



研究论文 ORIGINAL PAPERS

海南东寨港国家级自然保护区
海陆蛙的空间分布格局及保护对策李华亮^{1#}, 张明军^{2,3#}, 张熙斌¹, 李诗川¹, 陈珉^{3,4}, 颜文博⁵, 曾治高^{2*}

(1. 海南东寨港国家级自然保护区管理局, 海口 571129;

2. 中国科学院动物研究所动物多样性保护与有害动物防控全国重点实验室, 北京 100101;

3. 华东师范大学生态与环境科学学院崇明生态研究院, 上海 200241;

4. 华东师范大学海南研究院, 三亚 572025;

5. 陕西理工大学陕西省资源生物重点实验室, 汉中 723001)

稿件运行过程

收稿日期: 2025-03-17

修回日期: 2025-09-20



关键词: 红树林;

两栖动物;

海陆蛙;

分布格局;

水盐度

Keywords: Mangroves;

Amphibians;

Fejervarya moodiei;

Distribution pattern;

Water salinity

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-04-0828-11

DOI: 10.12375/ysdwxb.202503011

摘要

海陆蛙 (*Fejervarya moodiei*) 是红树林湿地中的优势两栖物种, 也是海南省省级重点保护野生动物。目前, 关于海陆蛙在红树林湿地类自然保护区中的空间分布格局及其影响因素的认识仍然较为有限。为探究海南东寨港国家级自然保护区海陆蛙的空间分布特征, 于2022年7月—2023年4月, 在保护区内布设了49条长200 m的固定调查样线, 并开展3轮夜间样线调查。结果表明: 保护区内海陆蛙的空间分布存在明显差异, 南部片区核心区的海陆蛙数量显著高于缓冲区, 北部片区则反之, 且南部片区核心区的海陆蛙数量显著大于北部片区核心区。水盐度、气温、水温和潮高等生态因子均能影响区内海陆蛙的分布。海陆蛙数量与环境水盐度和水体pH呈负相关, 却分别与气温、水温和潮高呈正相关。基于上述结果, 本研究为海陆蛙保护提出两点对策建议: 第一, 将南部片区的核心区规划为海陆蛙的优先保护区域; 第二, 从49条固定调查样线中筛选出海陆蛙出现频率较高的20条样线(南、北片区各10条), 作为未来的固定监测样线, 以制定科学的监测方案。本研究丰富了海南东寨港国家级自然保护区海陆蛙的生态学资料, 为红树林保护区中海陆蛙的保护与管理提供了科学依据。

基金项目: 海南东寨港国家级自然保护区管理局项目[动合(科)2022-199]

第一作者简介: 李华亮(1979—), 男, 林业工程师; 主要从事野生动物保护与管理研究。E-mail: hndzoffice@163.com

* 共同第一作者: 李华亮; 张明军

* 通信作者: 曾治高, E-mail: zengzhg@ioz.ac.cn

Spatial Distribution Pattern and Conservation Measures of *Fejervarya moodiei* in Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

LI Hualiang^{1#}, ZHANG Mingjun^{2,3#}, ZHANG Xibin¹,
LI Shichuan¹, CHEN Min^{3,4}, YAN Wenbo⁵, ZENG Zhigao^{2*}

- (1. Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve Authority, Haikou 571129, China;
2. State Key Laboratory of Animal Biodiversity Conservation and Integrated Pest Management, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. School of Ecological and Environmental Sciences, Institute of Eco-Chongming, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
4. Hainan Institute of East China Normal University, Sanya 572025, China;
5. Shaanxi Key Laboratory of Bio-Resources, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: *Fejervarya moodiei* is the dominant amphibian species in mangrove wetlands, and is also a provincial key protected wild animal in Hainan Province. At present, our understanding of the spatial distribution pattern and influencing factors of *F. moodiei* in mangrove wetland type nature reserves is still relatively lacking. In order to deeply understand the spatial distribution of *F. moodiei* in the Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve, 49 fixed sample lines with a length of 200 m were laid out in the reserve, and three rounds of night line transect surveys were carried out from July 2022 to April 2023. The results showed that there were some spatial differences in the distribution of *F. moodiei* in the reserve. The core zone of the southern area harbored significantly greater abundance of *F. moodiei* compared to the buffer zone, and vice versa in the northern area, and there were significantly greater abundance of *F. moodiei* in the southern core zone than in the northern core zone. Ecological factors such as water salinity, air temperature, water temperature and tide height could affect the distribution of *F. moodiei* in the reserve. The number of *F. moodiei* recorded in the survey was negatively correlated with water salinity and pH value of environments, but positively correlated with air temperature, water temperature and tidal height respectively. This paper put forward two countermeasures and suggestions for the protection of *F. moodiei*: (1) planning the core zone of the southern area as the priority protection area of *F. moodiei*; (2) from the 49 fixed sample lines, 20 samples (10 in the south and 10 in the north) which could record more *F. moodiei* were determined as future fixed monitoring sample lines, so as to make a scientific monitoring plan. This study enriched the ecological data of *F. moodiei* in the Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve, and provided scientific basis for strengthening future protection and management of *F. moodiei* in mangrove reserves.

生物多样性保护已成为全球性的重大议题^[1]。深入了解野生动物尤其是受保护的野生动物的空间分布,对于动物多样性保护至关重要^[2-4]。每种动物都有其特定的生存需求,这与其地理位置、气候条件和食物来源等紧密相关^[5-8]。掌握受保护野生动物的空间分布,有助于准确识别其栖息地,从而更有效地预测和评估人类活动对它们的潜在影响^[6]。同时,这也有助于确定物种保护的优先区域与保护空

缺,进而制定出相应的定期监测方案^[5,9-10]。因此,加强对受保护野生动物空间分布的了解,是生物多样性保护工作中不可或缺的一环,也为物种的长期保护和生态系统的可持续发展奠定基础。

作为一种重要湿地生态系统,海岸带的红树林具有维持滨海生物多样性的关键生态功能^[11]。为保护红树林湿地生态系统,许多自然保护区相继建立^[12-13],其中海南东寨港国家级自然保护区是我国

首个以红树林为主要保护对象的湿地类型自然保护区^[14]。红树林湿地中的鸟类及底栖动物相对丰富,两栖类物种相对较少^[15],且优势两栖类仅有海陆蛙(*Fejervarya moodiei*)一种^[16-17]。海陆蛙,别名海蛙、食蟹蛙,主要栖息于近海边的咸水或半咸水区域,尤其是海潮能够影响的海岸地带^[17-18]。它是海南省省级重点保护野生动物,也是海南红树林保护区内唯一受保护的两栖动物^[19-20]。

海陆蛙隶属于叉舌蛙科(Dicroglossidae)陆蛙属(*Fejervarya*),常见于海南东寨港国家级自然保护区红树林潮间带的咸水或半咸水区域,在每年4—10月繁殖活跃^[21-22]。成体雄性头体长45~71 mm,雌性45~94 mm^[21],头长等于或略大于头宽,吻端钝尖,吻棱圆,两眼间有“A”形斑,眼前角间有一白痣粒,背面皮肤较粗糙,背面前肢肩部有“W”形斑,腹面浅黄白色且皮肤光滑,前肢较短,后肢粗壮而短,趾末端尖圆,趾间全蹼但缺刻较深^[23]。海陆蛙捕食虾蟹等,也被鼠类活动所影响,是生态系统中上下承接的重要一环^[19,23]。海陆蛙亦可作为红树林环境监测的指示物种^[24-25]。因此,海陆蛙的存在对于维持红树林湿地生物多样性及生态系统平衡具有重要意义。虽然调查表明海陆蛙主要分布于红树林湿地及岸边水塘等生境^[16-18],但关于其在红树林类湿地自然保护区内空间分布的了解仍显不足。对受保护野生动物的空间分布格局缺乏系统研究,将不利于针对性地制定有效的物种保护对策。

海南东寨港国家级自然保护区内的两栖类优势种也是海陆蛙^[20],对区内两栖类的调查研究主要是围绕海陆蛙的分布与种群密度^[18]、生理^[24]和繁殖^[21-22]等方面进行。近期虽在保护区红树林潮沟区域调查了海陆蛙的分布与种群数量状况^[19],但局部区域的调查结果难以反映该物种在整个保护区内的空间分布格局。此外,该调查仅在一年中气温偏凉的4—5月及10月进行^[19],可能无法全面反映区内海陆蛙的分布情况,因为两栖动物在不同区域的出没情况可能存在季节变化^[5]。那么,海南东寨港国家级自然保护区内两栖类优势种海陆蛙会呈现怎样的空间分布格局?又可能受到哪些生态因子的影响?为回答这些问题,本研究基于更广的调查范围及更多轮次的调查时间,采用样线法对保护区海陆蛙进行系统调查,分析探讨全区海陆蛙的空间分布格局及其影响因素,以丰富保护区内海陆蛙的生态

学资料,并为该物种的有效保护提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

海南东寨港国家级自然保护区(19°51′—20°01′ N, 110°32′—110°38′ E;图1)地处海口市美兰区演丰镇,总面积3 337.6 hm²,是我国重要的湿地类型自然保护区,拥有丰富的自然资源和生物多样性^[26-27]。红树林作为该保护区的标志性植被,遍布海岸浅滩,面积达1 771 hm²^[19]。该区属热带季风气候区,年平均气温23.3~23.8℃,年均降水量1 676.44 mm^[19]。地形整体呈漏斗状,海岸线曲折,海湾宽广,滩面平缓。区域内潮水沟错综复杂。海岸地带为微咸沼泽,海水含氯量最高可达33.44‰,平均值为21.86‰^[20]。该海域潮汐属不规则半日潮,平均高潮位约1.73 m,低潮位约0.44 m,潮差显著。宽广的潮间带、曲折的潮水沟以及肥沃的泥质土壤,共同为红树林提供了优越的生长环境,也为蟹类等底栖动物营造了理想的栖息场所^[26]。

1.2 海陆蛙调查

海陆蛙调查选定在保护区的近岸和近海两类生境(样地)中进行。近岸与近海的划分主要基于区内红树林的空间分布特征。近岸生境指靠近陆地、可步行抵达并可步行调查的红树林湿地区域;近海生境则指近岸外侧靠近大海、需借助船只方能抵达并需行船调查的红树林潮沟湿地区域^[20]。样线法为当前两栖动物观测中最常用的方法^[28]。考虑到两栖动物活动扩散能力有限,样线布设间距一般大于500 m即可,具体视实际情况调整^[5,28]。在近岸和近海生境中分别布设25条和24条长200 m的固定调查样线,样线间距尽量大于500 m(图1)。用手持式GPS记录每条样线的起点位置(经纬度)及调查轨迹,边前行(1 km/h)边调查记录样线两侧2 m范围内的海陆蛙个体数量。调查时用海水盐度计(OUSURE/欧素® YDJ-100)测定水盐度(‰),用数字式温湿度计(SMART SENSOR® AS837)测定空气温度(℃)和湿度(%),用pH水质检测仪(PUCHUN® PH-100)测定水体pH和水温(℃),并根据调查时间从“2022年全国海域潮汐表”(https://www.chaoxibiao.net/)中获取邻近调查区域的文昌市铺前港的潮高(cm)数据。

参考海陆蛙的繁殖特性^[21-22],在其繁殖活跃初期(2023年4月)、中期(2022年7—8月)和后期



图1 海南东寨港国家级自然保护区两栖动物调查样线起点的空间分布示意图

Figure 1 Starting-point distribution of amphibian survey lines in Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

(2022年10—11月)分别开展1轮夜间样线调查,调查时间为19:00—24:00。每轮每条样线调查1次,重复2次,3次调查安排在不同日期的不同时段,以增强样线间数据的可比性。针对近海生境的调查,一般提前一天查看铺前港的潮汐表,选取潮高在1.0 m以下的日期及时间段进行。在此条件下,潮沟两侧通常有1~2 m宽的滩涂裸露,便于行船观察并记录海陆蛙活动。

1.3 数据处理与分析

海南东寨港国家级自然保护区的南、北两片区之间存在空间隔离且相距较远(图1),环境特征差异大,因此进一步把保护区细分为核心区(北)、缓冲区(北)、核心区(南)、缓冲区(南)和实验区5个调查区域进行相关分析。对比此前调查所划定的区域发现,核心区(北)相当于塔市-博度片区(潮沟),而核心区(南)相当于三江片区(潮沟)^[19]。

在处理数据时,先按每条样线汇总每轮调查记

录到的海陆蛙个体数量,再按整个调查期和调查样区分别汇总所分布的个体数量。通过Shapiro-Wilk检验判断数据正态性,利用非参数Kruskal-Wallis检验确定海陆蛙数量即多度在3轮调查期之间的差异,比较保护区内不同功能区之间海陆蛙分布数量的差异;用Mann-Whitney *U*检验比较调查期之间及功能区之间海陆蛙数量的差异,分析功能区之间水盐度的差异。通过Pearson相关分析检验水盐度、潮高、气温、湿度、水温、水体pH与海陆蛙数量之间的相关性。本研究中海陆蛙数量及环境因子数据均以平均值±标准误(mean±SE)表示。所有数据分析均在IBM SPSS 20中完成,显著水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 区内海陆蛙的时空分布

保护区内海陆蛙数量在3个调查时期之间存在

显著差异($\chi^2 = 30.400, df = 2, P < 0.001$)。具体而言,7—8月记录到的数量显著高于10—11月和4月(表1,表2)。这种差异主要体现在缓冲区($\chi^2 = 24.070, df = 2, P < 0.001$)和实验区($\chi^2 = 12.042,$

$df = 2, P = 0.002$)的海陆蛙数量上,而核心区的海陆蛙数量在不同调查时期之间的差异总体并不明显($\chi^2 = 5.320, df = 2, P = 0.070$),尽管7—8月的数量仍显著高于4月(表2)。

表1 海南东寨港国家级自然保护区各调查样线记录到的海陆蛙数量

Table 1 Number of *Fejervarya moodiei* recorded in each survey line of the Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

生境类型 Habitat type	样线 Sample line	海陆蛙数量/只 Number of frogs				生境类型 Habitat type	样线 Sample line	海陆蛙数量/只 Number of frogs			
		7—8月 Jul.-Aug.	10—11月 Oct.-Nov.	4月 Apr.	合计 Sum			7—8月 Jul.-Aug.	10—11月 Oct.-Nov.	4月 Apr.	合计 Sum
近岸 Inshore	N01a	18	22	4	44	近海 Offshore	N01b	2	0	0	2
	N02a	21	2	4	27		N02b	10	6	0	16
	N03a	66	7	32	105		N03b	0	0	0	0
	N04a	36	17	6	59		N04b	14	6	0	20
	N05a	11	5	1	17		N05b	4	10	6	20
	N06a	57	11	10	78		N06b	19	14	26	59
	N07a	69	17	12	98		N07b	29	4	5	38
	N08a	68	44	16	128		N08b	0	0	0	0
	N09a	70	7	4	81		N09b	22	1	1	24
	N10a	30	31	2	63		N10b	45	7	5	57
	N11a	31	14	2	47		N11b	55	2	4	61
	N12a	16	3	0	19		N12b	26	0	6	32
	S01a	72	11	8	91		S01b	44	12	9	65
	S02a	89	25	8	122		S02b	48	23	52	123
	S03a	41	18	3	62		S03b	26	6	3	35
	S04a	24	10	9	43		S04b	9	2	2	13
	S05a	33	17	2	52		S05b	1	0	0	1
	S06a	16	15	2	33		S06b	3	0	0	3
	S07a	38	11	8	57		S07b	46	14	8	68
	S08a	52	32	14	98		S08b	115	56	72	243
	S09a	30	11	24	65		S09b	72	55	35	162
	S10a	20	4	20	44		S10b	79	90	68	237
	S11a	42	17	16	75		S11b	39	74	48	161
	S12a	39	18	3	60		S12b	67	78	67	212
S13a	12	10	9	31							
总计/只 Total		1 001	379	219	1 599	总计/只 Total	775	460	417	1 652	

注: 样线代码中S和N分别表示海南东寨港国家级自然保护区的南、北片区。

Note: S and N in the sample line codes represent the south and north areas of Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve respectively.

表2 海南东寨港国家级自然保护区各功能区海陆蛙的数量情况

Table 2 Number of *Fejervarya moodiei* on the line transects of each functional zone in Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

功能区 Functional zone	样线数/条 No. of samples	海陆蛙数量/只 Number of frogs			
		7—8月 Jul.-Aug.	10—11月 Oct.-Nov.	4月 Apr.	合计 Total
核心区 Core zone	23	31.91 ± 6.20 ^a	20.74 ± 5.88 ^{ab}	17.83 ± 5.29 ^b	70.48 ± 16.38
缓冲区 Buffer zone	21	37.29 ± 4.56 ^a	13.38 ± 2.51 ^b	9.33 ± 1.84 ^b	60.00 ± 6.83
实验区 Experimental zone	5	51.80 ± 12.32 ^a	16.20 ± 2.71 ^b	6.00 ± 1.45 ^c	74.00 ± 14.46
全区 Entire protected area	49	36.24 ± 3.74 ^a	17.12 ± 2.98 ^b	12.98 ± 2.66 ^b	66.35 ± 8.28

注: 同行数值后上标不同字母表示同一功能区不同调查时间之间存在显著差异($P < 0.05$, Mann-Whitney U 检验)。

Note: Different superscript letters within the same row indicate significant differences across survey periods within a functional zone ($P < 0.05$, Mann-Whitney U test).

在整个研究期间,保护区内每条样线平均记录到海陆蛙66只。从功能区来看,核心区、缓冲区和实验区每条样线的海陆蛙平均数量分别为70、60、74只(表2),三者之间无显著差异($\chi^2 = 1.636, df = 2, P = 0.441$)。从调查时期来看,不论是4月($\chi^2 = 0.444, df = 2, P = 0.801$)、7—8月($\chi^2 = 3.243, df = 2, P = 0.198$),还是10—11月($\chi^2 = 1.524, df = 2, P = 0.467$),每条样线的海陆蛙数量在不同功能区

之间均不存在显著差异。

然而,从空间分布看,保护区内海陆蛙的分布存在明显异质性,尤其是在核心区(潮沟)即近海栖息地,海陆蛙数量在各样线间差异巨大。南部核心区(潮沟)的海陆蛙数量显著高于北部核心区(潮沟)(图2);海陆蛙数量在核心区(北)最低,在核心区(南)最高(表3)。

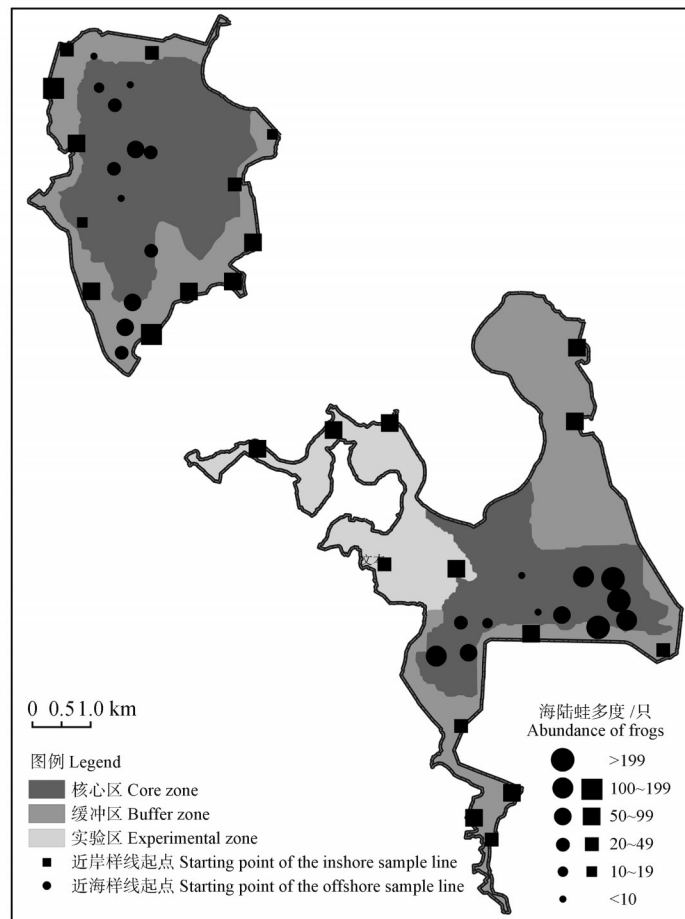


图2 海南东寨港国家级自然保护区海陆蛙种群数量的空间分布格局

Figure 2 Spatial distribution pattern of the population size of *Fejervarya moodiei* in Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

按3次调查数据分析,核心区(南)的海陆蛙数量显著大于核心区(北)($P < 0.05$),对每次调查单独分析的结果亦如此($P < 0.05$);而缓冲区(南)与缓冲区(北)之间的海陆蛙数量并无显著差异($P > 0.05$;表3)。此外,从整个保护区看,在南部片区,核心区的海陆蛙数量显著高于缓冲区;而在北部片区,情况恰好相反,核心区的海陆蛙数量显著低于缓冲区(图3)。

2.2 影响海陆蛙分布的环境因子

保护区的海岸带湿地大多微咸或咸,水盐度的空间异质性明显。分析表明,保护区核心区与缓冲区之间的水盐度差异在南、北片区内部均不显著,但北部片区的水盐度整体显著高于南部片区(包括核心区与缓冲区;图4)。基于3轮调查数据的相关性分析发现,海陆蛙数量与水盐度($r = -0.294, P < 0.001, n = 147$)呈显著负相关,表明水盐度对海陆蛙

表3 海南东寨港国家级自然保护区各调查区域海陆蛙的数量情况与统计比较

Table 3 Number of *Fejervarya moodiei* and statistical comparisons among survey areas in Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

调查区域 Survey area	样线数/条 No. of samples	海陆蛙数量/只 Number of frogs			
		7—8月 Jul.–Aug.	10—11月 Oct.–Nov.	4月 Apr.	合计 Total
核心区(北) Core zone (north)	11	16.82 ± 4.26	6.09 ± 1.50	4.18 ± 2.29	27.09 ± 6.20
核心区(南) Core zone (south)	12	45.75 ± 9.80	34.17 ± 9.82	30.33 ± 8.55	110.25 ± 26.38
	Z	-2.155	-1.985	-2.330	-2.155
	P	0.032	0.046	0.019	0.032
缓冲区(北) Buffer zone (north)	13	41.08 ± 6.64	12.54 ± 3.71	7.69 ± 2.40	61.31 ± 10.13
缓冲区(南) Buffer zone (south)	8	31.13 ± 4.97	14.75 ± 2.93	12.00 ± 2.78	57.88 ± 7.90
	Z	-0.942	-1.018	-1.310	-0.217
	P	0.374	0.336	0.210	0.860

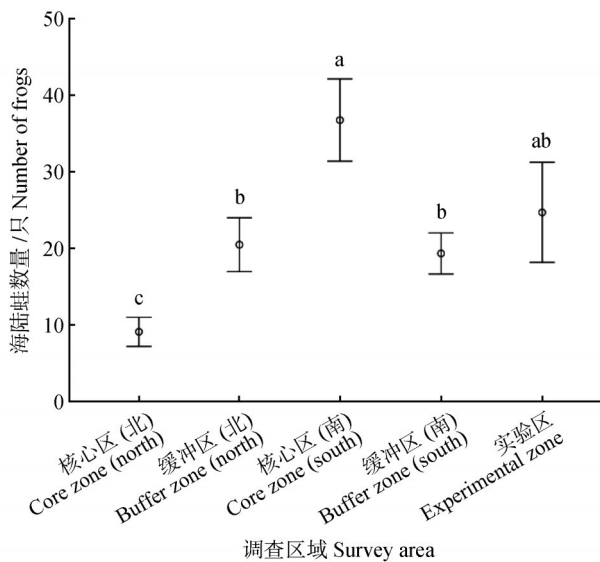


图3 海南东寨港国家级自然保护区每轮调查样线上海陆蛙数量的区域间差异

图上不同字母表示相互间存在显著差异 ($P < 0.05$, Mann-Whitney U 检验)。核心区(北)、缓冲区(北)、核心区(南)、缓冲区(南)和实验区的样本数分别为33、39、36、24、15个。

Figure 3 Regional difference of *Fejervarya moodiei* number on each round of survey sample line in Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

Different letters above bars indicate statistically significant differences ($P < 0.05$; Mann-Whitney U test). Sample sizes for the core zone (north), buffer zone (north), core zone (south), buffer zone (south), and experimental zone were 33, 39, 36, 24 and 15, respectively.

分布有显著负相关影响。

相关性分析还发现,海陆蛙数量与水体pH呈显著负相关($r = -0.348, P < 0.001, n = 147$),且与气

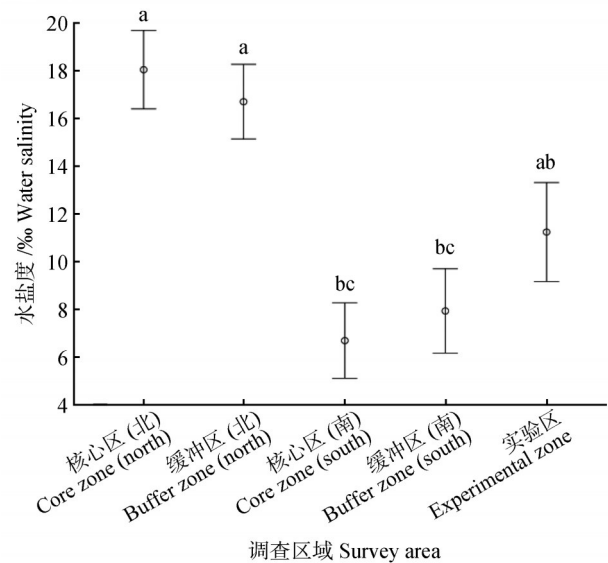


图4 海南东寨港国家级自然保护区各调查区域海水盐度差异

图上不同字母表示相互间存在显著差异 ($P < 0.05$, Mann-Whitney U 检验)。

Figure 4 Difference of seawater salinity among survey areas in Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

Different letters above bars indicate statistically significant differences ($P < 0.05$; Mann-Whitney U test).

温($r = 0.189, P = 0.022, n = 147$)和水温($r = 0.267, P = 0.001, n = 147$)呈显著正相关,但与湿度($r = 0.021, P = 0.803, n = 147$)和潮高($r = 0.017, P = 0.842, n = 147$)则无显著相关性。进一步分析发现,潮高对近海(潮沟)生境中的海陆蛙活动无显著相关影响($r = -0.148, P = 0.215, n = 72$),但与近岸生境

的海陆蛙数量呈显著正相关($r = 0.347, P = 0.002, n = 75$),表明潮汐变化对岸边活动的海陆蛙有显著影响。

2.3 未来海陆蛙监测调查样线的遴选

在本研究布设的49条调查样线中,有2条样线未记录到海陆蛙,另有3条样线仅记录到1~3只(图

2)。基于各样线的空间分布及其所记录到的海陆蛙数量,从中遴选出20条记录到海陆蛙数量相对较多的样线(南、北片区各10条)作为推荐监测位点(图5)。这20条调查样线覆盖合理、代表性强,建议作为海南东寨港国家级自然保护区未来开展海陆蛙监测的固定调查样线。

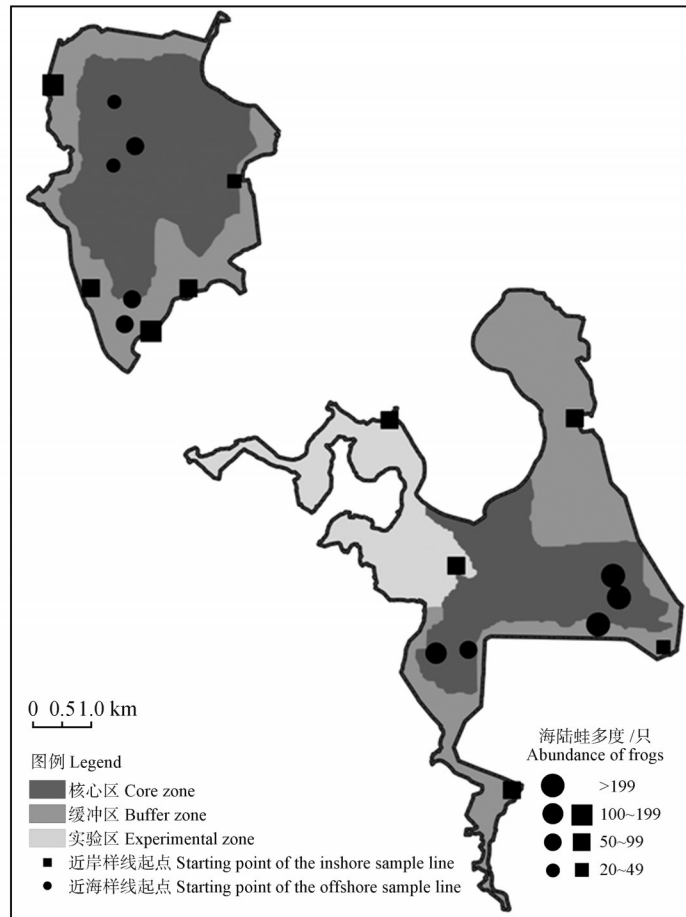


图5 海南东寨港国家级自然保护区海陆蛙推荐监测位点的分布

Figure 5 Distribution of recommended monitoring sites for *Fejervarya moodiei* in Hainan Dongzhaigang National Nature Reserve

3 讨论

本研究通过系统调查分析,揭示了海南东寨港国家级自然保护区海陆蛙的空间分布格局。从保护区尺度看,海陆蛙数量在核心区、缓冲区和实验区之间未呈现显著差异(表2)。从保护区的南、北片区尺度看,核心区和缓冲区之间的海陆蛙数量差异显著:在南部,核心区海陆蛙数量显著大于缓冲区;而在北部,核心区海陆蛙数量则显著小于缓冲区(表3,图3)。此外,南部核心区(潮沟)的海陆蛙数量显著高

于北部核心区(潮沟)(表3,图3),此结果与冯尔辉等^[19]在2020—2022年所发现的海陆蛙主要分布于保护区南部红树林潮沟区域的结果基本一致,但不同于其所提出的北部片区(塔市和博度片区)海陆蛙分布近乎空白的观点。本研究在北部片区核心区和缓冲区共记录到1 095只海陆蛙(表1,图2)。冯尔辉等^[19]在北部片区未调查到海陆蛙,可能与其调查样线布设位置及调查时期和频次有关,其调查时期为4—5月和10月,而本研究发现保护区内海陆蛙数量在7—8月显著高于10—11月和4月(表2)。尽管

本研究在北部片区记录到较多海陆蛙,但在该区域布设的24条调查样线中仍有3条仅记录到较少个体(0~2只;表1,图2)。未来在布设调查样线时,若能进一步结合海陆蛙的微生物偏好,将更有助于全面探查其实际分布。

海陆蛙是红树林生态系统中常见的、最优势的两栖类物种^[29-30]。对于两栖类来说,盐度是影响其分布的重要因素,以致在有一定盐度的水环境中只有少数几种两栖类能栖息,其中优势物种通常仅为海陆蛙^[16-17,20]。两栖动物皮肤具有高渗透性,对盐度变化非常敏感,高渗盐水环境易导致其遭受渗透压胁迫^[31-33]。研究表明,高盐度环境会导致两栖类的生长发育受限、蝌蚪死亡率增加^[34-37]。因此,水盐度不仅会降低两栖类的物种丰富度,也会导致其个体数量明显减少^[20]。本研究结果进一步证实,环境水盐度对海陆蛙数量具有负面影响,保护区北部核心区水盐度高、海陆蛙数量少,而南部核心区则反之(图3,图4)。海陆蛙具有很好的耐盐性且能成为红树林湿地中的优势两栖类,与其进化出了能参与体液渗透调节的适应高盐度环境的遗传基因有关,这些基因能使机体增加对尿素的合成并将其存留于血液中形成对外部环境高渗的内环境^[38-40]。

除水盐度外,红树林湿地中海陆蛙的空间分布格局还受气温、水温和潮高等多种生态环境因子的综合影响。两栖类是变温动物,其活动能力易受环境温度的影响,气温、水温高更有利于蛙类活动。例如,赖水发等^[5]研究指出,在凉爽秋季记录到的两栖类个体数量较炎热夏季显著减少;汪艳梅等^[41]研究表明,两栖动物的丰富度和多度均与气温、水温和湿度呈显著正相关。本研究在温度较高的7—8月记录到的海陆蛙数量明显多于4月及10—11月,且其数量与气温、水温均呈显著正相关。但本研究中海陆蛙数量与湿度未表现出显著相关性,这可能与调查区内具有较高的环境湿度 $[(92.67 \pm 0.55)\%, n = 147]$ 有关,在此条件下湿度未成为限制因子。此外,岸边区域的海陆蛙数量与潮高呈显著正相关,这可能是原本在滩涂上觅食的海陆蛙在潮位较高时会退缩到岸边或被潮水推至岸边活动,而近海生境中的海陆蛙活动未表现出受潮高的显著影响,可能与调查时间均设置在滩涂裸露的时段有关。除自然因子外,有研究认为非法捕捉、繁殖生境减少和水体污染是导致海南红树林保护区海陆蛙分布区缩小及种群

数量下降的致危因素^[18-19]。本研究在野外调查过程中也曾遭遇一起非法捕捉海陆蛙事件。相关分析显示,海水pH与海陆蛙数量呈显著负相关,这可能暗示着水体污染(如碱性生活污水输入)的潜在影响。保护区内红树林表土呈酸性(pH为5.0~6.0),而周边汇入的生活污水一般偏碱性(pH为8.0~9.0),这种外源输入可能导致局部水体碱化,进而影响海陆蛙的分布,但这种推测仍需进一步的研究来证实。

海陆蛙是海南省省级重点保护野生动物,也是红树林自然保护区内唯一受保护的两栖动物,因此有必要基于调查研究结果提出针对性的保护对策。近期有学者建议,在海南东寨港国家级自然保护区应加强对海陆蛙的管控和宣传保护力度并强化科研监测^[19]。这些建议与本研究的保护导向一致。就保护区核心区而言,南部核心区的海陆蛙数量显著多于北部核心区(图2,表3)。为此,建议将南部核心区规划为海陆蛙优先保护区域,以实现对该物种的重点保护。除掌握目标动物的分布、数量和生境等基础信息外,对野生动物的系统调查主要是服务于今后的监测保护。基于本研究结果,从已布设的49条调查样线中,遴选出20条记录到海陆蛙数量相对较多的样线(图5),推荐作为今后海陆蛙长期监测的固定样线,以期制定科学有效的监测方案提供支持。

4 结论

本研究系统揭示了海南东寨港国家级自然保护区海陆蛙的空间分布格局及其影响因素。尽管在保护区尺度上海陆蛙数量在各功能区之间无显著差异,但在片区尺度上呈现明显的空间异质性,具体表现为南部核心区的个体数量显著大于其缓冲区,北部片区则反之,且南部核心区的海陆蛙数量也大于北部核心区。水盐度、气温、水温和潮高等环境因子是影响该分布格局形成的主要生态因素。基于上述发现,建议将南部核心区规划为海陆蛙优先保护区域,并将南、北片区各遴选出的10条调查样线确立为长期固定监测样线,为制定科学合理的物种监测方案提供基础。本研究明确了海陆蛙在保护区内的空间分布格局,丰富了该物种的生态学资料,也针对性地提出了科学的保护对策建议。这些结果为今后加强对红树林保护区海陆蛙的保护与管理工作提供了科学依据。

致谢:海南东寨港国家级自然保护区管理局对本项调查工作给予了大力支持,宋周周、谭荣、冯尔辉和林雪云等参与了野外夜间调查工作,谨致深切谢意!

参考文献:

- [1] RANDES M R W, ADAMS W M, BENNUN L, *et al.* Biodiversity conservation: Challenges beyond 2010 [J]. *Science*, 2010, 329(5997): 1298–1303.
- [2] GILEV A V. Spatial distribution of red wood ants and scientific basis of their protection [J]. *Entomological Review*, 2011, 91(2): 133–140.
- [3] HARTEL T, SCHWEIGER O, ÖLLERER K, *et al.* Amphibian distribution in a traditionally managed rural landscape of Eastern Europe: Probing the effect of landscape composition [J]. *Biological Conservation*, 2010, 143(5): 1118–1124.
- [4] SINGH N J, MILNER-GULLAND E J. Conserving a moving target: Planning protection for a migratory species as its distribution changes [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(1): 35–46.
- [5] 赖水发, 余正良, 陈上权, 等. 江西赣江源区域两栖动物的群落组成和物种多样性特征 [J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 8005–8013.
- LAI S F, YU Z L, CHEN S Q, *et al.* Characteristics of composition and species diversity of the amphibian community in Ganjiangyuan area of Jiangxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 8005–8013.
- [6] RUBBO M J, KIESECKER J M. Amphibian breeding distribution in an urbanized landscape [J]. *Conservation Biology*, 2005, 19(2): 504–511.
- [7] 韦锦云, 曾治高, 张晓磊, 等. 栖息地荒漠化对蜥蜴群落组成的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1680–1687.
- WEI J Y, ZENG Z G, ZHANG X L, *et al.* Effects of habitat desertification on the community composition of lizards [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1680–1687.
- [8] ZENG Z G, BI J H, LI S R, *et al.* Habitat alteration influences a desert steppe lizard community: Implications of species-specific preferences and performance [J]. *Herpetological Monographs*, 2016: 34–48.
- [9] SANTINI L, DI MARCO M, BOITANI L, *et al.* Incorporating spatial population structure in gap analysis reveals inequitable assessments of species protection [J]. *Diversity and Distributions*, 2014, 20(6): 698–707.
- [10] 颜文博, 莫燕妮, 曾治高, 等. 海南尖峰岭中华穿山甲的分布与保护现状 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(6): 22106.
- YAN W B, MO Y N, ZENG Z G, *et al.* Distribution and conservation status of Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) in Jianfengling, Hainan [J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(6): 22106.
- [11] 卢元平, 徐卫华, 张志明, 等. 中国红树林生态系统保护空缺分析 [J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 684–691.
- LU Y P, XU W H, ZHANG Z M, *et al.* Gap analysis of mangrove ecosystem conservation in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 684–691.
- [12] 林鹏. 中国红树林研究进展 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2001, 40(2): 592–603.
- LIN P. A review on the mangrove research in China [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2001, 40(2): 592–603.
- [13] 黄凡非, 唐丽丽, 李瑞利. 近四十年来中国大陆红树林保护与恢复措施的生态效益分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(5): 813–822.
- HUANG F F, TANG L L, LI R L. Analysis of ecological benefits of mangrove protection and restoration measures in the mainland of China in the past 40 years [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2023, 59(5): 813–822.
- [14] 肖诗白, 南野. 东寨港, 中国第一个红树林保护区 [J]. *人与自然*, 2013(8): 80–89.
- XIAO S B, NAN Y. Dongzhai, China's first protected area of mangroves [J]. *Human & Nature*, 2013(8): 80–89.
- [15] 何斌源, 范航清, 王瑁, 等. 中国红树林湿地物种多样性及其形成 [J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4859–4870.
- HE B Y, FAN H Q, WANG M, *et al.* Species diversity in mangrove wetlands of China and its causation analyses [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4859–4870.
- [16] 庾太林, 张良建, 刘晓辉, 等. 广西北部湾海陆交错带两栖动物对生境的选择 [J]. *四川动物*, 2013, 32(6): 883–888.
- YU T L, ZHANG L J, LIU X H, *et al.* Habitat selection of amphibian in land-ocean ecotone of Guangxi, China [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2013, 32(6): 883–888.
- [17] 张良建, 庾太林, 韩增超, 等. 北仑河口国家级自然保护区两栖爬行动物调查 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(1): 112–118.
- ZHANG L J, YU T L, HAN Z C, *et al.* Survey of amphibians and reptiles in Beilunhekou National Nature Reserve of Guangxi, China [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 31(1): 112–118.
- [18] 洪美玲, 王力军, 杨炳坤, 等. 海南红树林的海陆蛙分布与种群密度调查 [J]. *动物学杂志*, 2011, 46(1): 23–28.
- HONG M L, WANG L J, YANG B K, *et al.* Survey on distribution and population density of crab-eating frog (*Fejervarya cancrivora*) in mangroves, Hainan [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2011, 46(1): 23–28.
- [19] 冯尔辉, 罗战, 朱萧文, 等. 海南东寨港国家级自然保护区红树林潮沟海陆蛙种群数量调查 [J]. *野生动物学报*, 2024, 45(3): 580–587.
- FENG E H, LUO Z, ZHU X W, *et al.* Survey on population density of crab-eating frog in mangrove tidal ditch, Hainan Dongzhai-gang National Nature Reserve [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2024, 45(3): 580–587.
- [20] 李华亮, 张熙斌, 李诗川, 等. 海南东寨港红树林湿地两栖动物多样性的空间分布特征 [J]. *野生动物学报*, 2025, 46(2): 366–375.
- LI H L, ZHANG X B, LI S C, *et al.* Spatial distribution traits of amphibian diversity in mangrove wetlands of Dongzhai-gang,

- Hainan [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2025, 46 (2) : 366-375.
- [21] 李春瑜, 洪美玲, 王力军, 等. 海陆蛙的两性异形和雌性繁殖特征 [J]. 动物学杂志, 2013, 48(1): 16-21.
LI C Y, HONG M L, WANG L J, *et al.* Sexual dimorphism and female reproductive trait of the crab-eating frog [J]. Chinese Journal of Zoology, 2013, 48(1): 16-21.
- [22] 王同亮, 贾乐乐, 翟晓飞, 等. 海陆蛙繁殖期鸣声特征和鸣叫节律 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2120-2125.
WANG T L, JIA L L, ZHAI X F, *et al.* Acoustic characteristics and daily circadian rhythms of *Fejervarya cancrivora* (Anura: Dicroglossidae) [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(7): 2120-2125.
- [23] 史海涛, 赵尔宓, 王力军, 等. 海南两栖爬行动物志 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 102-103.
SHI H T, ZHAO E M, WANG L J, *et al.* Fauna of amphibians and reptiles in Hainan [M]. Beijing: Science Press, 2011: 102-103.
- [24] 洪美玲, 王力军, 魏守芳, 等. 以海蛙作为红树林环境监测指示物种的初步研究 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(7): 4194-4196; 4201.
HONG M L, WANG L J, WEI S F, *et al.* Preliminary study on taking *Rana cancrivora* as indicator species for mangrove environment monitoring [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(7): 4194-4196; 4201.
- [25] LI C Y, HUANG G C, HONG Y C, *et al.* A preliminary study on taking *Rana cancrivora* as indicator species for mangrove environment monitoring [J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(2): 434-438.
- [26] 冯光辉, 梁伟诺, 胡亮, 等. 海南东寨港国家级自然保护区潮间带蟹类(十足目: 短尾下目)物种多样性 [J]. 生物多样性, 2023, 31(9): 23030.
FENG E H, LIANG W N, HU L, *et al.* Species diversity of intertidal crabs (Decapoda: Brachyura) of Dongzhaigang National Nature Reserve, Hainan Province [J]. Biodiversity Science, 2023, 31(9): 23030.
- [27] 东寨港红树林自然保护区 [EB/OL] (2019-08-27) [2025-09-09]. <http://www.haikou.gov.cn/sq/lsmc/mcms/yljq/201908/t273204.shtml>.
Dongzhaigang Nature Reserve of Mangroves [EB/OL] (2019-08-27) [2025-09-09]. <http://www.haikou.gov.cn/sq/lsmc/mcms/yljq/201908/t273204.shtml>.
- [28] 徐海根, 吴军, 吴延庆, 等. 全国两栖动物多样性观测网络 (China BON-Amphibians) 建设进展 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(1): 20-26.
XU H G, WU J, WU Y Q, *et al.* Progress in construction of China amphibian diversity observation network (China BON-amphibians) [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(1): 20-26.
- [29] GAYEN D, DEUTI K. First report of *Fejervarya moodiei* (Taylor, 1920) (Amphibia: Anura: Dicroglossidae) from the state of West Bengal, India [J]. Journal of Animal Diversity, 2021, 3(3): 1-7.
- [30] ZAKARIA N, ALLAHUDIN M I H, MA'AD S N S, *et al.* Diversity amphibians and reptiles at Sungai Kerteh mangrove forest, Terengganu, Malaysia [J]. Biodiversitas Journal of Biological Diversity, 2022, 23(11): 5574-5584.
- [31] HOPKINS G R, BRODIE E D, Jr. Occurrence of amphibians in saline habitats: A review and evolutionary perspective [J]. Herpetological Monographs, 2015, 29: 1-27.
- [32] HOPKINS G R, BRODIE E D, Jr, NEUMAN-LEE L A, *et al.* Physiological responses to salinity vary with proximity to the ocean in a coastal amphibian [J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2016, 89(4): 322-330.
- [33] ALBECKER M A, STUCKERT A M M, BALAKRISHNAN C N, *et al.* Molecular mechanisms of local adaptation for salt-tolerance in a treefrog [J]. Molecular Ecology, 2021, 30(9): 2065-2086.
- [34] 王立志. 中国林蛙生长发育盐效应的研究进展 [J]. 生物资源, 2019, 41(5): 397-401.
WANG L Z. Research progress on salt effect of growth and development of *Rana chensinensis* [J]. Biotic Resources, 2019, 41(5): 397-401.
- [35] 梁家豪, 鲜雪梅. 两种生长阶段的牛蛙蝌蚪对盐度的耐受性研究 [J]. 安徽农业科学, 2021, 49(14): 85-88; 97.
LIANG J H, XIAN X M. Study on the tolerance to salinity of tadpole of *Rana catesbeiana* Shaw at two growth stages [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(14): 85-88; 97.
- [36] 徐大德, 罗斯特, 李丽娟. pH和盐度对黑眶蟾蜍变态期蝌蚪的影响 [J]. 安徽农业科学, 2021, 49(17): 92-95.
XU D D, LUO S T, LI L J. Effects of pH and salinity on tadpoles of *Bufo melanostictus* Schneider during metamorphosis stage [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(17): 92-95.
- [37] HUONG H K, HUANG C T, NAM H K, *et al.* Effects of salinity on the egg fertilization, hatching, and tadpole growth and survival rates of the Thailand frog (*Rana tigerina* Dubois, 1981) [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2024, 2024(1): 6750783.
- [38] GORDON M S, TUCKER V A. Osmotic regulation in the tadpoles of the crab-eating frog (*Rana cancrivora*) [J]. Journal of Experimental Biology, 1965, 42(3): 437-445.
- [39] HSU W T, WU C S, LAI J C, *et al.* Salinity acclimation affects survival and metamorphosis of crab-eating frog tadpoles [J]. Herpetologica, 2012, 68(1): 14-21.
- [40] SHAO Y, WANG L J, ZHONG L, *et al.* Transcriptomes reveal the genetic mechanisms underlying ionic regulatory adaptations to salt in the crab-eating frog [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 17551.
- [41] 汪艳梅, 陈巧尔, 林友福, 等. 福建君子峰国家级自然保护区两栖类多样性时空分布 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(1): 76-84.
WANG Y M, CHEN Q E, LIN Y F, *et al.* Spatial and temporal distribution of amphibian diversity in Fujian Junzifeng National Nature Reserve [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(1): 76-84.