

基于MAXENT模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价

齐增湘^{1,2} 徐卫华^{2*} 熊兴耀¹ 欧阳志云² 郑 华² 甘德欣¹

1 (湖南农业大学园艺园林学院, 长沙 410128)

2 (中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 明确物种生境空间分布格局及其与环境因子的关系, 对制定合理有效的保护对策十分重要。本文以黑熊 (*Ursus thibetanus*) 为研究对象, 以其重要栖息地秦岭山系为研究区域, 选取68个黑熊分布点数据和34个环境因子, 应用MAXENT模型分析其生境空间分布及主要影响因子, 以最大化Kappa值的生境适宜性指数为阈值划分适宜生境, 结合已建自然保护区进行保护空缺分析, 并通过构建阻力面和最小成本路径分析, 开展黑熊生境廊道规划。结果表明: 人类干扰和土地利用类型是影响黑熊生境选择的主要生态因子, 居民点密度、到荒草地距离、到耕地距离3个因子对黑熊生境选择有重要影响, 其综合贡献值分别为21.4%、17.5%和15.9%, 到阔叶林距离、到水体距离等因子次之。黑熊的适宜生境主要集中分布在秦岭山系主脊的中西部地区, 占整个秦岭山系面积的19.23%。空缺分析表明: 已建自然保护区群覆盖了23.49%的适宜生境, 但尚有8,480 km²处于保护区之外。为更有效保护秦岭黑熊及其生境, 建议建设12条生境廊道, 同时结合其他物种进行系统保护规划。

关键词: 黑熊, GAP分析, 生境评价, 最小成本路径分析, 生境廊道

Assessment of potential habitat for *Ursus thibetanus* in the Qinling Mountains

Zengxiang Qi^{1,2}, Weihua Xu^{2*}, Xingyao Xiong¹, Zhiyun Ouyang², Hua Zheng², Dexin Gan¹

1 College of Horticulture & Landscape, Hunan Agricultural University, Changsha 410128

2 State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Abstract: Understanding the distribution of suitable habitat of target species and their relationship with environment are critical to formulating effective protective measures. The Qinling Mountains contain important habitat for *Ursus thibetanus*. A predictive habitat distribution map of this species was estimated using the Maximum Entropy (MAXENT) model with a total of 68 recorded points of known bear occurrence and 34 environmental factors. The distribution of potential habitat and its relationship with major environmental factors were analyzed and a gap analysis was carried out in light of existing nature reserves. Habitat corridor networks were also planned using resistance surface and least-cost analysis. Results showed that human interference and land use type were the main factors influencing habitat choice of *U. thibetanus*. Three variables including residential density, distance to grassland and distance to cultivated land had the greatest effect on habitat selection, with a contribution of 21.4%, 17.5% and 15.9% respectively, followed by the distance to broad-leaf forest and distance to water. Estimated suitable habitat for *U. thibetanus* was distributed mainly in the middle and western portions of the Qinling Mountains and occupied 19.23% of the Mountains' total area. Gap analysis showed that approximately 23.49% of the bear's predicted suitable habitat was protected within the nature reserves, but that 8,480 km² of suitable habitat was outside these reserves. In order to protect *U. thibetanus* and its habitat more effectively, suggestions for the construction of 12 habitat corridors and a systematic conservation planning process integrating other species' needs were proposed.

Key words: *Ursus thibetanus*, GAP analysis, habitat evaluation, least cost path analysis, habitat corridor

收稿日期: 2010-12-02; 接受日期: 2011-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(40901289)、国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421104)和世界自然基金会(WWF)项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xuweihua@rcees.ac.cn

在世界现存的3百万至1亿个物种中,平均每年约有1,000个灭绝,并且该速度还在提高(Heywood, 1995)。国内外的许多研究表明,生物生境的丧失和破碎化是导致物种灭绝和生物多样性下降的关键因素(Fahrig, 2003)。野生物种特别是野生动物的生存状况不断恶化,引起了国际社会对生物多样性进行有效保护问题的极大关注。要保护好濒危野生动物,就需要明确物种的生境需求和适宜生境空间分布格局(曹铭昌等, 2010),并分析物种的生境需求与当地自然环境的匹配关系,明确其生境的分布范围与特征,进而分析该物种种群减少及致危原因,为制定合理的保护对策提供依据(欧阳志云等, 2001)。

近年来,国内外学者广泛利用各种模型来预测目标物种生境的分布,如回归模型(Schadt *et al.*, 2002)、机理模型(欧阳志云等, 2001; 徐卫华等, 2006)、生态位模型(Brotons *et al.*, 2004; Phillips *et al.*, 2006; 王学志等, 2008; 徐卫华和罗翀, 2010)。其中回归模型不仅需要目标物种“出现点”的数据,而且也需要物种“不出现点”的数据。“出现点”数据可以通过野外调查和观测得到,而“不出现点”的数据则很难获得。同时,物种在某一特定地方没有出现,并不意味着这个地方就是不适宜生境(Viña *et al.*, 2010),从而导致预测结果出现偏差。因而,只需要物种出现点数据的一类生态位模型近年来发展迅速,MAXENT模型就是其中之一。该模型在进行物种生境预测与评价时只需要物种“出现点”的数据,并且即使在出现点数据较少的情况下,也具有更高的预测精度(Hernandez *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2006; Pearson *et al.*, 2007)。目前,该模型已被成功应用于保护物种的生境分布预测(Phillips *et al.*, 2006; Boubli & Lima, 2009; Stachura-Skierczynska *et al.*, 2009; 徐卫华和罗翀, 2010)。

黑熊(*Ursus thibetanus*)隶属于哺乳纲食肉目熊科,是典型的林栖动物,分布在亚洲大陆及其邻近岛屿、北美和欧洲。在我国分布很广,北自黑龙江,南至海南岛以及喜马拉雅山南坡。但随着人口的增加,森林面积的不断缩小,偷猎以及过度利用等原因,黑熊栖息地面积日趋缩小,野生种群数量急剧下降,在其历史分布区中约50–75%的地区已绝迹(Servheen, 1990)。我国也不例外,研究表明我

国野生黑熊种群数量估计仅为12,000–18,000头,最多不超过20,000头(马逸清等, 1994)。黑熊在IUCN濒危等级中被列为易危物种,被列入国际濒危动植物物种国际贸易公约(CITES)附录II中,我国将其列为国家II级重点保护动物(汪松, 1998)。为更好地保护黑熊及其赖以生存的环境,国内外许多专家学者对其生境选择(Carr *et al.*, 2002; 鲁庆彬和胡锦矗, 2003; Garneau *et al.*, 2008; 战如亮等, 2010)、干扰对种群的迁移和扩散的影响(White *et al.*, 2000; Hostetler *et al.*, 2009)、家域面积(马逸清等, 1994; 侯万儒等, 2001; Oli *et al.*, 2002; Lyons *et al.*, 2003; Garneau *et al.*, 2008)、种群结构及资源现状(郑生武等, 1995; 鲁庆彬和胡锦矗, 2002)等方面做了大量研究,取得了诸多成果,但很少有研究来定量分析黑熊生境与环境因子的关系,以评价黑熊生境的保护情况并进行生境规划。

秦岭山系是我国野生黑熊的重要分布区之一,由于人为因素导致生境消失和破碎化,黑熊现有种群数量只有约200头(侯万儒和胡锦矗, 1997)。为保护黑熊种群及其生境,我们拟用MAXENT模型评价其生境,分析其潜在生境空间分布及主要影响因素,利用Kappa分析划分黑熊适宜生境,在此基础上,结合已建自然保护区,明确秦岭地区黑熊的保护空白区域,并规划生境廊道,以期为秦岭山系黑熊的保护以及多物种的系统保护规划提供指导和基础资料。

1 研究区概况

研究区位于陕西省内的秦岭山系,地理位置为105°30′–110°05′ E, 32°40′–34°35′ N。北以秦岭北坡山脚线为界,南至汉江北岸,东到伏牛山,西至岷山,东西长400–500 km,南北宽150–200 km,总面积约57,620 km²。秦岭山势起伏,区内相对高差3,000 m以上,主峰太白山海拔3,767 m。秦岭山系地处我国东部暖温带和亚热带的过渡带,受大陆性气候和季风性气候的双重影响,气候垂直分异显著,年均温–2.1℃至13℃,南坡比北坡的年均温高,加之受纬度地带性的影响,植物垂直带谱明显,从下而上依次为山地常绿阔叶林、山地含常绿树种的落叶阔叶林、山地暗针叶林带与高山灌丛(徐卫华和罗翀, 2010)。

2 研究方法

2.1 模型介绍和评价

MAXENT模型是把研究区所有像元作为构成最大熵的可能分布空间, 将已知物种分布点的像元作为样点, 根据样点像元的环境变量如气候变量、海拔、土壤类型、植被类型得出约束条件, 探寻此约束条件下的最大熵的可能分布(即探寻与物种分布点的环境变量特征相同的像元), 据此来预测物种在研究区的生境分布(Phillips *et al.*, 2006)。该模型采用Jackknife检验对环境因子重要性进行分析, 并用ROC曲线(受试者工作特征曲线)下面积(area under curve, AUC)对MAXENT模型的精度进行评价。AUC值越大, 表示环境变量与预测物种地理分布模型之间相关性越大, 越能将该物种有分布和无分布判别开, 预测效果也就越好。评价标准为: AUC值为0.50–0.60, 失败(fail); 0.60–0.70, 较差(poor); 0.70–0.80, 一般(fair); 0.80–0.90, 好(good); 0.90–1.0, 非常好(excellent) (Swets, 1988; Araújo *et al.*, 2005)。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 黑熊分布点数据

数据来源于世界自然基金会(WWF)资助的秦

岭山系自然保护区野外巡护与监测记录。2006–2008年, 陕西省林业厅和WWF组织在佛坪、太白山、天华山、皇冠、周至、青木川等自然保护区设立490条巡护线路, 开展野外巡护和监测, 记录粪便、食迹、足迹、树穴等能够证明是黑熊活动后留下的痕迹以及黑熊活体, 用GPS进行定位, 共得到124个包含经纬度坐标的黑熊活动痕迹点。考虑到黑熊的活动范围较大, 痕迹点距离过近可能会因空间自相关而影响模型预测的精度, 故根据黑熊家域面积(马逸清等, 1994; 侯万儒等, 2001)对黑熊分布点进行buffer分析, 并按如下原则对痕迹点进行处理: 每条巡护路线只留1个痕迹点; 对于不在巡护路线上的痕迹点, 去除间距小于3,000 m的点。最后选取了68个黑熊分布点用于模型运算(图1)。

2.2.2 环境数据

已有研究表明, 黑熊喜欢选择向阳、避风性适中的山脊或坡面、乔木密度高、郁闭度大且坡陡的阔叶林和针阔混交林(鲁庆彬和胡锦矗, 2003; 陈洋等, 2010)。为此, 我们选择地形(海拔、坡度、坡向等)、水系、植被、气候(降雨量、气温、日照等)、人类干扰(居民点、道路、耕地等)等34个环境变量, 作为黑熊生境适宜性模型的预测变量。

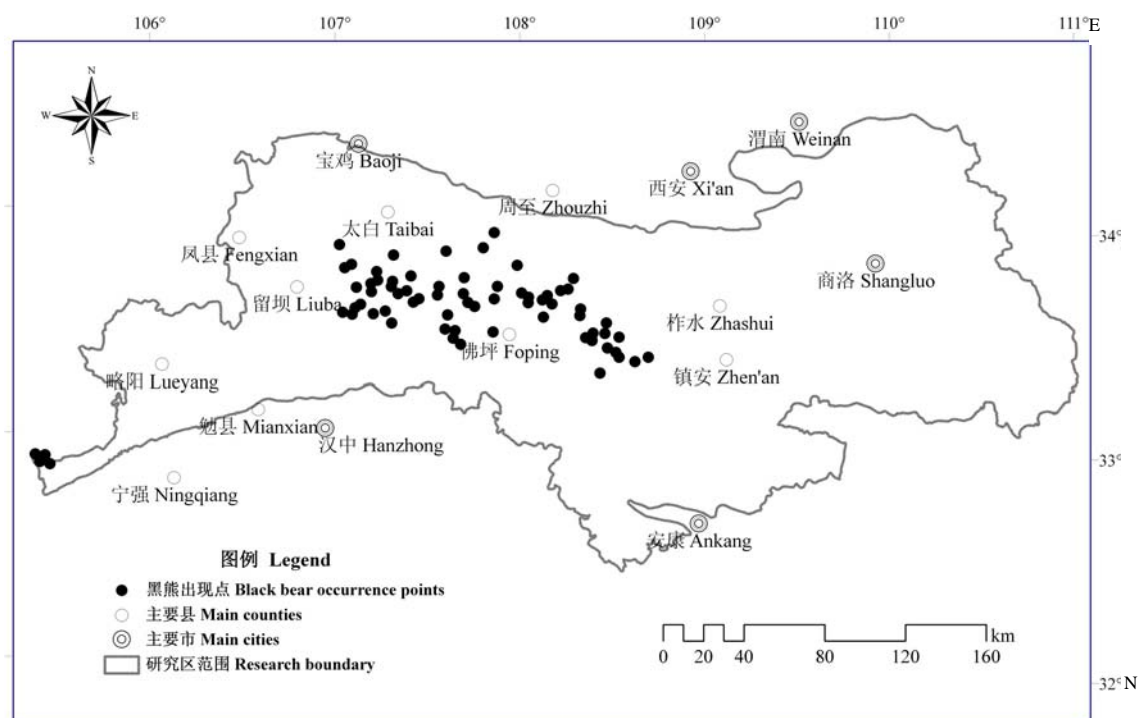


图1 秦岭黑熊出现点分布图

Fig. 1 Distribution of black bears' occurrences in Qinling

地形因子: 地形选取3个因子, 包括海拔、坡度和坡向。采用来源于中国科学院科学数据库分辨率为 30 m×30 m 的数字高程地图 (DEM) 数据, 在 ARCGIS9.3 中进行空间分析获得。

水系因子: 包括到主要河流和小河距离。水系由 DEM 在 ARCGIS9.3 中进行空间分析提取, 并进行直线距离分析得到到主要河流和小河距离的栅格图层。

植被因子: 利用遥感影像来提取, 所用遥感影像数据为 2007 年获取的 9 景 TM 影像数据, 轨道号分别为 125–128/37, 126–128/36, 分辨率为 30 m×30 m。由于秦岭山系地形起伏, 阴影影响严重, 在实地调查的基础上, 根据该区植被垂直分带的特点, 以及阴阳坡分布特性, 我们引入数值高程模型和坡向信息, 并将其与遥感图像特征相结合, 在遥感图像处理软件 ERDAS IMAGE 9.1 中对研究区 TM 影像进行专家知识辅助决策分类, 分为阔叶林、混交林、针叶林、灌丛、草甸、荒草地、耕地、水体、居民用地等 9 类, 并在 ARCGIS9.3 中进行直线距离分析得到与各种用地类型的距离栅格图层。

气候因子: 利用秦岭山区及周边 30 个基准台站点的标准月值数据 (1955–2001 年), 选择年均降雨量、最干旱 3 个月的平均降雨量、最湿 3 个月的平均降雨量、年降雨量变化范围 (最大降雨量月值与最小降雨量月值之差)、年均温、最热 3 个月的平均温度、最冷 3 个月的平均温度、年均日照率等 8 个气候因子, 以经度、纬度、海拔为独立变量, 建立与 8 个气候因子的回归模型, 插值得到气候数据 (Hijmans *et al.*, 2005)。

人类干扰因子: 选取到居民用地的距离、到主要公路 (县级以上公路) 的距离、到小路 (县内道路) 的距离、到耕地的距离、居民点密度等指标。居民点、道路数据来源于国家基础地理信息中心提供的 2009 年的 1:100 万地理数据。居民点通过密度制图转换成密度栅格文件, 到道路和耕地距离利用直线距离分析转换成栅格文件。所有提取信息转化为 90 m×90 m 的栅格数据, 并统一为 WGS_1984_UTM_Zone_49N 投影坐标系统。

2.3 数据分析

2.3.1 黑熊生境模型构建

将黑熊分布点数据和环境变量数据导入 MAXENT3.3 中, 随机选取 75% 的黑熊分布点数据用于建立模型, 剩下 25% 的黑熊分布点用于模型验证,

其他参数为模型默认值, 输出结果为值在 0–1 之间的连续栅格数据。

2.3.2 黑熊生境适宜性分析

在研究区内随机生成 68 个无分布点数据, 与分布点相对应, 基于黑熊生境适宜性指数提取生境适宜性值, 通过对生境适宜性指数划分不同的阈值, 计算黑熊分布点和无分布点在不同阈值条件下的 Kappa 统计值, 并以最大化 Kappa 值时的生境阈值为分类临界值, 将生境适宜性指数值重分类为 0 或 1, 1 为适宜生境, 0 为不适宜生境 (Hirzel *et al.*, 2006; Viña *et al.*, 2010), 最终生成秦岭山系黑熊适宜生境分布图。用景观格局分析软件 Fragstats3.3 计算黑熊生境景观格局指数, 包括生境面积、斑块数、斑块密度、最大斑块指数和平均斑块面积等。

2.3.3 黑熊生境保护空缺分析

秦岭山系是我国生物多样性保护热点地区, 也是全球生物多样性最具代表性的重点区域之一。为了保护大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 及其他珍稀濒危物种, 目前秦岭山系已建立了佛坪、长青等 11 个国家级自然保护区和牛尾河、老县城等 8 个省级自然保护区, 另有娘娘山与盘龙两个拟建自然保护区, 总面积达 4,934.7 km², 初步形成了边界互相连接的保护区组群和隔离的单个保护区的格局。将秦岭山系黑熊适宜生境与已经建立的自然保护区相叠加, 识别现有保护区系统之外具有较高保护价值但容易受到人类活动干扰的适宜生境, 定量评价秦岭地区黑熊生境保护与空缺状况。

2.3.4 秦岭山系黑熊生境廊道规划

黑熊种群的觅食、迁移、扩散等活动需要克服环境阻力来实现。研究表明黑熊的活动范围较大, 平均家域面积为 5.1–36.5 km² (马逸清等, 1994; 侯万儒等, 2001)。为更精确地模拟黑熊种群扩散过程, 根据黑熊家域面积的需求, 本文选取单个适宜生境面积大于 40 km² 的 16 个斑块作为“源”, 根据黑熊生物学和生态行为学特性, 通过专家咨询和 AHP (层次分析法) 方法, 确定影响黑熊运动的阻力因子以及各阻力因子的权重和阻力值 (附录 I), 在 GIS 中建立黑熊运动的阻力面。根据“源”和阻力面, 用最小成本路径分析 (least cost path), 计算每个像元离“源”的最小成本距离, 建立最小成本路径 (Li *et al.*, 2010), 并根据最小成本路径分析结果来进行生境廊道规划。

3 研究结果

3.1 黑熊生境与环境因子的关系

训练集和验证集AUC值分别为0.991和0.868, 表明MAXENT模型预测结果好。

Jackknife检验结果显示: 居民点密度、到荒草地距离、到耕地距离、到阔叶林距离是影响黑熊生境分布的主要环境因子。环境因子对模型综合贡献值(图2)表明, 居民点密度、到荒草地距离、到耕地距离3个环境变量对黑熊生境选择有重要影响, 其综合贡献值分别为21.4%、17.5%和15.9%, 到阔叶林距离、到水体距离等因子次之, 而年降雨量、年均温、混交林、水体、荒草地等因子对黑熊生境选择则没有影响。各生态环境单因子对黑熊生境适宜敏感性分析表明, 除了混交林外, 其他各环境因子都有不同程度的反应。其中到阔叶林距离、到草甸

距离、到混交林距离、到针叶林距离和居民点密度等因子随着距离或密度的增大, 生境适宜性指数显著减小, 呈显著负相关; 荒草地、水体、居民点、草甸、到小河距离等因子与生境适宜性指数呈负相关, 但显著性降低; 阔叶林、到道路距离、到水体距离、到主要河流距离等因子随着密度或距离的增大, 生境适宜性指数增大, 呈显著正相关; 而气象因子随着值的增大, 生境适宜性指数有不同幅度的升降。

3.2 黑熊生境适宜性分析与评价

Kappa分析表明, 当 $HSI=0.026$ 时, Kappa值最大, 为0.6911。以 $HSI=0.026$ 为阈值, 将生境适宜性指数重分类, 生成黑熊适宜生境分布图(图3)。结果表明, 黑熊的适宜生境主要集中在秦岭山系主脊的中西部地区, 具体分布在太白、眉县、城固、留坝、户县、周至、佛坪、宁陕、洋县、勉县、凤县、镇

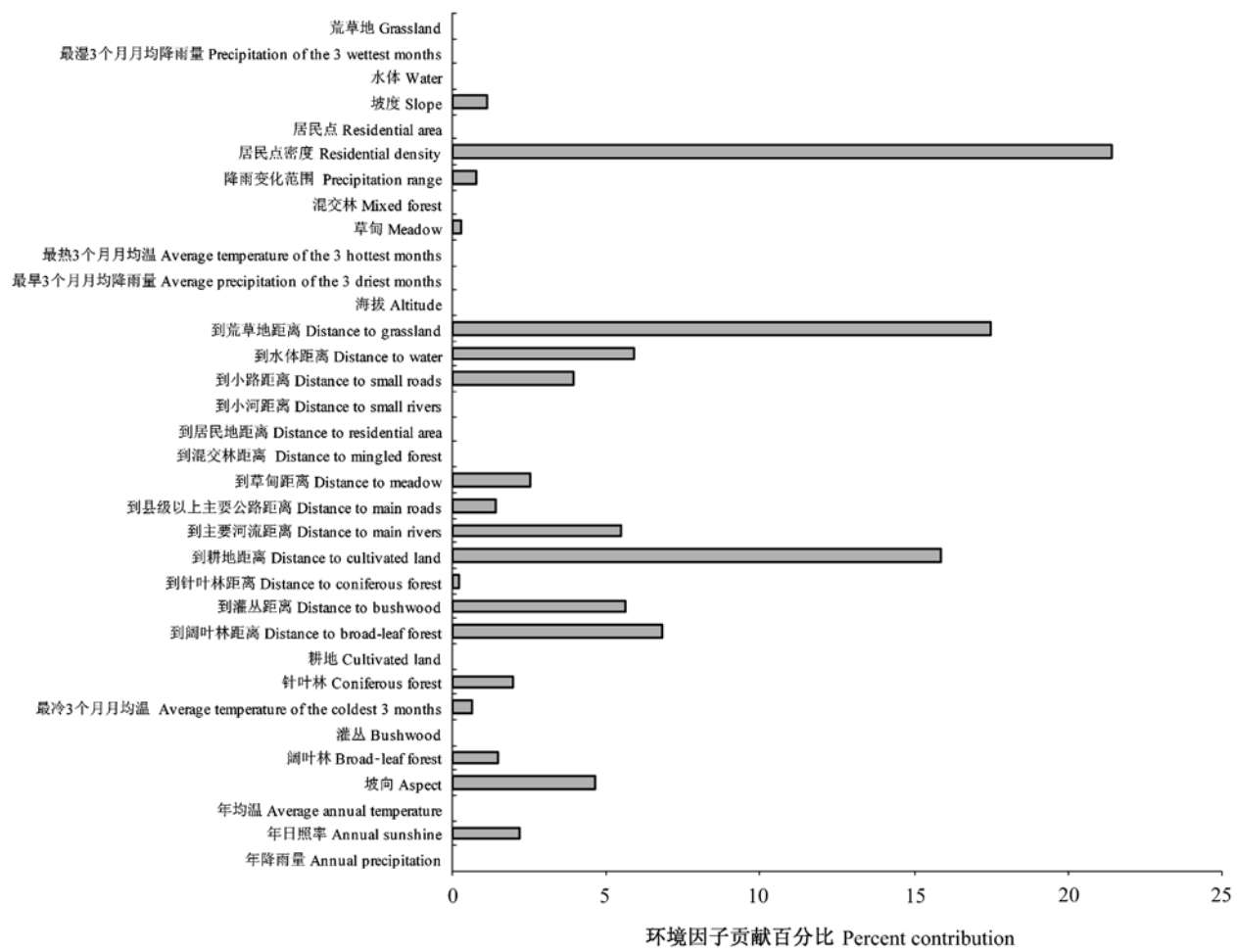


图2 环境因子对黑熊生境适宜性贡献比较
Fig. 2 The comprehensive contribution of environmental factors to *Ursus thibetanus* habitat suitability index

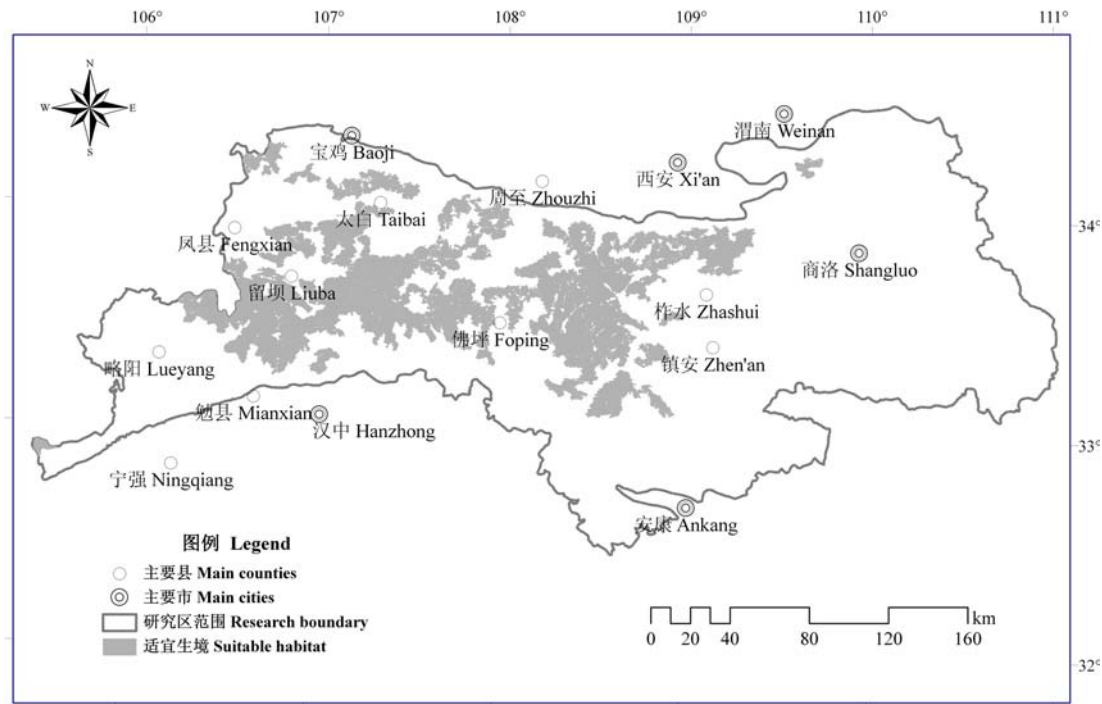


图3 秦岭山系黑熊适宜生境分布
Fig. 3 Suitable habitat distribution of *Ursus thibetanus* in Qinling Mountains

表1 黑熊生境类型景观格局指数
Table 1 Landscape pattern index of habitat types for *Ursus thibetanus*

生境类型 Habitat type	斑块面积 Patch area (ha)	斑块数目 Number of patches	斑块密度 Patch density (个/100 ha)	最大斑块指数 Largest patch index	平均斑块面积 Mean patch area (ha)
适宜生境 Suitable	1,108,441	9,481	0.857	40.355	116.637
不适宜生境 Unsuitable	4,653,365	8,751	0.188	97.201	531.433

安等地的中高海拔的山地阔叶林地区。另外，在华县西南部的长安、蓝田和柞水县交界地区以及宁强西南部也有一定面积的黑熊生境分布，适宜生境面积11,084 km²，占整个秦岭山系面积的19.23%。

黑熊生境景观格局分析表明，与研究区内的不适宜生境斑块比，适宜生境斑块数量多，密度大，而最大斑块指数和平均斑块面积却较小(表1)，适宜生境相对不适宜生境破碎化严重。主要是由于108国道、210国道、210省道、316国道和县内公路网穿过黑熊适宜生境，以及区内居民点、耕地等隔离与影响，使适宜生境斑块内夹杂了许多不适宜生境斑块。

3.3 保护空缺分析

空缺分析结果表明(图4)：已建自然保护区覆

盖了23.49%的适宜生境，尚有8,480 km²的黑熊适宜生境处于保护区之外，占黑熊生境总面积的76.51%。保护空缺区主要分布在6个区域：Ⅰ区：凤县—太白保护空白区，包括通天河国家森林公园、嘉陵江源头生态区、天台山、鸡峰山、紫柏山等适宜生境区；Ⅱ区：周至—眉县保护空白区，在周至县西北部以及眉县交界山区，包括太白山自然保护区以东部分地区、老县城、周至自然保护区以北部分地区；Ⅲ区：宁陕—户县保护空白区，位于宁陕县中北部以及户县、周至县交界区域；Ⅳ区：柞水—蓝田保护空白区，在牛背梁自然保护区以东，包括长安、蓝田和柞水3县区交界地区；Ⅴ区：留坝—勉县保护空白区，在留坝县西南及与勉县交界地区，包括屋梁山自然保护区以南地区；Ⅵ区：宁陕—安

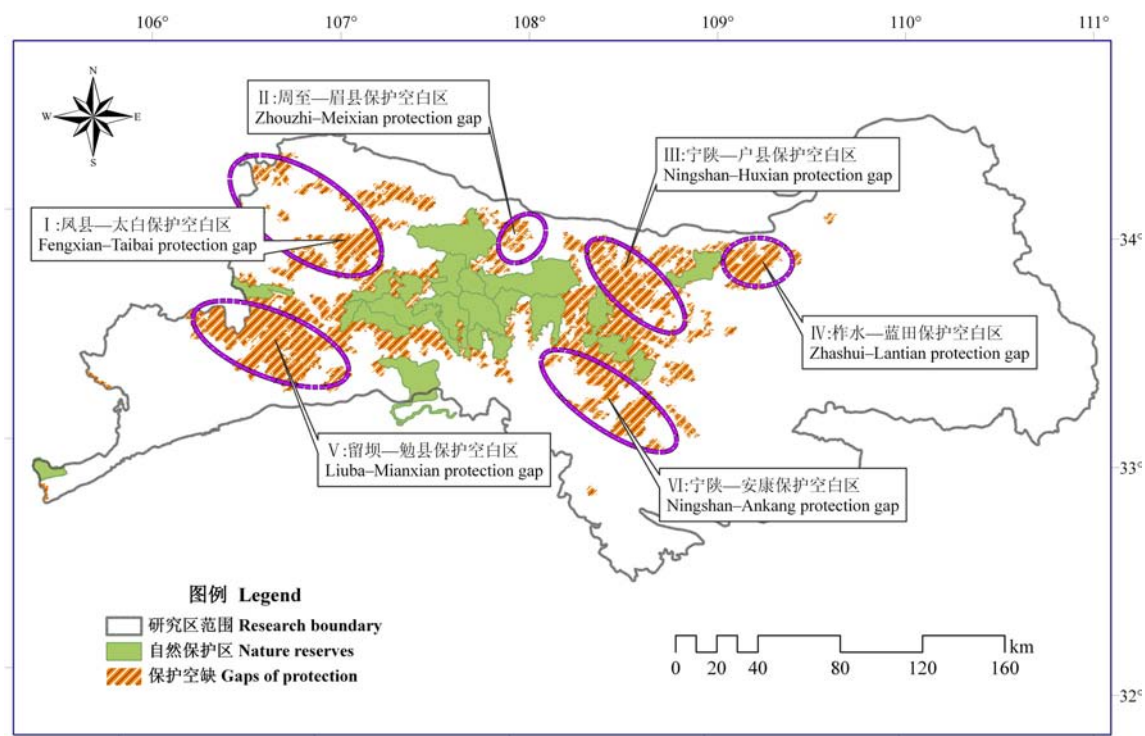


图4 秦岭山系黑熊保护空缺分析
Fig. 4 GAP analysis of *Ursus thibetanus* in Qinling Mountains

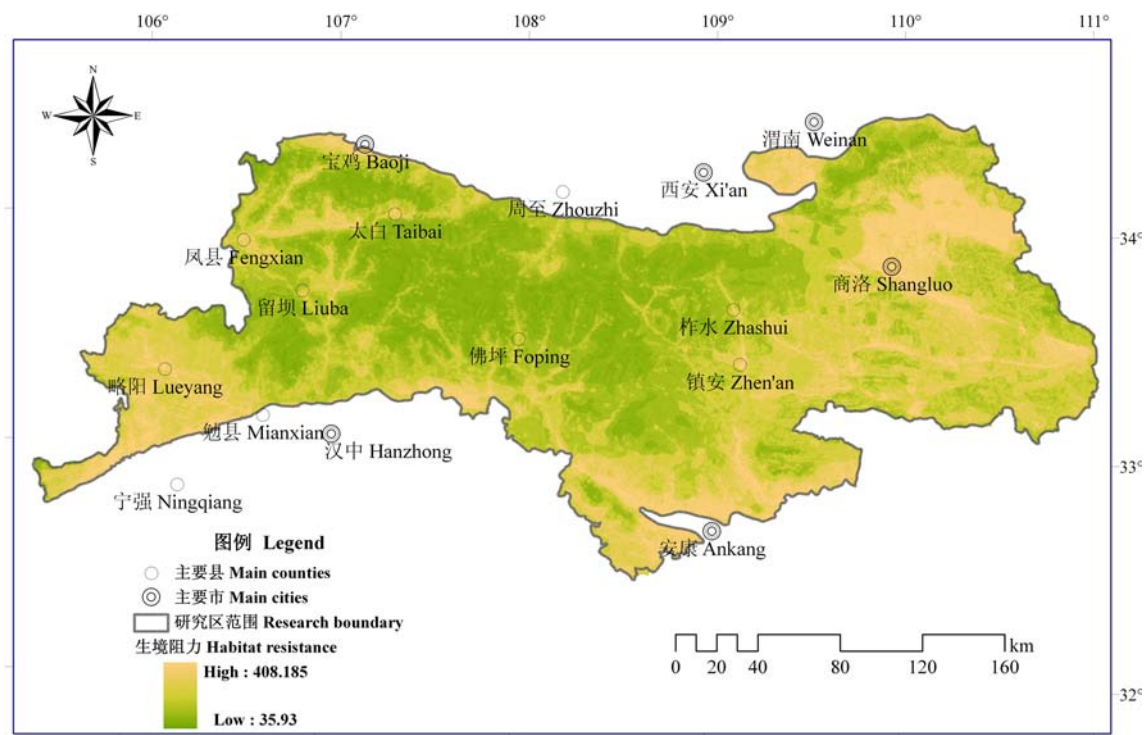


图5 黑熊迁移空间阻力分布
Fig. 5 Resistance distribution for *Ursus thibetanus* migration

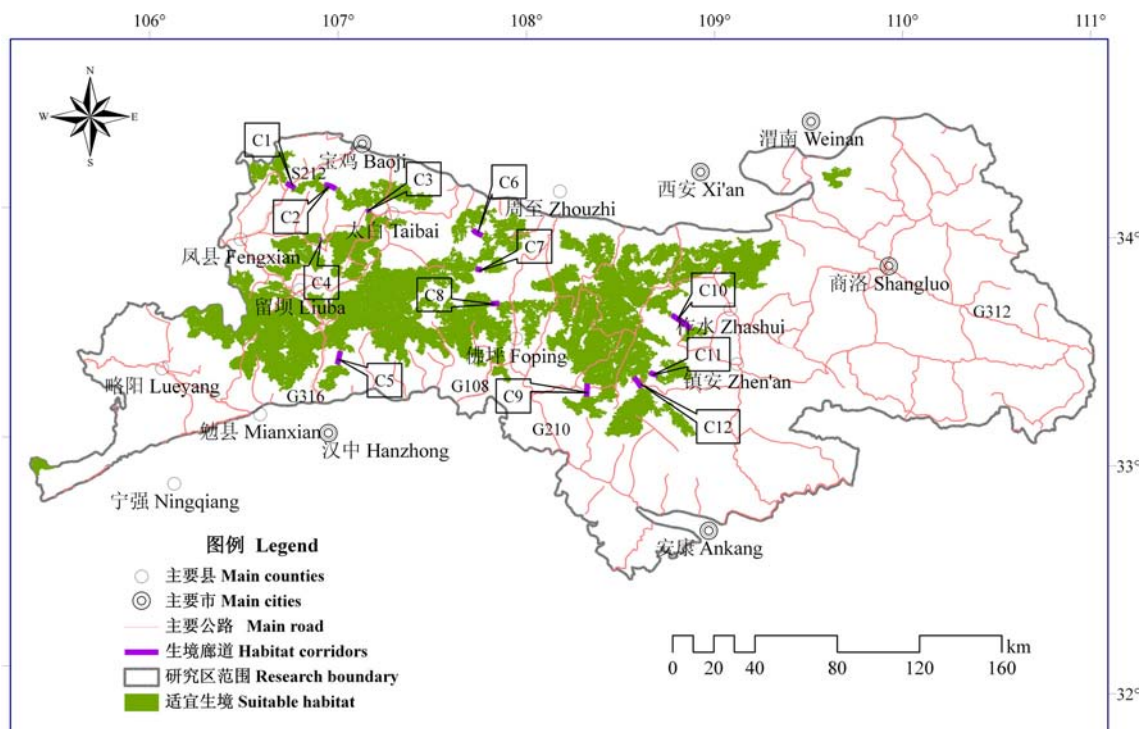


图6 秦岭山系黑熊生境廊道规划

Fig. 6 Habitat corridor planning for *Ursus thibetanus* in Qinling Mountains. C1–C12 indicate corridors

康保护空白区, 在宁陕县南部以及与安康、石泉县交界的地区, 包括皇冠、平和梁、鹰嘴石3个自然保护区以南地区。

3.4 秦岭黑熊生境廊道规划

秦岭黑熊迁移、扩散的阻力研究表明(图5), 阻力较大的区域分布在经济发展较快、人为干扰较为强烈的低海拔地区, 主要集中在秦岭西部的凤县、略阳、宁强等县, 南部的安康、汉阴、紫阳、旬阳、洋县南部等地, 以及东部的山阳、商南、丹凤、商洛、洛南等县, 而中西部地区的阻力较小。最小成本路径分析显示, 应该在研究区域内规划12条黑熊生境廊道(C1–C12)(图6)。第一条生境廊道(C1)在凤县境内, 跨过212省道将通天河森林公园和嘉陵江源头生态区连接起来; C2生境廊道将嘉陵江源头生态区与天台山、鸡峰山生境区连接; C3、C4生境廊道跨太白—凤县公路将太白县西部生境与天台山—鸡峰山生境区、凤县紫柏山生境区连通; C5生境廊道将摩天岭自然保护区南部生境与汉中天台山生境区连接; C6生境廊道将太白山自然保护区内的适宜生境连接; C7生境廊道将周至县内的适宜生境与老县城和周至自然保护区连接起来; C8生境廊道

将观音山和佛坪自然保护区内的适宜生境连接; C9生境廊道将位于平和梁自然保护区南部的生境与石泉县北部的适宜生境连接; C10生境廊道将宁陕县东北部生境与镇安县北部生境连接; C11、C12生境廊道分别将鹰嘴石自然保护区与镇安县西南部生境, 安康、镇安、宁陕3县交界适宜生境连接。通过这些廊道体系, 将相互隔离的生境斑块连接成一个连通的生境廊道网络, 有利于黑熊种群的迁移、觅食、繁衍和保护。

4 讨论

物种—环境关系是生态学研究中的一个重要内容, 是研究物种生境需求和分布的重要方面。本文利用MAXENT模型结合Kappa分析, 评价结果较为合理可信, 这表明应用生境评价模型并结合适当的统计分析方法是评价物种生境的一种较好的方法。

本文中阻力因子的选择不仅考虑了黑熊生态学和行为学的特性, 还考虑了不同环境因子的空间差异和可操作性。虽然对不同阻力因子的权重和阻力系数的赋值存在主观性, 但由于是根据多个专家决策和有关资料得出的相对值, 因而反映的是不同

环境因子的相对阻力大小,而不是绝对的阻力值。而阻力面计算的目的是反映相对趋势,所以相对意义上的阻力系数和因子的权重仍然具有意义(俞孔坚等,2009)。阻力因子的选择与赋值是影响区域生境廊道规划和景观生态设计的重要因素,其选择的科学性和客观性有待深入研究。但这种通过构建阻力面,并利用最小成本路径确定物种生境连接廊道位置,可为秦岭黑熊保护策略的制定提供直观的科学依据,对国内其他地区物种生境适宜性评价和保护也有借鉴意义。

用MAXENT模型根据物种痕迹点数据进行生境评价时,会因数据点距离过近存在空间自相关而影响模型模拟的精度。在诸多影响物种栖息地选择的生态因子中,少数因子起着主导作用(Morrison *et al.*, 1998),若简单的将所有因子平等对待,容易弱化重要因子的作用,而且环境因子之间的交互作用对模型的结果也存在影响。因此,在今后的研究过程中还需进一步对物种痕迹点数据作空间自相关分析,参考空间自相关的检测指数标准优化分布点数据,对环境因子作主成分分析,选取具有代表性的环境因子进行分析,以获得更好的评价结果。

秦岭山系是我国生物多样性热点地区,针对大熊猫、朱鹮(*Nipponia nippon*)、金丝猴(*Rhinopithecus xillana*)等国家重点保护物种建设了一批自然保护区。本文研究结果表明,现有保护区体系对黑熊适宜生境的保护并不充分,建议在对大熊猫等物种适宜生境进行分析的基础上,考虑黑熊等其他珍稀濒危物种生境分布及种群交流的要求,进行生物多样性系统保护规划,实现对多物种的综合保护,使对黑熊的保护融入到秦岭山系生物多样性综合保护规划中。

致谢: 本文得到了陕西省林业厅与世界自然基金会(WWF)西安办公室的支持,在此深表谢意!

参考文献

- Araújo MB, Pearson RG, Thuiller W, Erhard M (2005) Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, **11**, 1504–1513.
- Boubli JP, Lima MG (2009) Modeling the geographical distribution and fundamental niches of *Cacajao* spp. and *Chiropotes israelita* in northwestern Amazonia via a Maximum Entropy Algorithm. *International Journal of Primatology*, **30**, 217–228.
- Brotons L, Thuiller W, Araújo MB, Hirzel AH (2004) Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability. *Ecography*, **27**, 437–448.
- Cao MC (曹铭昌), Liu GH (刘高焕), Shan K (单凯), Hou YX (侯银蓄), Wang MC (王明春), Li DL (李东来), Shen WM (申文明) (2010) A multi-scale assessment of habitat suitability of red-crowned crane at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **18**, 283–291. (in Chinese with English abstract)
- Carr M, Yoshizaki J, Van Manen FT, Pelton MR, Huygens OC, Hayashi H, Maekawa M (2002) A multi-scale assessment of habitat used by Asiatic black bears in central Japan. *Ursus*, **13**, 1–9.
- Chen Y (陈洋), Xia Q (夏茜), Wang W (王文), Shen GS (沈广爽) (2010) Habitat selection of black bear in spring in Longkou Nature Reserve. *Chinese Journal of Wildlife* (野生动物), **31**(2), 63–68. (in Chinese with English abstract)
- Fahrig L (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **34**, 487–515.
- Garneau DE, Boudreau T, Keech M, Post E (2008) Habitat use by black bears in relation to conspecifics and competitors. *Mammalian Biology*, **73**, 48–57.
- Hernandez PA, Graham CH, Master LL, Albert DL (2006) The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, **29**, 773–785.
- Heywood VH (1995) *Global Biodiversity Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **25**, 1965–1978.
- Hirzel AH, Le Lay G, Helfer V, Randin C, Guisan A (2006) Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecological Modelling*, **199**, 142–152.
- Hostetler JA, McCown JW, Garrison EP, Neils AM, Barrett MA, Sunquist ME, Simek SL, Oli MK (2009) Demographic consequences of anthropogenic influences: Florida black bears in north-central Florida. *Biological Conservation*, **142**, 2456–2463.
- Hou WR (侯万儒), Hu JC (胡锦矗) (1997) The present situations of China's bear resources and protection. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*(四川师范学院学报(自然科学版)), **18**, 287–292. (in Chinese with English abstract)
- Hou WR (侯万儒), Zhang ZJ (张泽钧), Hu JC (胡锦矗) (2001) A preliminary analysis on population viability for black bear in Wolong. *Zoological Research* (动物学研究), **22**, 357–361. (in Chinese with English abstract)
- Li HL, Li DH, Li T, Qiao Q, Yang J, Zhang HM (2010) 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. *Ecologi-*

- cal Modelling, **221**, 944–952.
- Lu QB (鲁庆彬), Hu JC (胡锦矗) (2002) Population analysis for *Selenarctos thibetanus* in the Minshan Mountains. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **21**(4), 12–14. (in Chinese with English abstract)
- Lu QB (鲁庆彬), Hu JC (胡锦矗) (2003) Preliminary analysis on the habitat selection of black bears in the Minshan Mountains. *Acta Theriologica Sinica* (兽类学报), **23**, 98–103. (in Chinese with English abstract)
- Lyons AL, Gaines WL, Servheen C (2003) Black bear resource selection in the northeast Cascades, Washington. *Biological Conservation*, **113**, 55–62.
- Ma YQ (马逸清), Hu JC (胡锦矗), Zhai QL (翟庆龙) (1994) *Chinese Bears* (中国黑熊), pp. 54–68. Sichuan Science & Technology Press, Chengdu. (in Chinese)
- Morrison ML, Marcot BG, Mannan RW (1998) *Wildlife-Habitat Relationships: Concepts and Applications*, 2nd edn., pp. 3–15. The University of Wisconsin Press, Wisconsin.
- Oli MK, Jacobson HA, Leopold BD (2002) Pattern of space use by female black bears in the White River National Wildlife Refuge, Arkansas, USA. *Journal for Nature Conservation*, **10**, 87–93.
- Ouyang ZY (欧阳志云), Liu JG (刘建国), Xiao H (肖寒), Tan YC (谭迎春), Zhang HM (张和民) (2001) An assessment of giant panda habitat in Wolong Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **21**, 1869–1874. (in Chinese with English abstract)
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Peterson AT (2007) Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, **34**, 102–117.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**, 231–259.
- Schadt S, Revilla E, Wiegand T, Knauer F, Kaczensky P, Breitenmoser U, Bufka L, Červený J, Koubek P, Huber T, Staniša C, Trepl L (2002) Assessing the suitability of central European landscapes for the reintroduction of *Eurasian lynx*. *Journal of Applied Ecology*, **39**, 189–203.
- Servheen C (1990) The status and conservation of the bears of the world. *International Conference Bear Research and Management Monograph*, **2**, 1–32.
- Stachura-Skierczyńska K, Tumiel T, Skierczyński M (2009) Habitat prediction model for three-toed woodpecker and its implication for the conservation of biologically valuable forests. *Forest Ecology and Management*, **258**, 697–703.
- Swets JA (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, **240**, 1285–1293.
- Viña A, Tuanmu MN, Xu WH, Li Y, Ouyang ZY, DeFries R, Liu JG (2010) Range-wide analysis of wildlife habitat: implications for conservation. *Biological Conservation*, **143**, 1960–1969.
- Wang S (汪松) (1998) *China Red Data Book of Endangered Animals: Mammalia* (中国濒危动物红皮书), pp. 177–179. Science Press, Beijing, Hong Kong, New York. (in Chinese)
- Wang XZ (王学志), Xu WH (徐卫华), Ouyang ZY (欧阳志云), Liu JG (刘建国), Xiao Y (肖隼), Chen YP (陈佑平), Zhao LJ (赵联军), Huang JZ (黄俊忠) (2008) The application of ecological-niche factor analysis in giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) habitat assessment. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **28**, 821–828. (in Chinese with English abstract)
- White TH, Bowman JL, Leopold BD, Jacobson HA, Smith WP, Vilella FJ (2000) Influence of Mississippi alluvial valley rivers on black bear movements and dispersal: implications for Louisiana black bear recovery. *Biological Conservation*, **95**, 323–331.
- Xu WH (徐卫华), Luo C (罗翀) (2010) Application of MAX-ENT Model in *Rhinopithecus roxllanae* habitat assessment in Qinling Mountain. *Forest Engineering* (森林工程), **26**(2), 1–4. (in Chinese with English abstract)
- Xu WH (徐卫华), Ouyang ZY (欧阳志云), Jiang ZY (蒋泽银), Zheng H (郑华), Liu JG (刘建国) (2006) Assessment of giant panda habitat in the Daxiangling Mountain Range, Sichuan, China. *Biodiversity Science* (生物多样性), **14**, 223–231. (in Chinese with English abstract)
- Yu KJ (俞孔坚), Qiao Q (乔青), Li DH (李迪华), Yuan H (袁弘), Wang SS (王思思) (2009) Ecological land use in three towns of eastern Beijing: a case study based on landscape security pattern analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **20**, 1932–1939. (in Chinese with English abstract)
- Zhan RL (战如亮), Wang W (王文), Chen Y (陈洋), Feng Y (冯妍) (2010) Habitat selection of black bears in Uluhan forest farm, Heilongjiang. *Chinese Journal of Wildlife* (野生动物), **31**(2), 69–73. (in Chinese with English abstract)
- Zheng SW (郑生武), Yu YQ (余玉群), Zuo H (左华), Cao YH (曹永汉), Yuan W (袁伟), Fu WK (傅文凯) (1995) The present status, distribution and conservation measures of the black bear in Hanzhong prefecture, Shaanxi Province. *Acta Theriologica Sinica* (兽类学报), **15**, 93–97. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 李义明 责任编辑: 闫文杰)

附录I 黑熊生境阻力因子、分值和权重

Appendix I Resistance factors, values and weights of habitat for *Ursus thibetanus*

(<http://www.biodiversity-science.net/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=9545>)

附录I 黑熊生境阻力因子、分值和权重

Appendix I Resistance factors, values and weights of habitat for *Ursus thibetanus*

准则层1 Rule layer 1	权重 Weight	准则层2 Rule layer 2	权重 Weight	准则层3 Rule layer 3	对总目标的权重 Weights for the target	相对阻力 Relative resistance
物理环境因子 Physical environment factors	0.2120	坡度阻力因子 Resistance factor of slope (R_s) (°)	0.4241	>50	0.0899	400
				40–50		300
				30–40		200
				21–30		100
				<21		50
		坡向阻力因子 Resistance factor of aspect (R_a)	0.2214	阳坡 Sunny slope	0.0469	50
				半阳半阴坡 Semi-sunny slope		100
				阴坡 Cloudy slope		200
		海拔阻力因子 Resistance factor of elevation (R_e) (m)	0.1640	>2,200	0.0348	400
				1,600–2,200		300
				1,150–1,600		200
				600–1,150		100
				<600		50
		到水体距离阻力因子 Resistance factor of distance to water (R_w) (m)	0.1905	>800	0.0404	400
				600–800		300
				400–600		200
				200–400		100
				<200		50
生物环境因子 Biological environment factors	0.3162	土地利用类型阻力因子 Resistance factor of land use (R_l)	0.3162	阔叶林 Broad-leaf forest	0.3162	0
				混交林 Mixed forest		20
				针叶林 Coniferous forest		50
				灌丛 Brushwood		100
				草甸 Meadow		150
				荒草地 Grassland		200
				耕地 Cultivated land		300
				水体 Water		400
				居民地 Residential areas		500
人为干扰因子 Human disturbance factors	0.4718	到主要公路距离阻力因子 Resistance factor of distance to main roads (R_r) (m)	0.1483	>1,000	0.0700	50
				1,000–600		100
				600–300		200
				100–300		300
				<100		400
		居民点密度阻力因子 Resistance factor of residential density (R_j)	0.5627	>2.5	0.2655	500
				1.0–2.5		400
				0.4–1.0		200
				0.08–0.4		100
				<0.08		50
		到耕地距离阻力因子 Resistance factor of distance to cultivated land (R_c) (m)	0.2889	>1,200	0.1363	50
				1,200–800		100
				800–500		200
				500–100		300
				<100		400

黑熊生境综合阻力 Comprehensive habitat resistance of *Ursus thibetanus* (R)

$$R=0.0899 \times R_s + 0.0469 \times R_a + 0.0348 \times R_e + 0.0404 \times R_w + 0.3162 \times R_l + 0.0700 \times R_r + 0.2655 \times R_j + 0.1363 \times R_c$$