



•研究报告•

凉山山系大熊猫和黑熊适宜生境预测及重叠分析

和梅香¹ 陈俪心¹ 罗 概¹ 古晓东² 王 戈³ 冉江洪^{1*}

1 (四川大学生命科学学院生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610065)

2 (四川省野生动物资源调查保护管理站, 成都 610081)

3 (四川九顶山省级自然保护区什邡管理站, 什邡 618400)

摘要: 研究同域物种的分布格局及重叠状况对物种的区域整合保护管理及区域生物多样性保护具有重要实践价值。本研究基于全国第四次大熊猫调查及长期野外调查数据, 利用MaxEnt模型预测了凉山山系两种同域分布的熊科动物——大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)和黑熊(*Ursus thibetanus*)的适宜生境, 基于适宜生境预测结果, 分析了两个物种的生境需求因子、生境破碎化现状及重叠状况。结果显示: (1)大熊猫和黑熊的适宜生境分布格局相似, 主要分布在凉山山系的山脊地带, 适宜生境面积分别为1,383.84 km²和2,411.49 km²; (2)两个物种的适宜生境都较为破碎, 且存在一些隔离分布区, 相较而言, 黑熊适宜生境的连通性要优于大熊猫; (3)两个物种生态位重叠度较高($D = 0.654$, $I = 0.901$), 适宜生境重叠面积为958.29 km², 分别占大熊猫和黑熊适宜生境总面积的69.25%和39.74%; (4)两个物种对环境因子的选择和响应表现出了相似性和差异性。相似性在于对两个物种生境分布影响最大的两个因子均为距居民点距离和海拔; 差异性在于对大熊猫生境分布影响次之的因子是植被类型和最冷季均温, 而黑熊的是年最大EVI指数和距道路距离。为了更有效地保护两个物种, 应加强对人类干扰的控制和植被的恢复, 对栖息地实行连通管理, 并建立多物种保护规划。

关键词: 大熊猫; 黑熊; MaxEnt; 保护; 同域分布; 凉山山系

Suitable habitat prediction and overlap analysis of two sympatric species, giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) and Asiatic black bear (*Ursus thibetanus*) in Liangshan Mountains

Meixiang He¹, Lixin Chen¹, Gai Luo¹, Xiaodong Gu², Ge Wang³, Jianghong Ran^{1*}

1 Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-Environment of Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065

2 Sichuan Station of Wild Life Survey and Management, Chengdu 610081

3 Shifang Monitoring Station of Jiuding Mountain Provincial Nature Reserve of Sichuan, Shifang, Sichuan 618400

Abstract: Understanding spatial distribution and habitat overlap of sympatric species is essential to developing integrated policies for conserving species and regional biodiversity. This study combined data from the 4th National Survey of giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) and long-term field survey. We used the Maximum entropy model (MaxEnt) to predict the distributions of two sympatric bears, the giant panda and Asiatic black bear (*Ursus thibetanus*) in Liangshan Mountains. Based on spatial distribution of two species, we measured habitat fragmentation and spatial overlap of habitat use, and assessed environmental requirements of both species. Our results indicated that: (1) both species had similar distributions of suitable habitats, both were mainly distributed on the ridges of Liangshan Mountains. The suitable habitat area of giant panda and black bear were 1,383.84 km² and 2,411.49 km², respectively. (2) The habitats of both species were fragmented and separated into many patches. However, habitat connectivity for the black bear was better than for giant panda. (3) Niche overlap indices, calculated by ENMTools, showed that two species have high overlap in their ecological niche ($D = 0.654$ and $I = 0.901$). The overlapping habitat comprised 958.29 km² of the study area, which contained 69.25% of giant panda habitat and 39.74% of black bear habitat. (4) We used permutation

收稿日期: 2018-06-13; 接受日期: 2018-09-03

基金项目: 国家林业局国际合作资金([2017]115)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: rjhong-01@163.com

techniques to estimate the importance of environmental variables in the MaxEnt model. Distance to residents and altitude were the most influential predictors for both species. Vegetation types and mean temperature of coldest quarter were the third and fourth important predictor for giant panda, while annual maximum enhanced vegetation index (EVI) and distance to roads was important for the black bear. To protect these two species more effectively, a series of measures have to be adopted, such as strengthening vegetation restoration, controlling disturbance, and enhancing connectivity between habitat patches. We recommend that a systematic, multi-species conservation plan should be developed.

Key words: giant panda; Asiatic black bear; MaxEnt; conservation; sympatry; Liangshan Mountains

大型哺乳动物是全世界受威胁最严重的类群, 多数物种都处于濒危状态, 也是野生动物保护关注度最高的类群(Fritz et al, 2009; Ripple et al, 2014; Di Minin et al, 2016)。研究表明, 栖息地丧失和破碎化是导致大型哺乳动物濒危的主要因素(Fahrig, 1997; 武正军和李义明, 2003), 因此了解物种的适宜生境分布格局及质量对于目标物种的保护十分重要(曹铭昌等, 2010)。现有保护战略要求同时考虑同一景观中多个物种的保护工作, 而这离不开物种间的栖息地重叠分析, 栖息地重叠分析可以揭示多个物种的分布格局, 促进区域生物多样性保护(Wu et al, 2016)。近年来, 随着GIS空间分析、遥感数据和数据处理技术以及数理统计模型的发展, 应用栖息地评价模型进行栖息地质量评价与分布预测成了濒危动物保护研究的一个热点方向(魏辅文等, 2016)。

大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)和黑熊(*Ursus thibetanus*)是我国重点保护野生动物, 均被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES)附录I, 其生存与保护状况广受世人关注。二者在秦岭山系和川西横断山地是同域分布的(Schaller et al, 1989; Wang et al, 2015), 同域物种的生境研究, 不仅对于认识物种共存、竞争及生态位分化具有重要理论意义, 在实践中也有助于物种的区域整合管理(徐雨等, 2017)。然而, 有关大熊猫和同域物种的生境研究多集中在大熊猫和小熊猫(*Ailurus fulgens*)之间(魏辅文等, 1999; 杨春花等, 2006; Zhang et al, 2006; Qi et al, 2009), 尽管有一些学者从大熊猫对黑熊的伞护效应、微生境选择等方面对大熊猫和黑熊的生境关系展开了简单讨论(胡锦矗, 1990; Liu et al, 2009; 黄尤优等, 2014; Wang et al, 2015), 但关于两种熊科动物的宏生境比较研究仍然缺乏, 对它们的同域分布范围和栖息地利用格局还不甚了解。而对它们的生境分布及宏生境需求的了解, 对于均存在季节性迁移及长距离迁移现象(Reid et al, 1991;

Hwang et al, 2010; Zhang et al, 2014; Wei et al, 2015)的两个大型物种的有效保护是必需的。

凉山山系位于中国大熊猫分布区的最南端, 同时也是黑熊的分布区之一, 由于垦荒、砍伐、放牧等人为干扰严重, 凉山山系大熊猫和黑熊栖息地质量退化且破碎化严重(胡锦矗和王昌琼, 1993; 侯万儒和胡锦矗, 1997; 四川省林业厅, 2015)。在栖息地退化的背景下, 预测大熊猫和黑熊的潜在地理分布, 不仅可以揭示两个物种在凉山山系的适宜生境分布格局及破碎化程度, 还有助于了解物种与环境之间的关系, 同时也可以为熊科物种的保护管理提供科学依据。本研究的目的是: (1)了解两个物种的适宜栖息地范围与重叠状况; (2)评估两个物种的栖息地破碎化状况; (3)两个物种在食性上产生了分化, 是否存在生境分离; (4)基于本研究结果, 提出保护管理建议。

1 研究区域

凉山山系地处四川盆地西南缘向青藏高原的过渡地带(102°29'–104°23' E, 27°48'–29°18' N), 是我国生物多样性优先保护和全球生物多样性热点地区之一(范隆庆等, 2010)。全国第四次大熊猫调查结果表明, 凉山山系的野生大熊猫数量为124只, 占全国野生大熊猫种群数量的6.65%。本文研究区域包括大熊猫在凉山山系的9个分布区县——峨边县、美姑县、雷波县、马边县、甘洛县、越西县、金口河区、屏山县和沐川县, 总面积15,721.74 km², 海拔范围为251–4,235 m。该区域气候温和, 干湿季节、立体气候分明, 植被垂直分布明显, 竹类资源丰富。植被垂直带谱结构的基带植被为常绿阔叶林, 海拔2,600 m以下为阔叶林带; 海拔2,600–3,800 m为寒温性针叶林带; 海拔3,800 m以上为高山灌丛和草甸带(张顺林等, 2008)。

2 研究方法

2.1 方法与原理

本研究使用最大熵模型(maximum entropy modelling, MaxEnt模型; Phillips et al, 2006)分别预测大熊猫及黑熊在凉山山系的适宜生境。MaxEnt模型只需要目标物种在研究区域内的活动痕迹出现位置数据和相关的环境因子数据便可以对物种生境进行预测与评价,分析物种在生态位空间或环境空间中的特征,进而研究物种的环境耐受能力,是目前物种分布预测中使用最广泛的生态位模型(Phillips et al, 2006)。基于适宜生境预测结果,采用Fragstats软件(Mcgarigal & Marks, 1995)分别计算两个物种适宜生境景观格局指数,用ENMTools软件(Warren et al, 2010)计算两个物种间的生态位重叠度,ArcGIS 10.1确定两个物种的适宜生境重叠区域。

2.2 数据来源

2.2.1 物种分布点数据

大熊猫分布点数据来源于四川省第四次大熊猫调查(2012–2013年),共389个。黑熊分布点数据来

源于四川省第四次大熊猫伴生动物调查,以及本研究团队在研究区域的野外调查和部分保护区近年的红外相机监测数据(时间跨度为2010–2017年),共117个。为避免空间自相关影响模型预测,根据大熊猫和黑熊最小家域面积,分别为3.9 km²和5.1 km²(胡锦涛和夏勒, 1985; 马逸清等, 1994),剔除距离小于1,125 m的大熊猫冗余点和距离小于1,260 m的黑熊冗余点,最终保留115个大熊猫分布点、63个黑熊分布点进入分析运算(图1)。

2.2.2 环境数据

已有研究表明,大熊猫、黑熊对栖息地的坡形、坡向等地形因素以及植被因素等生态环境因子具有选择性,水源以及人类干扰状况也会影响其分布(齐增湘等, 2011; 青菁等, 2016),故选取以下环境因子评估其栖息地适宜性:(1)地形数据:包括海拔、坡度、坡向和坡位,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为30 m × 30 m;(2)植被类型数据:采用LANDSAT 8遥感影像,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台

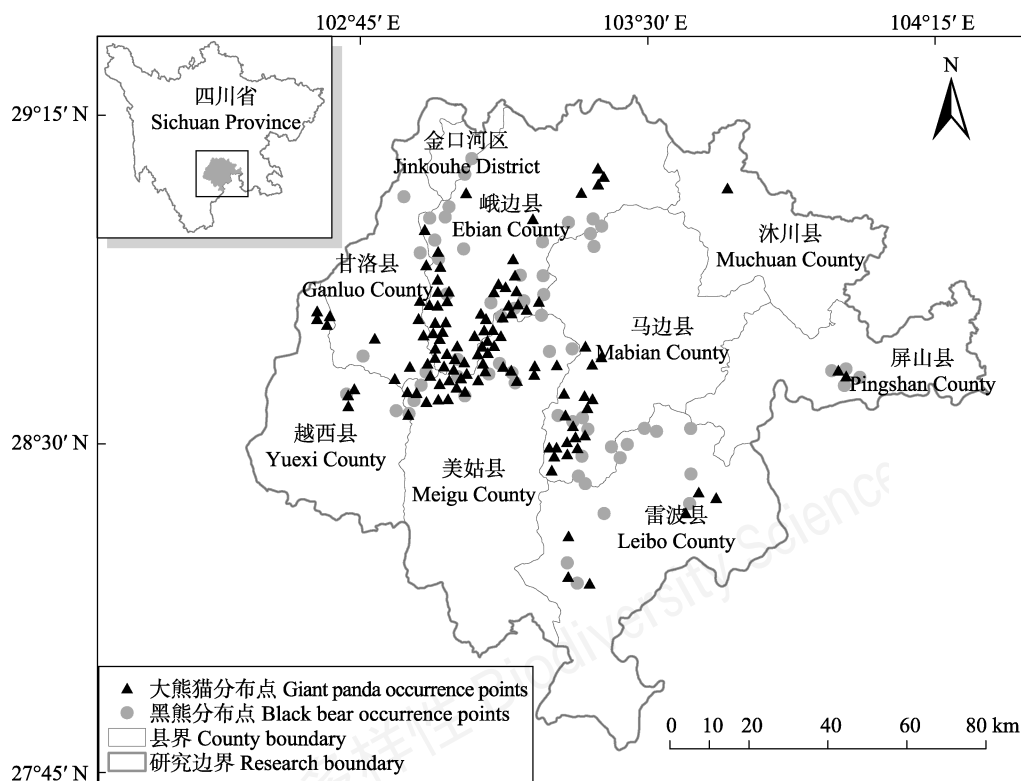


图1 大熊猫和黑熊分布点示意图

Fig. 1 The occurrence points of *Ailuropoda melanoleuca* and *Ursus thibetanus*

(<http://www.gscloud.cn>), 在 ERDAS 9.2 中借助全国第四次大熊猫调查植被样方数据和 Google Maps 对其进行监督分类, 分为阔叶林、针叶林、灌丛、草地、农耕地、水体和居民用地 7 类。分类后, 每一种类型选取 50 个参考点, 用于精度评价。结果显示, 我们的分类达到了 90% 以上的总体精度, 证明解译结果和真实情况有很强的一致性(Manandhar et al, 2009)。(3)水源数据: 包括到大小河流的距离, 抽提自 1:250,000 四川省地形图; (4)人类干扰数据: 选取距居民点距离和距道路距离指标, 居民点和道路数据的来源同水源数据。为了真实反映居民点和道路对两个物种生境的影响, 本研究还通过 Google Maps 和野外调查资料对居民点和道路数据进行了校正和补充。居民点定义标准为五户以上则记为一居民点, 道路包括高速、国道、省道、县道及乡道等主要道路; (5)增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI 指数)数据: 包括年平均 EVI 指数和年最大 EVI 指数, 由 Land Processes Distributed Active Archive Center 的 MOD13Q1 数据产品处理得到; (6)气候数据: 当前气候数据来源于 WorldClim 网站(<http://www.worldclim.org/>)。为避免模型的过度拟合, 参考王茹琳等(2017)的方法, 筛选出对模型模拟贡献率较大且相关性小于 0.80 的气候因子最冷季均温(Bio11)和最干季降水量(Bio17)代入运算。将上述 12 个环境变量转化为 30 m × 30 m 的栅格数据, 并统一坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

2.3 数据分析

2.3.1 适宜生境预测

将物种分布点数据和环境因子数据分别导入到 MaxEnt 3.3 中, 随机选择 75% 的分布点数据用于模型的建立, 剩余 25% 的数据用于模型验证, Bootstrap 重复运行 20 次, 并开启 Random seed, 勾选绘制响应曲线(response curves)和刀切法(Jackknife)功能来综合评价环境因子对物种分布的影响, 其他参数默认设置。输出结果为值在 0–1 之间的连续栅格数据, 空间分辨率为 30 m × 30 m。采用 ROC 曲线(receiver operating characteristic curve, 受试者工作特征曲线)下面积值, 即 AUC 值(area under curve)来评价模型模拟结果, AUC 值的范围为 0–1, 该值越大表示模型预测效果越好(齐增湘等, 2011)。以 20 次计算结果的均值作为最终栖息地图层, 得到栖息地适宜指数(habitat suitability index, HSI), 利用敏感性

和特异性总和最大化法(maximize the sum of sensitivity specificity, MaxSSS)确定阈值将栖息地分为适宜和不适宜两类(Liu et al, 2013), HSI 值大于该阈值的为物种适宜生境。

2.3.2 景观指数计算

通过景观格局分析软件 Fragstats 4.2 计算大熊猫及黑熊适宜生境的景观格局指数, 包括斑块数目(number of patches, NP)、斑块密度(patch density, PD)、平均斑块面积(mean patch size, MPS)、最大斑块面积(largest patch size, LPS)、最大斑块指数(largest patch index, LPI), 还计算了适宜生境聚散性指标: 斑块结合度指数(patch cohesion index, COHESION)、分割指数(segmentation index, DIVISION)、分离度指数(separation index, SPLIT)。景观指数的公式及计算方法详见 McGarigal (2015)。

2.3.3 两个物种适宜生境重叠分析

采用 ENMTools 1.4.4 计算大熊猫和黑熊的生态位重叠度。该软件能够依据 MaxEnt 的输出结果, 直接测算物种间的生态位重叠度等参数。Schoener's D (D) 和 Hellinger's-based I (I) 值用来表示生态位重叠度, D 值和 I 值介于 0–1 之间, 值越大, 生态位重叠度越高(Warren et al, 2010)。

通过 ArcGIS 10.1 确定两个物种的同域分布区。首先通过栅格重分类工具确定两个物种的适宜生境及不适宜生境, 并赋予新的像元值, 大熊猫栖息地栅格图层中不适宜生境的像元值为“1”, 适宜生境的像元值为“2”, 黑熊栖息地栅格图层中不适宜生境的像元值为“3”, 适宜生境的像元值为“4”。然后通过 ArcGIS 10.1 栅格计算功能对两个栅格数据进行“乘”运算, 这样每个栅格值都将代表新含义, 栅格像元值为“3”的表示都不适宜两个物种, 像元值为“4”表示仅是黑熊的适宜生境, 像元值为“6”表示仅是大熊猫的适宜生境, 像元值为“8”表示两个物种共同适宜生境(York et al, 2011)。

3 研究结果

3.1 适宜生境分布面积

ROC 曲线表明, 大熊猫栖息地预测模型的训练集和测试集的 AUC 值分别为 0.968 和 0.925, 黑熊栖息地预测模型的训练集和测试集的 AUC 值分别为 0.938 和 0.878, 表明模型预测结果可靠。

依据栖息地适宜性划分原则, 确定大熊猫栖息

地图层中 $HSI > 0.300$ 的区域为大熊猫适宜生境, 面积为 $1,383.84 \text{ km}^2$, 占研究区域总面积的8.80%; 黑熊栖息地图层中, $HSI > 0.320$ 的为黑熊适宜生境, 面积为 $2,411.49 \text{ km}^2$, 占研究区域总面积的15.34%。两个物种在凉山山系的适宜生境分布格局如图2所示。

3.2 适宜生境景观格局指数

景观格局分析结果表明, 大熊猫适宜生境的斑块数目、斑块密度、平均斑块面积、最大斑块面积、最大斑块指数和斑块结合度指数均小于黑熊, 而适宜生境的景观分割指数和分离度指数均高于黑熊, 说明了大熊猫适宜生境之间的分离程度比黑熊高,

即大熊猫的适宜生境连通性比黑熊的差(表1)。

3.3 两个物种适宜生境重叠情况

大熊猫与黑熊的生态位重叠度 D 和 I 值分别为0.654和0.901, 生态位重叠度较高。两个物种的适宜生境重叠面积达 958.29 km^2 , 分别占大熊猫和黑熊适宜生境总面积的69.25%和39.74%。其中峨边县的两者共同适宜生境面积最大, 为 369.38 km^2 , 接下来依次是美姑县(175.86 km^2)、雷波县(148.41 km^2)、马边县(129.16 km^2)、甘洛县(105.10 km^2)、越西县(19.20 km^2)和金口河区(11.18 km^2), 屏山县和沐川县没有两者的共同适宜生境(表2)。

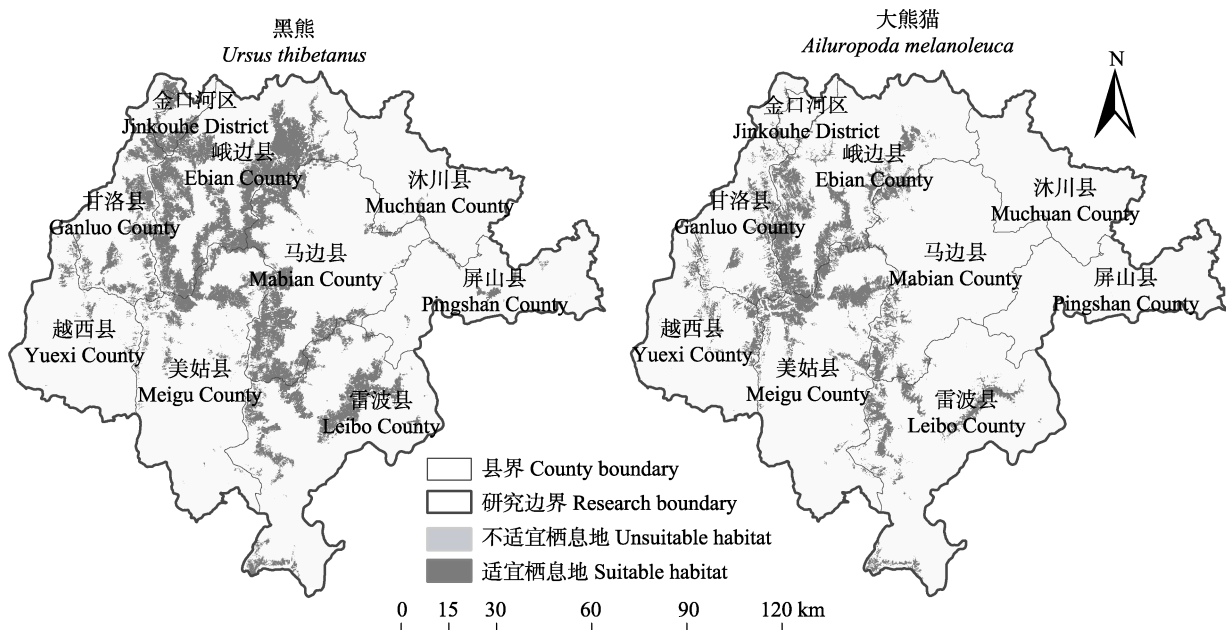


图2 凉山山系大熊猫和黑熊的适宜生境分布情况

Fig. 2 Suitable habitat distribution of *Ailuropoda melanoleuca* and *Ursus thibetanus* in Liangshan Mountains

表1 大熊猫和黑熊的适宜生境景观指数

Table 1 Landscape pattern indices of suitable habitat for *Ailuropoda melanoleuca* and *Ursus thibetanus*

景观指数 Landscape pattern index	大熊猫 <i>Ailuropoda melanoleuca</i>	黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>
斑块数目 Number of patches (NP)	5,340	5,983
斑块密度 Patch density (PD, ind./km ²)	0.340	0.381
平均斑块面积 Mean patch size (MPS, km ²)	0.26	0.40
最大斑块面积 Largest patch size (LPS, km ²)	339.535	1,115.759
最大斑块指数 Largest patch index (LPI, %)	2.160	7.097
斑块结合度指数 Patch cohesion index (COHESION)	99.506	99.822
分割指数 Segmentation index (DIVISION)	0.999	0.994
分离度指数 Separation index (SPLIT)	1,552.672	166.004

两个物种在凉山山系的适宜生境分布格局相似, 但黑熊的适宜生境范围明显广于大熊猫, 例如在雷波县、马边县、峨边县和金口河区存在大面积仅适宜黑熊的栖息地, 这些区域大部分都位于大熊猫保护区边缘或保护区以外(图3)。在保护区内的大熊猫和黑熊适宜栖息地面积分别为 763.00 km^2 和 944.68 km^2 , 分别占凉山山系适宜栖息地总面积的55.14%和39.17%。

3.4 大熊猫和黑熊生境与环境因子的关系

环境因子置换重要性分析显示, 影响大熊猫与黑熊生境分布的环境因子显示出了相似性和差异性: 对两个物种生境分布影响最大的环境因子都是

表2 凉山山系大熊猫和黑熊适宜生境重叠区域面积统计
Table 2 The overlap habitat area of *Ailuropoda melanoleuca* and *Ursus thibetanus* in Liangshan Mountains

区县 County	大熊猫适宜生境面积 Suitable habitat area of giant panda (km ²)	黑熊适宜生境面积 Suitable habitat area of black bear (km ²)	重叠的栖息地 Overlap habitat		
			面积 Area (km ²)	占大熊猫适宜生境比例 Percent of giant panda suitable habitat area (%)	占黑熊适宜生境比例 Percent of black bear suitable habitat area (%)
峨边县 Ebian County	459.81	846.91	369.38	80.33	43.62
金口河区 Jinkouhe District	12.73	66.68	11.18	87.83	16.77
甘洛县 Ganluo County	159.94	254.95	105.10	65.71	41.22
马边县 Mabian County	155.45	492.47	129.16	83.09	26.23
沐川县 Muchuan County	0	15.64	0	—	0
屏山县 Pingshan County	0	32.50	0	—	0
美姑县 Meigu County	290.02	239.89	175.86	60.64	73.31
雷波县 Leibo County	214.56	427.38	148.41	69.17	34.73
越西县 Yuexi County	91.33	35.07	19.20	21.02	54.74
总计 Total	1,383.84	2,411.49	958.29	69.25	39.74

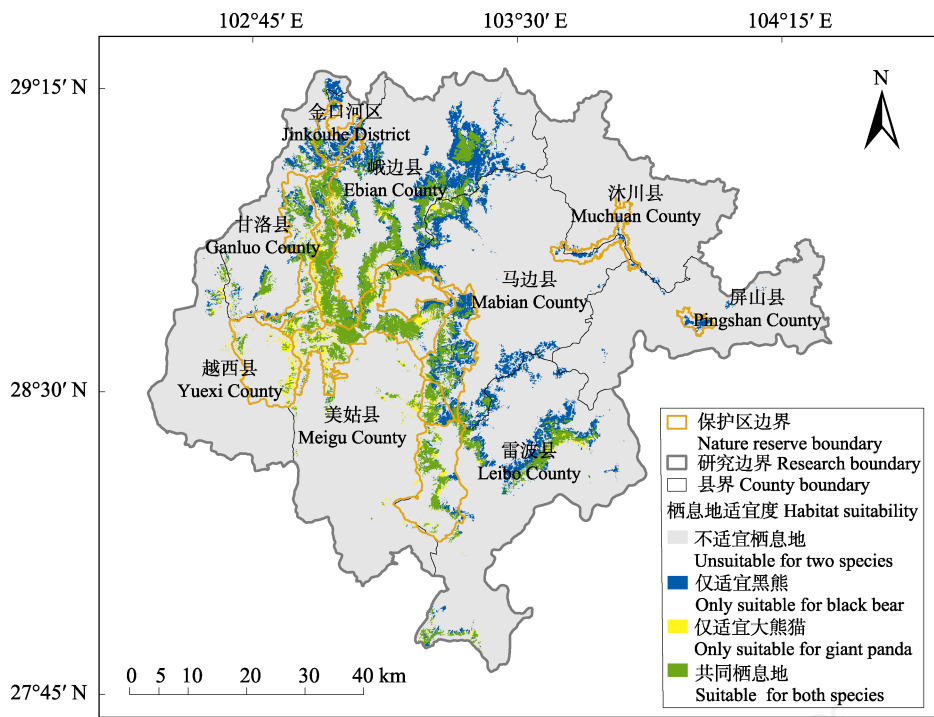


图3 凉山山系大熊猫和黑熊适宜生境的重叠情况
Fig. 3 Suitable habitat overlap of *Ailuropoda melanoleuca* and *Ursus thibetanus* in Liangshan Mountains

距居民点距离和海拔(特别是距居民点距离, 其对黑熊分布预测的重要值达到了59.7), 即人居和海拔因子对两个物种的生境分布影响最大; 其次影响大熊猫生境分布的因子是植被类型(10.9)和最冷季均温(8), 而黑熊是年最大EVI指数(6.9)和距道路距离(6.4), 反映出了两个物种的差异性(表3)。

从两个物种对主导环境因子的适宜范围看, 两个物种仍然表现出一定程度的差异性: 距居民点距离、距道路距离和海拔这三个因子大熊猫的适宜分布范围值高于黑熊, 即大熊猫对人类活动比黑熊更敏感; 黑熊对生境中的年最大EVI指数值需求比大熊猫更高, 表明其对植被的年最大生产力需求更高(表4)。

表3 环境因子对物种分布模型的置换重要性(%)

Table 3 The permutation importance of environmental variables for species distribution models (%)

环境因子 Variables	大熊猫 <i>Ailuropoda melanoleuca</i>	黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>	环境因子 Variables	大熊猫 <i>Ailuropoda melanoleuca</i>	黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>
距居民点距离 Distance to residents	31.8	59.7	坡度 Slope	4.2	1.7
距道路距离 Distance to roads	4.9	6.4	坡向 Aspect	1.5	2.3
植被类型 Vegetation types	10.9	2.5	坡位 Position on slope	1.1	2.8
年最大EVI指数 Annual maximum EVI	1.9	6.9	距河流距离 Distance to rivers	2.8	1.6
年平均EVI指数 Annual average EVI	1.7	1.4	最干季降水量 Precipitation of driest quarter (Bio17)	4.8	3.7
海拔 Altitude	26.4	9.6	最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter (Bio11)	8	1.5

环境因子置换重要性由MaxEnt模型给出, 对每个物种分布预测模型的重要值排名前4位的环境因子进行加粗表示。

The permutation importance of environmental variables derived from MaxEnt. The four variables with the highest contributions are presented in bold.

表4 物种潜在分布对应的主导环境因子适宜范围

Table 4 The suitable ranges of dominant environmental variables affecting the potential distribution of species

环境因子 Environmental variables	适宜范围 Suitable ranges	
	大熊猫 <i>Ailuropoda melanoleuca</i>	黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>
距居民点距离 Distance to residents (km)	4–8	> 3
距道路距离 Distance to roads (km)	4–9	> 3
海拔 Altitude (m)	2,500–3,600	2,000–3,250
最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter (°C, Bio11)	–4至1	–3至3
年最大EVI Annual maximum EVI	0.46–0.55	0.56–0.65
植被类型 Vegetation types	物种在针叶林中分布概率最大, 其次是阔叶林, 在其他植被类型中的分布概率较小 The most important vegetation types for this species is coniferous forest, followed by broad-leaf forest. The distribution probability in other vegetation types is low.	物种在针叶林中分布概率最大, 其次是阔叶林, 在其他植被类型中的分布概率较小 The most important vegetation types for this species is coniferous forest, followed by broad-leaf forest. The distribution probability in other vegetation types is low.

环境因子适宜分布范围由MaxEnt模型绘制的物种分布概率与环境变量的响应曲线得到, 仅列出对物种分布模型重要值排名前4位的主导环境变量的适宜分布范围。

The suitable ranges of dominant environmental variables are derived from the response curves based on MaxEnt. Response curves showed the ranges in environmental conditions that are more favourable for the distribution of species. We only showed the top four relevant variables for each species.

4 讨论

本研究预测的大熊猫适宜生境主要分布在凉山山系中部, 即峨边、甘洛、美姑三县交界区域, 适宜生境分布格局与范隆庆等(2010)、Qi等(2009, 2011, 2012)、四川省林业厅(2015)的研究结果一致。不同的是, 本研究得出的大熊猫适宜生境分布面积仅为1,383.84 km², 少于范隆庆等(2010)、四川省林业厅(2015)、Qing等(2016)的研究结果(分别为1,771.57 km²、1,498.88 km²、1,895.6 km²), 这有可能是采用的物种出现点数据、环境因子、模型及模型参数设置、栖息地适宜性划分方法及阈值等存在的差异所导致的。本研究生成的黑熊适宜生境分布

图与Liu等(2009)对四川省黑熊的分布预测结果基本一致, 一定程度上印证了本研究构建的栖息地预测模型的准确性。两个物种的适宜生境分布格局相似, 生态位重叠度较高, 但黑熊的适宜生境分布范围更广, 尤其在海拔2,000 m以下的区域, 这些区域往往分布在保护区边缘或保护区以外(Liu et al, 2009; Hwang et al, 2010; Malcolm et al, 2014)。

凉山山系由于20世纪高强度、大规模的森林采伐和当今农牧业的发展、道路的修建及居民点的扩张, 造成了大熊猫栖息地的丧失和退化, 使现有大熊猫群体间难以恢复联系, 种群隔离和栖息地破碎化问题严重(胡锦矗和王昌琼, 1993; 范隆庆等, 2010; 闫志刚和李俊清, 2017), 本研究仍然显示出

了相同的结果。从黑熊与大熊猫适宜生境分布图来看, 分布都较为破碎, 且存在一些隔离分布区。相较于大熊猫而言, 黑熊适宜生境的连通性要优于大熊猫。值得注意的是, 本研究在第四次大熊猫调查发现的新分布县——屏山县和沐川县未预测出大熊猫适宜生境, 仅预测出小面积的黑熊适宜生境, 且与凉山山系主山脊的核心分布区断裂严重。对处于边缘且确切发现了大熊猫与黑熊的分布区域, 需要加强调查和研究, 以保护这些区域的熊科动物, 同时加强各隔离区域的生境连接, 以促进个体的扩散与交流。

本研究结果表明, 距居民点距离、海拔、年最大EVI指数和距道路距离是影响黑熊宏生境选择的主要环境因子, 以往关于黑熊宏生境选择的研究也表明, 居民点密度(齐增湘等, 2011)、海拔(Bashir et al, 2018)、森林覆盖率(Liu et al, 2009; Bashir et al, 2018)和NDVI指数(Bashir et al, 2018)对黑熊的生境分布预测有着重要影响, 虽然使用的环境因子并不完全一致, 研究区域也各不相同, 但都说明了人类干扰、海拔和植被是影响黑熊分布的主要环境因子。距居民点距离、海拔、植被类型、最冷季均温是影响凉山山系大熊猫生境分布的主要环境因子。Qi等(2009, 2011)对凉山山系大熊猫宏生境偏好研究结果表明, 大熊猫主要集中在高海拔且远离人类干扰的针叶林中, 本研究结果与其一致。两个物种对环境因子的选择和响应表现出了一定的差异, 这些差异有可能是两个物种能在栖息地大面积重叠的情况下仍能长期相互适应、稳定共存的原因之一(Qi et al, 2009; Steinmetz et al, 2011)。大熊猫对居民点和道路等人为干扰更为敏感, 分布海拔更高, 耐寒能力更强; 年最大EVI指数对黑熊来说是重要的环境因子, 而对大熊猫的分布影响较小。这种生境选择的种间差异可能是由不同的生活史特征导致的(徐雨等, 2017)。大熊猫以竹为食, 食物资源相对丰富, 竹子主要分布在林下, 所以年最大EVI指数对其来说不是重要的影响因子, 而黑熊是杂食且有冬眠习性, 黑熊为了获得丰富的食物资源并储存足够的脂肪过冬, 喜欢在食物资源丰富、植被生产力较强的林中活动(鲁庆彬和胡锦涛, 2003; Bashir et al, 2018)。

保护生物多样性要求管理者从单一物种转移到多物种联合保护上(Barrows et al, 2005; Wang et al,

2015)。凉山山系是大熊猫和黑熊的重要分布区, 现有的大熊猫保护体系也能对黑熊起到一定的保护作用, 但并不完全, 相关部门应加强黑熊分布区域的保护管理及附近居民的宣传教育工作, 避免盗猎、人熊冲突事件的发生。建议在对大熊猫和黑熊进行栖息地预测、生境重叠分析的基础上, 综合考虑两个物种对环境因子的耐受能力及栖息地破碎化程度, 控制人类干扰, 加强植被恢复, 实行栖息地连通管理, 制定多物种保护计划, 以实现对两个物种甚至更多同域物种的综合保护。

致谢: 感谢四川省林业厅、四川老君山国家级自然保护区提供的数据支持; 感谢陈雪、陈俊橙等同学在野外调查中提供的帮助。

参考文献

- Barrows CW, Swartz MB, Hodges WL, Allen MF, Rotenberry JT, Li BL, Scott TA, Chen XW (2005) A framework for monitoring multiple-species conservation plans. *Journal of Wildlife Management*, 69, 1333–1345.
- Bashir T, Bhattacharya T, Poudyal K, Qureshi Q, Sathyakumar S (2018) Understanding patterns of distribution and space-use by *Ursus thibetanus* in Khangchendzonga, India: Initiative towards conservation. *Mammalian Biology*, 92, 11–20.
- Cao MC, Liu GH, Shan K, Hou YX, Wang MC, Li DL, Shen WM (2010) A multi-scale assessment of habitat suitability of red-crowned crane at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China. *Biodiversity Science*, 18, 283–291. (in Chinese with English abstract) [曹铭昌, 刘高焕, 单凯, 侯银蓄, 王明春, 李东来, 申文明 (2010) 基于多尺度的丹顶鹤生境适宜性评价——以黄河三角洲自然保护区为例. *生物多样性*, 18, 283–291.]
- Di Minin E, Slotow R, Hunter LTB, Pouzols FM, Toivonen T, Verburg PH, Leader-Williams N, Petracca L, Moilanen A (2016) Global priorities for national carnivore conservation under land use change. *Scientific Reports*, 6, 23814.
- Fahrig L (1997) Relative effects of habitat loss and fragmentation on population extinction. *Journal of Wildlife Management*, 61, 603–610.
- Fan LQ, Dong L, Zhang SL, Ran JH, Yue BS (2010) Landscape pattern of giant panda habitat in the Liangshan Mountains, Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 16, 179–184. (in Chinese with English abstract) [范隆庆, 董岚, 张顺林, 冉江洪, 岳碧松 (2010) 凉山山系大熊猫栖息地的景观格局. *应用与环境生物学报*, 16, 179–184.]
- Forestry Department of Sichuan Province (2015) The Panda of

Sichuan—The 4th Survey Report on Giant Panda in Sichuan Province. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [四川省林业厅 (2015) 四川的大熊猫——四川省第四次大熊猫调查报告. 四川科学技术出版社, 成都.]

- Fritz SA, Bininda-Emonds ORP, Purvis A (2009) Geographical variation in predictors of mammalian extinction risk: Big is bad, but only in the tropics. *Ecology Letters*, 12, 538–549.
- Hou WR, Hu JC (1997) The present situations of China's bear resources and protection. *Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science)*, 18, 287–291. (in Chinese with English abstract) [侯万儒, 胡锦矗 (1997) 中国熊类资源及其保护现状. 四川师范学院学报(自然科学版), 18, 287–291.]
- Hu JC, Schaller GB (1985) Wolong's Giant Panda. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [胡锦矗, 夏勒 (1985) 卧龙的大熊猫. 四川科学技术出版社, 成都.]
- Hu JC (1990) Feeding ecology of the black bear in Tangjiahe Natural Reserve. *Journal of Sichuan Teachers College*, 11, 182–194. (in Chinese with English abstract) [胡锦矗 (1990) 唐家河自然保护区黑熊的觅食生态研究. 四川师范学院学报, 11, 182–194.]
- Hu JC, Wang CQ (1993) Study on food habits of giant pandas in Liangshan Mountains. *Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science)*, 14, 290–295. (in Chinese with English abstract) [胡锦矗, 王昌琼 (1993) 凉山山系大熊猫的食性研究. 四川师范学院学报(自然科学版), 14, 290–295.]
- Huang YY, Qiao B, Wei W, Dong X (2014) Population distribution of giant panda and its sympatric species in Labahe Nature Reserve, Sichuan Province. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 30, 189–195. (in Chinese with English abstract) [黄尤优, 乔波, 韦伟, 董鑫 (2014) 四川喇叭河自然保护区大熊猫及其伴生动物种群分布变化. 生态与农村环境学报, 30, 189–195.]
- Hwang MH, Garshelis DL, Wu YH, Wang Y (2010) Home ranges of Asiatic black bears in the central mountains of Taiwan: Gauging whether a reserve is big enough. *Ursus*, 21, 81–96.
- Liu C, White M, Newell G (2013) Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 40, 778–789.
- Liu F, Mcshea W, Garshelis D, Zhu XJ, Wang DJ, Gong J, Chen YP (2009) Spatial distribution as a measure of conservation needs: An example with Asiatic black bears in south-western China. *Diversity and Distributions*, 15, 649–659.
- Lu QB, Hu JC (2003) Preliminary analysis on the habitat selection of black bears in the Minshan Mountains. *Acta Theriologica Sinica*, 23, 98–103. (in Chinese with English abstract) [鲁庆彬, 胡锦矗 (2003) 岷山黑熊生境选择的初步分析. 兽类学报, 23, 98–103.]
- Ma YQ, Hu JC, Zhai QL (1994) Bears in China. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [马逸清, 胡锦矗, 翟庆龙 (1994) 中国的熊类. 四川科学技术出版社, 成都.]
- Malcolm KD, Mcshea WJ, Garshelis DL, Luo SJ, Deelen TRV, Liu F, Li S, Miao L, Wang DJ, Brown JL (2014) Increased stress in Asiatic black bears relates to food limitation, crop raiding, and foraging beyond nature reserve boundaries in China. *Global Ecology and Conservation*, 2, 267–276.
- Manandhar R, Odeh IOA, Ancev T (2009) Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement. *Remote Sensing*, 1, 330–344.
- McGarigal K, Marks BJ (1995) Fragstats: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. General Technical Report, Portland.
- McGarigal K (2015) Fragstats Help. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf>. (accessed on 2018-04-05)
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Qi DW, Hu YB, Gu XD, Li M, Wei FW (2009) Ecological niche modeling of the sympatric giant and red pandas on a mountain-range scale. *Biodiversity and Conservation*, 18, 2127–2141.
- Qi DW, Zhang SN, Zhang ZJ, Hu YB, Yang XY, Wang HJ, Wei FW (2011) Different habitat preferences of male and female giant pandas. *Journal of Zoology*, 285, 205–214.
- Qi DW, Zhang SN, Zhang ZJ, Hu YB, Yang XY, Wang HJ, Wei FW (2012) Measures of giant panda habitat selection across multiple spatial scales for species conservation. *Journal of Wildlife Management*, 76, 1092–1100.
- Qi ZX, Xu WH, Xiong XY, Ouyang ZY, Zheng H, Gan DX (2011) Assessment of potential habitat for *Ursus thibetanus* in the Qinling Mountains. *Biodiversity Science*, 19, 343–352. (in Chinese with English abstract) [齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 欧阳志云, 郑华, 甘德欣 (2011) 基于MAXENT模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价. 生物多样性, 19, 343–352.]
- Qing J, Xu C, Yang B, Yang ZS, Qi DW, Yang XY, Gu XD, Dai Q (2016) Corridor design for the giant panda in the Xiaoxiangling Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 1125–1133. (in Chinese with English abstract) [青菁, 胥池, 杨彪, 杨志松, 齐敦武, 杨旭煜, 古晓东, 戴强 (2016) 小相岭山系大熊猫廊道规划. 生态学报, 36, 1125–1133.]
- Qing J, Yang ZS, He K, Zhang ZJ, Gu XD, Yang XY, Zhang W, Yang B, Qi DW, Dai Q (2016) The minimum area requirements (MAR) for giant panda: An empirical study. *Scientific Reports*, 6, 37715.
- Reid D, Jiang MD, Teng QT, Qin ZS, Hu JC (1991) Ecology of the Asiatic black bear (*Ursus thibetanus*) in Sichuan. *Mammalia*, 55, 221–238.

- Ripple WJ, Estes JA, Beschta RL, Wilmers CC, Ritchie EG, Hebblewhite M, Berger J, Elmhagen B, Letnic M, Nelson MP, Schmitz OJ, Smith DW, Wallach AD, Wirsing AJ (2014) Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science*, 343, 1241484.
- Schaller GB, Teng QT, Johnson KG, Wang XM, Shen HM, Hu JC (1989) The feeding ecology of giant pandas and Asiatic black bears in the Tangjiahe Reserve, China. In: *Carnivore Behavior, Ecology, and Evolution* (ed. Gittleman JL), pp. 212–241. Springer, Boston.
- Steinmetz R, Garshelis DL, Chutipong W, Seuaturien N (2011) The shared preference niche of sympatric Asiatic black bears and sun bears in a tropical forest mosaic. *PLoS ONE*, 6, e14509.
- Wang F, McShea WJ, Wang DJ, Li S (2015) Shared resources between giant panda and sympatric wild and domestic mammals. *Biological Conservation*, 186, 319–325.
- Wang RL, Li Q, Feng CH, Shi ZP (2017) Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using MaxEnt ecological niche modeling. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 8556–8566. (in Chinese with English abstract) [王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏 (2017) 基于MaxEnt的西藏飞蝗在中国的适生区预测. *生态学报*, 37, 8556–8566.]
- Warren DL, Glor RE, Turelli M (2010) ENMTTools: A toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*, 33, 607–611.
- Wei FW, Du WG, Zhan XJ, Li BG, Yang G, Fang SG, Zhang ZW, Li M (2016) Ecological restoration and conservation research of typical fragile ecosystems in China: Endangerment mechanisms and conservation technologies of endangered animals. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 469–475. (in Chinese with English abstract) [魏辅文, 杜卫国, 詹祥江, 李保国, 杨光, 方盛国, 张正旺, 李明 (2016) 中国典型脆弱生态修复与保护研究: 珍稀动物濒危机制及保护技术. *兽类学报*, 36, 469–475.]
- Wei FW, Feng ZJ, Wang ZW (1999) Habitat selection by giant pandas and red pandas in Xiangling Mountains. *Acta Zoologica Sinica*, 45, 57–63. (in Chinese with English abstract) [魏辅文, 冯祚建, 王祖望 (1999) 相岭山系大熊猫和小熊猫对生境的选择. *动物学报*, 45, 57–63.]
- Wei FW, Swaisgood R, Hu YB, Nie YG, Li Y, Zhang ZJ, Qi DW, Zhu LF (2015) Progress in the ecology and conservation of giant pandas. *Conservation Biology*, 29, 1497–1507.
- Wu W, Li YH, Hu YM (2016) Simulation of potential habitat overlap between red deer (*Cervus elaphus*) and roe deer (*Capreolus capreolus*) in northeastern China. *PeerJ*, 4, e1756.
- Wu ZJ, Li YM (2003) Effects of habitat fragmentation on survival of animal populations. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 2424–2435. (in Chinese with English abstract) [武正军, 李义明 (2003) 生境破碎化对动物种群存活的影响. *生态学报*, 23, 2424–2435.]
- Xu Y, Wang B, Dou L, Ran JH, Liu SR, Yue HQ, Yang L, Zong JW, Li YJ, Li BJ (2017) Habitat selection by three sympatric high-mountain Galliformes. *Sichuan Journal of Zoology*, 36, 258–265. (in Chinese with English abstract) [徐雨, 王彬, 窦亮, 冉江洪, 刘世荣, 岳汉秋, 杨柳, 宗建伟, 李彦娇, 李八斤 (2017) 三种同域高山鸡形目鸟类的生境选择. *四川动物*, 36, 258–265.]
- Yan ZG, Li JQ (2017) Assessment of ecosystem in giant panda distribution area based on entropy method and coefficient of variation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 4007–4016. (in Chinese with English abstract) [闫志刚, 李俊清 (2017) 基于熵值法与变异系数的大熊猫分布区生态系统评价. *应用生态学报*, 28, 4007–4016.]
- Yang CH, Zhang HM, Zhou XP, Wang PY, Wang XM (2006) Review of habitat selection in the giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*). *Acta Ecologica Sinica*, 26, 3442–3453. (in Chinese with English abstract) [杨春花, 张和民, 周小平, 王鹏彦, 王小明 (2006) 大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)生境选择研究进展. *生态学报*, 26, 3442–3453.]
- York P, Evangelista P, Kumar S, Graham J, Flather C, Stohlgren T (2011) A habitat overlap analysis derived from Maxent for tamarisk and the south-western willow flycatcher. *Frontiers of Earth Science*, 5, 120–129.
- Zhang SL, Ran JH, Tang MK, Du BB, Yang Q, Liu SC (2008) Landscape pattern analysis of red panda habitat in Liangshan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 4787–4795. (in Chinese with English abstract) [张顺林, 冉江洪, 唐明坤, 杜蓓蓓, 杨青, 刘世昌 (2008) 凉山山系小熊猫(*Ailurus fulgens*)分布区景观格局. *生态学报*, 28, 4787–4795.]
- Zhang ZJ, Wei FW, Li M, Hu JC (2006) Winter microhabitat separation between giant and red pandas in *Bashania faberi* bamboo forest in Fengtongzhai Nature Reserve. *Journal of Wildlife Management*, 70, 231–235.
- Zhang ZJ, Sheppard JK, Swaisgood RR, Wang G, Nie YG, Wei W, Zhao NX, Wei FW (2014) Ecological scale and seasonal heterogeneity in the spatial behaviors of giant pandas. *Integrative Zoology*, 9, 46–60.

(特邀责任编辑: 李晟 责任编辑: 闫文杰)