

DOI: 10.5846/stxb201602290341

陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 童笑笑, 周文佐, 陈若漪, 张超林. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展. 生态学报, 2017, 37(10): - .
Chen C D, Jia Z Y, Wu S J, Tong X X, Zhou W Z, Chen R Y, Zhang C L. A bibliometric review of Chinese studies on the application of landscape connectivity. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): - .

基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展

陈春娣¹, 贾振毅^{1,2,*}, 吴胜军¹, 童笑笑¹, 周文佐², 陈若漪³, 张超林⁴

1 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714

2 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

3 北京林业大学国际交流与合作处, 北京 100083

4 重庆市规划研究中心, 重庆 401121

摘要:景观连接度反映了景观对物种或某种生态过程在生境斑块之间运动的促进或阻碍作用,对维持景观格局及生态过程的完整性和连续性具有重要指示意义。在当前全球环境变化,自然生境丧失和破碎化不可避免的情况下,景观连接度的评价、模拟与应用已成为景观生态学、保护生物学等相关学科的研究热点。本文基于 CNKI 和 Web of Science 数据库,检索 1999—2015 年间国内发表的景观连接度期刊论文,通过文献计量法,分别从年发文量、来源期刊、研究机构、研究区域、研究目的、景观类型、景观尺度以及研究方法等多个视角分析国内该领域应用研究进展以及发展趋势。经检索共得到文献 240 篇,其中英文 43 篇。分析发现,近 20 年国内该领域年发文量总体呈显著增长趋势;《生态学报》、《生态学杂志》和 Urban and Landscape Planning 为主要刊载期刊;研究力量集中分布在北京、南京等东部 18 所科研机构,文献量占到 43.75%;研究目标区域也以东部为主(52.2%),而对中西部生态敏感脆弱区研究较少;研究目的以景观规划为主,但针对物种保护的研究较弱,仅占 11.25%,且主要关注大熊猫等被公众熟知的珍稀濒危物种;城市、城乡等人工景观是常见的景观研究类型,相比之下,自然景观所占比例较低;研究的空间尺度集中在<5000 km²的中小尺度域,占 72.5%,景观粒度以 30 m 的中等分辨率居多。识别出 14 种具体度量方法,常用的包括最小费用模型、基于图论原理的功能连接度指数和网络结构指数,以及景观格局指数等;关注功能性连接和多方法的综合应用已成为当前研究的趋势;度量方法的一些参数,如最小费用模型阻力赋值或距离阈值选择主要依据专家经验或已有文献,而针对目标物种采用实证研究的则较少。最后,本文对国内当前该领域的研究现状和不足展开讨论并展望了未来发展,以促进我国景观连接度后续研究。

关键词:图论;功能连接度;最小费用模型;生态网络;距离阈值

A bibliometric review of Chinese studies on the application of landscape connectivity

CHEN Chundi¹, JIA Zhenyi^{1,2,*}, WU Shengjun¹, TONG Xiaoxiao¹, ZHOU Wenzuo², CHEN Ruoyi³, ZHANG Chaolin⁴

1 Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

2 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

3 International Relations Office, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Chongqing Planning Research Centre, Chongqing 401121, China

Abstract: Landscape connectivity has been defined as the degree to which landscapes facilitate or impede the movement of species between habitat patches. It is a critical concern for the maintenance of integrity and continuity of landscape structure

基金项目:国家自然科学基金(51408584,41571497);中科院西部之光博士项目(Y43A370N10);重庆科委应用开发项目(cstc2014yykfC20002, Y33A172N10)

收稿日期:2016-02-29; **网络出版日期:**2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenyijay@163.com

and ecological processes. With global environmental degradation, habitats loss and natural area fragmentation is inevitable. As such, studies on landscape connectivity are the focus of applied landscape ecology. A well-connected ecological network is believed to facilitate energy and matter fluxes, species dispersal, genetic exchange, and many other ecological processes, and contribute to the overall maintenance of ecosystem stability and integrity. This paper presents a review of the literature on the application of landscape connectivity based on 240 publications from 1999 to 2015, in which we evaluated Chinese state-of-the-art achievements and developments on this topic. The literature review and data analysis based on the CNKI and Web of Science databases, were organized into eight categories using bibliometrics: number of published papers per year, source journals, research institutions, study areas, research objectives, landscape types, landscape scales and study methods in connectivity studies. We found an exponential increase in the number of publications from 1999 to 2015, especially after 2008. The majority were published in the journals "Acta Ecologica Sinica," "Chinese Journal of Ecology," and "Urban and Landscape Planning." Eighteen major research organizations from Beijing, Nanjing and other eastern areas of China, contributed 43.75% of the total papers. The main study areas were also concentrated in eastern region, then the far west, with the least in central region. Providing pragmatic solutions for landscape planning was the main research objective, and only 11.25% of papers targeted species conservation, usually regarding endangered or rare species that are well known to the public, such as the giant panda. Artificial landscapes, including urban or rural landscapes were the major target of research; whereas, 27.92% of papers were about natural landscapes. The spatial extent of the study area was less than 5000 km² in 72.5% of the studies. The spatial resolution almost varied between 6 m and 90 m pixel values, with the median being 30 m. The predominant analytic approach was functional connectivity (63.75%), followed by structural connectivity (36.25%). We identified 14 methods measuring connectivity. The four most utilized methods were least-cost analysis, graph-based functional connectivity indices, network structural indices, and landscape pattern metrics. In addition, applying a combination of various methods has become a trend in the recent connectivity application studies. Expert opinions and previous research results were typically used to evaluate the resistance values of the landscape matrix and the distance thresholds. However, different experts in isolation may assign different values and therefore affect the reliability of evaluation. Few analyses in China obtained these important parameters by means of field data or empirical study for a specific organism. We discuss problems and prospects of applying landscape connectivity in China to promote future research and application.

Key Words: graph theory; functional connectivity; Least-cost model; ecological network; distance threshold

连接度理论于1984年由Merriam首次引用到景观生态学中^[1],之后国内外学者从生态学、生物行为学、数学等角度对其理论与研究方法进行探索与扩展^[2-5]。虽然他们的具体表述存在差异,但核心思想基本一致,即景观连接度描述了景观要素在空间格局或生态过程上的有机联系。这种联系可能是生物群体间的物种或基因流,也可能是景观要素间物质与能量交换,它为探索景观空间异质性和揭示空间格局与生态过程之间的关系提供了理论基础和技术方法^[5-6]。由于受全球环境变化和人类活动的影响,景观破碎化和岛屿化现象日益严重,恢复或重建景观之间的连接,促进斑块间物质、能量等生态流成为维持景观完整性和连续性,提高区域生态系统服务功能的重要手段之一^[7],对区域生物多样性保护^[8-9]、栖息地重建^[10]、自然保护区^[11]和城市规划^[12]等具有重要指导意义。

景观连接度研究通常包括结构性连接(Structural connectivity)和功能性连接(Functional connectivity)^[13]。结构性连接主要测定景观的结构特征,如生境斑块的大小、形状和位置,而不考虑生态过程,反映的是景观斑块在空间格局上的物理联系,多用各种指数来描述^[14]。而功能性连接则基于目标媒介(动物、植物、物质或能量)在斑块间的迁移、流动等生物或生态过程,通常借助观测、实验或模型预测等手段实现^[6,15]。例如城市环境下,两个源斑块间无法形成结构性连接,但一块绿地中的乡土树种子通过风媒传播到达另一块落种生根,或

小型哺乳动物能够借助其中转迁徙,这两个斑块即构成功能性连接。功能性连接整合复杂的过程分析,更加关注于景观作为一个整体所发挥的功能,在生境破碎已成趋势,恢复结构性连接越发困难的情况下,其操作性更强,意义更加显著。

国内对景观连接度研究起步较晚,但伴随着中国大规模城市化进程和自然生境地丧失,近些年来备受关注,在景观规划、物种保护等领域涌现出大量应用研究案例。如俞孔坚^[16]基于景观连接度原理构建了北京市景观安全格局;孔繁花^[17]、Chang^[18]等分别利用最小费用模型确定了济南和常州城市生态网络的关键斑块和连接,为城市建设和规划提供了科学依据;焦胜^[19]等将景观连接度理论引入城市土地适宜性模型,弥补了传统土地适宜性评价忽略景观水平生态过程的缺陷;Ren^[20]等基于图论和地理探测模型定量分析厦门城市森林景观连接度与生态因子、人类活动的空间相关性;陈杰^[21]等应用功能连接度重要性指数分析了巩义市欲恢复为森林景观的农业用地斑块的重要值大小,从而确定斑块恢复的优先顺序;陈利顶^[22]将连接度评价引入物种生境破碎化研究,分析了卧龙自然保护区大熊猫生存的适宜生境类型;Liu^[23]等应用景观连接度评价了云南地区道路建设对动物迁移的影响,发现道路通过区的连接度明显降低;Wang^[24]等应用景观连接度分析了浙江稻田病虫害入侵格局与区域景观结构之间的关系,发现稻田斑块的连接度是造成病虫害扩散格局的主导因素,为病虫害防治提供了依据。

鉴于国内近 20 年景观连接度理论在应用领域所取得的一系列成果,本文通过文献计量法对该内容进行系统性分析和总结,以期为我国学者把握国内研究热点、发展趋势、存在问题和应用前景提供参考。

1 研究方法

基于 CNKI 和 Web of Science 两大数据库为检索源,选择同行审议的期刊论文作为研究对象。其中,中文以“景观”+“连通性、连接度、距离阈值、最小费用模型(类似概念包括最小累积阻力模型、最小耗费距离模型、耗费表面模型、累积耗费距离模型、有效费用距离模型、最小费用路径等^[25])、生态网络和生态廊道”为检索主题词,运用计算机检索语言“或”将各个检索词进行“并”联结;英文以“graph theory”OR“distance threshold”OR“least-cost path”OR“ecological network”AND“landscape connectivity”为检索主题词,国家或地区设置为中国^①;检索时间范围都设为 1999 年至 2015 年。根据设定的检索条件,初步得到中文文献 856 篇,英文 532 篇。然后通过生态学、景观学、地理学、生物学、植物学、动物学、农学、环境科学、资源学、城市生态学等学科对结果进行筛选,分别得到 795 篇和 102 篇。由于本文旨在探索景观连接度理论在国内的应用现状和不足,为今后的城市规划、自然保护区管理和物种保护等领域实践提供科学依据和方向性指引,而不是对该学科的理论发展进行描述和讨论,因此将文献中的理论研究、综述和不涉及具体研究案例的单纯方法论探索忽略,最终获得文献中文 197 篇,英文 43 篇,并通过以下内容展开统计分析(表 1)。

2 文献统计分析

2.1 按文献发表年份统计

国内第一篇景观连接度应用研究出现于 1999 年,由陈利顶等发表在《生态学报》的“卧龙自然保护区大熊猫生境破碎化研究”。期间 2002 年发表 3 篇,之后直到 2004 年才陆续有相关研究见刊。英文文献总体偏少,但整体保持较快增长趋势。从文献发表年份的数量趋势来看(图 1),可将我国景观连接度研究大致分为三个阶段:2003 年以前为萌芽阶段,仅有零星论文刊发;2004—2007 年为初步发展阶段,发文量总体较少,且呈现波动性增长;从 2008 年开始进入快速增长阶段,尤其是 2014 年,发表文献 44 篇,达到了近 15 年来的高峰。其中,74.17% 的文献发表于 2010—2015 这 6 年间,年发文量 30.3 篇,比最初 5 年的发表数量翻了近 30 倍。

① 仅指中国大陆地区,港澳台除外。

表 1 文献内容统计

Table 1 General description of literature review

内容分类 Contents classification	具体内容 Detail contents	描述 Description
基本信息 General information	题目	文献名称
	年份	发表时间
	来源期刊	文献刊载期刊
研究区 Study area	研究机构	第一作者或通讯作者所在研究机构
	研究区空间位置	所属省份及经济地带
	空间幅度	研究区的面积大小、界线
	景观粒度	栅格数据分辨率
研究方法 Study methodology	景观类型	城市景观、城乡景观、森林景观、湿地景观、流域景观、农业景观等
	研究目的	景观规划、景观评价、物种保护
	分析方法	功能性连接、结构性连接
	度量方法	景观连接度评价的具体模型、指数等度量方法
	软件应用	景观连接度评价所运用的软件工具
	最小费用模型	源选取、阻力因子识别和权重以及阻力赋值的方法和依据
	基于图论的功能连接度指数	距离阈值选取方法

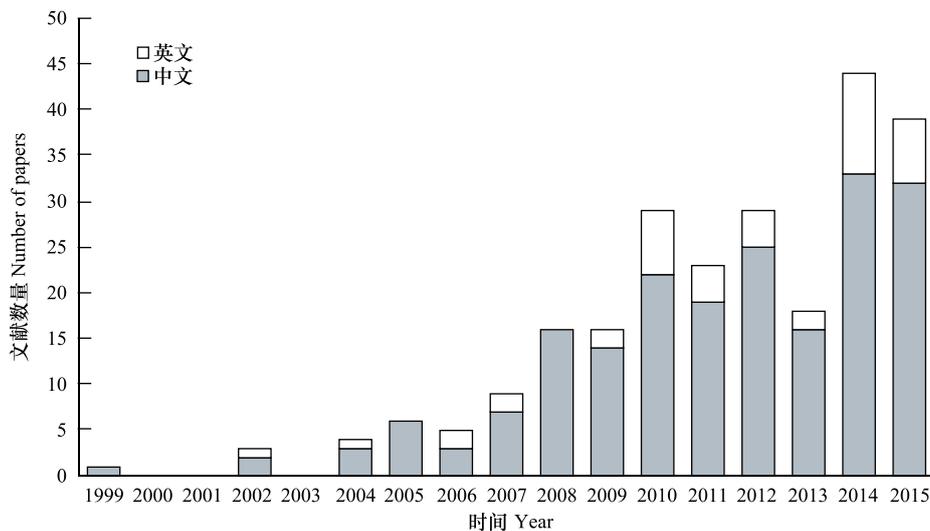


图 1 1999—2015 年景观连接度研究发文量

Fig.1 Number of published literatures on landscape connectivity between 1999 and 2015

2.2 按文献来源期刊统计

对刊载文献的来源期刊统计发现,该类研究广泛分布于国内外 121 种期刊,刊载量 4 篇以上的有 13 种(图 2),且集中于生态类和环境类期刊,约占文献总量的 42.92%。其中,《生态学报》刊载量位居首位,共载文 30 余篇,并和《生态学杂志》(16 篇)、《应用生态学报》(7 篇)、《自然资源学报》(6 篇)等一起形成连接度研究的主要阵地。英文期刊中,Landscape and Urban Planning 影响力最大,文献刊载量 9 篇,其次是 Ecological Modelling、Landscape Ecology 和 Ecological Engineering,分别排在英文前 4 位。

2.3 按文献所属研究机构统计

分析研究机构的分布可以帮助了解学术界对该主题的支持和认同程度。本文发现,目前国内景观连接度的研究主要分布在北京师范大学、北京大学、华东师范大学、南京大学、北京林业大学和南京师范大学等 18 所研究机构,发文量占文献总量的 43.75%,其中北京师范大学英文发表量最多(表 2)。研究机构具有明显的地

域分布特征,主要研究机构中有 14 所分布于东部经济发达区,9 所集中于北京和南京两市,发文量达总量的 27.08%,是景观连接度应用研究的重要力量。另外,研究机构的农林类学科特色显著,主要研究机构中有 7 所农林类研究院校,占主要研究机构的 41.17%,与该领域所服务的学科和针对的研究目的紧密联系。

2.4 按研究区域及研究目的统计

研究的目标区域主要分布于我国东部沿海地带(图 3),相关文献 126 篇,占 52.5%,尤其集中在江苏(25 篇)、福建(21 篇)、广东(20 篇)、北京(13 篇)和上海(10 篇)等省市(图 3);研究西部地区的有 51 篇(21.25%),主要集中在四川(15 篇)、云南(17 篇)两省,而对西藏、新疆和宁夏等生态敏感脆弱地区的研究则相对匮乏;针对中部地区的文献量最少,仅 45 篇(18.75%),其中关于黑龙江省的研究较多(9 篇),山西省目前还处于研究的空白区。

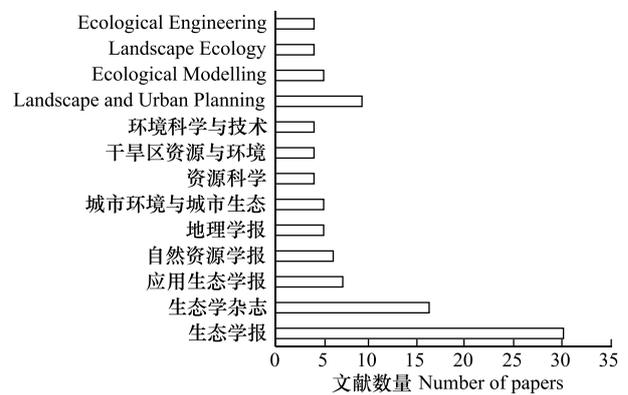


图 2 景观连接度研究文献主要刊载期刊

Fig.2 Journals with main published papers on landscape connectivity

表 2 文献所属的主要研究机构

Table 2 The institutional affiliation of published literatures

机构 Research institute	中文数量 Chinese paper quantity	中文数量 English paper quantity	机构 Research institute	中文数量 Chinese paper quantity	英文数量 English paper quantity
北京师范大学	3	12	福建师范大学	5	/
北京大学	10	1	西北师范大学	4	/
华东师范大学	7	4	沈阳农业大学	4	/
南京大学	7	/	河南大学	4	/
南京师范大学	7	/	河北农业大学	3	/
北京林业大学	7	/	西南林业大学	3	/
中国科学院生态环境研究中心	3	2	宁波大学	3	/
南京农业大学	5	/	东北林业大学	3	/
南京林业大学	5	/	中国科学院地理科学与资源研究所	1	2

根据研究目的不同,将文献划分为景观规划、景观评价和物种保护 3 种目标进行分类统计。结果表明,我国景观生态学者更加倾向于景观规划研究,如城市规划、绿地规划、土地资源管理和自然保护区规划等,共发表文献 123 篇,占文献总量的 51.25%;其次是景观评价研究(90 篇),占 37.5%,主要包括景观格局评价、生态网络评价和土地适宜性评价等;而针对物种保护的研究相对较少,仅 27 篇,所占比例最低(11.25%),且保护的對象主要针对于被公众所熟知的物种,如大熊猫、金丝猴、丹顶鹤和白鹭等。另外,由图 3 可以看出连接度理论应用的目的是在区域之间存在着较明显的差异性。其中,景观规划研究主要分布在东部地区,景观评价分布较为均衡,而四川、云南和陕西等西部地区物种保护研究的相对比例较高,这与地域特色显著相关。

2.5 按景观类型统计

本文借鉴 Forman 和 Godron 的景观分类原则^[2],根据人类对自然景观的干扰程度,把景观大致分为 7 类。据图 4 表明,目前国内对城市景观(城市建成区或核心区)的研究最为突出,该类文献共发表 104 篇,占总量的 43.33%;其中,围绕小城镇景观类型的有 18 篇;其次为城乡景观(城市建成区及其周围自然环境)43 篇,占文献总量的 17.92%;而森林、流域、湿地和农田等自然、半自然景观文献量较少,分别为 33 篇、17 篇、12 篇和 5 篇,共占研究的 27.92%。总体来讲,国内研究者更多的把目光投向了人类活动影响剧烈的城市、城乡等人工景观。

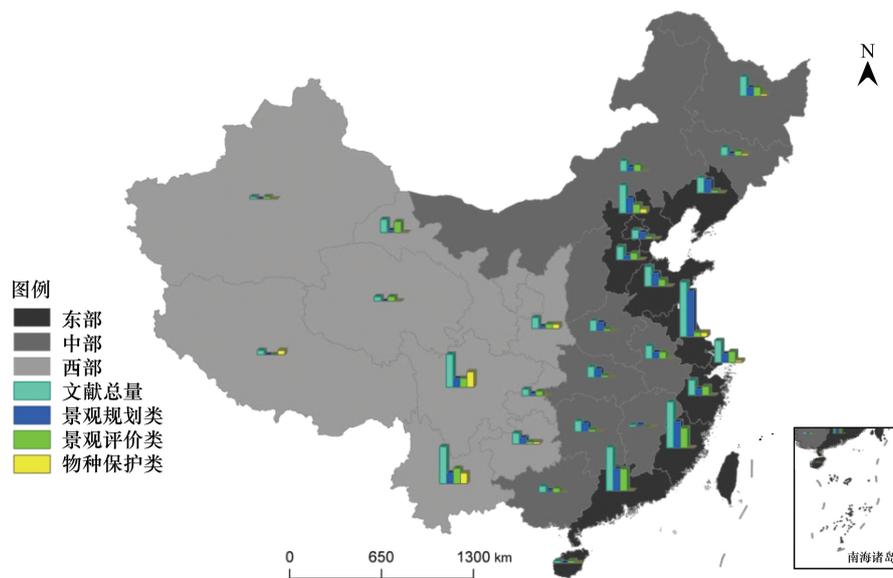


图3 景观连接度研究目标区域和研究目的的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of study areas and research objectives of landscape connectivity

2.6 按研究区空间尺度统计

在景观生态学研究,空间尺度(Scale)通常以粒度(Grain)和幅度(Extent)来表达。空间粒度指景观中最小可辨识单元所代表的特征长度、面积或体积;而空间幅度往往由研究区域的总面积来决定^[7]。统计发现(图5),以市域范围内某个地区(如区县,市内跨区县)进行研究的较多(93篇),其次是市域整体范围(58篇),而市域之间(9篇)、省域整体范围(2篇)和省域之间等大尺度研究(8篇)则较少。区域范围多由政治界线(78.75%)和自然地理界线来划定(21.25%),其中,自然地理界线以流域(20篇)、山脉(19篇)、自然保护区(12篇)居多。研究的空间幅度主要集中在 $<1000\text{ km}^2$ 和 $1000\text{—}5000\text{ km}^2$ 的中小尺度,共占研究的72.5%,多分布于东部城市密集区; $5000\text{—}10000\text{ km}^2$ 占11.67%, $10000\text{—}50000\text{ km}^2$ 占12.5%,而以 $50000\text{—}100000\text{ km}^2$ 为代表的超大尺度域仅占研究的3.33%,主要分布在西部地区。景观粒度选取如表3所示,主要集中在 $6\text{—}90\text{ m}$ 的中等分辨率范围(71.51%),其中尤以 30 m 像元居多,占了49.16%;而选择 $\leq 5\text{ m}$ 高分辨率(20.11%)和 $\geq 100\text{ m}$ 低分辨率(8.38%)的则较少。另外,25%的文章没有明确指出景观粒度大小。

2.7 按研究方法统计

根据景观连接度类型统计发现,针对功能性连接的研究(153篇,63.75%)远多于结构性连接(87篇,36.25%)。进一步,共识别出14种度量连接的方法(图6)。其中,最小费用模型(Least-cost model)和基于图论的功能连接度指数(如Integral Index of Connectivity, *IIC*和Probability index of connectivity, *PC*)是功能性连接的主要度量方法,分别占文献的46.67%和15.83%。另外,还有5.25%的文献选择生态连接度指数(*ECI*)^[26],生境适宜性模型(*HSI*)^[27],空间句法反规划模型^[28],*CLUE-S*模型和情景预测^[29]等方法。结构性连接常用的度量方法包括空间格局指数(42.08%)和网络结构指数(α 、 β 和 γ)(10%)等方法。

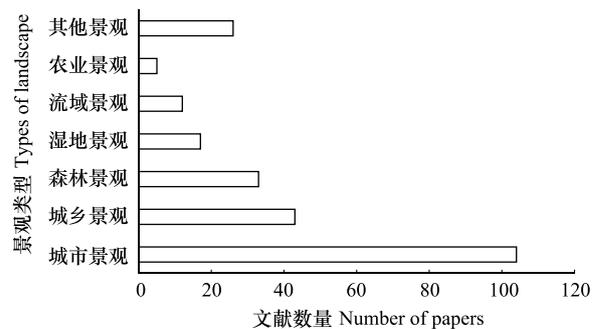


图4 连接度研究的主要景观类型

Fig.4 The main types of landscape on connectivity studies

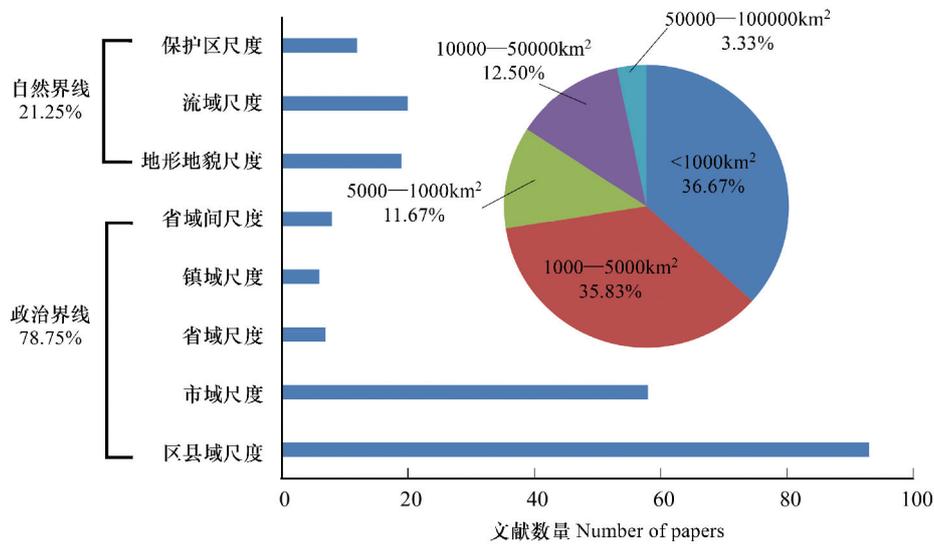


图 5 景观连接度研究的空间幅度分布

Fig.5 The distribution of spatial extent on landscape connectivity studies

表 3 景观空间粒度分布

Table 3 The distribution of the grain size on landscape connectivity studies

空间粒度分布 Distribution of the grain size	数量 Paper quantity	空间粒度等级 The class of the grain size	百分比 Percentage	空间粒度分布 Distribution of the grain size	数量 Paper quantity	空间粒度等级 The class of the grain size	百分比 Percentage	
0.61 m	3	高分辨率	20.11%	30 m	88	低分辨率 (≥ 100 m)	8.38%	
1 m	2	(≤ 5 m)		50 m	3			
1.27 m	1			60 m	1			
2 m	2			70 m	1			
2.5 m	1			85 m	1			
3 m	4			90 m	1			
4 m	4			100 m	8			
5 m	19			250 m	2			
10 m	18	中分辨率	71.51%	300 m	3			
15 m	3	(6—90 m)		500 m	1			
20 m	8			1 km	1			
25 m	4				179			75%

近年来国内研究已不再完全依赖某一种度量方法,而是将功能性和结构性连接多种方法相结合综合应用,实现对景观结构,生态过程和系统功能的全面评价以及进一步的格局优化。经统计,72 篇文献综合使用了多种连接度量方法,占文献总量的 30%。其中,最常用的是两种度量方法取长补短结合应用,如最小费用模型和基于图论的功能性连接度指数(15 篇),最小费用模型和景观格局指数(13 篇),景观格局指数和网络结构指数(8 篇),景观格局指数和基于图论的功能性连接度指数(8 篇)等。但综合使用 3 种方法的较少(6 篇),如许峰等^[30]结合 MSPA、功能连接度指数和最小费用模型 3 种方法对巴中市构建城市生态网络;郭宏斌等^[31]应用最小费用模型,景观格局指数和功能连接度指数对厦门城市生态网络进行评价和优化;潘竟虎等^[32]利用最小费用模型,景观格局指数和网络结构指数完成了兰州城市生态功能评价和景观格局优化。

对于景观连接度的量化分析工具,国内常用的软件包括 ArcGIS 空间分析模块“cost distance”(31.67%),Fragstats(35.83%)和 Conefor Sensinode(14.17%)等(图 7)。其中,ArcGIS“cost distance”主要用于阻力面构建,识别和模拟物种扩散或某种空间运动过程的最小费用路径或潜在廊道,Fragstats 软件是景观格局指数计

算的主要工具,而 Conefor Sensinode 则专门用于图论功能连接度指数的计算。另外,还有学者应用 IDRIS、Pathmatrix、Linkage mapper、Patch Analyst 等软件对连接度进行量化分析和评价。

3 景观连接度量方法

3.1 最小费用模型

景观连接度常使用欧氏距离 (Euclidean distance) 作为连接依据^[14],通过测量斑块边缘(质心)到边缘(质心)之间的空间直线距离获得,即斑块间的最小距离。该方法通常不考虑生境斑块的属性,也忽略了景观基质的异质性对连接的影响。相比之下,基于最小费用模型模拟的方法可以弥补以上不足。该模型计算物种或生态过程从源斑块经过不同阻力的景观基质类型所消耗的费用或克服阻力所作的功,并进一步模拟最小费用路径^[33],进而定量反映斑块之间的连接。最小费用模型因其简洁的数据结构和快速的运算法则,现已成为在大尺度背景下评价景观连接度的最好方法^[34]。虽然该模型最早由 Knaapen 于 1992 年提出,后经学者俞孔坚在 1999 年引用并应用到国内^[16],但直到近期才受到国内广泛关注。112 篇文献中有 84 篇发表于 2010—2015 年间(图 8),主要刊载于《生态学报》、《生态学杂志》和《应用生态学报》,共占该研究的 42.08%。

最小费用模型需考虑 3 个核心步骤与参数:评估并提取扩散源斑块;评价基质对扩散的阻碍性,构建阻力面;提取源斑块之间的最小成本路径所形成的连接。其中最关键的步骤则是源斑块确定和阻力面构建。

3.1.1 源选取

源是促进物种运动或生态过程发展的景观类型。国内常用的“源”识别方法可分为两类:第一类为结合研究区实际状况直接识别(67 篇),如选取自然保护区、水体、森林等生态服务功能较高的景观斑块;第二类为构建指标体系评估斑块重要性(24 篇),如孙贤斌、吴榛等分别用生态系统服务价值系数和功能连接度指数对斑块进行评估并提取重要值高的斑块为源^[35-36]。另外,39.29%的文献考虑了斑块的面积属性,认为生境斑块大小对维持区域生态过程和生物物种多样性具有重要意义^[37]。对于城市扩张用地研究,9.91%的文献同时选择生态和建设用地两种类型为源,并分别构建扩展阻力面来确定城市建设适宜区^[38-39]。

3.1.2 阻力面构建

阻力面的构建首先需要确定影响目标物种扩散的阻力因子。统计分析发现,几乎所有研究都将土地利用/覆被类型作为主要影响因子。其中,57.66%的文献除了考虑了这一单因子外,还对高程、坡度、地质灾害、土壤侵蚀、径流、交通、人口密度等因子进行分析。另外,不同学者确定因子权重的方法也不尽相同,63 篇多阻力影响因子的文献,16 篇采用专家打分来确定各因子权重,15 篇通过模型、公式等计量法对各因子的影响力进行评估,如熵值法,层次分析法(AHP)和变异系数法等;还有 18 篇(30.61%)对多因子赋予了同等权重。

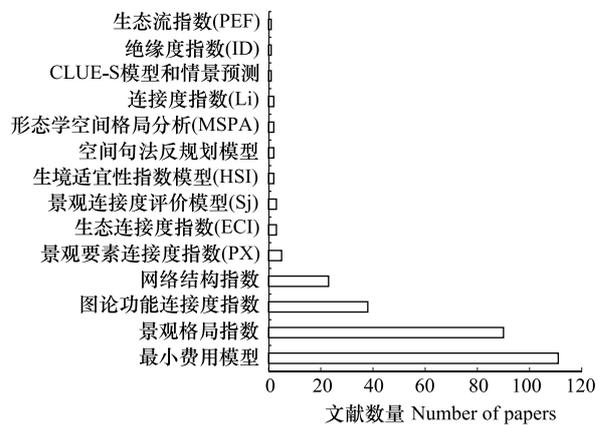


图 6 景观连接度主要度量方法

Fig.6 The main measurement methods of landscape connectivity studies

PX: Proximity index; ECI: Ecological connectivity index; Sj: Landscape connectivity model; HSI: Habitat suitability index; MSPA: Morphological spatial pattern analysis; Li: Landscape connectivity index; ID: Insulation degree; PEF: Potential ecological flow

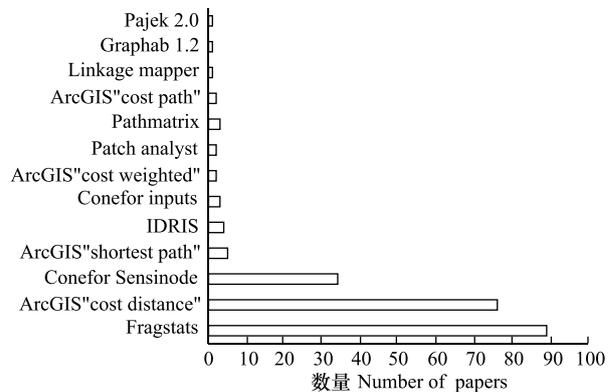


图 7 景观连接度研究主要软件工具

Fig.7 The main software tools for landscape connectivity analysis

在实践中,获取目标物种穿越不同景观要素的绝对阻力值比较困难,故大多研究则依据景观要素的(生态)适宜性来设定扩散的相对阻力值。具体包括生态系统服务价值系数评估(19.64%),参考相关文献(17.86%),专家经验打分(16.07%)和模型公式法等^[40-41](15.23%)。还有研究依据情景分析法广泛设置阻力系数,建立多个景观阻力面进行分析,以减小单一赋值带来的主观不确定性^[37,42]。而通过观测物种迁移扩散行为来获取阻力系数的研究则很少,目前仅统计到1篇^[43]。

3.2 景观连接度指数

3.2.1 基于图论的连接度指数

景观图论采用拓扑学方法把景观镶嵌体中的斑块、廊道、基质等抽象为节点、连接以及他们之间的生态流关系^[44],通过简单、直观的图形方式反映生态系统中复杂的网络结构关系。该方法的引入极大丰富了景观连接的度量方法。其中,包括早期颇受关注的基于图论的网络结构指数(α 、 β 和 γ)(24篇)和近几年发展起来的基于图论的功能连接度指数(*IIC/PC*)(38篇)。

基于图论的网络结构指数(α 、 β 和 γ)将景观完全简化为抽象的“点—线”图形,进而评价图的闭合和连接水平。其单独使用的情况较少,通常与其他模型或指数方法综合使用。如孔繁花^[17]、张蕾^[45]等采用最小费用模型模拟了济南和鞍山城市潜在生态廊道,然后通过重力模型和网络结构指数,对斑块间相互作用强度与生态网络结构进行了定量分析与优化。

Pascual-Hortal 等于 2006 年提出了基于图论的功能连接度指数(*IIC/PC*)法并随后研发出相应的 Conefor 软件工具。该指数不仅考虑图的结构特征,还将图所代表的斑块属性特征(如面积、保有物种丰富度等信息)、目标物种的分布概率或迁移扩散行为纳入分析当中^[46-47];同时可以分析景观各要素对于维持整体景观连接度的贡献程度。国内对该指数的应用始于 2008 年,即熊春妮^[48]等将其应用于重庆都市区绿地景观连接度的评价研究,近两年文献量激增,共发表 23 篇,占到该方法的 60.52%(图 8),多应用于森林^[21]、城市绿地^[36]、物种生境^[49]整体连接度和单个斑块的连接贡献值评估等方面。

图论功能连接度指数的应用关键在于参数的确定,即斑块连接的距离阈值(Distance threshold);当斑块间的距离小于或等于阈值,则认为连接。相比国外研究多选定目标物种并把该物种最大扩散距离作为距离阈值^[50-51],国内主要基于已有文献记载的距离梯度法(29篇),即针对不同物种的扩散距离选取多个阈值,然后依据统计学的原理,计算不同距离阈值下对应的景观连接度指数值,确立指数变化突变点处值作为最终分析的连接阈值。如刘常富^[52]等基于生境可利用性和鸟类、两栖类和哺乳类等动植物的扩散能力,选取了 8 个距离阈值,利用 5 个功能连接度指数计算沈阳城市森林景观连接度变化情况,最终确定 200 m 为适宜距离。另外,有 6 篇采用单一距离值,但对该值的选取依据没有详细说明。

3.2.2 景观格局指数

景观格局指数高度浓缩格局信息,反映区域景观结构组成及要素空间配置等特征^[53],是景观生态学领域广泛使用的一种定量研究方法,也是景观连接度的主要评价方法之一。国内自 1999 年以来利用该指数进行连接度研究的文献共 101 篇(图 8)。在早期研究中,该指数单独使用较为常见,多从斑块、类型和景观 3 个层次上选取具有连接意义的指标,如平均最小邻接距离、连通性、蔓延度和聚集度等指数来揭示区域景观连接度格局的变化特征^[53-54];而近些年来,景观格局指数主要结合其他度量方法综合应用于区域生态网络或景观安全格局评价等研究(31篇),占到该方法的 30.39%。

4 结论与讨论

本文基于文献计量法对我国近 20 年景观连接度应用类文献进行统计分析得出以下结论:

(1)通过检索共获得 240 篇文献,其中英文 43 篇。文献发表量总体上呈现明显增长的趋势,尤其在 2008 年之后,刊载量飞速增长,预计未来仍将大幅度增长;文献分布于国内外 121 种期刊,刊载量 4 篇以上的共 13 种,占文献总量的 42.92%,其中《生态学报》载文量最多,达 30 篇,《生态学杂志》(16 篇)和《应用生态学报》

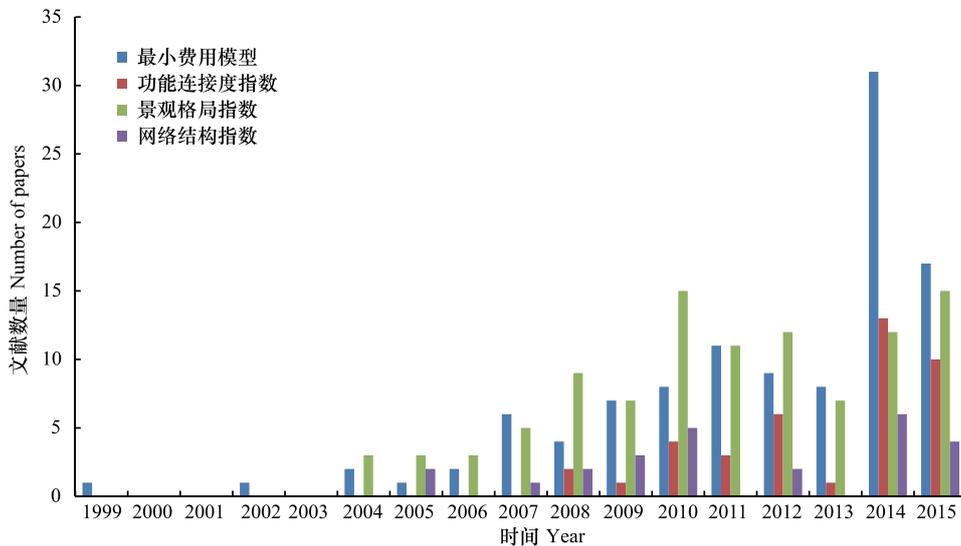


图8 景观连接度4种常用度量方法研究趋势

Fig.8 The trend of the four common measurement methods on landscape connectivity

(7篇)也是景观连接度应用研究的重要期刊;英文期刊中,Landscape and Urban Planning 载文量居首位(9篇),其次是 Ecological Modelling、Landscape Ecology 和 Ecological Engineering;研究机构主要分布在北京、南京等东部地区,北京师范大学、北京大学、华东师范大学、南京大学、北京林业大学、南京师范大学是该领域的主要研究力量;研究目标区也以东部地区为主(52.5%),西部次之(21.25%),而中部最少(18.75%);研究目的以景观规划(51.25%)和景观评价(37.5%)居多,物种保护仅占11.25%,且多以珍稀物种为主;景观类型以城市、城乡等人工景观占主导(61.25%),而自然景观研究较少(27.92%);中小尺度域($<5000 \text{ km}^2$)是国内景观连接度研究的常见尺度范围,占72.5%,且多以行政区划(市、区县)作为研究区的界线,也有部分以山体、流域等自然界线来划分;景观粒度主要选择6—90 m中等分辨率栅格数据,其中尤以30 m居多,占了49.16%;而25%的文献则没有给出景观粒度大小。

(2)连接的度量方法共识别出14种,其中,最小费用模型应用最为广泛,占46.67%,其次是空间格局指数法(42.08%)、基于图论的功能连接度指数(15.83%)和网络结构指数法(10%);另外,72篇文献综合使用了多种度量方法,这已成为当前景观连接度应用研究的趋势;连接度分析的主要软件包括 ArcGIS “cost distance”(31.67%),Fragstats(35.83%)和 Conefor Sensinode(14.17%);依据专家经验和相关文献,结合研究区实际情况来确定源斑块、阻力因子权重、阻力系数以及连接阈值的方法比较常见,而选取目标物种并对其迁徙扩散等生活习性进行实证研究的则很少,普遍存在模型构建主观性较强,与研究区或研究目标物种相匹配的生态过程研究难以实质性融入到实际应用(生态规划/设计等领域)中等问题。

针对当前景观连接度应用研究中存在一些问题,总结前人研究特点,在今后的研究中,应重点考虑以下几个方面:

(1)研究目标区分布不平衡。由于区域间经济发展存在的巨大差距,东部地区城市化密集,城市生态环境问题突出,加之高等教育资源与研究机构的地区分布不均衡,导致了地区间生态环境研究投入的力度差异。因此,一半以上的研究集中在我国东部沿海经济发达地区,而对中西部地区,包括西北干旱荒漠绿洲区、西南岩溶地区、三峡库区、黄土高原丘陵沟壑区以及青藏高寒区的研究相对薄弱,但这些地区正是我国生态敏感脆弱区,也是生态红线划定的范围区^[55],对维持我国生物多样性和区域生态安全及社会经济可持续发展具有深远意义^[56]。景观生态学者应借此契机,重点加强这些区域以生态过程为核心的景观连接研究,包括景观格局与物质循环、能量流动、动植物迁移扩散之间的关系,以促进区域景观功能的整体发挥。

(2)国外学者多将连接度应用在野生动植物保护相关领域,而国内学者更多应用于城市环境,这与中国

当前社会经济的高速发展分不开。改革开放以来,快速的城市化进程导致大量生态用地不断被挤占,自然生境地日渐消失,生态调控能力严重不足。在此背景下,以有限的土地资源,通过提高景观连接度水平来重建景观组分的生态联系,强化网络性景观结构建设,进而达到优化景观整体服务功能,维持区域生态安全的目的就成为必然选择。相比之下,国内针对特定物种的保护研究较少,且集中在大熊猫等珍稀物种的研究。而国外对目标种的选择较为广泛,如松鼠^[57]、蝴蝶^[58]、青蛙^[59]等。研究表明,加强对一般乡土物种的保护,能够抵御外来物种入侵,促进本土生态系统种群的基因交流,有效维持生物多样性。因此,国内研究者应加强生物多样性保护方面的考虑,在目标种的选择上,要增强对乡土性、一般性物种的关注度,以构建其栖息地为切入点,实现区域整体景观的改善。

(3) 尺度问题一直是景观生态学研究的核心问题之一。不同的尺度选择,往往会影响到对景观格局和生态过程及相互作用规律不同程度的把握,并最终影响到研究结果的科学性和实用性^[7]。国内景观度连接研究大多围绕中小尺度研究区(如城市/镇)来展开,考虑到数据的获取成本以及运算量大小,通常选择与 30 m 遥感影像相匹配的栅格数据,这可能造成一些对连接度起关键作用的斑块(如跳脚石)不能被有效识别。本文建议在今后的研究中,首先要考虑尺度选择的合理性,选择与目标物种的生态过程(如捕食、繁殖、迁徙等)相匹配的空间尺度;另外,可以设置多个尺度梯度,对比分析不同尺度条件下景观连接度的变化敏感性来选取最佳研究尺度^[60]。

(4) 最小费用模型弥补了空间直线距离忽略下垫面属性的不足,但模拟的最小费用路径仅表示两点间的线性连接,认为物种在两个特定斑块间沿固定路径运动。事实上物种的扩散行为多具有不确定性,运动路径很难有规律可循,因此该模拟路径也无法真实反映物种迁移的生物特性。近年来,电路理论(Circuit theory)逐渐被应用到景观连接度研究,通过物种的运动密度来识别出廊道和关键区域,将生境斑块间所有可能路径整合,模拟出多条具有一定宽度范围的连接区域(Least-cost corridor)^[61]。这种方法最大的优势是能够识别出斑块间所有替代性路径,可能更符合物种运动的真实状况。目前国外学者已在景观电路应用方面取得了一定成果,如以美洲狮^[62]和美洲叉角羚羊^[10]等为目标物种的景观连接研究。但该理论在国内的应用还处于空白,建议国内学者借鉴国外相关研究,以国内环境为案例完善其理论和方法。

(5) 应用最小费用模型的关键步骤之一是确定阻力值。综述国内文献,大多数研究通过土地适宜性评价结合文献资料和专家经验为土地利用/覆被类型打分获取,普遍存在阻力赋值主观性较强的问题。理想状态下赋值是根据研究目的,选择合适的目标物种,基于观察、实验研究获取。但是由于资金、技术、时间和数据可获取性等限制,无法进行实证研究,所以有学者建议采用多个阻力赋值方案构建多条最小费用路径,共同形成景观连接^[63],从而提高生态网络空间结构的拓扑健壮性,降低经验赋值的不确定性。此外,还有研究发现不同景观因格局特征的不同,对阻力赋值的响应也不尽相同,所以并不存在最佳的赋值方式,只有针对某种特定景观类型与特定研究目的相对适宜的赋值方案^[60]。因此,今后研究应结合研究目的对研究区景观做阻力赋值对目标扩散模拟的敏感性分析,获取相宜的阻力系数,提高最小费用模型应用的科学性和客观性。

(6) 景观连接度距离阈值的确定也是关键且具有挑战的一步。理想方法是依据目标物种生活习性^[52],但该方法需要长期大量的观测数据,耗时久、投入大。相比国外生态学研究历史久,各种类型的动植物长期监测数据充分且连续,国内大多只能依据国外相关文献,或选取多个距离梯度,通过对比分析获取最佳阈值。目前一个可能的契机是借助中国生态系统研究网络(CERN)开展相应的多物种野外观测或实验,积累生物习性的长期数据。而针对缺少动物迁移观测资料的城市环境,以乡土树种的风媒传播作为连接媒介,传播距离作为景观连接的距离阈值,通过直接观测或成熟的模型模拟其长距离传播,也是一个比较可行的研究方法^[33]。

(7) 目前国内应用的连接度指数方法类型多样,但各有利弊。如景观格局指数和网络结构指数可以反映景观要素的空间物理连续性,但忽略了生态过程;基于图论的功能连接度指数将斑块的属性特征整合到算法中,考虑了物种迁移等生态过程,并且可以分析各景观要素的连接重要性,是连接度指数方法的一大进步。面对当前复杂的生态环境,仅通过某一种指数或模型方法已经不能满足于景观连接度研究的需要。因此,根据

不同的研究目标以及区域的景观异质性特征选取适当的研究方法,从多个角度综合刻划研究区的景观连接状况,增强研究结果的实践指导意义已成为一大趋势。

致谢:感谢两位匿名审稿专家为本文修改提出的宝贵意见。

参考文献 (References):

- [1] Merriam G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern// Brandt J, Agger P, eds. Proceedings of the 1st Seminar of the International Association of Landscape Ecology. Roskilde, Denmark: Roskilde University Centre, 1984.
- [2] Forman R T T, Godron M. Landscape ecology. New York: John Wiley & Sons, 1986: 619.
- [3] Taylor P D, Fahrig L, Henein K, Merriam G. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 1993, 68(3): 571-573.
- [4] With K A, Gardner R H, Turner M G. Landscape connectivity and population distributions in heterogeneous environments. *Oikos*, 1997, 78(1): 151-169.
- [5] 陈利顶, 傅伯杰. 景观连接度的生态学意义及其应用. *生态学杂志*, 1996, 15(4): 37-42.
- [6] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 滕明君. 景观连接度的概念、度量及其应用. *生态学报*, 2010, 30(7): 1903-1910.
- [7] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [8] Bruinderink G G, Van Der Sluis T, Lammertsma D, Opdam P, Pouwels R. Designing a coherent ecological network for large mammals in northwestern Europe. *Conservation biology*, 2003, 17(2): 549-557.
- [9] Uezu A, Metzger J P, Vielliard J M E. Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic Forest bird species. *Biological Conservation*, 2005, 123(4): 507-519.
- [10] Poor E E, Loucks C, Jakes A, Urban D L. Comparing habitat suitability and connectivity modeling methods for conserving pronghorn migrations. *PLoS one*, 2012, 7(11): e49390.
- [11] Briers R A. Incorporating connectivity into reserve selection procedures. *Biological conservation*, 2002, 103(1): 77-83.
- [12] Marulli J, Mallarach J M. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area. *Landscape and urban planning*, 2005, 71(2/4): 243-262.
- [13] Tischendorf L, Fahrig L. On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*, 2000, 90(1): 7-19.
- [14] Calabrese J M, Fagan W F. A comparison-shopper's guide to connectivity metrics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(10): 529-536.
- [15] 肖笃宁, 李秀珍, 高骏, 常禹, 张娜, 李团胜. 景观生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15.
- [17] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [18] Chang H F, Li F, Li Z G, Wang R S, Wang Y L. Urban landscape pattern design from the viewpoint of networks: A case study of Changzhou city in Southeast China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(1): 51-59.
- [19] 焦胜, 李振民, 高青, 周恺, 魏春雨, 何韶瑶. 景观连通性理论在城市土地适宜性评价与优化方法中的应用. *地理研究*, 2013, 32(4): 720-730.
- [20] Ren Y, Deng L Y, Zuo S D, Luo Y J, Shao G F, Wei X H, Hua L Z, Yang Y S. Geographical modeling of spatial interaction between human activity and forest connectivity in an urban landscape of southeast China. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1741-1758.
- [21] 陈杰, 梁国付, 丁圣彦. 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例. *生态学报*, 2012, 32(12): 3773-3781.
- [22] 陈利顶, 刘雪花, 傅伯杰. 卧龙自然保护区大熊猫生境破碎化研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 291-297.
- [23] Liu S L, Deng L, Chen L D, Li J R, Dong S K, Zhao H D. Landscape Network Approach to Assess Ecological Impacts of Road Projects on Biological Conservation. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(1): 5-14.
- [24] Wang Z J, Wu J G, Shang H W, Cheng J A. Landscape Connectivity Shapes the Spread Pattern of the Rice Water Weevil: A Case Study from Zhejiang, China. *Environmental Management*, 2011, 47(2): 254-262.
- [25] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 滕明君, 彭丽. 基于最小费用模型的景观连接度评价. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 2042-2048.
- [26] 张小飞, 李正国, 王如松, 王仰麟, 李锋, 熊侠仙. 基于功能网络评价的城市生态安全格局研究——以常州市为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(4): 728-736.
- [27] 朱丽娟, 刘红玉. 挠力河流域丹顶鹤繁殖期生境景观连接度分析. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(2): 12-16, 83-83.
- [28] 杨天翔, 张伟倩, 樊正球, 王祥荣, 王寿兵. 基于鸟类边缘种行为的景观连接度研究——空间句法的反规划应用. *生态学报*, 2013, 33(16): 5035-5046.
- [29] 汪辉, 余超, 李明阳, 时宇, 杨玉锋. 基于 CLUE-S 模型的湿地公园情景规划——以南京长江新济洲国家湿地公园为例. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1263-1269.
- [30] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. *生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [31] 郭宏斌, 黄义雄, 叶功富, 李翠萍, 陈利. 厦门城市生态功能网络评价及其优化研究. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 71-79.

- [32] 潘竟虎, 杨旺明, 刘莹. 兰州市景观生态功能评价和格局优化. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 96-103.
- [33] 陈春娣, Meurk C D, Ignatieva M E, Stewart G H, 吴胜军. 城市生态网络功能性连接辨识方法. 生态学报, 2015, 35(19): 6414-6424.
- [34] Driezen K, Adriaensens F, Rondinini C, Doncaster C P, Matthysen E. Evaluating least-cost model predictions with empirical dispersal data: a case-study using radiotracking data of hedgehogs (*Erinaceus europaeus*). Ecological Modelling, 2007, 209(2/4): 314-322.
- [35] 孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例. 生态学报, 2010, 30(5): 1157-1166.
- [36] 吴榛, 王浩. 扬州市绿地生态网络构建与优化. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1976-1985.
- [37] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [38] 肖长江, 欧名豪, 李鑫. 基于生态-经济比较优势视角的建设用地空间优化配置研究——以扬州市为例. 生态学报, 2015, 35(3): 696-708.
- [39] 王洪新, 路建国, 张利, 门明新, 霍习良. 基于生物多样性保护的曹妃甸新区城镇用地规划研究. 水土保持研究, 2013, 20(6): 296-301.
- [40] 张林, 田波, 周云轩, 朱春娇. 遥感和 GIS 支持下的上海浦东新区城市生态网络格局现状分析. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2015, 4(1): 240-251.
- [41] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 王海霞. 三江平原东北部湿地生态安全格局设计. 生态学报, 2009, 29(3): 1083-1090.
- [42] 薛亚东, 李丽, 李迪强, 吴巩固, 周跃, 吕玺喜. 基于景观遗传学的滇金丝猴栖息地连接度分析. 生态学报, 2011, 31(20): 5886-5893.
- [43] 郭纪光, 蔡永立, 罗坤, 左俊杰, 刘治国, 倪静雪. 基于目标种保护的生态廊道构建——以崇明岛为例. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1668-1672.
- [44] Urban D, Keitt T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. Ecology, 2001, 82(5): 1205-1218.
- [45] 张蕾, 苏里, 汪景宽, 程铭. 基于景观生态学的鞍山市生态网络构建. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1337-1343.
- [46] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. Landscape ecology, 2006, 21(7): 959-967.
- [47] Saura S, Torné J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(1): 135-139.
- [48] 熊春妮, 魏虹, 兰明娟. 重庆市都市区绿地景观的连通性. 生态学报, 2008, 28(5): 2237-2244.
- [49] 欧维新, 李海丹. 土地整理对项目区生境景观连接度的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 682-687.
- [50] Minor E S, Urban D L. Graph theory as a proxy for spatially explicit population models in conservation planning. Ecological Applications, 2007, 17(6): 1771-1782.
- [51] Pereira M, Segurado P, Neves N. Using spatial network structure in landscape management and planning: a case study with pond turtles. Landscape and urban planning, 2011, 100(1/2): 67-76.
- [52] 刘常富, 周彬, 何兴元, 陈玮. 沈阳市森林景观连接度距离阈值选择. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2508-2516.
- [53] 王海珍, 张利权. 基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划. 植物生态学报, 2005, 29(1): 144-152.
- [54] 王天明, 王晓春, 国庆喜, 孙龙, 哈尔滨市绿地景观格局与过程的连通性和完整性. 应用与环境生物学报, 2004, 10(4): 402-407.
- [55] 刘军会, 邹长新, 高吉喜, 马苏, 王文杰, 吴坤, 刘洋. 中国生态环境脆弱区范围界定. 生物多样性, 2015, 23(6): 725-732.
- [56] 董文渊, 王逸之. 生态保护红线划定对云南生物多样性保护影响研究. 环境科学导刊, 2015, 34(6): 18-21.
- [57] Lookingbill T R, Gardner R H, Ferrari J R, Keller C E. Combining a dispersal model with network theory to assess habitat connectivity. Ecological Applications, 2010, 20(2): 427-441.
- [58] Bergerot B, Tourmant P, Moussus J P, Stevens V M, Julliard R, Baguette M, Foltête J C. Coupling inter-patch movement models and landscape graph to assess functional connectivity. Population Ecology, 2013, 55(1): 193-203.
- [59] Decout S, Manel S, Miaud C, Luque S. Integrative approach for landscape-based graph connectivity analysis: a case study with the common frog (*Rana temporaria*) in human-dominated landscapes. Landscape Ecology, 2012, 27(2): 267-279.
- [60] 陈春娣, 吴胜军, Meurk C D, 吕明权, 温兆飞, 姜毅, 陈吉龙. 阻力赋值对景观连接模拟的影响. 生态学报, 2015, 35(22): 7367-7376.
- [61] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19885-19890.
- [62] Castilho C S, Marins-Sá L G, Benedet R C, Freitas T O. Landscape genetics of mountain lions (*Puma concolor*) in southern Brazil. Mammalian Biology-Zeitschrift für Säugetierkunde, 2011, 76(4): 476-483.
- [63] Rayfield B, Fortin M J, Fall A. The sensitivity of least-cost habitat graphs to relative cost surface values. Landscape Ecology, 2010, 25(4): 519-532.