

基于 MaxEnt 模型预测海南岛 海南臭蛙的潜在地理分布

黄勇杰^① 卢佳斌^② 王锋堂^② 林英华^{①*} 刘磊^③ 米红旭^③
莫方群^④ 方精^⑤ 李佳灵^⑥

① 中国林业科学研究院湿地研究所 北京 100091; ② 海南热带海洋学院热带生物与农学院 三亚 572000; ③ 海南鹦哥岭国家级自然保护区 白沙 572800; ④ 海南尖峰岭林业局 乐东 572542; ⑤ 海南黎母山省级自然保护区 琼中 572934; ⑥ 海南五指山国家级自然保护区 五指山 572299

摘要: 生境分析与预测是受威胁物种有效保护的基础。本研究通过 ArcGIS 技术平台, 利用 MaxEnt 模型, 结合野外调查获得的海南臭蛙 (*Odorrana hainanensis*) 66 个分布点数据和 17 个 30 m × 30 m 分辨率的环境变量数据, 对该物种在海南岛内的潜在分布区进行预测, 并分析其与环境因子之间的关系。结果显示, 海南臭蛙的潜在分布区主要位于海拔 200 ~ 1 200 m 的地区, 最适宜的海拔范围是 600 ~ 1 000 m, 总分布面积约 2 179 km²。海南臭蛙空间分布具有不连续性, 其分布区分为三个斑块, 尖峰岭所在地为斑块 I, 霸王岭、鹦哥岭和黎母山所在地为斑块 II, 五指山和吊罗山所在地为斑块 III。适宜生境分析显示, 斑块 I 适宜生境面积为 218.4 km², 主要分布在尖峰岭中部的三分区、五分区和南部的南崖; 斑块 II 适宜生境面积为 963.5 km², 主要分布在霸王岭北部的牙琼、南美岭以及鹦哥岭东部的鹦哥嘴、什寒、秀寨岭和黎母山主峰西侧的四分场; 斑块 III 适宜生境面积为 997.1 km², 主要分布在五指山西部的那罗岭、南部的好定岭和吊罗山中部的度假村、白水岭以及研究区东部的牛上岭。环境变量分析显示, 海拔是影响海南臭蛙分布的最主要环境因子, 其次是坡度、距水源距离、归一化植被指数 (NDVI) 和年降水量, 温度、湿度和日照对海南臭蛙的分布影响较小。

关键词: 海南臭蛙; MaxEnt 模型; 潜在分布区

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2017) 01-30-12

Predicting the Potential Geographical Distribution of Hainan Odorous Frog (*Odorrana hainanensis*) in Hainan Province by MaxEnt

HUANG Yong-Jie^① LU Jia-Bing^② WANG Feng-Tang^② LIN Ying-Hua^{①*} LIU Lei^③
MI Hong-Xu^③ MO Fang-Qun^④ FANG Jing^⑤ LI Jia-Ling^⑥

① Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; ② College of Tropical Biology and Agronomy, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572000; ③ Hainan Yinggeling National Nature Reserve, Baisha 572800; ④ Hainan Jianfengling Forestry Bureau,

基金项目 全国陆生野生动物第二次调查专项;

* 通讯作者, E-mail: linyinghua@263.net;

第一作者介绍 黄勇杰, 男, 硕士研究生; 研究方向: 动物生态学; E-mail: 309049341@qq.com。

收稿日期: 2016-06-07, 修回日期: 2016-09-26 DOI: 10.13859/j.cjz.201701004

Ledong 572542; ⑤ Hainan Limushan Provincial Nature Reserve, Qiongzong 572934;

⑥ Hainan Wuzhishan National Nature Reserve, Wuzhishan 572299, China

Abstract: Habitat analysis and prediction are the foundation on threatened species protection. In this study, we used the ecological niche model, MaxEnt, based on ArcGIS, combined with 66 occurrence records and 17 30 m × 30 m resolution environmental variables, to predict the potential distribution of Hainan Odorous Frog (*Odorrana hainanensis*) and analyzed the relationship of this species with the environmental factors in Hainan Island, China. The prediction and analysis were conducted in MaxEnt 3.3.3. Then we employed the receiver operating characteristic (ROC) curve to evaluate the accuracy resulting from the model analysis and performed the Jackknife test to evaluate the importance and contribution of environmental variables. Finally, we analyzed the potential distribution of Hainan Odorous Frog produced by MaxEnt model by habitat suitability index (HSI), in which areas with value $HSI > 0.44$ was considered to be high suitability, $0.20 < HSI \leq 0.44$ was moderate suitability, $0.06 < HSI \leq 0.20$ was low suitability and $HSI \leq 0.06$ was unsuitability. The potential distribution of Hainan Odorous Frog is approximately 2 179 km² at an altitude range of 200 - 1 200 m with the optimum distribution range between 600 m and 1 000 m (Fig. 4). The overall pattern of potential distribution of this species is uncontinuity and occurs in three patches (Fig. 2). The Patch I named Jianfengling is a minimum potential distribution with an area of 218.4 km² (Table 1), which mainly occurs in the Sanfenqu and Wufenqu in the center and Nanya in the south of Jianfengling. The Patch II is as large as 963.5 km² which locates in the region of Bawangling, Yinggeling and Limushan within the regions Yaqiong, Nanmeiling of northern Bawangling, and Yinggezui, Shenhan, Xiuzhailing of eastern Yinggeling and Sifenchang of central Limushan. The Patch III is found in the region of Wuzhishan and Diaoluoshan and its size is 997.1 km² that is similar to Patch II. The majority of Patch III is in the Naluoling in the west, Haodingling in the south of Wuzhishan, and Dujiacun, Baishuiling in central Diaoluoshan, as well as the Niushangling in eastern study area. A further analysis for the potential distribution area which occurs within six nature reserves gave the following results: (1) The total potential distribution ($HSI > 0.06$) of this frog species was 565.1 km², of which 10.8% was highly suitable ($HSI > 0.44$). These habitats located in six protected areas and approximately accounted for 26.0% of the overall potential distribution region. The largest potential distribution ($HSI > 0.06$) with an area of 156.4 km² was located in the Bawangling National Nature Reserve, the next one was detected in Yinggeling National Nature Reserve with 137.9 km² ($HSI > 0.06$) in size. While the minimum value of potential distribution region 44.3 km² was found in Wuzhishan National Nature Reserve (Table 2). The result of Jackknife test showed the land altitude was the main environmental factor affecting the distribution of Hainan Odorous Frog for 45.2%, the slope for 23.9%, then distance to water for 8.3%, normalized difference vegetation index for 5.2% and annual precipitation, with a value of contribution 5.2% respectively (Table 3). Temperature, humidity and sunshine had little impact. Our study indicated that the area of suitable habitat of Hainan Odorous Frog in protected areas was relatively large, while the quality of habitat outside the nature reserves may be influenced by the climate and human factors.

Key words: Hainan Odorous Frog (*Odorrana hainanensis*); MaxEnt model; Potential distribution

两栖类物种正在快速地减少和消失(IUCN 2011), 这种现象在热带地区尤为明显(Whiles et al. 2006, Sánchez et al. 2008)。海南岛位于热带北缘, 具有亚热带与热带自然条件特征, 因与大陆隔绝, 形成了海南岛特有的生物物种资源与生态系统。截止 2012 年, 海南岛共记录到两栖类物种 44 种(刘惠宁等 2012)。除少数物种在沿海低地分布外, 大部分两栖类分布在海南岛中南部山区区域(史海涛 2002, 史海涛等 2011)。随着野外调查研究的深入, 许多学者对海南岛两栖动物的物种多样性、区系特征、新种发现等进行了描述(史海涛 2002, 王力军等 2004, 杨军等 2005, 肖智等 2008)。但受环境条件的制约, 岛内的大多数物种缺少详细的地理分布信息(汪继超等 2008), 进而限制了对这些物种, 尤其是受胁物种的有效保护。

近年来, 应用生态位模型对物种生境进行预测和评估成为新的研究热点(Ward 2007, Zhu et al. 2012, Garcia et al. 2013)。以遥感为主体的 3S 技术已成为评估野生动物栖息地适宜性的主要方法(吴庆明等 2016)。基于生态位原理的 MaxEnt (maximum entropy) 生境预测模型, 通过应用一定数量的物种出现点和环境变量数据分析物种的生境特征(Phillips et al. 2006, 2008), 目前也已应用于两栖类栖息地的研究中。Negga (2007) 利用该模型对葡萄牙法蒂玛(Fatima)和阿兰特斯(Abrantes)地区欧螈属(*Triturus*)的 *T. marmoratus* 和 *T. pygamaeus* 进行潜在分布区预测显示, 两个物种均偏向于选择植被覆盖度较大距水源较近的生境作为栖息地。Zhou 等(2014)利用 MaxEnt 模型结合 DNA 条形码技术分析了青藏高原特有物种高山倭蛙(*Nanorana parkeri*)在气候变化条件下潜在分布区的特征, 在未来化石能源和非化石能源的使用达到平衡的气候条件下, 原有生境将不再适宜高山倭蛙生存, 适宜栖息地将向青藏高原的西北部偏移, 其遗传多样性因此会受到严重影响。利用 MaxEnt 模型分析, 也可以反映出已有的自然保护区是否能有效保

护两栖类及其栖息生境。Ortega-Andrade 等(2013)的研究证明, 分布于厄瓜多尔西北部的糊玻璃蛙(*Cochranella mache*), 其适宜生境介于 48 509 ~ 65 147 km², 但只有 8% 的适宜生境位于重要的保护区系统内。Fong 等(2015)利用该模型的相关分析认为, 大部分有代表性的两栖类位于保护区内, 但有 50% 的物种未得到完全保护, 当前的保护区网络并未有效地保护两栖动物的栖息环境。而一些稀有物种, 由于其分布区和行为的隐蔽性, 野外种群分布调查将会受到更多的限制, 从而阻碍了对它们的保护(Groff et al. 2014)。

海南臭蛙(*Odorrana hainanensis*)属于中国特有种, 因野外种群稀少而被世界自然保护联盟(IUCN)列为易危种(IUCN 2011)。该物种于 1964 年在白沙鹦哥岭被发现, 并被定名为云南臭蛙(*Odorrana andersonii*), 后经费梁等(2001)基于形态特征进行深入研究而修订为海南臭蛙。近年来陆续在鹦哥岭周边地区, 如乐东县尖峰岭、琼中县五指山、陵水县吊罗山等地两栖动物野外调查时均发现海南臭蛙的实体(费梁等 2012, 刘惠宁等 2012)。但受野外调查力度和范围的限制, 目前其在海南的具体分布尚未清楚。因此, 本研究结合实地调查的海南臭蛙分布点数据, 利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件, 预测海南臭蛙在海南岛的潜在分布区, 综合分析影响海南臭蛙潜在分布的关键环境因子, 对于了解该物种分布, 进一步明确栖息地现状, 加强其野外种群保护具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本文的研究范围主要位于海南岛山区较为集中的中南部(18°23' ~ 19°21'N, 108°44' ~ 110°17'E), 包括乐东县、白沙县、昌江县、陵水县、保亭县、琼中县、五指山市以及这些区域的周边地区(图 1)。该区域总面积约 16 381.3 km², 海拔 0 ~ 1 867 m, 年均降水量为 1 184.4 ~

2 139.6 mm, 年均气温 17.5 ~ 25.5℃。植被类型多样, 以低地雨林、山地雨林、山地常绿林和高山矮林为主(蒋有绪等 2002), 此外还有次生林、人工林、灌丛、草地和农田等。

1.2 研究方法

1.2.1 海南臭蛙的分布点数据来源与处理

2015 年春季、秋季以及 2016 年春季选择位于海南省中南部的尖峰岭国家级自然保护区、鹦哥岭国家级自然保护区、霸王岭国家级自然保护区、吊罗山国家级自然保护区、五指山国家级自然保护区和黎母山省级自然保护区 6 个国家级与省级保护区为主要调查地点, 采用样线法野外调查海南臭蛙, 共记录到 66 个发现点。利用 DIVA-GIS 软件剔除了距离较近的坐标点, 保证每个栅格内只有一个分布点(Ward 2007), 最终得到 57 个分布点用于模型分析(图 1)。在 Excel 2013 中将分布点数据转换为模型要求的.csv 格式。

1.2.2 环境变量数据与地图数据

环境变量数据包括地形因子、气候因子、植被因子、干扰因子以及水源。其中, 地形因子包括海拔、坡度和坡向。数据来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站

(<http://www.gscloud.cn>) 中 ASTER GDEM V2 版 30 m × 30 m 分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM), 在 ArcGIS10.3 中使用空间分析工具计算得到。

气候数据来自国家气象总局中海南省 19 个气象站点 1961 ~ 2010 年的逐日地面观测数据, 基于 ANUSPLIN(Hutchinson 2004) 结合数字高程(DEM) 作为自变量进行气候插值。ANUSPLIN 基于薄板光滑样条函数(thin plate smoothing spline) 理论(Hijmans et al. 2005), 引入多个影响因子作为协变量对气象要素进行空间插值, 大大提高插值精度, 且能同时进行多个表面的空间插值。本研究选择广义交叉验证(generalized cross validation, GCV) 确定光滑参数, 以确定适合用于插值的最佳模型, 最终插值得到 1 月最低气温, 7 月最高气温, 1 月和 7 月的降水量及平均相对湿度, 年均气温, 年降水量, 年均相对湿度和年总日照时数等 10 个气候变量图层。

植被因子、干扰因子和水源数据均从 Landsat-8 卫星 2013 年 10 月 26 日拍摄的 Landsat TM 遥感影像中提取得到, 轨道号是 124/047。其中, 植被因子选取归一化植被指数

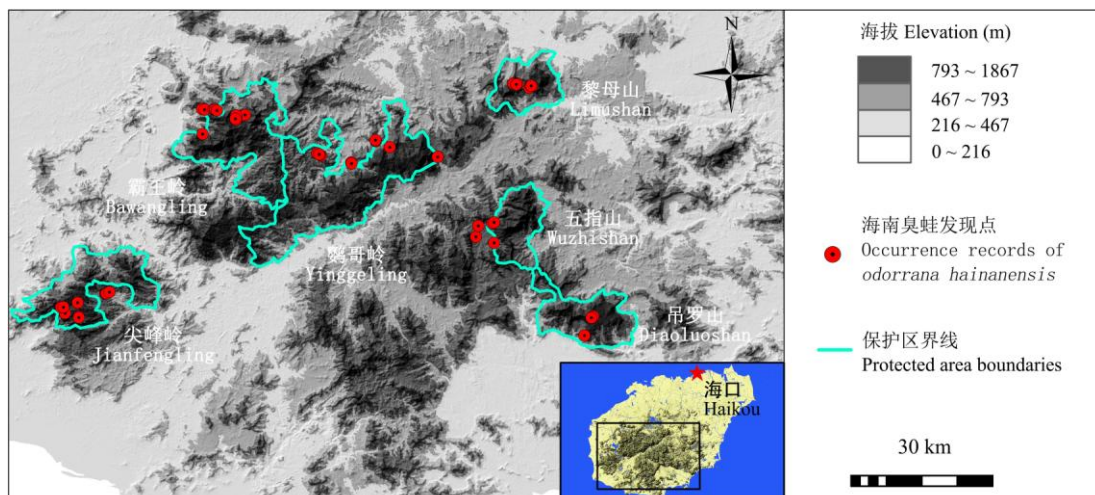


图 1 研究区域地理位置和海南臭蛙发现点

Fig. 1 The location of study area and the occurrence of Hainan Odorous Frog in Hainan Province, China

(normalized difference vegetation index, NDVI), NDVI 可以反映植被的生长状态和植被覆盖度, 对两栖类的生境选择具有重要的影响作用 (Negga 2007); 干扰因子包括耕地和建筑用地, 建筑用地由道路和居民用地组成, 由于研究区内的道路多为乡间公路, 且通常与居民地相邻, 因此在提取过程中采用了归一化处理。在 ENVI5.3 中对遥感影像经过大气校正和裁剪, 得到研究区域较清晰的影像图。基于 CART 决策树分类法对影像进行解译, 该方法由 Breiman 于 1984 年提出, 基本原理是通过由测试变量和目标变量构成的训练数据集的循环分析, 而形成二叉树形式的决策树结构 (陈云等 2008)。首先采用 ISO 非监督分类法对影像进行分类, 并计算归一化植被指数、改进的归一化差异水体指数 (modified normalized difference water index, MNDWI) 以及归一化建筑指数 (normalized difference building index, NDBI), 再使用 Layer Stacking 模块将上述计算结果以及影像中各波段进行组合, 通过目视结合 Google Earth 7.1 选取训练样本, 在 CART 算法下进行解译, 分为林地、草地、耕地、建筑用地、自然水体以及未利用地等, 最后利用野外调查所得的 159 个土地利用划分点进行验证, 解译精度达 88.2%。利用 ArcGIS 10.3 提取出耕地、建筑用地和自然水体并在空间分析模块下计算得到各因子的距离图层。

地图数据来源于国家基础地理信息系统网站 (<http://nfgis.nsd.gov.cn/>) 中 1:400 万的中国行政区划图。基于 GIS 技术, 将上述所有环境图层栅格大小统一为 30 m × 30 m, 坐标系统为 WGS_1984_UTM_zone_49N, 并转为 MaxEnt 模型要求的 ASCII 格式文件。

1.2.3 MaxEnt 模型预测建立 将海南臭蛙地理分布数据和各环境变量数据导入 MaxEnt 3.3.3 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>)。随机选取 80% 的海南臭蛙分布点用于建立模型, 剩余 20% 的分布点用于模型验证, 最大迭代次数设定为 5 000, 模型重复运行 10

次。为了减少由环境因子之间相关性引起的过拟合, 对 MaxEnt 模型进行两次模拟, 第一次模拟采用刀切 (Jackknife) 法检验环境因子与物种分布的相关性, 剔除相关性为 0 的环境因子, 并确定对物种分布有重要影响的环境变量; 第二次采用剩余的环境因子进行模拟, 以得到海南臭蛙的潜在分布图 (Ortega-Andrade et al. 2013)。

1.2.4 模型精度验证 模型预测结果选择受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 进行检验。ROC 曲线以假阳性率为横坐标, 真阳性率为纵坐标, 根据该曲线下的面积 (area under curve, AUC) 值判定模型的精确度, 其评价标准为: AUC 值在 0.5 ~ 0.6, 不及格; 0.6 ~ 0.7, 较差; 0.7 ~ 0.8, 一般; 0.8 ~ 0.9, 良好; 0.9 ~ 1.0, 优秀 (Phillips et al. 2006)。

模型输出结果为 0 ~ 1 之间的栖息地适宜度指数 (habitat suitability index, HSI) 形式的连续栅格数据, 值越接近 1, 表示越适合海南臭蛙分布, 选取平均适宜度指数的栅格数据作为海南臭蛙的潜在分布图, 将其导入 ArcGIS 10.3 中, 以 Natural Breaks (Jenks) 法将栖息地适宜度指数进行划分, 设定适宜度指数大于 0.44 的地区为海南臭蛙高适宜分布区, 适宜度指数为 0.20 ~ 0.44 的地区为中适宜分布区, 适宜度指数为 0.06 ~ 0.20 的地区为低适宜分布区, 适宜度指数小于 0.06 的地区为不适宜分布区域。

2 结果

2.1 海南臭蛙的潜在分布区

模型预测结果表明, 海南臭蛙的潜在分布区在海南岛中部各山区均有分布 (图 2), 海拔范围主要在 200 ~ 1 200 m, 总的潜在分布面积约 2 179.0 km² (HSI > 0.06), 其中, 高、中、低适宜分布区所占比例分别是 9.6%、23.7%、和 66.7% (表 1)。海南臭蛙的潜在分布区从空间上可划分为三个斑块, 即以尖峰岭所在地的

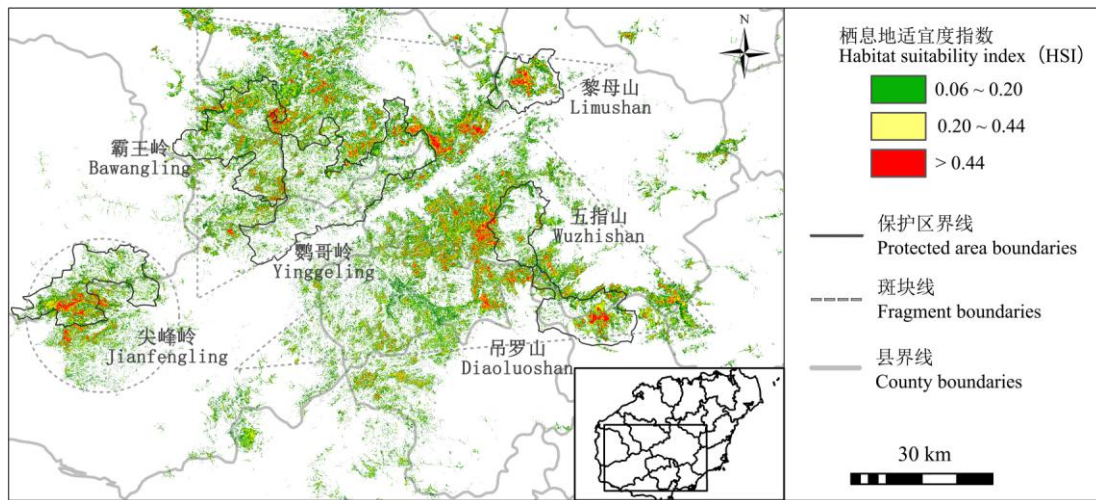


图 2 海南省海南臭蛙潜在分布区预测结果

Fig. 2 The result of the potential distribution prediction of Hainan Odorous Frog in Hainan Province, China

图中适宜度指数大于 0.06。The habitat suitability index (HSI) is higher than 0.06.

表 1 各斑块内的海南臭蛙潜在分布区面积 (单位: km^2)

Table 1 The size of potential distribution of Hainan Odorous Frog in each patch

斑块 Patch	潜在分布区面积 Area of potential distribution			总计 Total
	$0.06 < \text{HSI} \leq 0.20$	$0.20 < \text{HSI} \leq 0.44$	$\text{HSI} > 0.44$	
I	140.0	53.5	24.9	218.4
II	649.4	221.6	92.5	963.5
III	663.1	241.3	92.7	997.1
总计 Total	1 452.5	516.4	210.1	2 179.0

HSI. 适宜度指数; 适宜度指数大于 0.44 的地区为海南臭蛙高适宜分布区, 适宜度指数为 0.20 ~ 0.44 的地区为中适宜分布区, 适宜度指数为 0.06 ~ 0.20 的地区为低适宜分布区, 适宜度指数小于 0.06 的地区为不适宜分布区域。

HSI. Habitat suitability index; Value $\text{HSI} > 0.44$ was considered to be high suitability for Hainan Odorous Frog, $0.20 < \text{HSI} \leq 0.44$ was moderate suitability, $0.06 < \text{HSI} \leq 0.20$ was low suitability and $\text{HSI} \leq 0.06$ was unsuitability.

斑块 I, 以霸王岭、鹦哥岭和黎母山所在地的斑块 II, 以五指山和吊罗山所在地的斑块 III。适宜生境分析显示, 斑块 I 适宜生境面积为 218.4 km^2 ($\text{HSI} > 0.06$), 约占总潜在分布面积的 10.0%, 其中高、中、低适宜分布区分别占斑块 I 总的适宜生境面积的 11.4%、24.5% 和 64.1%, 均主要分布在尖峰岭中部的三分区、五分区和南部的南崖; 斑块 II 适宜生境面积为 963.5 km^2 ($\text{HSI} > 0.06$), 约占总的潜在分布面积的 44.2%, 其中高、中、低适宜分布区分别

占斑块 II 适宜生境面积的 9.6%、23.0% 和 67.4%, 均主要分布在霸王岭北部的牙琼、南美岭和鹦哥岭东部的鹦哥嘴、什寒、秀寨岭以及黎母山主峰西侧的四分场; 斑块 III 适宜生境面积为 997.1 km^2 ($\text{HSI} > 0.06$), 约占总的潜在分布面积的 45.8%, 高、中、低适宜分布区分别占斑块 III 适宜生境面积的 9.3%、24.2% 和 66.5%, 均主要分布在五指山西部的罗那岭、南部的好定岭和吊罗山中部的度假村、白水岭以及研究区东部的牛上岭。

分析同时显示, 位于尖峰岭国家级自然保护区、鹦哥岭国家级自然保护区、霸王岭国家级自然保护区、吊罗山国家级自然保护区、五指山国家级自然保护区和黎母山省级自然保护区 6 个国家级与省级保护区内的海南臭蛙潜在分布区面积为 565.1 km², 约占总潜在分布区面积的 26.0% (表 2), 其中高适宜分布区为 61.3 km², 约占保护区内潜在分布区的 10.8% (表 2)。在 6 个国家级与省级保护区中, 霸王岭国家级自然保护区潜在分布区的面积最大, 为 156.4 km², 高适宜分布区占其 10.8%; 鹦哥岭国家级自然保护区潜在分布区的面积其次, 为 137.9 km², 高适宜分布区仅占其 4.8%; 五指山国家级自然保护区潜在分布区的面积最

小, 为 44.3 km², 高适宜分布区占其 9.9%。

2.2 AUC 检验结果

ROC 曲线评价结果见图 3, 模型预测的 AUC = 0.981, 表明 MaxEnt 模型的预测结果准确、可靠, 达到优秀水平。

2.3 海南臭蛙潜在分布区与环境因子的关系

各环境变量与海南臭蛙分布的相关性分析表明, 温度、湿度和日照对海南臭蛙的分布影响较小, 海拔 (45.2%)、坡度 (23.9%)、距水源距离 (8.3%)、NDVI (5.2%) 和年降水量 (5.2%) 等 5 个环境变量的累积贡献率为 87.8%, 这些环境因子对海南臭蛙的生境选择具有重要影响, 其中海拔对海南臭蛙分布的影响最大 (表 3)。

表 2 各保护区内的海南臭蛙潜在分布面积

Table 2 The size of potential distribution of Hainan Odorous Frog in each protected area

保护区 Protected area	保护区面积 Size of nature reserve (km ²)	潜在分布区面积占保护区面积比例 (%) Percentage of potential distribution region in each protected area	潜在分布区面积 Size of potential distribution (km ²)			总计 Total
			0.06 < HSI ≤ 0.20	0.20 < HSI ≤ 0.44	HSI > 0.44	
尖峰岭国家级自然保护区 Jianfengling National Nature Reserve	244.2	42.2	61.8	26.9	14.4	103.1
五指山国家级自然保护区 Wuzhishan National Nature Reserve	135.9	32.6	30.5	9.4	4.4	44.3
鹦哥岭国家级自然保护区 Yinggeling National Nature Reserve	504.2	27.4	104.0	27.3	6.6	137.9
霸王岭国家级自然保护区 Bawangling National Nature Reserve	310.6	50.4	100.8	38.6	16.9	156.4
黎母山省级自然保护区 Limushan Provincial Nature Reserve	129.4	38.6	29.7	12.0	8.2	50.0
吊罗山国家级自然保护区 Diaoluoshan National Nature Reserve	183.0	40.1	42.8	19.8	10.7	73.4
总计 Total	1 507.3	37.5*	369.6	134.1	61.3	565.1

* 各保护区内总的潜在分布区面积 (HSI > 0.06) 占有保护区总面积的比例。

* The percentage of the total potential distribution (HSI > 0.06) in all of the protected areas.

HSI. 栖息地适宜度指数; 适宜度指数大于 0.44 的地区为海南臭蛙高适宜分布区, 适宜度指数为 0.20 ~ 0.44 的地区为中适宜分布区, 适宜度指数为 0.06 ~ 0.20 的地区为低适宜分布区, 适宜度指数小于 0.06 的地区为不适宜分布区域。

HSI. Habitat suitability index; Value HSI > 0.44 was considered to be high suitability for Hainan Odorous Frog, 0.20 < HSI ≤ 0.44 was moderate suitability, 0.06 < HSI ≤ 0.20 was low suitability and HSI ≤ 0.06 was unsuitability.

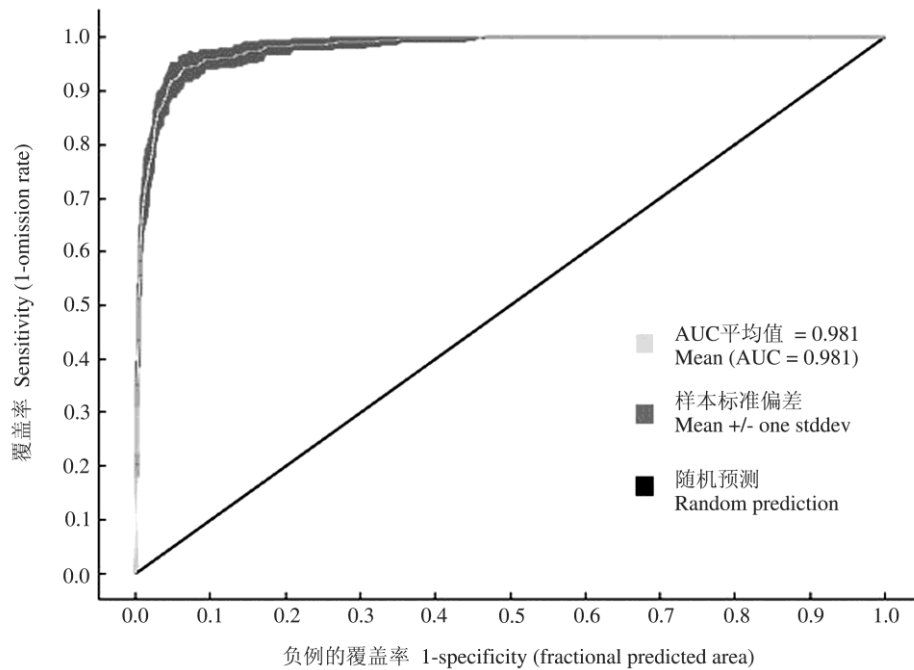


图 3 海南臭蛙潜在分布区预测的受试者工作特征曲线验证

Fig. 3 Receiver operating characteristic (ROC) curve verification of potential distribution prediction of Hainan Odorous Frog

表 3 各环境变量及其对模型预测的贡献率

Table 3 Contribution rate of environmental variables in MaxEnt

环境变量 Environmental variables	模型预测贡献率 (%) Percent contribution
海拔 Altitude	45.2
坡度 Slope	23.9
距水源距离 Distance to water	8.3
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	5.2
年降水量 Annual precipitation	5.2
距建筑用地距离 Distance to building	4.6
距农用地距离 Distance to agriculture	2.2
7 月降水量 Precipitation of July	1.7
坡向 Aspect	1.4
1 月最低气温 Min temperature of January	1.1
7 月最高气温 Max temperature of July	0.7
1 月降水量 Precipitation of January	0.5
1 月平均相对湿度 Average relative humidity of January	0.1
7 月平均相对湿度 Average relative humidity of July	0
年平均相对湿度 Annual average relative humidity	0
年日照时数 Annual sunshine duration	0
年均气温 Annual mean temperature	0

模型产生的环境变量对预测概率贡献值反应曲线 (response curve) 显示 (图 4), 海南臭蛙潜在适宜分布的最佳海拔范围是 600 ~ 1 000 m, 其他海拔区域的适宜度指数显著降低。坡度数据显示, 其与适宜度指数成正相关关系, 在 0 ~ 90° 范围内, 随着坡度的增加, 适宜度指数缓慢升高, 坡度到达最大值 (90°) 时, 海南臭蛙的适宜度指数保持最高值不变。距水

源距离在 0 ~ 500 m 范围内, 海南臭蛙分布区的适宜度指数随着该距离的增加而降低, 距水源距离在 500 ~ 2 000 m 范围内则相反, 当距离最小时适宜度指数最高。归一化植被指数显示, 在中等植被覆盖度的地区适宜度指数最高, 在低植被覆盖度和高植被覆盖度地区适宜度指数均显著减少。年降水量数据显示, 随着年降水量的变化, 海南臭蛙分布区的适宜度指数出现

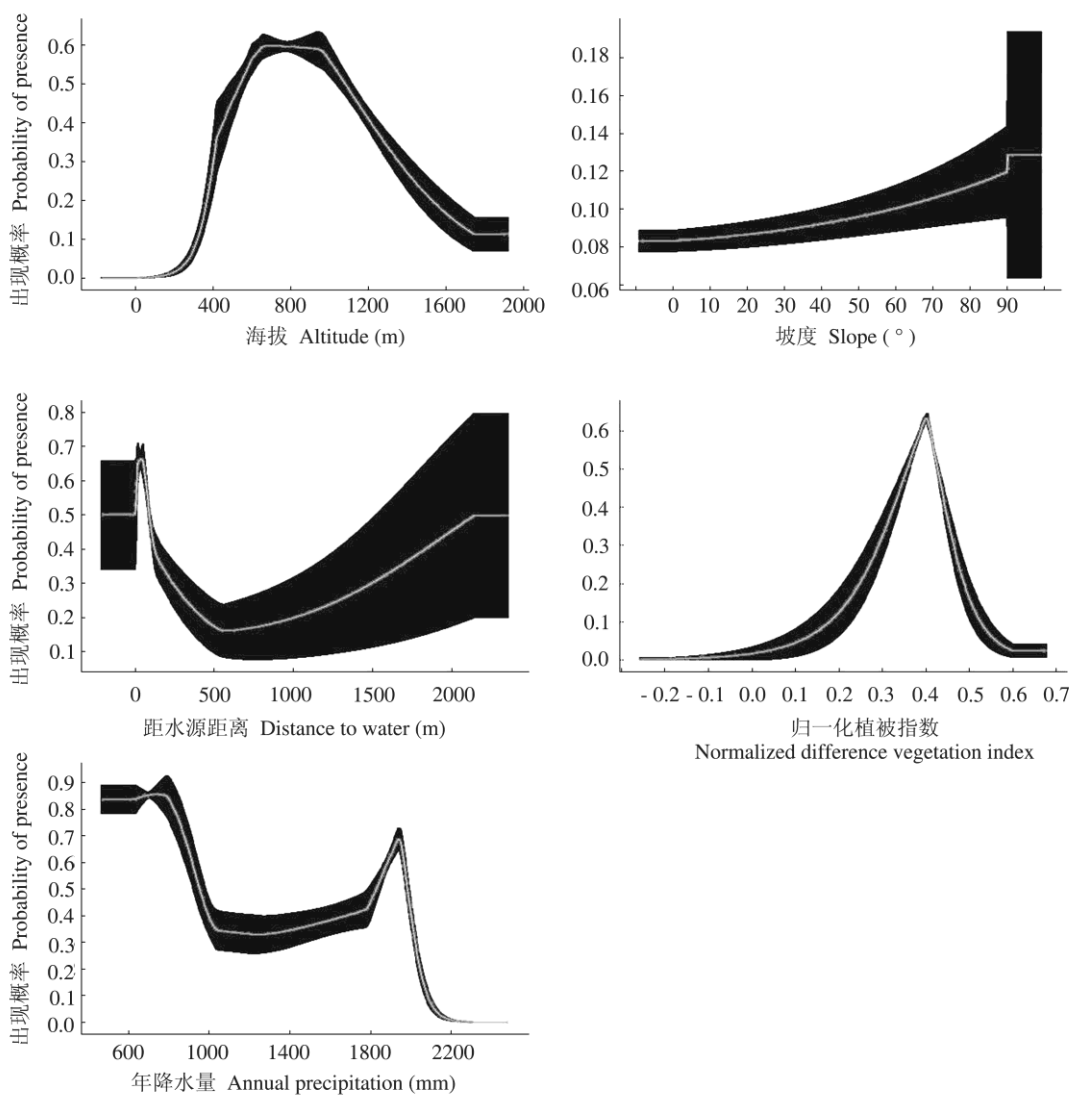


图 4 MaxEnt 模型中环境变量对预测概率的反应曲线

Fig. 4 Response curve of predicted probability for environmental variables in MaxEnt

图中表示 10 次运行结果均值 (白色) ± 标准差 (灰色)。

The figure shows the mean (white) ± standard deviation (gray) with 10 replicate runs.

波动性的变化, 其中, 在降水量为 800 mm 时, 适宜度指数最高, 当降水量大于 1 950 mm 时, 适宜度指数急剧下降直至最低值。

3 讨论

选择合适的环境变量对模型的有效预测具有重要影响作用 (Guisan et al. 2005)。本文选择了与两栖类特性相关的温度、降水和湿度等为主要气候因子, 并以气候的极端值占主导。一方面, 两栖类属于变温动物, 成体活动易受外界环境因子的限制, 尤其是温度和降水等气候因素的影响 (Soares et al. 2007, Qian 2010), 并且气候的极端值往往比变化范围或平均值具有更大的影响作用 (Groff et al. 2014)。另一方面, 受地形和水源的限制, 两栖类的栖息小生境范围狭小 (Guerry et al. 2002, van Buskirk 2005)。因此, 本研究选择了基于 ANUSPLIN 结合 30 m × 30 m 分辨率的数字高程图 (DEM) 对各气候变量进行插值, 提高了环境变量的精确度和空间分辨率 (Groff et al. 2014)。尽管如此, 本研究发现, 温度、湿度等气候因子对海南臭蛙的分布影响较小 (表 3), 可能是因为研究区域处于热带地区, 山区地形复杂, 植被覆盖度大, 大范围的气候所表现的差异远远小于局部小气候 (张声彝 1984), 热带山地雨林小气候在时空上也具有明显的变化 (周璋 2009)。

模型分析结果表明, 海拔是影响海南臭蛙分布的最主要环境因子, 海南臭蛙主要分布在海拔 200 ~ 1 200 m 之间, 其中最适宜生境分布于海拔 600 ~ 1 000 m 之间, 低于海拔 600 m 或高于海拔 1 000 m, 其生境适宜度急剧下降, 野外实际观测结果 (322 ~ 976 m) 与模型预测的最适海拔分布范围接近, 但与费梁等 (2012) 发现海南臭蛙分布在 200 ~ 780 m 以及刘惠宁等 (2012) 发现海拔范围在 395 ~ 1 100 m 之间略有差异, 这可能与调查强度有关。不同海拔区域, 水源、植被因子存在差异, 在海拔 600 m 左右的山区内, 小溪宽度较小, 通常小于 3 m, 溪水较浅且清澈, 半露出水面的石块较多, 植

被覆盖度大, 是大部分两栖类适宜栖息的生境, 这与模型分析得到的五指山主峰西侧、南侧和鹦哥岭主峰东部山区的高适宜生境结果相一致; 同时, 海拔较高处人类活动少, 干扰因子对海南臭蛙影响相对较小 (表 3), 低海拔区域人口密度大, 农业开发严重 (史海涛 2002), 容易导致栖息地的减少和破碎化 (Negga 2007)。

已有研究显示, 海南臭蛙主要分布在鹦哥岭、尖峰岭、五指山和吊罗山地区 (费梁等 2012, 刘惠宁等 2012)。本研究在黎母山和霸王岭地区野外调查发现了海南臭蛙实体, 与模型预测结果相一致。MaxEnt 模型还预测到牙琼、南美岭、什寒、秀寨岭、那罗岭以及好定岭等地是海南臭蛙潜在分布区 (图 2), 且栖息地适宜度指数较高, 预测的潜在分布总面积 ($HSI > 0.06$) 超过 279 km², 这显示海南臭蛙在海南的分布较广。但受自然景观与人类活动的影响, 其空间分布具有不连续性, 如大广坝水库将斑块 I 与斑块 II 分隔, 昌化江将斑块 II 与斑块 III 分隔, 城镇和农田将斑块 I 与斑块 III 分隔。有研究认为, 栖息地斑块大小及其适宜面积存在的差异性 (Lloyd 2008, Heisswolf et al. 2009), 将对物种分布和种群结构具有一定影响 (Mortelliti et al. 2010), 但在本研究中, 斑块 I 较斑块 II 和斑块 III 小, 该斑块内海南臭蛙潜在分布面积仅占总的潜在分布面积的 10.0% ($HSI > 0.06$), 但高适宜分布区占该斑块内潜在分布面积的 11.4% ($HSI > 0.44$), 斑块 II 和斑块 III 中潜在分布面积虽然较大, 但两个斑块内的高适宜分布区所占比例分别为 9.6% 和 9.3%, 这与 Lloyd (2008) 和 Heisswolf 等 (2009) 的研究不一致, 其原因需要进一步研究确认。

本研究调查样线主要设置在尖峰岭国家级自然保护区、鹦哥岭国家级自然保护区、霸王岭国家级自然保护区、吊罗山国家级自然保护区、五指山国家级自然保护区和黎母山省级自然保护区等 6 个国家级与省级保护区内, 海南臭蛙在各保护区内的潜在分布总面积为

565.1 km² (表 2), 占全部潜在分布区面积的 26.0%, 其中高适宜分布区占各保护区潜在分布总面积的 10.8%, 略高于海南岛高适宜分布区 9.6% 的比例, 而中适宜区和低适宜区大致相同, 这表明尖峰岭、鹦哥岭、霸王岭、吊罗山、五指山、黎母山等自然保护区存在较多适宜海南臭蛙的栖息生境, 而位于保护区外的栖息生境, 可能在未来由于气候因素以及人为干扰因素的影响而发生改变 (Ortega-Andrade et al. 2013), 因此, 未来对不同海拔地带海南臭蛙野外种群栖息地调查, 并对其栖息生境进行评估, 有利于保护野外种群。

致谢 尖峰岭保护区护林员苏红华、五指山保护区护林员李光才、鹦哥岭保护区护林员符寒武和刘礼跃、霸王岭保护区护林员陈庆、吊罗山保护区护林员梁宜文和黎母山保护区护林员李时兴在野外协助调查, 山东烟台大学曲江勇老师和五指山林业局张圣在野外调查和数据采集中给予大力支持和帮助, 中国水产科学研究院严登明硕士在数据处理过程中给予帮助, 东北林业大学高惠博士和吉林师范大学刘丹丹硕士在论文修改方面提出宝贵建议, 在此表示诚挚感谢。

参 考 文 献

- Fong G A, Viña Dávila N, López-Iborra G M. 2015. Amphibian hotspots and conservation priorities in eastern Cuba identified by species distribution modelling. *Biotropica*, 47(1): 119–127.
- García A, Ortega-Huerta M, Martínez-Meyer E. 2013. Potential distributional changes and conservation priorities of endemic amphibians in western Mexico as a result of climate change. *Environmental Conservation*, 41(1): 1–12.
- Groff L A, Marks S B, Hayes M P. 2014. Using ecological niche models to direct rare amphibian surveys: a case study using the Oregon Spotted Frog (*Rana pretiosa*). *Herpetological Conservation and Biology*, 9(2): 354–368.
- Guerry A D, Hunter M L. 2002. Amphibian distributions in a landscape of forests and agriculture: an examination of landscape composition and configuration. *Conservation Biology*, 16(3): 745–754.
- Guisan A, Thuiller W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9): 993–1009.
- Heisswolf A, Reichmann S, Poethke H J, et al. 2009. Habitat quality matters for the distribution of an endangered leaf beetle and its egg parasitoid in a fragmented landscape. *Journal of Insect Conservation*, 13(2): 165–175.
- Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15): 1965–1978.
- Hutchinson M F. 2004. ANUSPLIN Version 4.3 User Guide. Canberra: The Australia National University, Center for Resource and Environment Studies.
- IUCN. 2011. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2011.1. [DB/OL]. [2016-07-05]. <http://www.iucnredlist.org/>.
- Lloyd H. 2008. Influence of within-patch habitat quality on high-Andean *Polytlepis* bird abundance. *Ibis*, 150(4): 735–745.
- Mortelliti A, Amori G, Boitani L. 2010. The role of habitat quality in fragmented landscapes: a conceptual overview and prospectus for future research. *Oecologia*, 163(2): 535–547.
- Negga H E. 2007. Predictive modelling of amphibian distribution using ecological survey data: a case study of Central Portugal. Enschede: Ph. D. Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Ortega-Andrade H M, Rojas-Soto O, Paucar C. 2013. Novel data on the ecology of *Cochranella mache* (Anura: Centrolenidae) and the importance of protected areas for this critically endangered glassfrog in the Neotropics. *PLoS One*, 8(12): e81837.
- Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3): 231–259.
- Phillips S J, Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2): 161–175.
- Qian H. 2010. Environment-richness relationships for mammals, birds, reptiles, and amphibians at global and regional scales. *Ecological Research*, 25(3): 629–637.
- Sánchez D, Chacón-Ortiz A, León F, et al. 2008. Widespread

- occurrence of an emerging pathogen in amphibian communities of the Venezuelan Andes. *Biological Conservation*, 141(11): 2898–2905.
- Soares C, Brito J C. 2007. Environmental correlates for species richness among amphibians and reptiles in a climate transition area. *Vertebrate Conservation and Biodiversity*, 16(4): 1087–1102.
- van Buskirk J. 2005. Local and landscape influence on amphibian occurrence and abundance. *Ecology*, 86(7): 1936–1947.
- Ward D F. 2007. Modelling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand. *Biological Invasions*, 9(6): 723–735.
- Whiles M R, Lips K R, Pringle C M, et al. 2006. The effects of amphibian population declines on the structure and function of Neotropical stream ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(1): 27–34.
- Zhou W W, Zhang B L, Chen H M, et al. 2014. DNA barcodes and species distribution models evaluate threats of global climate changes to genetic diversity: A case study from *Nanorana parkeri* (Anura: Dicroglossidae). *PLoS One*, 9(8): e103899.
- Zhu G, Bu W, Gao Y, et al. 2012. Potential geographic distribution of brown marmorated stink bug invasion (*Halyomorpha halys*). *PLoS One*, 7(2): e31246.
- 陈云, 戴锦芳, 李俊杰. 2008. 基于影像多种特征的 CART 决策树分类方法及其应用. *地理与地理信息科学*, 24(2): 33–36.
- 费梁, 叶昌媛, 江建平. 2012. 中国两栖动物及其分布彩色图鉴. 成都: 四川科学技术出版社, 372–373.
- 费梁, 叶昌媛, 李成. 2001. 中国臭蛙属两新种记述 (无尾目: 蛙科). *动物分类学报*, 26(1): 108–114.
- 蒋有绪, 王伯荪, 藏润国, 等. 2002. 海南岛热带林生物多样性及其形成机制. 北京: 科学出版社, 219–324.
- 刘惠宁, 陈羣乐. 2012. 海南鹦哥岭自然保护区两栖动物区系及属种海南新纪录. *动物学杂志*, 47(1): 51–61.
- 史海涛. 2002. 海南岛两栖动物区系及地理区划. *四川动物*, 21(3): 174–176.
- 史海涛, 赵尔宓, 王力军. 2011. 海南两栖爬行动物志. 北京: 科学出版社, 36–120.
- 王力军, 洪美玲, 汪继超, 等. 2004. 海南黎母山自然保护区两栖动物多样性及区系特征. *动物学杂志*, 39(6): 54–57.
- 汪继超, 梁伟, 史海涛, 等. 2008. 海南省尖峰岭保护区海南特有两栖类分布和种群密度调查. *四川动物*, 27(6): 1163–1164.
- 吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 等. 2016. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例. *生态学报*, 36(12): 3758–3764.
- 肖智, 黎振昌, 高利宾. 2008. 海南岛蛙类新纪录——广西棱皮树蛙. *动物学杂志*, 43(4): 131–132.
- 杨军, 赵蕙. 2005. 海南部分地区两栖动物的调查. *四川动物*, 24(3): 309–311.
- 张声彝. 1984. 我国热带, 南亚热带山区气候特征与开发利用的探讨. *热带地理*, 4(1): 9–13.
- 周璋. 2009. 海南尖峰岭热带山地雨林小气候特征研究. 北京: 中国林业科学研究院硕士学位论文.