

学校编码: 10384

学 号: 22320191151031

厦門大學

硕 士 学 位 论 文

中国海域绿海龟活动热点区域与西沙群岛产卵群体
遗传学和产卵场温度特征研究

Hotspot areas of green turtles in Chinese waters, and the
rookery genetics and temperature features of nesting
ground at Xisha Islands

宋稼豪

指导老师姓名: 刘敏教授

专业名称: 海洋生物学

论文提交日期: 2022年5月

论文答辩日期: 2022年5月

学位授予日期: 2022年6月

2022年6月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为刘敏教授课题组的研究成果，获得刘敏教授课题组经费或实验室的资助，在鱼类生物学实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

本人声明该学位论文不存在剽窃、抄袭等学术不端行为，并愿意承担因学术不端行为所带来的一切后果和法律责任。

声明人（签名）：宋榕豪

指导教师（签名）：刘敏

2022年6月9日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的涉密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不涉密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。涉密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：宋榕豪

2022年6月9日

摘 要

绿海龟 (*Chelonia mydas*) 是一种具有复杂迁移行为且对产卵场高度忠诚的海洋爬行动物。本论文通过三个方面对我国绿海龟活动热点区域以及最大产卵场进行深入研究:

第一部分是 2016 年-2022 年卫星定位跟踪的 20 只绿海龟的运动轨迹进行研究。通过 20 只绿海龟的一日一点轨迹图的叠加, 发现了点迹密集区域同已知的海草床位置高度重合, 表明了绿海龟的活动区域与觅食场有密切关系; 同时确认了中国海域绿海龟的活动热点区域, 包括北部湾的白龙尾岛及姑苏群岛附近海域、广东雷州半岛东西沿海及琼州海峡海域、西沙群岛永兴岛附近海域、广东惠东附近海域、东沙岛附近海域、福建莆田附近海域、台湾澎湖列岛、台湾岛北部海域、菲律宾卡巴莱特岛附近海域以及山东烟台北部附近海域等。根据活动热点区域的分布, 表明经过琼州海峡和台湾海峡, 西起广西、经广东、东至福建莆田的带状近岸海域是绿海龟的主要迁移廊道。通过位移-时间图像, 将 20 只绿海龟运动轨迹划分为 4 种不同的运动类型: 全程迁移型(I 型), 迁移后停留型(II 型), 迁移-停留-再迁移-再停留型(III 型) 及停留型(IV 型)。为 II 型、III 型和 IV 型的绿海龟建立了家域。具有家域的绿海龟在迁移段的游泳速度要明显大于停留段的游泳速度 ($p < 0.01$)。结合了水深、海洋表面温度 (SST)、海洋表层叶绿素 a 浓度 (Chl-a) 等遥感信息对绿海龟的轨迹进行进一步分析, 结果显示绿海龟更倾向于在水深小于 200 m 的海域活动, 且能适应的温度和叶绿素 a 浓度范围都较大。SST、Chl-a 和迁移直线指数 (MSI) 同绿海龟运动路径并无实质性关联。因此对海草床等绿海龟重要觅食地的细致调查相较于遥感信息将更有助于绿海龟活动范围的判定, 并可以为减少人类活动对绿海龟的影响提供必要的基础信息。

第二部分是西沙群岛绿海龟产卵群体遗传学的研究。于 2017 年-2019 年期间, 通过采集的 13 个绿海龟蛋窝内死蛋、死胚胎、死稚龟样品, 对线粒体 DNA (mtDNA) 控制区段 (control region) 的约 800 bp 序列进行分析, 共发现了 5 种单倍型: CmP18.1, CmP19.1, CmP20.1, CmP243.1 (即 CmP75.1 延长 83 bp 后的单倍型), CmP244.1。其中 CmP244.1 为新发现的单倍型。随后将序列长度截短至 384 bp, 并构建进化邻接树。结合构建结果及国际公认的进化分

支，证实 CmP18, CmP19 和 CmP243 属于进化分支 VIII，而 CmP20 及 CmP244 属于进化分支 III。由于来自西沙群岛的样品量少，在确定本研究与之前一项同来自西沙群岛的研究数据（16 个样品）进行检验无群体差异后，将 29 个样品数据结合以代表西沙群岛绿海龟产卵群体，再与周围印度洋-太平洋地区、日本地区的产卵群体进行对比。结果显示，西沙群岛的产卵群体与印度洋-太平洋地区、日本地区的产卵群体均具有显著性差异 ($p < 0.001$)，因此建议将西沙群岛产卵群体视为一个独立的管理单元进行保护。这将为今后政府的海龟保护工作提供科学依据。

第三部分是西沙群岛七连屿绿海龟产卵场的全年沙坑温度监测，以探讨全球气候变化对我国目前最大的绿海龟产卵群体的深远影响。于 2019 年 12 月将 30 个开启的温度记录仪分别埋放在西沙群岛七连屿（包括西沙洲、赵述岛、北岛、南岛、北沙洲、中沙洲、南沙洲）。温度记录仪埋入绿海龟蛋窝附近，沙坑平均深度约为 50 cm，每小时记录一次温度。温度记录仪于一年后（2020 年 12 月）寻回，寻回率为 73%。全年沙坑温度同气温呈显著正相关。北岛植被覆盖区的沙坑温度波动相较于裸露沙滩区缓和，而北沙洲由于植被面积小且稀疏，沙坑温度同气温的关系非常密切。七连屿的月降水量同区域内整体的沙坑温度月较差呈现显著正相关。通过对 2020 年七连屿的绿海龟上岸产卵具体日期进行分析，获得绿海龟产卵高峰期为 6 月-9 月，而北岛为蛋窝数最多的岛屿。由于绿海龟蛋的孵化温度决定了稚龟的性别，推测 2020 年海龟补充群体的雌性比例为 79.9%-92.6%，显著高于平衡的雌性比例（50%）。结果显示，在全球气候变化大趋势下，我国最大的绿海龟产卵场——西沙七连屿的绿海龟补充群体是以雌性为主。

关键词：绿海龟；活动热点区域；产卵场；管理单元；性比

Abstract

Green turtle (*Chelonia mydas*) is a species of marine reptiles with complex migration movement and high loyalty to their nesting grounds. The research studies its hot spot areas and nesting grounds in China by three parts:

The first part is to do the research for the movement tracks of 20 green turtles released from 2016 to 2022. Through the overlap of the daily-one-point track maps of 20 green turtles, it is found that the dense areas of the spot traces are highly coincident with the known positions of the seagrass beds, indicating that the green turtle's activity areas are closely related to the feeding ground; besides, it is confirmed the hotspots of green turtles in Chinese waters, including: the adjacent water of Dao Bach Long Vi and Co To Archipelago in Beibu Gulf, the east and west coasts of Leizhou Peninsula and Qiongzhou Strait, the water near Yongxing Island of Xisha Islands, the water around Huidong of Guangdong province, the water around Dongsha Island, the water near Putian in Fujian, the water around Penghu Islands of Taiwan province, northern water of the Taiwan Island, the water around Cabaleta Island of Phillipines., and the northern water of Yantai of Shandong province. According to the hot spot areas, it is identified the belt-shaped costal migration corridor from Guangxi in the west to Fujian in the east, through Guangdong, the Qiongzhou Strait and the Taiwan Strait. Through displacement-time images, the movement tracks were divided into 4 different movement types: Totally migration type (type I), Migration-Stay type (type II), Migration-Stay-Migration-Stay type (type III) and Totally stay type (type IV). Home ranges were established for type II, III and IV. For turtles with home ranges, their migration speeds are significantly greater than their home-range speeds ($p < 0.01$). This study also combined remote sensing data such as depth, sea surface temperature (SST), and ocean surface chlorophyll-a concentration (Chl-a) to analyze the trajectories of green turtles. The result shows green turtles prefer to move in the water with a depth less than 200 meters. The adaptable temperature and Chl-a ranges are large for them, and the values of SST, Chl-a and migration linear index (MSI) have no substantial correlation with the movement paths. Therefore, compared with remote sensing data, the careful investigation of important foraging grounds for green turtles such as seagrass beds can be more helpful to determine their activity range, and

can provide necessary basic information for reducing the impact of human activities on them.

The second part is about the population genetics study of the green turtle nesting ground in the Xisha Islands. By sampling dead eggs, dead embryos and dead hatchlings ($n = 13$) from 2017 to 2019, we analyzed about 800 bp segments of mitochondrial DNA control regions. Five haplotypes were found: CmP18.1, CmP19.1, CmP20.1, CmP243.1 (i.e.: 83-bp extended haplotype from CmP75.1), CmP244.1. Among them, CmP244.1 was discovered for the first time. Then the segments were truncated to 384 bp for building a Neighbor-Joining tree. According to the result and the internationally recognized clades, CmP18, CmP19 and CmP243 belong to clade VIII, while CmP20 and CmP244 belong to clade III. Because of the few samples, after confirming that there is no difference of data between the results of this study and a previous study from the Xisha Islands (16 samples), we regarded the 29 samples as a whole to represent the nesting population of Xisha Islands after showing homogeneity, and compared it with other rookeries in Indo-Pacific and Japan regions. The result showed significant differences ($p < 0.001$) with those rookeries, so the nesting population of the Xisha Islands can be regarded as an independent Management Unit (MU) for protection. This study will provide a scientific basis for subsequent government protection work for turtles.

The third part is the whole-year monitoring of the sand temperature of the green turtle nesting ground in Qilianyu cluster, Xisha Islands. The aim of this part is to explore the far-reaching impact of global climate change on the largest nesting ground of green turtle in China currently. 30 opened temperature recorders were buried at Qilianyu cluster (West Sand, Zhaoshu Island, North Island, South Island, North Sand, Middle Sand and South Sand) in December of 2019. The recorders were buried in the sand near the turtle nests, with an average depth of about 50 cm, recording the temperature per hour. The recorders were retrieved after about a year (December of 2020), and the recovery rate is 73%. The sand temperature is significantly positively correlated with air temperature, and the sand temperature fluctuation of the vegetation coverage area on North Island is more moderate than bare beach area. The sand temperature of North Sand is very close to the air temperature because of its sparse and small area vegetation. There is a significantly positive correlation between the monthly precipitation and the monthly sand temperature range of Qilianyu cluster.

The peak turtle nesting season is from June to September, while the North Island is the nesting island with the largest number of nests by the analysis of the nesting dates of green turtles in 2020. Because the incubation temperature can influence the sex of hatchlings, the speculative female percentage of hatchlings in 2020 is 79.9%-92.6%, which is significantly greater than balance female percentage (50%). The results show that the hatchlings of the largest green turtle nesting ground of China, Qilianyu of Xisha Islands, are dominated by females under the general trend of global climate change.

Key words: Green turtle; Hot spot area; Nesting ground; Management Unit; Sex ratio

目 录

摘 要	I
Abstract	III
第一章 序言	1
第二章 中国海域绿海龟迁移路径及活动热点分布	4
2.1 绪论	4
2.2 材料与方法	6
2.2.1 绿海龟来源	6
2.2.2 定位仪型号及设置	10
2.2.3 其它实验耗材	10
2.2.4 定位仪安装步骤	10
2.2.5 卫星定位数据获取、筛选、处理	12
2.2.6 迁移类型划分	12
2.2.7 数据分析	14
2.2.7.1 迁移直线指数 (MSI) 计算	14
2.2.7.2 活动热点分析	14
2.2.7.3 家域确定	14
2.2.7.4 水深、海洋表层温度 (SST) 及表层叶绿素 a (Chl-a) 浓度 数据分析	15
2.2.7.5 差异性比较	15
2.3 结果	16
2.3.1 20 只绿海龟运动轨迹	16
2.3.2 迁移类型	35
2.3.3 热点活动区域	40
2.3.4 追踪时段剖析	42
2.3.4.1 迁移直线指数	42
2.3.4.2 水深	43
2.3.4.3 SST 及 Chl-a	44

2.3.5 家域.....	46
2.3.6 II型和III型绿海龟轨迹分段特征.....	47
2.3.6.1 迁移段迁移直线指数.....	47
2.3.6.2 迁移段与停留段水深对比.....	48
2.3.6.3 迁移段及停留段游速对比.....	49
2.3.6.4 SST及Chl-a对比.....	49
2.4 讨论.....	50
2.4.1 海域绿海龟迁移特点.....	50
2.4.2 保护建议.....	53
第三章 西沙群岛绿海龟产卵群体遗传特征.....	55
3.1 绪论.....	55
3.2 材料与方法.....	57
3.2.1 取样.....	57
3.2.2 实验仪器及相关试剂.....	58
3.2.3 DNA提取实验步骤.....	60
3.2.4 DNA序列处理及识别.....	61
3.2.5 统计分析.....	61
3.3 结果.....	62
3.3.1 单倍型和进化分支.....	62
3.3.2 管理单元的建立.....	64
3.4 讨论.....	70
3.4.1 西沙群岛管理单元的特点.....	70
3.4.2 保护建议.....	72
第四章 西沙群岛绿海龟产卵场温度监测及孵化稚龟性比预测.....	74
4.1 绪论.....	74
4.2 材料与方法.....	77
4.2.1 材料.....	77
4.2.2 埋放准备.....	78
4.2.3 选址.....	78

4.2.4 埋放过程.....	79
4.2.5 记录仪寻回.....	81
4.2.6 绿海龟产卵记录.....	83
4.2.7 数据分析.....	83
4.2.7.1 数据处理及沙坑温度特征值计算.....	83
4.2.7.2 降水量同月较差的关系.....	84
4.2.7.3 气温-沙坑温度拟合及沙坑温度预测	84
4.2.7.4 孵化稚龟性比预测.....	84
4.3 结果.....	87
4.3.1 温度记录仪回收情况.....	87
4.3.2 沙坑温度同气候的关系.....	87
4.3.2.1 七连屿各岛屿沙坑温度年变化.....	87
4.3.2.2 降水量同沙坑温度的关系.....	91
4.3.2.3 沙坑温度同气温的关系.....	92
4.3.3 蛋窝记录及相关性比推算.....	95
4.3.3.1 2020 年全年蛋窝数分布.....	95
4.3.3.2 2020 年孵化稚龟性比推算.....	96
4.4 讨论.....	96
4.4.1 沙坑温度变化.....	96
4.4.2 降水影响.....	97
4.4.3 绿海龟稚龟性比及其趋势.....	98
4.4.4 保护策略.....	99
第五章 总结与展望	100
5.1 成果总结	100
5.2 特色与创新点	101
5.3 不足与展望	102
参考文献	103
攻读硕士学位期间发表的论文、撰写的报告以及参与的项目	116

致谢 117

Content

Abstract	I
Chapter 1 Preface	1
Chapter 2 Migration paths and hotspot distribution of green turtles in Chinese waters	4
2.1 Introduction	4
2.2 Materials and Methods	6
2.2.1 Green turtle resources	6
2.2.2 Transmitter models and settings.....	10
2.2.3 Other materials.....	10
2.2.4 Transmitter deployment	10
2.2.5 Data acceptance, filtering and processing.....	12
2.2.6 Migration type division.....	12
2.2.7 Data analysis	14
2.2.7.1 Calculation of Migration Straight Index (MSI)	14
2.2.7.2 Hotspot analysis	14
2.2.7.3 Home range determination.....	14
2.2.7.4 Depth, sea surface temperature (SST) and surface chlorophyll a (Chl-a) concentration analysis	15
2.2.7.5 Difference comparison.....	15
2.3 Results	16
2.3.1 Migration routes	16
2.3.2 Migration types	35
2.3.3 Hot spot areas.....	40
2.3.4 Discription of trackings.....	42
2.3.4.1 MSI	42
2.3.4.2 Depth.....	43
2.3.4.3 SST and Chl-a	44
2.3.5 Home ranges	46
2.3.6 Section features of type II and type III	47
2.3.6.1 MSI of migration part	47

2.3.6.2	Depth comparison between migration part and staying part ...	48
2.3.6.3	Velocity comparison between migration part and stop part	49
2.3.6.4	Comparison of SST and Chl-a	49
2.4	Discussion.....	50
2.4.1	Features of green turtle migration in Chinese waters	50
2.4.2	Protection suggestions	53
Chapter 3	Nesting population genetics of green turtles at Qilianyu cluster nesting ground	55
3.1	Introduction	55
3.2	Materials and Methods.....	57
3.2.1	Sampling	57
3.2.2	Equipments and medicines	58
3.2.3	DNA extraction steps	60
3.2.4	DNA sequence processing and identification	61
3.2.5	Statistical Analysis	61
3.3	Results	62
3.3.1	Haplotypes and clades.....	62
3.3.2	Management unit establishment	64
3.4	Discussion.....	70
3.4.1	Features of Xisha Islands Management Unit	70
3.4.2	Protection suggestions	72
Chapter 4	Temperature monitor and sex ratio prediction of green turtle hatchlings at Xisha Islands nesting ground.....	74
4.1	Introduction	74
4.2	Materials and Methods.....	77
4.2.1	Materials	77
4.2.2	Preparation before burying	78
4.2.3	Site selection	78
4.2.4	Burying process	79
4.2.5	Recorder recycling	81
4.2.6	Green turtle nesting record.....	83
4.2.7	Data analysis	83

4.2.7.1 Data processing and calculation of sand temperature eigenvalues	83
4.2.7.2 Relationship between precipitation and monthly range.....	84
4.2.7.3 Air temperature-sand temperature fitting and sand temperature prediction	84
4.2.7.4 Sex ratio prediction	84
4.3 Results	87
4.3.1 Overview of temperature recorder recycling	87
4.3.2 Relationship between sand temperature and climate	87
4.3.2.1 Annual sand temperature change of each island at Qilianyu cluster	87
4.3.2.2 Relationship between precipitation and sand temperature.....	91
4.3.2.3 Relationship between sand temperature and air temperature ..	92
4.3.3 Nesting records and sex ratio estimation	95
4.3.3.1 Green turtle nest distribution in 2020	95
4.3.3.2 Estimation of hatchling sex ratio in 2020	96
4.4 Discussion.....	96
4.4.1 Sand temperature change in Qilianyu cluster	96
4.4.2 Influence of precipitation.....	97
4.4.3 Sex ratio and its trend of Qilianyu cluster	98
4.4.4 Protection strategy and research direction	99
Chapter 5 Summary and Prospect.....	100
5.1 Summary of achievements	100
5.2 Features and innovation	101
5.3 Deficiency and prospect.....	102
Reference	103
Publication, Reports and Projects.....	116
Acknowledgements	117

第一章 序言

海龟是一类生活在海洋的爬行动物，全世界现存 7 种海龟，分属 2 科 6 属，它们分别是海龟科的红海龟 (*Caretta caretta*)、绿海龟 (*Chelonia mydas*)、玳瑁 (*Eretmochelys imbricata*)、肯普氏丽龟 (*Lepidochelys kempii*)、太平洋丽龟 (*Lepidochelys olivacea*)、平背龟 (*Natator depressus*)，以及棱皮龟科的棱皮龟 (*Dermochelys coriacea*)。1981 年，绿海龟被列为《濒危野生动植物种国际贸易公约》(The Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, CITES) 的附录 I，并在 2004 年被列入了世界自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 红色名录的“濒危”等级 (Seminoff 2004; https://cites.org/eng/gallery/species/reptile/green_turtle.html)，其国际商业贸易被严格限制。中国作为 CITES 的缔约国之一，对海龟保护一直非常重视。早在 1989 年就将中国海域出现的 5 种海龟 (红海龟、绿海龟、玳瑁、太平洋丽龟和棱皮龟) 列为了国家二级保护动物，又于 2021 年 1 月将 5 种海龟全部升级为国家一级保护动物 (www.forestry.gov.cn/html/main/main_5461/20210205122239482485322/file/20210205122347636743107.pdf)。除了必要的法律法规的保障，对于海龟的保护更需要相关生物学和生态学信息。

作为中国海域数量最多的海龟种类，绿海龟在中国同时拥有觅食场和产卵场，且存在着复杂的长距离迁移行为，而这三者也构成了海龟研究的重点及保护的核心。但是，觅食场实际位置与范围的不确定性以及迁移行为的复杂性都增大了绿海龟保护的难度。作为了解动物轨迹最直观且有效的手段，卫星定位追踪可以帮助人们更好的确定中国海域绿海龟的活动轨迹及运动范围，摸清活动热点区域，若再辅之以遥感的水文和生态等相关信息，可更好的揭示绿海龟活动规律，进而为未来保护区的划定提供科学依据。

中国仅有绿海龟的产卵场，现存的包括广东惠东、香港南丫岛、台湾周边岛屿如澎湖列岛万安岛、兰屿、小琉球以及南海的东沙岛、太平岛、西沙群岛等 (Chan et al. 2007)。中国的绿海龟产卵场面临着严重的退化，香港南丫岛的绿海龟产卵场已有数年没有海龟上岸产卵，广东惠东近几年的自然产卵窝数也

极少或无，而台湾周边岛屿的产卵规模也不大 (Ng et al. 2017; Ng & Matsuzawa 2021)。目前南海西沙群岛七连屿的绿海龟产卵场维持着每年 100 窝以上，已成为中国现存的最大的绿海龟产卵场 (Jia et al. 2019)。因此，开展中国西沙群岛绿海龟产卵群体遗传特征研究具有重要意义，摸清该产卵群体与周边国家和地区产卵群体的关联性才能有效的制定保护策略。

海龟的性别是由龟蛋孵化期的温度所决定，因此全球气候变化导致的温度升高将对未来海龟补充群体的性别比例产生深远的影响。西沙群岛作为中国最大的绿海龟产卵场，包括孵化温度在内的监测还没有开展，对自然条件下孵出的稚龟性比更是不得而知。因此开展西沙群岛绿海龟孵化温度的监测，预测补充群体的性比，将对衡量全球变暖趋势下中国绿海龟群体结构具有重要意义。

为丰富中国海域绿海龟的保护生物学研究以及提升中国海域的综合保护水平，本论文开展以下三个方面的研究：

(1) 通过对中国海域绿海龟的卫星定位追踪，掌握其迁移路径和分布区域，分析其热点活动区域和觅食场，并结合环境生态参数（水深、表层海水温度、表层叶绿素 a 浓度），对绿海龟迁移路线和规律以及觅食场选择进行分析，为今后保护区的划定以及减少人类活动影响提供科学依据；

(2) 通过对西沙群岛绿海龟产卵群体的样品进行遗传学分析，确定该产卵群体的单倍型类型，并以此为基础分析并判断该群体同周边地区和国家产卵群体之间的关系，从而为我国制定联动性或针对性的保护措施提供理论基础。

(3) 通过监测西沙群岛七连屿产卵场的全年沙坑温度，了解该地区产卵环境月变化趋势，得出沙坑温度同气温之间的关系，以及影响这二者关系的相关因素；并通过七连屿月蛋窝数据分析，确定该产卵场的产卵高峰期及集中产卵的岛屿，通过结合沙坑温度数据推测 2020 年绿海龟孵化稚龟的性比，以此衡量全球气候变化对该产卵群体未来的影响。

本论文的技术路线图如下：

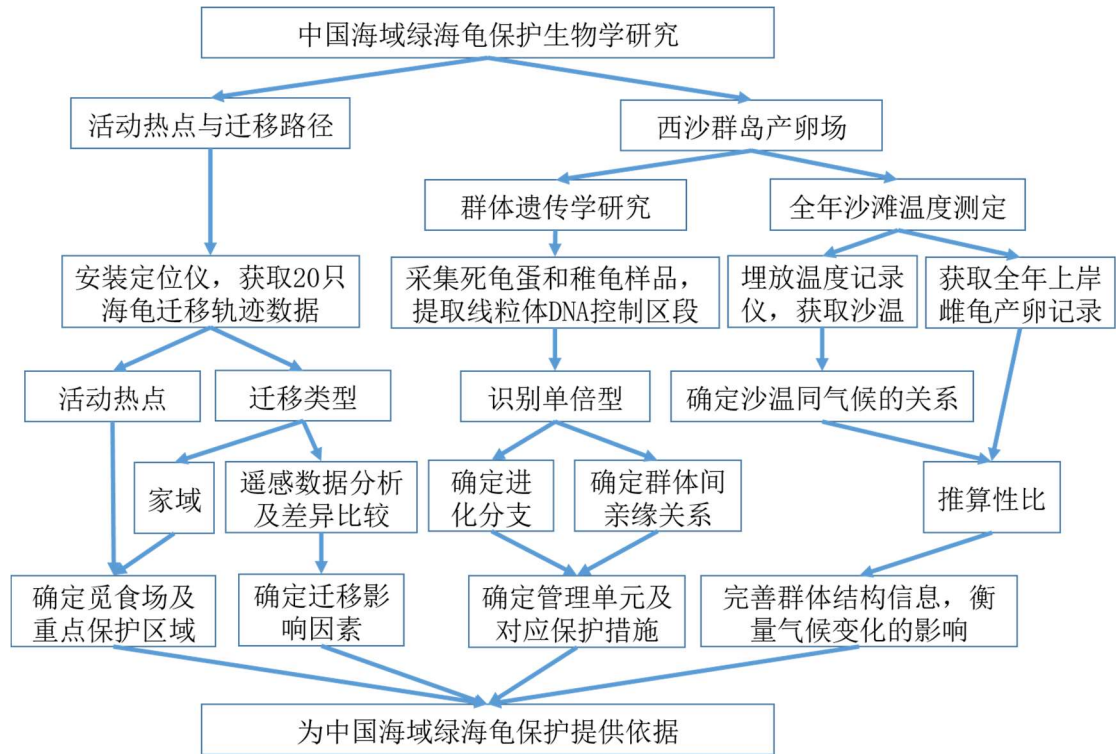


图 1-1 技术路线图

Table 1-1 Technology Roadmap

第二章 中国海域绿海龟迁移路径及活动热点分布

2.1 绪论

绿海龟 (*Chelonia mydas*) 是一种在全球热带及亚热带海域广泛分布的迁移性爬行动物, 成年绿海龟通常会往返于产卵场和觅食场, 在赴产卵场的途中或在产卵场附近海域或在较为特定的海域进行交配 (Carr 1965; Balazs 1980; Limpus 1993; Hirth 1997; Cheng et al. 2008)。与此同时, 绿海龟对于它们的产卵场有着很高的忠诚度, 而目前为止保持这一忠诚度的内在机制仍尚未被完全揭秘 (Hamann et al. 2003)。绿海龟的生长发育伴随着食性的转变 (Bjorndal 1980)。幼年绿海龟偏向于杂食性及肉食性, 而成年或亚成年绿海龟则以摄食海草和海藻等植物性食物为主 (Mortimer 1981)。虽然觅食场 (即海草床、海藻床、珊瑚礁) 区域相对固定, 但是, 海龟觅食场与产卵场之间的对应关系并不唯一, 也就是说一个觅食场的众多绿海龟可能来源于多个产卵场的海龟, 而到相同产卵场产卵的雌龟同样有可能分别去往不同的觅食场 (Song et al. 2002; Nishizawa et al. 2014; Gaillard et al. 2021)。错综复杂的对应关系也就增大了绿海龟保护的难度, 只有通过大量的野外观察及追踪活动轨迹数据的分析才有可能进一步揭示不同绿海龟群体的觅食场位置、主要洄游廊道以及产卵场和觅食场之间的对应关系。

卫星定位仪自发明之时便被视为追踪海龟活动区域及范围的有效方法之一。由于卫星定位仪安装的简易性, 定位数据的实时性和准确性以及对于海龟的零伤害, 使人们可以借助卫星定位追踪动态了解海龟的位置, 从而判断其运动规律, 如果结合迁移路径的海洋学要素等信息, 可以更好的了解海龟的生存环境和行为模式, 提出科学的海龟保护方案 (Collecte Localisation Satellites, 2008; Seminoff et al. 2008; Witt et al. 2010)。

活动热点区域是指动物集中活动的区域范围。通过对于活动热点的研究, 研究人员可以掌握动物个体或群体因觅食、繁殖等活动而集中逗留的地点, 从而为后续分析动物停留原因, 划定动物活动范围, 以及保护区建立等相应保护工作提供依据。家域 (Home Range) 可被视为一种特殊的活动热点, 同时对于家域的研

究也是划定野生动物主要活动区域的一种重要方法。家域通常是根据单只动物的活动轨迹进行确定，因而相对于一般的活动热点范围较小。通过对于尽可能多的海龟家域进行综合分析，可以判断海龟觅食场的位置、产卵场的位置和产卵间期的活动范围等，从而为保护区的划定以及减少人类活动的干扰提供指导依据（Casale et al. 2012; Gaos et al. 2012; Ng et al. 2018）。而家域的划定一般通过构筑最小凸多边形（Minimum Convex Polygon, MCP）或核密度分析（Kernel Density Estimate, KDE）两种方法（Gregory 2017）。MCP 法的特点是十分直观，且能够完整覆盖所有动物出现的位置；但缺点在于这种边界的划定过于灵敏且无法表现动物集中分布区域的权重以及 MCP 覆盖区域内的精细结构，有时造成单个活动点迹的出现即可让划定的区域极度扩张（Hooge et al. 1999; Seminoff et al. 2002; Gregory 2017）。相比之下，KDE 法的应用则更为广泛，由于其边界由曲线划定，因此所确定的边界可以向计算后得出的利用密度较高的区域进行弯曲，从而更准确的表现区域的利用情况（Worton 1989）。

国外应用家域判断绿海龟活动区域的研究已经展开。例如，通过利用率分布（Utilization Distribution, UD）为 50% 的 KDE 法分析了在美国佛罗里达州的 Sanible Island 和 Keewaydin Island 附近活动的 14 只绿海龟的核心驻留区域（core use resident areas），得到了平均面积为 296 km² 的核心区域（Sloan et al. 2022）。通过对美国洛杉矶湾觅食场的 12 只绿海龟进行卫星定位追踪，根据活动轨迹并通过 MCP 和 KDE 法分析，分别得到了平均 1.66 km² 和 1.54 km² 的觅食区域范围，为觅食场重点保护区域的大小和位置的确定提供了科学依据（Seminoff et al. 2002）。我国对于海龟家域的研究相对较少。Ng et al. (2018) 对我国海域 28 只误捕、搁浅或产卵的绿海龟进行卫星定位跟踪，并通过 MCP 和 KDE 的家域计算方法获得了 12 处位于香港东部、福建近岸、海南岛、东沙岛、台湾岛、菲律宾吕宋岛、菲律宾巴拉望岛、越南白龙尾岛、日本西表岛等地附近海域的觅食场家域，以及 3 处位于香港南丫岛附近的产卵间期家域。

卫星遥感信息覆盖面广且分辨率高、精度可靠，可为全球任意地区的海洋动物迁移研究提供全面详实的海洋学要素支撑。作为高忠诚度的典型类群，海龟的迁移具有很强的目的性（Hamann et al. 2003），但一些海洋学要素仍有可能对海龟具体的迁移路线或者觅食场的选择造成影响（McCarthy et al. 2010; Valverde-

Cantillo et al. 2019; Sandoval-Lugo et al. 2020)。例如，红海龟 (*Caretta caretta*) 在迁移过程中的直线指数 (Straight Index, SI) 同表层叶绿素 a 浓度 (Chl-a) 成显著负相关，而与海表温度值 (Sea Surface Temperature, SST)、水深等参量成显著正相关，这表明红海龟在迁移过程中对于高 Chl-a、低水深、低水温条件的偏好 (McCarthy et al. 2010)。同样，通过提取红海龟迁移路径上的 SST 和 Chl-a 证明了红海龟的觅食活动倾向于在 Chl-a 较高的环境下进行 (Sandoval-Lugo et al. 2020)。由于 SST 和 Chl-a 同初级生产力之间的密切关系，肉食性的红海龟同相关海洋学因素有着较好的相关性 (Barceló et al., 2013; Sandoval-Lugo et al. 2020)。对于绿海龟，相关方面的研究还相对较少。通过探测绿海龟觅食场的 SST 与 Chl-a，表明在哥斯达黎加产卵的绿海龟的蛋窝丰度 (Nesting Abundance) 同进入产卵场前所处觅食场的 Chl-a 显著正相关，而产卵间期时长 (Observed Internesting Period, OIP) 同产卵间期雌海龟栖息地的 SST 则成负相关且有着较大的年内和年际波动 (Valverde-Cantillo et al. 2019)。

绿海龟作为易受人类活动干扰的濒危物种，近海开发、船运活动、海洋污染以及产卵场、觅食场等重要栖息地破坏等因素都在威胁着它们的生存。本研究旨在 (1) 通过 2016 年至 2022 年在中国海域不同地点放归的 20 只安装卫星定位仪的绿海龟运动轨迹点的提取和叠加，确定活动热点区域；(2) 对有长期停留点的绿海龟个体进行家域范围计算和划定，从而确定其重点活动区域；(3) 通过提取运动轨迹经过点的卫星遥感数据 (水深、Chl-a 及 SST)，分析绿海龟活动所偏好水域深度以及能适应的 SST 和 Chl-a 范围，判断这些因素对于迁移路线及觅食场选择的潜在作用和影响；(4) 为今后保护区的划定以及减少人类活动对于绿海龟的影响提供建议。

2.2 材料与方法

2.2.1 绿海龟来源

本研究收集了 20 只安装卫星定位仪并放归的绿海龟轨迹数据，包括：本研究期间的 7 只 (2019 年-2022 年)、同研究团队数据未分析的 8 只 (2016 年-2019 年)、全国水生野生动物保护分会提供的 5 只 (2018 年-2019 年) (表 2-1)。20 只

绿海龟的主要来源是水族馆饲养、渔民误捕及执法机关查没（表 2-1）。在安装定位仪前，先由相关专业人员确定其具备野外生存能力，且体表无外伤、游动正常、个体较大。

根据一项长达 37 年的统计研究结果，美国佛罗里达州 Archie Carr 自然保护区内产卵绿海龟的最小成熟直线背甲长（SCL）为 81.4 cm，据公式（ $CCL = -0.414 + 1.039 * SCL$ ）推算约为曲线背甲长（CCL）84.2 cm（Bjorndal & Bolten 1989; Phillips et al. 2021），亚成年龟的 CCL 一般在 67-84 cm 的范围内（Ng et al. 2018），而位于我国西沙群岛七连屿的产卵雌龟的最小 CCL 是 91 cm（贾语嫣，2019），因此本研究的 20 只卫星定位追踪的绿海龟，大部分属于成龟或者亚成龟。

表 2-1 卫星定位追踪的 20 只绿海龟基础信息

Table 2-1 Basic information of the 20 satellite tracked green turtles

序号	编号	来源	放归地点	个体基本信息			数据来源
				曲线背甲长 (cm)	曲线背甲宽 (cm)	体质量 (kg)	
1	#34513	天津海洋馆	山东省烟台市	85.5	77.5	—	本研究
2	#34514	蓬莱极地馆	山东省烟台市	96.0	91.0	—	本研究
3	#182154	渔民误捕于北部湾	广西省北海市	92.0	92.0	103.25	本研究
4	#182155	渔民误捕于北部湾	广西省北海市	82.5	76.0	63.00	本研究
5	#67827	三亚极地馆	海南省陵水县	73.5	65.2	—	本研究
6	#198937	渔民误捕于湛江海域	广东省湛江市	92.5	81.5	93.32	本研究
7	#198938	渔民误捕于湛江海域	广东省湛江市	85.0	74.0	64.29	本研究
8	#162711	天津海洋馆	福建省厦门市	66.0	57.5	—	贾语嫣, 2019
9	#162712	天津海洋馆	福建省厦门市	61.5	54.0	—	贾语嫣, 2019
10	#162714	渔民误捕于台湾海峡	福建省漳州市	78.0	76.0	53.6	贾语嫣, 2019
11	#162715	渔民误捕于台湾海峡	福建省厦门市	56.5	50.5	23.28	贾语嫣, 2019
12	#162716	渔民误捕于台湾海峡	福建省厦门市	53.5	48.5	19.22	贾语嫣, 2019

第二章 中国海域绿海龟迁移路径及活动热点分布

13	#162723	渔民误捕于北海海域	广西省北海市	81.0	75.5	63.1	贾语嫣, 2019
14	#153329	渔民误捕于台湾海峡	福建省漳州市	89.0	79.5	—	贾语嫣, 2019
15	#153330	渔民误捕于台湾海峡	福建省漳州市	87.0	78.0	70.5	贾语嫣, 2019
16	#34470	执法机关查没	海南省三亚市	74.0	66.0	51.6	全国水野分会
17	#34474	执法机关查没	海南省三亚市	63.0	54.0	24.4	全国水野分会
18	#34452	执法机关查没	广东省惠州市	86.5	78.5	—	全国水野分会
19	#162719	执法机关查没	广东省惠州市	—	—	—	全国水野分会
20	#162722	执法机关查没	广东省惠州市	—	—	—	全国水野分会

2.2.2 定位仪型号及设置

放流海龟安装的定位仪分别为美国 Wildlife Computers 公司所生产的 SPOT-287C 和 SPOT-352B 型、美国 Telonics 公司生产的 K2G-576A 型以及新西兰 Sirtrack 公司所生产的 TAM-2640 型定位仪。生产厂家会根据定位仪安装动物的特性设置定位仪信号发射间隔等一些内部参数（如 Wildlife Computers 公司会将定位仪的信号发射模式设置为适合海龟的频率，15 秒发射一次信号）。Wildlife Computers 公司的用户还可以通过该公司所开发的 Tag Agent 软件通过电脑自行设置定位仪参数，设置的内容主要包括发射次数、发射模式、温度记录方式以及开关方式等信息。具体的设置信息还需按照跟踪海龟的实际情况进行判断，例如可根据海龟放归海域过顶卫星的经过情况设置发报模式，尽可能使信号的传送与接收相同步，从而提升通信效率。

2.2.3 其它实验耗材

环氧树脂 AB 胶（5 Minute Exopy）（美国 Devcon 公司），EA-3463 双组份环氧金属修补剂（美国 Loctite 公司），AB 胶枪（美国 Devcon 公司），玻璃纤维布，AB 胶混合枪头，砂纸（粒径为 P150 和 P36），水彩毛刷，木棍，卷尺，纸胶带，硅胶，封口塞，一次性手套，钢签及钢签钳，剪刀，酒精，碘酒等。

2.2.4 定位仪安装步骤

本研究采用 Balazs et al. (1996) 的方法安装卫星定位仪。其过程如下：

（1）记录。在安装前首先用卷尺测量海龟的 CCL 及曲线背甲宽（CCW），并做好记录。如条件允许，也获取体质量的相关信息。

（2）打磨。用一湿毛巾覆盖在海龟头部，遮住海龟视线并露出鼻孔以降低海龟的焦躁情绪。使用粗砂纸将龟背甲的第二椎盾处进行打磨以去除龟甲表面附着的藻类及污渍，再用细砂纸对打磨处进行进一步打磨从而将该处尽可能变得光滑，随后我们使用无水乙醇对打磨处进行冲洗，等待其自然晾干。

（3）剪裁。按照定位仪的大小剪裁玻璃纤维布以作为定位仪黏着的基底，该基底的长宽均应宽于定位仪本身长度 3 cm 左右（约为 2 手指宽）。由于玻璃纤维布本身易离散，剪裁时应顺着布本身编织的纹理进行剪裁，避免斜向剪裁导致

线条脱落。剪完后小心将剪好的玻璃纤维布放到一旁，等待后续黏着。

(4) 封口。将定位仪底座的保护膜撕下，并将合适大小的纸胶带粘在机身的两个电极上以避免后续操作不慎被 AB 胶误抹。用针筒将液体硅胶注入机身的数据接口，并用橡胶塞将数据接口进行封闭，擦去溢出堵塞口的多余硅胶。

(5) 浸胶。在龟背甲冲洗处晾干后，采用快速点胶技术（夏中荣等，2012）利用 AB 胶混合枪头将 AB 胶混匀，并将混合胶挤压在打磨处，面积应与剪下的玻璃纤维布面积相同，随后用水彩毛刷将挤出的胶涂抹均匀，涂抹后的胶覆盖面积应略大于玻璃纤维布的面积。将玻璃纤维布小心平铺在涂抹好的胶面上，平铺时要尽可能保证布的四周均浸没在胶内，且不留空气。用小木棍对浸没在胶中的玻璃纤维基底进行反复按压以保证排出缝隙间的空气，并保证 AB 胶可以充分且完全浸润玻璃纤维基底。

(6) 黏着。将定位仪底座水平放置在完全透胶的玻璃纤维基底上，放置方向应保证有天线一侧朝向海龟头部。随后切下适量大小的固体双组份环氧修补剂进行揉捏，使其中的两组分充分混合，直至揉捏出的修补剂呈现相同颜色即可。将捏好的修补剂塞到定位仪与基底面的接缝四周，并按压修补剂使其将两者之间的缝隙填满，而且要保证修补剂外侧面呈平滑倾斜坡面，从而使得龟背-修补剂-定位仪三者呈现流线型。等待修补剂和 AB 胶完全固化后再开始下一步操作。

(7) 固定。在定位仪顶面四周、两电极之间及修补剂上方用 AB 胶黏附固定的玻璃纤维布条，布条的宽度依据定位仪的形状而定，但黏附时应注意纵横交错且要完全覆盖机体边缘及修补剂表面，通常对机体进行两层加固。

(8) 晾干。在加固完成后等待 AB 胶完全固化。安装良好的定位仪玻璃纤维基底边缘应紧密贴合海龟背甲且无翘起，覆盖有玻璃纤维布条的机体表面应呈现透明色。通常晾干时间需等待 2-3 小时，在完全固化后将粘贴在电极上的纸胶带撕去从而露出电极，并可用磁铁靠近两电极进行检测，若定位仪内部 LED 灯闪烁 3 下并长亮 3 秒后熄灭，则证明定位仪以处于“Auto-Start”模式，入水即可启动。

(9) 打签。用钢签钳给海龟的左前肢打上钢签，以便日后识别。

2.2.5 卫星定位数据获取、筛选、处理

卫星定位追踪的数据通过登录 Argos (<https://argos-system.clsamerica.com/>) 或 Wildlife Computer (<https://my.wildlifecomputers.com/>) 官方网站进行下载。下载后的数据按照信号等级进行筛选。信号共分 7 个不同的等级, 分别代表不同的信号精度, 按照从高到低的排列分别是 3, 2, 1, 0, A, B, Z。其中精度“3”的距离估算在 250 米以内, “2”为 250-500 米, “1”为 500-1500 米, “0”为 1500 米以上, “A”和“B”为无法估算具体误差范围, 而“Z”为无效位置 (Collecte Localisation Satellites 2008)。

通常来说, 精度等级越高, 信号点就越少。所获得的卫星定位追踪数据无法保证每天都能发回高精度的数据点, 但为了保证每天的运动轨迹都可以兼顾, 本研究会尽可能选取精度较高、误差范围较小的信号点 (3、2、1、0), 如果没有, 等级“A”和“B”的信号点同样可以接受。具体筛选标准如下 (Zbinden et al. 2008):

(1) 对于已有数据, 除当日无坐标点信号返回, 尽可能每日选取一个精度最高的坐标点代表该日海龟所在位置, 精度除“Z”外均可纳入考虑范围;

(2) 若出现相同最高精度等级的不同坐标点, 则选取最接近 UTC 12:00 的坐标点;

(3) 将选取好的坐标点放入 Google Earth Pro 软件中大致确定各坐标点的位置, 舍弃出现在陆地上的坐标点, 并依照上述筛选标准重新选点, 若该日无其它坐标点, 则将点移动至离现有坐标点最近的海域并记录经纬度坐标;

(4) 计算相邻两坐标点之间的运动速度, 若海龟行进速度大于 5 km/h, 则通过观察舍弃两个坐标点中与其它坐标相差较大的一个, 并按照上述筛选原则重新选点。坐标点筛选完毕后将筛选完的坐标点绘制成轨迹图。若轨迹有横跨岛屿或陆地的部分, 对于横跨面积较小的陆地部分不再做处理, 相反则可根据海龟的行进路线在必经之路上增加 1-2 个坐标点, 并通过计算坐标点同前后的距离按照相应比例增加时间点, 从而更好的模拟海龟的运动路线。

2.2.6 迁移类型划分

本研究按照上述标准提取了每只海龟追踪时段“一日一点”的数据集, 并通过在线 Maptool 绘图工具 (<http://www.seaturtle.org/maptool/#>) 绘制成“一日一点

图”。而后续的数据分析及相关遥感数据的提取也均以此数据集作为基础。

每只海龟具有各自的运动特点，为了将不同的运动类型进行划分归类，本研究根据海龟的运动时间和位移（从出发点到各个坐标点之间的直线距离）通过 Matlab 2021a 绘制了位移-时间图像（Seminoff et al. 2008; Hawkes et al. 2011），并以此确定海龟运动特征，划分不同的海龟迁移类型（表 2-2）。在此共将绿海龟的迁移类型划分为四种。

表 2-2 迁移类型划分及定义

Table 2-2 Division and definition of migration type

类型	特征定义
I 型 (全程迁移型)	从放流开始便一直在进行迁移运动，从轨迹开始记录至终止之时，位移呈逐渐增大的趋势且无长于 30 日的长时间停留，追踪过程中始终未到达其停留区域。
II 型 (迁移后停留型)	在进行一段时间迁移后，海龟到达其停留区域并在该停留地附近进行较小空间范围内的长期（通常为 30 天以上）的、低速的、折线型的游动，信号传输终止之时一般位于停留区域内或未到达第二个目的地。全程可划分为迁移段和停留段。
III 型 (迁移-停留-再迁移-再停留型)	存在至少 2 个停留区域，海龟到达停留区域后均在附近进行较小空间范围内的长期（通常为 30 天以上）的、低速的、折线型的游动。停留区域之间的最短距离均大于 50 公里。从放归点到几个停留地之间都存在目的性的迁移运动过程。全程可划分为迁移段和停留段。
IV 型 (停留型)	放归点即在停留地附近，海龟一直在放归点附近进行低速折线式运动，时长达 30 天以上。

2.2.7 数据分析

2.2.7.1 迁移直线指数 (MSI) 计算

为了衡量追踪时段海龟运动的曲折程度，本研究引入了迁移直线指数 (Migration Straight Index, MSI) 来表征海龟的实际运动情况 (Batschelet et al. 1981; Luschi et al. 1998; Sandoval-Lugo et al. 2020)。

迁移直线指数 (MSI) = 起点与终点间的最短距离 / 实际运动路程之和

该指数的变化范围为 0-1, 越接近 1 则表明海龟的运动路径越接近一条直线, 越接近 0 则表明其路径越曲折。

在一般情况下, 起点与终点间的最短距离为两者之间的连线, 但实际上两点之间的直线常会经过陆地, 因此需要考虑陆地部分阻隔所产生的额外距离 (Foley et al. 2013)。本研究利用 ArcGIS 10.8 对有陆地阻隔的路线进行最小成本路径计算, 具体方法为: 首先用 Euclidean Distance 工具将陆地视为“barrier”进行计算, 然后将输出的“barrier”导入 Cost Path As Polyline 工具中绘制最短路径并计算出两点间的最短距离。

2.2.7.2 活动热点分析

将卫星定位追踪 20 只海龟的筛选后全部位置坐标进行了核密度分析, 以确定我国绿海龟分布的热点区域。运用 ArcGIS 10.8 工具箱中的核密度分析功能对栅格内点迹多于 5 个的区域分析, 随后使用 Natural Breaks 法将点迹密度按照不同颜色色块进行划分, 根据点迹分布按照蓝色-紫色-红色-黄色的顺序表示密度的递增, 以表示海龟整体的活动范围; 随后去除栅格内点迹少于 20 个的区域, 其它区域根据点迹分布按照紫色-红色-黄色的顺序表示密度的递增, 以表示海龟的活动热点。此外, 根据 Sudo & Nakaoka (2019) 和郑凤英等 (2013) 的文献记录, 将中国及东南亚地区的海草床分布点导入图内, 从而衡量海草床同绿海龟分布热点区域的重合程度并判断它们之间的关系。

2.2.7.3 家域确定

通过上述 20 只海龟卫星定位追踪的绘制的位移-时间图像以及对应的位移值, 选择图像上位移长时间 (30 天及以上) 未发生大变化的“水平”区段 (即该

区段的所有位移数值极差不超过 50 km)，并根据原始坐标数据找出进出的时段和对应坐标集，进行后续分析。

利用 ArcGis 10.8 中的 Home Range Tool 2.0 插件，对上述筛选出的坐标集根据不同个体进行核密度分析 (KDE)，选用 Least Squares Cross Validation (LSCV) 法计算核心区域的 Smoothing parameter (h)，将利用率分布 (UD) 的等值线分别设定为 50% 和 95%，分别表示家域核心区以及整体家域范围，并计算两者的面积。

2.2.7.4 水深、海洋表层温度 (SST) 及表层叶绿素 a (Chl-a) 浓度数据分析

本研究将追踪时段绿海龟的运动轨迹同各坐标点所对应的相关遥感水深、SST 及 Chl-a 等数据进行分析 (表 2-3)。根据每条运动轨迹上的点坐标，相应遥感数据的具体数值通过 Matlab 2021a 被分别提取出来，用以分析海龟在不同位置的环境参量。

表 2-3 遥感数据下载网址及相关信息

Table 2-3 Webs for remote sensing data download and relative information

参量	环境传感器	空间分辨率	间隔时长	下载网站
水深	ETOPO	1'	—	https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/
SST	MODIS	4 km	1 个月	https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/13/
Chl-a	MODIS	4 km	1 个月	https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/13/

2.2.7.5 差异性比较

根据位移-时间图像将绿海龟迁移路径划分为不同类型 (表 2-2) 后，对 II 型及 III 型海龟的全程运动轨迹拆分为迁移段和停留段，进行如下分析：

- (1) 迁移段 MSI 与全程 MSI 的成对样本 t-检验分析；

- (2) 迁移段 MSI 同 I 型迁移段（全程）MSI 的独立样本 t-检验分析；
 - (3) 对迁移段和停留段的运动速度、遥感特征值的水深、SST 以及 Chl-a 分别进行成对 t-检验分析；
 - (4) 迁移段特征值与遥感特征值的皮尔逊相关性分析。
- 以上分析均通过 SPSS 25 完成。

2.3 结果

2.3.1 20 只绿海龟运动轨迹

20 只绿海龟在追踪时段的运动路径可见图 2-1 到图 2-20。

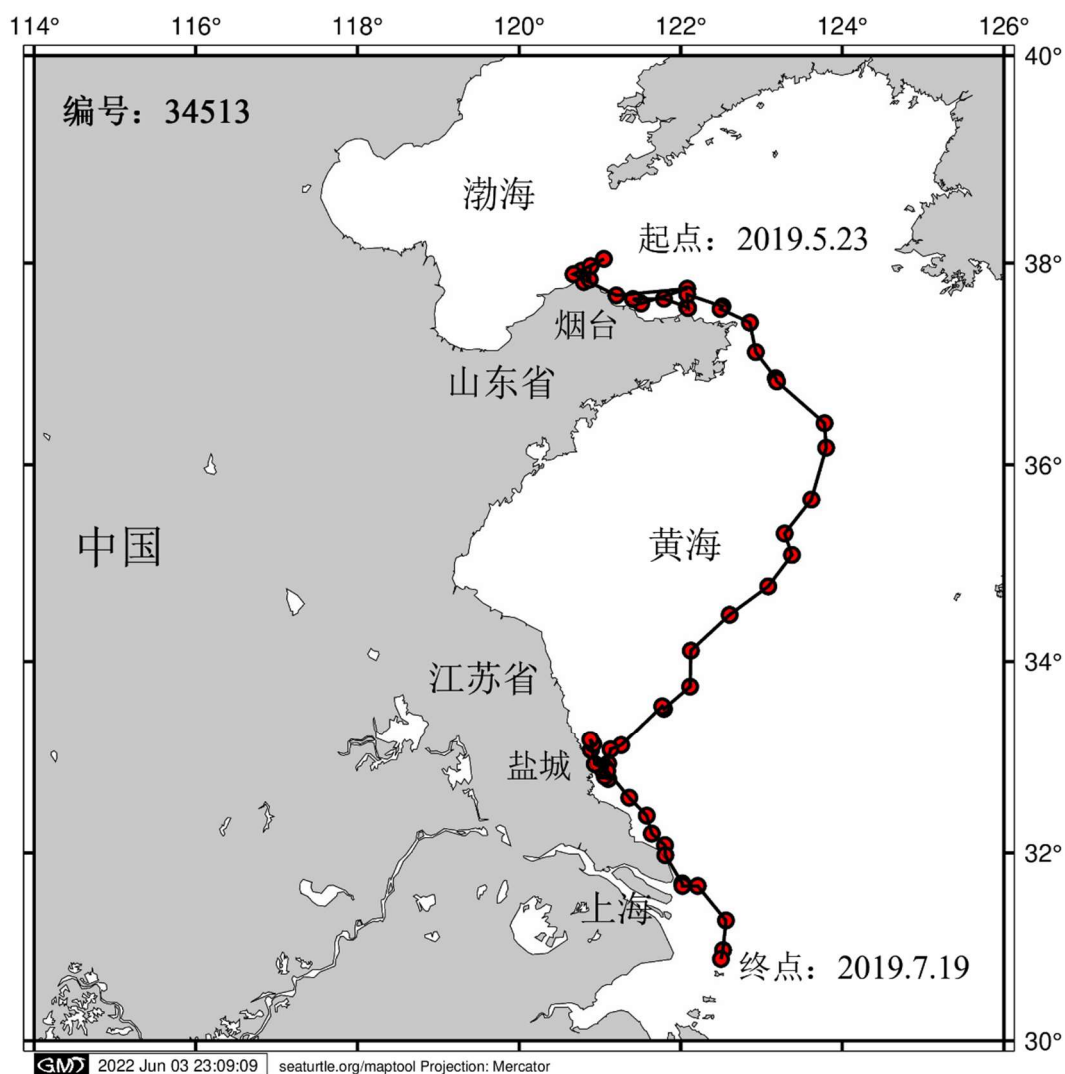


图 2-1 编号 34513 绿海龟运动路径（57 天）

Fig. 2-1 Movement route of No. 34513 green turtle (57 days)

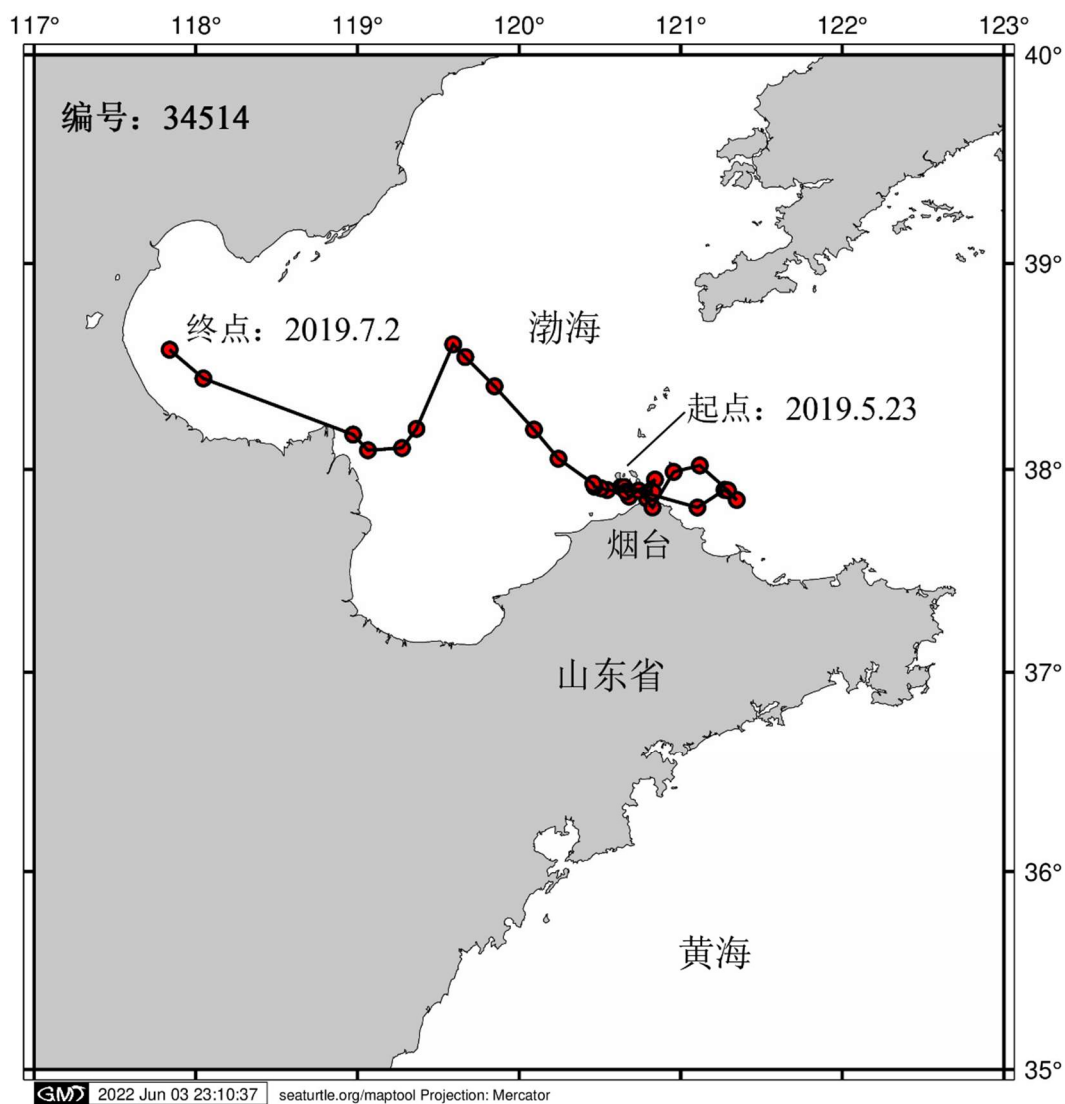


图 2-2 编号 34514 绿海龟运动路径 (40 天)

Fig. 2-2 Movement route of No. 34514 green turtle (40 days)

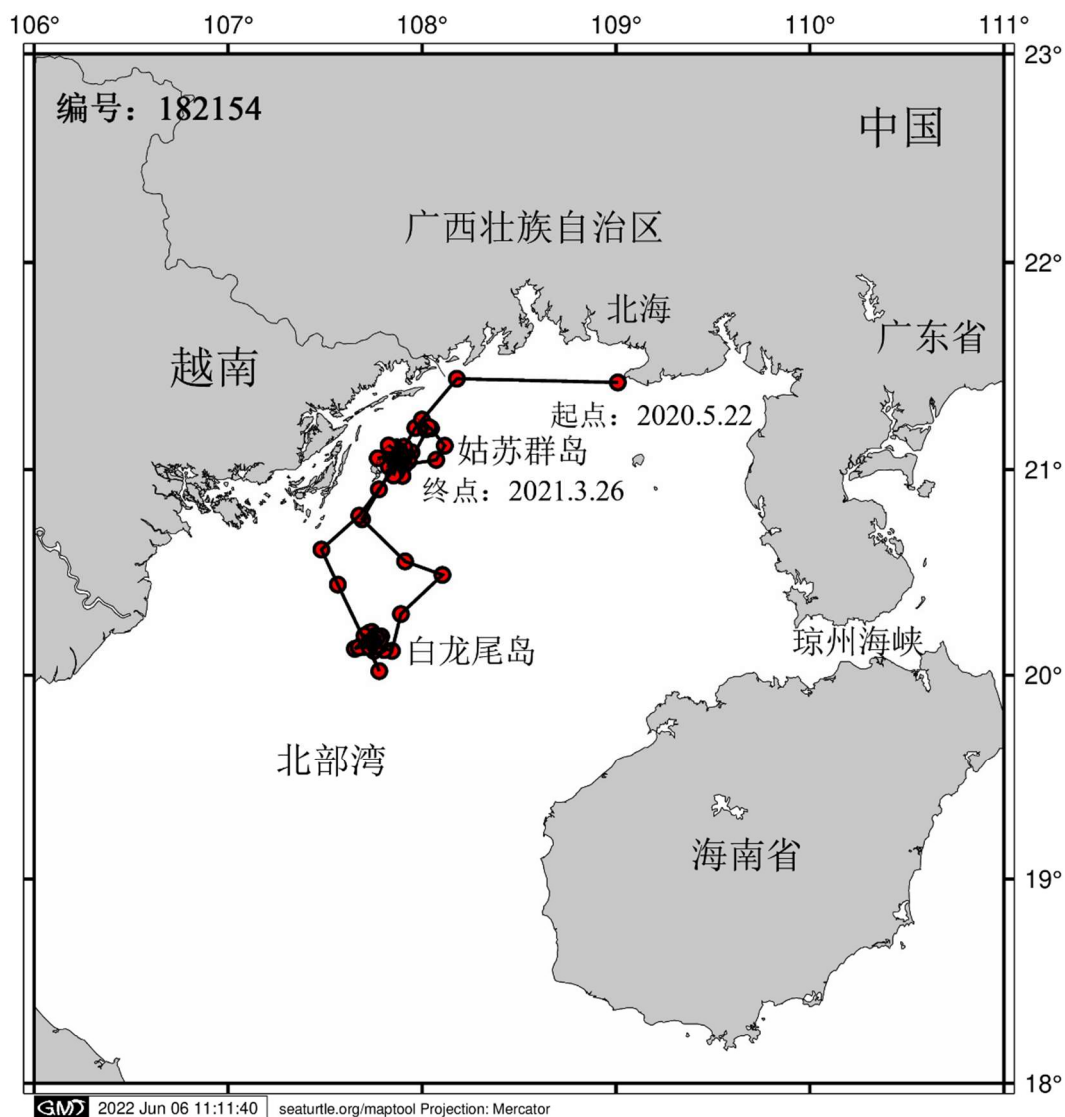


图 2-3 编号 182154 绿海龟运动路径 (308 天)

Fig. 2-3 Movement route of No. 182154 green turtle (308 days)

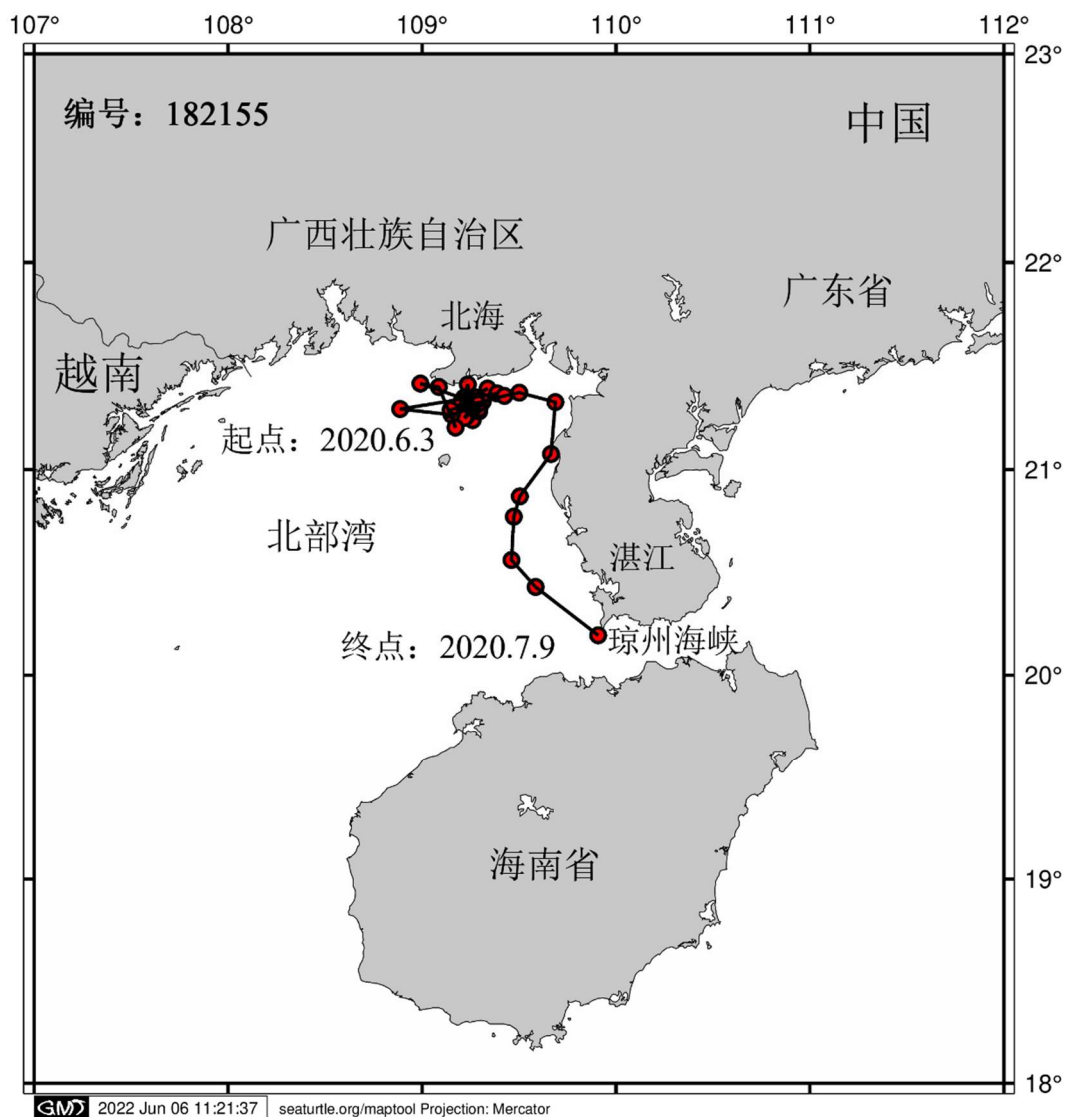


图 2-4 编号 182155 绿海龟运动路径 (36 天)

Fig. 2-4 Movement route of No. 182155 green turtle (36 days)

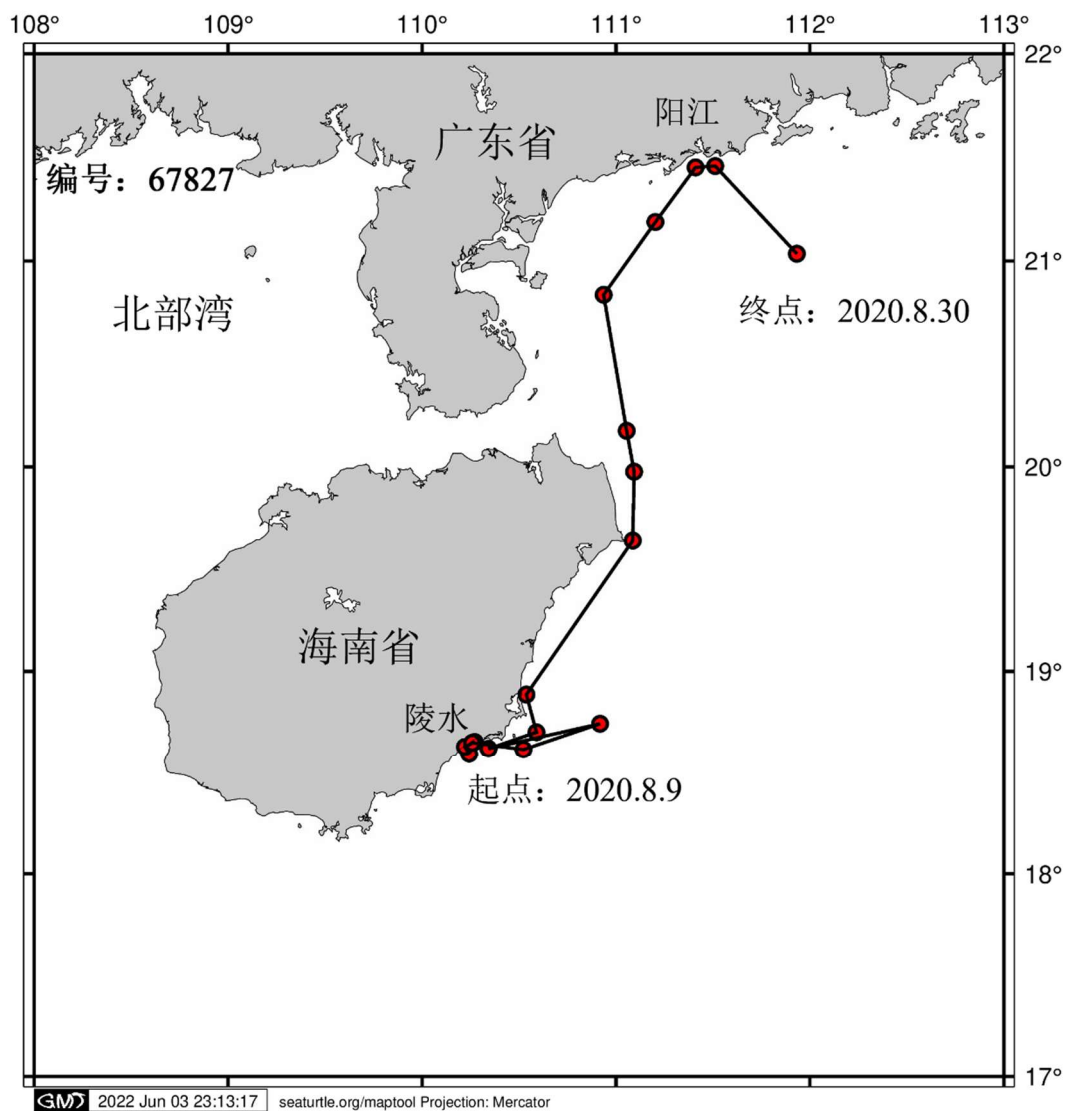


图 2-5 编号 67827 绿海龟运动路径 (21 天)

Fig. 2-5 Movement route of No. 67827 green turtle (21 days)

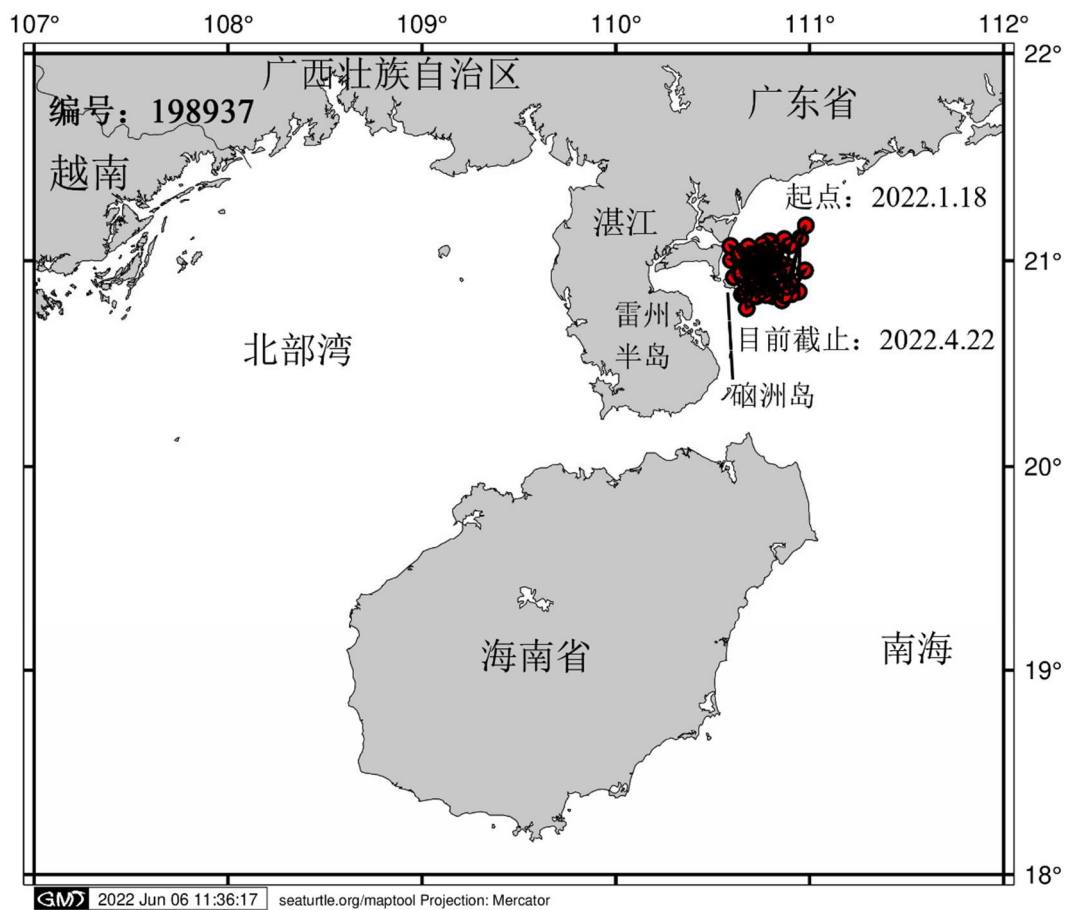


图 2-6 编号 198937 绿海龟运动路径 (94 天)

Fig. 2-6 Movement route of No. 198937 green turtle (94 days)

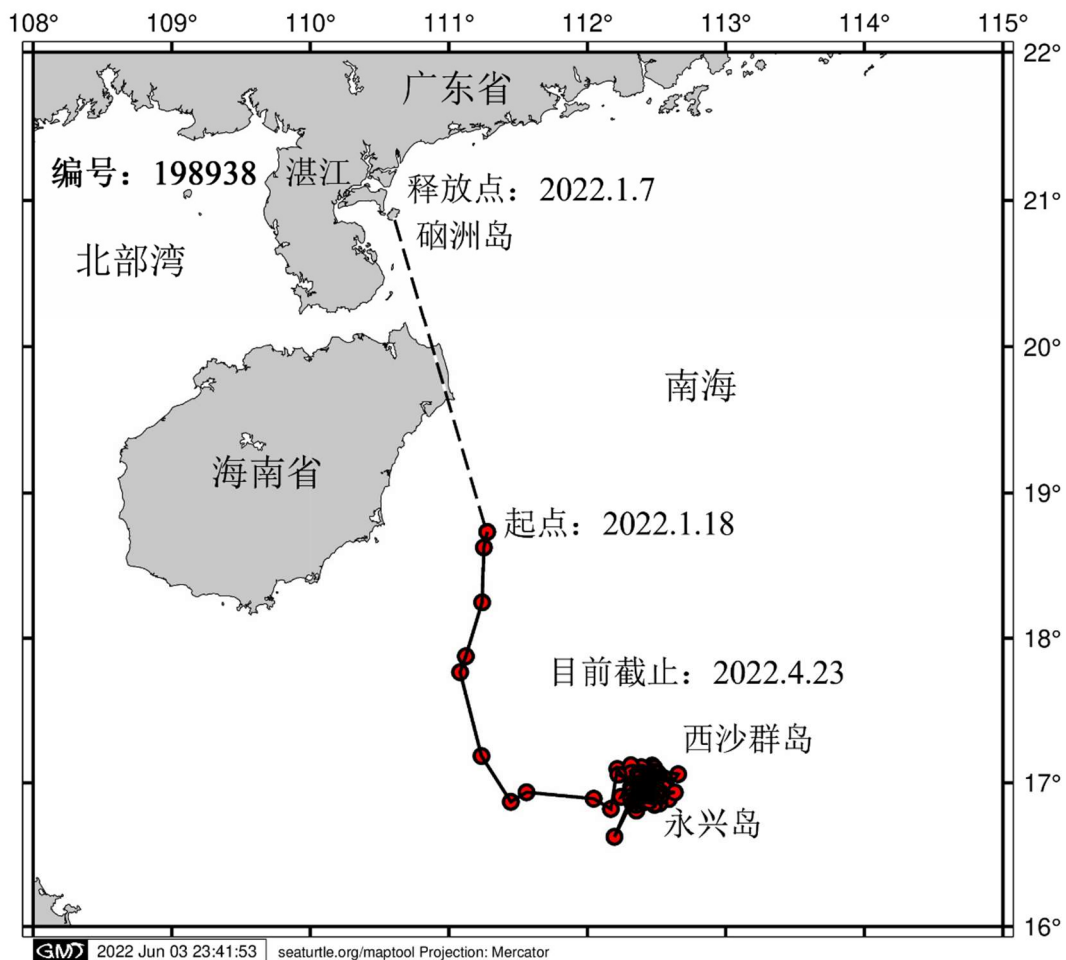


图 2-7 编号 198938 绿海龟运动路径 (95 天)

Fig. 2-7 Movement route of No. 198938 green turtle (95 days)

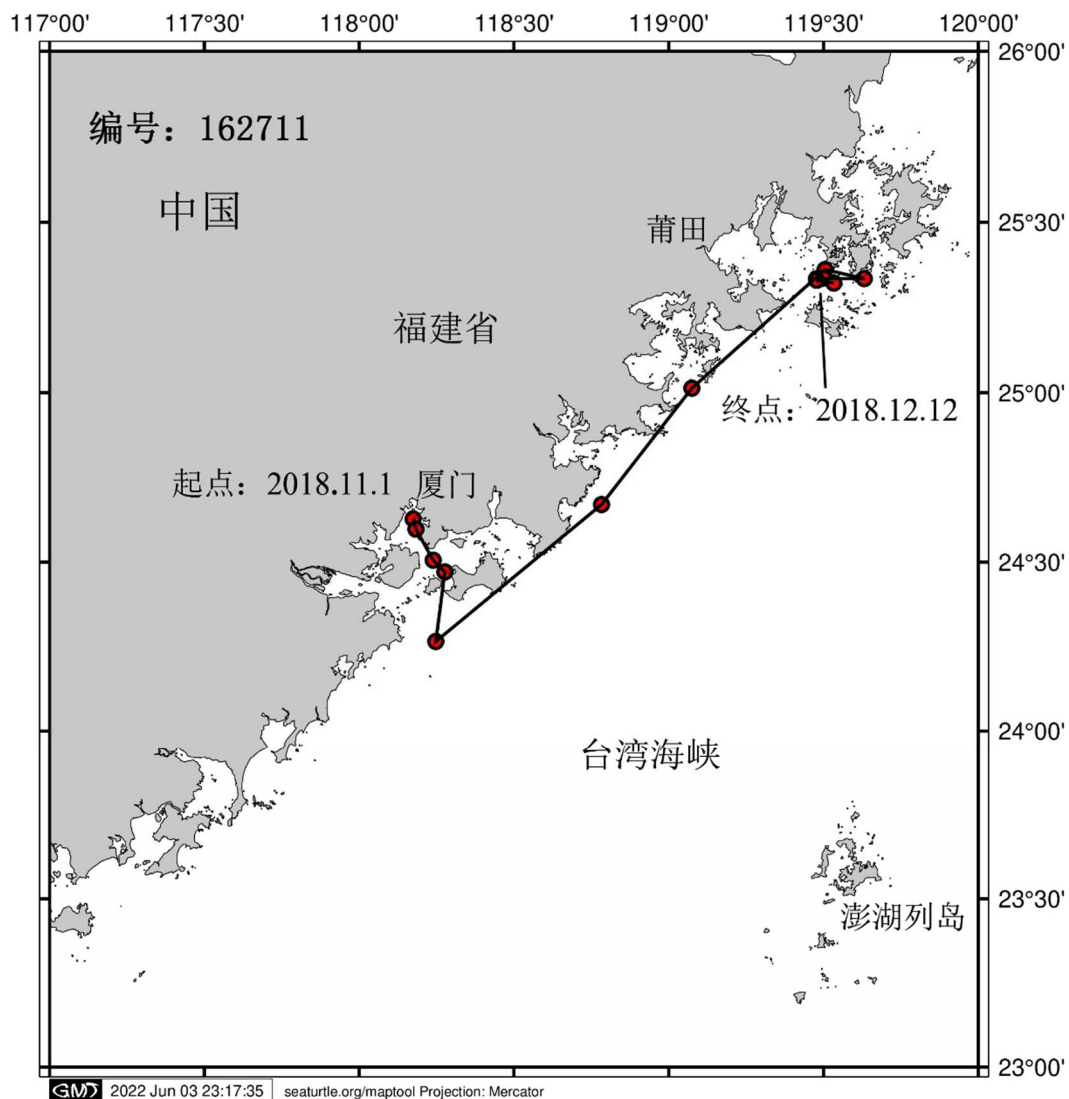


图 2-8 编号 162711 绿海龟运动路径 (41 天)

Fig. 2-8 Movement route of No. 162711 green turtle (41 days)

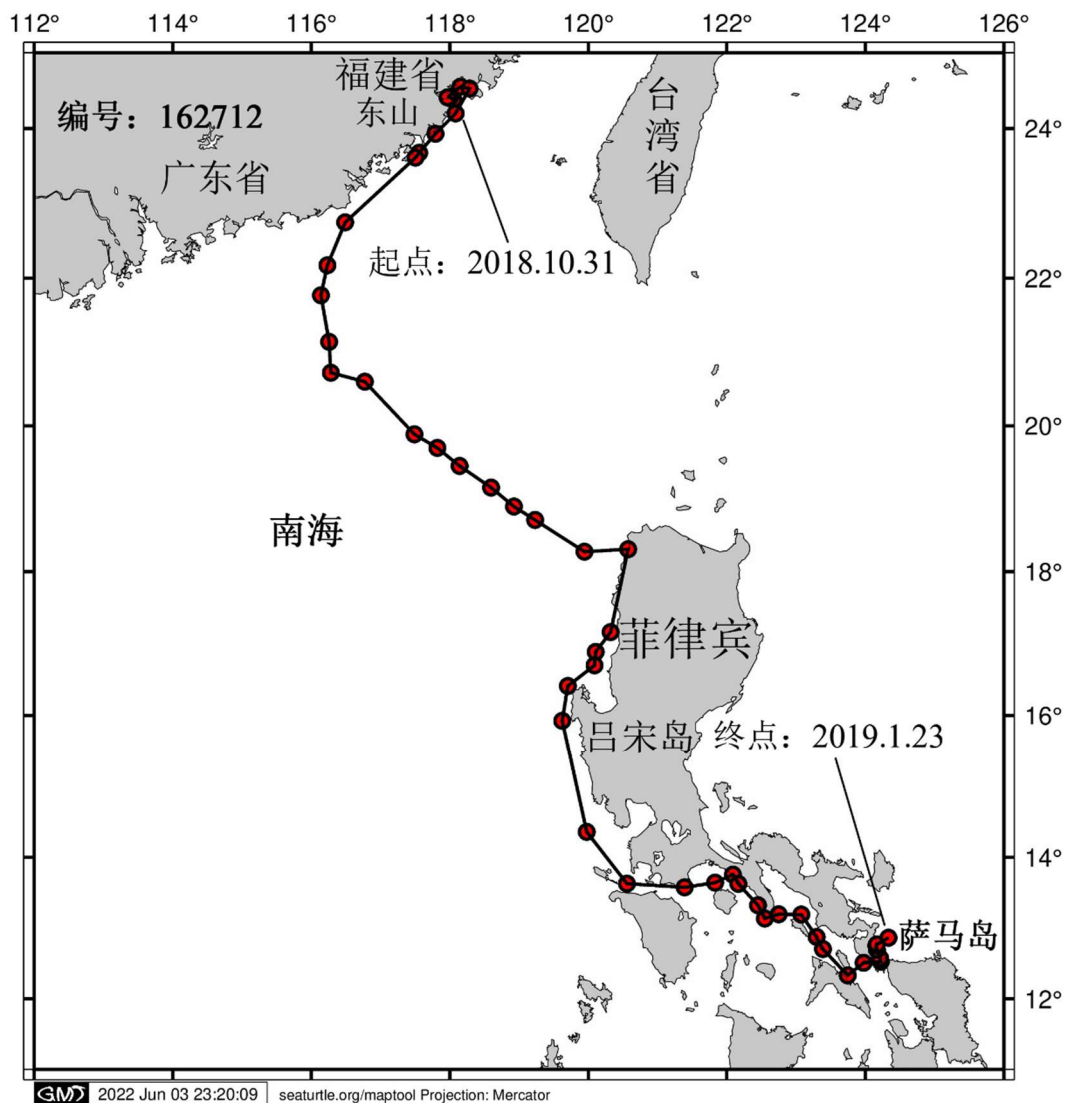


图 2-9 编号 162712 绿海龟运动路径 (84 天)

Fig. 2-9 Movement route of No. 162712 green turtle (84 days)

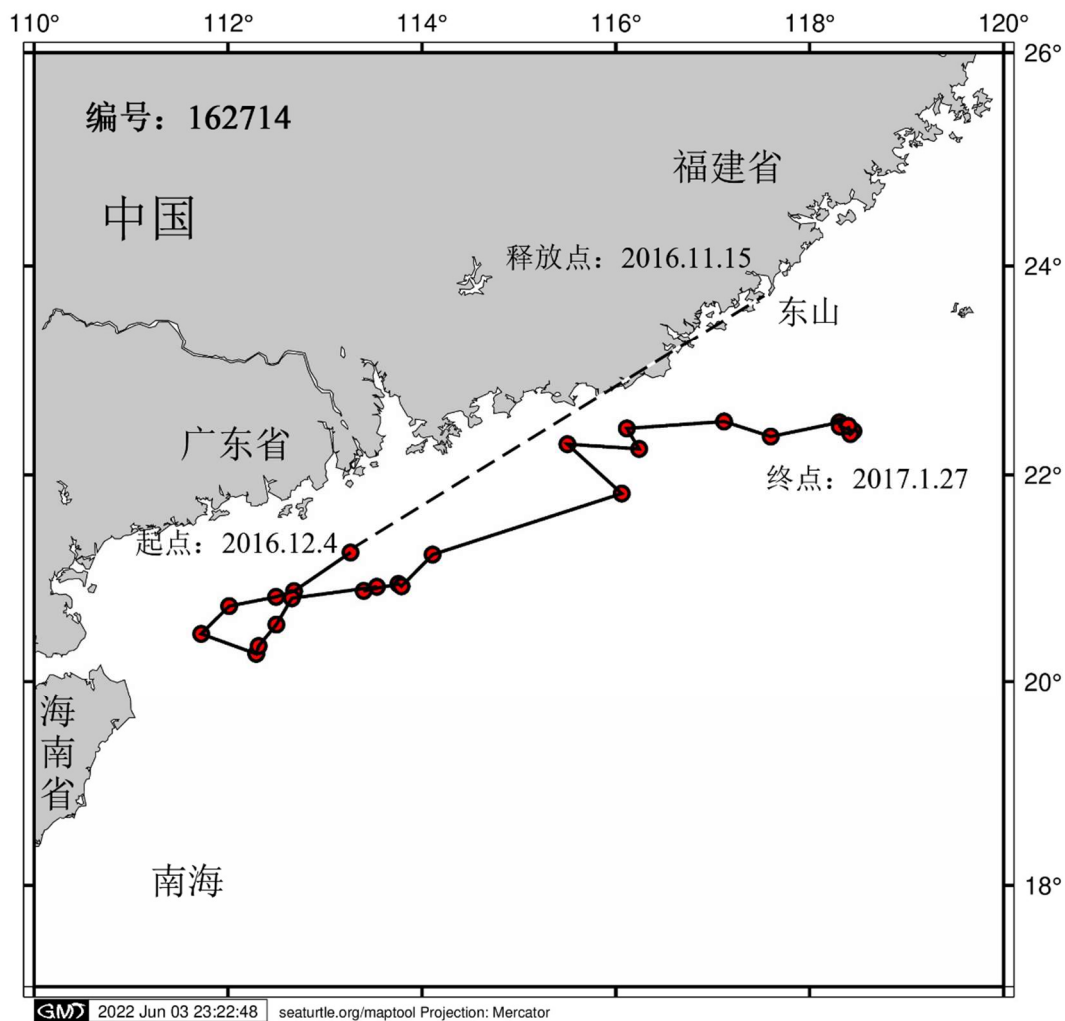


图 2-10 编号 162714 绿海龟运动路径 (54 天)

Fig. 2-10 Movement route of No. 162714 green turtle (54 days)

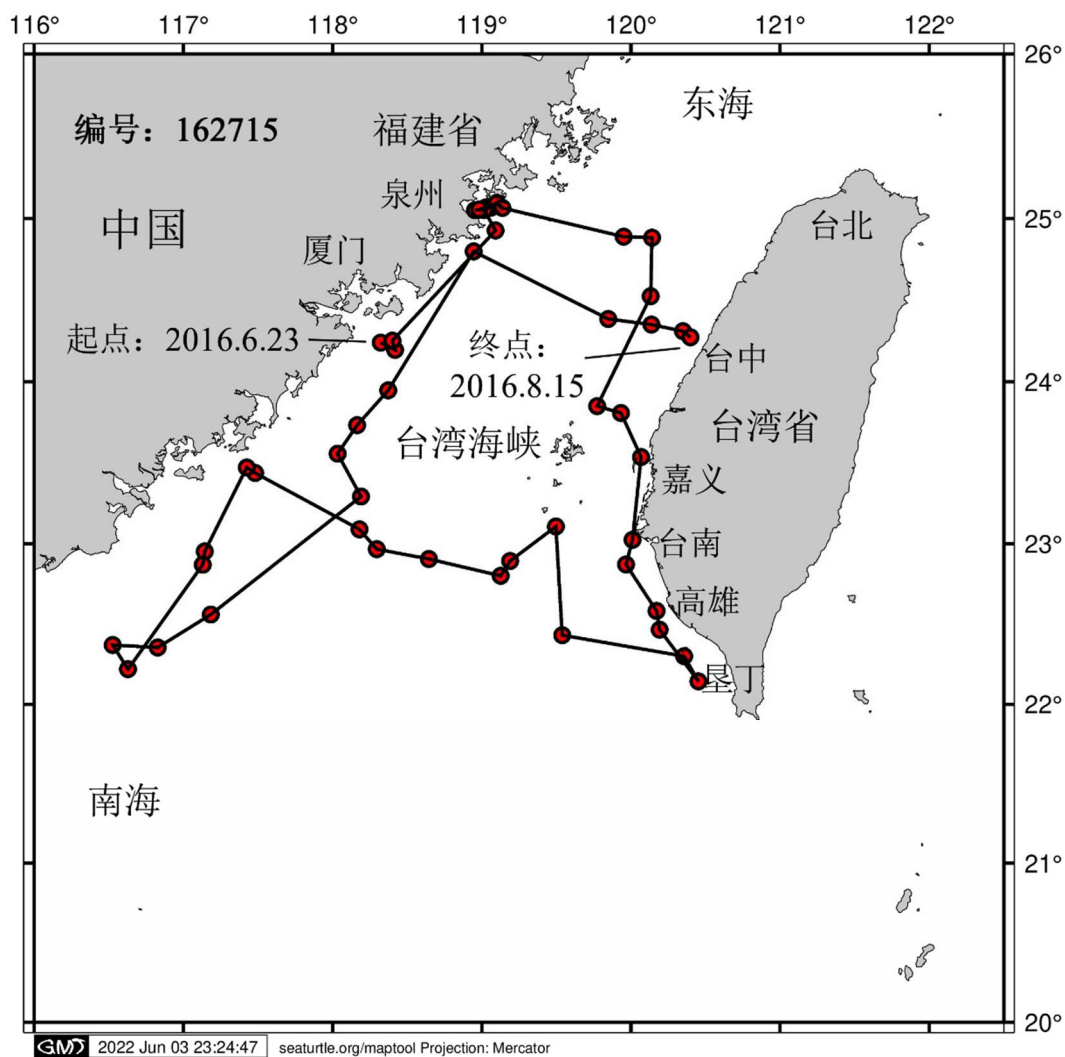


图 2-11 编号 162715 海龟运动路径 (53 天)

Fig. 2-11 Movement route of No. 162715 green turtle (53 days)

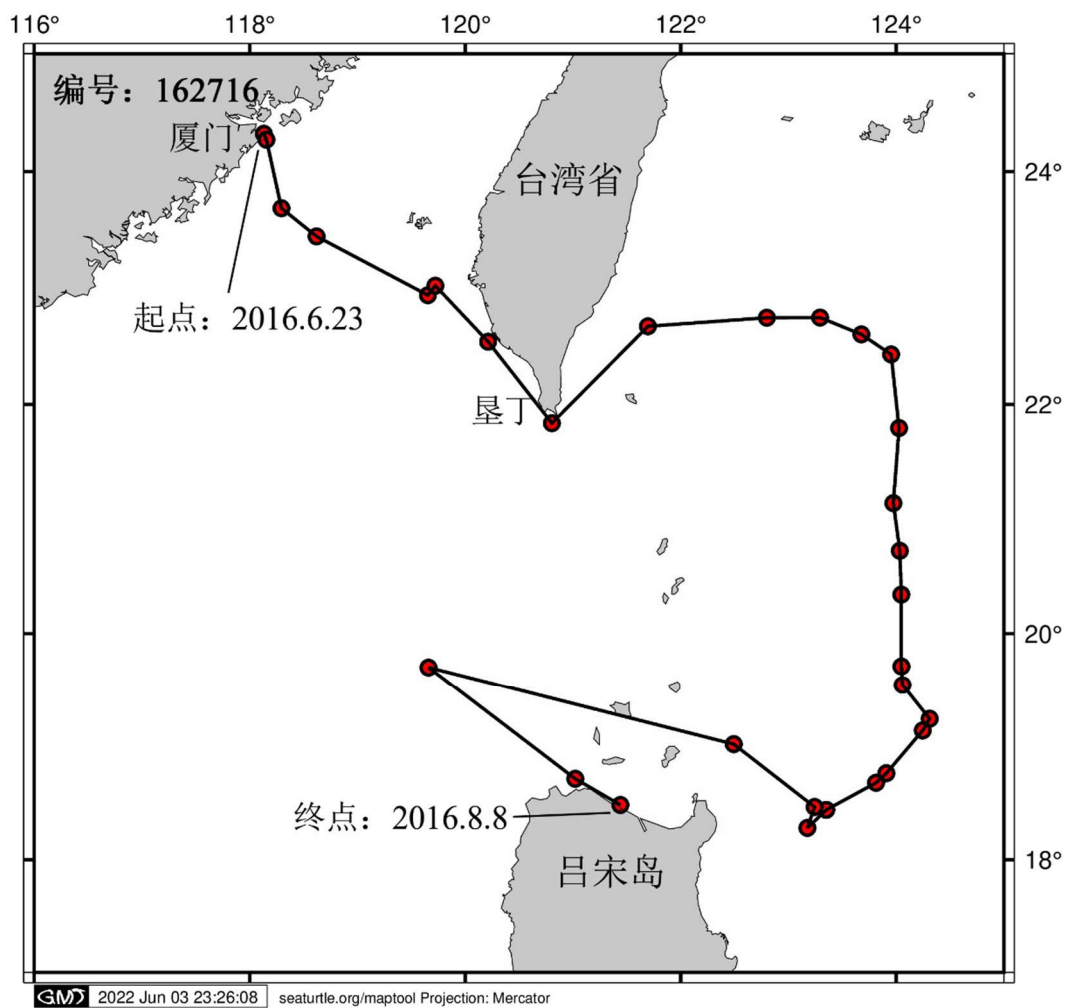


图 2-12 编号 162716 海龟运动路径 (46 天)

Fig. 2-12 Movement route of No. 162716 green turtle (46 days)

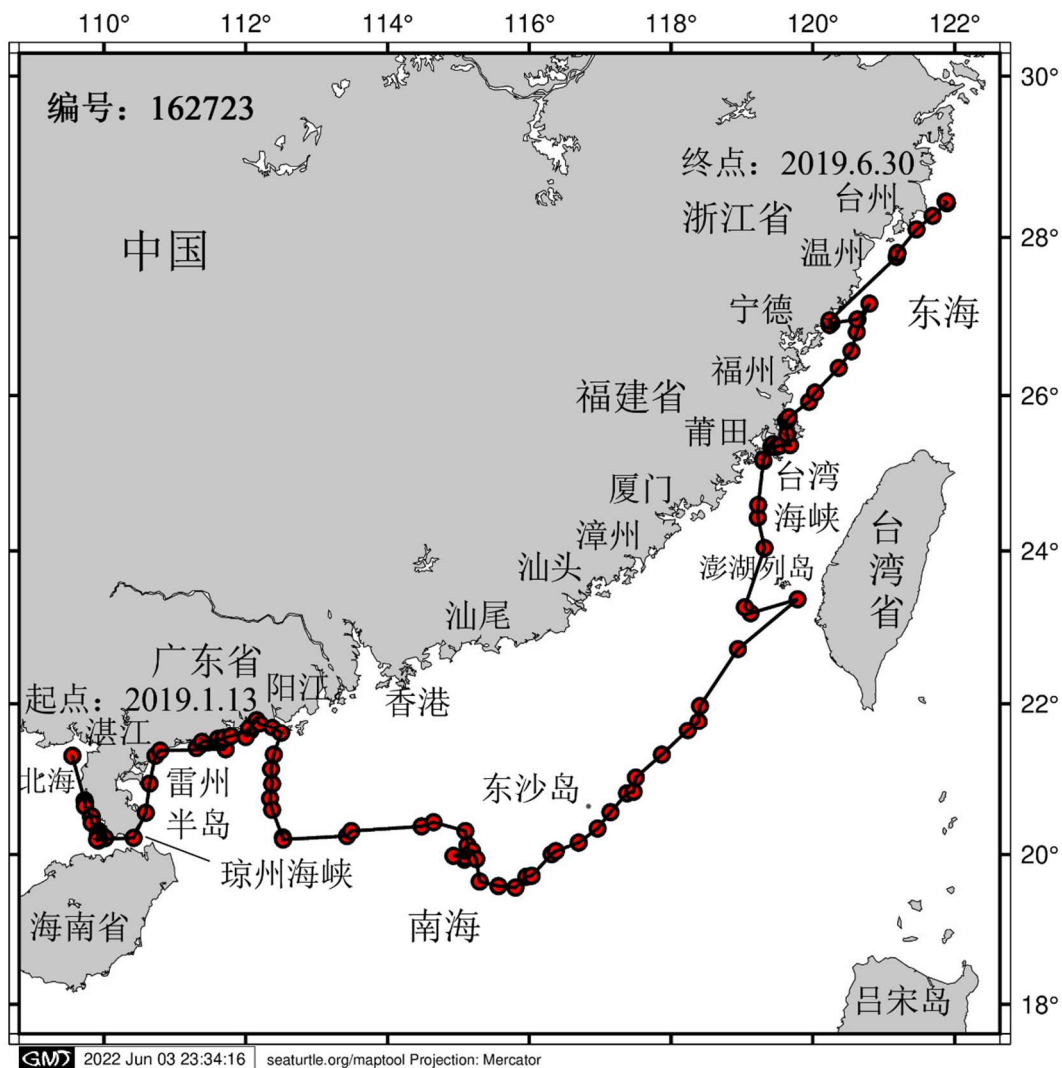


图 2-13 编号 162723 绿海龟运动路径 (169 天)

Fig. 2-13 Movement route of No. 162723 green turtle (169 days)

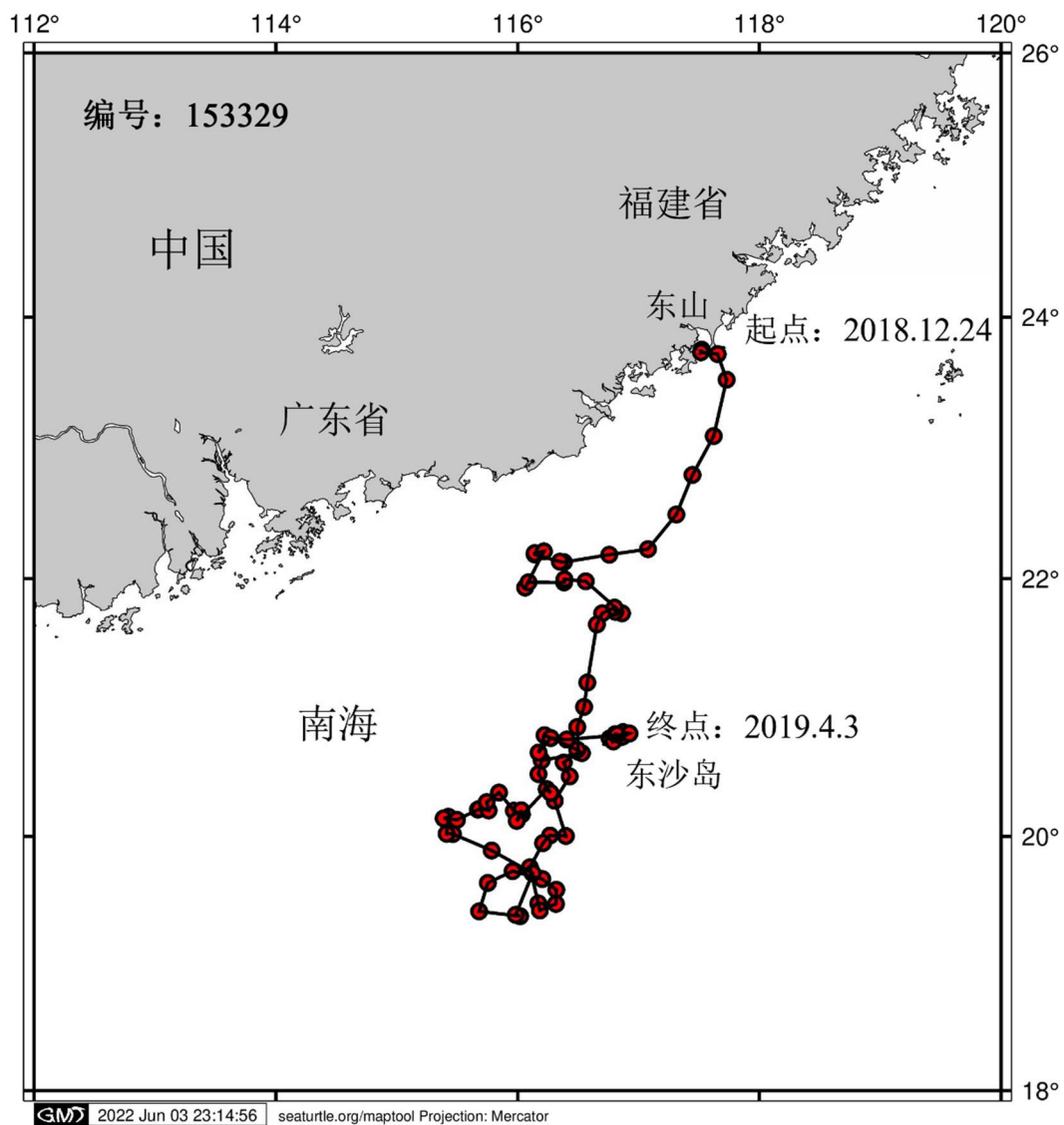


图 2-14 编号 153329 绿海龟运动路径 (100 天)

Fig. 2-14 Movement route of No. 153329 green turtle (100 days)

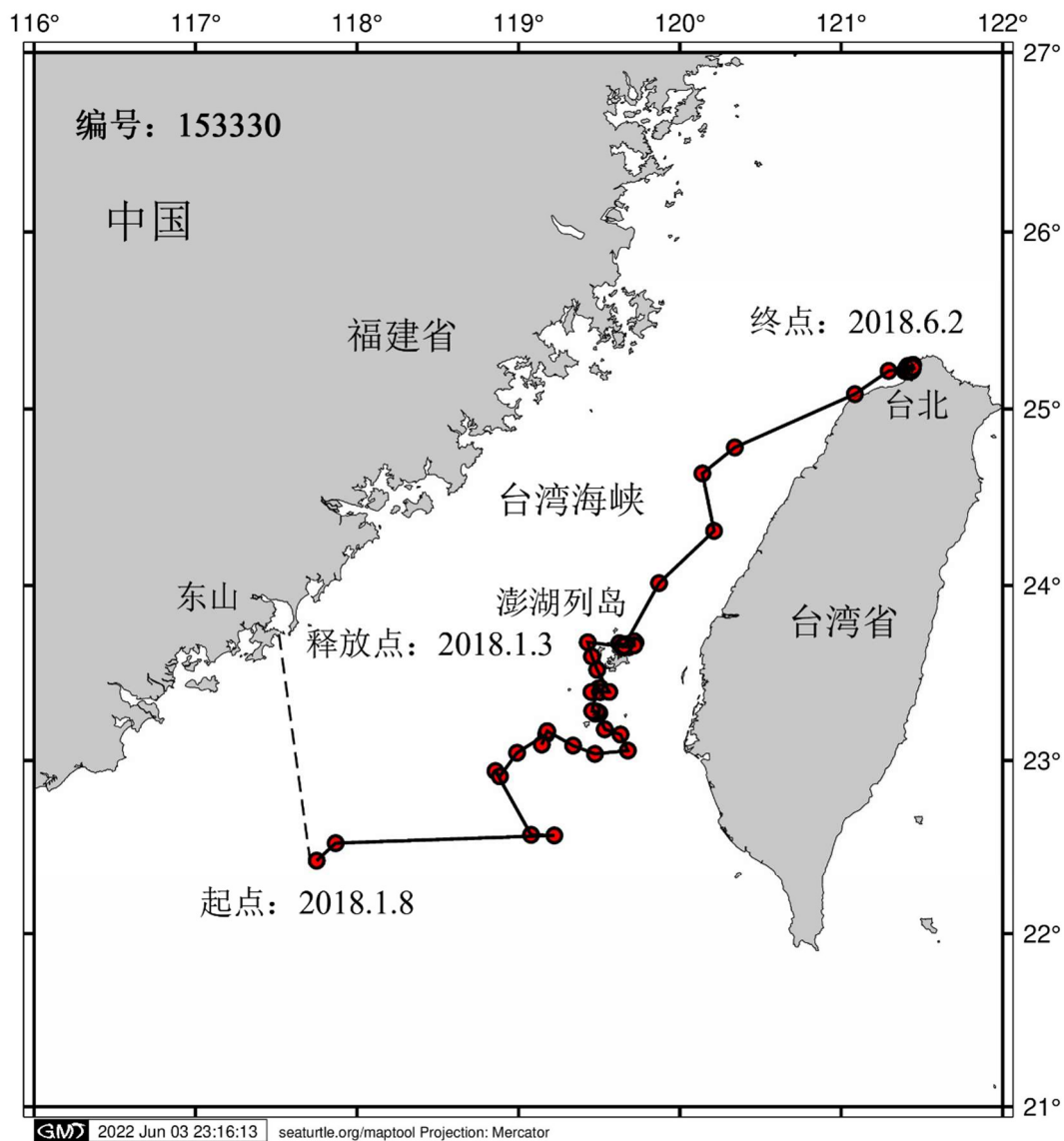


图 2-15 编号 153330 绿海龟运动路径 (145 天)

Fig. 2-15 Movement route of No. 153330 green turtle (145 days)

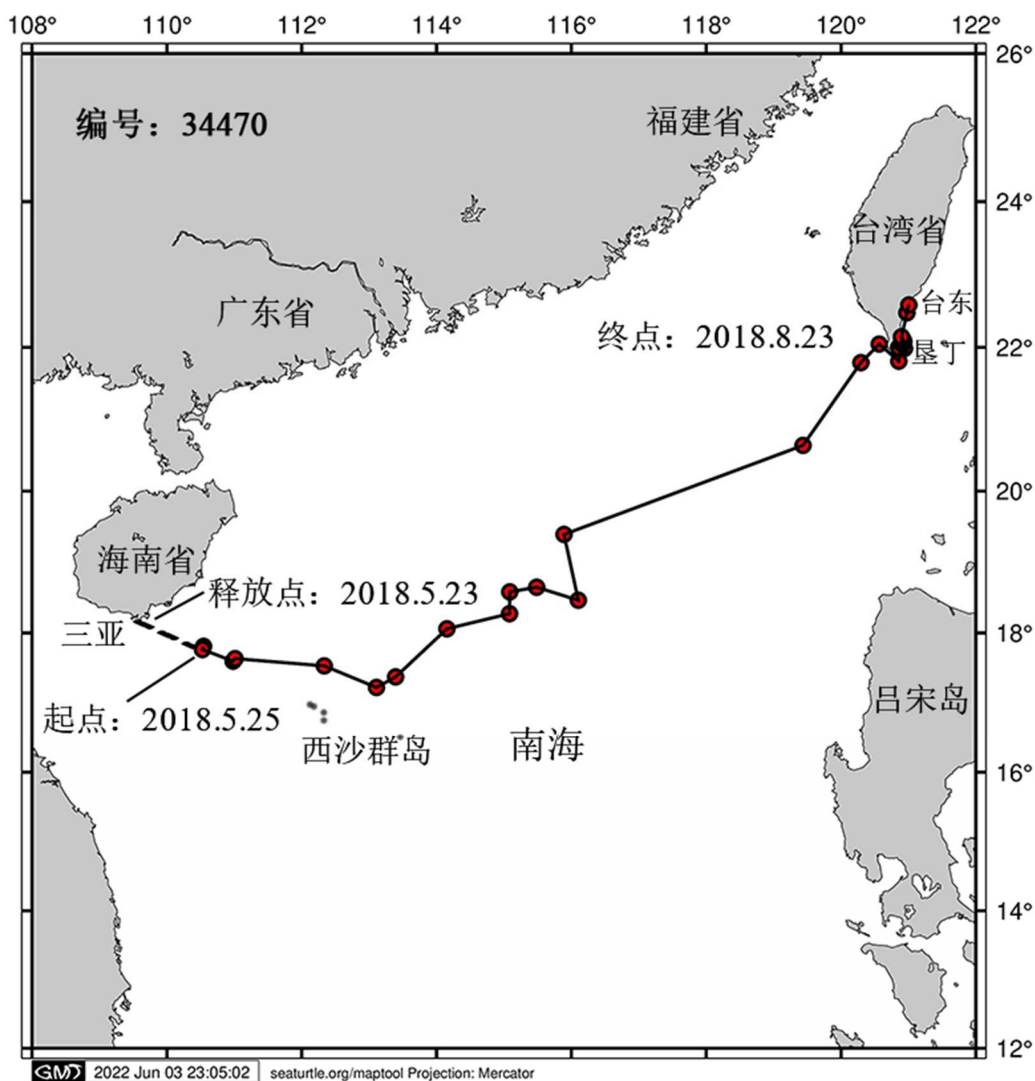


图 2-16 编号 34470 绿海龟运动路径 (90 天)

Fig. 2-16 Movement route of No. 34470 green turtle (90 days)

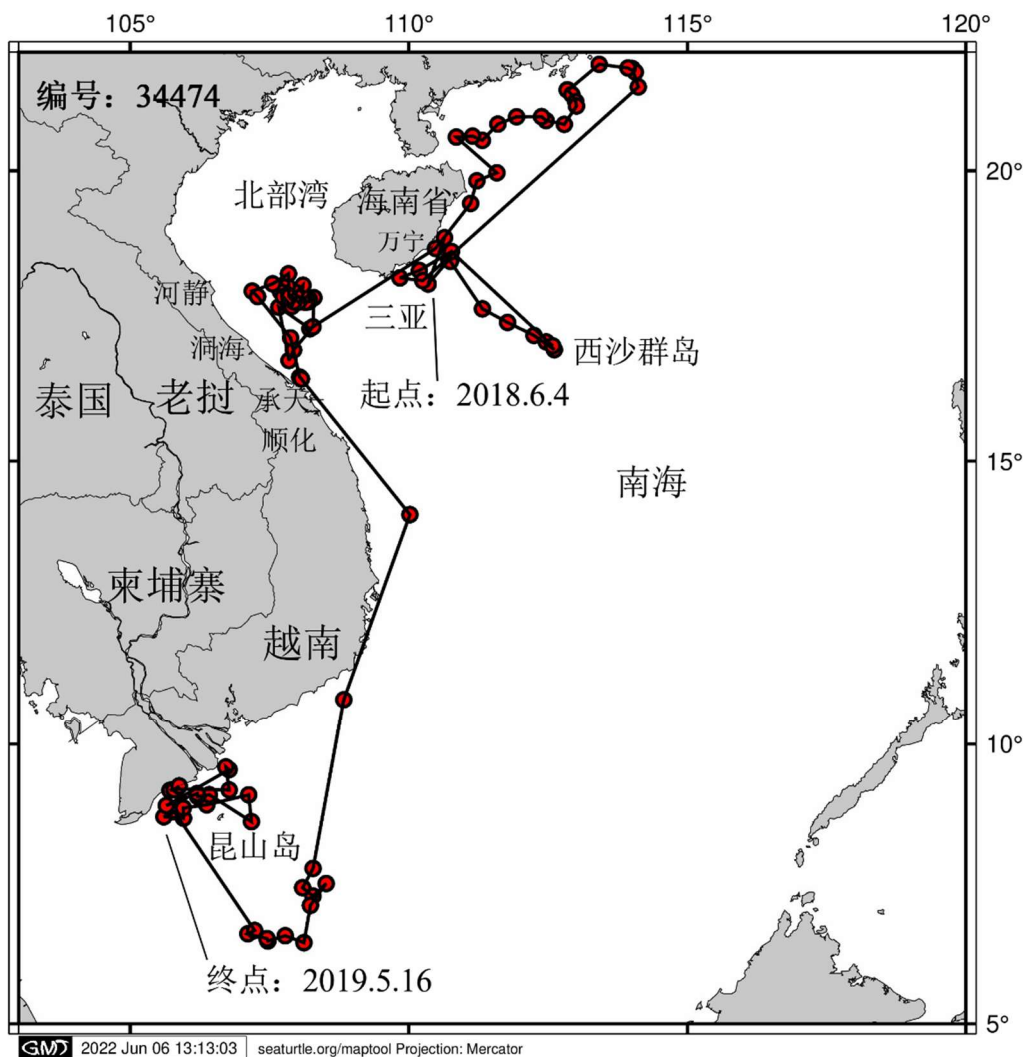


图 2-17 编号 34474 绿海龟运动路径 (346 天)

Fig. 2-17 Movement route of No. 34474 green turtle (346 days)

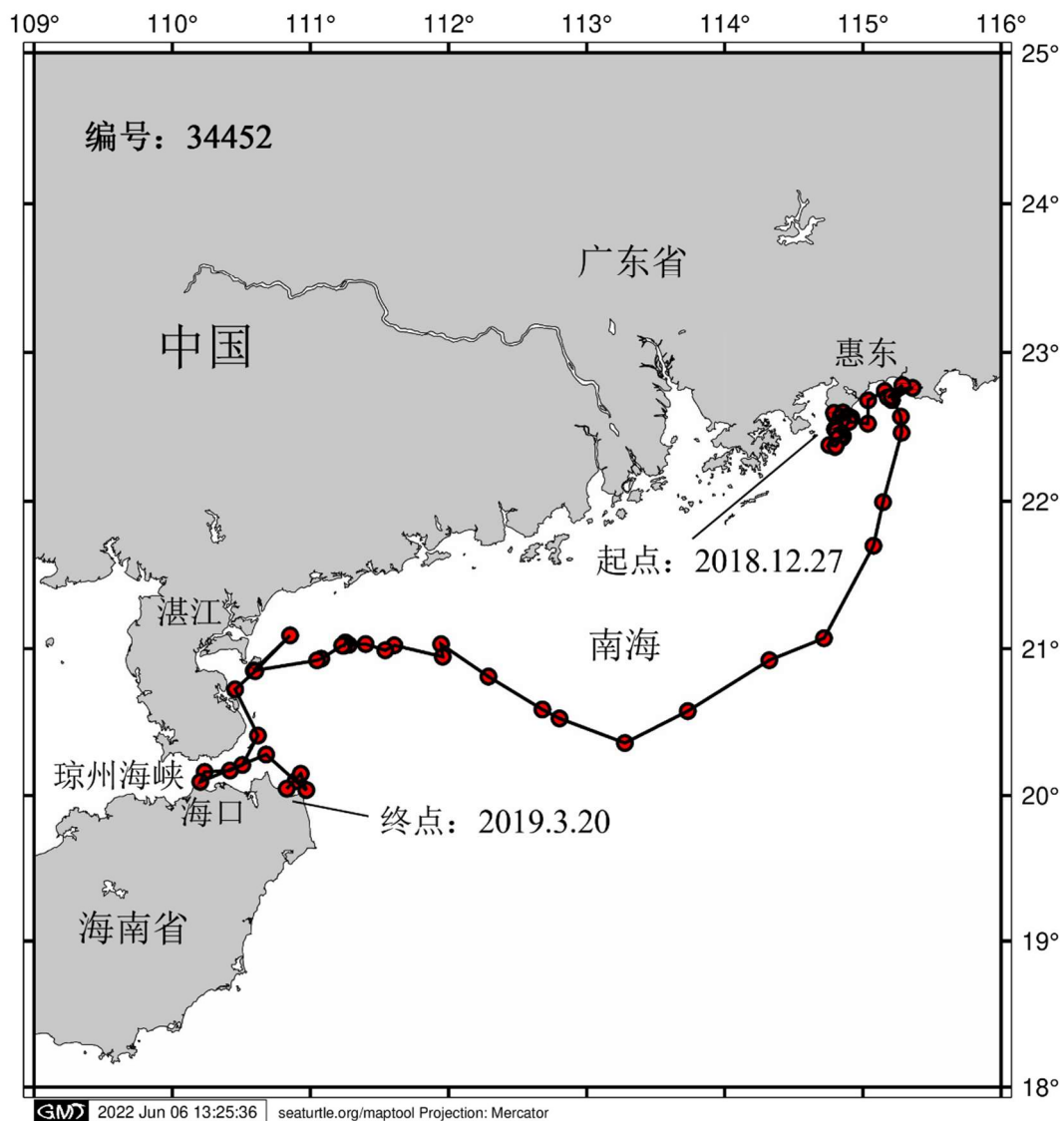


图 2-18 编号 34452 绿海龟运动路径 (83 天)

Fig. 2-18 Movement route of No. 34452 green turtle (83 days)

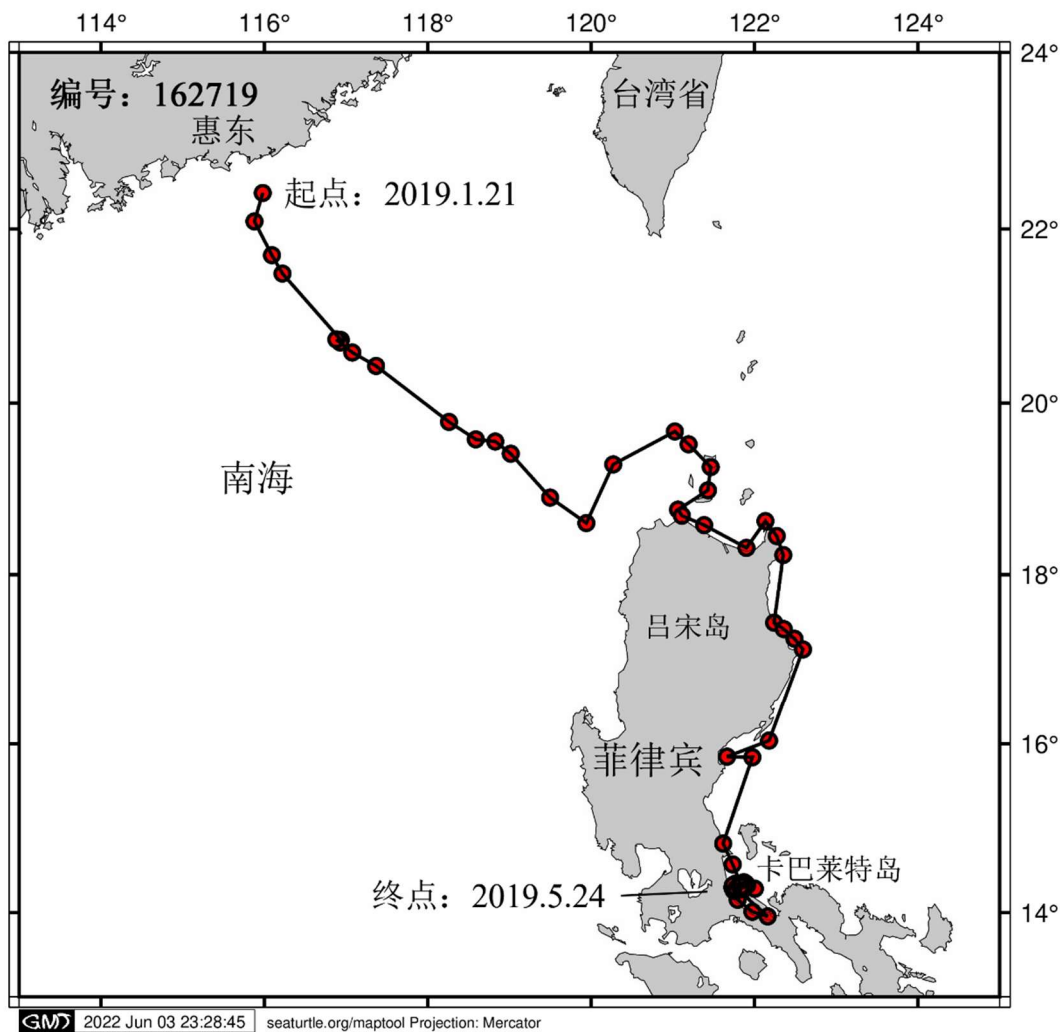


图 2-19 编号 162719 海龟运动路径 (123 天)

Fig. 2-19 Movement route of No. 162719 green turtle (123 days)

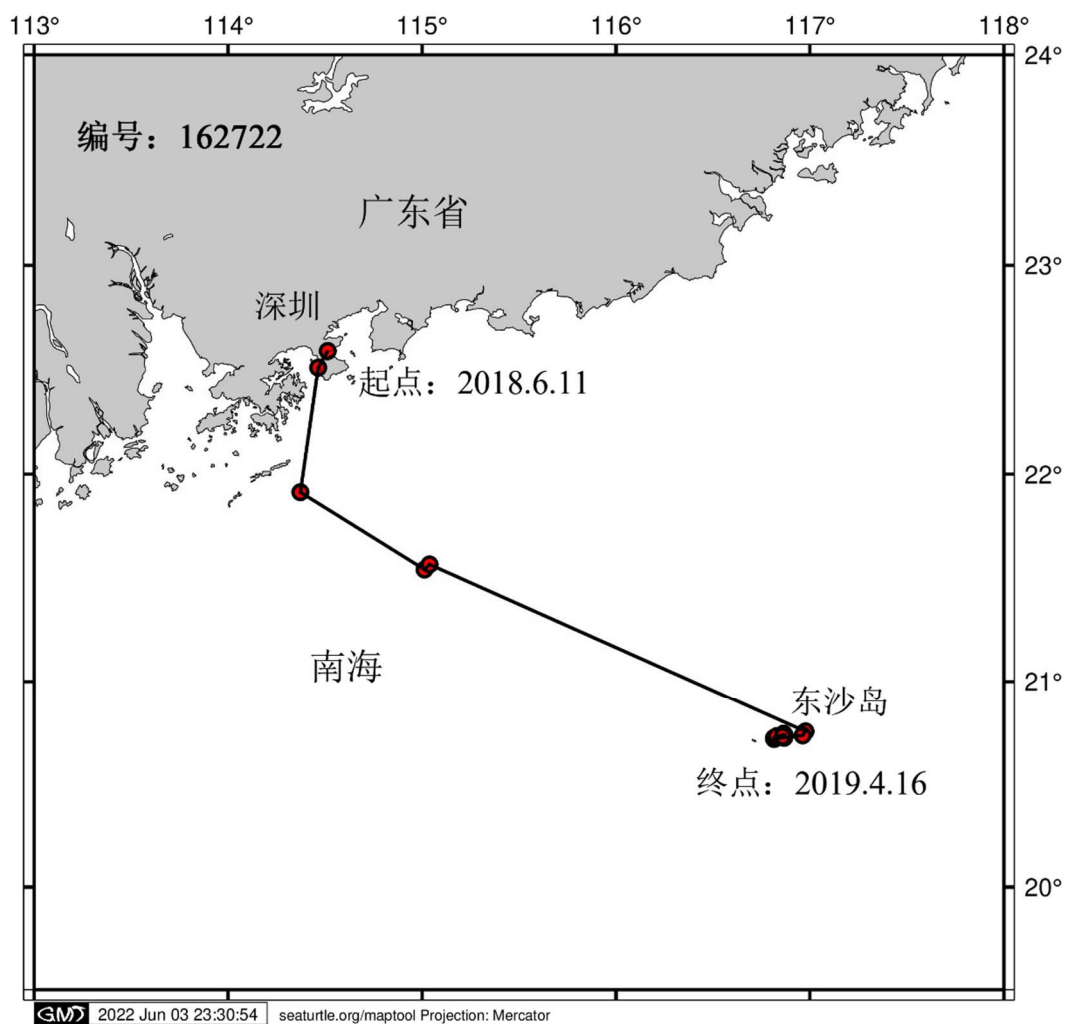
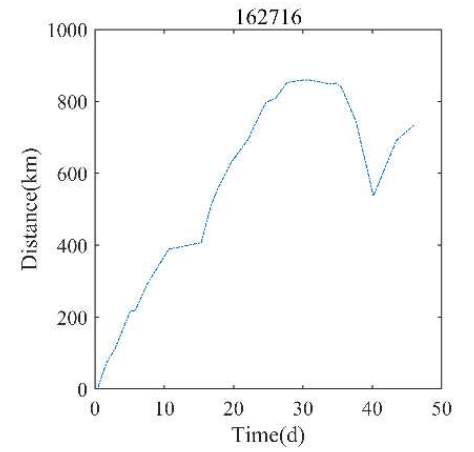
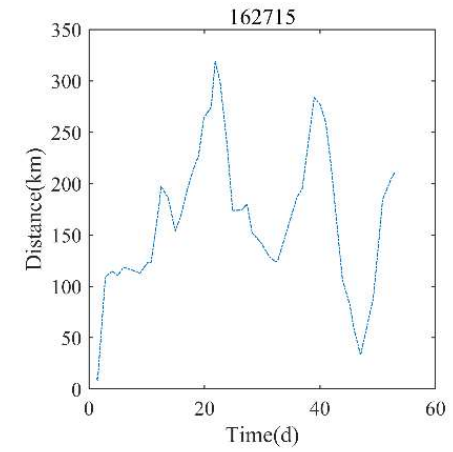
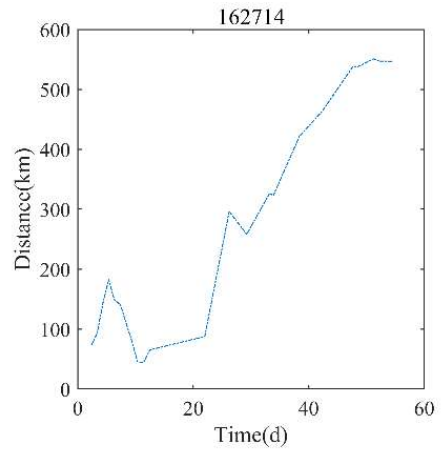
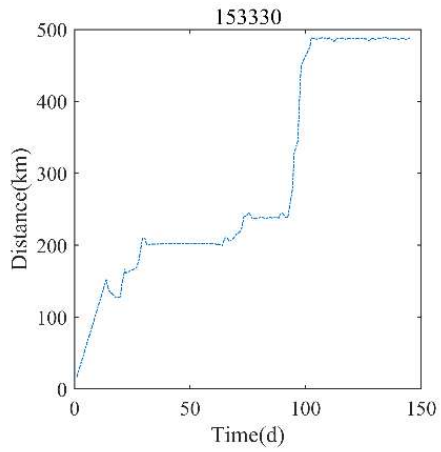
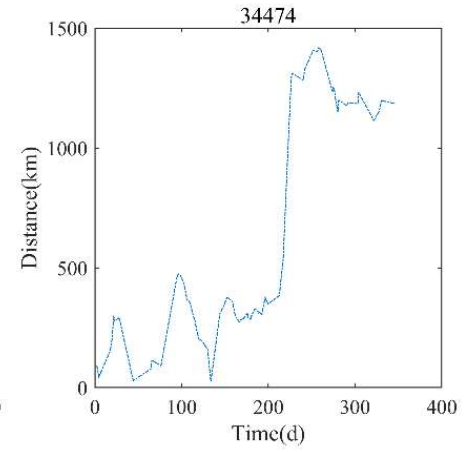
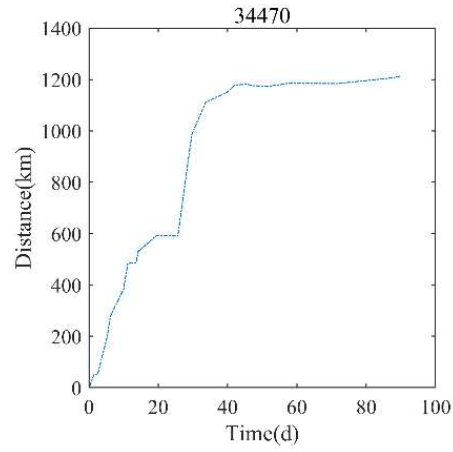
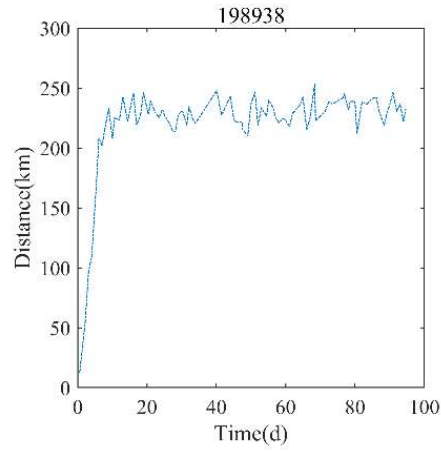
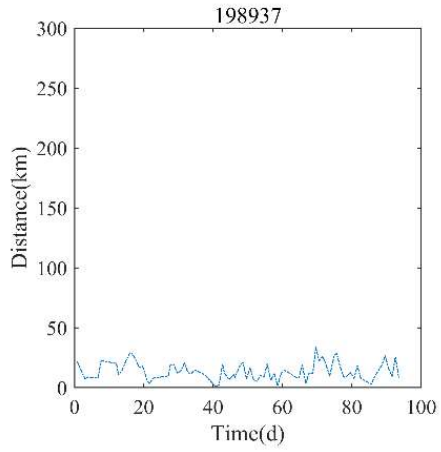


图 2-20 编号 162722 海龟运动路径（309 天）

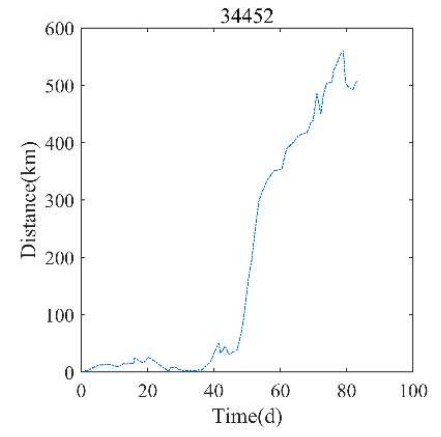
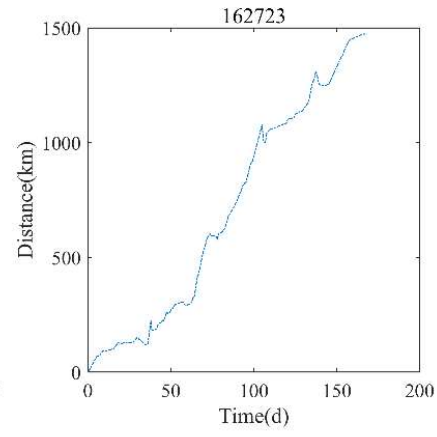
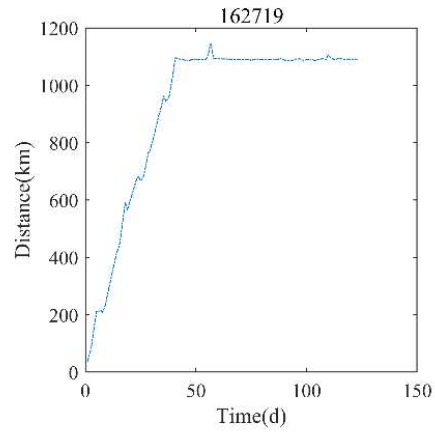
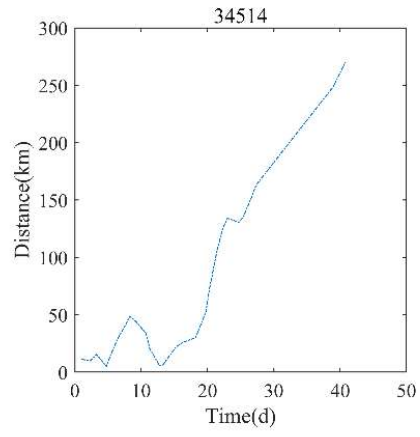
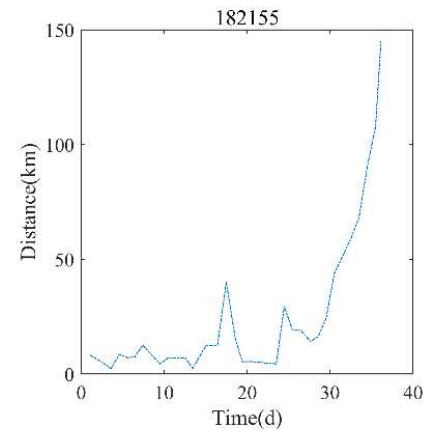
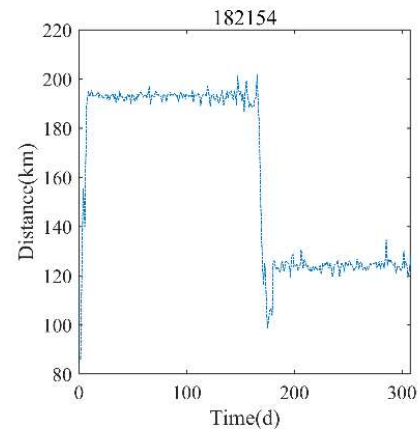
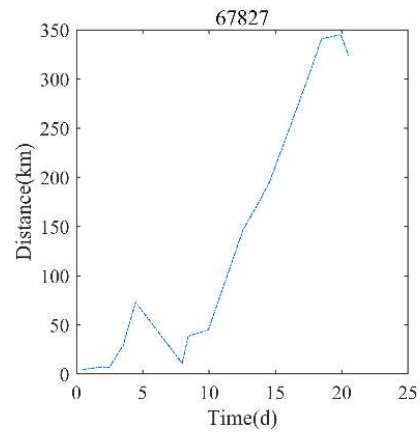
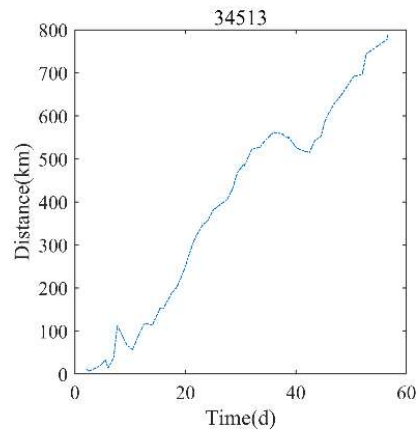
Fig. 2-20 Movement route of No. 162722 green turtle (309 days)

2.3.2 迁移类型

根据位移-时间图像（图 2-21）以及不同迁移类型的定义，可将 20 只绿海龟划分为 11 只 I 型（全程迁移型），7 只 II 型（迁移后停留型），1 只 III 型（迁移-停留-再迁移-再停留型），1 只 IV 型（停留型）（表 2-4）。



第二章 中国海域绿海龟迁移路径及活动热点分布



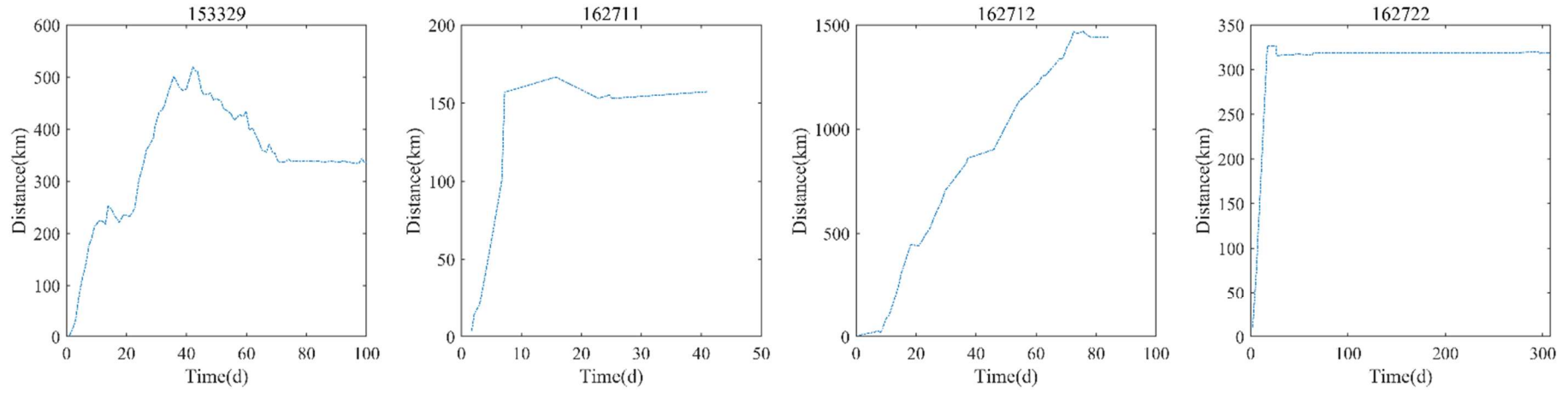


图 2-21 20 只绿海龟追踪的全程位移-时间图像

Fig. 2-21 Distance-Time figures of the entire migratory periods of the 20 green turtles

表 2-4 20 只绿海龟运动类型及追踪时段基本信息

Table 2-4 Movement types and basic tracking information of the 20 green turtles

类型	编号	追踪时段	追踪时长 (天)	全程平均速度 (km/h)	迁移直线指数 (MSI)
I 型	34513	2019.5.23-2019.7.19	57	1.270	0.603
	67827	2020.8.9-2020.8.30	21	1.351	0.578
	182155	2020.6.3-2020.7.9	36	0.635	0.273
	34514	2019.5.23-2019.7.2	40	0.796	0.455
	162723	2019.1.13-2019.6.30	169	0.793	0.614
	34452	2018.12.27-2019.3.20	83	0.806	0.408
	162712	2018.10.31-2019.1.23	84	1.502	0.655
	34474	2018.6.4-2019.5.16	346	0.991	0.223
	162714	2016.12.4-2017.1.27	54	1.143	0.466
	162715	2016.6.23-2016.8.15	53	1.415	0.117
	162716	2016.6.23-2016.8.8	46	1.767	0.371
II 型	34470	2018.5.25-2018.8.23	90	1.054	0.824
	162719	2019.1.21-2019.5.24	123	0.820	0.518
	153329	2018.12.24-2019.4.3	100	0.661	0.226
	162711	2018.11.1-2018.12.12	41	1.037	0.684
	162722	2018.6.11-2019.4.16	309	0.393	0.771
	198938	2022.1.18-2022.4.23	95 (未结束)	0.953	0.144
	153330	2018.1.8-2018.6.2	145	0.371	0.560
III 型	182154	2020.5.22-2021.3.26	308	0.199	0.095
IV 型	198937	2022.1.18-2022.4.22	94 (未结束)	0.721	0.006

I 型 (n = 11): 追踪时长为 21-346 天, 整体迁移速度均高于 0.5 km/h, MSI 同样各有差异。尽管绿海龟基本生活在近海, 但它们在游动或迁移时也会离岸跨过深水区, 且经过计算发现, 即使是同一只海龟, 位于近海和外海的行进速度也

存在着差异。比如#162723 在近岸水域的平均行进速度为 0.566 km/h，而在离岸段却达到了平均 1.128 km/h。由于追踪时段海龟的行进路线多为离岸较远且水深较深的大陆架斜坡地区，#162716 在追踪时段的总体平均行进速度达到了 1.767 km/h。

II 型 (n=7): 追踪时段分段明显。如#162719，它在到达目的地前的平均行进速度为 1.361 km/h，而在到达停留地点之后的平均行进速度则骤降为 0.222 km/h。

III 型 (n=1): III 型的绿海龟仅有 1 只 (#182154)，而迁移路径上的停留地为 2 个。整体 MSI 及迁移速度均较低。

IV 型 (n=1): IV 型的绿海龟仅 1 只 (#198937)，MSI (0.006) 为追踪海龟当中的最小值，截止目前的总平均游动速度为 0.721 km/h。

2.3.3 热点活动区域

通过对于 20 只绿海龟的运动点迹进行整合，得出了绿海龟的整体分布区域 (图 2-22) 以及活动热点区域 (图 2-23)。从整体分布可以看出，经过琼州海峡和台湾海峡，西起广西、经广东、东至福建莆田的带状近岸海域是绿海龟的主要迁移廊道。热点区域主要集中在我国南部近海且与海草床的分布区域高度重合，具体包括如下主要区域：北部湾白龙尾岛及姑苏群岛附近海域、雷州半岛东西沿海及琼州海峡海域、西沙群岛永兴岛附近海域、广东惠东附近海域、东沙岛附近海域、台湾海峡西边福建莆田附近海域、台湾海峡东边澎湖列岛以及台湾岛北部海域、菲律宾卡巴莱特岛附近海域以及山东烟台北部附近海域等。

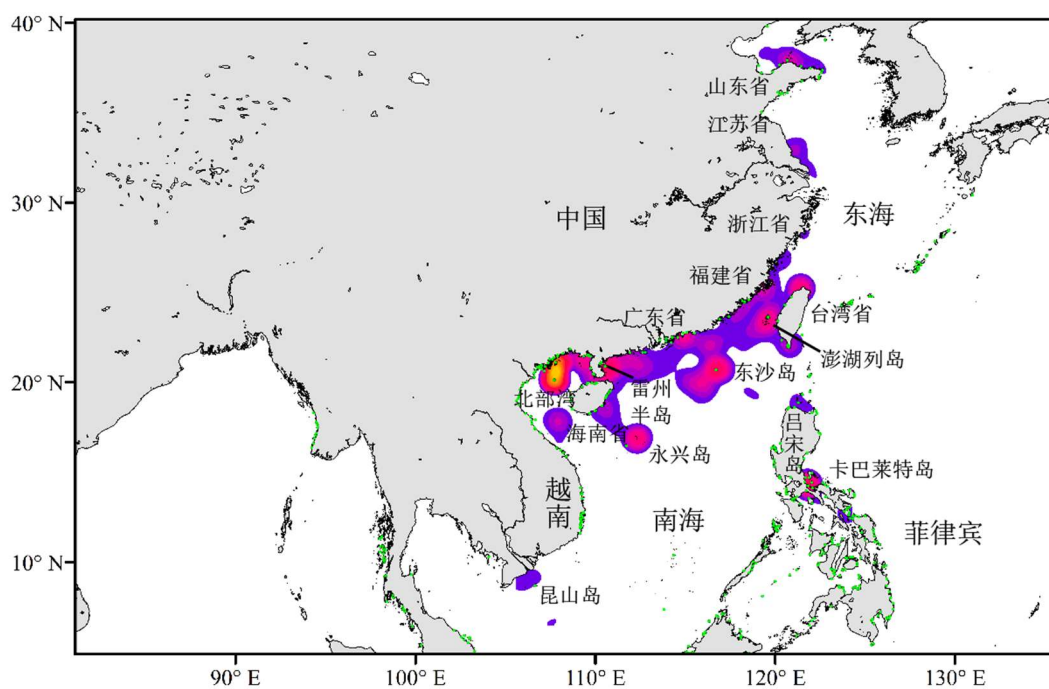


图 2-22 20 只绿海龟的整体活动区域

(密度按蓝色-紫色-红色-黄色的顺序依次升高; 绿点代表海草床位置)

Fig. 2-22 Activity areas of the 20 tracked green turtles

(density increased in order of blue-purple-red-yellow; green points display the locations of seagrass beds)

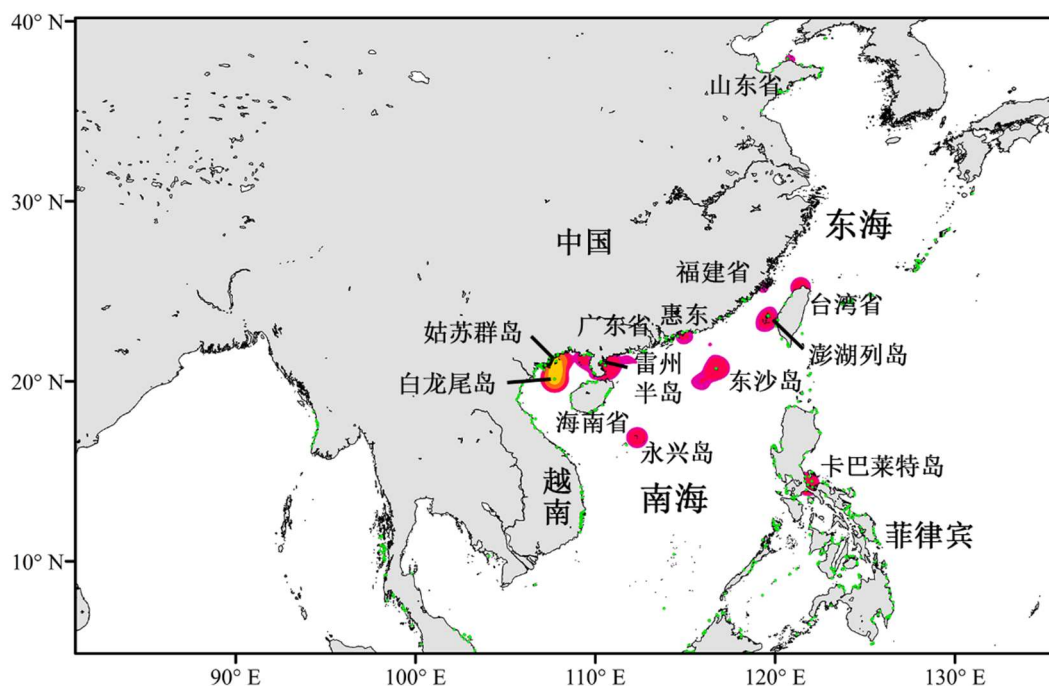


图 2-23 20 只绿海龟整合的活动热点区域

(密度按紫色-红色-黄色的顺序依次升高; 绿点代表海草床位置)

Fig. 2-23 Hot spot areas of the 20 tracked green turtles

(density increased in order of purple-red-yellow; green points display the locations of seagrass beds)

2.3.4 追踪时段剖析

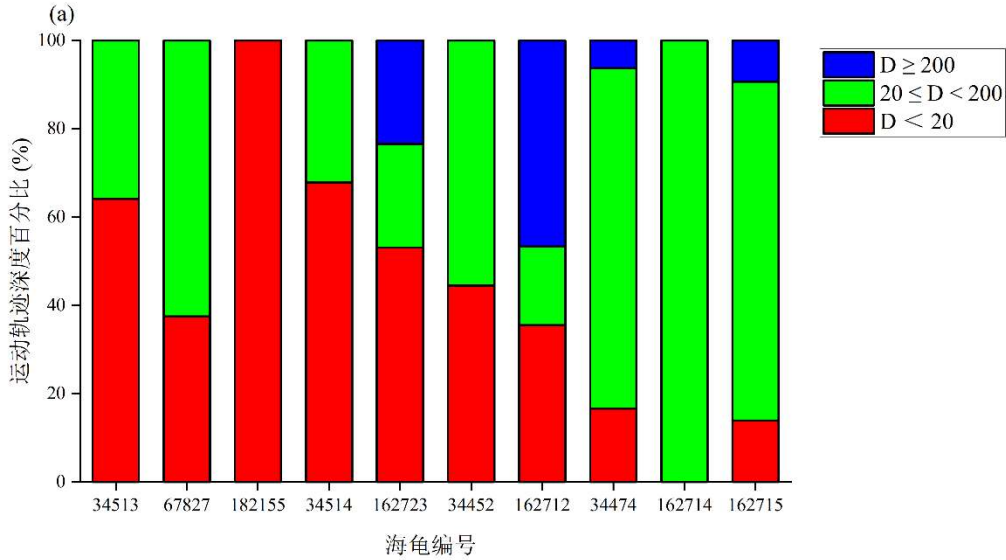
2.3.4.1 迁移直线指数

就完整追踪时段来看, 20 只海龟的迁移直线指数 (MSI) 有着较大波动, 其中最小值 (0.006) 为编号 198937 的 IV 型绿海龟, 而最大值 (0.824) 为编号 34470 的 II 型绿海龟 (表 4-4)。I 型绿海龟的 MSI 在 0.117-0.655 之间, 其中 MSI 小于 0.5 的海龟有 7 只。II 型在 0.226-0.824 之间, 除#153329 和#198938 外其余 5 只绿海龟的 MSI 均大于 0.5。III 型与 IV 型绿海龟的 MSI 均小于 0.1。由于#198937 和#198938 的卫星追踪信号仍在持续, 因此目前的 MSI 值并不是其最终的结果。

2.3.4.2 水深

从追踪时段的水深分析来看, 每只绿海龟迁移所经过的海域深度情况各有不同, 但是活动区域多为浅海 ($< 200 \text{ m}$), 仅有 4 只绿海龟 (20%) 有一半以上的时间位于深度较大 ($\geq 200 \text{ m}$) 的海域 (图 2-22)。绝大多数具有停留点的海龟个体 (II 型、III 型、IV 型), 在追踪时段多待在水深较浅 ($< 20 \text{ m}$) 的区域, 而仅进行迁移的海龟 (I 型) 同样也有相当部分的个体在浅水区 ($< 20 \text{ m}$) 游弋。

有 2 个例外的个体 (图 2-24)。编号 34470 的 II 型绿海龟 (图 2-16) 存在有长时间驻足的停留区域, 但是该区域的水深均超过了 20 m 。编号 182155 的 I 型绿海龟 (图 2-4) 所经过的水域水深却均不超过 20 m 。



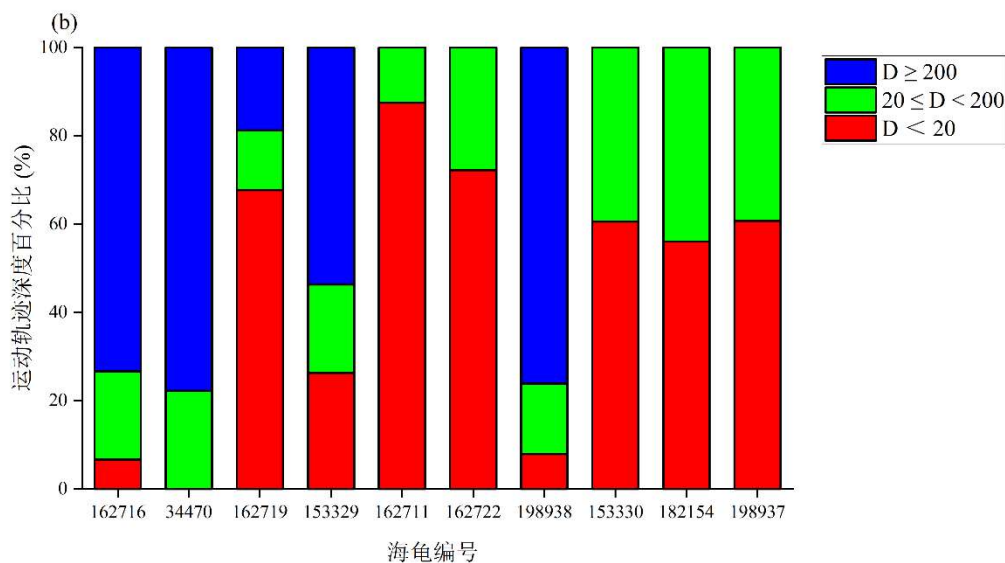


图 2-24 20 只绿海龟的轨迹水深占比

Fig. 2-24 Depth range percentage of the 20 green turtles passed

2.3.4.3 SST 及 Chl-a

20 只绿海龟追踪时段的 SST 变化范围为 9.605-31.525 °C，平均温度为 24.807±0.119 °C，大多数个体生活在 20-30 °C（表 2-5）。15 °C 以下活动的绿海龟属于少数，仅发现在#34513 和#34514 两只绿海龟，且它们在低温下所停留的时间都不长。而通过迁移路径来看，海龟对于特定的温度并没有特别的趋向性，并不会为了待在某一温度的水域离开某一停留点而进行特定的迁移。

20 只绿海龟活动区域的 Chl-a 变化范围为 0.042-16.521 mg/m³，平均浓度为 1.195±0.042 mg/m³（表 2-5）。平均 Chl-a 相对较高的 2 只海龟为#34514（图 2-2）和#162711（图 2-8），它们的追踪时间相对较短，活动地区位于渤海和福建近海。20 只绿海龟对 Chl-a 也并没有特别的倾向性。绿海龟主要在易受人类活动影响的沿岸近海活动，而这些海域会时常由于富营养化出现叶绿素的极端值。

表 2-5 20 只绿海龟经过区域的海洋表层温度和叶绿素 a 遥感观测值
**Table 2-5 Remote sensing values of the sea surface temperature and chlorophyll
a in the passed areas of the 20 green turtles**

类型	编号	海洋表层温度 (°C)			叶绿素 a 浓度 (mg / m ³)		
		最低值	最高值	平均值	最小值	最大值	平均值
I 型	34513	9.605	26.470	20.617	0.351	16.521	3.011
	67827	27.555	30.440	29.401	0.075	3.923	1.020
	182155	29.990	31.525	30.716	1.488	3.547	2.587
	34514	11.305	27.010	17.656	2.714	5.047	3.948
	162723	17.225	28.450	23.880	0.097	6.778	1.456
	34452	17.060	24.380	20.285	0.186	5.191	2.118
	162712	20.700	28.845	25.849	0.104	3.007	0.617
	34474	21.845	31.065	27.527	0.112	7.035	0.633
	162714	20.575	24.845	23.386	0.232	0.992	0.575
	162715	24.695	30.245	28.140	0.103	9.627	1.627
	162716	26.345	30.700	29.596	0.042	5.571	0.431
II 型	34470	27.740	30.175	29.123	0.074	0.189	0.206
	162719	21.675	30.200	27.610	0.085	0.568	0.206
	153329	17.640	27.980	23.892	0.145	3.496	0.384
	162711	18.265	21.270	20.214	2.479	4.235	3.446
	162722	24.950	30.565	28.576	0.102	3.386	1.001
	198938	24.080	25.490	24.981	0.104	0.228	0.152
	153330	20.215	27.715	24.092	0.196	1.762	0.779
III 型	182154	16.070	30.085	24.455	0.217	3.150	1.265
IV 型	198937	19.255	19.525	19.375	1.011	5.155	2.569
	合计	9.605	31.525	24.807	0.042	16.521	1.195

2.3.5 家域

在追踪的 20 只绿海龟当中，有 9 只海龟（II 型、III 型、IV 型）在一个或多个地区出现了超过 30 天以上的停留，定位信号的终止点除#34470 绿海龟外均位于它们最后的家域中（表 2-6）。由于绿海龟实际活动范围以及追踪时长的不同，所得到的家域的面积范围差异较大，其中最小的家域面积仅 2.4 km²，而最大的可超过 250 km²，面积相差百倍以上（表 2-6）。这 9 只绿海龟家域的范围和海草床的分布相对较为接近（图 2-25），这也就表明海龟长时间的停留可能是出于觅食的目的。

表 2-6 9 只绿海龟家域面积

Table 2-6 Home range areas of the 9 green turtles

类型	编号	停留时长 (天)	大致位置	家域 (95%) 面积 (km ²)	核心区 (50%) 面积 (km ²)
II 型	34470	30	台湾岛东岸南端	43.37	12.65
	162719	65	卡巴莱特岛北侧	51.53	11.51
	153329	30	东沙岛附近	16.07	3.03
	162711	34	莆田海域	30.57	6.39
	162722	282	东沙岛附近	4.94	1.32
	198938	85	永兴岛附近	269.09	63.69
	153330	43	台湾岛北部	2.41	0.41
III 型	182154	156+128	北部湾白龙尾岛 /姑苏群岛附近	8.78 / 13.94	1.11 / 2.14
IV 型	198937	94	湛江硇洲岛海域	274.49	70.21

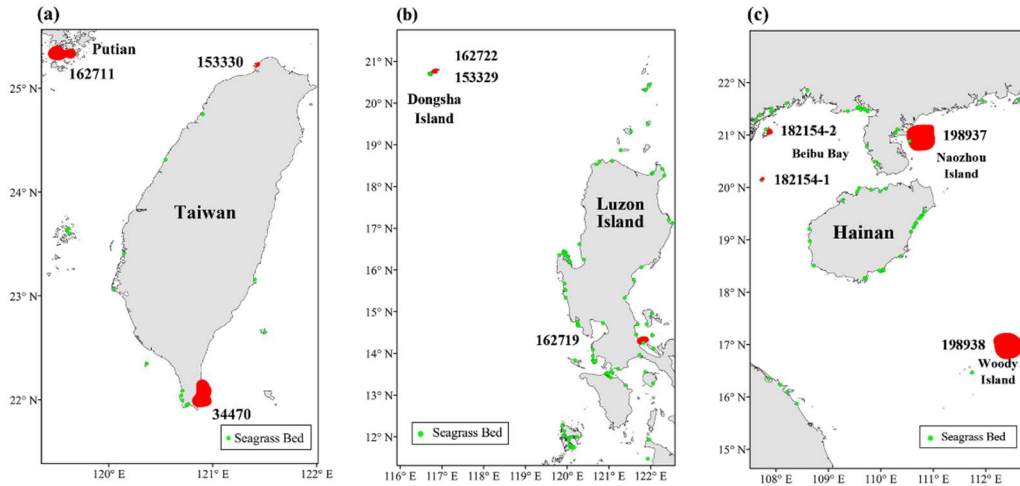


图 2-25 9 只绿海龟家域

Fig. 2-25 Home ranges of the 9 green turtles

2.3.6 II 型和 III 型绿海龟轨迹分段特征

2.3.6.1 迁移段迁移直线指数

II 型和 III 型的 8 只绿海龟的迁移时段 MSI 同整个迁移过程相比存在显著差异 ($p=0.043$) (表 2-7)。其中#182154 的第一段迁移过程最为明显, MSI 扩大为原来的 6 倍以上, 这也表明它们从出发点到停留地之间的迁移路线更加趋近于直线。此外 II 型和 III 型的迁移段 MSI 同 I 型迁移段 (整个追踪时段) 同样存在显著差异 ($p=0.027$)。

表 2-7 II 型和 III 型绿海龟迁移段的迁移直线指数 (MSI)

Table 2-7 Migration straight Index (MSI) of migratory periods of types II and III green turtles

类型	编号	追踪时段	全程 MSI	迁移段 MSI
II 型	34470	2018.5.25-2018.7.6	0.824	0.837
	162719	2019.1.21-2019.3.20	0.518	0.696
	153329	2018.12.24-2019.3.5	0.226	0.242
	162711	2018.11.1-2018.11.8	0.684	0.805
	162722	2018.6.11-2018.7.8	0.771	0.795
	198938	2022.1.18-2022.1.28	0.144	0.626
	153330	2018.1.8-2018.4.20	0.560	0.611
III 型	182154-1	2020.5.22-2020.5.30	0.095	0.656
	182154-2	2020.11.2-2020.11.8		0.341

2.3.6.2 迁移段与停留段水深对比

II 型和 III 型的 8 只绿海龟迁移段同停留段的对比结果显示两者的水深并没有出现显著差异 ($p=0.068$), 说明水深并非绿海龟运动状态的判断标准之一 (表 2-8)。

表 2-8 II 型和 III 型绿海龟迁移段和停留段水深对比

Table 2-8 Comparison of water depths between migratory and staying periods of types II and III green turtles

类型	编号	迁移段平均水深 (m)	停留段平均水深 (m)
II 型	34470	1953.474	266.222
	162719	669.923	5.622
	153329	729.028	13.720
	162711	8.714	7.500
	162722	44.857	9.750
	198938	919.727	485.782
	153330	27.359	10.094
III 型	182154	25.346	17.450

2.3.6.3 迁移段及停留段游速对比

II型和III型的8只绿海龟迁移段及停留段运动速度的对比发现,绿海龟的迁移段游速均显著高于停留段($p < 0.01$) (表 2-9)。

表 2-9 II型和III型绿海龟迁移段和停留段速度对比

Table 2-9 Comparison of the velocity between migratory and staying periods of tapes II and III green turtles

类型	编号	迁移段速度 (km/h)	停留段速度 (km/h)
II 型	34470	1.535	0.141
	162719	1.361	0.222
	153329	0.829	0.163
	162711	1.666	0.155
	162722	0.821	0.121
	198938	1.362	0.899
	153330	0.607	0.075
III 型	182154	0.946	0.135

2.3.6.4 SST 及 Chl-a 对比

II型和III型的8只绿海龟在迁移段和停留段的SST值($p = 0.304$)及Chl-a值($p = 0.113$)都没有显著差异(表 2-10)。而将II型和III型这8只绿海龟迁移段区域的SST极差、SST平均值、Chl-a极差、Chl-a平均值同它们迁移段时间、迁移段总距离以及迁移段MSI进行成对相关性的分析的结果显示,它们的皮尔逊相关性指数的显著性值全部大于0.05(表 2-11),这也表明追踪时段海龟所经过水域的SST、Chl-a水平同迁移路线之间并无实质性关系。

表 2-10 II 型和 III 型绿海龟停留段和迁移段 SST 和 Chl-a 对比

Table 2-10 Comparison of SST and Chl-a between staying and migratory periods of tapes II and III green turtles

类型	编号	SST (°C)		Chl-a (mg / m ³)	
		停留段	迁移段	停留段	迁移段
II 型	34470	28.51	29.49	0.37	0.14
	162719	29.54	25.85	0.18	0.23
	153329	25.32	23.41	0.21	0.45
	162711	19.65	20.54	3.78	2.81
	162722	28.32	29.20	1.35	0.53
	198938	25.35	24.89	0.15	0.17
	153330	25.89	22.64	1.76	0.71
III 型	182154	24.42	24.91	1.26	1.33

表 2-11 迁移段特征值与遥感特征值皮尔逊相关系数显著性值

Table 2-11 Significance values of Pearson correlation coefficient between remote sensing values and migratory period values

	迁移段追踪时间	迁移段追踪距离	迁移段 MSI
SST 极差	0.130	0.124	0.436
SST 均值	0.970	0.518	0.656
Chl-a 极差	0.219	0.097	0.114
Chl-a 均值	0.522	0.300	0.573

2.4 讨论

2.4.1 海域绿海龟迁移特点

20 只绿海龟的放流地点涉及福建、广东、广西、海南四个南部沿海的省份，以及在绿海龟分布相对较少的山东省【#34513（图 2-1）与#34514（图 2-2）】。因

此可以说本研究对于中国绿海龟行进轨迹的追踪做了较为系统的分析。根据获得的热点图显示，绿海龟的主要活动区域与 Ng et al. (2018)等人通过分析 28 只产卵后、误捕或搁浅绿海龟所得到的迁移结果基本吻合。本研究所追踪的#198938 还显示了西沙群岛永兴岛附近同样存在与中国海域绿海龟相关联的觅食热点区域，而#162723 的轨迹以及整体点迹的分布区域也证实了贯穿中国南部海域的迁移廊道的存在。此外由于追踪海龟数量的限制，Ng et al. (2018)中所描述的包括日本西表岛、海南东部万宁等区域在内的活动热点，在本研究中并未被发现，而这也体现出了扩大追踪海龟的样本数量对于活动热点确定的重要意义。

绿海龟的运动特点十分多样化，而根据它们的大致运动特征，本研究将其分为了四个类型，除了 IV 型海龟自获得信号之时便在该区域活动，其余海龟均或多或少表现出了他们的运动轨迹。通过对 I 型海龟的观察可以发现，有些绿海龟的目的性并不是那么强，可能是在一边行进一边觅食，因此他们并没有展现出对于前往特定觅食地点的急迫性，而只需要在沿途进食以满足它们的生存需要，这可能也解释了部分海龟看似没有目的性，未拘泥于固定海域的现象。而 I 型海龟当中还有海龟个体的情况与之恰好相反，编号 162723（图 2-13）海龟由雷州半岛附近沿大陆海岸线一路北上，并于 6 月底到达浙江外海。而浙江海域在夏季大型海藻生长旺盛，可以为绿海龟提供丰富的食物来源。编号 162723 海龟的迁移路径证明了叶明斌等人（2021）所提出的中国南部沿海存在海龟季节性迁移廊道的说法，以及浙江海域存在绿海龟夏季觅食场的观点。编号 162723 海龟的路径也表明了部分绿海龟对于食物具有一定的偏好。

编号 162712（图 2-9）、编号 162716（图 2-12）及编号 162719（图 2-19）海龟的路径均在菲律宾吕宋岛附近消失，这三只海龟在福建和山东放归，这表明在中国海域活动的绿海龟可能存在跨国界的南北向迁移。#162712 和#162719 到达吕宋岛海域的时间以及停留时间处于冬季和春季，因此它们可能均以吕宋岛南部海域丰富的海草床和珊瑚礁作为冬季的觅食场。

MSI 可以反映海龟迁移的曲折程度（Sandoval-Lugo et al. 2020）。纵观 20 只海龟整个追踪时段的 MSI，从不到 0.01 到 0.8，展现了极大的跨度，而这也说明了它们采取的迁移策略大相径庭。除去编号 198937（图 2-6）海龟自追踪开始便进入了停留区域，其它类型的海龟当中有相当一部分的觅食策略可以认为是边游

动边寻找，这也就导致部分迁移路线比较曲折，MSI 较低。比较典型的诸如 I 型的编号 34474 绿海龟（图 2-17），其在海南岛、西沙群岛、北部湾以及越南南部海域多处曾做过短暂停留，并最终在越南南部海域停留时失去信号，有可能这又是一处短暂停留，也有可能这便是它最终的目的地，它路线的曲折性、较长的跟踪时间均导致了较低的 MSI 值。从整体的迁移轨迹来看，#34513（图 2-1）、#162723（图 2-13）、#162712（图 2-9）、#34470（图 2-16）都展现出了很强的目的性，而它们的 MSI 相对也较高（表 2-4）。有学者认为这种迁移方式的海龟可能是由于自身的能量储备不多（如产卵后迁移的雌龟），因此迫切想要前往已知的觅食场进食以补充能量（Zollner & Lima 1999; Sandoval-Lugo et al. 2020）。相较之下，展现出停留地点的 II、III 型海龟的迁移段 MSI 会比 I 型更高，猜测其原因也可能是由于其目的地已经确立，或自身的能量储备不足，因此迁移的目的性会更强，从而压缩了徘徊逗留寻找食物的“机会主义”时间。当然，对于 MSI 的评估也要结合实际情况。比如编号 162722（图 2-20）海龟，其 MSI 值高达 0.771，但在其 300 多天的追踪时间当中，仅有 19 个数据点。从 2018 年 9 月到 2019 年 2 月之间杳无音信，只能用直线连接恢复信号前后的两个数据点来近似代替海龟在这期间的行动轨迹，而这也是它的 MSI 偏高的原因。可见更多的点迹坐标及追踪时长将更有利于 MSI 反映海龟真实的运动状况。

从水深分析结果看，追踪的绿海龟更偏向于 200 米以浅的浅海地区，尤其是水深不超过 20 米的水域，由于该深度也是适宜海草床和造礁石珊瑚生长的深度（Short et al. 2007, 黄晖 2021），因此猜测绿海龟在这一深度停留是出于觅食的目的。然而对于在停留区停留了一段时间的 3 只绿海龟（#153329, #34470, #198938）来说，深水区超过 50% 的占比看似并不十分合理（图 2-24）。对于 #153329（图 2-14）和 #34470（图 2-16）来说，海龟到达停留区域的时段相对于整个追踪时段来说相对较短，而迁移时段又多数经过水深较大的区域，因而也造成了深水段占比较大的现象。此外，针对停留段较大的水深，这里存在两种解释，一种解释是这三只海龟停留的栖息地是面积较小的珊瑚礁盘，而礁盘以外则是水深较大的区域，这导致海龟的活动范围会常常超出礁盘觅食区；另一种解释是，通过 ETOPO 下载的深度数据的分辨率为 1'，对于编号 34470（图 2-16）海龟所停留的台湾垦丁海域来说，其东侧岛缘陆架较为狭窄，大陆坡陡峭且紧邻较深海槽，

因此深度变化较大,深度数据所定位的栅格中心可能已经落到了深度较深的海槽或大陆坡上,因而显示海龟位于深度较大的海域。后者解释对于在永兴岛附近停留的编号 198938 (图 2-7) 海龟同样适用。

根据经过区域的遥感数据显示,绿海龟对温度和叶绿素的适应性较强,能够在温度及叶绿素 a 浓度跨度较大的环境下生存,而这一点也曾在加拉帕格斯群岛的一项关于产卵后海龟迁移路径的研究中得到过证明 (Seminoff et al. 2008)。由于海龟是冷血动物,需要依靠周围的水温来维持他们身体的温度,因此它们不能长期处于低于 12 °C 的环境当中,否则便会出现“冷昏迷”现象 (Niemuth et al. 2020)。在整个观测时段当中,仅编号 34513 (图 2-1) 绿海龟所身处的最低温度为 9.605 °C (表 2-5),而这一温度处于它刚刚放归的徘徊时段,在该低温水域停留了仅仅 1-2 天后,这只海龟边游向了更为温暖的水域,并在适应了环境后定向南迁。由此可见,绿海龟并不会长期处于恶劣的环境下,积极的游动为它们寻找环境因子更为合适的栖息地提供了可能。此外,绿海龟对于温度及 Chl-a 的变化有一定的耐受力,比如编号 182154 海龟在它的两个停留区域均经历了较为宽泛的温度和 Chl-a 的变化 (表 2-5),但该只海龟却没有因为环境因子的变动而离开自己的栖息地 (图 2-3)。

红海龟对于 Chl-a 较高的海域具有明显的偏好,表现为 MSI 值同 Chl-a 值呈现显著的负相关关系 (McCarthy et al. 2010),而对于 Chl-a 的观测可能也可以成为一种了解红海龟潜在活动热点的手段之一。然而,绿海龟对于温度及 Chl-a 并没有倾向性。这可能由于绿海龟集中分布的海草床以及珊瑚礁具有固定性,如果能对中国所在的东亚地区区域管理单元的基本情况及西沙群岛绿海龟产卵群体所对应的迁移路线和觅食场有所了解,或许将会更加容易推知绿海龟的活动区域。

2.4.2 保护建议

通过本研究的卫星定位追踪结果可以看出,绿海龟的迁移路线尽管十分多样,且与 SST、Chl-a 等遥感数据并未呈现显著的相关性,但主要覆盖区域是集中在中国南部海域,尤其是贯穿从北部湾一直延伸到福建莆田的沿海地区。由于中国近海较高的渔业捕捞强度 (Kang et al. 2018) 以及活动热点区域同渔业捕捞区域较高的重合度,绿海龟的生存空间被极度压缩,而中国近海误捕误伤海龟的事件

也屡见不鲜，这就要求在与海龟活动重合度较高的区域适当限制渔业捕捞，与此同时加快对于渔具渔法的规范，和对 TED (Turtle Excluder Devices) 等“海龟友好型”网具的推广 (Ishihara et al. 2011)。

海龟栖息地的保护十分重要，同时应该是产卵场和觅食场的共同保护。目前，中国对于绿海龟产卵场的国家级保护区仅包括广东惠东。针对海草床的国家级保护仅有北海的儒艮保护区。可见目前国家对于海龟的主要栖息和觅食区域的保护十分有限。本项研究根据追踪轨迹所确立的活动热点区域以及家域可为进一步建立针对海龟觅食地而设立保护区提供基本依据，以期为中国海域绿海龟的活动提供更多实质性的保护。

本研究所追踪绿海龟的轨迹还涉及越南、菲律宾等周边国家，且在菲律宾存在一个面积达 50 km² 以上的家域范围，这表明了开展国家间合作的重要性。与东南亚国家一道开展海龟研究，调查现存产卵场的基本情况及其群体遗传学信息，开展卫星定位追踪从而通过大量数据精确海龟在不同国家水域之间的迁移轨迹和活动热点，将对东亚区域管理单元信息的丰富起到至关重要的作用，也将为国家间建立联合保护区从而实现有效保护提供理论依据。

卫星定位追踪是研究海龟迁移路径及活动热点的有效手段，而想要进一步发挥卫星定位追踪的效力，还应当放归前做好对于海龟基础信息的记录，除了背甲长、背甲宽、体重和性别等基础生物学信息，还应当对海龟的来源进行详细询问和记录，从而评估同后续追踪数据的关联性。此外也要尽可能记录海龟放归前的状态，包括进食情况、食性偏好、腹部凹陷情况等等，并检查是否存在受伤的迹象，从而便于后续对于迁移路线做出科学的判断和预测。

第三章 西沙群岛绿海龟产卵群体遗传特征

3.1 绪论

绿海龟是广泛分布于全球热带及亚热带沿岸水域的标志性物种之一,它的活动范围覆盖全球 140 多个国家,而这其中 80 多个国家又存在绿海龟的产卵场 (Groombridge & Luxmoore 1989; Hirth 1997)。作为著名的洄游性物种,绿海龟有着复杂的运动和迁移规律,且对其产卵场高度忠诚 (Hamann et al. 2003)。

绿海龟的种群数量下降是一个长期存在的全球性问题 (Schwartz et al. 2007)。过度捕杀产卵雌龟、盗蛋、渔业兼捕、海岸带开发造成的产卵场环境恶化和破坏等因素已经导致绿海龟的数量严重下降。全球各国对于海龟的保护措施不尽相同,不同地区绿海龟群体的数量也是有升有降 (Bjorndal & Bolten 2008; Seminoff et al. 2015),而这也对评估各国各地区的保护效果并制定有效的保护计划提出了挑战。

绿海龟种群评估体系将全球的绿海龟种群按照不同的方式划分为若干个亚群体,以便在适当的地理范围内进行现状和风险评估,而这也有助于实现绿海龟种群遗传多样性的保护 (Seminoff 2004; Komoroske et al. 2017)。这些亚群体包括区域管理单元 (Regional Management Unit, RMU) (Wallace et al. 2010) 和差异群体聚群 (Distinct Population Segments, DPS) (Seminoff et al. 2015)。每一个这样的绿海龟亚群体单元,都由几个相互独立的“管理单元”(Management Unit, MU) 组成,而一个管理单元又由一个或多个临近地区的产卵群体 (rookery) 组成 (Jensen et al. 2019)。对于绿海龟来说,同一管理单元内不同产卵场之间的最远距离不超过 500 km (Dethmers et al. 2006)。

对于绿海龟来说,识别管理单元通常基于线粒体 DNA (mtDNA) 等位基因或单倍型频率的显著差异,而无需考虑单倍型的系统发育进化过程 (Moritz 1994)。860 bp 的 mtDNA 控制区 (control region) 包含足够的变异,通常用于精细的检测样本中的单倍型变种 (Taylor & Dizon 1999; Formia et al. 2006)。然而,较短的控制区序列 (比如早期研究常用的 384 bp 长度序列) 也可以大致区分不同的单倍型个体 (Norman et al. 1994)。迄今为止,通过对于 27 个不同地区绿海龟产卵场产卵个体的采样分析,研究人员利用 384 bp 的线粒体控制区片段,在澳大利

亚水域确认了 25 种单倍型、5 个进化分支以及 17 个 MUs (Dethmers et al. 2006)。此外, Jensen et al. (2019) 基于 386 bp 的控制区片段, 在全球 127 个绿海龟栖息地中鉴定出了 11 个进化分支 (分支 I-分支 XI), 并根据进化的相对独立性将 58 个 MUs 划分为了 12 个地理区域。在这 12 个地区中, 印度洋-太平洋地区 (Indo-Pacific Region) 由 15 个 MUs 组成, 包含 5 个进化分支 (III、IV、V、VII 和 VIII), 并覆盖了从中国南部到东南亚再到澳大利亚北部的大片区域, 而日本地区 (Japan Region) 由 4 个 MUs 组成, 包括 4 个进化分支 (III、IV、VII 和 VIII), 该区域内的产卵场均位于日本大陆以南的群岛 (如小笠原群岛、琉球群岛和八重山群岛)。

在中国, 几乎所有历史上记录的沿岸绿海龟产卵场 (包括广东、海南和香港) 都已经消失或严重衰退 (Chan et al. 2007)。在全球划定的 17 个区域管理单元 (RMU) 中, 台湾的产卵群体属于西北太平洋 RMU, 南海的产卵群体属于西太平洋/东南亚 RMU (Wallace et al. 2010)。此外, 在全球确定的 12 个差异群体聚群 (DPS) 中, 中国的产卵场则隶属于东印度洋-西太平洋 DPS (Seminoff et al. 2015)。目前在中国, 只有 2 个确立了的 MUs: 一个位于台湾西部 (澎湖列岛的万安岛), 另一个位于台湾东部 (兰屿) (Cheng et al. 2008; Jensen et al. 2019)。总的来看, 目前为止有关在中国绿海龟产卵群体的研究十分有限, 西太平洋地区的绿海龟产卵群体遗传学研究在南海区域仍旧存在空白。

南海的三个群岛有绿海龟产卵场, 包括北部的东沙岛 (Chan et al. 2007), 南部南沙群岛上的太平岛 (Cheng 1996) 和中部的西沙群岛多个岛礁 (Chan et al. 2007)。最近, 西沙群岛七连屿证实是中国现存最大的绿海龟产卵场, 2016 年至 2021 年每年记录的蛋窝数均超过 100 个 (Jia et al. 2019; 七连屿工委监测数据, 2016-2021)。七连屿包括 8 个岛屿 (西沙洲、赵述岛、北岛、中岛、南岛、北沙洲、中沙洲、南沙洲), 位于同一珊瑚礁盘上, 最远的两个岛屿之间相距约仅为 16 公里。此外, 在西沙群岛的永乐群岛, 包括晋卿岛和甘泉岛, 也有绿海龟产卵场的报道; 然而, 产卵规模不明 (Jia et al. 2019) (图 3-1)。

近年开展的为数不多的中国绿海龟群体遗传学研究表明, 西沙群岛的绿海龟产卵群体具有独特性。Ng et al. (2014, 2017) 曾指出由于广东惠东和香港南丫岛绿海龟产卵场 (约 90 公里的直线距离) 所获得的样品序列太少, 因此同西沙群岛产卵群体之间的亲缘关系仍不得而知。从西沙群岛蛋窝中获取的 16 个样本数

据表明在该区域产卵的绿海龟群体遗传学特征是与众不同的,可能代表一个独特的地理种群 (Gaillard et al. 2021), 而进一步的深入研究并未展开。

虽然存在采样困难的原因,但是南海西沙群岛绿海龟产卵群体的遗传结构研究亟待进一步深入。本研究通过采集西沙群岛七连屿绿海龟产卵场部分孵化后蛋窝中的死蛋、死胚胎或死稚龟样品,并对其 mtDNA 的控制区段进行测序,获得该产卵场绿海龟产卵群体所出现的单倍型类型,并通过与发表文献中的数据进行比较分析,确定西沙群岛产卵群体结构及其与其它印度洋-太平洋地区产卵群体的系统地理关系,而本研究的结果也将为制定我国和国际海龟保护行动计划以及针对性保护西沙群岛绿海龟产卵场及产卵群体提供科学依据。

注: 本章节研究成果已发表 (Song et al. 2022)。

3.2 材料与方法

3.2.1 取样

2017 年至 2019 年在七连屿的北岛 ($n=9$)、中岛 ($n=3$) 和南沙洲 ($n=1$) 三个岛屿上收集到了 13 个孵化后蛋窝中的死蛋、死胚胎或死稚龟样品。这三个岛屿之间的直线距离均小于 6 km, 且无地理屏障, 均属于同一珊瑚礁盘 (图 3-1), 而根据筑巢地点和日期来看, 几乎可以排除这些蛋窝来自于同只雌性海龟。

对于死亡海龟蛋, 本研究提取卵黄作为样品, 若死蛋内胚胎已经成型, 则尽可能取胚胎作为样品, 而对已死稚龟则取其左前鳍肢的一部分作为样品。本研究从每个死蛋/胚胎/稚龟中分离 2 g 左右的组织, 并将样品做好编号和记录, 保存在 95% 的乙醇溶液当中, 用于后续 DNA 提取。此外, 本研究将同一蛋窝中每一个残留的死蛋/胚胎/稚龟均进行留样 (在可以获得多个样品的情况下), 用于后续的质控并防止因为部分样品降解而对实验结果产生影响。

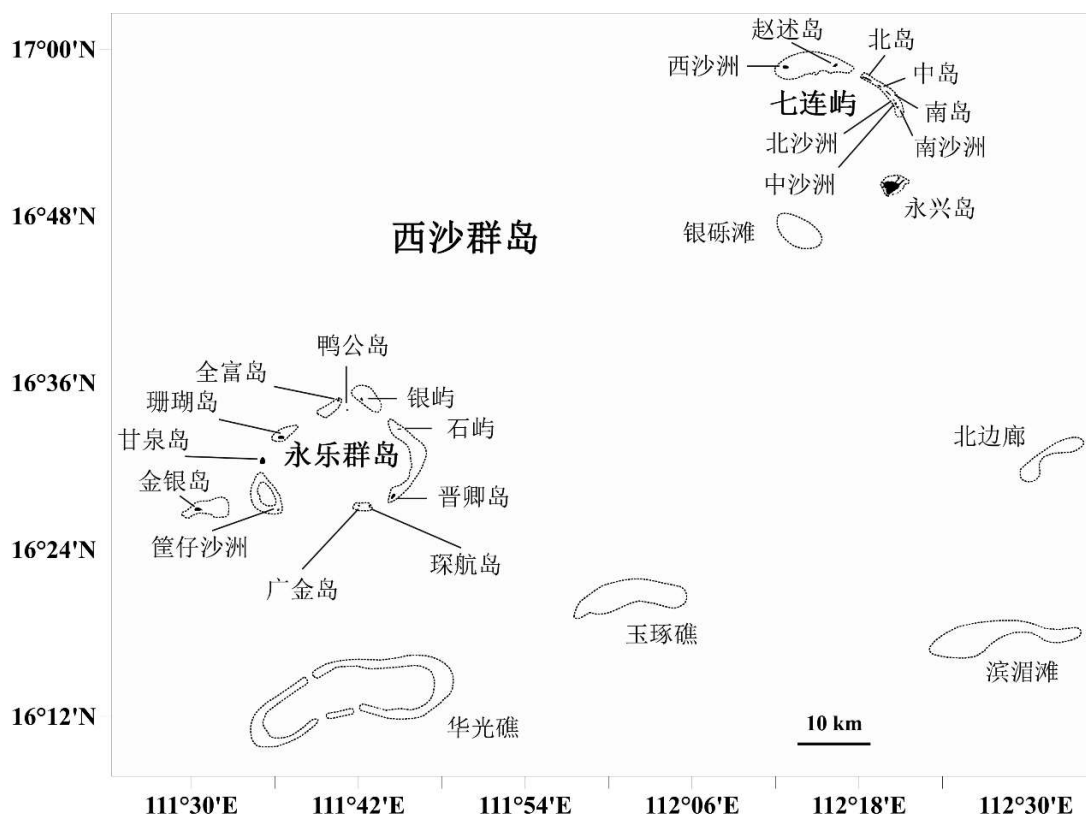


图 3-1 西沙群岛地图

Fig.3-1 Map of Xisha Islands

3.2.2 实验仪器及相关试剂

实验仪器及相关试剂如表 3-1 所示。

表 3-1 实验仪器、试剂及生产公司

Table 3-1 List of equipment and chemicals used in this study and their manufacturers

实验仪器	生产公司
PCR 仪	美国 ABI 公司
凝胶成像仪	上海复日科技有限公司
台式高速离心机	湖南湘仪实验仪器开发有限公司
电泳仪及电泳槽	北京六一仪器厂
微型旋涡混合仪	上海沪西分析仪器厂有限公司
数显恒温水浴锅	太仓市科教器材厂
电热炉	嘉兴市凤桥电热器厂
冰箱	青岛海尔股份有限公司
实验试剂	生产公司
蛋白酶 K	美国 Sigma-Aldrich 公司
Chelex®100 树脂溶液	美国 Bio-Rad 公司
Primer (正向+反向)	上海生工生物工程股份有限公司
Taq Plus DNA 聚合酶	Takara 生物技术有限公司
10 * PCR Buffer (含 Mg ²⁺)	上海生工生物工程股份有限公司
dNTP (10mM)	上海生工生物工程股份有限公司
去离子水	上海生工生物工程股份有限公司
DuGreen 核酸染料	北京泛博身无化学有限公司
Marker DL2000	Takara 生物技术有限公司
琼脂糖	西班牙 BIOWEST 公司
TAE 缓冲液	上海百赛生物技术有限公司

其它实验器材：剪刀、镊子、0.2 ml 离心管若干、1.5 ml 离心管若干、移液枪、药匙、石棉网、锥形瓶。

3.2.3 DNA 提取实验步骤

(1) 加样

使用 Chelex®100 树脂液 (Bio-Rad Laboratories) 提取样品的 mtDNA。首先利用去离子水和 Chelex 树脂母液配置 10% 的 Chelex 树脂溶液。从各样品中取出约 0.1 g 样品, 将其剪碎 (死胚胎或稚龟的肌肉组织) 或打散 (死蛋的卵黄) 放入 0.2 ml 离心管中, 向离心管中加入 95-96 μl 10% Chelex 树脂溶液和 5 μl 蛋白酶 K 溶液, 添加完毕后在微型旋涡混合仪上混合 10-15 秒。

(2) 样品消解

将样品置于 56 °C 的恒温水浴锅中消解 60 分钟, 取出后在漩涡混合仪上震荡混合 10-15 秒; 再将其放入 PCR 仪中设置为 99 °C 加热 15 分钟使蛋白质变性; 后 37 °C 的水浴条件下静置 1 分钟; 再放入设置为 99 °C 的 PCR 仪中加热 15 分钟, 最后取出放入 4 °C 条件下冷却; 低速离心, 取上清液至 0.5 ml 离心管中, 放入 -20 °C 冰箱中保存或直接进行扩增。

(3) 聚合酶链式反应 (PCR) 扩增

使用引物 LCM15382 (5'-GCT TAA CCC TAA AGC ATT GG-3') 和 H950 (5'-GTC TCG GAT TTA GGG GTT TG-3') 对长度约 800 bp 的 mtDNA 控制区片段的正向和反向序列进行 PCR 扩增 (Abreu-Grobois et al. 2006)。扩增过程如下: 在 25 μl 的 PCR 体系中加入 0.15 μl 正向引物 (10 μM), 0.15 μl 反向引物 (10 μM), 2.0 μl dNTP (10 mM), 2.5 μl 10 \times Buffer 缓冲液 (15 mM MgCl_2), 0.2 μl Taq 聚合酶 (5 $\text{U}\mu\text{l}^{-1}$), 2 μl DNA 模板 (20-50 $\text{ng}\mu\text{l}^{-1}$) 和 18 μl 去离子水。PCR 扩增使用标准化条件: 在 94 °C 下变性 30 秒, 在 58 °C 下退火 30 秒, 在 72 °C 下延伸 60 秒, 进行 38 个循环, 最后放于 4 °C 冰箱进行保存。

(4) 琼脂糖凝胶电泳

琼脂糖凝胶的制备: 在 250 ml 锥形瓶中加入 1.5% 琼脂粉 0.45 g, 倒入 TAE 电泳缓冲液 30 ml 摇匀, 在锥形瓶下垫石棉网, 放在电热炉上加热煮沸, 使琼脂糖粉完全溶解后停止加热, 加入 3 μl 核酸染料后边用冷水冷却边摇晃锥形瓶, 在冷却至 40-50 °C 之后将其倒入模具中使琼脂糖凝胶冷却成形。

将电泳仪内倒入适量 TAE 缓冲液, 将制好的琼脂糖凝胶置于其中, 使用移

液枪在琼脂糖凝胶内加入 PCR 扩增后的样品以及 Marker 2000 试剂，后接通电源进行电泳监测。电泳结束后将凝胶放到凝胶成像系统下观察拍照，并根据显示的条带结果，选择结果较好的 PCR 扩增产物送测（Sangon Biotech）。

3.2.4 DNA 序列处理及识别

测序得到的正向和反向序列通过 DNA STAR Lasergene SeqMan Pro 7.1.0 进行拼接，随后使用 BioEdit 软件将拼接好的序列进行剪接和对齐，完成后将得到的序列放入美国国家生物技术信息中心（National Center for Biotechnology Information, NCBI）的 GenBank 数据库中进行 BLAST 比对，用于识别样品的单倍型类型（Sayers et al. 2019）。由于较短的控制区片段，尤其是长度为 384 bp 的片段，通常被用于比对和分析绿海龟的群体结构，本研究在获得长度为 800 bp 左右序列后，将其剪为 384 bp 的片段长度便于同其他文献中的序列进行比对，并使用标准化的 CmP 命名法进行命名（Jensen et al. 2019; Gaillard et al. 2021; P. H. Dutton Uupubl.data）。一般地说，整数形式的单倍型名称（例如 CmPx）代表长度为 384 bp 序列，而带有十进制后缀的单倍型（例如 CmPx.1）代表这些 384 bp 单倍型的相应变体，这些变体的识别则基于 384 bp 外更长序列上的不同。由于用于质量控制的同一蛋窝中的全部样本是 100%相同的，本研究只从每个蛋窝中选择一个样品序列进行下一步分析。

3.2.5 统计分析

在近期的一个研究（Gaillard et al. 2021）中，2012 年-2018 年从相距约 93 公里的七连屿和永乐群岛上的不同海龟蛋窝中采集了 16 只死亡绿海龟稚龟（*L. Linpers. comm.*）（图 3-1）。为了检验西沙群岛这两个数据集之间的同质性，本研究先利用 Arlequin 3.5.2.2 对其进行了基于遗传距离（ Φ_{ST} ）的分子方差分析（AMOVA），另外还通过精确性检验（exact test）（参数设置：Markov chain: 500000 steps; Dememorization: 10000 steps）和成对 F_{ST} 分析来对两组数据进行额外的分化测试（Nishizawa et al. 2013）。在证实没有显著差异的情况下，将两项研究的数据结合起来作为西沙群岛这一地区的样品（即 29 个）进行进一步分析（见结果部分）。

本研究将西沙群岛绿海龟产卵场同印度洋-太平洋地区和日本地区内共 19 个记录在案的绿海龟 MUs 进行成对比较测试 (Jensen et al. 2019), 对这些产卵群体使用精确性检验 (exact test), 基于单倍型频率的 F_{ST} 检验以及结合了遗传距离信息的 Φ_{ST} 检验 (运用 Kimura 2-parameter 模型计算距离矩阵), 并将 α 显著性水平设定为 0.05 来确定西沙群岛是否可以被视为一个新的管理单元 (sensu Moritz 1994)。随后又利用分子方差分析 (AMOVA) 将印度洋-太平洋和日本两个地区 (Jensen et al. 2019) 中的所有管理单元进行了进一步比较。上述的分析过程均通过 Arlequin 3.5.2.2 软件进行计算, 此外还利用该软件计算了西沙群岛地区样本的核苷酸多样性值 (π) 以及单倍型多样性值 (h) (Excoffier & Lischer 2010)。

印度洋-太平洋地区、日本地区以及本研究所获得的所有单倍型序列 (Ng et al. 2014, 2017; Jensen et al. 2019; Gaillard et al. 2021) 的系统地理关系通过 MEGA6.06 构建邻接系统发育树进行推断, 在建树过程中利用平背龟 (*Natator depressus*) 作为外群, 并将重复检验次数 (pseudo-replications) 设置为 10000 次 (Koichiro et al. 2013)。

3.3 结果

3.3.1 单倍型和进化分支

13 个样品中共确定了 5 个片段长度约为 800 bp 的单倍型, 包括 3 个已记录的单倍型 (CmP18.1, CmP19.1, CmP20.1)、CmP243.1 (GenBank 序列号为 MW631941, 即 CmP75.1 延长 83 bp 后的单倍型) 和 1 个新单倍型 (CmP244.1, GenBank 序列号为 MW631940)。CmP19.1 是最常见的单倍型, 共在 8 个样品中发现 (占 61.5%), 其中北岛 7 个, 南沙洲 1 个 (表 3-2)。

5 个截短后的 384 bp 单倍型共包含 24 个多态位点, 突变类型均为转换。CmP243 (MW013461) 可以通过 1 个替换位点识别, CmP244 (MW013460) 由 2 个替换位点识别。此外, 在另一项关于西沙群岛海龟单倍型的研究中也发现了 4 个 384 bp 的单倍型 (CmP18、CmP19、CmP49、CmP54) (Gaillard et al. 2021), 使得 2 个独立的西沙群岛研究共观察到的单倍型类型达到了 7 个 (表 3-3)。根据构建的邻接系统发育树进行判断, CmP18、CmP19、CmP49 和 CmP243 属于进

化分支 VIII, 而 CmP20、CmP54 和 CmP244 属于分支进化 III (Jensen et al. 2019) (图 3-2)。

表 3-2 西沙群岛七连屿各采样岛屿所对应的基本信息及所属单倍型
Table 3-2 Sampling information from the islands at Qilianyu cluster of Xisha
Islands, and the available haplotype(s)

采样岛屿	蛋窝数	产卵日期	单倍型	进化分支*	核苷酸多样性	单倍型多样性
					指数 (π) (平均值 \pm 标准差)	指数(h) (平均值 \pm 标准差)
中岛	1	2017.7.5	CmP20.1	III	0.039 \pm 0.030	0.667 \pm 0.314
	2	2017.6.23 2017.7.5	CmP243.1	VIII		
北岛	1	2019.8	CmP18.1	VIII	0.014 \pm 0.009	0.417 \pm 0.191
	7	2018.8 2019.7.16 2019.7.27 2019.8.1 2019.8.3 2019.8 2019.10	CmP19.1	VIII		
	1	2019.8	CmP244.1	III		
	1	2019.7.23	CmP19.1	VIII		
	1	2019.8	CmP244.1	III		
	1	2019.7.23	CmP19.1	VIII		
南沙洲	1	2019.7.23	CmP19.1	VIII	0.000 \pm 0.000	1.000 \pm 0.000
合计	13		5		0.018 \pm 0.010	0.628 \pm 0.143

*: 进化分支类别根据 Jensen et al. (2019)进行划分

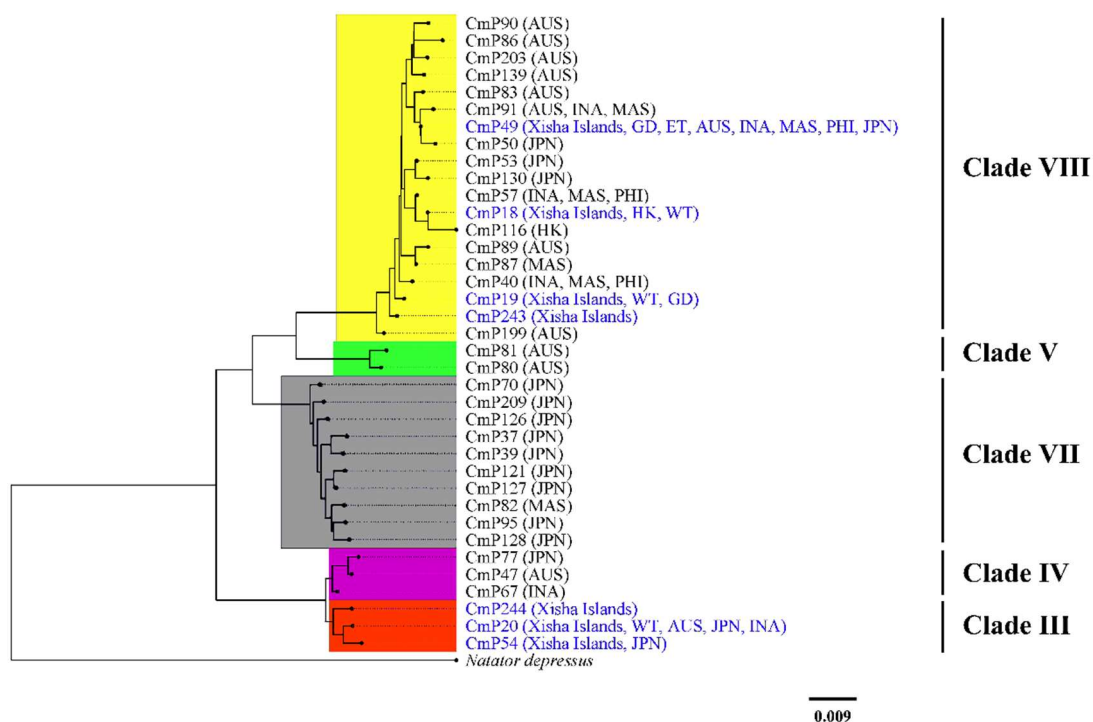


图 3-2 由印度洋-太平洋地区及日本地区出现的 37 个单倍型类型（含西沙群岛的 7 个（蓝色字体））构筑的邻接系统发育树

Fig.3-2 Neighbor-Joining tree constructed by the 37 haplotypes from rookeries of green turtles (*Chelonia mydas*) in the Indo-Pacific and Japan regions, including the seven haplotypes (blue) from the Xisha Islands

缩写：AUS = Australia; ET = Eastern Taiwan; GD = Guangdong; HK = Hong Kong; INA = Indonesia; JPN = Japan; MAS = Malaysia; PHI = Philippines; WT = Western Taiwan

3.3.2 管理单元的建立

分子方差分析 (AMOVA)、精确性检验 ($p = 0.0997$) 和 F_{ST} ($F_{ST} = 0.015$, $p = 0.2760$) 的结果都表明本研究和 Gaillard et al. (2020) 研究的两个数据集之间无差异性, 因此将 2 个研究得到的数据合并, 共同代表西沙群岛的产卵群体数据 (29 个样品), 以供进一步分析 (表 3-3)。

表 3-3 西沙群岛产卵场出现的单倍型所对应的进化分支及蛋窝数目
Table 3-3 Clades and the number of nests corresponding to the haplotypes in Xisha Islands nesting grounds

进化分支	单倍型	蛋窝数目 (个)	参考文献
III	CmP20	1	Song et al. (2022); 本研究
	CmP54	1	Gaillard et al. (2021)
	CmP244	1	Song et al. (2022); 本研究
VIII	CmP18	2	Gaillard et al. (2021); Song et al. (2022); 本研究
	CmP19	18	Gaillard et al. (2021); Song et al. (2022); 本研究
	CmP49*	4	Gaillard et al. (2021)
	CmP243	2	Song et al. (2022); 本研究
	总计	29	

*: 经确认, 在原文 Gaillard et al. (2021)中记载为 CmP83 的单倍型实为 CmP49, 在本研究中进行了更正。进化分支名称依据 Jensen et al. (2019)。

精确性检验表明, 西沙群岛产卵群体与印度洋-太平洋及日本地区内的全部 19 个管理单元之间均存在显著差异 ($p < 0.0001$) (表 3-4)。所有两两群体比较的 F_{ST} 值范围在 0.283 至 0.659 之间, 且均具有显著性 ($p < 0.0001$)。通过 Φ_{ST} 分析, 19 对比较当中的 18 对显示出了显著差异 (其中与 16 个管理单元的 p 值小于 0.01, 与 2 个管理单元比较的 p 值介于 0.01 至 0.05 之间), 而同澳大利亚 Cocos Keeling Island 管理单元的比较则并没有显示出差异的显著性 ($p > 0.1$)。

根据西沙群岛产卵群体同印度-太平洋地区的其他管理单元之间出现显著差异的结果, 本研究认为应当把西沙群岛的产卵群体视为一个新的管理单元, 而在该管理单元方圆 500 km 的范围内暂时还并未发现任何其他的产卵群体(图 3-3)。

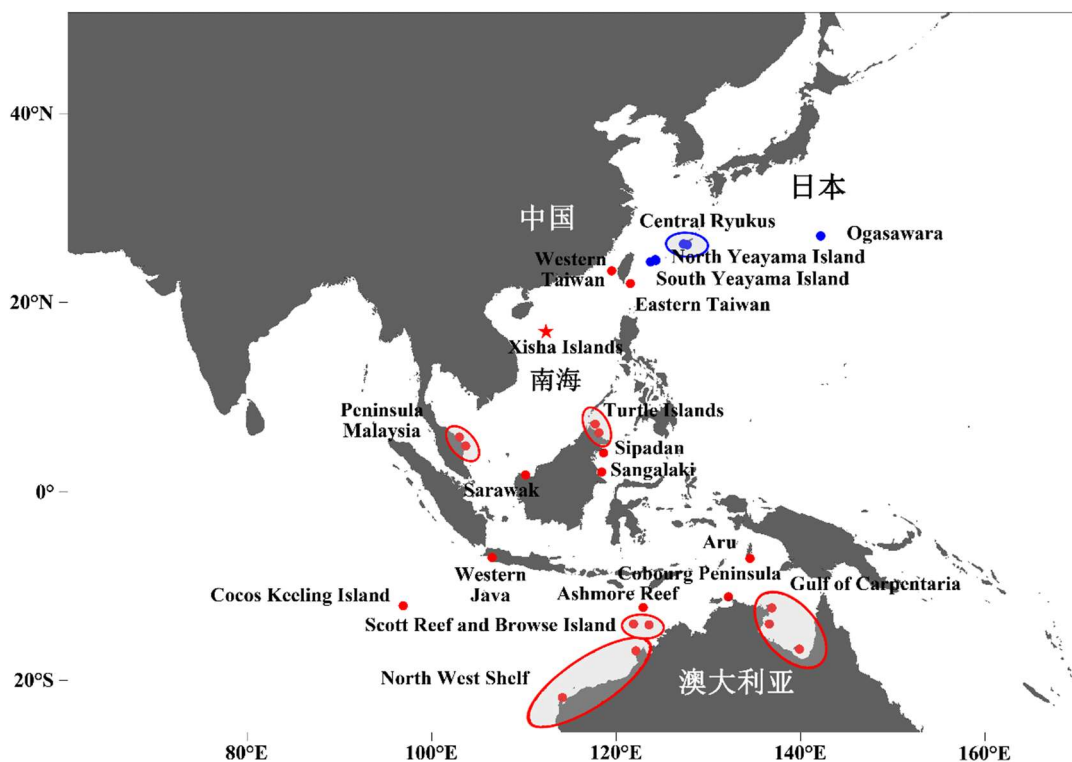


图 3-3 印度洋-太平洋地区（红点）及日本地区（蓝点）的 20 个管理单元。（红色和蓝色圆圈代表由一个产卵群体组成的管理单元）

Fig. 3-3 Twenty management units in Indo-Pacific (red dots) and Japan (blue dots) regions. Red and blue circles indicate a management unit having more than one rookery.

表 3-4 西沙群岛产卵群体同印度洋-太平洋（含香港及广东两个产卵群体）及日本地区管理单元的差异检验

Table 3-4 Difference tests between Xisha Islands rookery and the management units of Indo-Pacific (including Hongkong and Guangdong two rookeries) and Japan areas

地区	管理单元	国家	样本量	精确度检验	F _{ST} 检验	Φ _{ST} 检验	参考文献
印度-太平洋	Guangdong (rookery)	中国	2	$p = 0.6341$	-0.161 ($p = 0.9999$)	-0.257 ($p = 0.9999$)	Ng et al. (2017)
印度-太平洋	Hong Kong (rookery)	中国	6	$p = 0.0003$	0.448** ($p < 0.0001$)	0.322** ($p = 0.0041$)	Ng et al. (2014)
印度-太平洋	Western Taiwan	中国	40	$p < 0.0001$	0.420** ($p < 0.0001$)	0.150** ($p = 0.0050$)	Cheng et al. (2008)
印度-太平洋	Eastern Taiwan	中国	14	$p < 0.0001$	0.571** ($p < 0.0001$)	0.151* ($p = 0.0313$)	Cheng et al. (2008)
印度-太平洋	Western Java	印度尼西亚	23	$p < 0.0001$	0.433** ($p < 0.0001$)	0.187** ($p < 0.0001$)	Dethmers et al. (2006)
印度-太平洋	Aru	印度尼西亚	28	$p < 0.0001$	0.659** ($p < 0.0001$)	0.278** ($p < 0.0001$)	Dethmers et al. (2006)
印度-太平洋	Sangalaki	印度尼西亚	29	$p < 0.0001$	0.283** ($p < 0.0001$)	0.126** ($p < 0.0001$)	Dethmers et al.

平洋							(2006)
印度-太	Sipadan	马来西亚	30	$p < 0.0001$	0.357** ($p < 0.0001$)	0.199** ($p < 0.0001$)	Dethmers et al. (2006)
平洋							(2006)
印度-太	Turtle Islands	马来西亚、	67	$p < 0.0001$	0.545** ($p < 0.0001$)	0.409** ($p < 0.0001$)	Dethmers et al. (2006)
平洋		菲律宾					(2006)
印度-太	Sarawak	马来西亚	22	$p < 0.0001$	0.517** ($p < 0.0001$)	0.197** ($p = 0.0001$)	Dethmers et al. (2006)
平洋							(2006)
印度-太	Peninsula	马来西亚	27	$p < 0.0001$	0.469** ($p < 0.0001$)	0.080* ($p = 0.0242$)	Dethmers et al. (2006)
平洋	Malaysia						(2006)
印度-太	Cocos Keeling	澳大利亚	19	$p < 0.0001$	0.514** ($p < 0.0001$)	0.045 ($p = 0.1409$)	Jensen et al. (2016)
平洋	Island						
印度-太	Ashmore Reef	澳大利亚	20	$p < 0.0001$	0.315** ($p < 0.0001$)	0.280** ($p = 0.0009$)	Dethmers et al. (2006)
平洋							(2006)
印度-太	Scott Reef and	澳大利亚	65	$p < 0.0001$	0.395** ($p < 0.0001$)	0.181** ($p = 0.0001$)	Jensen et al. (2016)
平洋	Browse Island						
印度-太	North West Shelf	澳大利亚	45	$p < 0.0001$	0.529** ($p < 0.0001$)	0.296** ($p < 0.0001$)	Dethmers et al. (2006)
平洋							(2006)

印度-太平洋	Cobourg Peninsula	澳大利亚	37	$p < 0.0001$	0.412** ($p < 0.0001$)	0.321** ($p < 0.0001$)	Jensen et al. (2016)
印度-太平洋	Gulf of Carpentaria	澳大利亚	132	$p < 0.0001$	0.354** ($p < 0.0001$)	0.324** ($p < 0.0001$)	Dethmers et al. (2006)
日本	South Yeayama Island	日本	26	$p < 0.0001$	0.395** ($p < 0.0001$)	0.377** ($p < 0.0001$)	Nishizawa et al. (2011)
日本	North Yeayama Island	日本	41	$p < 0.0001$	0.365** ($p < 0.0001$)	0.659** ($p < 0.0001$)	Nishizawa et al. (2011)
日本	Central Ryukus	日本	70	$p < 0.0001$	0.343** ($p < 0.0001$)	0.165** ($p = 0.0009$)	Hamabata et al. (2014)
日本	Ogasawara	日本	103	$p < 0.0001$	0.331** ($p < 0.0001$)	0.548** ($p < 0.0001$)	Nishizawa et al. (2013)

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

另外, Ng et al. (2017)在广东惠东自然保护区产卵群体的 2 个样品中同样发现了 CmP19 和 CmP49 两种单倍型, 并从香港产卵群体的 6 个样品中发现了两种单倍型 CmP18 和 CmP116 (Ng et al. 2014) (表 3-4)。在距离广东和香港约 700 km 的西沙群岛产卵群体当中, CmP19 是最常见的单倍型, 但是没有发现 CmP116 单倍型的存在 (表 3-3)。CmP18 是香港群体中最常见的单倍型 (占 83.3%), 但仅占西沙群岛群体的 6.9% (表 3-3)。

精确性检验、 F_{ST} 和 Φ_{ST} 分析的结果显示, 西沙与广东的产卵群体之间并没有显示显著差异, 但却和近乎绝灭的香港产卵群体展现出了显著的差异(表 3-4)。分子方差分析的结果显示, 印度洋-太平洋地区和日本地区两个区域之间管理单元所造成的差异 (45.73%) 要高于区域内管理单元之间的差异 (18.22%) 和各区管理单元内部的差异 (36.05%)。

3.4 讨论

3.4.1 西沙群岛管理单元的特点

基于本研究、Gaillard et al. (2021) 和 Song et al. (2022) 的研究, 从西沙群岛获得的 29 个绿海龟样品中鉴定出 7 个单倍型, 其中包括 1 个新单倍型 (表 3-3)。尽管西沙群岛的样品量较少, 但该地区同西太平洋的菲律宾 (3 种单倍型)、马来西亚 (6 种单倍型) 和印度尼西亚 (6 种单倍型) 等国家的管理单元相比, 仍展现出了较高的单倍型多样性 (图 3-2)。

在印度洋-太平洋地区和日本地区, 单倍型 CmP19 (或 CmP19.1) 并不常见, 仅发现于台湾西部的澎湖列岛万安岛和广东惠东的产卵群体 (Cheng et al. 2008; Ng et al. 2017) (图 3-2), 以及澳大利亚东北部 (Jensen et al. 2016) 和日本 (CMJ35, 相当于 CmP19.1 截部分的 517 bp 序列) 觅食群体 (Nishizawa et al. 2010)。然而在西沙群岛, CmP19 (或 CmP19.1) 却是最常见的, 占了样品总量的 62% (Gaillard et al. 2021; Song et al. 2022; 本研究) (表 3-3)。在西沙群岛西北方向不到 300 km 的海南岛附近水域捕获的幼年绿海龟 (71%) 中, 单倍型 CMC2 (489 bp, CmP19 的变体之一) 的个体占到了其中的 71% (Yang et al. 2015); 在海南水域被渔民捕获的绿海龟中, 近 46% 的个体的单倍型也被证实为 CmP19 (Gaillard et al. 2021)。

考虑到海南与西沙群岛之间的距离相对较短,西沙群岛的产卵群体和补充群体可能是海南水域觅食绿海龟的重要来源地。

CmP18.1 和 CmP20.1 两种单倍型在西沙群岛的占比较低 (10.3%)。CmP18 是几乎灭绝的香港群体和台湾西部的产卵群体中发现的主要单倍型种类,其在日本地区的觅食场也有发现 (Cheng et al. 2008; NishiZawa et al. 2010; Ng et al. 2014; Hamabata et al. 2015)。CmP20 是台湾西部产卵群体中第二大单倍体类型(32.5%),该单倍型个体广泛分布于日本、印度洋-太平洋和中西太平洋地区的产卵场和觅食场(Dethmers et al. 2006; Hamabata et al. 2014; Read et al. 2015; Jensen et al. 2019)。单倍型 CmP20.1 的个体在中西太平洋地区占据主导地位 (Dutton et al. 2014; Read et al. 2015; Boissin et al. 2019),但在澳大利亚北部却不太常见 (Dethmers et al. 2006; Cheng et al. 2008; Jensen et al. 2016)。上述地区不同单倍型之间比例的变化是十分显著的,但不同单倍型个体背后所展现的群体扩散或进化趋势还值得进一步研究。构建的系统发育树显示,西沙群岛单倍型分别属于分支 III 和分支 VIII,各自占据总样本量的 10.3%和 89.7% (表 3-3)。分支 VIII 在印度-太平洋地区占主导地位 (Jensen et al. 2019),而台湾东部的产卵群体仅由分支 VIII 组成 (Cheng et al. 2008)。研究证实,分支 VIII 在西沙群岛的产卵群体中也占主导地位,这与该管理单元在印度-太平洋地区的系统地理学位置相一致。

在漫长的进化过程中,海龟曾多次展现出通过偶发性的单次迁居或多次长距离的扩散而建立的群体间的联系,而这一点被过去的系统发育学研究所发现的证据所证明 (Leroux et al. 2012)。Jensen et al. (2019) 指出,印度洋-西太平洋是绿海龟的来源地,或是当今全球 mtDNA 进化分支多样性的起源中心。来源于高度分化的进化分支上【分支 III 和 VIII, 2-350 万年前, Jensen et al. (2019)】的单倍型存在在西沙群岛的绿海龟产卵群体中,而这其中还包括一个新的独特单倍型,表明这一新发现的管理单元对保护该物种的多样性来说十分重要。本研究的结果也与 mtDNA 分支进化的连通性相一致,该连通性体现在直线距离跨域超过 1000 km 的日本地区-西沙群岛-印度-太平洋地区之间的连线上 (Jensen et al. 2019)。

虽然本研究的结果支持将西沙群岛划定为南海内的一个单独的管理单元,但仍需要进一步考虑两方面的问题。首先,西沙群岛的产卵群体与广东惠东产卵群体之间并没有展现出显著的群体遗传学差异,而他们之间的直线距离约为 680 km,

这种同质性很有可能是由于广东惠东产卵群体的样本量过少 ($n=2$) 所造成的误差 (Ng et al. 2017)。要进一步证实两地的差异,则需要继续收集广东惠东产卵场的样品。其次,根据 Φ_{ST} 分析,西沙群岛管理单元与澳大利亚 Cocos Keeling Island 管理单元之间的直线距离约为 3500 km,而这两者之间却未出现分化 ($p > 0.1$),而该分析结合了遗传距离和共享单倍型两方面的影响 (表 3-4)。CmP19 是西沙群岛的主要单倍型 (62.1%),而 CmP49 是 Cocos Keeling Island 产卵群体的主要单倍型 (89.5%)。值得注意的是,CmP19 和 CmP49 仅存在 2 bp 的碱基差异,而这种明显的分化缺失可能反映了更深层的进化连通性,而不是当代的基因流,这也值得进一步研究 (Song et al. 2022)。

3.4.2 保护建议

准确识别管理单元是发展合适的评价、监测、管理体系以应对绿海龟生存威胁的关键的第一步。本研究建议在数据贫乏的南海地区建立了一个新的绿海龟管理单元,将帮助决策者起草以管理单元为中心的国家乃至国际保护行动计划和管理策略,这些计划和策略可以模仿西太平洋地区其他国家的计划和策略 (Song et al. 2022)。如果一个管理单元跨越多个国家的管辖范围,则需要进行国际协调,例如菲律宾和马来西亚共享的海龟岛管理单元 (Palma 1997, Dethmers et al. 2006) (图 3-3)。而对于具有一个以上管理单元的国家,可以调整不同的管理策略,以解决不同管理单元特定的管理优先事项。例如,在澳大利亚,已经确定了 9 个绿海龟的管理单元,它们之间跨越了十分广阔的地理区域,并有着不同的群体发展趋势和威胁 (Dethmers et al. 2006; Jensen et al. 2016; Common Wealth of Australia 2017)。《澳大利亚海龟保护十年计划》基于多方利益相关者的考虑,综合了科学、社会经济和环境因素,以制定保护计划,应对特定的威胁 (Common Wealth of Australia 2017)。例如,密集的石油及天然气相关的工业活动主要影响 North West Shelf 管理单元的筑巢海滩 (图 3-3),因此控制人工照明和化学品泄漏的威胁是该地区管理的优先事项。相比之下,拖网渔船、幽灵网和觅食区海洋废弃物所造成的死亡和伤害是 Gulf of Carpentaria 地区绿海龟的主要威胁,因此也是这一管理单元的优先解决事项。

历史记载绿海龟产卵场在中国大陆南方的海岸线十分普遍,但现在却已消失

殆尽，仅存的广东惠东和香港南丫岛的绿海龟产卵场也呈现功能性消失。台湾周边岛屿、南海东沙岛、太平岛和西沙群岛记录的产卵场可能是中国仅存的最后几处具有一定规模绿海龟产卵场（Frazier et al. 1988; Cheng 1996; Chan et al. 2007; Jia et al. 2019）。我国高度重视海龟的保护工作，继 2019 年发布了《中国海龟保护行动计划（2019-2033）》，并于 2021 年 1 月将我国海域出现的 5 种海龟全部升级为国家一级保护动物（www.forestry.gov.cn/html/main/main_5461/20210205122239482485322/file/20210205122347636743107.pdf），以此向国际社会表明了我国对于海龟保护的决心。

本研究确定了西沙群岛可以作为一个独立的新管理单元，加上之前确定的 2 个台湾海域的管理单元，使得中国的管理单元总数达到 3 个（图 3-3）。由于西沙群岛绿海龟产卵群体有相对较高的单倍型多样性，对西沙群岛这一管理单元实行针对性保护也将更有助于西太平洋地区绿海龟遗传多样性的维护以及 RMU 基础信息的完善。随着人们对西沙群岛的研究兴趣日益浓厚（Yang et al. 2015; Jia et al. 2019; Gaillard et al. 2021; Song et al. 2022），我国这个现存最大的绿海龟产卵场的基础信息正在逐步丰富和完善。本研究的结果也为更准确地对在中国海域觅食、搁浅和非法捕捞海龟的个体来源判定提供了群体遗传学的研究基础。在最近的一项研究中，通过对于海南省没收的 85 只幼年及成年绿海龟的混合群体来源分析表明，大多数海龟来自于西沙群岛和苏禄海（菲律宾和马来西亚地区）的海龟产卵场（Gaillard et al. 2021）。利用卫星定位装置跟踪西沙群岛产卵海龟的产卵后迁移路线将有助于确定与这一产卵群体有关的觅食场和活动热点，再结合继续扩大样品量分析，将有助于对于栖息地连通性和 RMU 划定的进一步了解，从而为中国以及更广泛的印度洋-太平洋地区的绿海龟保护提供更有价值的信息。

第四章 西沙群岛绿海龟产卵场温度监测及孵化稚龟性别预测

4.1 绪论

众所周知,海龟是由温度决定性别的动物之一(Ackerman et al. 1997)。研究海龟性别比例是预测和衡量海龟群体未来生存状况的重要指标。在海龟蛋的孵化过程中,存在一个“热敏感时期”(Temperature Sensitive Period, TSP),通常是在整个孵化过程中三分之一的时间,这个时期海龟蛋所处的外界温度可以直接决定孵化小海龟的性别(Mrosovsky & Pieau 1991)。对于绿海龟来说,决定性别的关键温度(Pivotal Temperature, PT)一般在29 °C左右(Laloe et al. 2014)。若海龟蛋在“热敏感时期”所处的孵化温度在这一温度上下,孵化出稚龟的性别就约为1:1,而若高于这一温度,会导致雌性个体偏多,反之雄性居多。根据具体产卵群体的不同,关键温度会在此基础上上下波动(Standora & Spotila 1985; Mrosovsky 1994; Ackerman 1997)。海龟蛋的孵化存在过渡温度范围(Transitional Range of Temperature, TRT),即稚龟性别从全雄到全雌之间转变的温度范围,该范围同样存在种内差异。根据过去几项研究的测定,一般在27.5-31.5 °C之间(Godfrey & Mrosovsky 2006; Patricio et al. 2017; Stubbs & Mitchell 2018)。

除此之外,海龟蛋的孵化时间也与孵化温度息息相关(Gammon et al. 2020)。一般来讲,在整个孵化过程中,较高的外界温度会缩短海龟蛋的孵化时间,反之则会使得孵化时间延长。对于红海龟来说,温度升高1 °C可以使孵化时长缩短4天至7天(Uçar et al., 2013; Kaska & Sezgin 2019)。由于不同海龟蛋在同一个蛋窝中所处的位置不同,因此各自所接受到的热量条件也会有所差异,这也导致了每一枚海龟蛋都有独特的发育轨迹和TSP(Kaska & Sezgin 2019),而孵化的时长和同步性可以在一定程度上反映这种热量及发育差异。例如,若一窝海龟蛋分若干个批次孵出,最先孵化批次的海龟蛋可能位于蛋窝的中央,从而接受到了周围海龟蛋代谢热的累积,使孵化温度整体偏高,缩短孵化时间,并导致孵出稚龟的性别更偏向于雌性;后孵化的海龟蛋相较于前一批所处位置可能更加边缘,因而热量累加效应没有那么明显,且易受外界环境温度的影响,从而导致整体孵化

温度下降,延长了孵化时间并使性别比同前面的批次产生差异(Gammon et al. 2020)。这也表明了若一窝海龟蛋的孵化分多个批次,只对单一批次孵化的稚龟进行观察或采样可能会导致性别比估算的偏差(Kaska & Sezgin 2019; Gammon et al. 2020)。当然,温度对于性别以及孵化时间的影响是有限度的,这个限度一般是在 23-35 °C 的范围内,也就是说过高或过低的孵化温度都会导致海龟蛋的死亡(Ackerman 1997; Hawkes et al. 2007; Patricio et al. 2017)。即使是间歇性的处于极端温度也有可能导致孵化率的下降或稚龟的发育异常。发育异常通常表现在稚龟的形态异常以及运动、代谢等方面的问题,从而降低这些稚龟的野外生存几率(Packard et al. 1977; Miller 1985; Fuentes et al. 2009; Gammon et al. 2020)。

如今,气候变暖的趋势对海龟的生存造成了潜在的巨大影响。一方面,气候变暖导致的海平面上升会导致一些海拔较低的岛屿或沙滩被上涨的海平面所淹没,导致部分海龟产卵场的丧失;另一方面,日渐上升的温度可能会影响孵化稚龟的性别比例,导致海龟补充群体的大量“雌化”,进而最终使得未受精龟蛋数的增加以及海龟群体性比的失衡(Wyneken & Lolavar 2015)。

海龟蛋窝的孵化温度受到非生物因素和生物因素的共同影响(Wallace et al. 2004; Cheng et al. 2015),其中非生物因素对蛋窝温度的影响占据主导作用。非生物因素主要是指蛋窝周围沙子的温度(即沙温),沙温会通过热传导的方式影响蛋窝内空气的温度。而影响沙温的因素则有很多,包括气温、降水、受风、太阳直射时长、植被遮蔽、蛋窝深度等环境因素,以及砂砾的颜色、折射率、颗粒大小、透气性和导热性等自身性质。其中,降水对于孵化的影响较为多元,一方面雨水本身的温度以及水分的蒸发可以冷却或带走相当一部分热量,另一方面降水所造成的沙土湿度增加也会对胚胎的发育产生潜在的影响(King et al. 2013; Cheng et al. 2015; Wyneken & Lolavar 2015; Lolavar & Wyneken 2017)。若孵化的“热敏感期”恰逢降水较多的时期,即使在这一时段温度达到完全雌化温度,也会有雄性个体的产生(Wyneken & Lolavar 2015)。

生物因素主要包括蛋窝中胚胎发育过程中进行呼吸作用所释放的代谢热,也包括细菌等微生物降解海龟蛋周围的黏液或死亡海龟蛋所释放的热能。代谢热具有累加效应,这也就意味着蛋窝中龟蛋的数目越多,所产生的代谢热也就越多(King et al. 2013)。此外,代谢热所造成的额外温度增加会随胚胎发育的进行而

逐渐升高。多数研究表明,代谢热所造成的温度增加在整个孵化周期的前三分之一并不显著,在中间三分之一开始出现显著增加,并在后三分之一时段达到峰值(通常会使得蛋窝温度在原有沙温的基础上上升 1-4 °C)(Gammon et al. 2020)。研究人员在通过温度预测稚龟性比时,对于孵化中期的“热敏感时期”代谢热的处理方式也不尽相同,其中多数学者是在沙温的基础上加上一个固定数值(一般是 0.5 °C)以体现对于代谢热的考量(Godley et al. 2002; Hays et al. 2003; Hawkes et al. 2007; Laloe et al. 2014; Esteban et al. 2016; Laloe et al. 2016; Patricio et al. 2017; Tanner et al. 2019),也有少数学者认为孵化中期产生的代谢热较少,可以忽略不计(Katselidis et al. 2012)。

最普遍的确定稚龟性比的方法是通过“热敏感时期”龟蛋所处的环境温度来判断大致的雌雄比例,尽管这种预测或判断方法并不能完全保证性比的准确性,但重要的是不会对稚龟造成伤害。构造模型也是蛋窝温度预测的普遍方法,研究人员一般采用“共相关模型”或“机械模型”两种方式对于蛋窝孵化温度进行预测。“共相关模型”方法是通过建立气温、沙温与蛋窝孵化温度三项指标中任意两者的线性关系,再将代谢热的因素考虑其中,最终实现估算或预测蛋窝孵化温度的目的。它主要可应用于具有长期观测数据的已知孵化环境,其优点在于所需的变量较少且操作起来较为简便。“机械模型”方法是通过 R 语言的程序包进行模拟,除了需要考虑各种温度要素之外,还需输入降雨量、风向等环境要素以及产卵场砂砾的色度、折射率等属性。这一方法的主要研究对象为一个未知研究环境下的整个孵化时期,其优点在于对于一处产卵场的预测无需十分精确的环境数据(即可以利用遥感数据),且可以通过调整一个或一组环境变量衡量某些环境因素的变化对于孵化带来的影响,但需要注意额外考虑代谢热的释放作用(Gammon et al. 2020)。

除了对孵化温度进行预测,也有部分学者对孵化温度和性比关系进行了验证。验证多是基于组织学的直接观察,这包括对稚龟的性腺进行切片观察(Godley et al. 2002; Kaska et al. 2006; 古河祥等, 2010; King et al. 2013; Patricio et al. 2017)、测定羊水或血清中的激素含量(古河祥等, 2010)以及在暂养稚龟一段时间后通过腹腔镜观察性腺发育来确定性别(Lolavar & Wyneken, 2017)。当然,也有少数学者会通过观察孵出稚龟的形态特征来直接判断性别(张晓荣等, 1995),但这

种判断方式较为主观，且稚龟形态易受营养条件的影响，所以会产生较大误差，因此鲜有人将直接观察作为佐证孵化温度与性比关系的方式(古河祥等, 2010)。

中国对于孵化稚龟性比的研究相对较少，主要受限于现存的海龟产卵场数量少，以及对国家一级保护动物的严格监管。大陆的相关研究多集中在位于广东省的惠东港口海龟国家级自然保护区(张晓荣等, 1995; 古河祥等, 2010)。台湾对于绿海龟产卵场的研究相对较为完善。King et al. (2013) 通过温度监测以及性腺组织切片的方法对澎湖列岛万安岛及兰屿绿海龟产卵场的关键温度进行确认和验证; Chen et al. (2010) 和 Cheng et al. (2015) 通过测量海龟蛋窝氧气含量的方法了解龟蛋孵化期间的胚胎发育及代谢情况。至今为止，尚未有学者对西沙群岛绿海龟产卵场的稚龟性别比例进行研究。本研究期望通过全年沙坑温度监测的方式对西沙群岛七连屿绿海龟产卵场的稚龟性别比例进行初步研究和预测，以期完善该产卵场的基础环境信息。

通过在西沙群岛七连屿绿海龟产卵场的 7 个岛屿(西沙洲、赵述岛、北岛、南岛、北沙洲、中沙洲、南沙洲) 埋放小型温度记录仪，监测产卵场沙坑全年的温度变化，并结合当地的气温数据，拟合气温同沙温之间的线性关系，从而为将来对产卵场沙温的预测提供依据。此外，本研究还获取了七连屿各岛屿全年的海龟产卵数据，结合全年的沙坑温度数据，预测七连屿孵化稚龟大致的性别比例以及各月对于性别比例的贡献情况，从而更好的完善七连屿绿海龟产卵场的基础环境信息。

4.2 材料与方法

4.2.1 材料

温度记录仪: HOBO® U23-001 temp/RH Pro v2, 美国 ONSET 公司。质量 57 g, 大小为 10.2*3.8 cm。记录的温度范围为-40-70 °C, 在 0-50 °C 下的精度为±0.21 °C, 25 °C 下分辨率为 0.02 °C。

GPS 记录仪: OREGON-550, 美国 Garmin 公司。

相机: iPhone 6Plus 后置镜头, 美国 Apple 公司。

鱼线, 剪刀, 铁铲。

4.2.2 埋放准备

共采购 30 台温度记录仪以供后续埋放。记录仪需要专用数据线与电脑连接，并下载专门设置记录程序以及读取数据的 HOBOWare 软件进行提前设定。本研究参照西沙群岛此前研究的温度采集时段，将记录仪的温度记录间隔设置为 1 小时（贾语嫣，2019）。仪器每次会记录相应时刻的温度、露点温度以及湿度，考虑到露点温度以及湿度使用的局限性，本研究只采用温度的记录值进行后期处理。除了记录每天的温度外，该仪器还可以对当日记录的温度进行汇总，得出全天温度的最大值、最小值、平均值，方便后续处理。

本研究首先对所需埋放的记录仪按照正式实验的记录方式进行预实验。将所有记录仪通过电脑软件设定为开启状态，后放在 25 °C 恒温箱中 24 小时进行温度记录，并在恒温箱中放置 3 根水银温度计，每隔 1 小时读取一次水银温度计的温度并取平均值，同温度记录仪读取的温度进行比对。预实验发现全部记录仪同水银温度计的波动范围均在 ± 0.1 °C 以内，符合后续的实验要求（King et al. 2013）。在预实验完成后，记录仪被设置为启动状态，等待后续埋放。温度记录仪处于开启状态后，内部会有频闪的红色 LED 灯光闪烁。

4.2.3 选址

在七连屿的不同岛屿（西沙洲、赵述岛、北岛、南岛、北沙洲、中沙洲、南沙洲）上埋放一定数量的温度记录仪。由于海况以及相对较少的蛋窝记录，中岛没有埋放温度记录仪。北岛作为产卵核心岛屿同时也是七连屿面积最大的岛屿（Jia et al. 2019），在埋放温度记录仪的数量上予以侧重。通过之前对于北岛的巡视发现，岛屿的中部覆盖有大量低矮的植被，而四周为宽度不等的裸露沙滩，而岛屿的西北角地势相对较为平缓，平坦的沙滩有利于海龟的登陆和爬行，但与此同时这里的风力与风速要明显大于别处。因此本研究尝试在北岛西北角的裸露沙滩区以及植被与裸露沙滩交界的植被区的边缘埋放温度记录仪，从而揭示同一岛屿的不同地点以及植被的覆盖是否会对沙子温度产生影响，进而影响海龟蛋的孵化温度和稚龟性比。

4.2.4 埋放过程

依据西沙群岛七连屿各岛礁的主要蛋窝沙滩分布情况 (Jia et al. 2019), 于 2019 年 12 月 25 日和 26 日在西沙群岛七连屿的 7 个岛屿 (西沙洲、赵述岛、北岛、南岛、北沙洲、中沙洲、南沙洲) 埋放数量不等的温度记录仪 (表 4-1)。

根据西沙群岛七连屿海龟蛋窝的平均深度 (贾语嫣, 2019), 通过手掘的方式在沙地上垂直掏出一个直径约 15 cm, 深度约 50 cm 的洞穴。在记录仪末端缠绕鱼线, 将记录仪放入洞穴底部并使其保持水平, 随后将原位掘出的沙土将记录仪填埋, 并将鱼线一端系挂在周围植被的贴地主干上。此后, 通过 GPS 定位仪对埋放地点进行定位保存, 并对相应地点及周围的标志性景观进行拍照。

表 4-1 30 台温度记录仪埋放信息

Table 4-1 Information of the 30 buried temperature loggers

岛屿	编号	坐标	埋放时间
北岛 (裸露沙滩区)	N-9	16°57'54.71"N; 112°18'16.11"E	2019.12.25
北岛 (裸露沙滩区)	N-10	16°57'53.51"N; 112°18'17.84"E	2019.12.25
北岛 (裸露沙滩区)	N-11	16°57'58.53"N; 112°18'18.69"E	2019.12.25
北岛 (裸露沙滩区)	O-29	16°57'58.50"N; 112°18'21.16"E	2019.12.25
北岛 (裸露沙滩区)	F-1	16°57'55.59"N; 112°18'14.79"E	2019.12.25
北岛 (裸露沙滩区)	F-7	16°57'57.17"N; 112°18'15.86"E	2019.12.25
北岛 (植被区)	N-16	16°57'42.86"N; 112°18'40.08"E	2019.12.25
北岛	N-17	16°57'42.02"N;	2019.12.25

(植被区)		112°18'41.57"E	
北岛	N-23	16°57'43.63"N;	2019.12.25
(植被区)		112°18'38.30"E	
南沙洲	O-26	16°55'49.64"N;	2019.12.25
		112°20'42.83"E	
南沙洲	F-5	16°55'48.44"N;	2019.12.25
		112°20'40.65"E	
南沙洲	N-18	16°55'47.25"N;	2019.12.25
		112°20'41.56"E	
南沙洲	N-19	16°55'49.68"N;	2019.12.25
		112°20'42.22"E	
中沙洲	O-24	16°55'59.48"N;	2019.12.25
		112°20'37.12"E	
中沙洲	N-20	16°55'58.66"N;	2019.12.25
		112°20'38.93"E	
中沙洲	N-21	16°55'59.48"N;	2019.12.25
		112°20'37.12"E	
北沙洲	O-25	16°56'14.57"N;	2019.12.25
		112°20'30.41"E	
北沙洲	F-6	16°56'18.01"N;	2019.12.25
		112°20'28.82"E	
北沙洲	N-22	16°56'15.80"N;	2019.12.25
		112°20'30.94"E	
南岛	O-30	16°56'39.90"N;	2019.12.25
		112°20'11.54"E	
南岛	F-3	16°56'39.18"N;	2019.12.25
		112°20'12.62"E	
南岛	F-8	16°56'41.61"N;	2019.12.25
		112°20'09.87"E	

南岛	N-12	16°56'42.31"N; 112°20'08.39"E	2019.12.25
南岛	N-13	16°56'40.82"N; 112°20'10.39"E	2019.12.25
西沙洲	F-2	16°58'36.68"N; 112°12'54.81"E	2019.12.26
西沙洲	O-27	16°58'40.63"N; 112°12'53.66"E	2019.12.26
西沙洲	N-14	16°58'40.19"N; 112°12'49.10"E	2019.12.26
西沙洲	N-15	16°58'44.11"N; 112°12'47.97"E	2019.12.26
赵述岛	F-4	16°58'43.03"N; 112°16'21.38"E	2019.12.25
赵述岛	O-28	16°58'43.69"N; 112°16'22.12"E	2019.12.25

4.2.5 记录仪寻回

在野外工作结束后，GPS 定位仪中埋放记录仪的经纬度坐标被导入电脑，随后将坐标导入 Google Earth Pro，生成各岛屿的温度记录仪埋放图（图 4-1）。

在记录约一年的数据后，于 2020 年 12 月 9 日再次登临各个岛屿，根据 GPS 定位、埋放地图以及拍摄的照片前往每个埋放地点将记录仪挖出，并清理鱼线等垃圾。在尽可能地回收埋放的记录仪并返回住所后，记录仪中记录的数据被立即导出至电脑进行保存。



图 4-1 七连屿各岛温度记录仪埋放位置图

(a) 西沙洲；(b) 赵述岛；(c) 南岛；(d) 北沙洲；(e) 中沙洲；(f) 南沙洲；(g) 北岛

Fig. 4-1 Locations of the temperature loggers at the islands of Qilianyu cluster

(a) West Sand; (b) Zhaoshu Island; (c) South Island; (d) North Sand; (e) Middle Sand; (f) South Sand; (g) North Island

4.2.6 绿海龟产卵记录

本研究还对 2020 年七连屿工委记录的各岛屿绿海龟产卵蛋窝数据进行汇总, 分析月蛋窝数, 确定产卵高峰月份, 以便于后续分析这两年的稚龟孵化情况, 并结合沙坑温度信息估算 2020 年孵化稚龟的性别比例。

4.2.7 数据分析

4.2.7.1 数据处理及沙坑温度特征值计算

温度记录仪所记录的沙坑温度日平均值、最大值、最小值等数据。将埋放日和挖出日两天的数据剔除以避免埋放前的气温及记录仪本身的温度给实际观测所造成的误差, 并通过目测剔除数据中所存在的远高于(如高于 100 °C 的异常温度值)或低于(如低于 0 °C 的异常温度值)常规温度或测量范围的不合理值。各岛屿以及七连屿整体的日平均值、日较差、月平均值、月较差、观测时期的沙坑温度平均值以及观测时期的沙坑温度极差等数据均通过处理后的数据算得。在计算七连屿或产卵岛屿的沙坑温度特性时, 每一个记录仪无论所在岛屿, 都被认为是一个单独的重复组, 因此会利用每一天所有有数据记录仪的平均值得出七连屿整体或产卵岛屿整体的日平均值, 再用得到的日平均值计算其它特征值。本研究利用 Origin 2021b 绘制成观测时段内各岛屿日较差的堆积百分比条形图用以表征每日温度变化幅度的大小并据此判断对于海龟蛋孵化的影响。在这一过程中, 由于在中沙洲所埋放的温度记录仪均未能记录全年观察时期的沙坑温度变化, 因而并没有对其进行分析。

由于赵述岛鲜有绿海龟上岸产卵的记录, 将赵述岛与其它产卵岛屿整体在观测时段的沙坑日平均温度及日较差取月平均值, 通过 SPSS25 进行成对 t 检验, 以判断沙坑温度是否会对绿海龟产卵岛屿的选择造成影响。

4.2.7.2 降水量同月较差的关系

通过 WheatA 农业气象大数据系统 (www.wheata.cn) 下载了七连屿 2019 年 12 月-2021 年 3 月包括平均温度及降水量等信息在内的气象数据, 这一时段包含沙坑温度观测时段 (2019 年 12 月-2020 年 12 月) 以及 2020 年末蛋窝孵化时段 (2021 年 1 月-3 月)。通过 SPSS 25 计算七连屿月平均降水量同七连屿月较差的皮尔逊相关系数, 并据此判断降水量同月较差的相关性。

4.2.7.3 气温-沙坑温度拟合及沙坑温度预测

气温与沙坑温度的皮尔逊相关性指数同样通过 SPSS 25 计算得出, 在据此判断两者显著相关后, 将各个监测岛屿的沙坑温度同当地气温进行线性拟合, 得到各个岛屿沙坑温度同气温之间的线性方程, 并利用每个岛屿的线性方程求算 2020 年 12 月 9 日至 2021 年 3 月 5 日的沙坑温度, 用于后续性别比例的预测。

本研究没有对中岛进行沙坑温度监测, 因此采用七连屿整体的气温-沙坑温度线性方程对中岛海龟蛋孵化期的沙坑温度进行估算。此外, 由于中沙洲的温度记录并不完整, 因此仅用中沙洲 2019 年 12 月 26 日至 2020 年 8 月 27 日的沙坑温度-气温进行线性方程拟合, 并借此推算有海龟蛋孵化但没有沙坑温度记录时段的性比。

4.2.7.4 孵化稚龟性比预测

海龟的性别比例以及孵化时间均受温度的影响, 因此需对不同岛屿全年不同时间产下的龟窝的孵化时间进行估测, 从而尽可能避免对“热敏感时期”所处的日期和时长产生误判。通过收集在西沙群岛甘泉岛上产下的绿海龟蛋, Yao et al. (2022) 进行了不同温度条件下的恒温孵化实验, 并据此得出了不同温度下海龟蛋的孵化时长。考虑到甘泉岛同七连屿相近的地理位置 (最远距离 93 km) 以及连通性, 本研究假定两地产卵雌龟同属一个产卵群体且龟蛋的孵化特征相似, 因此将 Yao et al. (2022) 的实验结果应用到本研究当中。本研究将 Yao et al. (2022) 所得到的孵化温度 (Incubation Temperature, IT) 与孵化天数 (Incubation Duration, ID) 进行多项式拟合, 得到两者之间的二次方程 ($ID = 0.461*IT^2 - 31.953*IT + 596.717$, $R^2 = 0.9982$), 并据此细化孵化温度同孵化天数之间的关系

(表 4-2), 所得孵化天数取整数用于后续估算。

表 4-2 西沙群岛七连屿孵化温度-孵化时间对应关系

Table 4-2. Relationship between incubation temperature and incubation time at Qilianyu cluster, Xiasha Islands

温度 (°C)	孵化时间 (天)	温度 (°C)	孵化时间 (天)
26.0	77	30.5	51
26.5	73	31.0	49
27.0	70	31.5	47
27.5	66	32.0	46
28.0	64	32.5	45
28.5	60	33.0	44
29.0	58	33.5	43
29.5	55	34.0	43
30.0	52		

由于自然条件下海龟蛋孵化过程中环境温度始终处于变动之中, 因此本研究采用孵化全过程的平均温度来代替恒定的孵化温度。此外, 平均温度除了由环境温度(沙坑温度)决定外, 海龟蛋孵化过程中所产生的代谢热升温同样需要考虑 (Gammon et al. 2020)。因为西沙群岛缺乏相关代谢热的评估实验, 本研究只能通过收集其他地区已有的绿海龟蛋孵化代谢热研究数据(包括整个孵化过程中所产生代谢热的平均值以及“热敏感期”所产生代谢热的平均值)后取平均值, 应用于本研究。在文献的筛选过程中, 只选择同时计算“热敏感时期”代谢热和整个孵化过程代谢热的文献, 从而减少因研究数量不同而造成的人为误差(表 4-3)。此外, 由于每个蛋窝的龟蛋数量各有不同, 而龟蛋数量又是影响代谢热的重要因素之一, 本研究将每篇文献中获得的代谢热数据按七连屿平均龟蛋数量的规模(89±20 枚/窝)进行折算 (Jia et al. 2019), 从而得到较为准确的代谢热温度。

表 4-3 绿海龟的代谢热记录值

Table 4-3 Metabolic heat temperature of green turtles

参考文献	热敏感期 代谢热 (°C)	折算后 代谢热 (°C)	孵化全过程 代谢热 (°C)	折算后 代谢热 (°C)	龟蛋数 (枚/窝)
Sönmez 2018	0.37	0.30	0.68	0.55	111
Chen et al. 2010	1.80	1.69	1.68	1.57	95
Cheng et al. 2015	2.47	1.98	1.57	1.26	111
Candan & Kolankay 2014	0.60	0.43	0.90	0.65	123
Önder & Candan 2016	0.60	0.51	0.80	0.68	104
平均值	1.17	0.98	1.13	0.94	108.80

本研究采用以下步骤对于孵化稚龟性别进行估算：

首先，假设每窝蛋均在 55 天后孵化，计算产卵时间后 55 天内的预估蛋窝温度（沙坑温度+代谢温度）的平均值（代谢温度为 0.94 °C，表 4-3），观察该预估平均值是否低于 55 天孵化所需要的平均孵化温度 29.5 °C（表 4-2）。若低于这一温度，则意味着该蛋窝的孵化时间应长于 55 天，反之则短于 55 天，随后再将估计的孵化时间相应加长或缩短，求算对应天数的平均温度。反复重复这一操作，直至将预估温度的平均值调整至与孵化天数对应温度（表 4-2）的差值在±0.25 °C 的范围内，即可确定这一蛋窝的大致孵化天数和孵化期内的平均温度。在这一基础上，再求得这一孵化时段中间三分之一时段的“热敏感时期”，并获得“热敏感时期”的平均沙坑温度，再加中间段代谢热所得到的 0.98 °C（表 4-3），最终得出中间段的孵化温度；最终我们将这一温度同七连屿的性别决定温度进行比对，若高于 30.5 °C 则均为 100 % 雌性，若低于 28.0 °C 则为 100 % 雄性，而温度介于 28.0 °C 到 30.5 °C 之间则视为雌雄混杂。取雌化窝数的最小值（即雌雄混杂的情况下认为该窝全部为雄性）和最大值（即雌雄混杂的情况下认为该窝全部为雌性）计算全年雌性性比的取值范围：

雌性性比 = 雌化窝数 / 总窝数 * 100%。

4.3 结果

4.3.1 温度记录仪回收情况

西沙群岛七连屿的沙坑温度监测始于 2019 年 12 月 26 日，结束于 2020 年 12 月 8 日，共计 349 天，约一年的时间。成功寻回温度记录仪共 22 台，占埋放总数的 73.33%。其中成功提取了 17 台记录仪的数据（北岛 6 台，南岛 2 台，北沙洲 2 台，中沙洲 2 台，南沙洲 3 台，西沙洲 1 台，赵述岛 1 台）；而拥有完整全年记录数据的记录仪共有 11 台（北岛 6 台，南岛 1 台，北沙洲 1 台，南沙洲 1 台，西沙洲 1 台，赵述岛 1 台）。

4.3.2 沙坑温度同气候的关系

4.3.2.1 七连屿各岛屿沙坑温度年变化

七连屿的年平均沙坑温度为 29.11 ± 2.49 °C，且各岛全年最低沙坑温度均在 22 °C 以上，为典型的热带气候（表 4-4）。各个岛屿的沙坑温度年变化在总体趋势上保持一致，七连屿在 2020 年的全年最高温出现在 7 月下旬，在西沙洲及南沙洲均有记录过 34.06 °C 的高温，接近绿海龟蛋孵化期间的最高耐受温度。在此之后七连屿的沙坑温度逐渐回落，并在 2 月初跌落至最低值（图 4-2，表 4-5）。沙坑的全年温度变化幅度较小，在 11 °C 以内。同时，七连屿沙坑的日温度变化也相对较小，各岛屿有 90% 以上时间的日较差均在 1 °C 以内，赵述岛的极端温差天数 (>1 °C) 相对较多，占到了全年的 5.4%（图 4-3）。赵述岛的观测时段平均沙坑温度 ($p = 0.526$) 和平均沙坑温度日较差 ($p = 0.794$) 与其余各产卵岛屿的整体平均值均未显示显著差异。岛屿间及岛屿内的沙坑温度变化也存在差异。其中，北沙洲的年际沙坑温度波动最为剧烈，是监测过程中唯一年沙坑温度极差超过 10 °C 的岛屿，此外全年的最低温度观测值也出现在北沙洲（表 4-4）。而通过北岛的岛屿内对比可以发现，其植被遮蔽区的月温度波动 (29.10 ± 2.03 °C) 相较于裸露沙滩区 (28.92 ± 2.95 °C) 要更加缓和（图 4-4），在 1 月-4 月及 11 月-12 月，裸露沙滩区的沙坑温度显著低于植被区，而在 5 月-8 月情况则相反（图 4-5）。

表 4-4 七连屿各岛屿监测时段平均沙坑温度

Table 4-4 Average sand temperature of different islands at Qilianyu cluster in the monitor period

岛屿*	成功提取数据 温度记录仪 (台)	平均沙坑 温度	最高沙坑温 度	最低沙坑温 度	沙坑温度极 差
北岛（裸露沙滩区）	3	29.10	33.56	23.74	9.82
北岛（植被区）	3	29.27	32.75	24.70	8.05
南岛	2	29.08	32.90	24.92	7.98
北沙洲	2	27.99	32.97	22.27	10.7
中沙洲**	2	28.90	32.67	24.60	8.07
南沙洲	3	29.57	34.06	24.11	9.95
西沙洲***	1	30.04	34.06	25.34	8.72
赵述岛	1	28.86	32.82	23.81	9.01
各岛屿综合	17	29.11	34.06	22.27	11.79

*: 监测时间为 2019 年 12 月 26 日-2020 年 12 月 8 日。

**：中沙洲埋放 HOBO 的最长监测时间仅到 2020 年 8 月 27 日。

***：西沙洲监测时间开始于 2019 年 12 月 27 日。

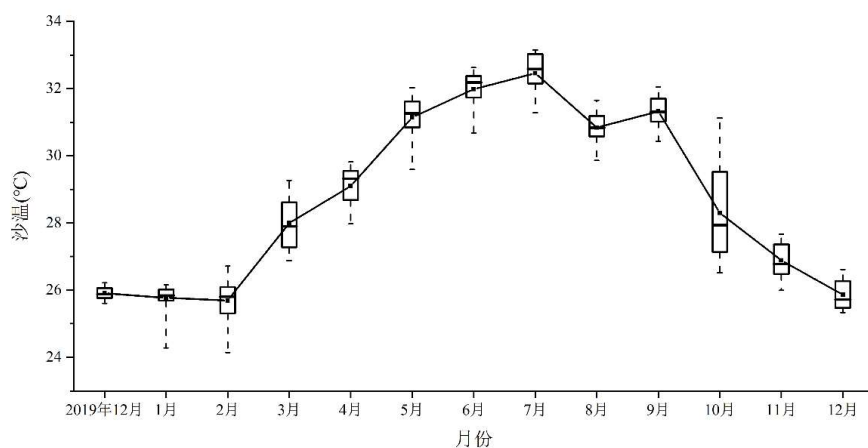


图 4-2 七连屿监测时段沙坑温度变化

Fig. 4-2 Sand temperature variation in the monitor period of Qilianyu cluster

表 4-5 七连屿各岛屿监测时段月均沙坑温度

Table 4-5 Monthly average sand temperature of different islands at Qilianyu cluster in the monitor period

月份	岛屿							
	北岛 (裸露沙滩区)	北岛 (植被区)	南岛	北沙洲	中沙洲*	南沙洲	西沙洲*	赵述岛
2019 年 12 月*	25.40	27.27	26.68	24.27	26.02	25.36	26.81	25.61
1 月	25.30	27.10	26.51	24.14	25.74	25.39	26.65	25.28
2 月	25.35	26.69	26.39	23.94	25.73	25.54	26.84	25.00
3 月	27.80	28.50	28.43	26.63	27.57	28.46	29.19	27.18
4 月	29.31	29.16	29.47	27.64	28.63	29.89	30.12	28.09
5 月	31.67	30.71	30.87	30.40	30.51	32.05	31.91	30.67
6 月	32.55	31.32	31.45	31.27	31.42	32.87	33.00	31.21
7 月	32.91	31.96	32.13	31.84	31.86	33.25	33.60	31.36
8 月	31.12	30.48	30.39	30.35	30.40*	31.49	32.38	30.83
9 月	31.38	31.42	30.40	30.71		31.49	32.22	31.29
10 月	28.09	28.46	28.11	27.08		28.77	28.72	28.96
11 月	26.18	27.21	26.86	25.51		27.57	27.19	28.46
12 月*	25.32	26.21	26.12	23.80		26.31	26.41	27.21

*: 2019 年 12 月均温为监测时段（12 月 26 日-12 月 31 日，西沙洲为 12 月 27 日-12 月 31 日）均温；2020 年 12 月均温同样为监测时段（12 月 1 日-12 月 8 日，除中沙洲）均温；中沙洲最长沙坑温度监测时间到 2020 年 8 月 27 日，其 8 月均温仅计算至 8 月 27 日。

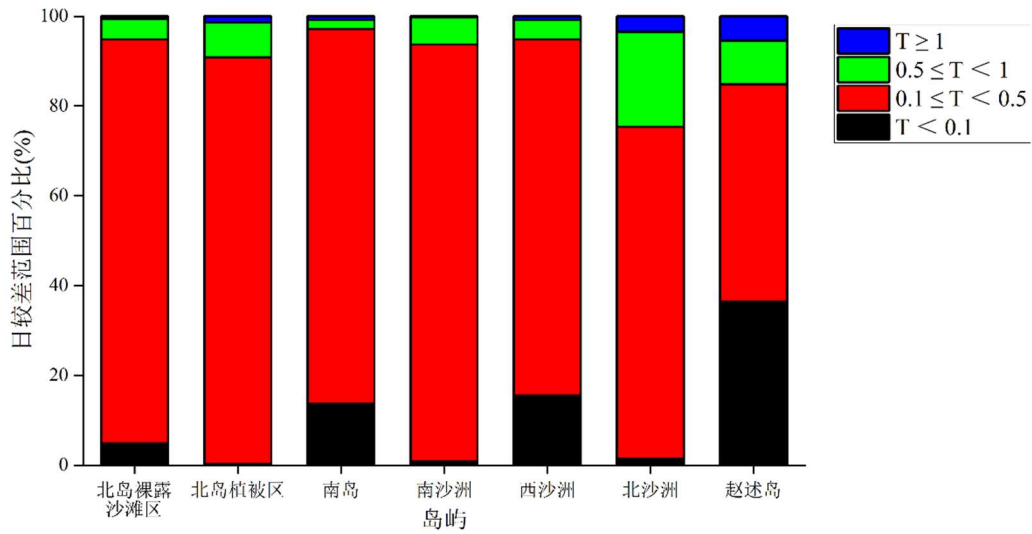


图 4-3 七连屿各岛屿监测时段日较差分布

Fig. 4-3 Daily temperature range of different islands at Qilianyu cluster in the monitor period

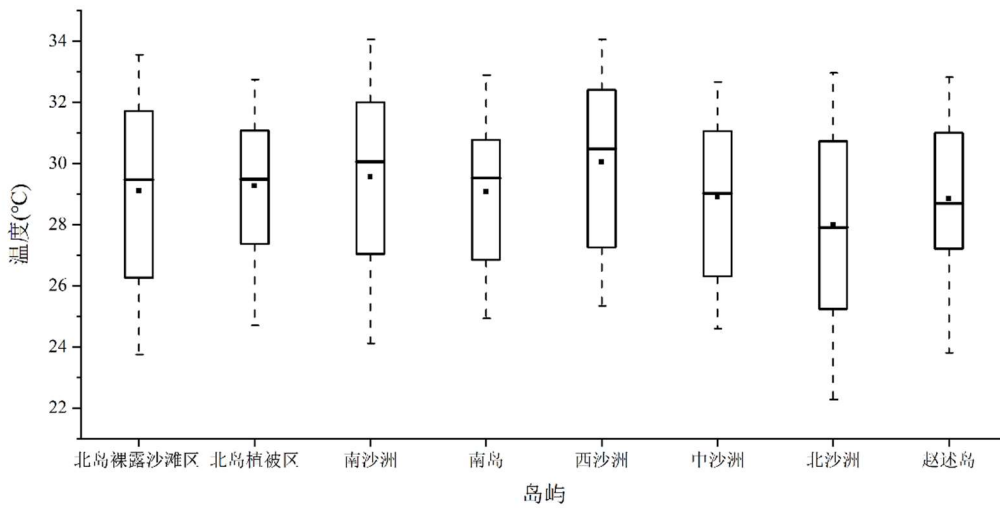


图 4-4 七连屿各岛监测时段沙坑温度分布

Fig. 4-4 Sand temperature of different islands at Qilianyu cluster in the monitor period

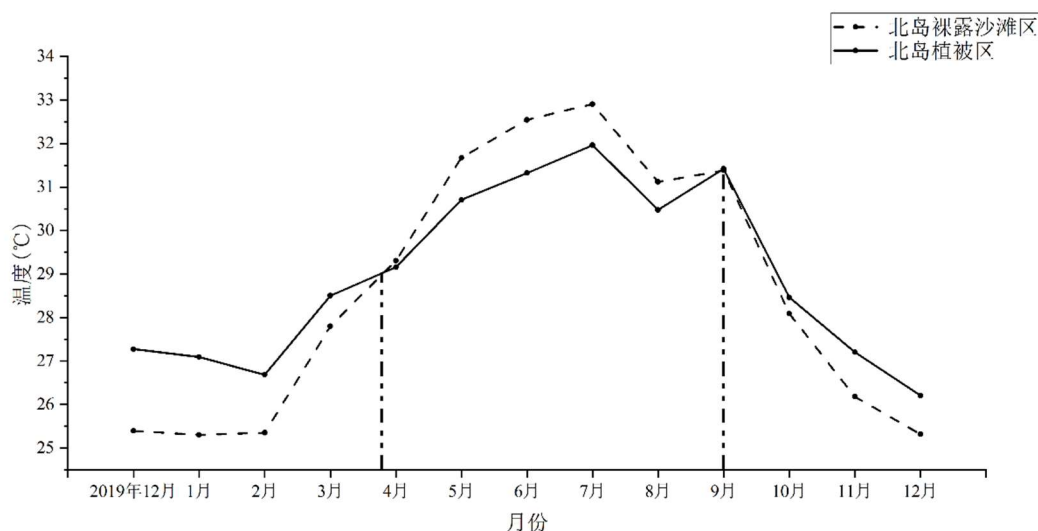


图 4-5 北岛裸露沙滩区及植被覆盖区监测时段月均沙坑温度变化

Fig. 4-5 Monthly average sand temperature of exposed beach and plantation areas at North Island in the monitor period

4.3.2.2 降水量同沙坑温度的关系

2020年七连屿的降水主要集中在8月-11月，在这一时段的总降雨量占全年降水总量的82.74%，其中又以10月降水为最多，占到全年的50%以上（表4-6）。与此同时，降水量的增多也与沙坑温差的增大相关，降水最多的10月份同时也是月较差最大的月份，月较差为 4.61 ± 0.62 °C（表4-6）。而相关性分析的结果也表明，七连屿产卵场的降水量同沙坑温度月较差呈现显著正相关关系（皮尔逊相关系数 $r = 0.815$, $p = 0.001$ ）。

表 4-6 七连屿监测时段月降水量及沙坑温度月较差

Table 4-6 Monthly total rainfall and monthly ranges of sand temperature at Qilianyu cluster in the monitor period

月份	降水/ mm	月较差/ °C
2019 年 12 月*	9.65	0.61
1 月	60.45	1.88
2 月	3.3	2.57
3 月	0.76	2.39
4 月	14.22	1.84
5 月	61.47	2.43
6 月	61.98	1.95
7 月	58.42	1.87
8 月	138.18	1.79
9 月	113.28	1.61
10 月	792.48	4.61
11 月	226.06	1.67
12 月*	4.32	1.28

*: 2019 年 12 月降水及月较差为监测时段值 (12 月 26 日-12 月 31 日, 西沙洲为 12 月 27 日-12 月 31 日); 2020 年 12 月同样为监测时段 (12 月 1 日-12 月 8 日, 除中沙洲)。

4.3.2.3 沙坑温度同气温的关系

七连屿的气温同沙坑温度的相关性分析显示二者极显著相关(皮尔逊相关系数 $r = 0.944$, $p < 0.001$) (图 4-6)。各个岛屿及七连屿的平均沙坑温度同气温进行线性拟合, 得到各岛屿同气温间的相关线性方程 (图 4-7)。

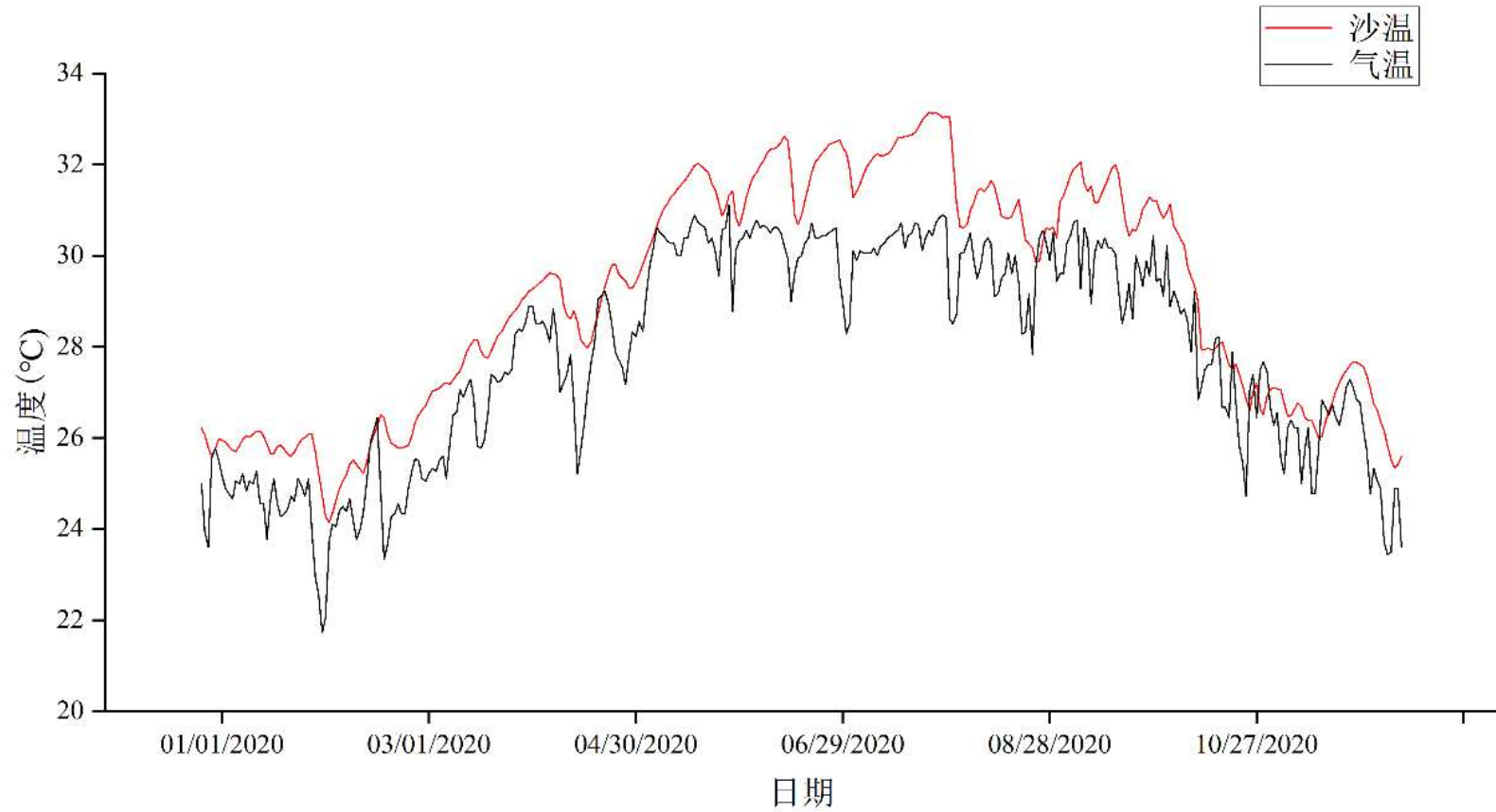


图 4-6 七连屿监测时段沙坑温度及气温变化情况

Fig. 4-6 Sand and air temperature of Qilianyu cluster in the monitor period

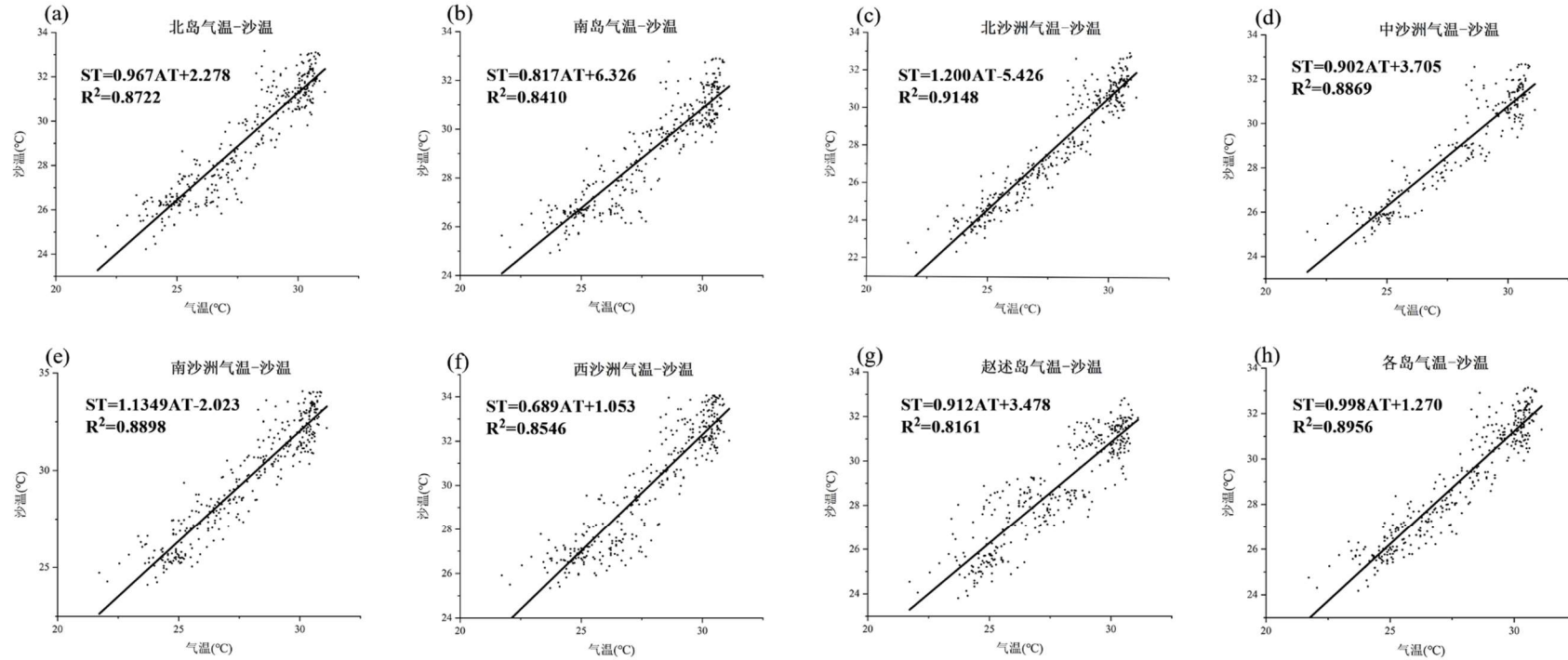


图 4-7 七连屿各岛屿气温及沙坑温度关系

(a) 北岛; (b) 南岛; (c) 北沙洲; (d) 中沙洲; (e) 南沙洲; (f) 西沙洲; (g) 赵述岛; (h) 各岛平均

Fig. 4-7 Correlation between air temperature and sand temperature of different islands at Qilianyu cluster

(a) North Island; (b) South Island; (c) North Sand; (d) Middle Sand; (e) South Sand; (f) West Sand; (g) Zhaoshu Island; (h) Average

4.3.3 蛋窝记录及相关性比推算

4.3.3.1 2020 年全年蛋窝数分布

2020 年七连屿绿海龟产卵场共记录 149 窝海龟蛋，而上岸产卵记录最多的岛屿均为北岛，接近总蛋窝数的 50%。除此之外，南岛及南沙洲也是七连屿较为重要的产卵岛屿，和北岛一起共同占据了该地区 90%左右的蛋窝量(图 4-8(a))。产卵高峰期则集中在 6 月-9 月，这四个月组成全年 60%以上的蛋窝量(图 4-8(b))，因而这一时段海龟蛋的孵化温度将会决定七连屿产卵场全年总体的性别比例。

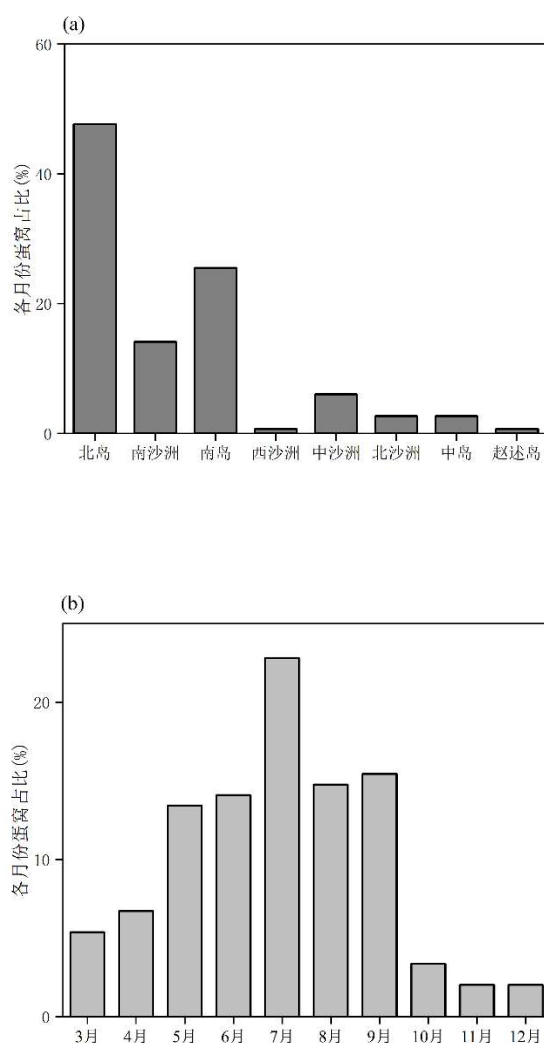


图 4-8 2020 年七连屿绿海龟蛋窝数

(a) 各岛屿蛋窝数; (b) 各月份蛋窝数

Fig. 4-8 Number of nests of green turtles at Qilianyu cluster in 2020

(a) By island; (b) By month

4.3.3.2 2020 年孵化稚龟性别推算

2020 年全年产下的 149 窝海龟蛋中，完全“雌化”的有 119 窝，主要集中产于 5 月-8 月，占到全年总蛋窝数的 79.9%，孵化时长一般为 44-47 天；孵化时间在 51-64 天的稚龟，平均孵化温度一般在 29 °C（关键温度）上下，在这一温度附近的 19 窝存在雌雄混合的稚龟，而这些蛋大多集中产于 3 月、9 月和 10 月；而完全“雄化”的蛋窝有 11 窝，产卵时间全部分布于 9 月-12 月，孵化时长需要 60 天以上。此外，由于岛屿间环境的相对差异，即使在同一天产的卵，孵出的时间以及稚龟的性别也均有可能出现差异。通过极端值推算，估计七连屿 2020 年全年的雌性比例约为 79.9%-92.6%。

4.4 讨论

4.4.1 沙坑温度变化

根据回收的温度记录仪所记载的温度变化情况来看，全年沙坑温度变化较为平稳且极端温度值相对较少。一项关于甘泉岛的恒温孵化实验得出海龟蛋的最适发育温度在 28-32 °C 之间，高于或低于这一温度范围会引发孵化率的下降，而过高 (>35 °C) 或过低 (<23 °C) 的温度则会直接诱发海龟蛋的死亡 (Booth 2017; Yao et al. 2020)。从七连屿产卵场监测时段的沙坑温度来看，除北沙洲有 4 天低于 23 °C 的极端情况出现 (2020 年 1 月 30 日至 2 月 2 日；且没有海龟蛋的孵化过程处于这一时间段当中)，其余各岛均未出现低于 23 °C 和高于 35 °C 的极端温度。尽管如此，随着全球变暖趋势的加剧，在夏季，尤其是 6 月-7 月份孵化的海龟蛋可能会由于极端高温的出现，而面临着胚胎发育异常或孵化率下降的威胁。此外，各岛在观测时段的日较差变化幅度均不是很大，全年温度变化小于 0.5 °C 的天数占到了 70% 以上，这也就表明日较差不会对龟蛋的孵化产生较大的影响，而日平均温度也可以更好的表征每天的温度。

在观测时段，七连屿沙坑温度同气温的皮尔逊相关系数高于 0.9，且为极显

著相关,这说明气温的走势可以很好的体现海龟蛋孵化环境的温度变化,且沙坑温度与气温之间构筑的线性关系具有较强的可信度。通过北岛的生境对比实验可以发现,植被会对气候变化起到一定的缓冲作用,从而为海龟蛋窝提供良好的庇护,减少极端天气所带来的短时温度变化导致的海龟蛋发育异常的风险。北沙洲的植被十分稀疏,且岛屿面积仅为 0.02 平方公里,是七连屿当中面积最小的一个岛屿,而北沙洲的沙坑温度同气温的皮尔逊相关系数却是各个岛屿中最高的($r = 0.956, p < 0.001$),说明该岛的沙坑温度最容易受到气温的影响并跟随气温发生改变,而这也是该岛温度极端值较多和日较差变化幅度较大的原因。由此可见,北沙洲的蛋窝容易在环境的影响下出现较低的孵化率,且在产卵高峰期孵出稚龟的雌性比例相较于其他岛也会更高。相较于北沙洲,尽管北岛也存在裸露的沙滩及不适宜产卵的地段,然而其较高的植被覆盖率可以在一定程度上保证贴近植被蛋窝的孵化率。有研究表明,靠近植被的蛋窝的性别比还会更加均衡(Loop et al. 1995; Kamel et al. 2013),因此较高的植被覆盖还可以在在一定程度上降低气候变暖所造成的群体雌化风险。

赵述岛是七连屿的八个岛屿中海龟产卵最少的岛屿,而从岛屿的沙温特征来看,该岛并未与其他岛屿展现出明显的差异。而作为该地渔民主要居住的岛屿,频繁的人类活动、自然沙滩的丧失以及夜晚灯光的干扰可能才是导致海龟不选择赵述岛作为产卵岛屿的原因。

4.4.2 降水影响

沙坑温度由气温决定,因此在气温变化较大的月份,沙坑温度的月较差也会随之变大。而通过本研究的结果可以发现,沙坑温度的月较差还同降水有着显著的相关性,这种响应主要源于雨水本身较低温度的传导以及后续雨水蒸发吸收热量所造成的降温。若海龟蛋的孵化期恰好位于降水较多的月份则可能会产生较多的雄性稚龟,而这一倾向也在之前的研究中得到了证实(Lolavar & Wyneken 2017),因此对于性别决定期处于七连屿降水较多的 8-11 月的海龟蛋来说,孵出雄性海龟的概率会较高,即使是在产卵高峰期且完全“雌化”的 7 月份,雨水也有可能部分稚龟的性别成为雄性,然而这种影响无法通过温度记录仪所记录的温度上得以体现,同时也缺乏组织切片观察或腹腔镜观察等直接的证据进行证

明。除了性别比，降水所造成的湿度变化也会对孵化的其它性质产生影响。高温且干燥的孵化环境会加速新陈代谢和对氧气的消耗，反之，高湿度的环境会减慢新陈代谢和耗氧，延长孵化时间并影响剩余卵黄的大小和稚龟个体的大小（Ackerman et al. 1985; McGehee et al. 1990; Cheng et al. 2015），而相关研究尚未在七连屿的绿海龟产卵场开展。

4.4.3 绿海龟稚龟性别比及其趋势

根据性别比的推算，本研究得出七连屿产卵场的绿海龟稚龟性别比例严重偏向雌性，2020年的雌性性别比在70%以上。而在产卵高峰季的7月和8月，雌性性别比更是达到了100%，这表明七连屿的绿海龟孵化稚龟性别比例将面临严重失衡，而这种性别比例的失衡通常认为会对于后续种群的发展和延续产生不利影响。不仅是西沙群岛七连屿，台湾、南大堡礁、阿森松岛在内的其它热带及亚热带地区的绿海龟产卵场也同样面临着性别失衡的危机（Godley et al. 2002; Booth & Freeman 2006; King et al. 2013）。

表观性别比例的失衡可以通过其它的调控方式来削弱其影响。比如，雌性绿海龟可以在交配期同多只雄性进行交配，并将获得的精子储存起来以供后续繁殖期使用（FitzSimmons 1998; Hays et al. 2010），从而实现种群的延续。另外，Limpus（1993）的研究表明，雌性绿海龟的繁殖周期一般在4.65年左右，而雄性绿海龟则为1-2年，雄性更加频繁的交配频率可以在一定程度上弥补数量上的缺乏，从而保证雌性体内卵细胞的受精率。除了雌性对于产卵场及觅食场有着十分高的忠诚度外，雄性同样会周期性的往返于求偶地点和觅食场之间，这也就保证了它们同雌性相遇以及交配的概率（Balazs et al. 1980; Limpus 1993）。雌性海龟也可以通过改变产卵的位置和蛋窝深度来调整性别决定的关键温度以及选择将产卵时间转移至气温较低的月份等方式，抵御气候变暖对性别比例所造成的不利影响（Fuentes et al. 2009）。只不过这些相应的改变并不会像人类设想的那样迅速做出，而只能通过漫长的进化得以实现。

此外，气候变暖并不只会从性别比的角度影响海龟群体的发展，其所导致的海平面上升同样也会使得一些岛屿产卵场沙滩的消亡，而这就会迫使失去产卵场的雌性海龟寻找新的产卵场，从而构筑新的性别比例模式（Hamann et al. 2007）。

4.4.4 保护策略

当今气候变化的趋势十分迅速, 尽管海龟经历了上亿年的进化以及地球上的数次气候变化, 但无法保证它们可以在如此迅速的气候变化中再次幸存, 因此可能需要人类采取一些辅助的保护措施从而保证其性别比例的维持和种群的维系。北沙洲、中沙洲上植被的覆盖率相对较低, 因而可以考虑种植一定密度的本土植被, 从而进行一定的保护和降温。对于在最高高潮线以下而有被淹没风险的蛋窝, 若在北岛可通过人工孵化的手段, 通过将温度保持在关键温度 (29 °C) 上下以保证其性别比例, 若在其他岛屿则可以考虑将其就近移植, 在移植时应在保证及时性 (必须在产下卵后 24 小时内进行移植) 的基础上尽可能将海龟蛋贴近植被埋放, 从而借助植被对环境变化的缓冲作用提高孵化率并维持合适性比。对于处于合适位置的蛋窝, 可以选择任其自然孵化。

目前对于七连屿产卵场性比的研究依旧只是起步阶段, 对于全年沙坑温度的监测只能大致推测稚龟性比的范围, 而需要证实这一范围的可靠性并得到更加精确的温度-性比对应关系, 还需要继续对海龟蛋窝进行长期的监测, 监测内容除了常规的产卵时间外, 还需要包括每一窝海龟蛋的孵化时间。若要细致研究, 还需对不同蛋窝孵化阶段的蛋窝深度、蛋窝温度、蛋窝规模、孵化率等信息进行详细的调查和记录, 并在海龟蛋孵化后尽可能采集死亡胚胎的样品或取少量小海龟进行饲养, 通过后续的性腺切片观察或腹腔镜检验以佐证通过沙坑温度进行的性比推测。

第五章 总结与展望

5.1 成果总结

通过综合全部海龟轨迹的坐标点,得到如下活动热点区域:北部湾白龙尾岛及姑苏群岛附近海域、雷州半岛及琼州海峡海域、西沙群岛永兴岛附近海域、广东惠东附近海域、东沙岛附近海域、台湾海峡西边莆田附近海域、台湾海峡东边澎湖列岛以及台湾岛北部海域、菲律宾卡巴莱特岛附近海域以及山东烟台北部附近海域等。确认了经过琼州海峡和台湾海峡,西起广西、经广东、东至福建莆田的带状近岸海域是绿海龟主要迁移廊道。绿海龟的活动热点同海草床分布高度重合,且呈现近海分布的特点。根据卫星定位追踪的 20 只绿海龟活动轨迹制作的位移-时间图像,可将其分为了 4 种迁移类型:全程迁移型(I型),迁移后停留型(II型),迁移-停留-再迁移-再停留型(III型)及停留型(IV型)。除 I 型外其余三种类型所对应的个体均有相应的家域(Home Range),即海龟在某一地区低速折线式运动长达 30 天以上的区域。判断的家域范围包括:台湾岛东岸南段海域、台湾岛北部海域、东沙岛附近海域、福建莆田海域、西沙群岛永兴岛附近海域、北部湾白龙尾岛及姑苏群岛附近海域、广东湛江硃洲岛附近海域以及菲律宾卡巴莱特岛北侧海域。此外,本研究还结合了水深、海洋表层温度(SST)、海洋表层叶绿素 a 浓度(Chl-a)等遥感信息对迁移路径进行分析,结果显示绿海龟的活动集中于水深 200 米以浅水区,可适应的平均温度为 24.807 ± 0.119 °C,平均 Chl-a 浓度为 1.195 ± 0.042 mg/m³。结果还表明绿海龟对于特定的温度和 Chl-a 浓度并无明显的趋向性,表现为迁移路径的特征值与 SST、Chl-a 等环境生态参数并不呈现显著相关。

通过提取西沙群岛七连屿死蛋、死胚胎和死稚龟的 mtDNA (13 个样品)并对其控制区约 800 bp 和 384 bp 长度片段进行分析,共发现了分属于 2 个分支(Clade III, Clade VIII)的 5 种绿海龟单倍型(CmP18, CmP19, CmP20, CmP243, CmP244),其中包括本研究发现的 1 种单倍型(CmP244),而这也体现了西沙群岛较高的单倍型多样性以及群体特异性。将上述数据与 Gaillard et al. (2021) 研

究所得到的西沙群岛单倍型数据进行结合分析,确定了西沙群岛的绿海龟产卵群体同印度-太平洋及日本地区的其它产卵群体具有显著性差异的独立群体,可视为一个独立的管理单元,而这也将中国绿海龟的管理单元总数扩展到了3个。独立管理单元的确立为保护工作提供了指导,表明西沙群岛需要根据该地所存在的威胁海龟生存的因素采取个性化的保护措施,从而保证这一种群的延续。

本研究对七连屿的7个岛屿(西沙洲、赵述岛、北岛、南岛、北沙洲、中沙洲、南沙洲)进行了全年沙坑温度监测,结果表明了各岛屿沙坑温度同该地气温全年变化趋势整体一致,两者呈现显著性相关,裸露沙滩区的温度波动要显著大于植被覆盖区,这也导致了相对裸露且植被面积较小的北沙洲的沙坑温度同气温的相关性最高,且降水量的增多会引起月较差的增大。基于2020年海龟上岸产卵次数分析,北岛依然为七连屿蛋窝数最多的岛屿,可视为核心岛屿。七连屿全年的产卵高峰期则集中在6月-9月。由于气候变暖,海龟雌化已既成事实。根据上岸产卵日期以及全年沙坑温度监测,本研究还首次对七连屿绿海龟产卵场的孵化稚龟的性比做出了初步推测,结果表明产于5月-8月的海龟蛋窝所孵出的稚龟几乎全部为雌性,而全年完全雌化的蛋窝也占到了蛋窝总数的79.9%,并推测七连屿2020年全年的雌性性比为79.9%-92.6%。

5.2 特色与创新点

(1) 本研究首次使用“一日一点”的方式对海龟的运动路径进行分析,从而避免了卫星定位数据量过于庞大且分布不均匀所带来的数据分析方面的问题,也有利于通过“一日一点图”十分直观的看出海龟实际集中分布的区域以及运动迁移过程的大致路径。此外,首次通过位移-时间图像为主导方式来判断海龟可能存在的家域,能够快速确定海龟进出家域的时间范围,使原本琐碎且掺杂的数据变得简洁具象。

(2) 本研究从群体遗传学的角度分析了七连屿的绿海龟产卵群体。根据西沙群岛同周围地区产卵群体的显著差异,首次提出在西沙群岛确立一个全新的管理单元。由于该管理单元的相对独立性、遗传多样性高,呼吁管理部门需进一步了解该地区产卵群体的特点从而施行不同于其他国家和地区产卵群体的针对性保护。

(3) 本研究首次对西沙群岛七连屿各主要产卵岛屿的沙坑温度进行了全年监测,从而揭示了各岛全年沙坑温度的变化及其同当地气温之间的关系,并首次根据沙坑温度及全年产卵情况推测了该地孵化稚龟的性别比例。

5.3 不足与展望

绿海龟安装的卫星定位仪没有结合实时的海流监测数据,而这可能是影响海龟迁移路径的潜在重要因素之一。受制于部分地区短暂的追踪时间以及跟踪的个体数仍然较少(虽然本研究的跟踪数量已在国内团队中属于最多),可能存在更多的觅食场或活动热点区域没有被挖掘出来。因此期望后续加大在中国近海的海龟卫星定位追踪力度,通过更多、更详实的数据来尽可能还原绿海龟对我国近海海域的使用情况。由于海龟的性别在产卵期外很难从外观进行判别,因此我们无法从性别角度来分析海龟不同的迁移行为。另外也希望能开展对产卵后雌龟的跟踪研究。

尽管采集了三年来自于三个岛屿的样品,并结合了另一项研究的数据以扩充样本量,但本研究用于数据分析的样本依然较少($n=29$),因此西沙群岛的单倍型可能并没有完全涵盖,进而有可能影响同其它地区繁殖群体的对比分析结果。期望能够通过后续采样持续丰富样本量,从而尽可能保证样品采集的全面性以及分析结果的可靠性。

对于本次产卵场沙滩温度监测而言,由于除北岛外的其它岛屿所埋放的温度记录仪数量较少,且并没有登陆中岛埋放,导致了部分岛屿监测数据的缺失,在今后的研究当中应适当注意。此外,针对产卵场的监测项目可以适当增加,比如在温度方面还可以考虑监测海龟蛋孵化期的蛋窝内温度,在日常记录方面可以记录每一个蛋窝的位置坐标以及海龟蛋的孵化时长等等,从而丰富产卵场的基础生物学信息,为实现性比预测的精确化提供更多依据。

参考文献

- Abreu-Grobois F A, Horrocks J, Formia A, Leroux R A, Velez-Zuazo X, Dutton P, Soares L, Meylan P, Browne D C. New mtDNA D-loop primers which work for a variety of marine turtle species may increase the resolution capacity of mixed stock analysis [Z]. Proceedings of the 26th Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation, 3-8 April 2006, Crete, Greece.
- Ackerman R A, SeaGrave R C, Dmi' EL R, AR A. Water and heat exchange between parchment-shelled reptile eggs and their surroundings [J]. Copeia, 1985, 3: 703-711.
- Ackerman R A. The Biology of Sea Turtle, Volume I [M]// The nest environment and the embryonic development of sea turtle/ Boca Raton: CRC Press, 1997, 83-106.
- Balazs G. Synopsis of biological data on the green turtle in the Hawaiian Islands [R]. National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum, National Marine Fisheries Service, Southwest Fisheries Center, Honolulu Laboratory, Honolulu, Hawaii, 1980, 9-15.
- Balazs G H. Procedures to attach a satellite transmitter to the carapace of an adult green turtle, *Chelonia mydas*[C]//Proceedings of the 15th Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation, 1996.
- Barceló C, Domingo A, Miller P, Ortega L, Giffoni B, Sales G, McNaughton L, Marcovaldi M, Heppell S, Swimmer Y. High-use areas, seasonal movements and dive patterns of juvenile loggerhead sea turtles in the Southwestern Atlantic Ocean [J]. Marine Ecology Progress Series, 2013, 479: 235–250.
- Batschelet E. Circular statistics in biology [M]. New York: Academic Press, 1981, 201-210.
- Bjorndal K A. Nutrition and grazing behavior of the green turtle *Chelonia mydas* [J]. Marine Biology, 1980, 56(2): 147-154.
- Bjorndal K A, Bolten A B. Comparison of straight-line and over-the-curve

- measurements for growth rates of green turtles, *Chelonia mydas* [J]. Bulletin of Marine Science, 1989, 43: 189-192.
- Bjorndal K A, Bolten A B. Annual variation in source contributions to a mixed stock: implications for quantifying connectivity [J]. Molecular Ecology, 2008, 17: 2185-2193.
- Boissin E, Neglia V, D'hauteserre F B C, Tatarata M, Planes S. Evolutionary history of green turtle populations, *Chelonia mydas*, from French Polynesia highlights the putative existence of a glacial refugium [J]. Marine Biodiversity, 2019, 49(6): 2725-2733.
- Booth D T, Freeman C. Sand and nest temperatures and an estimate of hatchling sex ratio from the Heron Island green turtle (*Chelonia mydas*) rookery, Southern Great Barrier Reef [J]. Coral Reefs, 2006, 2: 629-633.
- Booth D T. Influence of incubation temperature on sea turtle hatchling quality [J]. Integrative Zoology, 2017, 12: 352-360.
- Carr A. The navigation of the green turtle[J]. Scientific American, 1965, 212(5): 78-87.
- Casale P, Broderick A C, Freggi D, Mencacci R, Fuller W J, Godley B J, Luschi P. Long-term residence of juvenile loggerhead turtles to foraging grounds: a potential conservation hotspot in the Mediterranean [J]. Aquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystem, 2012, 22: 144-154.
- Chan S K-F, Cheng I-J, Zhou T, Wang H-J, Gu H-X, Song X-J. A comprehensive overview of the population and conservation status of sea turtle in China [J]. Chelonian Conservation and Biology, 2007, 6(2): 185-198.
- Chen C-L, Wang C-C, Cheng I-J. Effects of biotic and abiotic factors on the oxygen content of green sea turtle nests during embryogenesis [J]. Journal of Comparative Physiology, 2010, 180: 1045-1055.
- Cheng I-J. Sea turtles at Taipin Tao, South China Sea [J]. Marine Turtle Newsletter, 1996, 75: 6-8.
- Cheng I-J, Dutton P H, Chen C L, Chen H C, Chen Y H, Shea J W. Comparison of the genetics and nesting ecology of two green turtle rookeries [J]. Journal of Zoology,

- 2008, 276: 375-384.
- Cheng I-J, Lin C-h, T C-T. Factors influencing variations of oxygen content in nests of green sea turtles during egg incubation with a comparison of two nesting environments [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2015, 471: 104-111.
- Collecte Localisation Satellites. Argos Users's Manual [OL]. 2008, http://www.argos-system.org/documents/userarea/argos_manual_en.pdf
- Commonwealth of Australia. Recovery plan for marine turtles in Australia 2017–2027 [R]. Department of the Environment and Energy, Australian Government, 2017.
- Dethmers K E M, Broderick D, Moritz C, Fitzsimmons N N, Limpus C J, Lavery S, Whiting S, Guinea M, Prince R I T, Kennett R. The genetic structure of Australasian green turtles (*Chelonia mydas*): exploring the geographical scale of genetic exchange [J]. *Molecular Ecology*, 2006, 15: 3931-3946.
- Dutton P H, Jensen M P, Frutchey K, Frey A, LaCasella E, Balazs G H, Cruce J, Tagarino A, Farman R, Tatarata M. Genetic stock structure of green turtle (*Chelonia mydas*) nesting populations across the Pacific Islands [J]. *Pacific Science*, 2014, 68(4): 451-464.
- Esteban N, Laloe J-O, Mortimer J A, Guzman A N, Hays G C. Male hatchling production in sea turtles from one of the world's largest marine protected areas, the Chagos Archipelago [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20339.
- Excoffier L, Lischer H E L. Arlequin suite ver 3.5: A new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows [J]. *Molecular Ecology Resources*, 2010, 10: 564-567.
- FitzSimmons N N. Single paternity of clutches and sperm storage in the promiscuous green turtle (*Chelonia mydas*) [J]. *Molecular Ecology*, 1998, 7: 575-584.
- Foley A M, Schroeder B A, Hardy R, MacPherson S L, Nicholas M, Coyne M S. Postnesting migratory behavior of loggerhead sea turtles *Caretta caretta* from three Florida rookeries [J]. *Endangered Species Research*, 2013, 21: 129-142.
- Formia A, Godley B J, Dontaine J F, Bruford M W. Mitochondrial DNA diversity and

- phylogeography of endangered green turtle (*Chelonia mydas*) populations in Africa [J]. *Conservation Genetics*, 2006, 7: 353-369.
- Frazier S S, Frazier J G, Ding H, Huang Z, Zheng J, Lu L. Sea turtles in Fujian and Guangdong Provinces [J]. *Acta Herpetologica Sinica*, 1988, 1: 16-46.
- Fuentes M, Maynard J A, Guinea M, Bell I P, Werdell P J, Hamann M. Proxy indicators of sand temperature help project impacts of global warming on sea turtles in northern Australia [J]. *Endangered Species Research*, 2009, 9: 33-40.
- Gaillard D, Yeh F C, Lin L, Chen H Q, Zhang T, Luo S J, Shi H T. Lost at sea: determining geographic origins of illegally traded green sea turtles (*Chelonia mydas*) rescued on Hainan Island, China [J]. *Wildlife Research*, 2021, 48: 55-63.
- Gammon M, Fossette S, McGrath G, Mitchell N. A systematic review of metabolic heat in sea turtle nests and methods to model its impact on hatching success [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, 8: 556379.
- Gaos A R, Lewison R L, Wallace B P, Yañez L M Y, Nichols W J, Baquera A, Seminoff J A. Spatial ecology of critically endangered hawksbill turtles *Eretmochelys imbricata*: Implications for management and conservation [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 450: 181-194.
- Godfrey M, Mrosovsky N. Pivotal Temperature for green sea turtles, *Chelonia mydas*, nesting in Suriname [J]. *Herpetological Journal*, 2006, 16(1): 55-61.
- Godley B J, Broderick A C, Glen F, Hays G C. Temperature-dependent sex determination of Ascension Island green turtles [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 226: 115-124.
- Gregory T. The International Encyclopedia of Primatology [M]// Home Range Estimation/ [Online] John Wiley & Sons, 2017, Volume 3: pp. 1-4.
- Groombridge B, Luxmore R. The green turtle and hawksbill turtle (Reptilia Cheloniidae): world status, exploitation and trade [M]// Summary/ Switzerland: The Secretariat of the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, 1989, 1-4.
- Hamabata T, Kamezaki N, Hikida T. Genetic structure of green turtle (*Chelonia mydas*)

- peripheral populations nesting in the northwestern Pacific rookeries: evidence for northern refugia and postglacial colonization [J]. *Marine Biology*, 2014, 161: 495-507.
- Hamabata T, Hikida T, Okamoto K, Watanabe S, Kamezaki N. Ontogenetic habitat shifts of green turtles (*Chelonia mydas*) suggested by the size modality in foraging aggregations along the coasts of the western Japanese main islands [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2015, 463: 181-188.
- Hamann M, Limpus C J, Owens D W. The biology of sea turtles, Volume II [M]// Reproductive cycles of males and females/ Boca Raton: CRC Press, 2003, 135-162.
- Hamann M, Limpus C, Read M. Vulnerability of marine reptiles in the Great Barrier Reef to climate change [M]// Climate change and the Great Barrier Reef: a vulnerability assessment/ QLD: Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, 2007, 465-496.
- Hawkes L, Broderick A, Godfrey M, Godley B. Investigating the potential impacts of climate change on a marine turtle population [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 923-932.
- Hawkes L A, Witt M J, Broderick A C, Coker J W, Coyne M S, Dodd M, Frick M G, Godfrey M H, Griffin D B, Murphy S R, Murphy T M, Williams K L, Godley B J. Home on the range: spatial ecology of loggerhead turtles in Atlantic waters of the USA [J]. *Diversity and Distributions*, 2011, 17: 624-640.
- Hays G C, Broderick A C, Glen F, Godley B J. Climate change and sea turtles: a 150-year reconstruction of incubation temperatures at a major marine turtle rookery [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 642-646.
- Hays G C, Fossette S, Katselidis K A, Schofield G, Gravenor M B. Breeding periodicity for male sea turtles, operational sex ratios, and implications in the face of climate change [J]. *Conservation Biology*, 2010, 24: 1636-1643.
- Hirth H F. Synopsis of the biological data on the green turtle *Chelonia mydas* (Linnaeus

- 1758) [M]// Distribution/ Washington, D.C.: Fish & Wildlife Service, US Department of the interior, 1997, 2:1-8.
- Hooge P N, Eichenlaub W, Solomon E. The Animal Movement Program [R]. Anchorage, AK: United States Geologic Survey, Alaska Biological Science Center, 1999.
- Ishihara T, Matsuzawa Y, Wang J, Peckham S H. 2nd International workshop to mitigate bycatch of sea turtles in Japanese pound nets [J]. Marine Turtle Newsletter, 2011, 130: 27-28.
- Jensen M P, Bell I, Limpus C J, Hamann M, Ambar S, Whap T, David C, Fitzsimmons N N. Spatial and temporal genetic variation among size classes of green turtles (*Chelonia mydas*) provides information on oceanic dispersal and population dynamics [J]. Marine Ecology Progress Series, 2016, 543: 241-256.
- Jensen M P, FitzSimmons N N, Bourjea J, Hamabata T, Reece J, Dutton P H. The evolutionary history and global phylogeography of the green turtle (*Chelonia mydas*) [J]. Journal of Biogeography, 2019, 46: 860-870.
- Jia Y, Wang J, Balazs G H, Liu M. Nest productivity for green turtles (*Chelonia mydas*) at Qilianyu of Xuande Islands, South China Sea, P.R. China: preliminary findings [J]. Chelonian Conservation and Biology, 2019, 18: 116-120.
- Kamel S J. Vegetation cover predicts temperature in nests of the hawksbill sea turtle: implications for beach management and offspring sex ratios [J]. Endangered Species Research, 2013, 20: 41-48.
- Kang B, Liu M, Huang X X, Li J, Yan Y-R, Han C-C, Chen S-B. Fisheries in Chinese seas: what can we learn from controversial official fisheries statistics? [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2018, 28(3): 503-519.
- Kaska Y, Ilgaz Ç, Özdemir A, Başkale E, Türkozan O, Baran I, Stachowitsch M. Sex ratio estimations of loggerhead sea turtle hatchlings by histological examination and nest temperatures at Fethiye beach, Turkey [J]. Naturwissenschaften, 2006, 93: 338-343.
- Kaska Y, Sezgin C. Evaluation of nest temperatures on Dalyan beach, Turkey [Z]. The

- Thirty-Sixth Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation (Lima: NOAA Technical Memorandum NOAA NMFS-SEFSC-734), 2019.
- Katselidis K A, Schofield G, Stamou G, Dimopoulos P, Pantis J D. Females first? Past, present and future variability in offspring sex ratio at a temperate sea turtle breeding area [J]. *Animal Conservation*, 2012, 15: 508–518.
- King R, Cheng W-H, Tseng C-T, Chen H, Cheng I-J. Estimating the sex ratio of green sea turtles (*Chelonia mydas*) in Taiwan by the nest temperature and histological methods [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, 445: 140-147.
- Koichiro T, Glen S, Daniel P, Alan F, Sudhir K. MEGA6: molecular evolutionary genetics analysis version 6.0 [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2013, 30(12): 2725-2729.
- Komoroske L M, Jensen M P, Stewart K R, Shamblin B M, Dutton P H. Advances in the application of genetics in marine turtle biology and conservation [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 156.
- Laloë J-O, Cozens J, Renom B, Taxonera A, Hays G C. Effects of rising temperature on the viability of an important sea turtle rookery[J]. *Nature climate change*, 2014, 4: 513-518.
- Laloë J-O, Esteban N, Berkel J, Hays G C. Sand temperatures for nesting sea turtles in the Caribbean: implications for hatchling sex ratios in the face of climate change [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2016, 474: 92–99.
- LeRoux R A, Dutton P H, Abreu-Grobois F A, Lagueux C J, Campbell C L, Delcroix E, Chevalier J, Horrocks J A, Hillis-Starr Z, Troëng S, Harrison E, Stapleton S. Re-examination of population structure and phylogeography of hawksbill turtles in the wider Caribbean using longer mtDNA sequences [J]. *Journal of Heredity*, 2012, 103(6): 806-820.
- Limpus C J. The green turtle, *Chelonia mydas*, in Queensland: breeding males in the Southern Great Barrier Reef [J]. *Wildlife Research*, 1993, 20: 513-523.
- Lolavar A & Wyneken J. Experimental assessment of the effects of moisture on

- loggerhead sea turtle hatchling sex ratios [J]. *Zoology*, 2017, 123: 64-70.
- Loop K A, Miller J D, Limpus C J. Nesting by the hawksbill turtle (*Eretmochelys imbricata*) on Milman Island, Great Barrier Reef, Australia [J]. *Wildlife Research*, 1995, 22(2): 241-251.
- Luschi P, Hays G C, Del Seppia C, Marsh R, Papi F. The navigational feats of green sea turtles migrating from Ascension Island investigated by satellite telemetry [J]. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 1998, 265: 2279–2284.
- McCarthy A L, Heppell S, Royer F, Freitas C, Dellinger T. Identification of likely foraging habitat of pelagic loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in the North Atlantic through analysis of telemetry track sinuosity [J]. *Progress in Oceanography*, 2010, 86: 224–231.
- McGehee M A. Effects of moisture on eggs and hatchlings of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) [J]. *Herpetologica*, 1990, 46: 251–258.
- Miller JD. *Biology of the Reptilia [M]// Embryology of marine turtles/* New York: Wiley Interscience, 1985, 271–328.
- Moritz C. Defining 'Evolutionarily Significant Units' for conservation [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1994, 9: 373-375.
- Mortimer J A. The feeding ecology of the West Caribbean green turtle (*Chelonia mydas*) in Nicaragua [J]. *Biotropica*, 1981, 13(1): 49-58.
- Mrosovsky N & Pieau C. Transitional range of temperature, pivotal temperatures and thermosensitive stages for sex determination in reptiles [J]. *Amphibia-Reptilia*, 1991, 12: 169-179.
- Mrosovsky N. Sex ratios of sea turtles [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1994, 270: 16–27.
- Ng C K Y, Dutton P H, Chan K F, Cheung K S, Qiu J W, Sun Y N. Characterization and conservation concerns of green turtles (*Chelonia mydas*) nesting in Hong Kong, China [J]. *Pacific Science*, 2014, 68: 231-243.
- Ng C K Y, Dutton P H, Gu H X, Li T H, Ye M B, Xia Z R, Zhang F Y, Duan J X, Hsu

- C K, Balazs G H, Murphy M B. Regional conservation implications of green turtle (*Chelonia mydas*) genetic stock composition in China [J]. *Chelonian Conservation and Biology*, 2017, 16(2): 139-150.
- Ng C K Y, Gu H X, Li T H, Ye M B, Xia Z R, Zhang F Y, Duan J X, Hsu C K, Balazs G H, Murphy M B. Insights into identifying habitat hot spots and migratory corridors of green turtles in the South China region [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem*, 2018, 1-11.
- Nishizawa H, Okuyama J, Kobayashi M, Abe O, Arai N. Comparative phylogeny and historical perspectives on population genetics of the Pacific hawksbill (*Eretmochelys imbricata*) and green turtles (*Chelonia mydas*), inferred from feeding populations in the Yaeyama Islands, Japan [J]. *Zoological Science*, 2010, 27(1): 14-18.
- Nishizawa H, Abe O, Okuyama J, Kobayashi M, Arai N. Population genetic structure and implications for natal philopatry of nesting green turtles *Chelonia mydas* in the Yaeyama Islands, Japan [J]. *Endangered Species Research*, 2011, 14: 141-148.
- Nishizawa H, Naito Y, Suganuma H, Abe O, Okuyama J, Hirate K, Tanaka S, Inoguchi E, Narushima K, Kobayashi K, Ishii H, Tanizaki S, Kobayashi M, Goto A, Arai N. Composition of green turtle feeding aggregations along the Japanese archipelago: implications for changes in composition with current flow [J]. *Marine Biology*, 2013, 160: 2671-2685.
- Nishizawa H, Narazaki T, Fukuoka T, Sato K, Hamabata T, Kinoshita M, Arai N. Juvenile green turtles on the northern edge of their range: mtDNA evidence of long-distance westward dispersals in the northern Pacific Ocean [J]. *Endangered Species Research*, 2014, 24:171-179.
- Niemuth J N, Harms C A, Macdonald J M, Stoskopf M K. NMR-based metabolomic profile of cold stun syndrome in loggerhead *Caretta caretta*, green *Chelonia mydas* and Kemp's ridley *Lepidochelys kempii* sea turtles in North Carolina, USA [J]. *Wildlife Biology*, 2020, 1:1-14.
- Norman J A, Moritz C, Limpus C J. Mitochondrial DNA control region polymorphisms:

- genetic markers for ecological studies of marine turtles [J]. *Molecular Ecology*, 1994, 3: 363-373.
- Packard G C, Tracy C R, Roth J J. The physiological ecology of reptilian eggs and embryos, and the evolution of viviparity within the class Reptilia [J]. *Biology Reviews Cambridge Philosophical Society*, 1977, 52: 71–105.
- Palma J A M. Marine turtle conservation in the Philippines and initiatives towards a regional management and conservation program [M]// *Marine turtle research and management in Indonesia*, Wetlands International/ Bogor: PHPA/Environment Australia, 1997, 121-138.
- Patrício A R, Marques A, Barbosa C, Broderick A C, Godley B J, Hawkes L A, Rebelo R, Regalla A, Catry P. Balanced primary sex ratios and resilience to climate change in a major sea turtle population [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, 577: 189-203.
- People’s Republic of China. Action plan of sea turtle conservation (Years 2019 to 2033) [Z]. Ministry of Agriculture and Rural Affairs, People’s Republic of China, 2018.
- Phillips K F, Stahelin G D, Chabot R M, Mansfield K L. Long-term trends in marine turtle size at maturity at an important Atlantic rookery [J]. *Ecosphere*, 2021, 12(7): e03631.
- Read T C, FitzSimmons N N, Wantiez L, Jensen M P, Keller F, Chateau O, Farman R, Werry J, MacKay K T, Petro G, Limpus C J. Mixed stock analysis of a resident green turtle, *Chelonia mydas*, population in New Caledonia links rookeries in the South Pacific [J]. *Wildlife Research*, 2015, 42: 488-499.
- Sandoval-Lugo A G, Espinosa-Carreón T L, Seminoff J A, Hart C E, Ley-Quiñónez C P, Aguirre A A, Jones T T, Zavala-Norzagaray A A. Movements of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in the Gulf of California: integrating satellite telemetry and remotely sensed environmental variables [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2020, 100: 817–824.
- Sayers E W, Cavanaugh M, Clark K, Ostell J, Pruitt K D, Karsch-Mizrachi I. GenBank [OL]. 2019, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>.

- Schwartz M K, Luikart G, Waples R S. Genetic monitoring as a promising tool for conservation and management [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(1): 25-33.
- Seminoff J A. *Chelonia mydas* [J]. The IUCN Red List of Threatened Species, 2004, e.T4615A11037468.
- Seminoff J A, Resendiz A, Nichols W J. Home range of green turtles *Chelonia mydas* at a coastal foraging area in the Gulf of California, Mexico [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 242: 253-265.
- Seminoff J A, Zárate P, Coyne M, Foley D, Parker D, Lyon B, Dutton P H. Post-nesting migrations of Galápagos green turtles (*Chelonia mydas*) in relation to oceanographic conditions: integrating satellite telemetry with remotely sensed ocean data [J]. *Endangered Species Research*, 2008, 4:57–72.
- Seminoff J A, Allen C D, Balazs G H, Dutton P H, Eguchi T, Haas H L, Hargrove S A, Jensen M P, Klemm D L, Lauritsen A M, MacPherson S L, Opay P, Possardt E E, Pultz S L, Seney E E, Van-Houtan K S, Waples R S. Status review of the green turtle (*Chelonia mydas*) under the U.S. Endangered Species Act [R]. NOAA Technical Memorandum, NOAA/NMFS-SWFSC-539, 2015, 571 pp.
- Short F, Carruthers T, Dennison W, Waycott M. Global seagrass distribution and diversity: A bioregional model [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 350: 3–20.
- Sloan K A, Addison D S, Glinsky A T, Benschoter A M and Hart K M. Inter-nesting movements, migratory pathways, and resident foraging areas of green sea turtles (*Chelonia mydas*) satellite-tagged in Southwest Florida [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 8:775367.
- Song J-h, Lin B-a, Jia-Y-y, Dutton P H, Kang B, Balazs G H, Liu M. New management unit for conservation of the Endangered green turtle *Chelonia mydas* at the Xisha (Paracel) Islands, South China Sea [J]. *Endangered Species Research*, 2022, 47: 145-154.
- Standora E A, Spotila J R. Temperature dependent sex determination in sea turtles [J].

- Copeia, 1985, 3: 711–722.
- Stubbs J L, Mitchell N J. The influence of temperature on embryonic respiration, growth and sex determination in a Western Australian population of green turtles (*Chelonia mydas*) [J]. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2018, 91(6): 1102–1114.
- Sudo K & Nakaoka M. Fine-scale distribution of tropical seagrass beds in Southeast Asia [J]. *Ecological Research*, 2020, 35(6): 994–1000.
- Tanner C E, Marco A, Martins S, Abella-Perez E, Hawkes L A. Highly feminised sex-ratio estimations for the world’s third-largest nesting aggregation of loggerhead sea turtles [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2019, 621: 209–219.
- Taylor B L, Dizon A E. First policy then science: why a management unit based solely on genetic criteria cannot work [J]. *Molecular Ecology*, 1999, 8: S11–S16.
- Uçar A H, Kaska Y, Ergene S, Aymak C, Kaçar Y, Kaska A, Ili P. Sex ratio estimation of the most eastern main loggerhead sea turtle nesting site: Anamur Beach, Mersin, Turkey [J]. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 2013, 58(1): 87–100.
- Valverde-Cantillo V, Robinson N J, Tomillo P S. Influence of oceanographic conditions on nesting abundance, phenology and internesting periods of east Pacific green turtles [J]. *Marine Biology*, 2019, 166: 93.
- Wallace B P, Sotherland P R, Spotila J R, Reina R D, Franks B F, Paladino F V. Biotic and abiotic factors affect the nest environment of embryonic leatherback turtles, *Dermochelys coriacea* [J]. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2004, 77: 423–432.
- Wallace B P, Dimatteo A D, Hurley B J, Finkbeiner E M, Bolten A B, Chaloupka M Y, Hutchinson B J, Abreu-Grobois F A, Amorocho D, Bjorndol K A, Bourjea J, Bowen B W, Duenas R B, Casale P, Choudhury B C, Costa A, Dutton P H, Fallabrino A, Girard A, Girondot M, Godfrey M H, Hamann M, Lopez-Mendilaharsu M, Marcovaldi M A, Mortimer J A, Musick J A, Nel R, Pilcher N J, Seminoff J A, Troeng S, Witherington B, Mast R B. Regional management units for marine turtles: a novel framework for prioritizing conservation and research

- across multiple scales [J]. PLOS ONE, 2010, 5(12): e24510.
- Witt M J, Åkesson S, Broderick A C, Coyne M S, Ellick J, Formia A, Hays G C, Luschi P, Stroud S, Godley B J. Assessing accuracy and utility of satellite-tracking data using Argos-linkedFastloc-GPS [J]. Animal Behavior, 2010, 80: 571-581.
- Worton B J. Kernel methods for estimating the utilization distribution in home-range studies [J]. Ecology, 1989, 70: 164-168.
- Wyneken J, Lolavar A. Loggerhead sea turtle environmental sex determination: implications of moisture and temperature for climate change based predictions for species survival [J]. Journal of Experimental Zoology, 2015, 323B: 295-314.
- Yang W, Wang Y, Chen M. Genetic structure and diversity of green sea turtle (*Chelonia mydas*) from South China Sea inferred by mtDNA control region sequence [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2015, 60: 95-98.
- Yao Y-T, Du Y, Pan J-X, Lin C-X, Ji X, You W-H. Incubating green turtle (*Chelonia mydas*) eggs at constant temperatures: hatching success, hatchling morphology and post-hatch growth [J]. Journal of Thermal Biology, 2022, 104: 103182.
- Zbinden J A, Aebischer A, Margaritoulis D, Arlettaz R. Important areas at sea for adult loggerhead sea turtles in the Mediterranean Sea: satellite tracking corroborates findings from potentially biased sources [J]. Marine Biology, 2008, 153: 899-906.
- Zollner P A & Lima S L. Search strategies for landscape level interpatch movements [J]. Ecology, 1999, 80: 1019-1030.
- 古河祥, 夏中荣, 李丕鹏, 端金霞, 叶明斌, 张飞燕, 陈华灵, 林日锦. 绿海龟稚龟性别鉴定及临界温度[J]. 动物学杂志, 2010, 45(4): 81-88.
- 黄晖 编. 中国珊瑚礁状况报告 (2010-2019) [M]. 北京: 海洋出版社, 2021, 2-10.
- 贾语嫣. 中国海域海龟迁移特征与产卵场现状[D]. 厦门大学硕士学位论文, 2019.
- 夏中荣, 古河祥. 绿海龟卫星追踪报道[J]. 四川动物, 2012, 31(3): 435-439.
- 张晓荣, 李放明, 王伦武. 稚海龟的雌雄辨别[J]. 动物学杂志, 1995, 30(1): 48-49.
- 郑凤英, 邱广龙, 范航清, 张伟. 中国海草的多样性、分布及保护[J]. 生物多样性, 2013, 21(5): 517-526.

攻读硕士学位期间发表的论文、撰写的报告以及参与的项目

发表论文:

Song J H, Lin B A, Jia Y Y, Dutton P H, Kang B, Balazs G H, Liu M. New management unit for conservation of the endangered green turtle *Chelonia mydas* at the Xisha (Paracel) Islands, South China Sea. *Endangered Species Research*, 2022, 47:145-154.

参与撰写报告:

刘敏、任庆强、宋稼豪。《海南省三沙市宣德群岛海洋生态调查简报——2019年12月23日至2020年1月5日航次》

刘敏、任庆强、宋稼豪。《海南省三沙市七连屿海洋生态调查简报——2020年12月航次》

参与项目:

“编制海龟栖息地保护方案”: 国家林业和草原局自然保护地管理司(2019-2020)

“海龟栖息地保护能力建设”: 农业农村部渔业渔政管理局(2019-2021)

“雷州半岛周边海域海龟资源科学考察”项目: 广东科学技术厅(2022-2023)

“2022海龟关键栖息地保护以及救护海龟科学放归”: 北京市企业家环保基金会(2022-2023)

致谢

走上周隆泉楼悠长的楼梯，沿着 B2 区昏暗的走廊向前步步寻觅，终于在尽头看到了一间亮着灯的屋子，凭借着屋中透出的光确认了一下房间号，B2-309，没错，就是这里。我敲开门走了进去，开启了自己的三年之旅。回首这三年，有欢乐，有泪水，有煎熬，有感动，然而回想这交织着酸甜苦辣的生活，我最想说的依然是感谢。

首先感谢的，是我最亲爱以及敬爱的导师，刘敏教授。我时常感慨命运的神奇，而正是老师让我见证到了好运其实同样可以在我身上降临，兜兜转转，希望又失望，但最终在几经绝望之时圆了我的梦想，将我带进了我自大三之时就梦寐以求的鱼类生物学实验室。在周围同学都饱受科研之苦时，是老师一直用谆谆的教导、广阔的胸襟以及开放的眼光呵护着我对生物学研究热爱的火种，并淬炼着我科研的精神；刘老师以她热忱的工作态度、渊博的知识和严谨的治学态度言传身教，教导我作为一个科研人应当具备的品质：严谨、做人、感恩。尤记得自己的第一篇文章尚在雏形之际，是老师熬过无数个深夜帮助我将文章一步步推敲成型，也记得老师顶着身体的强烈不适，冒着倾盆大雨陪我在南岛找寻埋放的仪器，刘老师在时刻以自身行动践行着对学生的责任感。桃李不言，下自成蹊，惟愿自己能够时刻铭记刘老师的教导，在往后的科研道路上越走越远，以报答老师的栽培，并将老师的精神传递给更多的人。

感谢 George Balazs 先生，我的“第二导师”，时刻以最专业的视角来回答我在研究过程中提出的每个问题，在我第一篇文章创作之时对我的诸多建议和指导，在我升学申请之时给予我的推荐和帮助，以及在平日里跟我分享他的日常以及对诸多事件的看法，他对生活的豁达以及对科研近乎刻板般的严谨均使我受益匪浅。此外，感谢 Peter Dutton 先生对于我的第一篇文章所做出的建议以及对他的发表所作出的巨大贡献，感谢 Connie 女士对我及我们团队的帮助、推荐与支持，感谢三沙市政府、七连屿工委对我们团队进行绿海龟产卵场研究所给予的大力支持。

特别感谢贾语嫣师姐，作为我们实验室的第一代“海龟人”，师姐在读期间所做的大量而细致的工作为我留下了宝贵的经验，使我能够站在巨人的肩膀上继

续进行海龟研究。面对我的疑问，师姐总是会实时且耐心的解答。也正是由于这些帮助，自己才能够顺利完成老师所布置的每项任务，并有所成绩。

感谢林柏岸师兄，是师兄丰富的经验、真诚的建议帮助我走出研一在科研上的不适期，使我少走了很多弯路，而在处理样品、处理数据、修改文章上的悉心指导帮助我迈出了科研上第一步坚实的脚步；感谢姜艳师姐，给我们讲故事讲八卦给我们带来无限快乐；感谢张蓝蓝师姐和蔡旺进师兄与我相约球场，挥洒汗水；感谢任庆强师兄给我分享诸多学习资源，时刻提醒我目前该做的事情，以及对我的无限鼓励和信任；感谢颜丽婷师妹带我尝遍天下美食，并在我不会写代码之时给予我及时的帮助；感谢杨国晗师弟作为我的体力担当，丰富我们的知识，给我和实验室带来欢声笑语；感谢刘彩莲师妹带我观鸟，与我分享自己的故事与日常，以及对我行为习惯的督促；感激叶燕茹师姐、陈馨怡师妹、林杰师弟、姜晨锐师妹在日常测样、实验以及生活中给我带来的诸多帮助和美好回忆。

感谢章博文和慈东箭二位师弟以及赵宇师兄在处理数据方面给予我的专业支持与帮助，感谢崔文会、刘倩倩、马一帆等好友在我失意之时基于我的鼓励、劝慰以及最大的精神支持，感谢陈学雷老师给我的推荐，感谢金鹏老师带我们吃香喝辣，给我们讲述人生道理以及对于我们课题组的大力支持。

特别感谢许庆，我最好的朋友。不管是作为师兄对师弟的提携帮助，还是平日作为朋友互相倾诉衷肠，抑或是作为过来人给予我的建议、指导和忠告，都使我受益良多。我们一起上过的小破船、挤过的小破屋，你的口音、笑声、表情以及丰富的肢体语言都将是研究生生涯最难忘的回忆之一。

最后，我要感谢我的前女友吕文菁。两年多的朝夕陪伴几乎贯穿了我这最美好三年的始末，我也从一个恋爱小白逐渐成长为一只懵懵懂懂的恋爱菜鸟。放眼整个厦园，满眼都是你坐在我自行车后座一起上下班、一起吃饭、一起运动、一起赶组会、一起旅游、一起吐槽、一起看电影、一起打游戏的场景。你教给了我怎样真正对一个女生好，怎样照顾女生，并为我出谋划策，时刻劝我自信的面对一切，所有美好的回忆我都牢牢的铭记在心。尽管离别不太体面，但我相信时光终会涤去回忆里的尘埃，留下那最甘甜的琼浆，珍藏于心底。

当目光重新聚焦，电脑屏幕映出了我最该感谢的那个人的影子，我想对他说：你找到了，也找对了，B2-309，就是这里！