•方法•

景观生态安全格局的算法改进与应用

陈洁 周年兴* 陶卓民

(南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 景观安全格局是一种有效的生物保护途径, 其构建应以生物运动的生态过程为基础。本文基于最小累积阻力模型, 运用效用公式法对景观安全格局中的缓冲区识别方法进行探索, 运用梯度算法对生态廊道(源间联结和辐射道)的识别方法进行了改进。结果表明, 在缓冲边界外的低阻力区且与源有一定距离但适合目标保护物种生存的生境孤岛可作为源的潜在区, 缓冲区边界内的高阻力区且与源距离较近但不适合目标保护物种生存的区域则可划分为生态修复区, 在生态廊道上与高阻力点交叉部分可识别为生态修复关键点。以武陵源风景名胜区的猕猴(*Macaca mulatta*)为目标保护物种的景观安全格局, 建立了以4个离散分布的猕猴栖息地为源及其3个潜在区为补充的核心保护区域, 划定了多条辐射道和源间联结以改善栖息地之间的连通性, 并识别出了多个生态修复关键点。本文对景观安全格局中缓冲区和生态廊道的识别方法进行了改进, 在武陵源风景名胜区猕猴保护中的运用也具有生物保护上的实践价值。

关键词: 景观安全格局; 算法; 武陵源风景名胜区; 猕猴

Algorithm improvements and applications for biological conservation security patterns

Jie Chen, Nianxing Zhou*, Zhuomin Tao

School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023

Abstract: Using biological movement as a basis, landscape security patterns are an effective approach to biological conservation. This study probes the recognition technique to buffer zones with the aid of utility formulas, and improves the method of recognition of ecological corridors with the help of gradient descent algorithms. These habit islets, which are located within low-resistance areas outside the buffer zone and of a certain distance from suitable sources for the subsistence of targeted protected species, can be considered source candidates. Regions, which are situated within high-resistance areas inside the buffer zone and close to unsuitable sources for maintaining targeted protected species, can be categorized in ecological restoration areas. The intersection between ecological corridors and high-resistance areas should be identified as a key point for ecological restoration. Taking the Wulingyuan Scenic and Historic Interest Area (WSA) as an empirical case, the study formulates the landscape security pattern of *Macaca mulatta*, in which the core area of the reserve is comprised of four discrete source *Macaca mulatta* habitats and is supplemented by three source candidates. A few ecological corridors and connections between sources that aimed to improve connectivity of the inter-population were delimited, and strategic points of ecological restoration are discerned. This study not only identifies buffer zones and ecological corridors in landscape security patterns but also attaches great practical significance to biological conservation exemplified by the *Macaca mulatta* population in WSA.

Key words: landscape security pattern; algorithm; Wulingyuan Scenic and Historic Interest Area; *Macaca mulatta*

景观生态学以景观格局与过程相互作用研究为核心。在Forman (1995)的“集中中有离析”的景观

最优生态模型的基础上, 俞孔坚(1996)从景观格局入手, 借助最小累积阻力模型(minimum cumulative

收稿日期: 2017-04-19; 接受日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(41671140, 41271150)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhounianxing@263.net

resistance, MCR), 以地理信息系统技术为手段, 通过景观过程的分析 and 模拟, 构建了由源(source)、缓冲区(buffer zone)、源间联结(inter-source linkage)、辐射道(radiating routes)和战略点(strategic point)构成的景观安全格局, 并依据不同的生物保护要求确定不同层次的景观安全格局。该理论自1995年提出以来, 引起了学者们的广泛关注, 并在生物多样性保护(李静等, 2017)、生态规划(李辉等, 2011)、土地管理(王思易和欧名豪, 2013)、防灾减灾(姚好等, 2011)、风景名胜区和旅游规划(游巍斌等, 2014)、城镇规划(俞孔坚等, 2009)以及文化遗产保护(冯淑华和沙润, 2006)等领域进行了大量研究, 但目前尚缺乏对景观安全格局理论的相关计算方法的研究。

在缓冲区的判别算法中, 俞孔坚(1996)在MCR阻力面上, 通过构建各源距离与MCR值的关系剖面 and MCR值与面积的关系曲线, 利用相关的经验值(例如50%以上的土地作为保护区才有利于物种的空间运动不受景观破碎化的影响)来判断缓冲区, 这很难满足不同物种的保护要求, 也很难适用于不同的生境条件。在生态廊道(包括源间联结和辐射道)的判别中, 俞孔坚(1996)主要依据累积阻力面上源与源之间的联结通道和自源向外发射的低阻力谷来判断。而实际上, 从源向外扩散的辐射道和源间联结主要依托于单一的源, 需要基于单一源的阻力面进行单独计算。为了解决这些问题, 本文在充分考虑生态过程和景观功能的基础上, 利用效用函数判别缓冲区, 采用梯度计算方法识别生态廊道, 对景观安全格局进行了算法优化。并以武陵源风景名胜区猕猴(*Macaca mulatta*)种群为保护目标, 构建了理想的景观安全格局以保护和恢复猕猴种群栖息地。

1 算法改进

景观安全格局的景观组分包括源、缓冲区、源间联结、辐射道和战略点。不同于以往研究所用的栅格数据分析法和统计图表法, 本文在景观阻力模型分析的基础上, 通过构建缓冲区效用公式和引入梯度算法分别对景观安全格局中的缓冲区和生态廊道(源间联结、辐射道)的识别进行了算法优化。

1.1 缓冲区

缓冲区是环绕源的周边地区, 是物种扩散的低阻力区(李纪宏和刘雪华, 2006), 其功能是保护源及其周围生态敏感区的生态过程和种群演化, 减少外

界干扰带来的冲击。缓冲区的构建是整个景观安全格局的基础, 当前国际上尚没有一致公认的科学方法对缓冲区进行划分。本文试图通过构建缓冲区效应公式并进行导数分析的方法来识别缓冲区, 其缓冲区划分由面积和边界方程确定。

景观阻力表示从源经过不同阻力的异质性景观所耗费的费用或者克服阻力所做的功。在地理空间坐标系中建立景观阻力面, 并用以地理坐标(x, y)为变量的函数来表示, 阻力面方程可表示为:

$$R = f(x, y) \quad (1)$$

在此, 引入地理学常用的等值线概念, 阻力面的等值线方程为 $c = f(x, y)$ 。每条等阻力线上的阻力值相等。为方便数学计算, 把缓冲区边界定义为等阻力线, 将求缓冲区边界转化为求特殊值 c_0 。缓冲区的效用边界由物种在单位面积内运动所需克服的累积阻力决定, 所以缓冲区的确定应考虑面积和累积阻力的函数关系, 可表示为:

$$R_{sum} = g(S) \quad (2)$$

对于每一个由等阻力线围成的区域, 其面积 S 和累积阻力 R_{sum} 可表示为:

$$S = \iint_D dx dy, D = \{(x, y) | c = f(x, y)\} \quad (3)$$

$$R_{sum} = \iint_D f(x, y) dx dy, D = \{(x, y) | c = f(x, y)\} \quad (4)$$

由于 R_{sum} 表示阻力的累积值, 所以 $g(S)$ 为单调递增函数(图1), $\frac{dg(s)}{ds} > 0$ 。当 $\frac{dg(s)}{d^2s} = 0$ 时, 可取得 $g'(S)$ 的最小值; 当 $\frac{dg(s)}{d^2s} < 0$ 时, 随着面积的扩大, 区域内累积阻力的增长速率减缓, 此时应继续扩大缓冲区面积, 但其保护效益开始减少; 当 $\frac{dg(s)}{d^2s} > 0$ 时, 区域内累积阻力的增长速率开始上升, 说明随着面积的继续扩张, 缓冲区内的累积阻力将大幅度上升。所以, $\frac{dg(s)}{d^2s} = 0$ 的点即为缓冲区最有效面积的临界点。根据面积可计算出 c_0 , 进而得到缓冲区边界方程。

1.2 廊道

生态廊道包括辐射道和源间联结。生态廊道是由源向外围景观辐射的低阻力通道, 也是外围进入源内的低阻力通道。对于阻力面 $R = f(x, y)$ 上的两点 $A(x_1, y_1)$ 和 $B(x_2, y_2)$, 两点间的生态廊道即使A到达B所需克服阻力最小的路径。在此引入梯度概念, $R = f(x, y)$ 在点 (x, y) 的梯度为:

图1 累积阻力与累计面积的函数关系

Fig. 1 Functional relationship between cumulative resistance and area

$$\text{grad}f(x, y) = (\partial f / \partial x)I + (\partial f / \partial y)j \quad (5)$$

梯度方向是函数 $f(x, y)$ 在点 (x, y) 增长最快的方向, 即沿梯度向量的相反方向 $f(x, y)$ 在点 (x, y) 下降最快。设定起始外围点的坐标 (x_0, y_0) , 在Matlab中运行梯度下降算法, 得到外围点进入源的低阻力通道路径。伪代码为:

Repeat until convergence ($e < e_0$)

{

$$x = x - \alpha \partial f(x, y) / \partial x$$

$$y = y - \alpha \partial f(x, y) / \partial y$$

}

$$e = ((x - x_{last})^2 + (y - y_{last})^2)^{1/2} \quad (6)$$

其中, α 为梯度下降的步长, 控制下降速率。路径寻找结束条件为前后两步的距离小于预设极小值 e_0 。算法同时记录路径经过的 (x, y) 序列, 即为生态廊道。

辐射道的计算基于景观阻力面, 取离某一源距离为 D 的同心圆上的 N 个点, 逐一代入梯度下降模型进行计算, 每个点分别对应一条通向源的路径并记录了路径上每个点的阻力值, 计算 $\min(\sum R_1, \dots, \sum R_n)$, 得到累积阻力最小的路径。对不同距离 D 进行计算, 得到源的多条辐射道。源间联结的识别同理, 分别计算每个源进入其他源的通道, 如果通道存在重合或接近, 说明该通道同时为源A进入源B和源B进入源A的最佳通道, 通道重合数越多则等级越高。

2 应用案例

2.1 研究区域

武陵源风景区(110°20'–110°41' E, 29°16'–29°24' N)位于湖南省张家界市(图2), 由张家界自然保护

区、索溪峪自然保护区、天子山自然保护区和杨家界自然保护区组成, 总面积397.58 km² (尹华光等, 2011)。武陵源风景区属亚热带常绿阔叶林区, 地形、地貌复杂多样, 垂直差异明显, 形成各种不同的山地小气候环境, 为众多物种的生存和发展提供了有利的条件(庄大春等, 2004)。景区内森林覆盖率达85%, 有高等植物3,000余种, 首批列入国家重点保护的珍稀濒危种子植物有35种; 陆生脊椎动物共116种, 包括国家一级保护动物3种, 二级保护动物10种(庄大春等, 2004)。1992年, 联合国教科文组织将其列入《世界自然遗产名录》。随着旅游业的迅速发展, 景区内的生态系统受到的人为干扰日益加剧, 严重影响了区内野生动物的种类、数量和结构, 许多动物从景区消失, 不少动物濒临灭绝。在保存下来的动物中, 也有一部分的生活习性发生了改变(马俊, 2016)。猕猴是武陵源风景区的重点保护物种, 长期以来高强度的旅游开发导致其生境出现了严重的孤岛化和破碎化, 迫切需要进行栖息地的恢复和重建。

2.2 数据来源

本研究所用的相关数据主要包括: (1) 1984年研究区实测1:1万地形图经数字化后建立的DEM数字等高模型; (2) 由于三十多年来植被变化较大, 其植被分布数据由2014年Landsat-5 TM遥感影像基于ENVI平台采用监督分类解译获取, 并通过相关检验; (3) 猕猴种群和栖息地范围通过参考《张家界国家森林公园野生动物资源调查及评价报告》(吴楚材, 2008), 查阅相关文献(庄大春等, 2004; 吴章文, 2008; 成程等, 2013; Huang & Zhou, 2016)并结合实地野外考察获取; (4) 研究区内公路、游步道、索道、

图2 武陵源风景名胜区示意图
Fig. 2 Sketch map of Wulingyuan Scenic and Historic Interest Area

观光电梯等工程设施数据通过查阅相关城建档案获取。

2.3 构建方法

本研究数据预处理、空间分析和数据可视化基于ArcGIS平台,景观斑块指数的计算基于Fragstats软件,而算法的实现则是基于Matlab平台。

2.3.1 景观阻力面构建

景观阻力面的构建考虑源、空间距离和阻力基面特征等3个方面的因素,刻画了从源经过不同阻力的景观所耗费的费用或者克服阻力所做的功(俞孔坚, 1996)。其数学表达式为:

$$R = f(D_{ij} \times ER_i)$$
 (7)

式中, R 表示生物从源到外围运动过程中穿越景观单元*i*所做的功, D_{ij} 为距离阻力, ER_i 为环境阻力。环境阻力因子和权重的确定参考目标保护物种的生活史和生境适宜参数(铁军等, 2014, 2015; 王让虎等, 2014), 其结果见表1。

武陵源风景区目前主要有4个猕猴栖息区域, 分别分布于石家檐、老屋场、袁家界和黄石寨(Huang & Zhou, 2016)。将这4个栖息地作为景观安全格局的4个源, 分别建立景观阻力面。将各阻力因子数据根据其权重进行空间栅格计算, 得到景观阻力分布图(图3), 在此基础上将研究区划分为52,664个100 m × 100 m栅格并作为采样点导入Matlab中构成[52,664, 3]矩阵, 每个样本点包含*x*坐标、*y*坐

表1 环境阻力因子及权重
Table 1 The factors and weights of environmental resistance

阻力因子	Resistance factor	权重	Weight
植被覆盖类型	Vegetation cover type	0.4	
高程	Elevation	0.2	
距水源地的距离	Distance from water	0.1	
距河流的距离	Distance from rivers	0.2	
距公路的距离	Distance from roads	0.06	
距游步道的距离	Distance from walking trails	0.04

图3 单一源的景观阻力面(石家檐)
Fig. 3 Landscape resistance map of Shijiayan

标和阻力值等3个变量。对这些样本点进行多项式回归拟合, 得到阻力拟合面方程, 并生成阻力拟合面。

2.3.2 缓冲区划分

在阻力拟合面上以边界方程 $c_0 = f(x, y)$ 作为缓冲区边界, 并对4个源的缓冲区进行叠置分析(图

4)。叠置层越多表示该区域同时作为多个源的缓冲区,缓冲区级别更高,叠置层最多的区域为核心保护区,对整个安全格局至关重要,是各个源之间的衔接地带。以 c_0 为阈值对阻力分布图的阻力值进行划分,并将4个源的阻力分布图进行栅格叠置分析得到基于阻力分级的缓冲区(图5)。

2.3.3 源的潜在区和生态修复区识别

拟合阻力面得到的缓冲区(图4)是在面积约束条件下对生物保护效益最高的区域。但是,缓冲边界内会存在阻力值较大的点,而边界外则存在阻力值较小的点。对比图4,基于阻力分级的缓冲区(图5)为阻力值低于 c_0 阈值的所有区域,区域之间并不连续,缓冲边界内存在高阻力区(阻力 $\geq c_0$),缓冲边

界外也存在低阻力区(阻力 $\leq c_0$)。缓冲区边界外的低阻力区是与源有一定距离但适合猕猴生存的生境孤岛,可以作为新的猕猴栖息地即源的潜在区。源的潜在区不仅可以有效识别可能的栖息地,也有利于提高现有源的连通性。源的潜在区从缓冲区以内的低阻力区域中选取,选取条件由斑块的猕猴生境适宜度指数(habitat suitability index)、景观异质性、斑块面积和斑块形状4个参数决定(表2)。缓冲区边界内的高阻力区是与源距离较近但不适合猕猴生存的区域,这些区域不利于目标保护物种的扩散,应划为生态修复区。

2.3.4 生态廊道和生态修复关键点识别

在Matlab中对阻力面函数执行梯度下降算法,得到各源的辐射道和源间联结。源间联结是辐射道上的特殊点,从该点到多个源的累计阻力相等,其特殊位置决定其成为相邻源沟通的“跳板”,而这些特殊点与高阻力面上的交叉点(如道路、高强度使用的游步道)则是生态修复的关键点。

2.3.5 景观安全格局构建

将各景观组分叠加,便得到武陵源风景区猕猴目标保护种群的景观安全格局(图6)。

3 结果

3.1 缓冲区和生态修复区

武陵源风景区内猕猴的石家檐栖息地与老屋场栖息地距离较近,是连通性较好的源。但在其缓冲区内存在高阻力区域,主要是十里画廊和天子山景区等客流量大的景点和旅游设施密集区。因此,应将天子山核心景区和天子山索道下站划分为生态修复区,对这两个区域进行重点管制。天子山核心景区内应严格禁止修建游步道,禁止任何人为改

图4 由边界方程划分的缓冲区
Fig. 4 Buffer zone drawn by boundary equation

图5 基于阻力分级的缓冲区
Fig. 5 Buffer zone drawn by resistance ranking

表2 源的潜在区选取因子及权重

Table 2 The factors and weights in selection of new source

因子 Factors	条件 Selecting condition	权重 Weight
猕猴生境适宜度指数[0, 1] Habitat suitability index for <i>Macaca mulatta</i> [0, 1]	≥ 0.7	0.7
景观异质性 Landscape heterogeneity	≥ 2	0.1
斑块面积 Patch area	$\geq 0.4 \text{ km}^2$	0.1
斑块形状指数[0, 1] Patch shape index [0, 1]	≥ 0.6	0.1

图6 猕猴保护的景观安全格局

Fig. 6 Security pattern for the protection of *Macaca mulatta*

变自然原貌的活动, 禁止采集生物标本。天子山索道下站区域应重点进行生态恢复, 禁止新建任何人工设施。

袁家界栖息地和黄石寨栖息地为金鞭溪流域的孤岛状猕猴栖息地。该缓冲区内由于旅游开发强度大, 对猕猴栖息地造成了极大的威胁, 如百龙天梯作为大体量旅游设施不仅阻断了现有栖息地之间的联结, 也对生态景观造成极大破坏。袁家界和黄石寨景区的过度开发使猕猴生境被密集的公路和游步道分割, 导致栖息地质量严重下降。因此, 应严格管制其缓冲区内游客数量; 采用内部机动车环保交通, 限制外来机动车进入; 现有居民应逐渐迁出; 禁止新建旅游设施。

3.2 源的潜在区

武陵源风景区内猕猴的现有栖息地(源)均为块状斑块, 存在穿凿、分割、破碎等空间破坏过程, 栖息地质量较低。而猕猴种群保护需要大面积连续的生境适宜区, 并且各适宜区之间的生态连通性良好。在缓冲区外的低阻力区且和源有一定距离的区域可划分出3个源的潜在区。如图6所示, 源的潜在区①紧邻石家檐栖息地, 位于十里画廊和天子山交界处, 具有重要的生境连通性价值。源的潜在区②位于索溪湖畔, 目前尚未有游客进入, 生境适宜度较高, 通过索溪湖水系可与石家檐、老屋场等现有源相连。袁家界栖息地和黄石寨栖息地是两个较为孤立的栖息地, 应发展潜在的源③来加强栖息地之

间的连通性。

3.3 生态廊道

武陵源风景区内猕猴的各栖息地之间相距较远, 且被自然地形和旅游设施切割, 源与源之间难以连通, 迫切需要建立连接多个源之间的生态廊道, 如建设贯穿老屋场、袁家界、黄石寨栖息地的源间联结廊道和贯穿老屋场、石家檐、源的潜在区②的源间廊道。同时也要构建相邻源之间的多条辐射道。如石家檐栖息地和老屋场栖息地位于十里画廊峡谷两岸, 观光游步道的建设阻断了栖息地之间的连接, 应适当缩短游步道宽度, 并依托自然河流、峡谷和林地建立生态廊道, 并严格限制生态廊道内的人为活动。

3.4 生态修复关键点

源间联结是动物扩散迁移的关键点, 而武陵源风景区猕猴保护物种的若干源间联结点受到旅游开发和当地居民人为活动的严重干扰, 这些点应成为生态修复的关键点。袁家界、黄石寨景点由于游步道密集, 并且穿越部分源间联结点 and 生态廊道, 应在必要联结点处通过设置天桥等方式以利于动物迁徙。

4 结语

景观安全格局理论是对生物保护战略的空间博弈, 试图以最小的代价获取最大的保护效益, 其构建基于最小累积阻力模型。从算法上来看, 相对

于传统的景观安全格局构建方法,运用效用函数可以更加客观定量地判别缓冲区,采用梯度算法识别生态廊道则可以解决传统GIS方法建构最小累积阻力模型时所采用的基于多个源的物种扩散函数与实际生态廊道基于单个源物种扩散函数之间的矛盾。从实际案例来看,本文构建的武陵源风景区猕猴保护种群的景观安全格局,在传统安全格局的基础上识别出了源的潜在区、生态修复区和生态修复关键点,这些都将使景观安全格局理论具有更加针对性的实践价值。

值得注意的是,俞孔坚(1996)构建的缓冲区识别方法可以依据不同的保护要求划分出高、中、低安全格局水平。本文缓冲区的构建更多的是从数学算法的角度试图找出缓冲区的合理边界,但这种边界的划分是一种理想化思维,可能很难适应保护区不断变化的实际情况。本文运用梯度算法进行生态廊道的识别也是根据理想状况,而现实中物种的扩散迁移并不完全按照低阻力区的最短路径进行。另外,本文对景观安全格局算法的研究尚缺乏对其组分生态功能的深入探讨,而景观安全格局理论本身也需要更多野外观测数据的支撑。

参考文献

- Cheng C, Xiao Y, Ouyang ZY, Rao EM (2013) Natural landscape valuation of Wulingyuan Scenic Area in Zhangjiajie City. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 771–779. (in Chinese with English abstract) [成程, 肖隰, 欧阳志云, 饶恩明 (2013) 张家界武陵源风景区自然景观价值评估. *生态学报*, 33, 771–779.]
- Feng SH, Sha R (2006) On ancient village scenery field theory and scenery safety pattern. *Geography and Geo-information Science*, 22, 91–94. (in Chinese with English abstract) [冯淑华, 沙润 (2006) 古村落场理论及景观安全格局探讨. *地理与地理信息科学*, 22, 91–94.]
- Forman RT (1995) *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Huang GP, Zhou NX (2016) *Geodesign in developing countries: The example of the master plan for Wulingyuan National Scenic Area, China*. *Landscape and Urban Planning*, 156, 81–91.
- Li H, Yi N, Yao WJ, Wang SQ, Li ZY, Yang SH (2011) Shangri-La County ecological land use planning based on landscape security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 5928–5936. (in Chinese with English abstract) [李晖, 易娜, 姚文璟, 王思琪, 李志英, 杨树华 (2011) 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. *生态学报*, 31, 5928–5936.]
- Li J, Zhang YY, Zhu YM (2017) Research on biodiversity conservation of Beidaihe New District based on landscape security pattern. *Research of Soil and Water Conservation*, 24, 306–310. (in Chinese with English abstract) [李静, 张莹莹, 朱永明 (2017) 基于景观安全格局的北戴河新区生物多样性保护研究. *水土保持研究*, 24, 306–310.]
- Li JH, Liu XH (2006) Research of the nature reserve zonation based on the least-cost distance model. *Journal of Natural Resources*, 21, 217–224. (in Chinese with English abstract) [李纪宏, 刘雪华 (2006) 基于最小费用距离模型的自然保护区功能分区. *自然资源学报*, 21, 217–224.]
- Ma J (2016) Biodiversity protection strategy under the background of ecological environment threshold and the tourism carrying capacity—According to the core of the world natural heritage Wulingyuan Scenic Area as an example. *Economic Geography*, 36, 195–202. (in Chinese with English abstract) [马骏 (2016) 基于生态环境阈限与旅游承载力背景下生物多样性保护策略研究——以世界自然遗产武陵源核心景区为例. *经济地理*, 36, 195–202.]
- Tie J, Jin S, Chen YB, Qin YY, Zhang GP, Ru WM (2014) Floristic characteristics of food plants of *Macaca mulatta* in Manghe National Nature Reserve Shanxi, China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 34, 1482–1488. (in Chinese with English abstract) [铁军, 金山, 陈艳彬, 秦永燕, 张桂萍, 茹文明 (2014) 山西蟒河国家级自然保护区猕猴食源植物区系特征. *西北植物学报*, 34, 1482–1488.]
- Tie J, Li YF, Wang X, Bai FL, Cui FT, Jin S (2015) Species diversity of forest community in *Macaca mulatta* habitat in Lishan National Nature Reserve, Shanxi. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 3009–3015. (in Chinese with English abstract) [铁军, 李燕芬, 王霞, 白凤麟, 崔方天, 金山 (2015) 山西历山国家级自然保护区猕猴栖息地森林群落物种多样性. *生态学杂志*, 34, 3009–3015.]
- Wang RH, Li XY, Zhang SW, Li YB, Cao C (2014) Research for landscape ecological security pattern and early warning in farming-pastoral zone of Northeast China—a case study on Tongyu County in Jilin Province. *Geography and Geo-information Science*, 30, 111–115. (in Chinese with English abstract) [王让虎, 李晓燕, 张树文, 李艳博, 曹琛 (2014) 东北农牧交错带景观生态安全格局构建及预警研究——以吉林省通榆县为例. *地理与地理信息科学*, 30, 111–115.]
- Wang SY, Ou MH (2013) Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 4425–4435. (in Chinese with English abstract) [王思易, 欧名豪 (2013) 基于景观安全格局的建设用地管理分区. *生态学报*, 33, 4425–4435.]
- Wu CC (2008) *Research on Tourism Resources of Zhangjiajie National Forest Park*. China Tourism Press, Beijing. (in Chinese) [吴楚材 (2008) 张家界国家森林公园本底旅游资源研究. 中国旅游出版社, 北京.]
- Wu ZW (2008) *Research on Landscape Tourism Resources of Zhangjiajie National Forest Park*. China Tourism Press, Beijing. (in Chinese) [吴章文 (2008) 张家界国家森林公园景

- 观旅游资源研究. 中国旅游出版社, 北京.]
- Yao Y, Zhang P, Yan LJ, Fan J (2011) Risk pattern analysis of soil erosion based on RUSLE and SP—A case study of Diebu County, Gansu Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 31, 161–167. (in Chinese with English abstract) [姚好, 张沛, 严力蛟, 樊吉 (2011) 基于RUSLE和景观安全格局的土壤侵蚀风险格局研究—以甘肃省甘南藏族自治州迭部县为例. *水土保持通报*, 31, 161–167.]
- Yin HG, Fei JJ, Xie S (2011) A perception research on the residents benefits of scenic spot from the perspective of ecological tourism—A case study of Wulingyuan Scenic Area. *Journal of Hunan University (Social Sciences)*, 25(5), 81–87. (in Chinese with English abstract) [尹华光, 费建杰, 谢莎 (2011) 生态旅游视角下景区居民利益感知研究——以武陵源风景区为例. *湖南大学学报(社会科学版)*, 25(5), 81–87.]
- You WB, He DJ, Hong W, Wu LY, Ji ZR, You HM, Tan Y, Zheng XY (2014) Identification for tourism disturbance sensitive areas and protection based on landscape security pattern in world mixed heritage site Wuyishan Scenery District. *Mountain Research*, 32, 195–204. (in Chinese with English abstract) [游巍斌, 何东进, 洪伟, 巫丽芸, 纪志荣, 游惠明, 谭勇, 郑晓燕 (2014) 基于景观安全格局的武夷山风景名胜区旅游干扰敏感区判识与保护. *山地学报*, 32, 195–204.]
- Yu KJ (1996) Security patterns and surface model and in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 36, 1–17.
- Yu KJ, Wang SS, Li DH, Li CB (2009) The function of ecological security patterns as an urban growth frame work in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1189–1204. (in Chinese with English abstract) [俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波 (2009) 北京市生态安全格局及城市增长前景. *生态学报*, 29, 1189–1204.]
- Zhuang DC, Deng XZ, Zhan JY (2004) Assessment of the environmental quality for Wulingyuan Scenic Spot in Hunan Province. *Geographical Research*, 23, 192–200. (in Chinese with English abstract) [庄大春, 邓祥征, 战金艳 (2004) 武陵源风景区环境质量评估. *地理研究*, 23, 192–200.]

(责任编辑: 马克明 责任编辑: 黄祥忠)