

DOI: 10.5846/stxb202201050031

肖璐瑶, 张勘, 朱玉东, 束潇潇, 郑普阳, 王远飞, 梁福轩, 谢锋. 大凉螈保护空缺分析与四川栗子坪国家级自然保护区保护成效评估. 生态学报, 2023, 43(11): 4502-4514.

Xiao L Y, Zhang K, Zhu Y D, Shu X X, Zheng P Y, Wang Y F, Liang F X, Xie F. Conservation gap analysis on the Taliang Knobby Newt (*Liangshantriton taliangensis*) and conservation effectiveness assessment of Sichuan Liziping National Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4502-4514.

大凉螈保护空缺分析与四川栗子坪国家级自然保护区保护成效评估

肖璐瑶^{1,2}, 张勘³, 朱玉东³, 束潇潇^{1,2,4}, 郑普阳^{1,2,4}, 王远飞^{1,2,4}, 梁福轩¹, 谢锋^{1,*}

1 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 四川栗子坪国家级自然保护区, 雅安 625400

4 四川大学生命科学学院, 成都 610041

摘要: 栖息地丧失和退化严重威胁全球两栖类动物的生存与繁衍, 栖息地保护在两栖动物保育中具有高的优先性。大凉螈 (*Liangshantriton taliangensis*) 是国内外广泛关注的横断山区特有珍稀有尾类物种。结合大凉螈 33 个分布位点和 9 个环境变量数据, 本文运用最大熵 (MaxEnt) 模型预测了大凉螈当前潜在适宜分布区, 再根据现有自然保护地 (5 个国家级和 9 个省级) 分布进行了保护空缺分析, 同时, 借助比例体重指数法 (SMI) 衡量了 7 个种群共 218 个个体的身体状况, 比较了保护区内外种群间的差异, 利用归一化植被指数 (NDVI) 识别了保护区内植被变化, 据此对四川栗子坪国家级自然保护区的保护成效进行了评估。结果表明, (1) 影响大凉螈分布的最主要环境变量为 NDVI (贡献值 34.33%)、最干月份降水量 (贡献值 26.81%) 和海拔 (贡献值 20.92%); (2) 大凉螈适宜生境主要集中在小相岭和凉山山系, 占研究区域总面积的 15.38%, 现有自然保护地覆盖了大凉螈 23.62% 的适宜生境, 仍有 3760.91 km² 的保护空缺; (3) 栗子坪保护区内雄性个体肥满度指数显著大于保护区外个体 (t -test, $P=0.006$), 雌性个体肥满度指数无显著差异 (t -test, $P=0.214$), 保护区内近 6 年 NDVI 值显著高于保护区建立前 (Mann-Whitney U test, $P<0.0001$), 均提示总体保护成效优。结合研究结果, 提出了确立大凉螈为重要保护目标物种、扩大现有保护区、建立保护小区或拯救中心、建设生态廊道等保护地建设的物种恢复措施, 以提升对大凉螈的保护能力。

关键词: 大凉螈; 适宜生境; 自然保护区; 肥满度指数

Conservation gap analysis on the Taliang Knobby Newt (*Liangshantriton taliangensis*) and conservation effectiveness assessment of Sichuan Liziping National Nature Reserve

XIAO Luyao^{1,2}, ZHANG Kan³, ZHU Yudong³, SHU Xiaoxiao^{1,2,4}, ZHENG Puyang^{1,2,4}, WANG Yuanfei^{1,2,4}, LIANG Fuxuan¹, XIE Feng^{1,*}

1 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Sichuan Liziping National Nature Reserve, Ya'an 625400, China

4 College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610041, China

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2017YFC0505202); 生态环境部生物多样性保护专项 (2111101); 栗子坪国家级自然保护区物种保护项目 (2019); 中国生物多样性监测与研究网络项目 (Sino BON)

收稿日期: 2022-01-05; **网络出版日期:** 2023-02-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiefeng@cib.ac.cn

Abstract: The survival and reproduction of amphibians were seriously threatened by habitat loss and degradation globally, and natural habitat protection has a high priority in amphibian conservation. The Taliang Knobby Newt (*Liangshantriton taliangensis*) is a rare caudata species endemic to the Hengduan Mountains, Sichuan, southwestern China and its population status and conservation are widely concerned. In the current study, based on 33 distribution sites and 9 environmental variables data, we predicted the potential suitable distribution area of the Taliang Knobby Newt by MaxEnt model. A total of 14 (five national and nine provincial) nature reserves were used for gap analysis. Scaled mass index (SMI) was quantified to estimate body conditions of 7 populations including 218 individuals, and the differences of SMI between populations inside and outside of Sichuan Liziping National Nature Reserve (LZP) and the variation of the normalized vegetation index (NDVI) in the reserve were further analyzed for assessing conservation effectiveness of the nature reserve. The results indicated that: (1) the most important environmental variables affecting the distribution of the Taliang Knobby Newt were NDVI (contribution 34.33%), the precipitation of driest month (26.81%), and altitude (20.92%). (2) The high suitable habitat of the Taliang Knobby Newt was mainly concentrated in the Xiaoxiangling (XXL) and Liangshan (LS) Mountains, accounting for 15.38% of the study area. 23.62% of the high suitable habitats of the Taliang Knobby Newt were covered by the existing nature conservation network. There were still 3760.91km² conservation gaps. 3) The male SMI in LZP was significantly higher than that of individuals outside the reserve (t -test, $P=0.006$), and the female SMI was no significant difference (t -test, $P=0.214$). The NDVI in the last 6 years of the reserve was significantly higher than that before the establishment of the reserve (Mann-Whitney U test, $P<0.0001$). All of these indicated that the conservation effectiveness of LZP was positive. Based on the results, we proposed systematic restoration measures to enhance the protection capacity on the Taliang Knobby Newt, including developing the salamander as important conservation target species, expanding current nature reserves, establishing conservation communities or rescue centers, and building ecological corridors.

Key Words: *Liangshantriton taliangensis*; suitable habitat; nature reserves; body condition index

全球脊椎动物生物多样性正持续丧失,其中两栖类受威胁比例达到41%^[1]。1980年来,两栖类物种丰富度的下降速度远超其他脊椎动物,如果不对受威胁物种进行保护,生物多样性丧失速度将加剧原来的五分之一^[2]。栖息地质量下降、生境破碎化和过度利用是两栖类多样性衰退的主要原因^[3-5]。目前中国受栖息地丧失和退化影响的两栖动物达两栖动物种数的76.47%,受胁比例达43%,高于全球水平^[6]。栖息地保护是保护中国受胁两栖动物物种的关键。

栖息地保护最主要的措施是就地保护,就地保护最直接的方式是建立自然保护区,明确物种适宜生境分布范围是栖息地保护的前提^[7]。近年来,我国自然保护地面积不断增加^[8],但对两栖类保护针对性不强,保护空缺较大^[9-10],各保护区对两栖类的保护成效值得进一步评判。

横断山区是全国生物多样性热点地区之一,其两栖动物物种丰富度也在国内名列前茅,但对该地区的保护仍存在较大空缺^[10]。大凉螈(*Liangshantriton taliangensis*)隶属蝾螈科(Salamandridae),有尾目(Caudata),疣螈属(*Tytolotriton*),费梁等^[11]根据其形态结构特点,将其单独建立为凉螈属(*Liangshantriton*)。作为横断山区特有的两栖动物,大凉螈仅分布于四川西南部,分布区狭窄^[12]。Shu等^[13]依据大凉螈遗传多样性及分化水平,将该物种划分为小相岭-贡嘎山系和凉山山系两大保护管理单元(MUs)。由于栖息地丧失,种群数量持续下降^[14-15],世界自然保护联盟(IUCN)红色名录将大凉螈濒危等级由近危(NT)升级为易危(VU)^[16],其在中国生物多样性红色名录中也被评为易危(VU)^[6,17]。大凉螈作为我国长期保护的国家二级重点保护野生动物,以其为代表来研究区域自然保护地对两栖动物的保护现状具有一定的指导价值。

最大熵模型(MaxEnt)利用物种现有分布点和气候数据,对物种潜在适宜生境做出模拟和预测^[18-19]。该模型预测结果准确度高、操作简单,且自动选择参数^[20-22],被广泛应用于各种动植物的栖息地评价预测与保

护空缺分析中^[23–26]。相较于传统构建物种分布图的方法,MaxEnt 模型能更准确地预测出物种分布范围。

保护区保护成效评估通常需要借助一定的评估标准^[27]。肥满度指数是根据动物个体的体重和身体长轴参数建立的指数,代表动物身体的营养和健康状况^[28]。两栖类身体状况的评估也常选用这一非伤害性形态学指标^[29–32]。肥满度指数越高,动物的身体状况越好^[33]。高质量的栖息地往往能孕育身体状况更优的个体^[34–36],动物的肥满度大小能反映出相应栖息地质量的高低,从而间接反映栖息地保护成效。

本研究运用地理信息系统(GIS)技术和 MaxEnt 模型预测大凉螈当前的适宜分布区,结合现有自然保护区,探究其对大凉螈种群现有适宜分布区的覆盖程度,明确其保护空缺;同时以四川栗子坪国家级自然保护区为例,通过大凉螈肥满度指数,分析保护区内和保护区外各种群身体状况差异,评估栖息地的保护成效,以期为国家二级重点保护的大凉螈的保护地建设和管理提供科学依据和合理建议。

1 研究区域概况

本研究区域位于四川省境内西南山地,小相岭-贡嘎及凉山山系所覆盖以及有大凉螈历史分布点的 11 个县,包括汉源、石棉、九龙、冕宁、甘洛、越西、峨边、马边、美姑、昭觉和布拖县。地理位置为 27°36′—29°22′N, 102°11′—103°20′E,海拔范围为 1688—3214m。该区域隶属横断山区,地势延绵起伏,气候分异显著,主要为亚热带季风气候。

2 研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 大凉螈分布点数据

大凉螈的分布位点信息来源于 2014—2021 年野外实地调查记录到的 18 个位点,以及大凉螈已知的 19 个历史分布位点^[37]。为了降低物种的空间自相关,对物种分布点进行筛选,利用 ArcGIS 10.6 中的 SDM toolbox 插件,使 1km 以内的分布点只保留一个^[38]。数据处理后,共获得 33 个有效位点信息(表 1),用于大凉螈适宜生境预测。

表 1 参与大凉螈适宜生境预测的 33 个位点信息表

Table 1 33 sites involved in the prediction of suitable habitats for *L. taliangensis*

点位 Sites	县 County	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	海拔 Altitude/m	点位 Sites	县 County	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	海拔 Altitude/m
里海子(LHZ)	石棉	102.1709	29.3932	2308	七里坝(QLB)	昭觉	102.5240	27.8734	3140
新民(XM)		102.1889	29.3715	2410	七里坝 1(QLB1)		102.5671	27.8798	2895
紫马(ZM)		102.2736	28.9809	1984	越西(YX)	越西	102.5774	28.4582	2206
紫马 1(ZM1)		102.2743	28.9819	1974	乌科(WK)	布拖	102.7444	27.5974	3214
野牛河(YNH)		102.2809	29.0147	2201	甘洛(GL)	甘洛	102.8562	28.9719	3022
金花湖(JHH)		102.2858	28.9738	2607	炳途(BT)	美姑	103.0488	28.5686	2319
竹马(ZUM)		102.4308	29.1356	1688	美姑(MG)		103.0518	28.6882	2454
石棉 1(SM1)		102.4772	29.0711	2072	处洪觉(CHJ)		103.1300	28.6448	2837
石棉 2(SM2)		102.3022	28.9757	1976	美姑 1(MG1)		103.1674	28.7539	1834
公益海(GYH)		102.3932	29.0205	2019	龙窝 1(LW1)		103.1970	28.7178	2078
公益海 1(GYH1)		102.3829	29.0295	2028	龙窝(LW)		103.2017	28.7188	2172
公益海 2(GYH2)		102.3835	29.0288	2044	美姑 2(MG2)		103.2087	28.7729	1733
公益海 3(GYH3)		102.3864	29.0226	2070	胜利坪(SLP)	峨边	103.0502	28.7367	2279
汉源(HY)	汉源	102.4100	29.2200	2240	黑竹沟(HZG)		102.9081	28.6650	2982
菩萨岗(PSG)	冕宁	102.3081	28.8991	2518	勒乌(LeW)		103.0548	28.8140	2374
拖乌(TW)		102.2788	28.8949	2932	三河口(SHK)	马边	103.3246	28.8811	1700
冕宁(MN)		102.2875	28.8125	2220					

2.1.2 环境数据来源

使用 23 个环境因子用于适宜分布区分析,包括生物气候因子(19 个)、海拔、植被归一化指数(NDVI)(1998—2019 年平均值)、全球人类影响指数(HII)和河流。生物气候变量和海拔数据从 WorldClim 网站下载(<https://www.worldclim.org>);NDVI(1998—2019 年)和河流(.shp)数据来自资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),HII 源自地球大数据(EARTHDATA)(<https://sedac.ciesin.columbia.edu>)。在 ArcGIS 10.6 中对河流 shp 图层进行了距离分析(欧氏距离),以构建新的河流栅格来进行 MaxEnt 分析,有可变栅格的分辨率均为 30s。对 23 个环境因子按照研究区域范围进行裁剪,并将裁剪后的图层转换为 ASCII 格式。

2.1.3 自然保护区网络

研究区域内自然保护区图层由四川省林草局提供,包括 5 个具有准确边界的国家级自然保护区和 9 个省级自然保护区(表 2)。由于市县级保护区缺乏明确边界,故暂未将其纳入研究范围。根据保护地调整,研究区域内新建了大熊猫国家公园,该公园涵盖了四川栗子坪国家级自然保护区(全区),因其与现有保护区重叠,加之其为 2021 年新建,本次研究暂时沿用原有保护区图层,而未将国家公园纳入分析。图层分析使用的

表 2 研究区域内当前自然保护地对大凉螭适宜生境的保护情况

Table 2 Current protection state of the natural reserves for *L. taliangensis* suitable habitat in study area

保护区 Nature reserves	缩写 Abbreviations	行政区域 Administrative region	面积 Area/km ²	适宜生境面积 Area of suitable habitat/km ²	适宜生境覆盖率 Covering percentage of suitable habitat/%	适宜生境占比 Percentage of suitable habitat/%
四川栗子坪国家级自然保护区 Sichuan Liziping National Nature Reserve	LZP	石棉县	485.36	287.77	59.29	5.84
四川美姑大风顶国家级自然保护区 Sichuan Meigu Dafengding National Nature Reserve	MG	美姑县	514.99	232.97	45.24	4.73
四川贡嘎山国家级自然保护区 Sichuan Gonggashan National Nature Reserve	GGS	康定县、泸定县、九龙县、石棉县	1664.80	172.73	10.38	3.51
四川黑竹沟国家级自然保护区 Sichuan Heizhugou National Nature Reserve	HZG	峨边彝族自治县	294.53	169.22	57.45	3.44
四川马边大风顶国家级自然保护区 Sichuan Mabian Dafengding National Nature Reserve	MB	马边彝族自治县	374.25	40.56	10.84	0.82
四川湾坝省级自然保护区 Sichuan Wanba Provincial Nature Reserve	WB	九龙县	369.94	111.78	30.22	2.27
四川马鞍山市省级自然保护区 Sichuan Maanshan Provincial Nature Reserve	MAS	甘洛县	257.03	71.57	27.84	1.45
四川冶勒省级自然保护区 Sichuan Yele Provincial Nature Reserve	YL	冕宁县	236.81	70.32	29.69	1.43
四川申果庄省级自然保护区 Sichuan Shenguo Zhuang Provincial Nature Reserve	SGZ	越西县	332.29	3.65	1.10	0.07
四川麻咪泽省级自然保护区 Sichuan Mamize Provincial Nature Reserve	MMZ	雷波县	24.29	1.22	5.02	0.02
四川大相岭省级自然保护区 Sichuan Daxiangling Provincial Nature Reserve	DXL	荣经县	2.43	0.99	40.84	0.02
百草坡省级自然保护区 Baicaopo Provincial Nature Reserve	BCP	金阳县	1.02	0.00	0.00	0.00
四川芹菜坪省级自然保护区 Sichuan Qincaiping Provincial Nature Reserve	QCP	沐川县	0.97	0.00	0.00	0.00
四川周公河珍稀鱼类自然保护区 Sichuan Zhougonghe Rare Fish Provincial Nature Reserve	ZGH	洪雅县、雅安市雨城区	0.04	0.00	0.00	0.00
总计 Total			4558.75	1162.78	25.51	23.62

物种分布点集、物种分布预测结果和自然保护地图层均在 ArcGIS 10.6 软件中处理,地理坐标系统为 WGS_1984。

2.2 数据分析

2.2.1 大凉螈 MaxEnt 模型构建与检验

为了防止过度拟合,在构建模型前,使用 ArcGIS 中空间分析工具里的“band collection statistic”功能计算图层间相关系数,并结合使用全气候图层进行预测后各个因子贡献率来删除相关性高且贡献不大的因子 ($|r| \geq 0.8$)。最终保留了 9 个环境预测因子参与模型构建(表 3),包括温度季节性变动系数(Bio04),温度年较差(Bio07),年平均降水量(Bio12),最干月份降水量(Bio14),降水量季节性变动系数(Bio15),海拔(Alt),NDVI,HII 和河流(River)。将 9 个环境因子和 33 个存在点信息导入 MaxEnt 3.4.1^[39] 构建大凉螈生态位模型。使用 logistic 模型,设置背景点 10000,并进行 10 次交叉验证(cross-validation)重复,10 次平均结果作为最终预测结果。

表 3 最大熵(MaxEnt)模型中环境变量的贡献值及重要性

Table 3 Percentage contribution and permutation importance of the environmental variables in the MaxEnt model

变量 Variables	缩写或编码 Abbreviations or Code	贡献百分比/% Percent contribution	排列重要性/% Permutation importance
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	NDVI	34.33	1.94
最干月份降水量 Precipitation of the driest month	Bio14	22.81	17.66
海拔 Altitude	Alt	20.92	35.14
年降水量 Annual precipitation	Bio12	9.49	24.44
温度年较差 Temperature annual range	Bio07	3.88	0.53
距河流距离 Distance to rivers	River	3.60	2.53
全球人类影响指数 Human influence index	HII	2.64	1.72
季节性降水量 Precipitation seasonality	Bio15	1.41	3.72
季节性温度 Temperature seasonality	Bio04	0.92	12.31

受试者曲线下面积(AUC)^[40]常被作为模型准确性的评价指标,取值范围为 0.5—1^[41—42]。AUC>0.9 时,模型预测精度高;0.8—0.9 表示预测结果较好;0.7—0.8 表示预测结果一般;0.6—0.7 表示预测结果较差;0.5—0.6 表示预测结果差^[43]。

2.2.2 大凉螈适宜生境分布和保护空缺分析

基于最大特殊敏感性加特殊性(MTSS) threshold^[44],在 ArcGIS 中将结果图层进行重分类,以 MTSS 作为存在阈值,选取能覆盖所有分布点的适合度值生成大凉螈高适宜生境图。将 MaxEnt 模型预测的大凉螈适宜生境图层与研究区域内当前自然保护区图层进行叠加,以识别大凉螈未受保护的高适宜生境。利用 ArcGIS “计算几何”工具计算面积,定量评价大凉螈保护空缺现状。

2.2.3 大凉螈保护成效评估

以四川栗子坪国家级自然保护区为例,调查了保护区内及其周边共 7 个实际分布点(表 4),对野外实地调查所采集的大凉螈样本进行现场身体参数测量,使用电子称(EHA251,中山佳维电子有限公司)称量体重(W),使用电子游标卡尺(472 型,德国麦思德五金工具,MASTERPROOF TOOLS)测量头体长(SVL),用以计算肥满度指数,测量完毕后原地释放。肥满度指数计算方法多样,本研究选用系统误差较小的比例体重指数法(SMI)来计算大凉螈肥满度指数^[13, 45—46]。因大凉螈肥满度具有性二型性^[47],故将不同性别的群体分开比较。通过比较不同性别保护区内和保护区外种群肥满度差异,来识别栖息地质量的差异,以判别保护区对大凉螈的保护成效。所有统计分析在 R 4.1.1 中进行,Shapiro 检验数据的正态性,若数据正态,选用 *t* 检验(*t*-test)进行差异分析,若不符合正态分布,则采用 Mann-Whitney *U* 检验。当保护区内种群肥满度显著大于保护区外时,判定为保护成效优;当保护区内与区外种群肥满度无显著差异时,判定为保护成效一般;当保护区外种群肥满度显著大于保护区内时,判定为保护成效差($\alpha = 0.05$)。同时,比较保护区建立以前 6 年(1998—

2003 年) 和近 6 年(2014—2019 年) 的 NDVI 值进一步分析保护区植被变化,判断保护区对生境质量的保护效果。

表 4 大凉蛭肥满度测度样本信息表

Table 4 *L. taliangensis* sampling information for conservation effectiveness assessment

点位 Sites	县 County	样本量 Sample size/个		海拔 Altitude/m	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude
		雄性 Male	雌性 Female			
菩萨岗 (PSG)	冕宁	17	11	2518	102.3081	28.8991
竹马 (ZUM)	石棉	28	4	1688	102.4308	29.1356
紫马 (ZM)		16	4	1984	102.2736	28.9809
野牛河 (YNH)		13	4	2201	102.2809	29.0147
金花湖 (JHH)		14	9	2607	102.2858	28.9738
新民 (XM)		45	5	2410	102.1889	29.3715
公益海 (GYH)		35	13	2019	102.3932	29.0205

3 结果与分析

3.1 MaxEnt 模型预测精度评估

模型测定 AUC 值达 0.936,表明该模型预测结果精度高。如表 3 所示,预测变量归一化植被指数 (NDVI)、最干月份降水量 (Bio14)、海拔 (Alt) 在训练及测试过程中均对模型贡献率最大,而排列重要性显示海拔 (Alt)、年降水量 (Bio12) 和最干月份降水量 (Bio14) 重要性更高。

3.2 大凉蛭适宜生境划分与评价

MaxEnt 模型预测的大凉蛭适宜生境 MTSS 最小阈值为 0.2301,以适合度值 0.6 为界限,将生境划分为 2 个

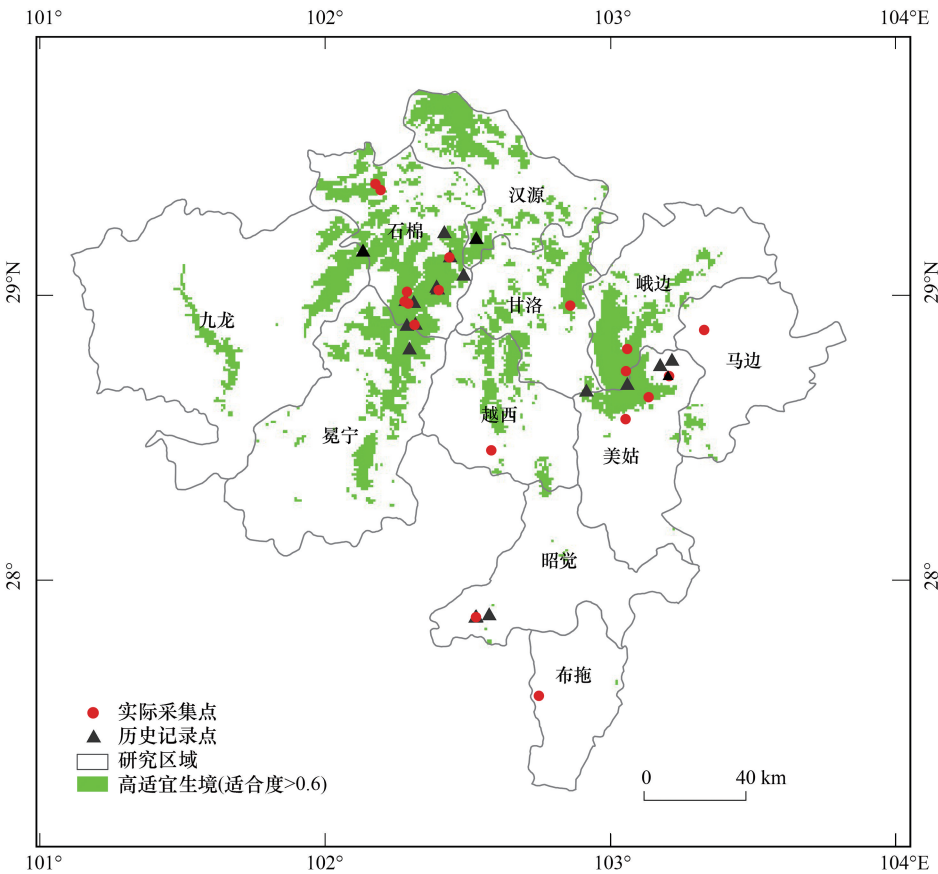


图 1 研究区域大凉蛭高适宜生境分布

Fig.1 The high suitable habitat distribution of *L. taliangensis* in study area

等级:高适宜生境(>0.6)和低适宜或不适宜生境(<0.6)。如图1所示,大凉螈高适宜生境主要集中于小相岭山系、凉山山系中西部地区,在小相岭山系基本呈连续分布,在凉山山系呈间断分布。在本研究区域内成片分布于汉源、石棉、甘洛、冕宁、九龙、越西、峨边、美姑等地,此外在马边、昭觉、布拖也有少量零星的高适宜生境。研究区域内高适宜生境几乎覆盖了大凉螈的实际采集点和历史记录点,基本与当前分布点吻合。大凉螈高适宜生境面积为4923.69km²,占研究区域总面积(32022.24km²)的15.38%。

3.3 现有自然保护地与保护空缺分析

结合大凉螈适宜生境和现有自然保护地图层可知(图2),当前研究区域内共有5个国家级自然保护区和9个省级自然保护区。其中国家级自然保护区分布在九龙、石棉、峨边、马边和美姑,省级自然保护区分布于九龙、冕宁、甘洛、越西,以及汉源、马边、美姑、昭觉各县。研究区域内现有自然保护区总面积为4558.75km²,占研究区域国土面积的14.24%。

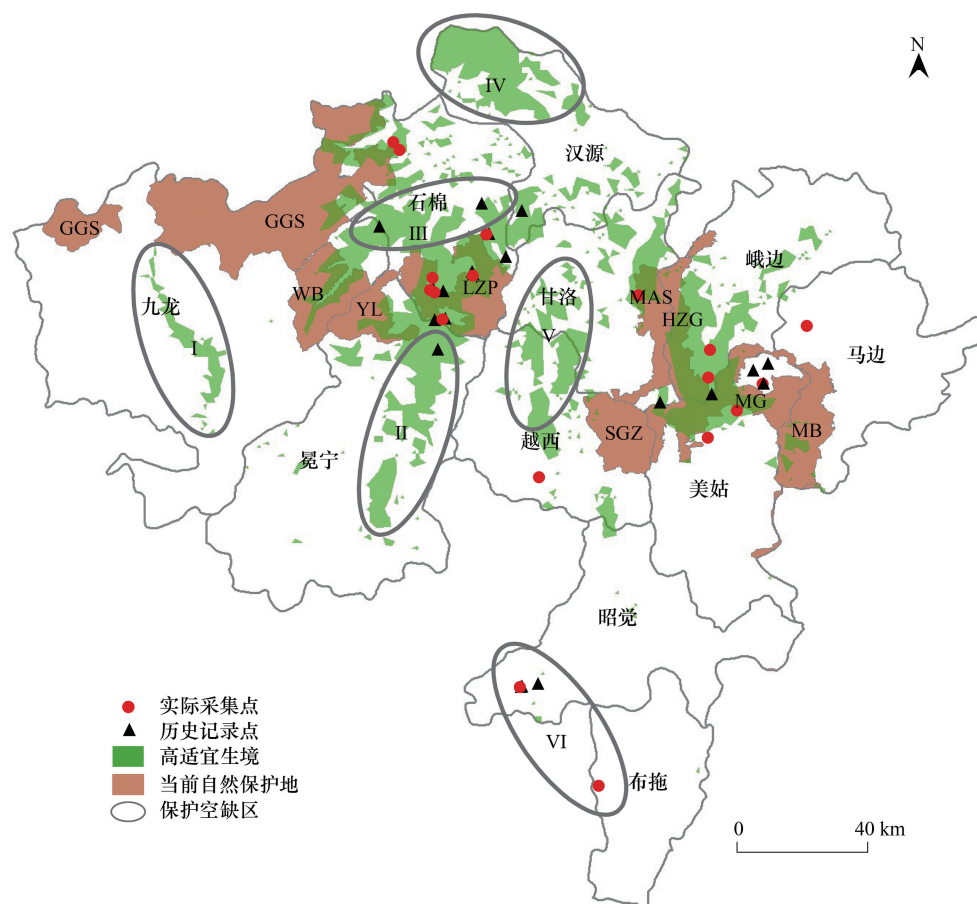


图2 研究区域大凉螈保护空缺分析

Fig.2 GAP analysis of *L. taliangensis* in study area

GGS: 贡嘎山 Gonggashan; LZP: 栗子坪 Liziping; HZG: 黑竹沟 Heizhugou; MG: 美姑 Meigu; MB: 马边 Mabian; WB: 湾坝 Wanba; YL: 冶勒 Yele; MAS: 马鞍山 Maanshan; SGZ: 申果庄 Shengguozhuang

对各保护区保护情况进行统计(表2)显示,当前自然保护区网络仅覆盖了大凉螈23.62%(1162.78km²)的适宜生境,仍有3760.91km²的保护空缺,占其总适宜生境面积的76.38%。5个国家级自然保护区保护了大凉螈18.34%(903.25km²)的适宜生境,栗子坪、美姑、贡嘎山、黑竹沟国家级自然保护区对大凉螈适宜生境保护比例均超过3%,其中四川栗子坪国家级自然保护区的覆盖程度和保护比例皆为最高;9个省级自然保护区保护了5.27%(259.53km²)的适宜生境,其中湾坝(2.27%)、马鞍山(1.45%)、冶勒(1.43%)有较高覆盖率。总

体上看,国家级自然保护地对大凉螈种群保护的贡献更大。

保护空缺主要分布在 6 个区域(图 2): I 区,九龙保护空缺区,位于九龙县中部,湾坝自然保护区以西、贡嘎山自然保护区以南; II 区,冕宁-石棉保护空缺区,位于栗子坪、冶勒自然保护区以南,包括灵山景区在内的冕宁县东部地区,及其与石棉县交界区域; III 区,石棉-九龙保护空缺区,包括栗子坪以北,以及石棉县与九龙县、汉源县和甘洛县交界区域; IV 区,汉源保护空缺区,位于大渡河以北、大相岭自然保护区以南; V 区,越西-甘洛保护空缺区,包括越西县与甘洛县交界区域,位于申果庄自然保护区以西,大凉山山系上游; VI 区,昭觉-布拖保护空缺区,包括昭觉和布拖西部,位于大凉山山系下游。峨边地区虽有部分适宜生境未被保护区覆盖,但黑竹沟和马边大风顶国家级自然保护区已经保护了该地区大部分适宜生境,且未被覆盖区域处于两个保护区中间,从一定程度上来说也已受到保护。

3.4 大凉螈保护成效评估

对栗子坪保护区内(公益海、紫马、金花湖)及其周边地区(新民、竹马、菩萨岗、野牛河)大凉螈种群(图 3)不同性别个体肥满度差异的分析结果显示(图 4),栗子坪保护区内和区外的大凉螈雄性个体肥满度差异极显著($P=0.006$),保护区内雄性个体肥满度显著大于保护区外雄性个体,即保护区内雄性的营养状况更好,表明保护区内栖息地质量更高;保护区内外雌性个体肥满度差异不显著($P=0.214$),但从均值来看,保护区内种群肥满度($18.63\pm 1.84, n=25$)高于保护区外($17.73\pm 3.16, n=27$),因此整体而言,将栗子坪保护区的保护成效评定为优。Mann-Whitney U 检验显示,保护区近 6 年的 NDVI 值显著高于保护区建立以前 6 年($P<0.01$)(表 5),表明保护区建立后,保护区内植被覆盖度显著提高。

4 讨论

两栖动物对环境依赖性强,迁徙能力弱,其生存与延续对生境的要求极高。MaxEnt 模型预测结果显示,大凉螈当前适宜生境基本分布于研究区域的 11 个县,在小相岭山系和凉山山系内部基本各呈连续状态,为大凉螈集中分布的区域。汉源县南北部以大渡河相隔,九龙种群被分隔在贡嘎山以西,甘洛、越西种群分布于小相岭和大凉山之间。大凉螈适宜分布区在各山系间整体是不连续的,几个种群呈离散状态。由本文研究可知,在高山峡谷区海拔是物种分布的重要限制因素,种群相对隔离,只能通过保护各个分隔适宜生境,提高区域内适宜栖息地数量上的保护,来达到保护整个大凉螈种群的目的。

模型预测的大凉螈分布比实际记录到的分布范围广,如汉源、九龙两地,2015—2021 年本团队实际多次野外调查验证,都未在该区域发现大凉螈踪迹,其它团队在汉源地区调查也未发现^[14],而历史记录显示,该地区曾确有大凉螈存在^[11],该区域大凉螈消失的原因很可能是人为干扰导致的栖息地丧失和过度利用。研究表明,冕宁和石棉县存在将其当作羌活鱼(山溪鲵, *Batrachuperus pinchonii*)的混品而被人为大量捕捉利用的现象^[14-15],在调查走访中发现,九龙县此现象更为严重,以至无法在野外发现大凉螈种群;汉源县的水电建设,也是导致现今大凉螈在此无迹可寻的原因;冕宁县的大凉螈原产地拖乌乡,因城镇化发展迅猛,道路建设密集,在几个历史分布点已无法调查到大凉螈的存在,仅于与石棉县接壤的菩萨岗小区域发现少量个体。在未来研究中需要进一步确认上述历史分布点是否还有大凉螈的存在,以便对其进行更好的保护;这些区域种群的消失也提示了,如果不对现有栖息地进行保护,其消失速度可能加剧。

表 5 四川栗子坪国家级自然保护区建立以前 6 年和近 6 年之间的归一化植被指数(NDVI)值比较

Table 5 Comparison of NDVI between the 6 years before the establishment of Sichuan Liziping National Nature Reserve and the last 6 years

阶段 Period	年份 Years	平均值±标准差 Mean±sd	P
保护区建立前 Before the establishment of the reserve	1998—2003	0.7887±0.0140	<0.0001 ***
保护区建立后 After the establishment of the reserve	2014—2019	0.8900±0.0160	

自然保护体系建设是栖息地保护的关键措施。近年来我国自然保护地面积不断增加,已达全国陆域面积

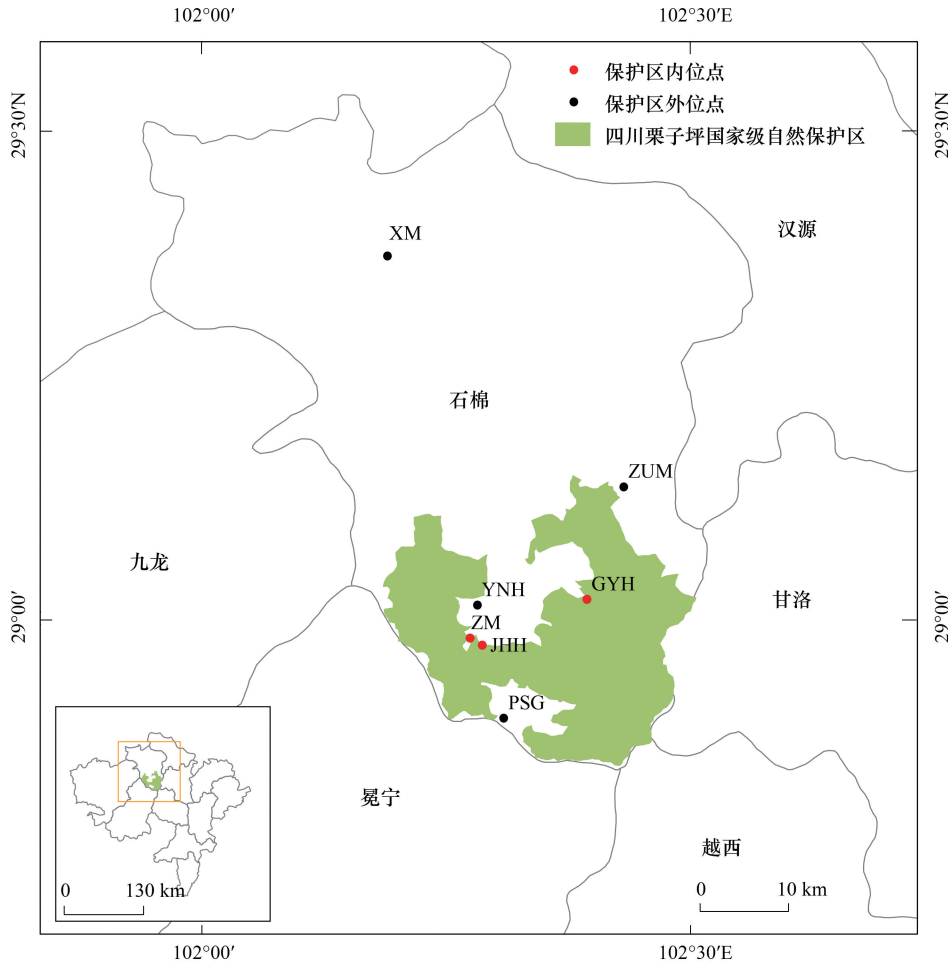


图3 四川栗子坪国家级自然保护区及其周边点位分布图

Fig.3 Sampling sites in or around Sichuan Lizhiping National Nature Reserve

XM: 新民 Xinmin; ZUM: 竹马 Zhuma; GYH: 公益海 Gongyihai; YNH: 野牛河 Yeniuhe; ZM: 紫马 Zima; JHH: 金花湖 Jinhuahu; PSG: 菩萨岗 Pusagang

的 18%^[48],符合 2020 年全球“爱知目标”(目标 11:保护 17%的陆地和内陆水域的面积指标)^[49],可见我国目前整体的自然保护水平较高。本研究区域位于横断山南部,区域内国家级和省级自然保护区覆盖度为 14.24%,由于缺乏市县级保护区的准确数据,各级自然保护地对该区域的覆盖度还有待进一步评估,但区域内对两栖动物的保护仍存在较大空缺^[10]。横断山区为全球生物多样性保护热点之一^[50–52],也是两栖动物分布中心和保护热点之一,具有丰富的物种多样性,大量的区域特有种也使横断山脉拥有高度不可替代性^[9]。除大凉蟾外,横断山南段区域还生存有国家 I 级保护的普雄原鲵(*Protohynobius puxiongensis*),国家 II 级保护的川南疣蟾(*Tylototriton pseudoverrucosus*)、山溪鲵、无斑山溪鲵(*B. karlschmidt*)、盐源山溪鲵(*B. yenyuanensis*)、凉北齿蟾(*Oreolalax liangbeiensis*)等珍稀两栖动物,其中盐源山溪鲵(EN)、川南疣蟾(EN)和凉北齿蟾(CR)分布地均未受到任何保护区覆盖^[6]。大凉蟾作为横断山区一个历史性的保护物种,其适宜分布区虽部分受现有保护地的保护,但仍存在 76.38%的保护空缺,这提示在未来的保护规划中需要提高对两栖动物的重视程度。

空缺分析结果显示大凉蟾仅有 23.62%的适宜生境被现有保护地所覆盖,还有大面积的适宜生境未被保护,这些生境仍是大凉蟾生存的载体,存有大量的独立进化的遗传单倍型^[13],需要加以重视。为此本研究将大凉蟾未被保护区划分为 6 个保护空缺区,现依据每个空缺区实际情况提出相应保护管理建议:高适宜生境的 I 区(九龙县)和 IV 区(大渡河以北,汉源县北部)曾有大凉蟾分布的历史记录^[12],但多次调查未在该区

域发现其踪迹,未来需进一步确认该区域是否还存在大凉螈种群,如果野外种群尚存,建议在这两个保护空缺区增设自然保护地,这对大凉螈种群复壮具有重要意义;Ⅱ区位于冕宁县,该县仅有一个省级自然保护区(冶勒)保护了仅 1.43% 的适宜生境,未被保护的适宜生境面积达 657.05 km², 占总适宜生境面积的 13.34%, 建议相关部门调整冶勒自然保护区面积以提高对大凉螈栖息地的覆盖程度;Ⅲ区位于四川栗子坪国家级自然保护区以北,该种群在其自然分布的边缘,具有进化的独特性^[13], 与该保护区覆盖的适宜生境呈连续分布,可考虑扩大现有贡嘎山自然保护区范围以达到保护该种群的目的;Ⅴ区涵盖甘洛县西南部和越西县东北部,该区位于小相岭和凉山山系两大保护管理单元之间,是二者进行基因交流的关键区域^[13], 应予以优先保护,然该区域适宜生境呈不连续分布,为保护物种的遗传多样性,在建立自然保护区的同时,还应建立生态廊道以保证两个遗传族群间的基因交流;Ⅵ区包含了昭觉和布拖县西部 2 个未受国家级和省级自然保护区保护的大凉螈种群,虽然该区适时预测的适宜分布区小、不连续,但遗传价值大^[13], 不过昭觉县适宜生境范围内还未建立任何等级的保护地,布拖县仅有乐安州级湿地自然保护区和交际河县级内陆湿地自然保护区,且二者未保护到现有大凉螈种群^[53], 建议加强现有市县级自然保护区建设,并针对大凉螈建立保护小区或拯救中心,加强其遗传种质资源的收集和保存,以防止其栖息地继续丧失而造成不可挽回的局面。

本研究以肥满度为评价指标来评估保护区对大凉螈的保护成效。肥满度是决定动物个体适合度的一个重要因素^[54], 并对栖息地的特征和质量做出响应^[55], 它作为一个定量指标比定性指标更具准确性,因此保护区内外大凉螈肥满度差异可从侧面反映保护区对其保护成效如何。借助肥满度这一指标研究发现,栗子坪保护区内大凉螈雄性个体的肥满度显著高于保护区外个体,保护成效显著,能反映该保护区内较区外栖息地质量更高,食物资源更丰富,更有利于物种的生存与繁衍。保护区内外雌性个体肥满度统计上无显著差异,但从均值上看,保护区内种群的肥满度指数 ($18.63 \pm 1.84, n = 27$) 仍高于保护区外 ($17.73 \pm 3.16, n = 25$), 一定程度上也可反映该保护区的保护成效。建立自然保护区是濒危物种栖息地保护中的重要一环,该措施通过保护区域内的植被和生态系统,减少人为活动等途径来提高保护区的栖息地质量。NDVI 值在四川栗子坪国家级自然保护区建立前到建立后有显著提高,证明该自然保护区的建立使区域内植被和生态系统逐渐恢复且受到了较好保护,本研究实地调查发现栗子坪保护区针对大凉螈有一系列专门的保护措施,在公益海保护站辖区的大凉螈繁殖场设有大凉螈栖息地的标识以及物种介绍,在提示人们减少对动物干扰的同时也向大众进行了科普;新建人工繁殖水体,促进了种群繁殖;对重要的繁殖水体开展了视频监控、严格控制保护区内人员干扰等,起到了良好的保护成效,减少了该物种的适宜生境受原有道路建设、放牧、外来物种入侵、捕捉等因素的影响^[15], 对保护区内大凉螈的生存和繁殖产生了积极作用,其肥满度显著高于保护区外的个体。栗子坪保护区好的保护成效提示了大凉螈栖息地保护的重要性,加大对大凉螈栖息地保护的覆盖度,将让更多种群获益。

针对保护成效评估,过往研究中多是对特定对象进行整体评估,如湿地自然保护区、水源涵养林、单个保护区、国家重点保护野生动物等^[56-61], 上述评估以物种丰富度、种群数量和动物寿命等单一指标或建立多套

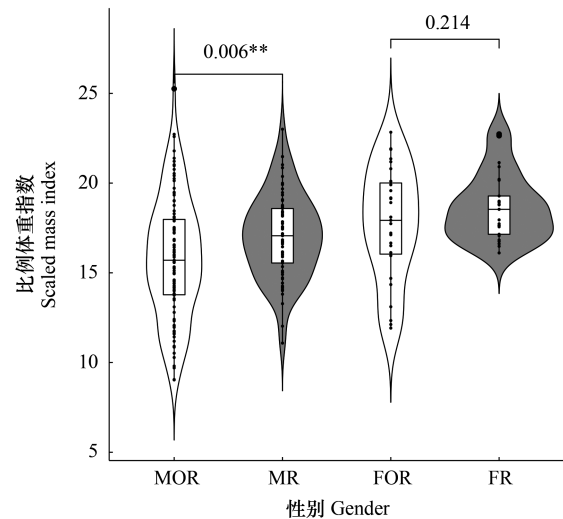


图 4 大凉螈不同性别在四川栗子坪国家级自然保护区内外的肥满度差异

Fig.4 Body condition differences of *L. taliangensis* between genders in and outside of Sichuan Liziiping National Nature Reserve

* * 表示 $P < 0.01$; MOR: 保护区外雄性 males out of the reserve; MR: 保护区内雄性 males in the reserve; FOR: 保护区外雌性 females out of the reserve; FR: 保护区内雌性 females in the reserve

评价体系来综合评估保护成效,而不同评估方法所得出的结果是有差异的^[62]。本研究借助单一的代表身体质量的肥满度指数比较发现,石棉县栗子坪保护区内外大凉蟾雌性个体的肥满度无显著差异,这仅在单个性别上反映保护区内外栖息地质量差异,不能完全说明该地区的保护成效。从总体上看,肥满度对栖息地质量有指向性,也与实际的植被指数改善相一致,本研究反映出的保护成效结果具有较大参考价值。在未来对大凉蟾保护成效的研究中,可以采用多元化的指标和方法,更全面更准确地综合评估各保护区对其保护成效,从而提出更高效的保护管理建议。

鉴于两栖动物的濒危现状,国内外关注度持续增加,这对自然保护地建设的针对性提出了更高要求。现针对本研究中大凉蟾的就地保护情况,提出以下建议:(1)在分布有大凉蟾适生区的现有保护区中,将大凉蟾列为其主要保护对象,使保护工作具有针对性;(2)根据保护空缺区,对成片的连续分布区采用新建或扩建大凉蟾保护区或保护小区,对零星分布点采用救助式保护,实现种群复壮和种质资源保护;(3)在保护区内和保护区间打造生境廊道,保证种群连通性,维持基因交流。

参考文献(References):

- [1] Baillie J E M, Griffiths J, Turvey S, Loh J, Collen B. Evolution lost: Status and trends of the world's vertebrates. London: Zoological Society of London, United Kingdom, 2010.
- [2] Hoffmann M, Hilton-Taylor C, Angulo A, Böhm M, Brooks T M, Butchart S H M, Carpenter K E, Chanson J, Collen B, Cox N A, Darwall W R T, Dulvy N K, Harrison L R, Katariya V, Pollock C M, Quader S, Richman N I, Rodrigues A S L, Tognelli M F, Vié J C, Aguiar J M, Allen D J, Allen G R, Amori G, Ananjeva N B, Andreone F, Andrew P, Ortiz A L A, Baillie J E M, Baldi R, Bell B D, Biju S D, Bird J P, Black-Decima P, Blanc J J, Bolaños F, Bolivar-G W, Burfield I J, Burton J A, Capper D R, Castro F, Catullo G, Cavanagh R D, Channing A, Chao N L, Chenery A M, Chiozza F, Clausnitzer V, Collar N J, Collett L C, Collette B B, Fernandez C F C, Craig M T, Crosby M J, Cumberlidge N, Cuttelod A, Derocher A E, Diesmos A C, Donaldson J S, Duckworth J W, Dutson G, Dutta S K, Emslie R H, Farjon A, Fowler S, Freyhof J, Garshelis D L, Gerlach J, Gower D J, Grant T D, Hammerson G A, Harris R B, Heaney L R, Hedges S B, Hero J M, Hughes B, Hussain S A, Icochea M J, Inger R F, Ishii N, Iskandar D T, Jenkins R K B, Kaneko Y, Kottelat M, Kovacs K M, Kuzmin S L, La Marca E, Lamoreux J F, Lau M W N, Lavilla E O, Leus K, Lewison R L, Lichtenstein G, Livingstone S R, Lukoschek V, Mallon D P, McGowan P J K, McIvor A, Moehlman P D, Molur S, Alonso A M, Musick J A, Nowell K, Nussbaum R A, Olech W, Orlov N L, Papenfuss T J, Parra-Olea G, Perrin W F, Polidoro B A, Pourkazemi M, Racey P A, Ragle J S, Ram M, Rathbun G, Reynolds R P, Rhodin A G J, Richards S J, Rodríguez L O, Ron S R, Rondinini C, Rylands A B, De Mitcheson Y S, Sanciangco J C, Sanders K L, Santos-Barrera G, Schipper J, Self-Sullivan C, Shi Y C, Shoemaker A, Short F T, Sillero-Zubiri C, Silvano D L, Smith K G, Smith A T, Snoeks J, Stattersfield A J, Symes A J, Taber A B, Talukdar B K, Temple H J, Timmins R, Tobias J A, Tsytsulina K, Tweddle D, Ubeda C, Valenti S V, Van Dijk P P, Veiga L M, Veloso A, Wege D C, Wilkinson M, Williamson E A, Xie F, Young B E, Akçakaya H R, Bunnell L, Blackburn T M, Boitani L, Dublin H T, Da Fonseca G A B, Gascon C, Lacher T E, Mace G M, Mainka S A, McNeely J A, Mittermeier R A, Reid G M, Rodriguez J P, Rosenberg A A, Samways M J, Smart J, Stein B A, Stuart S N. The impact of conservation on the status of the world's vertebrates. *Science*, 2010, 330(6010): 1503-1509.
- [3] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, Zhang Z X, Deng X Z. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(4): 373-384.
- [4] 安娜, 高乃云, 刘长娥. 中国湿地的退化原因、评价及保护. *生态学杂志*, 2008, 27(5): 821-828.
- [5] 江建平, 谢锋, 臧春鑫, 蔡蕾, 李成, 王斌, 李家堂, 王杰, 胡军华, 王燕, 刘炯宇. 中国两栖动物受威胁现状评估. *生物多样性*, 2016, 24(5): 588-597.
- [6] 江建平, 谢锋. 中国生物多样性红色名录-脊椎动物-第四卷-两栖动物(上册). 北京: 科学出版社, 2021.
- [7] 林源, 徐雪怡, 伊剑锋, 陆舟. 基于 MaxEnt 模型的广西黑颈长尾雉潜在栖息地预测与保护空缺分析. *四川动物*, 2017, 36(3): 328-333.
- [8] 赵建龙. 野生动植物保护及自然保护区建设现状及对策. *南方农业*, 2021, 15(20): 197-198.
- [9] Xie F, Lau M W N, Stuart S N, Chanson J S, Cox N A, Fischman D L. Conservation needs of amphibians in China: A review. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2007, 50(2): 265-276.
- [10] Chen Y H, Zhang J, Jiang J P, Nielsen S E, He F L. Assessing the effectiveness of China's protected areas to conserve current and future amphibian diversity. *Diversity and Distributions*, 2017, 23(2): 146-157.
- [11] 费梁, 叶昌媛, 江建平. 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, 2012.
- [12] 费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭. 中国动物志-两栖纲(上卷)总论 蚓螈目 有尾目. 北京: 科学出版社, 2006.

- [13] Shu X X, Hou Y M, Cheng M Y, Shu G C, Lin X Q, Wang B, Li C, Song Z B, Jiang J P, Xie F. Rapid genetic divergence and mitonuclear discordance in the Taliang knobby newt (*Liangshantriton taliangensis*, Salamandridae, Caudata) and their driving forces. *Zoological Research*, 2022, 43(1): 129-146.
- [14] 李蓓, 邹立扣, 罗燕. 大凉疣螈栖息地现状调查及其保护. *四川动物*, 2011, 30(6): 964-966.
- [15] 何流洋, 唐博, 吴应豪, 舒国成, 龚宇舟, 曾一唯, 程明阳, 束潇潇. 石棉县的大凉螈分布、种群现状及保护建议. *四川林业科技*, 2019, 40(1): 66-71.
- [16] IUCN SSC Amphibian Specialist Group. *Tylotriton taliangensis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020; e. T59486A63871228. [2022-07-19]. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T59486A63871228.en>.
- [17] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽. 中国脊椎动物红色名录. *生物多样性*, 2016, 24(5): 500-551.
- [18] Saupe E E, Qiao H J, Hendricks J R, Portell R W, Hunter S J, Soberón J, Lieberman B S. Niche breadth and geographic range size as determinants of species survival on geological time scales. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(10): 1159-1169.
- [19] Van Proosdij A S J, Sosef M S M, Wieringa J J, Raes N. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography*, 2016, 39(6): 542-552.
- [20] 李白尼, 魏武, 马骏, 张润杰. 基于最大熵值法生态位模型 (Maxent) 的三种实蝇潜在适生性分布预测. *昆虫学报*, 2009, 52(10): 1122-1131.
- [21] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [22] Jayasinghe S L, Kumar L. Modeling the climate suitability of tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] in Sri Lanka in response to current and future climate change scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 272-273: 102-117.
- [23] 徐卫华, 罗翀. MAXENT 模型在秦岭川金丝猴生境评价中的应用. *森林工程*, 2010, 26(2): 1-3, 26-26.
- [24] 张熙骛, 隋晓云, 吕植, 陈毅峰. 基于 Maxent 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测. *生物多样性*, 2014, 22(2): 182-188.
- [25] Remya K, Ramachandran A, Jayakumar S. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 184-188.
- [26] Suel H, Mert A, Yalcinkaya B. Changing potential distribution of gray wolf under climate change in Lake District, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16(5): 7129-7137.
- [27] Pressey R L, Cabeza M, Watts M E, Cowling R M, Wilson K A. Conservation planning in a changing world. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(11): 583-592.
- [28] 戴强, 戴建洪, 李成, 刘志君, 王跃招. 关于肥满度指数的讨论. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(5): 715-718.
- [29] 王小平, 肖向红, 王向峰. 不同地区中国林蛙的肥满度和重长指标的初步研究//中国动物学会两栖爬行动物学分会 2005 年学术研讨会暨会员代表大会论文集. 南京: 中国动物学会两栖爬行学分会, 2005.
- [30] 于东, 赵文阁. 哈尔滨地区花背蟾蜍冬眠前后几项形态生理系数的研究//中国动物学会两栖爬行动物学分会 2007 年学术研讨会论文集. 长沙: 中国动物学会, 2007.
- [31] Băncilă R, Hartel T, Plăiaur R, Smets R, Cogălniceanu D. Comparing three body condition indices in amphibians: A case study of yellow-bellied toad *Bombina variegata*. *Amphibia-Reptilia*, 2010, 31(4): 558-562.
- [32] Maccracken J G, Stebbings J L. Test of a body condition index with amphibians. *Journal of Herpetology*, 2012, 46(3): 346-350.
- [33] Jones R E, Petrell R J, Pauly D. Using modified length-weight relationships to assess the condition of fish. *Aquacultural Engineering*, 1999, 20(4): 261-276.
- [34] Irschick D J. Measuring performance in nature: Implications for studies of fitness within populations. *Integrative and Comparative Biology*, 2003, 43(3): 396-407.
- [35] VanDerWal J, Shoo L P, Johnson C N, Williams S E. Abundance and the environmental niche: Environmental suitability estimated from niche models predicts the upper limit of local abundance. *The American Naturalist*, 2009, 174(2): 282-291.
- [36] Acevedo P, Ferreres J, Escudero M A, Jimenez J, Boadella M, Marco J. Population dynamics affect the capacity of species distribution models to predict species abundance on a local scale. *Diversity and Distributions*, 2017, 23(9): 1008-1017.
- [37] Fei L, Ye C Y. *Amphibians of China Volume: I*. Beijing: Springer, 2016.
- [38] Brown J L. SDMtoolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 694-700.
- [39] Phillips S J, Dudí K M, Schapire R E. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3. 4. 1). *Biodiversity Informatics*,

2017. http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.
- [40] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [41] Araújo M B, Guisan A. Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 2006, 33(10): 1677-1688.
- [42] Abdelaal M, Fois M, Fenu G, Bacchetta G. Using MaxEnt modeling to predict the potential distribution of the endemic plant *Rosa arabica* Crép. in Egypt. *Ecological Informatics*, 2019, 50: 68-75.
- [43] Li X J, Mao F J, Du H Q, Zhou G M, Xing L Q, Liu T Y, Han N, Liu Y L, Zhu D E, Zheng J L, Dong L F, Zhang M. Spatiotemporal evolution and impacts of climate change on bamboo distribution in China. *Journal of Environmental Management*, 2019, 248: 109265.
- [44] Liu C R, Newell G, White M. On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(1): 337-348.
- [45] Peig J, Green A J. New perspectives for estimating body condition from mass/length data: The scaled mass index as an alternative method. *Oikos*, 2009, 118(12): 1883-1891.
- [46] 程明阳, 束潇潇, 张勘, 朱玉东, 龚宇舟, 肖璐瑶, 舒国成, 谢锋. 小个体大凉蕨增加精子质量投入获得交配后竞争优势. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(4): 831-836.
- [47] 龚宇舟, 王刚, 黄峰, 何流洋, 束潇潇, 谢锋. 大凉蕨繁殖生态. *生态学报*, 2019, 39(9): 3144-3152.
- [48] 王伟, 李俊生. 中国生物多样性就地保护成效与展望. *生物多样性*, 2021, 29(2): 133-149.
- [49] Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) Global Biodiversity Outlook 4. Montréal, 2014. <https://www.cbd.int/gbo4/>.
- [50] Mittermeier R A, Myers N, Gil P R, Mittermeier C G. Hotspots: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Monterrey: Cemex, Conservation International and Agrupación Sierra Madre, 1999.
- [51] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, Da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [52] Brooks T M, Mittermeier R A, Mittermeier C G, Da Fonseca G A B, Rylands A B, Konstant W R, Flick P, Pilgrim J, Oldfield S, Magin G, Hilton-Taylor C. Habitat loss and extinction in the hotspots of biodiversity. *Conservation Biology*, 2002, 16(4): 909-923.
- [53] 孙厚成, 刘绍龙, 冉江洪, 郑志荣, 吴慧芳, 侯秋菊, 凌伟. 四川布拖乐安自然保护区两栖爬行动物多样性分析. *四川大学学报: 自然科学版*, 2007, 44(2): 410-414.
- [54] Green A J. Mass/length residuals: Measures of body condition or generators of spurious results?. *Ecology*, 2001, 82(5): 1473-1483.
- [55] Kohler C C, Hubert W A. Inland fisheries management in North America. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, 1993.
- [56] 蒋明康, 王智, 秦卫华, 贺昭和. 我国自然保护区内国家重点保护物种保护成效评价. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(4): 35-38.
- [57] Chen L J, Zhu A X, Qin C Y, Liu J Z. Effectiveness assessment of soil erosion critical source areas for soil and water conservation. *Journal of Resources & Ecology*, 2012, 3(2): 138-143.
- [58] 郑姚闽, 张海英, 牛振国, 宫鹏. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估. *科学通报*, 2012, 57(4): 207-230.
- [59] Goswami R, Mariappan M, Singh T S, Ganesh T. Conservation effectiveness across state and community forests: the case of Jaintia Hills, Meghalaya, India. *Current Science*, 2016, 111(2): 380-387.
- [60] Lu C Y, Wang Z M, Li L, Wu P, Mao D H, Jia M M, Dong Z Y. Assessing the conservation effectiveness of wetland protected areas in Northeast China. *Wetlands Ecology and Management*, 2016, 24(4): 381-398.
- [61] Dong K K, Hou G L, Xu D D, He H L, Liu Z L. A method to compare the biodiversity conservation effectiveness between regions based on a reference condition. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3694.
- [62] Grantham H S, Pressey R L, Wells J A, Beattie A J. Effectiveness of biodiversity surrogates for conservation planning: Different measures of effectiveness generate a kaleidoscope of variation. *PLoS One*, 2010, 5(7): e11430.