

基于 MaxEnt 模型和 GIS 空间技术对大熊猫在岷山地区的时空变化分析及预测

陈文德^{1,2}, 朱 坤¹, 姚文文¹, 黄钟宣¹, 彭俊生^{1,2,3*}

(1. 成都理工大学 旅游与城乡规划学院, 四川 成都 610059; 2. 四川省社会科学重点研究基地(扩展)国家公园研究中心, 四川 成都 610059;
3. 四川农业大学 风景园林学院, 四川 成都 611130)

摘 要:大熊猫是国家Ⅰ级保护野生动物,是全世界珍稀动物的旗舰保护物种。经过历史环境的不断演变,野生大熊猫不仅仅在食性上由食肉转变为食竹,而且其个体形态、行为和生理等方面也有一定改变。由于大熊猫种群数量的稀少和习性的改变,相关保护工作和科学研究更具意义。近年来,在全球气候变化的大背景下,人类制定科学的保护计划来减轻大熊猫生境破碎化。基于大熊猫繁殖生境分布较为破碎和大熊猫种群数量较少,本研究从生态学角度研究大熊猫与环境之间的关系。通过 MaxEnt 模型和 GIS 空间技术对岷山地区大熊猫栖息地的时空变化分析及 21 世纪 50、70 年代栖息地范围预测,揭示大熊猫分布区与气候环境因素、坡度、植被和海拔等因素的相关性。结果表明,受试者操作特征曲线面积均超过 0.9,显示模型建立准确性“极好”,且都具有统计学意义。野生大熊猫在岷山地区的适宜栖息地集中在中低海拔(2 500~3 000 m)、年平均温度(6~7℃)适宜、降水量(800 mm)丰富的温性针叶林和常绿阔叶林。野生大熊猫分布的主要影响因素为 BIO15,并且大熊猫生境最适宜生存的区域在岷山片区明显向南偏移。从时间和空间的角度,对岷山片区大熊猫适宜生境进行动态分析,预测出不同情景下未来最适宜生存区域,为岷山片区内的自然保护地分布及管理提供科学信息。

关键词:大熊猫;MaxEnt 模型;时空变化;栖息预测;岷山地区

中图分类号:S718.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)04-0182-09

Analysis and Prediction of Temporal and Spatial Changes of Giant Pandas in the Area of Minshan Moutains Based on MaxEnt Model and GIS Spatial Technology

CHEN Wen-de^{1,2}, ZHU Kun¹, YAO Wen-wen¹, HUANG Zhong-xuan¹, PENG Jun-sheng^{1,2,3*}

(1. School of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;
2. Sichuan Key Research Base of Social Sciences (Extended) National Park Research Center, Chengdu 610059, Sichuan, China;
3. School of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract: *Ailuropoda melanoleuca* is a first-class national protected wild animal and also the flagship protected species of rare animals all over the world. With the continuous evolution of historical environment, wild giant pandas not only change from eating meat to eating bamboo, but also have some changes in their individual morphology, behavior and physiology. Because of the scarcity of giant panda population and the change of its habits, relevant conservation work and scientific research are more meaningful. In recent years, under the background of global climate change, human beings have made scientific protection plans to reduce the habitat fragmentation of giant pandas. Because the breeding habitat of giant pandas is fragmented and the population of giant pandas is small, this paper studied the relationship between giant pan-

收稿日期:2020-08-08 修回日期:2020-09-01

基金项目:四川省社会科学重点研究基地(扩展)国家公园研究中心(GJGY2019-ZD004)。

作者简介:陈文德,副教授,博士。研究方向:景观规划与生态修复。E-mail:chenwende@mail.cdut.edu.cn

* 通信作者:彭俊生,讲师。研究方向:风景园林规划与设计。E-mail:48002132@qq.com

das and the environment from an ecological point of view. By using MaxEnt model method and GIS spatial technology, this paper analyzed the spatial and temporal changes of giant panda habitat in the area of Minshan Mountains and forecasted the habitat range in 2050s and 2070s, which showed that the distribution of giant pandas was related to climate and environmental factors, slope, vegetation and altitude. The results showed that the area of operation characteristic curves of all subjects exceeded 0.9, which showed that the accuracy of establishing the model was “excellent” and had statistical significance. The suitable habitat of wild giant pandas in the area of Minshan Mountains was concentrated in temperate coniferous forest and evergreen broad-leaved forest with moderate and low altitude (2 500—3 000 m), suitable annual average temperature (6℃—7℃) and abundant precipitation (800 mm). The main factor affecting the distribution of wild giant pandas was BIO15, and the most suitable habitat for giant pandas was obviously shifted southward in the area of Minshan Mountains. From the perspective of time and space, this paper made a dynamic analysis of the suitable habitat of giant pandas in the area of Minshan Mountains, and predicted the most suitable living areas in the future under different scenarios, to provide scientific information for the distribution and management of nature reserves in the area of Minshan Mountains.

Key words: giant panda; MaxEnt model; space-time change; habitat prediction; Minshan mountain area

大熊猫是食肉目中的一种小型杂食性动物。其进化历史悠久,根据历史文献记载的时间演变关系可知,大熊猫的进化历程为禄丰始大熊猫(*Ailurarctos lufengensis*)、大熊猫小种(*Ailuropoda microta*)、大熊猫武陵山亚种(*A. m. wulingshanensis*)、大熊猫巴氏亚种(*A. m. baconi*)、大熊猫现生种(*Ailuropoda melanoluca*)^[1]。1999—2003 年,我国完成了全国第 3 次大熊猫调查,据统计我国成年大熊猫数量为 1 596 只。根据 2015 年四川省公布的第 4 次大熊猫调查结果,显示岷山地区大熊猫数量从 591 只增长到 666 只^[2]。相比于前 3 次调查结果,大熊猫数量正在以可持续发展的种群结构稳定增长。虽然大熊猫种群数量在近 30 a 呈明显增长趋势,但是其物种存活率低,活动范围小,栖息地破碎化等问题仍然存在。19 世纪末 20 世纪初,国内外研究人员长期关注大熊猫栖息地及环境对大熊猫成长的影响。从近 10 a 国内外发布的期刊的文章来看,作为大熊猫故乡的中国,研究的学科主要集中在野生动物保护、生物学和林学等领域。但是,对大熊猫栖息地适宜性程度的研究仍有所不足。研究人员从大熊猫生存的质量因子进行分析,例如主食竹、温度、降水量、湿度、土壤环境等,不仅影响物种分布,而且在活动生境进化过程中发挥重要作用^[3-5]。其中学者们较为关注的可食竹研究分析,多从主食竹特征、竹子开花、生长趋势等问题进行研究。由此在植被类型解译中专门解译出竹林区域。在全球气候剧烈变化的趋势下,面对不受控制的人为干扰和自然灾害,岷山地区栖息地上的珍稀动植物被推向灭绝的边缘。生境恢复和栽培被证明是恢复和保护物种栖息地的实用生态措施之一^[6]。为保护岷山地区大熊猫的基础栖息地的恢复,利用生态建模来

了解大熊猫适宜生境分布及决定生境分布形成的环境因素是十分必要的。随着统计建模和地理信息系统的发展,生态学理论和地理信息系统技术在生态保护和利用领域得到广泛应用^[7-8]。

近年来,利用模型对目标物种栖息地质量评估和物种栖息地的空间分布预测,主要分为 3 类:机理模型、统计分析模型和生态位模型^[9]。其中,机理模型不需要目标物种活动点和非活动点数据,但该模型主要依赖专家经验且结果无法检验。统计分析模型中的回归模型需要目标物种活动点和非活动点数据,因而模型结果会出现偏差;生态位模型只要活动点数据,且结果相对准确^[10-12]。同时,生态位模型有最大信息熵模型(maximum entropy model)、GARP 生态位模型(the genetic algorithm for rule-set prediction),Bioclim 模型(the bioclimatic prediction system),Domain 模型(the domain model)和生态位因子分析模型(ecological-niche factor analysis)等^[13]。经过对比发现,MaxEnt 是最为精准预测物种分布的标准模型,其工作原理是估计概率分布,模型具有联系性、生成性、高效性的算法特征^[14]。即使物种数据分布信息及分布区的环境变量不完整,MaxEnt 模型也能对物种潜在分布区进行精准预测分析^[15]。尽管有一些学者大熊猫生境预测用景观分析方法和地理探测器对大熊猫分布范围、栖息地利用格局进行分析,但关于气候环境因子对大熊猫生境影响研究仍然缺乏^[16]。随着全国大熊猫调查研究结果发现,大熊猫的生存家园受到一定程度迫害^[17]。为了探索岷山栖息地保护和资源利用的新途径,本研究用 MaxEnt 模型结合 ArcGIS 软件和环境气候变量预测的潜在分布区,再利用生境指数划分不

同等级,评估生境适宜性。本研究旨在通过气候、海拔、植被等因素建立生态位模型识别与物种分布的相 关性,再通过未来气候变化基于模型预测或确定适宜 生存栖息地,整篇文章的研究流程如图 1 所示。

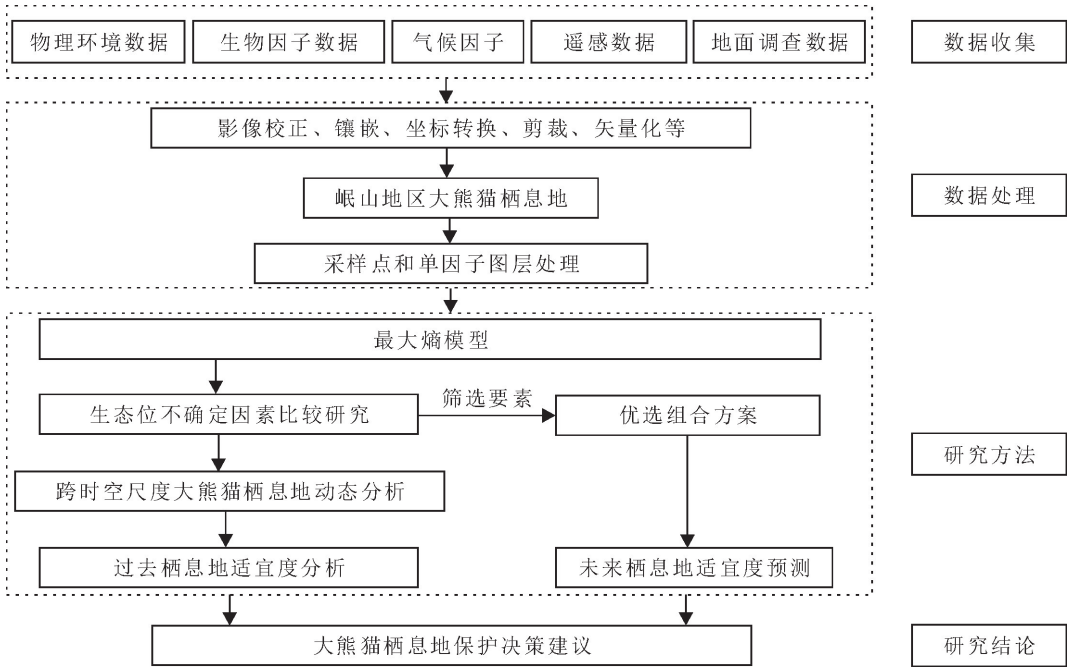


图 1 研究路线
Fig. 1 Research route

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域为岷山山系,范围包括平武县、松潘、北川等 55 个乡镇,地理坐标为 102°12′—106°28′E, 30°33′—34°20′N。该研究区野生自然资源丰富,其中包含 21 个自然保护区、9 个风景名胜区、7 个森林公园、3 个地质公园、2 个世界自然遗产地。建立自然保护地的目的是为保护岷山片区物种多样性、促进人与自然和谐共生。岷山地区的野生大熊猫大致可以分为 6 个局域区域。最大种群为虎牙局域种群,由 343 只野生大熊猫组成;最小种群为黑河局域种群。本研究根据全国第 3 次和第 4 次大熊猫调查结果,并结合现场实际调查情况确定岷山地区研究范围(图 2)。该地区是全球生物多样性较为丰富的热点地区,海拔 479~5 391 m,以针叶林和常绿阔叶林为生态系统的特征类型。该区域有丰富的以大熊猫为食的竹类物种,分布最多的竹类为缺苞箭竹(*Fargesia denudata*),其余包含青川箭竹(*Fargesia rufa*)、糙花箭竹(*Fargesia scabrida*)、钓竹(*Ampelocalamus breviligulatus*)、团竹(*Fargesia obliqua*)和冷箭竹(*Arundinaria faberi*)等^[9-11]。

研究选择岷山地区有 3 个原因:1)岷山山脉是全国大熊猫调查范围中面积最大的山系,并且野生大熊猫数量(大约 600 余只)最多。该区域受气候变化影响较大,栖息地面积变化较明显^[12-13]。2)选择

岷山地区作为研究区域,因为其位于全国大熊猫调查范围的北端,快速的气候变化和人为干扰可能会导致这些种群面临更大的灭绝风险,因此需要进行预测栖息地适应性变化趋势^[14]。3)近年来政府制定一系列保护政策,对野生大熊猫进行就地保护,建立自然保护地。因此,岷山对保护大熊猫和生物多样性具有重大意义^[15-17]。

1.2 物种分布数据

1998—2002 年第 3 次全国大熊猫调查后,由国家林业局 2006 年编制而成的调查报告显示的岷山地区大熊猫分布点。2015 年 5 月四川省林业厅著作并发布的四川省第四次大熊猫调查报告中显示的岷山地区大熊猫分布点。通过 ArcGIS 10.3 对这 2 次调查结果中岷山地区的有效分布痕迹点进行数字化处理,从而得到各点的经纬度。共计有 723 个野生大熊猫种群的地点被识别出来,其中第 3 次调查有 311 个点,第 4 次调查有 412 个点,其地理坐标用 ArcGIS 10.3 中全球定位系统提取出来。

1.3 环境变量数据及预处理

723 个有效点的记录坐标信息转换成“CSV”格式。转换后的文件输入 MaxEnt 中。除了大熊猫发生数据外,环境数据、海拔数据、植被类型数据也是输入 MaxEnt 中的重要组成部分。从 worldclim 数据门户网站(www.worldclim.org)下载 30 弧秒分辨率数据中的 19 个生物气候参数和海拔数据,从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载

Landsat8 影像数据中 2002、2013 年的影像, 分别选取同月份云量少、精度为 30 m 的影像, 从航天飞机雷达测绘任务 STRM30 数字高程库中获取精度为 30 m 的海拔影像(<http://srtm.csi.cgiar.org>)。本研究使用 ArcGIS 10.3 建立研究区所需的掩膜的 shp 面文件, 对变量数据进行合并、统一坐标系、影像几何校正、FLAASH 大气校正、重采样、剪裁、按掩膜提取等处理。同时, 使用 ENVI 5.3.1 软件对原始影像数据进行植被解译, 并通过对研究区现状植被类型的实况调查, 将其大致分为以下植被类型: 常绿和落叶阔叶林、常绿和落叶针叶林、针阔混交林、稀疏林、竹林、灌丛、耕地、草甸等。这些数据用 R 软件检查变量之间的自相关, 避免误差来源^[18]。将这些文件再用 ArcGIS 10.3 将变量数据都转换为“ASCII”格式^[19]。生物气候变量分别代表年度趋势和季节性趋势, 如平均温度、降水量、年温度范围等限制性环境因素(表 1)。从门户网站下载 MaxEnt 5.4.1 用于建立模型研究。将处理好的数据按照要求放入 MaxEnt 中生成变量响应曲线和折刀法突出每个变量的相对影响^[20], 及范围预测栖息地。

表 1 相关环境变量名称及描述

Table 1 Description of environmental variables

| 变量 | 描述 | 变量 | 描述 |
|--------|------------|---------|-----------|
| BIO1 | 年平均气温 | BIO2 | 昼夜温差月平均值 |
| BIO3 | 昼夜温差与年温差比值 | BIO4 | 温度变化方差 |
| BIO5 | 最热月份最高温 | BIO6 | 最冷月份最低温 |
| BIO7 | 年温变化范围 | BIO8 | 最湿季度平均温度 |
| BIO9 | 最干季度平均温度 | BIO10 | 最暖季度平均温度 |
| BIO11 | 最冷季度平均温度 | BIO12 | 年平均降雨量 |
| BIO13 | 最湿月份降雨量 | BIO14 | 最干月份降雨量 |
| BIO15 | 降雨量变化方差 | BIO16 | 最湿季度降雨量 |
| BIO17 | 最干季度降雨量 | BIO18 | 最暖季度降雨量 |
| BIO19 | 最冷季度降雨量 | tmax_M | M 月平均最高温度 |
| tmin_M | M 月平均最低温度 | tmean_M | M 月平均温度 |
| prec_M | M 月平均降水量 | veg | 植被类型 |
| alt | 海拔 | tmax_M | M 月平均最高温度 |
| tmin_M | M 月平均最低温度 | tmean_M | M 月平均温度 |
| prec_M | M 月平均降水量 | | |

另外, 以 2002—2013 年全国第 3 次和第 4 次调查岷山地区所得结果为基础, 运用 MaxEnt 和 ArcGIS 软件, 结合政府气候变化专门委员会(IPCC)第五次气候评估报告分布的 CMIP6 气候模式数据, 采用最大熵模型预测 4 种气候变化(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP4-6.0、SSP5-8.5)情景下 2050s 及 2070s 岷山地区大熊猫的分布范围变化情况^[21-22]。从全国第 4 次大熊猫分布点中筛选出有效数据, 再加上 worldclim 数据门户网站中的未来 2041—2060 年和

2061—2080 年 2 个时间段的平均最低气温、最高气温、降水量和生物气候等变量, 预测岷山地区大熊猫栖息地在未来 21 世纪 50、70 年代的范围分布情况和不同适应性区域面积。

模型模拟效果准确性与 AUC 值成正比。当 AUC 值为 0.5~0.6 时, 仿真效果不理想, 0.6~0.7 效果不良, 0.7~0.8 时预测效果一般, 0.8~0.9 时预测效果良好, >0.9 时预测精度效果最优^[23]。为了更准确地评价岷山片区大熊猫生境适宜性, 本研究采用阈值法划分大熊猫生境适宜等级。根据 MaxEnt 输出结果里的表格查找最大测试敏感性+特异性逻辑阈值, 并对 MaxEnt 模型预测结果进行重分类, 共设 3 个分类: 不适宜生境、边缘适宜生境和适宜生境。其中 $P<0.1$ 为不适宜生境, $0.1\leq P<0.5$ 为边缘适宜生境, $P\geq 0.5$ 为适宜生境。

2 结果与分析

2.1 跨时空尺度大熊猫栖息地动态分析

2.1.1 MaxEnt 预测结果检验与分析 在 MaxEnt 模型中利用第 3 次和第 4 次全国调查数据, 生成的模型检验 ROC 曲线。在图 3a、图 3b 中, 红色线代表训练集, 黑色表示随机预测, 蓝色表示测试集, 2 次调查有明显变化。本研究采用 ROC 曲线对模型进行准确性检验。第 3 次调查 AUC 值获得 MaxEnt 的训练集为 0.915(图 3a); 第 4 次调查 AUC 值获得 MaxEnt 的训练集为 0.926(图 3b)。通过对比分析, 可以看出回归模型预测精度较高, 表现该模型较稳定, 预测准确性达到“极好”程度, 该结果可以用于岷山大熊猫适生地区划。

2.1.2 生境适宜性分布 岷山地区大熊猫生境分为不适宜生境、边缘适宜生境和适宜生境(图 4), 统计分析表明, 在第 3 次调查中, 不适宜生境总面积为 $311.85\times 10^4\text{ hm}^2$, 占研究区面积的 45.46%; 边缘生境面积为 $235.22\times 10^4\text{ hm}^2$, 占研究区面积的 35.04%; 适宜生境面积为 $124.19\times 10^4\text{ hm}^2$, 占研究区面积的 18.50%。第 4 次调查中, 不适宜生境总面积为 $326.44\times 10^4\text{ hm}^2$, 占研究区面积的 48.63%; 边缘生境面积为 $231.66\times 10^4\text{ hm}^2$, 占研究区面积的 34.51%; 适宜生境面积为 $113.18\times 10^4\text{ hm}^2$, 占研究区面积的 16.86%。显而易见, 从 2001 年到 2013 年岷山地区适宜生境面积减少 $11.01\times 10^4\text{ hm}^2$, 边缘适宜生境减少 $3.56\times 10^4\text{ hm}^2$, 适宜生境增加 $14.59\times 10^4\text{ hm}^2$ 。野生大熊猫主要集中分布于岷山中部, 边缘适宜生境主要集中于适宜生境范围的边缘, 同时适宜生境有向岷山南部偏移趋势。

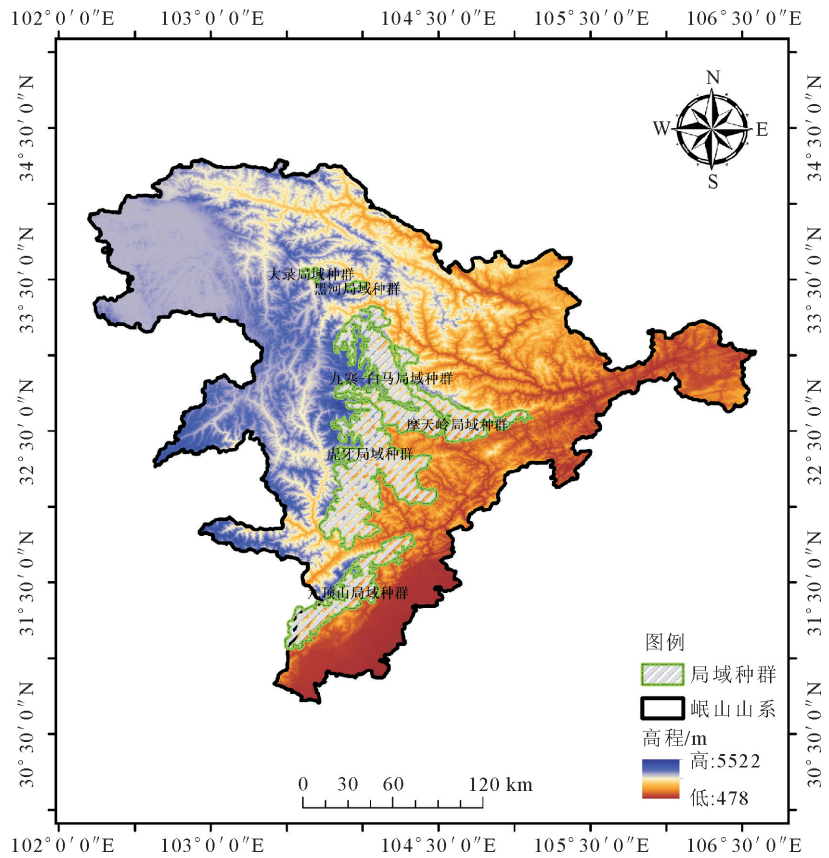


图 2 岷山山脉大熊猫栖息地区位

Fig. 2 Location map of giant panda habitat in the area of Minshan Mountains

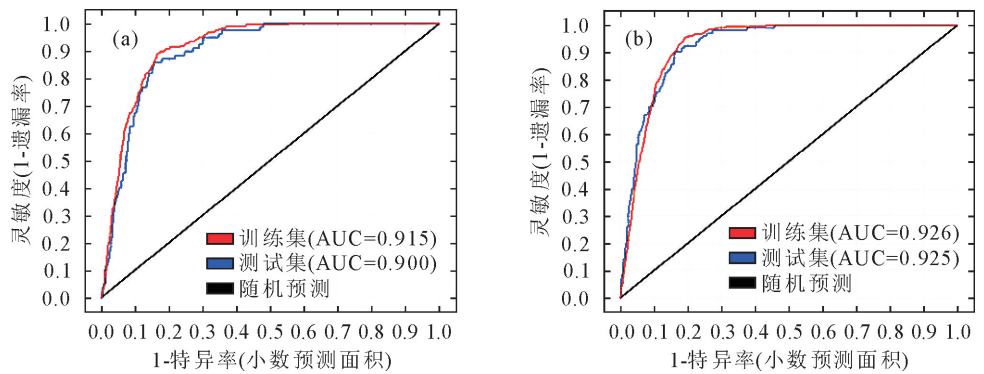


图 3 模型适用性检验 AUC 值

Fig. 3 AUC value on applicability test of the MaxEnt model

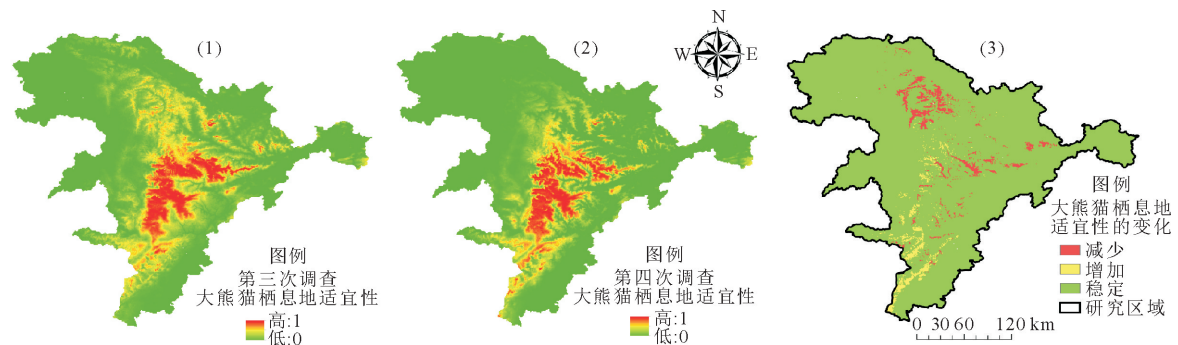


图 4 第 3 次至第 4 次调查岷山大熊猫栖息地适宜性变化

Fig. 4 The change in panda habitat suitability in the area of Minshan Mountains from the 3rd to 4th survey

本研究使用 Jack-刀方法估计环境变量的贡献率,以确定环境最佳环境参数或各个变量的重要性^[24]。柱状图结果显示(图 5),第 3 次调查中影响大熊猫潜在分布主要生境因子是最干季度降水量、最累季节降水量和年温度范围;第 4 次调查中影响大熊猫潜在分布主要生境因子是降水季节性、最干季度降水量和最累季节降水量。在 MaxEnt 5.3.1 基础上,利用环境变量建立模型,定位潜在的岷山地区适宜性分布。该模型自动输出的每个变量的贡献率如表 2 显示,第 3 次调查中降水季节性、最干燥月份的降水、最冷月份的最低温度、年温度范围、最热季度的平均温度、温度季节性、平均日较差和等温性分别为 30.5%、13.4%、9.7%、8.3%、8.1%、8%、6.1%、6%,这些因子总贡献率为 90.1%。第 4 次调查中降水季节性、最干燥月份的降水、年温度范围、最热月份的最高温度、温度季节性、最干燥季度的降水量、年降雨量分别为 25.4%、25.1%、15.6%、13.6%、4.8%、4.7%、3%,这些因子总贡献率为 89.2%,这些值能够描述岷山大熊猫生境主要特征。海拔、土地利用类型等环境变量贡献率较低,均小于 3%。同时,2 次调查都显示大熊猫主要活动最适海拔为 2 500~3 000 m,最适降雨量为 800 mm 左右,最适植被类型为温性针叶林与常绿阔叶林,最适年平均温度为 6℃~7℃。

2002—2015 年国家发布施行退耕还林项目 (GTGP)和天然林转换项目(NFCP)的保护工程,同时由于地震引起山体滑坡带来物种扩散的行为的成功率降低的叠加影响,最终导致岷山地区大熊猫种群隔离,甚至局部灭绝^[25-28]。通过模型分析可知,气候变化相对于海拔和植被类型等变量的贡献更多。因此,使用未来气候数据预测大熊猫栖息地的准确性相对可靠。

2.2 预测未来岷山地区栖息地

2.2.1 气候变化情况

对本研究所用未来气候 (2050s 和 2070s)预测模拟的 CMIP6 气候模式数据检测发现,岷山区域的气候相对于基准年 2001—2013 年都有一定的改变^[29-33]。随着全球温室气体排放量的增加,20 世纪 50 年代均温度增加幅度为 1~1.6,20 世纪 70 年代同一温室气体排放量比前 20 世纪 50 年代更大,上升幅度在 1.2~2.0。在岷山地区特别是中心地带,年均温中间明显低于边缘地区。同时,岷山地区年降水量的变化较为不规律,且整体在一定程度上降水量有所减少。

2.2.2 气候变化下大熊猫栖息地面积变化

在 4 种气候变化情景下建立不同 MaxEnt 模型中 ROC 曲线下的面积 AUC 分布,其 20 世纪 50 年代的训

练数据集和测试数据集分别为 0.921、0.884(ssp1-2.6);0.919、0.878(ssp2-4.5);0.919、0.882(ssp3-7.0);0.920、0.883(ssp5-8.5)。20 世纪 70 年代的训练数据集和测试数据集分别为 0.919、0.882(ssp1-2.6);0.920、0.885(ssp2-4.5);0.916、0.883(ssp3-7.0);0.920、0.884(ssp5-8.5)。这些值均与 1 非常相近,随机选取其中 80%数据点为训练数据集,剩下的 20%的数据点进行检验,本研究发现模型具有较高的符合度和较好的效果。在不同气候环境下,利用 MaxEnt 模拟了岷山地区大熊猫在当代、21 世纪 50 年代和 70 年代的潜在分布范围。将研究区大熊猫生境适宜性分为 3 类,即不适宜生境(<10%)、适宜生境(适宜性指数 10%~50%)和高适宜生境(适宜性指数>50%),从而得到研究区大熊猫潜在空间分布(图 6)和不同气候条件下大熊猫高适宜生境及其面积(图 7)。

表 2 环境因素对模型预测的贡献率

Table 2 Contribution rate of environmental factors to model prediction

| 第三次调查 | | 第四次调查 | |
|-------|-------|-------|-------|
| 变量 | 贡献率/% | 变量 | 贡献率/% |
| bio15 | 30.50 | bio15 | 25.40 |
| bio14 | 13.40 | bio14 | 25.10 |
| bio6 | 9.70 | bio7 | 15.60 |
| bio7 | 8.30 | bio5 | 13.60 |
| bio10 | 8.10 | bio4 | 4.80 |
| bio4 | 8.00 | bio17 | 4.70 |
| bio2 | 6.10 | bio12 | 3.00 |
| bio3 | 6.00 | bio6 | 2.20 |
| bio17 | 2.10 | bio3 | 1.70 |
| bio18 | 2.00 | bio19 | 1.10 |
| bio13 | 1.00 | bio11 | 0.80 |
| alt | 0.90 | bio1 | 0.80 |
| bio12 | 0.90 | bio18 | 0.30 |
| bio19 | 0.90 | alt | 0.30 |
| bio11 | 0.70 | bio2 | 0.30 |
| veg | 0.60 | bio13 | 0.20 |
| bio1 | 0.60 | bio8 | 0.10 |
| bio16 | 0.10 | bio9 | 0.10 |
| bio5 | 0.10 | bio10 | 0.10 |
| bio9 | 0.10 | veg | 0 |
| bio8 | 0 | bio16 | 0 |

随着气候情景的变化,大熊猫生态适宜区的范围和几何中心有所变化,主要集中在岷山中部区域,大熊猫的适宜生境和高适宜生境范围和几何中心有向南部偏移的趋势。

由模型预测的结果可以看出,当前气候条件下大熊猫适宜生境面积($231.66\times10^4\text{ hm}^2$)比第 3 次调查的面积($235.22\times10^4\text{ hm}^2$)减少 3.56×10^4

hm²。在 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP4-6.0、SSP5-8.5 情景下,21 世纪 50 年代预测的大熊猫在适宜生境潜在分布面积分别为 250.05×10⁴、255.35×10⁴、260.59×10⁴、252.7⁴×10⁴ hm²,比当代气候条件下适宜生境面积有明显增长。到 21 世纪 70 年代,这 4 种情景下研究区大熊猫在适宜生境分布面积也有一定程度增加,但是增加程度略微低于 21 世纪 50 年代,适宜生境面积分别为 252.74×10⁴、250.05×10⁴、250.05×10⁴、250.02×10⁴ hm²。

在高适宜生境面积方面,当前气候条件下大熊

猫的生境面积(113.18×10⁴hm²)比第 3 次调查的生境面积(124.19×10⁴ hm²)减少 11.01×10⁴ hm²。未来 4 种气候条件下大熊猫适宜生境面积相对有所增加。其中,在 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP4-6.0、SSP5-8.5 情景下,21 世纪 50 年代的面积分别为 131.64×10⁴、142.18×10⁴、144.80×10⁴、139.56×10⁴ hm²;70 年代的面积分别为 139.56×10⁴、136.87×10⁴、136.87×10⁴、129.02×10⁴ hm²。从中可得,高适宜生境面积有先上升再下降的趋势,但是整体变化幅度不大较为稳定。

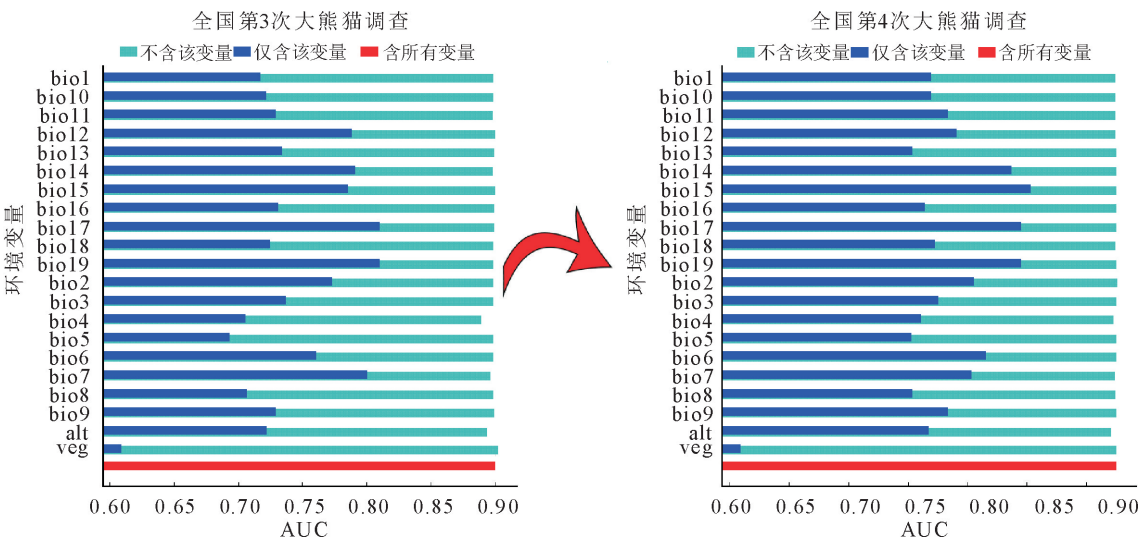


图 5 环境变量的 jack-刀方图

Fig. 5 Jackknife test for environmental variables

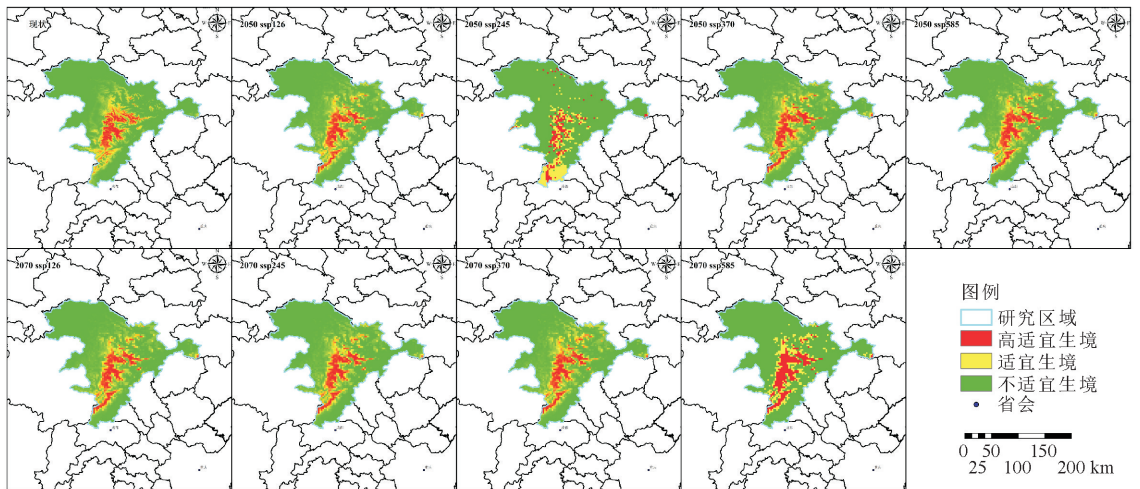


图 6 2050 年至 2070 年岷山地区大熊猫在不同气候变化情景下的分布

Fig. 6 Distribution map of giant pandas in the area of Minshan Mountains during 2050s and 2070s under different climate change scenario

3 结论与讨论

本研究在前人的研究基础上,较全面考虑影响到岷山地区大熊猫栖息地的各种环境变化因子,同时利用 MaxEnt 模型对环境因子进行刷选,再对大熊猫未来栖息地进行预测。在 2002—2012 年,岷山

地区适宜生境面积增长区域主要集中于白河、小寨子沟、宝顶沟、千佛山等自然保护区,而适宜生境面积略有减少的地区为包座、白水江等自然保护区。同时,从中可以得到大熊猫的活动最适宜海拔是中低海拔地区(2 500~3 000 m);最适宜降水量约是 800 mm;最适应植被类型是温性针叶林和常绿阔叶

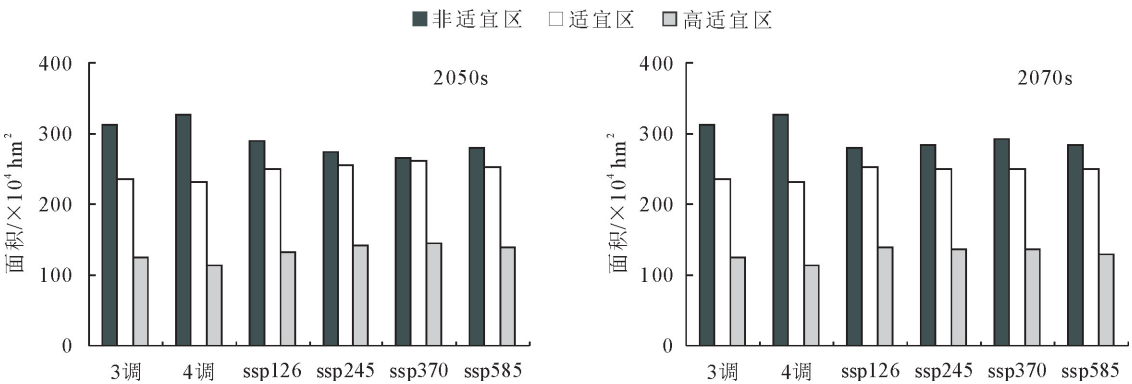


图 7 不同气候变化情景下 2050 年代和 2070 年代大熊猫生境面积变化

Fig. 7 Prediction of habitat variation of giant pandas in 2050s and 2070s under different climate change scenario

林;最适应年平均温度为 6℃~7℃。从这 2 次全国大熊猫调查可以看出,岷山地区大熊猫数量持续增长,栖息地面积有所增加,说明当前大熊猫保护措施有着明显成效。在 2050—2070 年,温度有稳定上升趋势,降水量变化较为不规律,结果显示大熊猫岷山片区高适宜和适宜栖息地面积变化趋势均为先增加后减小的趋势。大熊猫生境适宜生存的区域在岷山片区明显向南偏移。导致这样结果的原因可能是不同自然保护区之间存在一定的破碎化现象,这可能是由于地震、泥石流等灾害造成,而经过此间自然环境的修复,破碎化的栖息地未能恢复到连接成片。破碎化的大熊猫栖息地不但影响大熊猫的扩散行为,甚至使大熊猫斑块种群受到自然环境变化而产生局部隔离。结果发现,大熊猫主要集中分布在斑块较大的区域。在岷山局域种群中,可以观察大录局域种群和黑河局域种群相对较为孤立,这些局域种群存在较大的隔离风险。虎牙种群和九顶山种群之间存在间隔,需要建立局域种群之间的廊道。由人为干扰或自然灾害造成栖息地斑块破碎化,野生大熊猫廊道有助于完成局域种群之间的迁移、扩散、繁衍,增加种群间的基因和物种交流,降低种群灭绝风险。本研究结果有利于深入了解大熊猫在我国西南岷山地区的潜在适宜性最适分布区及七主导的环境变量,当然还有一些其他对大熊猫适宜区预测有影响的因子在本研究中未考虑到,如中间关系、生物相互作用以及人类活动强度,在今后的研究中需要进一步考虑环境变量的选取。

本研究建议保护区,一方面,根据预测结果有目的的选择高适宜生境和适宜生境区域进行大熊猫野生资源调查研究,建立相应的野生大熊猫基因库,观察区域内种群活动,从而发挥出其最大科研利用价值。另一方面,有效选取野生大熊猫抚育生境,对当地加大宣传保护力度,展开相关措施,加大有效人工管理力度和合理的相关投资,持续加强野化放归措

施,扩大野生种群数量,发挥野生濒危保护动物的可持续利用价值。

参考文献:

[1] 李涛,赖旭龙,王颖,等. 大熊猫的分类与演化综述[J]. 地质科技情报,2004(3):40-46.
LI T, LAI X L, WANG W, et al. Taxonomy and evolution of giant panda[J]. Geological Science and Technology Information, 2004(3):40-46. (in Chinese)

[2] 国家林业局. 全国第三次大熊猫调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[3] 雍严格, 曹庆, 唐新成, 等. 佛坪大熊猫冬季栖息地的功能和面临的主要问题[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(6): 98-101.
YONG Y G, CAO Q, TANG X C, et al. Functioning and threats confronting winter habitat of the giant pandas in Foping National Nature Reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(6): 98-101. (in Chinese)

[4] LIU J G, OUYANG Z Y, William W. Taylor, et al. A framework for evaluating the effects of human factors on wildlife habitat: the case of giant pandas[J]. Blackwell Science Inc., 1999, 13: 6.

[5] LI B, ZENG T, RAN J H, et al. Characteristics of the early secondary succession after landslides in a broad-leaved deciduous forest in the South Minshan Mountains[J]. Elsevier B. V., 2017, 405.

[6] CLAUDIO SILVA, FRANCISCO LEIVA, JOSÉ LASTRA. Predicting the current and future suitable habitat distributions of the anchovy (*Engraulis ringens*) using the Maxent model in the coastal areas off central-northern Chile[J]. Fisheries Oceanography, 2019, 28(2): 171-182.

[7] GUI SAN A, THUILLER W, ZIMMERMANN, et al. Habitat suitability and distribution models: with applications in R[J]. Cambridge: Cambridge University Press; 2017, 93: 3.

[8] JOSÉ C. BRITO, ANDRÉ L. ACOSTA, FRANCISCO ÁLVARES, et al. Biogeography and conservation of taxa from remote regions: an application of ecological-niche based models and GIS to North-African Canid[J]. Biological Conservation, 2009, 142(12): 3020-3029.

[9] 帕尔曼·帕哈尔丁, 楚光明, 常亚玲, 等. 基于最大熵(MaxEnt)模型对西北地区 2 种红砂属植物潜在适宜区预测分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 18-25.

Perlman Pahardin, CHU G M, CHANG Y L, *et al.* Prediction and analysis of two potential suitable areas of reaumuria plants in Northwest China based on the maximum entropy (MaxEnt) model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35 (4): 18-25. (in Chinese)

[10] 廖颖, 王心源, 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 767-778.

LIAO Y, WANG X Y, ZHOU J M. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(6): 767-778. (in Chinese)

[11] 孙蓉. 基于 InVEST 模型与 MaxEnt 模型在自然保护区中保护效益的评价[D]. 南昌: 江西师范大学, 2020.

[12] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 许仲林, 等. 基于 MaxEnt 模型对新疆地区的蒙古沙拐枣潜在分布预测及适生性分析[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 71-77.

Sayit Hamit, Nurbay Abdushalih, XU Z L, *et al.* Analysis of potential distribution and suitable area of *Calligonum mongolicum* in Xinjiang based on MaxEnt model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 71-77. (in Chinese)

[13] 戎战磊, 周宏, 韦伟, 等. 基于 MAXENT 模型的唐家河自然保护区大熊猫生境适宜性评价[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(2): 269-273, 278.

RONG Z L, ZHOU H, WEI W, *et al.* Giant panda habitat suitability assessment in Tangjiahe Nature Reserve based on MAXENT model[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2017, 53(2): 269-273, 278. (in Chinese)

[14] 和梅香, 陈丽心, 罗概, 等. 凉山山系大熊猫和黑熊适宜生境预测及重叠分析[J]. 生物多样性, 2018, 26(11): 1180-1189.

HE M X, CHEN L X, LUO G, *et al.* Suitable habitat prediction and overlap analysis of two sympatric species, giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) and Asiatic black bear (*Ursus thibetanus*) in Liangshan Mountains[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(11): 1180-1189. (in Chinese)

[15] 王学志, 徐卫华, 欧阳志云, 等. 生态因子分析在大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 生境评价中的应用[J]. 生态学报, 2008 (2): 821-828.

WANG X Z, XU W H, OUYANG Z Y, *et al.* The application of Ecological-Niche factor analysis in giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) habitat assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008(2): 821-828. (in Chinese)

[16] 田联会, 樊金控, 王秋玲, 等. 秦岭大熊猫栖息地保护现状、问题与对策[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 114-117.

TIAN L H, FAN J S, WANG Q L, *et al.* Current situation of panda and their habitat conservation in Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(5): 114-117. (in Chinese)

[17] STEVEN J P, ROBERT P A, ROBERT E S. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190: 231-259.

[18] RUBTSOV G A. Geographical distribution of the genus pyrus and trends and factors in its evolution[J]. The American Naturalist, 1944, 78: 777.

[19] OZKAN E, OMER K, EMRE A. Habitat suitability model with maximum entropy approach for European roe deer (*Capreolus capreolus*) in the black sea region[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191: 11.

[20] ROBERT J H, SUSAN E C, JUAN L P, *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25: 15.

[21] JOHN R G, DZIANIS P, CHENG T, *et al.* Genomic inbreeding and relatedness in wild panda populations[J]. PLoS One, 2016, 11: 8.

[22] BERT B, STEF W, PETER M B, *et al.* Range shifts and global warming: ecological responses of *Empetrum nigrum* L. to experimental warming at its Northern (high arctic) and Southern (Atlantic) geographical range margin[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(2): 025501.

[23] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. in contri-bution of working group I to the fifth assessment report of the inter-governmental panel on climate change (1535 pp)[M]. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press, 2013.

[24] WANG F, McShea William J, WANG D J, *et al.* Evaluating landscape options for corridor restoration between giant panda reserves[J]. PloS One, 2014, 9: 8.

[25] CHENG L, Thomas Connor, BAI W K, *et al.* Dynamics of the giant panda habitat suitability in response to changing anthropogenic disturbance in the Liangshan Mountains[J]. Biological Conservation, 2019, 237.

[26] HULL V, ZHANG J D, ZHOU S Q, *et al.* Space use by endangered giant pandas[J]. Journal of Mammalogy, 2015, 96 (1): 230-236.

[27] CARSTEN F D, JANA M M, MIGUEL B A, *et al.* Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review[J]. Ecography, 2007, 30(5): 609-628.

[28] ANDRÉS V, MAO-NING T, XU W H, *et al.* Range-wide analysis of wildlife habitat: implications for conservation[J]. Biological Conservation, 2010, 143(9).

[29] KHANUM R, MUMTAZ A S, KUMAR S. Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of pakistan using Maxent modeling[J]. Acta Oecologica, 2013, 49: 23-31.

[30] COLWELL R K, BREHM G, CARDELÙS C L, *et al.* Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics[J]. Science, 2008, 322(5899): 258-261.

[31] FREEMAN B G, CLASS FREEMAN A M. Rapid upslope shifts in new guinean birds illustrate strong distributional responses of tropical montane species to global warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(12): 4490-4494.

[32] KENZA GARAH, ABDALLAH BENTOUATI. Using the Max-Ent model for assessing the impact of climate change on the Aurasian Aleppo pine distribution in Algeria[J]. African Journal of Ecology, 2019, 57(4).

[33] LUO X, LIANG L, LIU Z X, *et al.* Habitat suitability evaluation of the Chinese horseshoe bat (*R. sinicus*) in the Wuling Mountain area based on Maxent modelling[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29: 2.