

自然保护区分区方法的解析与比较

张娜¹, 周静波^{2*}, 郑志元¹

(1. 合肥工业大学建筑与艺术学院, 合肥 230009; 2. 安徽林业职业技术学院资源与环境系, 合肥 230031)

摘要: 分区是自然保护区经营和管理的有效工具, 致以确保自然资源的安全性, 并为发展社会经济实现可持续发展奠定基础。因此, 是否具有科学性和实际操作性的分区方法是解决自然保护区各种冲突最为关键的因素。从自然保护区分区方法的起源、内涵、作用机理以及应用等方面进行梳理, 辨析自然保护区各种分区方法的优劣性, 提出目前自然保护区分区方法所存在的问题和解决的途径。

关键词: 自然保护区; 分区方法; 种群生存力分析; 栖息地分布模型; 最小费用距离法

中图分类号: Q16

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)05-0862-06

Dissection and evaluation of the Zoning method for nature reserve areas

ZHANG Na¹, ZHOU Jingbo², ZHENG Zhiyuan¹

(1. College of Architecture & Art, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. Department of Resources & Environment, Anhui Vocational & Technical College of Forestry, Hefei 230031)

Abstract: Zoning is an effective tool for managing nature reserve areas; therefore a scientific and practical zoning method is critical for dealing with conflicts of nature reserve. Reasonable zoning can make a sustainable development of nature reserve areas by protecting natural resources, and meanwhile develop the social economy. In this paper, different zoning methods were analyzed based their origin, connotation, mechanism, application and other aspects. Moreover, the pros and cons of the various zoning methods among the current nature reserves were summarized. Finally, problems existed in zoning methods were discussed and the putative solving strategies were proposed.

Key words: nature reserve; zoning method; population viability analysis; habitat distribution model; minimum cost distance model

随着人类活动的不断加强和经济活动范围的扩大, 全球范围内适宜于生物生存的栖息地面积在不断减少和破碎化。生境的丧失和斑块化致使各种种群间很难实现基因交流, 因此遗传多样性丧失严重, 生物多样性保护受到严重威胁。由于自然保护区能够就地保护生态系统和自然环境, 维持目标物种在其自然环境中具有生存力的群体, 因此它是减缓物种灭绝速率、保护生物多样性最为有效的途径。

分区是自然保护区管理和经营的有效工具^[1], 自 1974 年联合国教科文组织正式建议把生物圈划分为“核心区/缓冲区/实验区”这一同心圆模式之后, 对于如何有效分区一直是各国学者研究的热点。目前, 针对 3 区划分方式不同的区域有不同的分区方

法, 如核心区存在种群生存力分析法、栖息地模型法和最小费用距离模型等分区法, 缓冲区有等宽度分析法、层次分析法和景观阻力面分析法等。本研究试图通过对自然保护区各种分区方法进行探讨, 寻求自然保护区最为有效的管理措施。

1 种群生存力分析

以岛屿生物地理学为理论起源的种群生存力分析法 (PVA), 通过分析和模拟种群动态过程建立灭绝概率与种群数量之间的关系, 为濒危物种保护提供了重要的理论依据和研究途径^[2]。PVA 是保护生物学的基础理论^[3], 1981 年 Shaffer^[3]在采用种群随机模型研究黄石公园棕熊的种群生存力时候首次明确提

收稿日期: 2017-03-02

基金项目: 中央高校基本科研业务项目 (JZ2015HGXJ0168) 资助。

作者简介: 张娜, 博士, 讲师。E-mail: 631941689@qq.com

* 通信作者: 周静波, 教授。E-mail: 515911792@qq.com

出了最小可存活种群 (minimum viability population, MVP) 概念, 认为在随机干扰的状况下, 能够有 99% 机率存活 1 000 年的种群就是最小可存活种群, 而随机干扰又包括种群统计随机性、环境随机性、自然灾害随机性和遗传随机性^[4]。Clark 和 Seebeck^[5]则将 PVA 定义为能够使得野生动物管理者利用计算机对小种群灭绝过程进行模拟的程序, 即保证种群在一个特定的时间内能够健康生存所需的最小有效数量, 低于这个阈值种群会逐渐趋向绝灭^[6]。不同大小种群对随机干扰的反应是不同的, 在没有系统压力下, 大种群对随机干扰不敏感, 种群不易绝灭; 而小种群对随机干扰极为敏感, 种群易绝灭。因此, PVA 主要研究小种群的随机绝灭问题^[7]。

种群脆弱性分析是最近应用于确定最小存活种群的方法^[8], Shaffer 指出群落或生态系统随着环境的改变某些物种总是表现出比其他物种更为敏感, 并且在生态系统功能明显退化之前此种群数量最先下降, 此物种可称之为最脆弱的物种, 最脆弱的物种最先绝灭。如果群落或生态系统中最脆弱的物种能够在自然保护区中长期存活, 则群落或生态系统中的其他物种亦能长期存活^[4], 因而对生态系统中关键种生存力的研究是界定系统生存力最适用的途径^[9]。它采用数学模型和蒙特卡洛方法模拟种群动态, 评估随机因素的作用机制, 预测种群未来的变化趋势 (增长/下降)^[2], 其目的是制定最小可存活种群, 把绝灭减少到可接受的水平。PVA 和 MVP 在内涵方面是紧密相关的, PVA 是调查各种确定性

和随机性因素对某个特定物种相对性和累积性的影响, 而 MVP 则是为此种群基于涡旋灭绝之上的种群规模阈值^[10]。目前已提出了 5 类估计濒危物种绝灭风险的种群生存力分析模型, 即: 分析模型、单种群确定性模型、单种群随机模型、异质种群模型和显空间模型^[11]。种群生存力分析是正在迅速发展的新方法, 在对孤立种群的动态研究中得到了广泛应用, 已成为保护生物学的研究热点。如缪沪君等^[12]利用漩涡模型预测了鄱阳湖区獐种群在未来 100 年内的种群变动趋势; 张泽钧等^[13]对唐家河大熊猫未来 100 年内的种群动态进行了模拟; Frick 等^[14]则利用种群生存力原理讨论了风能基础设施的建设对蝙蝠种群生存的影响。在应用 MVP 理论指导自然保护区核心区设计时可分为 3 步: 首先, 判断出最脆弱的物种, 或者关键种; 其次, 计算出在理想种群模型下最小存活的种群数量, 即有效种群数量; 再次, 通过有效种群数量和该物种在野外生境中自然分布的种群密度计算出实际种群数量, 从而判断出核心区所需要的最小面积。虽然 PVA 在珍稀濒危野生动物保护政策和管理中最为有价值的技术, 但是其需要大量的生物学数据, 而这些数据从即将灭迹的小种群物种很难获得^[15], 并且一些濒危物种种群统计学数据质量差和种群动态的有关假说模糊不清可能影响到模型预测的准确性^[16]。

2 栖息地分布模型法

栖息地是指由野生动物物种或者其他一些物种

表 1 栖息地评价方法的优劣分析

Table 1 Advantage and disadvantage analysis of habitat evaluation methods

评价方法 Method of evaluation	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	案例 Case
实地勘测法 GBM	根据实地放样勘测动物存在的痕迹, 从而达到对物种栖息地的适宜性进行判断, 如老虎的挂爪、毛发等。	需要大量的人力和时间, 并且由于区域面积较大不能够一次性完成放样勘测, 因此存在一定的限制性。	—
主成分分析和判别式功能分析法 PCA+DFA	PCA 数据是基于观察个体物种筛选的结果, 结合 DFA 分析从而判断出栖息地的分化格局和两个物种的偏爱性。适宜用于同域内 2 个以上物种栖息地适宜性分析。	实例的筛选会存在误差。由于 DFA 是对两个物种进行观察, 因此其将只产生一种判别功能。这将限制单独性分析的功能, 使得对两个物种相对位置的功能判别比较困难。	Habib 等 ^[20] 利用主成分分析和功能判别分析法对 Pathri Rao 地同区域内 4 种有蹄类物种的栖息地适宜指数进行分析。
二项多元逻辑斯谛回归法 BMLR	“二项多元逻辑斯谛回归”的应用是一种相对较为新的预测模型数据技术, 其是一种回归形式, 因变量是二分变量, 自变量是连续的。	以这种方式估计某些事件的发生概率, 其缺乏实际资料的证明。	Imam 和 Kushwaha ^[22] 提出通过多元逻辑回归评估印度 Chandoli 国家公园老虎栖息地适宜指数。
基于 GIS 的多标准判定分析法 G-MCA	考虑到了栖息地的各种影响因素, 其中包括物理因素、生物因素以及人为干扰因素。	在使用模糊层次分析法对各个参数进行权重赋值时存在很大的主观性。	Sinha 等 ^[1] 利用层次分析法和基于 GIS 的多标准判定分析法对印度 Sariska 老虎栖息地适宜性进行分析。

种群所占据的某一物种地方的环境场地的总和^[17]。生境一词最早由美国的 Grinnel 于 1917 年提出,指的是生物的居住场所,即生物个体、种群或群落能在其中完成生命过程的空间^[18]。所有物种对栖息地都有特定的要求,这可以认为是栖息地需求因子。这些因子综合在一起就构成了栖息地的关键特征,如植被、土壤和景观元素的空间结构^[19]。很多学者采用栖息地分布模型对物种栖息地的适宜性进行分析,而栖息地模型的指数叠加形式是采用地理信息系统环境分析执行^[20]。

栖息地的评价方法在初始时期主要是利用野外的抽样调查数据对目标物种栖息地的适宜性进行判断,近年来随着遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)等技术的不断发展,3S技术以其在空间数据的获取和分析方面的巨大优势成为野生动物栖息地研究的有效工具。栖息地的评价方法主要有主成分分析法、判别式功能分析、二项多元逻辑斯谛回归法以及基于GIS的多标准判定分析(G-MCA),如Sinha等利用层次分析法对Sariska国家公园老虎栖息地进行分析^[1],Galluzzi等^[21]基于逻辑回归算法对意大利阿尔卑斯山脉中部Adamello Brenta自然公园高山旱獭种群生存状况进行研究,表1则分析了栖息地分布模型中评价方法的优缺点以及案例应用。利用栖息地模型分布法可以判断目标物种在保护区内的适宜分布空间,从而确定自然保护区的核心区域,共分为4个步骤:①确定目标物种,建立栖息地适宜指数的评价程序;②将选择因素的主题图层输入计算机;③用GIS进行空间数据分析,描述栖息地因子的数据光栅处理,每个因子是存储在其自己的地图图层,并通过回归模型确定物种适宜的栖息地;④确定核心区的位置及面积。

3 最小费用距离模型分区法

最小费用距离(Lest-cost)模型是一种基于图论的度量方法^[23],其结合了景观中详细地理信息和生物体的行为特征。最小费用距离是指从源经过不同阻力的景观所耗费的费用或者克服阻力所作的功,该模型能够测定多种空间运动过程,它实质上反映了异质景观对某种空间运动过程的综合阻力^[24]。“源”是物种扩散和维持的原点,它具有内部同质性和向四周扩张或向“源”本身汇集的能力,因此“源”应该具有代表性,并且它需要能够充分反映

保护区的生境要求,其可以由被保护物种或现存生境构成^[25]。最小费用距离计算的是一种加权距离,它与空间距离相似,但是它计算的是从目标斑块到最近“源”斑块的累积费用距离而非实际的空间距离,费用的概念抽象地反映出了移动过程中克服阻力所要做的功的大小^[26]。最小费用模型如下:

$$N_{i+1} = N_i + \sqrt{2}(r_i + r_{i+1})/2 \quad (1)$$

$$N_{i+1} = N_i + \sqrt{2}(r_i + r_{i+1})/2 \quad (2)$$

N_i 为所在单元*i*的累积费用; r_i 为所在单元*i*的阻力系数; N_{i+1} 为所在单元*i+1*的累积费用; r_{i+1} 为所在单元*i+1*的阻力系数;*i*:源单元;*i+1*:目标单元。其算法采用节点/链接的表示方式,如图1所示,对于任意一个既定的从单元*N_i*至单元*N_{i+1}*的移动,累积费用为达到单元*N_i*的费用加上从单元*N_i*至单元*N_{i+1}*的平均费用,见式(1),由于模型基于一个八邻单元结构,因此要考虑生物体有时作对角运动。如果从单元*i*前往4个对角相邻的单元,其费用距离的计算公式见式(2)^[23]。最小费用距离图层可以通过ArcGIS软件中费用距离模块生成,其中源图层和阻力图层作为模块的输入图层。目前,最小费用模型中的阻力层主要源于土地覆盖类型。由于生物体在不同土地覆盖类型中的渗透性和适宜性存在很大区别,因此,合理的土地覆盖分类是最小费用模拟过程的重要步骤之一。曲艺和栾晓峰^[28]以最小费用距离模型作为系统框架,综合植被类型、地形、人类影响等因素,确定了黑龙江东部山区的东北虎核心栖息地分布,并提出目前东北虎的保护空缺。利用最小费用距离模型判断保护地核心区流程如下:首先根据实际勘测到的目标物种栖息地确定“源”,其次根据景观要素的特征(一般为土地覆盖类型)明确阻力层和阻力系数,然后根据GIS中COST DISTANCE模型确立阻力面和最小费用路径,最后结合生态安全水平的要求标准明确核心区的边界。

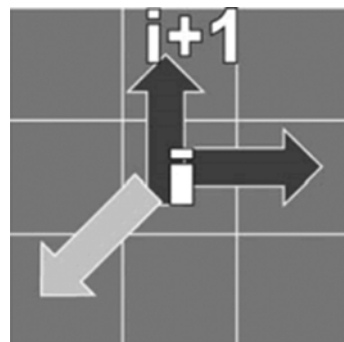


图1 最小费用距离模型^[25]

Figure 1 Model of minimum cost distance

4 景观阻力面分析法

孤立的栖息地岛屿和海洋岛屿不仅是依赖从源区的距离,也依赖于中间的景观的特征。对于后者 Knaapen 在 1992 年建议使用“最小累积阻力(MCR)”来计算,并且最先应用于荷兰西部的新森林规划^[29]。最小累积阻力模型指物种在从源到达目的地运动过程中所需耗费代价的模型,国内学者俞孔坚^[30],陈利顶和傅伯杰^[31]根据 Knaapen 等的模型和地理信息系统中常用的费用距离修改,公式如下:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (3)$$

其中 f 是一个未知的正函数,反映空间中任一点的最小阻力与其到所有源的距离和景观基面特征的正相关性关系。 D_{ij} 是物种从源 j 到空间某一点所穿越的某景观的基面 i 空间距离; R_i 是景观 i 对某物种运动的阻力。尽管函数 f 通常是未知的,但 $(D_{ij} \times R_i)$ 累积值可以作为对物种从源到空间某一点的某一路径相对易达性的衡量指标。其中从所有源到该点阻力的最小值被用来衡量该点的易达性,因此,阻力面反映了物种运动的潜在可能性及趋势^[30],并通过单元最小累积阻力的大小可判断该单元与源单元的“连通性”和“相似性”。在 MCR 阻力面基础上,可以作两种曲线,一种曲线是从某一源到最远离源的某一点作一条垂直于阻力线的剖面曲线,得到的是 MCR 与离源距离的关系曲线;另一条曲线是 MCR 值与面积的关系曲线。在一般情况下可以假设这 2 种曲线都有某些阶段性门槛的存在,即随着缓冲区边界向外围的扩展景观对物种的阻力随之增加,但这种增加并不是均匀的,有时平缓而有时则非常陡峻,根据这些门槛值就可以确定相应空间格局缓冲区的有效边界,从而实现对缓冲区的有效性划分^[32]。MCR 为计算基于网格的地图上估计景观类型扩散阻力一个简单模型,虽然其应用受到一定的限制约束,但该模型在地理规划和自然保护方面非常有益^[33],它的贡献在于其认识到生物空间运动的潜在趋势与景观格局改变之间的关系。最小累积阻力模型虽起源于物种扩散过程的研究,但并不局限于特定的具体的生态过程,近些年来该模型已经应用到了模拟城市土地演变过程。

5 层次分析法

因为不同的核心区受外界影响的程度不同,所以其理论上不可能具有相同宽度;即使同一个核心

区,由于周边不同地带受影响的程度不同,所以其宽度也应视周边区段的不同而将核心区周围按所受影响程度不同分为若干段^[32]。李文军和王子健^[34]提出了一个数学模型,利用层次分析法对盐城丹顶鹤自然保护区的缓冲带进行设计,在这个模型中主要考虑 5 方面的因素:物种对人为干扰的敏感性;保护区周边的常住人口;当地居民对保护区内资源的需求;旅游者进入缓冲区的频率;以及核心区周围的地形地貌。使用 AHP 法设计缓冲区的宽度,需要基于以下几个步骤:①确定可供选择的缓冲区宽度;②确定影响缓冲区宽度的因素;③生成分析层,评估每个影响因素的重要性以及每个影响因素的抉择的优先性;④确定每个可供选择的缓冲区宽度的相对优先性,同时计算缓冲区的宽度。

$$B_i = D + K_i \times D$$

$$K_i = f(K_{ai} + K_{bi} + K_{pi} + K_{si}) \quad (4)$$

B_i 是第 i 段的缓冲带宽; D 是一个核心区的缓冲带最小宽度,它反应了物种对人为干扰的敏感程度, D 的值由野外对物种的行为生态考察而得,即人类能够接近而不干扰物种的最近距离; K_i 是反应其他 4 种因素的一个综合系数。

6 等宽法

等宽法在缓冲区的设计中是非常普遍的一种方法,它是以核心区的外围边界为界限,距离核心区边界线同等距离环绕核心区,所得的等宽度的面域即为缓冲区,MAB 采用的就是此方式,我国很多自然保护区的缓冲区的划分法也是采用此法。但是对于缓冲区的宽度究竟应该为多少,却没有形成统一的意见。巴西的 Amazonia 地区所有的自然保护区都被统一地设以 10 km 宽的缓冲带^[35];陈顶利等^[36]在以卧龙自然保护区为例探讨自然保护区景观结构设计 with 物种保护关系时,提出以核心区源点 3 km 外围等距线为缓冲区的边界线。关于自然保护区外围缓冲区边界线等宽法的划分是一种很笼统很模糊的提法,并没有非常可信的科学依据。

7 结论

以上是对自然保护区分区方法的剖析,这几种方法是目前自然保护区功能分区的主要依据,同时也为濒危物种保护提供了重要的理论依据和研究途径。但是它们还存在一定的不足,以下就是对上述几种方法的优点和缺点进行对比分析。

除了以上几种较为常用的分区法之外,还存在一些分区方法,如聚类分析方法、景观适宜性指数

法、欧式距离法等。但是这些分区方法在功能分区的实践中只考虑到了目标物种的特性而忽视了目标物种承载体（即自然环境）的特性，因而自然保护区的分区方法还需要进一步完善，这也是未来自然保护区功能分区管理最为重要的任务。以上几种分区方法所存在的问题如下：①只注重生物个体或者种群生存的空间适宜性分布，忽视了它们所存在的栖息地生态系统是个有机的整体，对于自然保护区的生态系统稳定性和生态系统敏感性等其他生态属性问题缺乏评估和判断；②以上几种分区方法只

是针对自然保护区的核心区或者缓冲区某一个区域划分的方法，因此，对于同一个自然保护区不同的区域边界的界定需要不同的评估方法，而以上方法缺乏一个统一的判断标准；③分区方法自身都还存在一定的缺陷。如种群生存力分析法在确定有效种群时候所考虑到的杂合丧失因素缺乏科学的依据，并且没有绝对适用的 MVP；最小费用模型和景观阻力面分析法局限性在于无法科学确立阻力层和阻力系数。

表 2 自然保护区分区方法优劣对比分析
Table 2 Analysis of zoning methods for nature reserve

区域 Area	方法 Method	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
核心区 Core area	种群生存力分析法	通过分析和模拟种群动态过程，建立灭绝概率与种群数量之间的关系。	在确定有效种群时候所考虑到的杂合丧失因素缺乏科学的依据；最小面积计算本身还存在很多争议，没有绝对适用的 MVP。
	栖息地适宜性模型法	基于目标物种的生态习性，能够探求适宜性栖息地的分布空间，为物种保护提供重要的依据，是目前比较通用的方法之一。	其自身又具有很多评价方法，广泛接受的是基于 GIS 的多标准判定分析。在使用模糊层次分析法确定各个参数权重时存在很大的主观性。
	最小费用模型法	可直观形象地描绘出物种在异质景观中的扩散状况，且可在 GIS 程序包中实现简便运算和适度的数据需求量。	局限性在于无法科学确立阻力层和阻力系数。
缓冲区 Buffer area	层次分析法	量化核心区外围不同地段的缓冲区宽度，构建了缓冲区宽度和影响因素的数量关系。	它要求缓冲区的宽度是原定可供选择的范围，而其范围的标度本身就是非常主观的。
	景观阻力面分析法	认识到生物空间运动的潜在趋势与景观格局改变之间的关系。	同最小费用模型一样，存在阻力层和阻力系数确立困难的问题。
	等宽法	简单、便捷。	缺乏科学性的依据，其没有考虑不同地段的自然保护影响因素和自然保护区自身生态系统特征。

基于以上几种分区方法的优劣性，本研究认为可以通过对种群生存力方法、栖息地模型法以及最小费用距离模型（或景观阻力面分析法）的优势组合重新构建一个分区方法——首先，通过种群生存力分析法确定最小种群数量；其次，通过栖息地分布模型评估能够满足最小种群生存的适宜性栖息地，从而科学划分出满足保护目标物种生存的核心区面积；再次，依据自然保护区生态稳定性和生态敏感性的评估结果对整个自然保护区的核心区和缓冲区进行调整划分。此方法的优点在于将保护物种所存在的栖息地生态系统作为一个有机整体进行考虑，缺点在于并不能够解决维持种群生存力的最小临界值问题。希望在以后的研究中能够继续对种群生存力进行深入研究，明确每个物种维持永久（至少 1 000 年）存在的最小数量，如果目标物种永久存在的最小种群数量和目标物种生存的领地面积被确定，就能够判断出保护目标物种的最小保护地面

积；结合栖息地适宜性分布模型法，保证自然保护区具有充足适宜目标物种最小种群生存和发展的面积；从景观生态学角度对于干扰的程度和区域进行有效的分区控制，则自然保护区就能够得到很好的保护。

参考文献：

- [1] SINHA S, SHARMA L, NATHAWAT M S. Retrieving tiger habitats: Conserving wildlife geospatially[J]. J Appl Remote Sens, 2011, 2(1): 1-5.
- [2] 田瑜, 邬建国, 寇晓军, 等. 种群生存力分析 (PVA) 的方法与应用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 257-256.
- [3] SHAFFER M L. Population viability analysis[J] Conservation Biology, 1990, 4(1): 39-40.
- [4] SHAFFER M L. Minimum population sizes for species conservation [J]. BioScience, 1981, 31(2): 131-134.
- [5] CLARK T W, SEEBECK J H. Management and conservation of small populations[C]//Conference on the Management and Conservation of Small Populations (1989: Royal Melbourne Zoological Gardens). Chicago Zoological So-

- ciety, 1990.
- [6] 徐宏发, 陆厚基. 最小存活种群(MVP)-保护生物学的一个基本理论[J]. 生态学杂志, 1996, 15(2): 25-30.
- [7] 李义明, 李典漠. 种群生存力分析研究进展和趋势[J]. 生物多样性, 1994, 2(1): 1-10.
- [8] SOULÉ M E, SIMBERLOFF D. What do genetics and ecology tell us about the design of nature reserves?[J]. Biol Conserv, 1986, 35(11): 19-40
- [9] SOULÉ M E. What is conservation Biology [J]. BioScience, 1985, 35(11): 727-734.
- [10] THOMAS C D. What do real population dynamics tell us about minimum population sizes[J]. CONSERV BIOL, 1990, 4(3): 324-327.
- [11] 李义明. 种群生存力分析: 准确性和保护应用[J]. 生物多样性, 2003, 11(4): 340-350.
- [12] 缪泸君, 李言阔, 叶晶, 等. 鄱阳湖区獐种群生存力分析[J]. 四川动物, 2015, 34(1): 133-140.
- [13] 张泽钧, 胡锦涛, 吴华, 等. 唐家河大熊猫种群生存力分析[J]. 生态学报, 2002, 22(4): 990-997
- [14] FRICK W F, BAERWALD E F, POLLOCK J F, et al. Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat [J]. Biol Conserv, 2017, 209: 172-177.
- [15] MURPHY D D, FREAS K E, WEISS S B. An "environment-meta- population" approach to population viability analysis for a threatened invertebrate [J]. Conserv Biol, 1990, 4(1): 41-51.
- [16] LINDENMAYE D B, CLAR T W, LACY R C. Population viability analysis as a tool in wildlife conservation policy: With reference to australia[J]. Environ Manage, 1993, 17(6): 745-758.
- [17] SINGH G, VELMURUGAN A, DAKHATE M P. Geospatial approach for tiger habitat evaluation and distribution in Corbett Tiger Reserve, India[J]. J Indian Chem Soc, 2009, 37(4): 573-585.
- [18] ROY PS, RAVAN SA, RAJADNYA N, et al. Habitat suitability analysis of *Nemorhaedus goral*: A remote sensing and geographic information[J]. Curr Sci India, 1995, 69(8): 685-691
- [19] STORE R, KANGAS J. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS based habitat suitability modeling[J]. Landscape Urban Plan, 2001, 55(2): 79-93.
- [20] HABIB B, DAR T A, KHAN J A, et al. Evaluation of habitat suitability models for four sympatric ungulate species in Pathri Rao Watershed adopting geo-statistical modelling[J]. Curr Sci India, 2010, 99(4): 500-506.
- [21] GALLUZZI M, ARMANINI M, FERRARI G, et al. Habitat suitability models for ecological study of the alpine marmot in the central Italian Alps[J]. Ecol Inform, 2017, 37: 10-17
- [22] IMAM E, KUSHWAHA S P S. Habitat suitability modeling for Gaur (*Bos gaurus*) using multiple logistic regression, remote sensing and GIS[J]. J Appl Anim Res, 2013, 41(2): 189-199.
- [23] CHARDON J P, ADRIAENSEN F, MATTHYSEN E. Incorporating landscape elements into a connectivity measure: a case study for the Speckled wood butterfly (*Pararge aegeria* L.)[J]. Landscape Ecol, 2003, 18(6): 561-573.
- [24] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 基于最小费用模型的景观连接度评价[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 2042-2048.
- [25] 李纪宏, 刘雪华. 基于最小费用距离模型的自然保护区功能分区[J]. 自然资源学报, 2006, 21(2): 217-224.
- [26] ADRIAENSEN F, CHARDON J P, DE BLUST G, et al. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model[J]. Landscape Urban Plan, 2003, 64(4): 233-247.
- [27] NIKOLAKAKI P. A GIS site-selection process for habitat creation: estimating connectivity of habitat patches[J]. Landscape Urban Plan, 2004, 68(1): 77-94.
- [28] 曲艺, 栾晓峰. 基于最小费用距离模型的东北虎核心栖息地确定与空缺分析[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1866-1874
- [29] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape Urban Plan, 1992, 23(1): 1-16.
- [30] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [31] 陈利顶, 傅伯杰. 景观连接度的生态学意义及其应用[J]. 生态学杂志, 1996(4): 37-42, 73.
- [32] 李文军, 王子健. 地理信息系统用于自然保护区的设计[J]. 中国生物圈保护区, 1997, 4(4): 18-22.
- [33] YU K. Security patterns and surface model in landscape ecological planning[J]. Landscape Urban Plan, 1996, 36(1): 1-17.
- [34] 李文军, 王子健. 盐城自然保护区的缓冲带设计—以丹顶鹤为目标种分析[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 843-847.
- [35] PERES C A, TERBORGH J W. Amazonian nature reserves: an analysis of the defensibility status of existing conservation units and design criteria for the future[J]. Conserv Biol, 1995, 9(1): 34-46.
- [36] 陈利顶, 刘雪华, 傅伯杰. 卧龙自然保护区大熊猫生境破碎化研究[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 291-297.