

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2017.06.001

## 基于 MaxEnt 模型的卧龙国家级自然保护区 雪豹 (*Panthera uncia*) 适宜栖息地预测

乔麦菊<sup>1</sup>, 唐卓<sup>2</sup>, 施小刚<sup>2</sup>, 程跃红<sup>2</sup>, 胡强<sup>2</sup>, 李文静<sup>2</sup>, 张和民<sup>1\*</sup>

(1. 中国大熊猫保护研究中心, 都江堰 611830; <sup>2</sup>. 四川卧龙国家级自然保护区管理局, 汶川 623000)

**摘要:**2013年11月到2016年3月,在卧龙自然保护区27个位点布设了红外相机,其中10个位点成功拍摄到雪豹影像,基于MaxEnt模型预测雪豹在卧龙的适宜栖息地。结果显示:雪豹的适宜栖息地面积为345 km<sup>2</sup>,占总面积的12%。其中,279 km<sup>2</sup>(81%)位于核心区,49 km<sup>2</sup>位于缓冲区,17 km<sup>2</sup>位于实验区。植被类型、年均温度和坡向是影响雪豹栖息地选择的主要环境因子。雪豹主要选择年均温度为-8~0℃的阳坡,最偏好的植被类型为草甸。

**关键词:**雪豹;卧龙国家级自然保护区;适宜栖息地;MaxEnt模型

中图分类号:S862;Q959.838

文献标识码:A

文章编号:1003-5508(2017)06-0001-04

## Habitat Suitability Assessment of Snow Leopards in Wolong National Nature Reserve Based on MaxEnt Modeling

QIAO Mai-ju<sup>1\*</sup> TANG Zhuo<sup>2</sup> SHI Xiao-gang<sup>1</sup> CHENG Yue-hong<sup>2</sup> HU Qiang<sup>2</sup>  
LI Wen-jing<sup>2</sup> ZHANG He-ming<sup>1\*</sup>

(1. China Conservation and Research Center for the Giant Panda, Dujiangyan Sichuan 611830, China;

2. Wolong National Nature Reserve, Wenchuan Sichuan 623000, China)

**Abstract:** Between November 2013 and March 2016, infrared-triggered camera were installed in 27 different loci in Wolong National Nature Reserve, Sichuan, China. Among them, 10 cameras photographed snow leopards successfully. Based on these 10 loci and MaxEnt model, the snow leopard distribution map was developed in Wolong. The area of available habitat was 345 km<sup>2</sup>, covering 12% of the total area. 279 km<sup>2</sup> (81%) of the suitable habitat were located in the core area, 15% in the buffer area, and only 5% in the experimental area. The main factors influencing the habitat selection by snow leopards include the vegetation form, the average annual temperature and aspect of the habitat. Snow leopards in Wolong preferred the sunny slope at an annual temperature of -8 °C ~ 0 °C. The favorite landcover type is meadow. The studies provided the basic data for the protection of suitable habitats.

**Key words:** Snow leopards, Wolong National Nature Reserve, Suitable habitat, MaxEnt model

雪豹 (*Panthera uncia*) 是全球濒危的大型猫科动物,仅分布于中国、俄罗斯、尼泊尔、蒙古等12个国家地处中亚的高山地区<sup>[1]</sup>。雪豹占据食物链的

顶端,其生存状况是整个山地生态系统健康状况的良好反映<sup>[2]</sup>。

栖息地是物种生存栖息的空间,是可以提供食

收稿日期:2017-09-21

基金项目:香港援建卧龙灾后重建可持续发展项目 SC07、大熊猫国合资金科研专项 WL16、林业自然保护区补助资金资助。

作者简介:乔麦菊(1986-),女,博士研究生,工程师,主要研究方向为保护生物学方面的研究。E-mail:qiaomaiju@163.com。

\* 通讯作者:张和民(1961-),男,教授级高级工程师,博导,主要研究方向:保护生物学。

物、庇护所和繁殖机会的场所。保护物种的最好方法之一就是保护它们的栖息地<sup>[3]</sup>。中国是世界上雪豹分布面积最大的国家,全球约 60% 的雪豹栖息地位于中国,总面积约 44 万 km<sup>2</sup><sup>[4, 5]</sup>。但是,我国的雪豹研究起步较晚,此前的研究工作有一定的积累,包括其分类地位、食性、分布以及保护遗传学研究等方面,研究区域多选在青海、西藏、新疆等雪豹分布区面积较大的地区<sup>[5~10]</sup>。四川是中国雪豹分布的最南端,目前有关四川雪豹的研究很少,主要集中在活动节律分析、数量估算等方面<sup>[11, 12]</sup>,尚未进行适宜栖息地方面的研究。

预测物种适宜栖息地分布的模型有很多,数据比较少的时候,MaxEnt 模型准确性优势尤为突出<sup>[13~15]</sup>。MaxEnt 最大熵模型(Maximum Entropy Modeling),同时考虑最大熵(理想状况)和生态位(实际约束),通过已知的物种分布地和多种环境数据模拟预测物种的可能分布范围。是利用物种出现点和背景样点上的环境变量数据,来估计环境变量一定时物种的出现概率。由于卧龙自然保护区雪豹数量稀少,栖息地海拔高、气候恶劣,野外调查难度高,所得到的数据相对较少。因此选用 MaxEnt 模型来预测四川卧龙国家级自然保护区雪豹适宜栖息地分布,拟为进一步开展卧龙雪豹的保护研究工作提供基础资料。

## 1 研究区域

研究地位于四川省卧龙国家级自然保护区。保护区位于成都平原西缘,阿坝藏族羌族自治州汶川县境内,地处邛崃山系东南麓,东经 102°52′~103°24′,北纬 30°45′~31°25′,面积约 2 000 km<sup>2</sup><sup>[16]</sup>。卧龙属青藏高原气候区,年温差较小,干湿季节分明,年均温 8.4℃。年降雨量 1 800 mm,相对湿度达 80%。复杂的地形、气候、土壤和水文条件孕育了种类丰富的珍稀动植物,连续 40 a 没有发生火灾,森林资源得到了有效保护<sup>[17]</sup>。2009 年,利用红外触发相机,卧龙自然保护区首次拍摄到野生雪豹照片,证实了雪豹在卧龙保护区境内的分布<sup>[18]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 雪豹分布点

2013 年 11 月至 2016 年 3 月,在卧龙保护区内的银厂沟、梯子沟和魏家沟的雪豹痕迹点、山脊、兽

径等地共布设了 27 台 Ltl-6210MC 红外相机,其中 10 台成功拍摄到雪豹<sup>[12]</sup>。选取这 10 个确定有雪豹分布的红外相机位点,用于建立卧龙雪豹的适宜栖息地模型。

表 1 拍摄到雪豹的红外相机位点

Tab. 1 The location of infrared-triggered cameras photographing snow leopards

编号	纬度	经度	海拔(m)
1	31.06893°	103.0108°	3536
2	31.07847°	103.0171°	4102
3	31.08126°	103.0131°	4214
4	30.93716°	102.913°	4221
5	30.8421°	103.0369°	4310
6	30.93842°	102.9116°	4321
7	30.93928°	102.9103°	4418
8	30.8447°	103.0389°	4432
9	30.84752°	103.0406°	4437
10	30.84892°	103.0408°	4481

### 2.2 环境变量

如果变量过多、变量空间共线性过强,会增加模型的复杂性,增大随机误差。无意变量的存在会对模型的结果造成消极的影响,降低准确性。通过变量相关性分析,剔除了共线性高的变量(利用 ArcGis 多元分析进行波段集统计,将 Pearson 相关系数绝对值大于 0.7 的剔除一个),只考虑重要的环境变量。另外根据文献建议,用更直接的影响因素替代间接因素,如用温度替代海拔<sup>[19]</sup>。最终从 39 个环境变量中筛选得到 10 个重要变量进行模型构建(表 2)。在 ArcGis 中,以 EVI 图层为基准,将所有环境变量图层的栅格统一为 250 m × 250 m,将坐标统一为 WGS-1984-UTM-Zone-48N,并将图层边界统一,最后将环境变量图层格式转化为 Maxent 软件需要的 ACSII 格式。

表 2 环境变量的来源及处理方法

Tab. 2 Source and processing method of environmental data

类型	变量	数据来源
自然环境	坡度 slope	DEM
	坡向 aspect	
	到河流的距离 d_river	NGCC
	植被类型 landcover	Land Processes Distributed Active Archive Center 2013~2015 的 MOD13Q1 数据
	增强型植被指数标准差 evi_std	
增强型植被指数变异系数 evi_cv		
气候	年均温 bioclim 1	Worldclim
人类干扰	人类干扰指数 hii	last of the wild
	到居民点距离 d_resident	NGCC
	到公路的距离 d_road	NGCC

### 2.3 模型构建

将雪豹分布点和相应环境变量导入 MaxEnt 软件。随机选取 75% 的数据作为训练数据用于模型构建,其余 25% 的数据作为检验数据,通过响应曲线和 jackknife test 分析变量对模型的贡献。

为保证模型结果的稳定性,进行 10 次自举法 (bootstrap) 重复。以受试者工作特征曲线 (ROC) 下的面积 (AUC) 评价模型结果,值越大说明正确区分雪豹点和随机点的准确率越高,即模型有比较高的区分度。其标准为:AUC 在 0.5 ~ 0.6 为失败;0.6 ~ 0.7 为较差;0.7 ~ 0.8 为一般;0.8 ~ 0.9 为好;0.9 ~ 1 为非常好<sup>[20]</sup>。

MaxEnt 给出的结果为每个栅格单元上的栖息地适宜度,为 0 到 1 之间的值。选取最大约登指数

(Maximum training sensitivity plus specificity) 为阈值 (threshold)<sup>[21]</sup>,用 ArcGis 中的重分类功能将此阈值以上的划分为雪豹适宜栖息地。

## 3 结果

### 3.1 雪豹分布与环境变量的关系

经过 10 次重复得到的雪豹适宜栖息地模型中,训练数据和检验数据的 AUC 值分别为 0.940 和 0.849,大于 0.8,说明模型的区分度很高,预测结果较准确。Jackknife 的检验结果显示,对模型综合贡献率最大因素为植被类型、年均温、坡向,这 3 个环境变量对模型的累计贡献百分比达到 70% (图 1)。

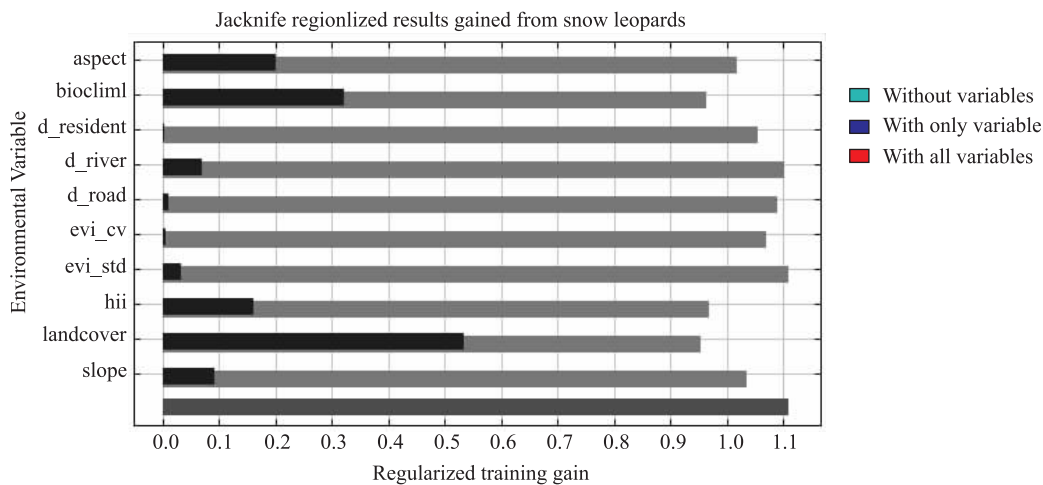


图 1 雪豹栖息地选择模型中环境因素的贡献

Fig. 1 Contribution of environmental variables in the snow leopard habitat selection model

各个环境因素的响应曲线显示,雪豹在卧龙最偏好的植被类型为草甸;偏好在年均温  $-8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的区域活动,温度升高,出现的概率显著下降;主要活动于靠阳坡的环境,越靠近阴坡,出现的概率越低。

### 3.2 雪豹的适宜栖息地

当训练数据的特异度和敏感度之和达到最大时,阈值为 0.497。以此为分界点对雪豹栖息地适宜度结果进行重分类,生成雪豹适宜栖息地图 (图 2)。通过 ArcGis 计算得出,雪豹在卧龙自然保护区的适宜栖息地面积约  $345\text{ km}^2$ , 占总面积的 17.25%。

卧龙保护区按照功能区划分为 3 部分:核心区、缓冲区和实验区。将适宜栖息地面积按照卧龙保护

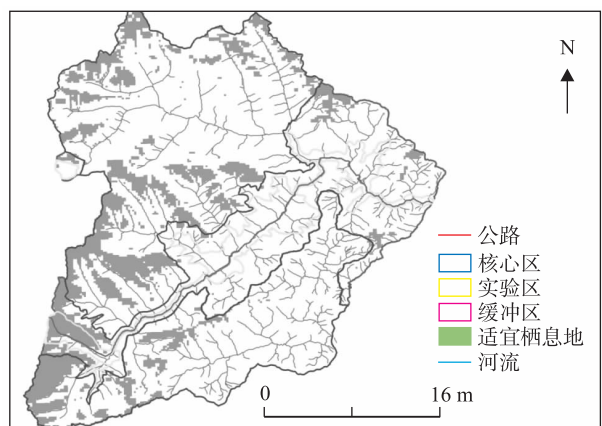


图 2 卧龙自然保护区雪豹适宜栖息地分布

Fig. 2 Suitable habitats of the snow leopard in Wolong Nature Reserve

区的功能分区进行划分,发现 279 km<sup>2</sup> 的雪豹适宜栖息地位于核心区中,占总面积的 81%;仅有 5% 的适宜栖息地落在实验区。

#### 4 讨论

环境因子中对雪豹栖息地适宜度贡献最大的为植被类型,雪豹最偏好选择的栖息地为高山草甸,其次为灌丛;偏好在年均温度 -8℃~0℃ 的区域活动,温度升高,出现的概率显著下降;主要活动于靠阳坡的环境,越靠近阴坡,出现的概率越低。这些特点都与雪豹的演化特征和取食行为相符。雪豹起源于青藏高原,已经演化出了适应低温环境的诸多特征:灰白的毛色在高山草甸流石滩区域是很高的保护色<sup>[4]</sup>;扩大的鼻腔可以温暖寒冷的空气<sup>[22]</sup>;而岩羊等草食动物作为雪豹的主要食物,春秋季节在高山草甸活动,交配季节平均利用草甸和灌丛生境<sup>[23, 24]</sup>;阳坡气温相对较高,食物相对丰富,推测是雪豹偏好阳坡的原因。

自然保护区核心区的建立是为了保护自然生态系统;实验区的建立是为了人类发展;而处于核心区与实验区中间地带的缓冲区的建立是为了减少人类活动对自然生态系统的影响<sup>[25]</sup>。卧龙 81% 雪豹适宜栖息地分布于核心区,主要是林线以上的草甸和流石滩地区,这里气候严酷,没有人类居住,这对于雪豹及其栖息地的保护是非常有利的。未来应限制旅游、挖药等人类活动向雪豹适宜栖息地延伸,进一步降低栖息地所承受的压力。

MaxEnt 模型预测避免了使用伪出现点带来的悖论,可同时使用多种类型的变量进行分析,且算法明确,结果直观,被广泛应用于适宜栖息地预测、物种濒危机制探讨、自然保护区设计、栖息地破碎化研究、外来物种入侵风险评估、气候变化对物种分布的影响等多个方面<sup>[26~30]</sup>。AUC 值是判断模型准确性的最重要参数,值越大说明模型的精确性越高<sup>[20]</sup>,本研究对卧龙雪豹适宜栖息地预测的模型训练数据和检验数据的 AUC 值均大于 0.8,说明模型的区分度很高,预测结果较准确。由于基于 MaxEnt 模型得到的卧龙雪豹的适宜栖息地为模拟栖息地,栖息地斑块中的环境是适宜雪豹分布的,但是否确实有雪豹真实分布,需要实地调查才能确定。本研究预测了卧龙自然保护区雪豹的适宜栖息地分布,为后期

雪豹栖息地专项调查和监测保护工作提供指导。

#### 参考文献:

- [1] Jackson M, Hunter O, Dawn D, et al. Surveying snow leopard populations with emphasis on camera trapping: [M]. A handbook Sonoma, California: The Snow Leopard Conservancy, 2005.
- [2] Fox J L. Snow leopard conservation in the wild - a comprehensive perspective on a low density and highly fragmented population [C]. In: Proceedings of the Seventh International Snow Leopard Symposium. Xining, Qinghai, China; International Snow Leopard Trust, 1994: 3~15.
- [3] 李俊清. 大熊猫栖息地研究 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [4] Mccarthy T M, Chapron G. Snow leopard survival strategy [M]. In. Seattle, USA: ISLT and SLN, 2003.
- [5] Li J, Lu Z. Snow leopard poaching and trade in China 2000 - 2013 [J]. Biological Conservation, 2014, 176(4): 207~211.
- [6] 于宁, 郑昌琳, 王行亮, 等. 雪豹线粒体 DNA (mtDNA) 研究及其分类地位的探讨 [J]. 兽类学报, 1996, 16(2): 105~108.
- [7] Schaller G B, Ren J, Qiu M. Status of the snow leopard *Panthera uncia* in Qinghai and Gansu provinces, China [J]. Biological Conservation, 1988, 45(3): 179~194.
- [8] Yang Q, Yanfa L, Prefecture Y. Further study on the geographical distribution and conservation of snow leopard in Qinghai, China [C]. In: Proceedings of the Seventh International Snow Leopard Symposium. Xining, Qinghai, China; International Snow Leopard Trust, 1994: 72~77.
- [9] 刘楚光, 郑生武, 任军让. 雪豹的食性与食源调查研究 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2003, (S2): 154~159.
- [10] 周芸芸, 冯金朝, 朵海瑞, 等. 基于粪便 DNA 的青藏高原雪豹种群调查和遗传多样性分析 [J]. 兽类学报, 2014, 34(2): 138~148.
- [11] 彭基泰. 青藏高原东南横断山脉甘孜地区雪豹资源调查研究 [J]. 四川林业科技, 2009, 30(1): 57~58.
- [12] 唐卓, 杨建, 刘雪华, 等. 基于红外相机技术对四川卧龙国家级自然保护区雪豹 (*Panthera uncia*) 的研究 [J]. 生物多样性, 2017, 25(1): 62~70.
- [13] Hernandez P A, Graham C H, Master L L, et al. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods [J]. Ecography (Cop.), 2006, 29(5): 773~785.
- [14] Pearson R G. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners [M]. Synthesis: American Museum for Natural History, 2008.
- [15] Vina A, Tuanmu M, Xu W, et al. Range - wide analysis of wildlife habitat: Implications for conservation [J]. Biological Conservation, 2010, 143(9): 1960~1969.

(下转第 16 页)

- [J]. 安徽农学通报, 2011, 17(12): 56~57.
- [6] 黄永芳, 陈锡沐, 庄雪影, 等. 油茶种质资源遗传多样性分析[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 38~43.
- [7] 李新. “中国油茶王”一大果红花油茶[J]. 农村新技术, 2005, (11): 29.
- [8] 李旦. 腾冲红花油茶的研究进展[J]. 西部林业科学, 2015, 44(3): 123~127.
- [8] 陈清风, 张应中, 丁晓纲, 等. 油茶无性繁殖技术研究进展[J]. 广西林业科技, 2011, 27(6): 74~78.
- [9] 黄佳聪, 郭军, 罕新艳, 等. 腾冲红花油茶芽苗砧嫁接技术及其成效分析[J]. 西部林业科学, 2011, 40(2): 84~87.
- [10] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] 江秀福. 红花油茶繁殖及栽培技术[J]. 花卉, 2016(3): 75
- [12] 杨培华. 红花油茶嫁接育苗试验研究[J]. 绿色科技, 2013(10): 125~127.
- [13] 万晓军, 杨开保. 腾冲红花油茶扦插繁殖技术研究及扦插苗栽培试验初报[J]. 林业调查规划, 2011, 36(5): 131~134.
- [14] 何宇凡. 山茶花扦插生根剂及营养液的筛选[J]. 环境科学导刊, 2009(1): 5~7.
- [15] 吴窈窈, 谢云, 金锡勤, 等. 生长激素对浙江红山茶扦插生根的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(10): 123~127.
- [16] 陈清风, 张应中, 刘喻娟, 等. 广宁红花油茶扦插育苗技术研究[J]. 广东林业科技, 2012, 28(6): 39~45.
- [17] 林盛松. 浙江红花油茶嫩枝扦插育苗技术初步研究[J]. 亚热带植物科学, 2013, 42(1): 31~34.
- [18] 龚作华. 不同扦插时间对浙江红花油茶扦插育苗的影响[J]. 绿色科技, 2015(8): 62~64.
- [19] 俞秀兰. 红花油茶在福建浦城的扦插育苗试验[J]. 花卉, 2016(1): 3~4.
- [20] 周文才, 幸伟年, 黄文印, 等. 红花油茶嫁接苗木质量评价[J]. 经济林研究, 2012, 30(3): 96~99.
- [21] 周志美. 腾冲红花油茶芽砧嫁接苗培育技术[J]. 林业实用技术. 2011, (10): 27~28.
- [22] 万晓军, 董诗凡, 辛成莲, 等. 腾冲红花油茶高接改造试验[J]. 林业调查规划, 2012, 37(2): 100~102.
- [23] 潘新建, 张运斌, 李静, 等. 浙江红花油茶高接换种试验初报[J]. 全国油茶技术协作组第一届油茶学术交流会: 237~239.
- [24] 王清连. 植物组织培养[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 王瑞, 陈永忠. 油茶组织培养与植株再生研究进展[J]. 湖南林业科技, 2006, 33(5): 63~66.
- [26] 李建安, 张日清, 石明旺, 等. 油茶两物种花药培养愈伤组织诱导试验[J]. 经济林研究, 2003, 21(3): 36~38.
- [27] 杨育红. 明月山红花油茶嫩枝组织培养研究[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(24): 98~99.
- [28] 龚峥, 王洪峰, 张弘. 广宁红花油茶组织培养育苗技术研究[J]. 广东林业科技, 2015, 31(2): 7~14.
- [29] 李冬林, 张良富, 李良松. 关于发展我国油茶生产的战略思考(下)[J]. 安徽科技, 2000(3): 34~35.
- [30] 陈宜木, 陈辉, 刘玉宝, 等. 油茶无性繁殖技术研究进展[J]. 林业勘察设计, 2012(1): 93~96.

(上接第4页)

- [16] 胡锦涛, 夏勒. 卧龙的大熊猫[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1985.
- [17] 卧龙自然保护区管理局. 卧龙植被及资源植物[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998.
- [18] Li S, Wang D, Lu Z, et al. Cats living with pandas[J]. CAT-news, 2010, 52: 20~23.
- [19] Pearson R G. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners[M]. Synthesis: American Museum for Natural History, 2008.
- [20] 刘振生, 高惠, 滕丽微, 等. 基于MAXENT模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7243~7249.
- [21] Stéphanie M, Ceri W H, Ormerod S J. Evaluating presence - absence models in ecology: the need to account for prevalence[J]. Journal of Applied Ecology, 2001, 38(5): 921~931.
- [22] 李娟. 青藏高原三江源地区雪豹(Panthera uncia)的生态学研究及保护[D]; 北京大学, 2012.
- [23] Oli M K, Rogers M E. Seasonal pattern in group size and population composition of blue sheep in Manang, Nepal[J]. Journal of Wildlife Management, 1996, 60(4): 797~801.
- [24] 张明春. 贺兰山岩羊的种群动态及警戒行为研究[D]; 上海: 华东师范大学, 2012.
- [25] 于广志, 蒋志刚. 自然保护区的缓冲区: 模式、功能及规划原则[J]. 生物多样性, 2003, 11(3): 256~261.
- [26] Phillips S J, Miroslav K, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling[C]. In: Proceedings of the International Conference on Machine Learning, 2004: 83.
- [27] Ouyang Z Y, Wei-Hua X U, Wang X Z, et al. Impact assessment of Wenchuan Earthquake on ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5801~5809.
- [28] Li H L, Li D H, Li T, et al. Application of least - cost path model to identify a giant panda dispersal corridor network after the Wenchuan earthquake - case study of Wolong Nature Reserve in China[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(6): 944~952.
- [29] Guan T P, Owens J R, Gong M H, et al. Role of new nature reserve in assisting endangered species conservation-case study of giant pandas in the northern Qionglai mountains, China[J]. PLoS One, 2016, 11(8): e0159738.
- [30] Wang B, Xu Y, Ran J. Predicting suitable habitat of the Chinese monal (Lophophorus lhuysii) using ecological niche modeling in the Qionglai Mountains, China[J]. PeerJ, 2017, 5(7): e3477.