

野生动物生境景观连通性综述

杨娅楠^{1,2}, 王金亮¹, 习晓环², 王成²

(1. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094)

摘要: 分析了野生动物生境景观连通性的国内外研究进展, 如生境景观连通性在生境破碎化分析、保护区规划和空间格局分析中的应用等, 并对基于图论和渗透理论以及模型模拟等方法, 开展连通性研究的方法进行深入分析。探讨了当前在生境景观连通性研究中存在的问题, 认为要合理设置并建立生物廊道, 这不仅是保护野生动物生境的重要手段, 也是野生动物生境生态网络研究的重要方向。

关键词: 生境; 景观连通性; 野生动物; 综述

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-9655 (2015) 03-0010-06

DOI:10.13623/j.cnki.hkdk.2015.03.004

生境 (habitat) 一词最早由美国 Grinnell 于 1917 年提出, 指生物生活的生态地理环境, 包括生物必需的生存条件以及其他对生物起作用的生态因素。野生动物为了生存 (如觅食、繁殖或者逃避敌害等) 对生境要素与生境结构做出反应, 进而确定其适应的生境。

生境质量对生物的种群数量和个体质量会产生重要影响^[1], 生境研究可以作为野生动物保护成效评价的一个方向, 其研究内容主要包括生境的适宜性、分布格局、破碎化以及保护区的建立等方面^[2]。生境景观连通性是影响生境景观斑块分布格局、景观破碎程度和进行保护区分布管理的一个重要度量指标。

随着景观生态学的引入, 生境景观连通性的分析由生境景观格局的定量分析逐步转向生境景观生态过程分析, 以及人类活动、经济发展、社会影响等复合因素作用下的生态功能的动态变化分析。

开展野生动物生境景观连通性研究, 构建生境景观连通性的研究, 意义在于: 保证野生动物生境景观斑块之间物质、能量、信息的流通, 从网络层面维持种群数量的动态平衡, 为物种的迁移提供合适的廊道, 促进种群间的基因交流, 加快生态功能流的流通速度, 强化生境斑块的联系程度^[3]。在全球变化背景下, 对野生动物生境景观连通性开展

研究, 有助于发现并迎接全球变化下的物种生境适宜斑块的丧失和破碎化给生物多样性保护带来的新问题和挑战, 意识到生物多样性保护必须由单纯的物种保护上升到生境景观的保护^[4]。

从理论基础到实践方法方面分析野生动物生境景观连通性的概念、测定方法和应用, 并指出其存在的问题, 未来研究方向, 可为保护野生动物生境保护提供科学依据。

1 生境景观连通性内涵

1.1 生境景观连通性定义

Forman 等^[5]将测定连接景观中的廊道或基质在空间上连续的指标定义为景观连通性。Philip 等^[6]提出景观连通性是衡量景观中能量供应、资源链接、生物运动等的重要因素。Tischendorf 等^[7]认为景观连通性描述景观中物质运动, 反应不同景观元素对景观结构的响应程度, 将景观连通性运用于生境中, 可以作为测定生境景观结构和生境斑块运动能力的指标。因此, 基于复合种群理论, 将生境生态系统看作一个相互连接的网络, 生境内各个景观组分之间存在移动、扩散的生态过程, 生境景观连通性是衡量景观连续性、度量生态过程便利或阻碍程度的指标。

1.2 理论基础

依据系统论、等级理论和地域分异理论, 以及在此基础上衍生出的岛屿生物地理学理论、复合种群理论和渗透理论, 把野生动物生境所有景观组分看作独立但又相互联系的系统。景观组分的连接状态可以分为完全离散、临界连接和完全连接, 通过计算景观连通性可对生境景观空间连续程度进行

收稿日期: 2014-11-04

基金项目: 国家科技部国际科技合作专项 (2013DFG21640); 中国科学院百人计划专项 (09ZZ06101B)。

作者简介: 杨娅楠 (1989-), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要从事遥感图像处理与应用研究。

通讯作者: 王成 (1975-), 男, 汉族, 研究员, 主要从事激光雷达遥感研究。

描述。

1.3 生境景观连通性的影响因素

野生动物生境景观连通性的高低取决于野生动物生境景观结构和野生动物的行为活动之间相互作用的关系,分析生境景观连通性的影响因素包括3个方面:①生境景观组成要素和空间布局,如斑块的大小、形状以及斑块间的距离等;②所研究的生态过程,不同的生态过程其生态机制有所差异,能量流动、物种迁移等有不同的规律,连通性也会不同;③研究对象,不同物种对生境的适应能力不同,对景观资源利用方式也有所差异^[8]。

1.4 生境景观连通性的研究范围

适宜生境斑块连通性。将适宜生境的斑块作为重要的识别斑块,对斑块间的连通程度进行计算。适宜生境斑块连通性体现了野生动物栖息、迁移等行为活动对生态环境的依赖,适宜生境斑块连通性的分析有助于对野生动物基因交流、迁移扩散等提供信息。

生境全局连通性。生境全局连通性是依据拓扑学中数学概念,对野生动物生境网络中的所有景观类型在空间上的连续性的量度。通过对生境生态系统中景观连接度和景观连通性的分析,完成对生境全局连通性的研究^[9]。

2 生境景观连通性的测定

野生动物生境景观连通性的测定主要包括结构连接度和功能连接度。结构连通性反映了生境景观中各个景观组分的斑块的大小、形状和斑块间的距离等结构特征,描述不同景观组分在空间格局上的联系,一般不与生态过程结合^[8],其度量方式主要是通过景观结构连通性(Landscape connectedness)对景观空间结构布局的测定得到。功能连通性则表示生境景观组分间的关联程度,主要取决于景观空间结构与生态过程的关系,不仅描述景观组成特征和空间分布格局,还定量描述不同生物群体之间以及不同生境景观斑块之间在生态行为、功能和过程上的有机联系,功能连接度是景观连接度与生态过程的综合^[10]。功能连通性的度量通过景观连接度(Landscape connectivity)对斑块间的物种迁移或其他生态过程进展的顺利程度来体现。前者主要实测野生动物移动数据,以及基于图论分析生境景观空间结构;后者包括基于渗透理论计算生境景观功能连接度,以及融合图论与渗透理论建立的模型模拟方法来测算。

2.1 实验法

实验法主要利用无线遥测、标记释放回捕等方

法对野生动物个体运动路径进行跟踪,获得生物体行为特征的直接数据^[11]。该方法按照动物的生活习惯,在很小的时间间隔不断获取它们的路线和地理坐标,进而对使用土地覆盖子像素进行分析^[12]。

虽然实验的方法能够直接真实反映连接度的变化,但是所需数据量较大,时间周期较长,在不同空间尺度的应用具有一定局限性^[11]。

2.2 基于图论测定

图论方法可以量化野生动物生境网络连接度,以直观的方式表示连接度和流量特征,通过直观距离的测量来测定景观结构的连接度。主要测量手段包括欧氏最短距离测量、邻近斑块测量^[13]、缓冲连接测量^[14]等。结构连接度计算一般公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n A_i^c \sum_{j \neq i} D(d_{ij}, a) A_j^b \quad (1)$$

式中: A_i 表示斑块 i 的面积, b 为斑块 i 到斑块 j 的迁入率, c 为斑块 i 到斑块 j 的迁出率, $D(d_{ij}, a)$ 是公式的核心, d_{ij} 是斑块 i 到斑块 j 的距离, a 是物种移动能力的距离^[15]。

该方法仅测量斑块的景观结构特征,无法对野生动物的运动规律和生存能力进行景观功能性的测定。

2.3 基于渗透理论测定

该方法主要是对景观中发生渗透的生态过程进行描述,实际是对功能连通性的测定,可以从移动性、耗费性和渗透矩阵等方面来计算。

2.3.1 移动可能性的测定

野生动物生境斑块的连通性可以通过对斑块间的平均迁移概率,或者是传播扩散的成功率进行计算,公式为:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} P_{ij}^p}{n_p (n_p - 1)}, i \neq j \quad (2)$$

式中: n_p 为斑块数量, P_{ij}^p 为斑块 i 移动到斑块 j 可能的概率。

2.3.2 渗透矩阵的测定

物种移动的过程主要决定因素在于对其移动的障碍阻力,例如道路、海拔、土地类型等因素,因此,使用特定物种的迁移系数计算斑块间的土地类型矩阵可以对生境斑块连通性进行量化,计算公式为:

$$C_i = \sum_j P_i e^{-ad_{ij}} A_j^b, P_i > 0, a > 0, 0 < b \leq 1 \quad (3)$$

式中: A_j 为斑块 j 的面积, a 为距离移动常量, b 为预计种群数量,当 P_i 为 1 时表示斑块被完全占有, P_i 为 0 时表示斑块为空^[16]。

2.4 模型模拟法

模型模拟是基于栅格图层数据建立模型测量连通性,主要包括最小费用距离模型、空间迁移扩散模型^[17]、景观动态模型,其优点在于系统有效地解决了大尺度数据处理的难题。目前应用较好的是最小费用模型,它基于图论理论,模拟多种空间运动过程,反映了异质景观对某种空间运动过程的综合阻力^[18]。多个研究证明,通过该模型方法构建的生态网络结构闭合度水平高,有利于物质循环和能量流动^[19]。

最小费用模型出发点是建立耗费距离方程,通过方程来识别并选取功能源点之间的最小费用的方向和路径。模型中将每个单元的中心作为一个节点源,从该节点前往相邻的4个单元,其费用距离的计算通过公式(4)得到^[20],即:

$$N_{i+1} = N_i + (r_i + r_{i+1}) / 2 \quad (4)$$

式中: N_i 和 r_i 分别为节点源 i 的累积费用和阻力系数, N_{i+1} 和 r_{i+1} 分别为前往单元 $i+1$ 的累积费用和阻力系数。由于该模型基于一个八邻单元结构,考虑到生物作对角运动,如果从节点源 i 前往4个对角相邻的单元^[21],其费用距离的计算公式为

$$N_{i+1} = N_i + \sqrt{2} \times (r_i + r_{i+1}) / 2 \quad (5)$$

建立最小费用模型。首先,选择源图层,该图层是最小费用模型工作的底图,在野生动物生境保护中,一般选择物种生境范围连续或者不连续的面状斑块。其次,建立阻力栅格图层,模型阻力因子主要包括土地覆盖、地理位置、海拔、道路密度等因素,利用GIS软件生成阻力图层。最后根据物种生活习性以及物种在阻力因子中被发现的频率对各因素的阻力进行赋值,阻力系数为1时为物种通过良好,随着阻力系数的升高适宜程度降低,采用成本模型对预设阻力值集合进行优劣比较,实现阻力系数赋值的验证^[22],计算可以穿越的最大阻力值,建立最小耗费路径,生成最佳耗费栅格图^[23]。

薛亚东使用了Path Matrix软件对滇金丝猴栖息地进行最小费用距离分析,选取植被类型作为阻力层,将研究区植被分为适宜生境、其他林地、灌丛和草甸四类,把种群扩散的阻力最小的适宜生境赋值为1,对其他林地、灌丛和草甸依次进行递增赋值,然后通过软件对最小费用距离的自动计算,得到不同赋值情景下的最小费用距离矩阵^[24]。曲艺以东北虎痕迹点为基础数据,选取影响其栖息地选择的7个因子作为构建阻力栅格的变量,并通过专家咨询和文献资料等确定了各因子不同范围对东北

虎的阻力值,生成费用距离栅格,进行核心栖息地的确定及空缺分析^[25]。

2.5 景观指数测定法

基于地理信息系统(GIS)、遥感技术(RS)等软件技术进行模型模拟,从生境景观空间格局以及规划生态网络角度研究生境景观结构连接度和功能连接度,成为野生动物生境景观连接度较为有效的手段^[26]。

Marulli等人将最小费用模型进行数学变换后得到生态连接度指数(ESI, Ecological Connectivity Index),作为空间上生态连接度的分类指标^[27],基于图论建立综合连接度指数(IIC, Integral Index of Connectivity)、连接度概率指数(PC, Probability of Connectivity)、斑块离散度和蔓延度指数等,从生态连接过程定量描述生态连接度。

2.5.1 生态连接度指数(ESI)

ESI是对生态功能区所有斑块之间的功能、结构以及生态过程的相关性的模拟,如公式(6):

$$ESI = 10 - 9 \frac{\ln(1 + d_i)}{\ln(1 + d_{max})^3} \quad (6)$$

$$d_i = \sum_{r=1}^m d_{ri} \quad (7)$$

式中: d_i 为生境斑块 i 到各个生态功能区的总耗费距离, d_{ri} 为斑块 i 到 r 生态功能区的耗费距离, d_{max} 表示给定区域生境斑块到各个生态功能区总耗费距离的最大值^[28]。ESI是一个相对分布值,在0~10变化,一般情况下,ESI不能用于不同地域或同一地区的不同时间段的比较。

2.5.2 综合连接度指数(IIC)

IIC是一个整合了的生境特征和景观连通性的属性值,基于图论将生境斑块作为节点,建立生境斑块之间的拓扑关系^[29],如公式(8):

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \square a_j / 1 + nl_{ij}}{A_L^2} \quad (8)$$

式中: a_i 为斑块 i 的面积, a_j 为斑块 j 的面积, nl_{ij} 为 i 到 j 的最短路径拓扑距离,为景观斑块总面积。IIC的范围为0~1,当值为1时表示景观完全由栖息地占据,值为0时表示生境斑块间无连接。IIC能够识别连接性大的景观斑块关系,而生境斑块连接性相对其他景观类型斑块连通性较小。为了有效地解决连通性小的斑块间关系的分析,提出节点重要性连接度指数(dIIC, Node Importance Index of Connectivity)的计算^[30]。

2.5.3 连接度概率指数(PC)

PC指数是假设两个动物随机地被放在生境斑

块中,能够相互连通的概率^[31],如公式(9):

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \square a_j P_{ij}}{A_L^2} \quad (9)$$

式中, P_{ij} 表示从斑块*i*移动到斑块*j*可能的概率,当产生一条路径的概率属于路径的每一步时, P_{ij} 为最佳概率;斑块之间足够靠近可以看作简单的距离运动时,则 P_{ij} 就等于最佳概率,随着斑块距离的增加, P_{ij} 超过最佳概率,斑块扩散能力出现负值,最佳概率就等于最短路径的值;当两个斑块距离大到彼此孤立无连通性时,连通概率 $P_{ij}=1$,当两个斑块重叠即 $i_1=i_2$ 时,连通概率 $P_{ij}=0$ 。

3 生境景观连通性应用研究

生境景观连通性主要通过通过对生境破碎化、保护区规划、分布格局变化、物种扩散进行分析。生境景观连通性减少,破碎化增加,导致生境适宜面积减少和生境斑块岛屿化,影响种群生存甚至导致种群灭绝。通过研究生境景观连通性,在保护区建立生物廊道,依据一定的条件将孤立的生境斑块和保护区连接起来形成良好的生境生态网络,保证种群物质、信息和基因的连续性;通过对景观连通性的分析,模拟生境扩散,探索野生动物活动的路径、范围及空间分布格局,有利于获取潜在的生境。

3.1 生境景观连通性在破碎化中的研究

生境景观破碎化可以看作是生境连接过程的逆过程,是指景观由单一、均质和连续的整体变为复杂、异质和不连续的斑块镶嵌体的过程。其直接后果是改变了种群的迁入和扩散模式、造成种群遗传变异等,野生动物数量的减少或者后代存活能力的下降,基因交流受到限制,近亲繁殖增加,物种多样性减少,种群灭绝危险增大^[13]。同时,景观破碎后会改变物种之间的捕食、寄生和竞争关系,生境斑块面积变小,其提供的庇护场所减小,生物被捕获概率增加,动物种群生存受到威胁^[32],并间接影响整个生境网络的能量流动和物质循环等生态过程,是导致保护区生态系统退化、生物多样性功能减弱甚至丧失的主要原因。

在景观破碎化度量研究中,早期主要是通过斑块密度、最大斑块面积、平均斑块面积等指标展开研究,进而从破碎化的生态效应方向入手,引入景观连通性对破碎化的隔离效应和扩散效应。陈利顶^[33]等对卧龙大熊猫生境景观建立连接度评价模型,通过景观连接水平的计算对大熊猫生境破碎化进行评价。唐强^[34]通过最小费用模型和生境连接度指数对生境结构的完整性和扩散阻力进行分析,

完成对辽河三角洲的野生动物生境破碎化分析。Crooks等^[35]通过计算平均欧式距离作为斑块连通性指标,对全球244种陆生哺乳动物高质量生境进行破碎化分析。多个研究结果显示生境网络连通性低,生境内部生态功能弱,景观破碎度高。

3.2 生境景观连通性在保护区规划中的运用

在人为干扰和气候变化日趋严重的形势下,世界各国纷纷采取建立自然保护区对野生动物物种及其生境进行保护,但是很多物种生境斑块在保护区建立后变成了孤立状态,不利于野生动物的保护^[36]。近年来,国内外依据野生动物的生活习性、迁移需求等条件,对生境生态网络建立生物廊道,将多个保护区连接起来,减少种群隔离效应,达到保护生物多样性的目的^[37]。

Petracca等^[38]通过对美洲虎基因交流的连通性分析,监测到农业活动对美洲虎连接廊道的威胁,预测人类活动及干扰状况,制定相应的保护措施,建立更为完善的保护美洲虎的生境廊道。Roever等^[39]基于电流巡回理论,分析非洲大象种群生境之间的连通性,发现其他可利用的生境功能区,并将其作为潜在生境。薛亚东^[40]利用最小费用距离模型计算库姆塔格沙漠野骆驼潜在的迁徙路线,通过建立生境廊道来帮助野骆驼躲避危险和种群生境迁移。

3.3 生境景观连通性在物种分布格局中的应用

基于复合种群理论^[41]和空间关联集合种群模型^[42],可通过计算生境斑块之间的连通性,监测野生动物在生境网络中的景观空间布局的动态变化。

生境景观连通性用于衡量野生动物种群的生境斑块空间格局和生境结构,对生境的恢复和保护有重要意义。王志强^[43]等采用最近邻体分析法对丹顶鹤巢址的空间分布格局及动态进行分析,结果显示了巢址分布集中区与核心区的空间格局。Mortelliti等^[44]在意大利中部地区以榛睡鼠和红松鼠为例研究脊椎动物的生境,对比相同数量的生境斑块空间配置和生境结构连接度,结果显示生境结构连接度是影响脊椎动物分布的一个重要因素。Pierline等^[45]基于景观图论理论的方法计算不同尺度的景观连接功能,分析菊头蝠在生境网络中适宜生境斑块的空间交流概率,预测菊头蝠潜在生境的分布格局。

3.4 生境景观连通性在物种扩散中的应用

野生动物生境种群景观内各斑块间存在相互交流的可能性,这种交流受斑块间的距离、空间网络结构和物种的扩散能力共同作用影响,景观连通性的分析,为物种扩散距离、扩散方向的研究提供了

依据^[46]。

王波^[47]通过分析若尔盖自然保护区高原林蛙生境的连通性,基于八邻规则的算法建立扩散模型,利用模型模拟林蛙的空间扩散范围和景观功能连接图。Lookingbill等^[48]基于图论模型理论,以土地覆盖数据为基础,模拟尼日尔灰松鼠的移动方向和移动距离,以最邻近算法计算景观连通性水平,建立尼日尔灰松鼠扩散模型。研究表明景观结构影响物种扩散的范围,生境景观连通性的测定为物种扩散范围模拟提供了有效的数据。

4 结论与展望

野生动物生境研究是开展野生动物保护的基础。目前对野生动物生境质量和生境格局等方面的研究应用范围广,但是对于生境景观连通性的研究并不是很多,可以归纳为对生境景观连通性方法的研究和生境景观连通性运用的研究。

生境景观连通性分析方法由简单的地理学技术和生态学模型向景观生态学情景预测模拟等复杂模型方向发展,从简单的景观系统结构研究向复杂的景观生态网络功能研究过渡。但是研究模型仍存在问题:①基于景观连通性对野生动物种群分布格局的分析主要集中在利用最小费用模型,而阻力系数的赋值问题是分析的关键,目前研究多以地形、道路、土地利用类型等作为阻力图层,忽略了滑坡、泥石流等不受人控制的自然灾害对其造成的影响,对多个影响因素建立阻力图层分析,有助于提高生境景观连通性计算的准确性;②需对模型算法存在的不确定性进行改正,如对于景观连通性模型参数的不确定,通过开展景观渗透性误差评估以及渗透率研究,解决模型中存在的问题。

在应用研究上,生境景观连通性分析主要是对野生动物迁移扩散、种群关系的研究,从生态结构和功能上对野生动物生境的适宜性、保护区生境破碎化、廊道规划设计等方面开展研究。结合其他学科,可以扩展其运用:①生境景观连通性模型与种群密度存在一定关系,对高密度动物的种群而言,其生境所需斑块面积小,连通性强。因此,生境景观连通性的应用分析可以从种群密度问题展开研究;②基于基因遗传学对景观连通性的分析,将基因流结构与景观结构相结合,强调景观组分结构、空间结构和环境梯度对基因交流的影响,整合相关类型数据,今后仍然是生境景观连通性运用的一个研究重点。

参考文献:

[1] 田茂兴,曹光宏. 纳板河保护区野生动物生境管理分析评价

[J]. 环境科学导刊,2012,31(6):17-19.

- [2] 关博,崔国发,朴正吉. 自然保护区野生动物保护成效评价研究综述 [J]. 世界林业研究,2012,25(6):40-45.
- [3] 张明海,马建章. 野生动物生境破碎化理论探讨 [J]. 野生动物学报,2014,35(1):6-14.
- [4] 薛亚东,李丽,吴巩固,等. 景观遗传学:概念与方法 [J]. 生态学报,2011,31(6):1756-1762.
- [5] Forman R T T, M Godron. Landscape Ecology [M]. New York: Wiley, 1986.
- [6] Philip D, Taylor, Lenore Fahrig, Kringen Henein, et al. Connectivity is a vital element of landscape structure [J]. Oikos, 1993(68):571-573.
- [7] Lutz Tischendorf, Lenore Fahrig. On the usage and measurement of landscape connectivity [J]. Oikos, 2000, 90(1):7-19.
- [8] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等. 景观生态学原理及应用(第二版) [M]. 北京:科学出版社,2011:79.
- [9] 邬建国. 景观生态学概念与理论 [J]. 生态学杂志,2000,19(1):42-52.
- [10] 张娜. 景观生态学 [M]. 北京:科学出版社,2014:79-80.
- [11] 富伟,刘世梁,崔保山,等. 景观生态学中生态连接度研究进展 [J]. 生态学报,2009,29(11):6174-6182.
- [12] 李谦,戴靓,朱青,等. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究 [J]. 地理科学,2014,34(6):733-739.
- [13] 武正军,李义明. 生境破碎化对动物种群存活的影响 [J]. 生态学报,2003,23(11):2424-2435.
- [14] Pavel Kindlmann, Françoise Burel. Connectivity measures: a review [J]. Landscape Ecology, 2008, 23(8):879-890.
- [15] Atte Moilanen, Ilkka Hanski. On the use of connectivity measures in spatial ecology [J]. Oikos, 2001, 95(1):147-151.
- [16] Atte Moilanen, Ilkka Hanski. Metapopulation dynamics: effect of habitat quality and landscape structure [J]. Ecology, 1998, 79(7):2503-2515.
- [17] Johnathan T. Kool, Atte Moilanen, Eric A, et al. Population connectivity: recent advances and new perspectives [J]. Landscape Ecology, 2013, 28(2):165-185.
- [18] Karin Johst, Martin Drechsler, Astrid J. A. van Teeffelen, et al. Biodiversity conservation in dynamic landscapes: trade-offs between number, connectivity and turnover of habitat patches [J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 48(5):1227-1235.
- [19] 张蕾,苏里,汪景宽,等. 基于景观生态学的鞍山市生态网络构建 [J]. 生态学杂志,2014,33(5):1337-1343.
- [20] 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.
- [21] Paul Beier, Daniel R, Majka, Shawn L, Newell. Uncertainty analysis of least-cost modeling for designing wildlife linkages [J]. Ecological Applications, 2009, 19(8):2067-2077.
- [22] 郭纪光,蔡永立,罗坤,等. 基于目标种保护的生态廊道构建-以崇明岛为例 [J]. 生态学杂志,2009,28(8):1668-1672.
- [23] Yvan Richard, Doug P, Armstrong. Cost distance modelling of landscape connectivity and gap-crossing ability using radio-tracking data [J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 47(3):

- 603–610.
- [24] 薛亚东. 结合景观遗传学的滇金丝猴栖息地景观连接度分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [25] 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.
- [26] Paul Opdam, Eveliene Steingröver, Sabine van Rooij. Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75 (3–4): 322–332.
- [27] Joan Marulli, Josep M, Mallarach. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71 (2–4): 243–262.
- [28] 张利, 陈亚恒, 门明新, 等. 基于 GIS 的区域生态连接度评价方法及应用 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (8): 218–226.
- [29] Lucía Pascual-Hortal, Santiago Saura. Integrating landscape connectivity in broad-scale forest planning through a new graph-based habitat availability methodology: application to capercaillie [J]. *European Journal of Forest Research*, 2008, 127 (1): 23–31.
- [30] Camilo A, Correa Ayrama, Manuel E, Mendoza, Diego R, Pérez Salierup, et al. Identifying potential conservation areas in the Cuitzeo Lake basin, Mexico by multitemporal analysis of landscape connectivity [J]. *Journal for Nature Conservation*, 2014, 22 (5): 424–435.
- [31] Santiago Saura, Lucía Pascual-Hortal. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83 (2–3): 91–103.
- [32] 武晶, 刘志民. 生境破碎化对生物多样性的影响研究综述 [J]. 生态学杂志, 2014, 33 (7): 1946–1952.
- [33] 陈利顶, 刘雪花, 傅伯杰. 卧龙保护区大熊猫生境破碎化研究 [J]. 生态学报, 1999, 19 (3): 291–297.
- [34] 唐强. 基于生境保护的辽河三角洲绿道布局 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [35] Kevin R, Crooks, Christopher L, Burdett, David M, Theobald, et al. Global patterns of fragmentation and connectivity of mammalian carnivore habitat [J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2011, 366 (1578): 2642–2651.
- [36] 李玉强, 邢韶华, 崔国发. 生物廊道的研究进展 [J]. 世界林业研究, 2010, 23 (2): 49–54.
- [37] 李正玲, 陈明勇, 吴兆录. 生物保护廊道研究进展 [J]. 生态学杂志, 2009, 28 (3): 523–528.
- [38] Lisanne S, Petracca, Sandra Hernández-Potosme, Lenin Obando-Sampson, et al. Agricultural encroachment and lack of enforcement threaten connectivity of range-wide jaguar (*Panthera onca*) corridor [J]. 2014, 22 (5): 436–444.
- [39] C. L. Roeber, R. J. van Aarde, K. Legget. Functional connectivity within conservation networks: Delineating corridors for African elephants [J]. *Biological Conservation*, 2013, (157): 128–135.
- [40] 薛亚东. 基于红外相机的库姆塔格沙漠地区野骆驼活动规律和适宜生境研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [41] 张晓东. 人为干扰后荒漠破碎化生境中啮齿动物集合种群研究 [D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2013.
- [42] 宋卫信, 张锋, 刘荣堂. 生境破坏的模式对集合种群动态和幸存的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29 (9): 4815–4819.
- [43] 王志强, 傅建春. 扎龙湿地丹顶鹤巢址空间分布变化及其对环境变化指征 [J]. 生态环境学报, 2010, 19 (3): 697–700.
- [44] Alessio Mortelliti, Giovanni Amori, Dario Capizzi. Independent effects of habitat loss, habitat fragmentation and structural connectivity on the distribution of two arboreal rodents [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48 (1): 153–162.
- [45] Pierline Tournant, Eve Afonso, Sébastien Roué, et al. Evaluating the effect of habitat connectivity on the distribution of lesser horseshoe bat maternity roosts using landscape graphs [J]. *Biological Conservation*, 2013 (164): 39–49.
- [46] 朱丽, 卢剑波, 余林. 复合种群中扩散的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2010, 29 (5): 1008–1013.
- [47] 王波. 若尔盖自然保护区高原林蛙扩散模型与景观连接分析 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (成都生物研究所), 2007.
- [48] Todd R, Lookingbill, Robert H, Gardner, Joseph R, Ferrari, et al. Combining a dispersal model with network theory to assess habitat connectivity [J]. *Ecological Applications*, 2010, 20 (2): 427–441.

The Overview of Habitat Landscape Connectivity of Wild Animal

YANG Ya-nan^{1,2}, WANG Jin-liang¹, XI Xiao-huan², WANG Cheng²

(1. School of Tourism and Geographical Science, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan 650500, China)

Abstract: Habitat is the basis of biological survival. Habitat quality plays an important role in animal population size and individual quality. Habitat landscape connectivity explains wild animal movement for migrations and food in the landscape. It can be used as the index to analyze habitat network ecological functions and measure ecological processes for wild animal. In this paper, the progress of applications and methods of habitat landscape connectivity for wild animal was reviewed. The problems in current research were pointed out as well as the future research fields, such as ecological corridors for wild animals. Building a series of reasonable ecological corridors for wild animals was suggested.

Key words: habitat; landscape connectivity; wild animal; fragmentation; corridor