

绿色生态空间网络研究进展

于强¹ 张启斌² 牛腾¹ 王戈¹ 马骏¹ 杨林哲¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 河北工程大学地球科学与工程学院, 邯郸 056038)

摘要: 绿色生态空间网络是景观生态学的重要研究内容,是耦合景观格局、生态过程与生态功能的重要桥梁,对于提高景观连接性、保护物种多样性、促进生态系统结构与功能的完整性具有重要意义。本文梳理了绿色生态空间网络的研究脉络,从绿色生态空间网络的概念与特征、相关理论与研究方法等方面展开论述,阐述了绿色生态空间网络的相关概念及发展历程,构建、分析与优化中的常见方法与主要特点,以及绿色空间网络研究中的相关理论,列举了绿色生态空间网络的主要应用领域,如城市、水文、防风固沙、水土保持等,并对绿色生态网络的基本改变、研究方法、尺度研究以及和其他空间网络结合等方面进行了展望。

关键词: 绿色生态空间网络; 概念特征; 分析优化; 复杂网络理论

中图分类号: K903 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)12-0001-15 OSID: 

Research Progress and Prospect of Green Ecological Space Network

YU Qiang¹ ZHANG Qibin² NIU Teng¹ WANG Ge¹ MA Jun¹ YANG Linzhe¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Green ecological space network is an important research content of landscape ecology and an important bridge coupling landscape pattern, ecological process and ecological function. It is of great significance for improving landscape connectivity, protecting species diversity, and promoting the integrity of ecosystem structure and function. This paper combs the research context of the green ecological space network, discusses the concept and characteristics of the green ecological space network, related theories and research methods, and elaborates the related concepts and development process of the green ecological space network. It is in the process of construction, analysis and optimization. The common methods and main characteristics of the green space network, as well as the relevant theories in the research of the green space network, enumerate the main application areas of the green ecological space network, such as urban, hydrology, wind and sand fixation, soil and water conservation, etc., and the basic changes and research methods of the green ecological network, scale research and integration with other spatial networks and other aspects.

Key words: green ecological space network; conceptual characteristics; analysis and optimization; complex network theory

0 引言

经济的快速发展使城市化率迅速升高,根据联合国人居署发布的《2020 年世界城市报告》,全球城市人口比例将在 2030 年达到 60.4%^[1],其中 96% 的城市增长将发生在东亚、南亚和非洲地区^[2]。我国第七次人口普查数据显示,全国城市化率已达 63.89%,且仍处在较快发展区间^[3]。高速的城市化

进程改变了地表景观的结构与功能,由此引发了动植物栖息地破碎、景观连通性降低等现象,使得生物多样性降低,生态服务功能遭到破坏,城市人居环境恶化^[4]。如何缓解经济发展与生态建设间的矛盾,实现可持续发展,成为当前亟待解决的问题。

近年来,一些学者从景观连通性与生态系统结构、功能完整性的角度出发,提出了生态空间网络的概念与基本原理^[5],综合评价区域内的自然与人文

收稿日期: 2021-09-15 修回日期: 2021-10-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(42001211,42071237)
作者简介: 于强(1987—),男,讲师,博士,主要从事 3S 技术生态环境应用和复杂生态空间网络研究,E-mail: yuqiang@bjfu.edu.cn

因素,以区域内重要生态资源斑块为节点,以生态资源斑块间的带状廊道为边,构建区域生态空间网络,以缓解生境破碎、生态系统服务功能下降的问题,改善城市人居环境^[6-7]。绿色生态空间网络的概念最早源自绿道系统,自提出以来不断发展完善,如今已经成为城市规划、景观生态学、地理学等学科的研究热点^[8]。当前生态空间网络的研究热点包括生态空间网络的构建、生态空间网络结构与功能研究、生态空间网络评价与优化等,在城市规划^[9]、水文规划与管理^[10]、防风固沙、矿区生态重建^[11]、动物保护^[12]等领域进行了大量实证研究。

本文在总结已有研究成果的基础上,对绿色生态空间网络相关概念的提出和发展、绿色生态空间网络的理论基础和研究方法、绿色生态空间网络的主要应用领域等进行阐述,并对其发展趋势进行展望,以期为绿色生态空间网络的进一步研究和应用提供理论依据。

1 绿色生态空间网络概念与特征

1.1 绿色生态空间网络概念与功能

绿色生态空间网络是景观生态学重要的内容,目前绿色生态空间网络研究是景观生态学研究的重点和热点^[13]。绿色生态空间网络对于保护生物多样性、维持生态平衡、增加景观连接度具有重要意义^[14]。根据不同的角度,绿色生态空间网络有多个含义,如表 1 所示。

表 1 绿色生态空间网络的多种概念解释
Tab.1 Various conceptual explanations of ecological networks

角度	绿色生态空间网络性质
网络重要性	开放性、连接性、循环性
廊道连接性	连接性、开放性
生态系统多重稳定性	景观链、开放性、集成性、自然属性
生态过程一致性	空间连贯性、有机交流性、过程完整性
土地规划及生态网络功能性	线性、多用途性、多功能性
生物多样性保护	保护性、缓解矛盾性

根据不同网络的重要性程度,绿色生态空间网络可以理解为一个连接城市空间与乡村空间的循环系统,它是一个开放的空间。在绿色生态空间网络中,生态廊道是最为基本也最为重要的网络结构,根据廊道连接性的不同,绿色生态空间网络也可以理解为连接自然保护区、居民点、各种景观的一种开放的空间结构^[15-16]。

绿色生态空间网络具有多重作用,这是由于绿

色生态空间网络中的生态要素也是由多种不同类型的生态系统组成的。从绿色生态空间网络中生态系统的多重稳定性角度,绿色生态空间网络的含义可以理解为:绿色生态空间网络是一个景观链,具有文化稳定性、生态稳定性和娱乐稳定性等多重特性^[17-18]。

绿色生态空间网络是一个复杂系统。在这个复杂系统中,存在着多种生态过程。生态过程具有一致性和不一致性。根据生态过程的一致性,绿色生态空间网络可以理解为一个为了维持这种一致性和完整性而存在的复杂系统。绿色生态空间网络主要受到人类的干扰,在各种干扰下,绿色生态空间网络中的各个要素之间相互影响,共同抵抗这些干扰。可见,绿色生态空间网络是一个多种类型的生态节点和生态廊道组成的空间连贯的开放系统^[19-21]。

绿色生态空间网络是具有一定生态功能的网络。现实中,大多数的绿色生态空间网络都是人为规划设计出来的。根据土地规划和绿色生态空间网络的功能性,绿色生态空间网络可以理解为一个土地网络,这个网络具有多种生态功能。除了生态功能,这个网络还具有交通运输的功能和休闲娱乐的功能。从景观设计角度,绿色生态空间网络还具有美学功能。从功能的角度,结合实际情况而进行规划设计,根据不同的用途而对绿色生态空间网络进行管理^[22]。

绿色生态空间网络是一个由多种类型生物组成的复杂网络。不同的绿色生态空间网络的生物多样性不同,人们对生物多样性的保护也是不相同的。根据绿色生态空间网络中生物多样性的保护程度,绿色生态空间网络可以理解为为了保护生物多样性,降低人为干扰的复杂系统。可以说,绿色生态空间网络能够解决生物多样性保护和人类对生物资源利用之间的矛盾^[23]。

1.2 绿色生态空间网络发展历程与特点

绿色生态空间网络这一概念出现较晚,但在早期的城市规划与景观生态学研究已经出现了其思想的萌芽。生态空间网络的发展过程大致可以概括为 3 个阶段。18 世纪到 20 世纪 60 年代是生态空间网络的孕育和启蒙阶段,在这一阶段,景观规划领域出现了轴线、林荫大道以及城市公园体系的规划理念。OLMSTED^[24]借鉴轴线和林荫大道的设计理念,基于城市公园的镶嵌分布构建了城市公园体系,取得了较好的景观与生态效果。20 世纪 60 年代到 20 世纪 80 年代是生态空间网络思想快速发展阶段,这一阶段出现了大量有关开放空间规划的研究,生态空间网络的相关研究发展迅速,绿色网络、环境

廊道等概念开始出现^[25],20 世纪 80 年代,绿色生态空间网络被首次提出,绿色生态空间网络的相关研究与规划得以更加广泛的展开^[26]。20 世纪 80 年代至今是绿色生态空间网络的热点研究阶段,这一阶段中,生态空间网络相关研究开始出现多目标、多功能与多尺度的特点,所涵盖的生态功能越来越多,在城市规划、景观生态学等方面发挥着越来越重要的作用^[27]。

当前,绿色生态空间网络已经成为景观生态学、城市规划、地理学等领域的热点。然而,由于起步较晚,生态空间网络的概念仍在不停发展变化中,各学者根据自己的理解从不同角度开展研究,研究内容与达成的目标较为多样,但是都认为,生态空间网络至少应该具备以下特点:①连接性,生态空间网络应该通过线状景观元素连接区域中的生态资源斑块,增强景观连接性。②功能性,生态空间网络应该具备维护物种多样性、调节气候等多种生态服务功能。③发挥重要连接功能的生态廊道应该是线性的。④整体性,网络的节点、边与基质应该形成一个整体的系统。⑤应该在有效减少人类活动对自然生态系统干扰的同时,最大限度地发挥自然生态系统的生态服务功能^[28]。根据以上特点,本文将绿色生态空间网络的特征概括为:基于景观生态学和保护生态学原理,以保护区域生态系统结构与功能的完整性及充分发挥其生态系统服务功能为目的,利用线性的空间廊道将区域生态资源斑块有机连接成系统整体。

在实际应用中,绿色生态空间网络分为潜在绿色生态空间网络 and 实际绿色生态空间网络。在实际中的绿地斑块、林带、道路两侧绿篱等组成了实际绿色生态空间网络的基本结构,现实中真实存在的绿色生态空间网络就是实际绿色生态空间网络,比如具有生态功能的道路网络、河流网络、森林网络等。而潜在绿色生态空间网络是指抽象存在的绿色生态空间网络,潜在绿色生态空间网络中的廊道,在现实中可能并不存在,但是生态能量的流动与传播却是沿着这个廊道而进行的。这种生态能量的传播看不到,却是真实存在的。潜在绿色生态空间网络可以理解为一个具有传播功能的结构。可以将潜在绿色生态空间网络理解为基于现状土地利用,提取出来的生态能量流动网络系统。潜在绿色生态空间网络也可以理解为实际绿色生态空间网络的一种优化模式,但是由于是基于现状所提取的,这种优化是不完全的优化,故潜在绿色生态空间网络还有必要进行再一次的优化,这也是未来研究中的重点。

2 绿色生态空间网络构建、分析与优化

2.1 绿色生态空间网络识别与构建

一个绿色生态空间网络的结构完整性与优劣性决定了其功能是否能够正常发挥。目前,在园林学中,国外的绿色生态空间网络类型主要包括荷兰国家生态网络、自然 2000 网络、绿宝石网络、欧盟生态网络等^[29-30]。另外针对不同的对象,潜在生态网络构建研究大多集中在森林生态网络构建、湿地生态网络构建、城市绿地生态网络构建、森林生态网络构建、湿地生态网络构建和沙漠区防护生态网络等^[31-35]。例如针对中国西北干旱半干旱生态脆弱区所构建的绿色生态空间网络是典型的沙漠区防护绿色生态空间网络^[36]。中国西北地区生态脆弱区具有荒漠化严重、景观斑块破碎、生态环境极其脆弱等特征,防护型潜在绿色生态空间网络能够通过生态廊道和生态节点连接破碎生境,形成完整的景观网络,从而保证区域生态安全。

生态源地一般指景观中为相邻生态系统提供能量、物质和生物有机来源的区域,它是构建生态空间网络的重要组成部分,是多种生物进行物质传递和能量流动的重要场所^[37]。当前有关生态空间网络的研究中,学者所使用的生态源地提取方法存在较大差别,但大致可以归纳为以下 4 类:①直接识别法,根据研究区的自然生态特征选取面积较大的水域、植被或者重要的生物栖息地作为生态源地^[38]。②指标评价法,以生态服务功能与价值等指标作为依据,选取符合条件的斑块作为生态源地^[39]。③形态学空间分析法 (Morphological spatial pattern analysis, MSPA),该方法通过腐蚀、膨胀、开闭运算等形态学处理方法对研究区域的土地利用栅格数据进行处理^[40],可以较为精确地识别出区域内的核心区、孤岛、空隙、边缘区、桥接区、环岛与支线共 7 类景观。④综合识别法,从景观连通性、生态系统服务功能及自身生境等方面综合分析,通过景观格局指数、空间聚类分析、空间叠加分析等方法识别具有重要生态功能的斑块作为生态源地^[41]。生态源地的提取是构建区域生态空间网络的基础,它一方面应该是物质、能量、信息的来源,另一方面还应该起到流动和传递的作用,因此其提取过程应该从景观结构和生态功能两方面考虑,上述提取方法中综合识别法可以较好的考虑到这两方面,但在具体操作层面仍存在较大的任意性,如何科学合理的提取生态源地,仍然是一个值得探讨的问题。许多学者利用面积、生态系统服务价值等对生态源地等级划分进行了研究,分级的衡量因子较为单一^[42]。能值分析

理论能够将复杂系统中的不同种类的物质流、能量流、货币流转化为统一的能值指标来分析和比较,其能够综合多源数据对生态源地进行等级划分,但是能值分析理论计算复杂,数据要求量极大^[43]。

生态廊道则是绿色生态空间网络的骨架,是生态能量流动的通道。生态廊道是景观的重要组成部分,是景观生态流发生的主要通道,对区域生态过程、景观美学特征和生态功能的发挥都具有重要意义^[44]。在生态空间网络的构建中,生态廊道的提取是必不可少的^[45]。MCR 模型由 Kanppen 提出^[46],起初该模型运用在物种迁徙模拟中,我国学者俞孔坚将其应用于景观格局分析中^[47],该模型的构建主要考虑源地、阻力面和累积代价 3 个要素,通过提取生态流在源地间流动的最小阻力路径来实现生态廊道的构建。MCR 模型结构简单、算法明晰,已经成为生态廊道提取的主流方法^[48]。电路理论于 2006 年由 MCRAE 提出,该方法把景观看作一个导电表面,把复杂景观中的物种或生态流看作一个随机游走者。模型中的电阻相当于累积阻力模型中的阻力面,阻力越大,生态流游过程中面临的阻力越大;电流的强弱表示物种或生态流到达目标斑块时通过某条路径的概率。相比于 MCR 模型,电路理论结合了随机游走理论,可以显示廊道冗余度,可通过电流的强弱判断生态源地和廊道的相对重要程度等信息,逐渐被越来越多的应用到国内外生态网络的构建中。

生态节点一般指生态廊道中具有重要生态学意义或者生态敏感性较高的点位。根据景观生态学中的踏脚石原理,景观中大型斑块之间存在的小斑块可构成踏脚石系统,促进生物的迁徙及物质能量的流动,这种踏脚石系统一般面积较小,但具有较强的实用性^[49]。在生态廊道中识别生态节点,可起到很好的生态踏脚石作用^[50]。当前生态节点的提取方法一般可归纳为两种:基于先验知识进行,将廊道途经的重点保护区域、生态敏感区域作为生态节点;基于 MCR 模型中的累积阻力面进行,通过水文学分析方法提取累积阻力面中的山脊线,通过山脊线与生态廊道的交点即廊道中生态阻力最大处确定为生态节点^[51]。一般情况下,结合两种方法可以对生态节点进行更加准确的识别。起到踏脚石作用的生态斑块节点实现了绿色生态空间网络从结构的联通到功能的联通,生态斑块节点的提取方法主要包括景观阻力分析、网络分析、生态阻力面模型、形态学空间格局模型等,其中生态阻力面模型通过提取阻碍生态流的最小耗费路径和最大耗费路径的交叉点以及生态廊道最薄弱的点来确定生态斑块节点,其被广

泛应用于生态斑块节点提取的研究中。

2.2 绿色生态空间网络结构分析

针对绿色生态空间网络的空间结构进行研究一直以来都是国内外学者的研究重点。在针对绿色生态空间网络结构相关研究中,GOLDSTEIN 等^[52]通过模型算法以及统计实验,分析了鸟类活动的规律,得出了鸟类保护生态廊道的宽度,并且分析了生态廊道结构与周边环境之间的耦合关系,认为绿色生态空间网络结构上的联通性是最为重要的。JONGMAN^[53]研究了欧洲 15 个国家的绿地网络,发现在欧洲绿色生态空间网络的结构主要以保护为核心。此外,景观格局指数、联通度指数、景观可视化、网络结构指数、障碍影响指数等被广泛的应用在绿色生态空间网络的结构分析以及优化评价中。MONTIS 等^[54]提出了一个基于网络建模的绿色生态空间网络研究和建模方法框架,使用了网络属性和中心度量,并且通过引入相应的加权中心度量来考虑分散能力,通过从 3 个角度监测扩散能力和联通数量来模拟绿色生态空间网络的结构动态变化。YAN 等^[55]利用生物多样性与生物量之间的关系,探讨了理论网络复杂性的特点。UPADHYAY 等^[56]对喜马拉雅地区森林物种的生态信息流进行了研究,发现物种栖息绿色生态空间网络是一个无标度网络,且具有小世界特性。

国内针对绿色生态空间网络结构的研究也较多,曾琦芳^[57]基于点线面的构建模式在华侨大学厦门校区绿色生态空间网络的构建研究中对该校绿色生态空间网络节点、脉络、结构进行研究,将绿色生态空间网络结构分为核心型、轴线性型和匀质型,为新校区建设带来新的规划。段飞^[58]以青岛、深圳的高校为例,对滨海地区高校绿色生态空间网络结构、生态廊道、生态节点进行研究,为其他滨海地区高校生态规划建设提供参考。傅强等^[59]基于计算机图形学中的 CL-PIOP 评价方法,对青岛市绿色生态空间网络结构进行研究,该方法能快速统计重要位置的廊道,判断廊道的不可替代程度,为相关规划中的生态用地保护、恢复提供理论依据。刘耕源等^[60]基于热力学焓流核算方法研究大连市绿色生态空间网络结构,确立该城市的代谢系统,并对系统内各组分进行研究,为城市健康可持续发展提供研究依据。闫维等^[61]将 GIS 与景观格局分析、斑块网络结构分析相结合,研究滨海新区规划对区域绿色生态空间网络结构的影响,并提出滨海新区绿色生态空间网络构建的改进建议。

2.3 绿色生态空间网络结构优化

对生态空间网络的优化一般需要基于对网络结

构和功能的结果进行分析,因此生态空间网络的各种分析方法常常同时作为对网络进行优化的手段或优化结果的评价标准。其中,基于景观格局分析与网络结构指数法的研究较多^[62-64]。

然而,当前基于景观格局分析以及各类网络指数的优化研究中,仍然没有形成领域内公认的优化策略,具体的优化方法往往由研究者根据自己的理解构建,不同研究之间的差别也比较大,并且有部分研究只给出管控建议,没有具体的网络优化方案。例如:有的学者研究采用不同的网络模型分别构建了生态空间网络,通过对比不同模型下生态空间网络的生态廊道数量、网络中廊道面积和网络结构指数,筛选最优的生态空间网络构建方案^[65];AN 等^[66]根据生态廊道与生态源地的空间分布特征、网络连接指数,在生态廊道的断裂处选取核心源地斑块构建生态踏脚石,实现了对研究区生态空间网络的优化;而张萌等^[67]的研究中只给出了绿色生态空间网络的管控建议,没有具体的优化方案。

基于复杂网络理论的生态空间网络优化方法仍处于起步阶段,仅有少量研究出现,如张启斌^[39]基于度低者优先的原则,构建了乌兰布和沙漠东北缘潜在生态空间网络的增边优化策略。裴燕如等^[68]综合考虑生态节点的生态风险以及节点度中心性,构建网络优化策略,实现了鄂榆地区生态空间网络的优化。总的来讲,这些研究都是通过构建不同优先原则的增边策略实现对生态空间网络结构的优化。

利用 3S 技术进行绿色生态空间网络优化的研究较多。例如,郭慧慧^[69]将 3S 技术与常用的景观格局计算方法相结合,对慈溪市绿地绿色生态空间网络进行优化,最终从 4 种绿色生态空间网络规划预案中选出最佳的绿地绿色生态空间网络优化方案。张远景等^[70]将 GIS 与 CA - Markov 模型相结合,对哈尔滨中心城区进行绿色生态空间网络模拟优化。吴榛等^[71]基于 RS 与 GIS 技术,通过分析连通性指数确定绿地斑块节点,对绿色生态空间网络结构进行定量分析,针对性地提出扬州市绿色生态空间网络优化建议。陈涛等^[72]基于城市绿地绿色生态空间网络相关理论与城区内林鸟连接度的情况,对长沙市宁乡县中心城区绿地绿色生态空间网络进行分析,针对宁乡县中心城区绿地中存在的林鸟连接度问题提出生态优化途径,同时增加“踏脚石”途径以及人文繁荣途径进行优化。贾振毅等^[73]采用景观格局分析与最小费用模型模拟城市网络结构。

除此之外,有研究者通过分析生态节点或生态

源地的辐射范围来实现对生态源地的合理布局,如张远景等^[70]采用地理空间网格法统计空间网格中生态节点的数量,从而识别生态盲区,实现生态节点的优化布局;于强等^[43]采用泰森盲区多边形形心优化(BCBS)模型进行生态盲区识别,构建了生态节点的优化部署策略。

3 绿色生态空间网络研究相关理论

3.1 岛屿生物地理学原理

岛屿生物地理学认为岛屿上物种的丰富度与其面积存在一定的数量关系,这一理论在维持物种多样性、解决由生境破碎化造成的物种保护问题等方面发挥了重要作用^[74]。

岛屿是岛屿生物地理学中的重要概念,在岛屿生物地理学中,岛屿的定义可以被理解为:某一区域中,明显区别于基底的,许多生物集中生活的生境斑块,类似于本研究中荒漠中间的绿洲,这些生境斑块可以是大小各异、多种多样的,包括海洋中散布的岛屿、城市中的自然保护区、森林中的林窗等,因此可以将岛屿看作一个具有明显边界的生态系统,而其大小、类型等性质并不是形成“岛屿”的必要条件^[75]。

岛屿生物地理学认为,在气候条件相对一致的一定区域内,岛屿上的物种数目会随着岛屿面积的增加而增加。例如,当某一岛屿的面积增加到原来的 10 倍,其上的两栖、爬行类生物数量将翻倍。有研究表明,这一规律在不受外界扰动的岛屿中十分明显。1913 年,GRINNEL 和 SWARTH 提出了种类-面积方程^[76]

$$S = CA^Z \tag{1}$$

两端取对数可得

$$\lg S = \lg C + Z \lg A \tag{2}$$

式中 S——岛屿上所有生物物种的数量

A——岛屿面积

C——物种的空间分布密度

Z——统计指数

种类-面积方程中的 Z 值具有重要的生物学意义,例如当 Z = 0.5 时,只需将岛屿面积增加 4 倍即可将物种数目加倍,而当 Z = 0.14 时,必须使面积增加 140 倍才能达到相同的效果。

种类-面积方程是对岛屿面积与物种数量的经验统计规律,难以解释其机理,因此 MACARTHUR 和 WILSON^[77]于 1967 年提出了动态平衡理论,丰富了物种-面积关系。平衡理论引入了迁入和灭绝两个因素,而平衡则指的是迁入和灭绝这两个因素的平衡。当迁入大于灭绝,岛屿物种丰富度上升,反之

则下降,平衡时,物种丰度维持稳定。

伴随人类影响范围的不断扩大,自然生态空间由于受到人类活动的影响已经或正在成为生境岛屿,因此岛屿生物学理论在自然保护区的选址、设计和绿色生态空间网络的规划等方面被广泛应用^[78]。

3.2 景观生态流与空间再分配原理

在某区域的景观格局中,不同景观组分之间存在着物质、能量、物种和信息的交换,这一交换的内容称为景观生态流^[79-80]。景观生态流一般表现为生态流的形式,景观格局的演变必然引起物质、能量与信息的流动和空间再分配,因此生态流的运行受到景观格局的明显影响^[81-82]。

物质、能量和信息的流动势必伴随能量的转化过程,因此景观生态流在景观中的运行必须克服阻力实现^[83]。斑块间的景观生态流可视为在能级上的有序运动,斑块的能级由其所处的环境参数决定,这些环境参数包括物质组成、空间位置、生物因素等。景观生态流的运行过程可以表现为聚集和扩散两种趋势。景观中物质、能量和信息的交换主要通过 5 种媒介或传输机制实现从某一个景观组分向另外一个景观组分的流动,这 5 种媒介为:风、水、飞行动物、地面动物和人类活动^[84]。在水平方向上,生态流受到扩散、传输和运动 3 种力的驱动。扩散是一种随机运动过程,类似于热力学中的布朗运动,它是一种低耗能过程,仅在小尺度发挥作用,是景观呈现均质化的主要动力^[85]。传输指的是景观生态流中的物质流沿能量梯度下降方向的运移过程,如河道水分的侧渗过程对地下水的补给、水土流失过程等,它是景观格局中物质、能量、信息流动的主要作用力。运动是物质通过消耗自身能量在景观空间中的移动过程,很明显在这一过程中移动的主体主要为动物,这种迁移过程将导致物质和能量在景观中维持高度聚集状态^[86]。

综上所述,扩散过程使得景观中的聚集格局减少,传输对于聚集格局不存在明显的正向和负向影响,运动这一过程可形成最明显的聚集格局。在景观生态流的运行过程中,景观组分的边界可对经过景观组分边界的生态流进行过滤,对生态流的性质、方向和流量具有重要影响。

3.3 斑块-廊道-基质模型

斑块(patch)、廊道(corridor)和基质(matrix)是景观生态学中用来描述景观结构及其功能性特征的基本模型,由 FORMAN 于 1986 年正式提出^[87],它普遍适用于荒漠、森林、草原、城市等多种景观,景观中的任意一点一定是落在斑块、基质或廊道上,不存在其他可能^[88]。斑块-基质-廊道的组合是最容易

理解、最常见的景观模型,在景观格局的分析、比较与规划等方面发挥了重要作用^[89]。以该模式为核心,发展出了一系列概念、理论和方法,已经逐渐成为景观生态学的重要方面^[90]。

斑块是景观格局的基本组成单元,它指的是与周围背景具有明显区别的、非线性的、内部相对均质的地表空间范围^[91]。由于景观中的斑块具有不同的成因和演化路径,其大小、形状及外部特征各异^[92]。斑块既可以是存在生命的,如由植被覆盖的林地、草地,也可以是不存在生命的,如建筑、裸岩等;它既可以是天然形成的,如天然形成的荒漠、绿洲,也可以是人为建设的,如果园、农田等^[93]。

廊道是景观中与两侧基质存在明显区别的狭长的线性或带状地表空间,实际上,可以将廊道看作一种斑块的特殊类型,只是其形状是线性或带状的^[94]。廊道既可以是对景观空间产生分割作用的条状区域,如人工道路、河流;也可能以逐渐过渡的形式与本底呈现区别,如更新过程中的带状采伐迹地等^[95]。廊道的两端通常连接着具有重要生态作用的大型斑块,如道路两端的居民点、河流两端的湖泊、山岭等^[96]。廊道的这一特点使得它成为景观生态流经过的主要通道,对区域生态过程与生态功能的良好运行具有重要作用。

基质是景观中的本底,对景观的动态变化发挥主要作用,决定了景观的性质,广阔的草原、荒漠,大面积的森林都可以当作基质^[97]。确定某一景观类型是否为景观的基质,通常需要以下特点:①相对面积。是某一景观类型在景观总面积中所占的比例,景观中相对面积最大的景观类型往往也控制着景观生态流的运行。一般情况下,若景观中某一景观类型的相对面积大于 50% 或大于其他各类景观类型的面积总和,那么该景观类型可被认为是基质。③连通性。只用相对面积来判断基质有时会出现误判,因此引入连通性这一标准是必要的。若景观中某一景观类型连通性较高,且对其他景观类型形成了环绕包围的态势,此时该景观类型也可被认为是基质。③动态控制作用。动态控制作用指的是某一景观类型对景观整体的演化方向、速度和终点起到决定性作用。从生态意义上看,这种动态控制作用是判断某一景观类型是否为基质的根本标准。在实际中,对基质的判断往往需要将上述 3 种标准结合使用,在计算比较各景观类型的相对面积和连通性后若仍不能确定基质,则需要查阅文献或野外观测实验进行确定。

3.4 “源-汇”理论

“源-汇”理论最早用来分析大气运行过程,

“源”和“汇”的概念为分析大气污染物的产生、传输和汇集提供了有效手段^[98-100]。在景观生态学中,“源”指的是某种生态过程的源头,即能提供各种物质、能量或物种的景观单元或生态系统^[101]。“汇”是某个生态过程的重点,即各种物质、能量和物种汇集的景观单元或生态系统^[102]。对于农业面源污染来说,施用化肥和农药较多的农业用地就起到了景观中“源”的作用,而下游方向的草地、林地和湿地等景观要素起到了“汇”的作用,他们之间的一些景观要素起到了传输通道的作用^[103]。

很明显,“源”和“汇”是两个相对的概念,根据不同的生态过程,“源”和“汇”是可以相互转化的^[104]。例如水库和湖泊,在降雨过程中,雨水朝水库和湖泊汇集,对于这一生态过程来讲,湖泊和水库为景观中的“汇”。而干旱缺水时,水库、湖泊中的水又发挥了补枯的作用,不仅可改善其周边的水文环境,还可以灌溉农田,在这一生态过程中,湖泊与水库又转化为了“源”。经上述分析可知,“源”和“汇”并不是绝对的,只有当针对某一特定的生态过程时,它们才是明确的。因此,在识别景观中的“源”和“汇”时,应基于某生态过程进行。

“源-汇”理论对景观格局和生态过程进行了深入的阐释,使得对于景观的分析从静态、平面的分析转移到动态的过程分析中来^[105]。基于某一生态过程进行“源”和“汇”的空间平衡分析,可以对生态过程调节、景观格局优化提供许多有益的借鉴^[106]。当前“源-汇理论”在面源污染控制、生物多样性保护、缓解热岛效应等方面已经有大量应用,同时也是生态网络构建的重要理论基础^[107]。

3.5 生态安全格局理论

根据景观生态学的相关理论,格局和过程是相互影响的,因此一些基本的景观改变和管理措施被认为有利于区域的生态安全^[108]。这些改变或管理措施包括核心栖息地斑块保护、生态廊道的建立和生态重建等^[109-110]。而核心生态斑块识别、廊道构建与建设新的栖息地斑块是实际操作中需要首先考虑的问题。生态安全格局理论可较好地回答这一问题。

生态安全格局理论认为,无论景观是均质的还是异质的,景观中的各点对于生态安全的意义是不同的,在这些点位中存在一些现有的或潜在的生态基础设施,对于控制区域的景观生态过程具有关键作用,这些具有关键作用的点位就构成了生态安全格局^[111]。生态安全格局对于生态过程的战略意义主要体现在 3 方面,分别是:主动优势,即生态安全格局一旦被某种有利的生态过程占据,就可以以安

全格局为基础,影响控制全局的生态过程,且这一过程将会是自发的、主动的;空间联系优势,即生态安全格局有利于联系孤立的景观单元,促进其物质、能量、信息和物种的交换;高效优势,即生态安全格局对全局景观生态过程的控制具有高效和经济的特点^[112]。生态安全格局可以由源、缓冲区、源间连接、辐射道和战略点等构成,生态网络由生态源地、生态廊道与生态节点等部分构成,也是生态安全格局的一种。

4 绿色生态空间网络相关分析方法

4.1 景观格局分析法

景观格局分析法是将生态空间网络的空间密度、网络各组成部分的面积、斑块形状特征进行量化表示的一种方法^[113]。这种方法可以较好的表征景观格局状况以及生态空间网络的结构特征,但是由于该方法仅考虑到密度、面积、形状等结构特点,难以对网络的连通性进行有效分析且对网络生态功能的考虑较少,因此生态意义稍显不足。

4.2 图论分析法

基于图论的网络结构指数包括:生态空间网络综合指数,由网络环通度指数(α)、线点数(β)和连接度(γ)等指数构成,利用这些指数可以较好地反映网络整体的连接情况,可以为生态空间网络的构建与优化提供一定借鉴,然而却难以对某一个生态源地或生态廊道的重要性进行评价^[114-115];基于图论的网络结构指数是网络连接度指数,由 PASCUAL-HORTAL 等^[116]于 2006 年提出,包括整体连接度指数(IIC)、可能性连接指数(PC)以及等效连接性指数(EC)等,该方法不仅能较好地反映网络整体的连接性,而且可以定量的评价网络中廊道、源地以及节点等要素对网络整体连接性的贡献,从而为网络的构建与优化提供更加具体的建议。

4.3 复杂网络理论分析方法

复杂系统与复杂性科学被誉为 21 世纪的科学,“复杂系统理论”是复杂科学下的子领域^[117]。不同视角下复杂系统的特征不尽相同,复杂系统以不同形式、不同状态、不同规模广泛存在于地理学(土地覆盖类型-景观系统)、生态学(生物个体-生态系统)、社会学以及经济学等研究领域^[118-121]。土地景观系统是典型的复杂系统,其除了具有无序性、动态性等基本特征外,还具有多层次性、自组织适应性、异质性与相互作用性、控制性与突发涌现性^[122]。

复杂网络的抽象研究方法成为目前复杂系统研究的新热点,其是从一个新的角度和方法来研究复

杂系统,复杂网络所关注的研究对象是系统中个体相互关联作用的拓扑结构^[123]。

复杂网络的研究方法已经被广泛的应用到如WWW网络、社交网络、专家网络、航空网络、交通网络等领域^[124-125]。在景观地理学领域,基于景观生态学理论的生态网络是一种特殊的复杂网络,可以理解为区域内生态源地、生态廊道和生态节点3种景观格局要素所组成的复杂网络,它的结构、功能以及两者之间的联系一直是网络科学以及景观生态学的一个研究重点。

复杂网络分析方法是在图论的基础上发展而来的,钱学森认为,具有小世界特征、自相似特征、自组织特征和无标度特征中的一个或多个特征的网络都可以称为复杂网络^[126],生态空间网络具有明显的无标度特性。可以看作复杂网络的一种,其特性可以利用复杂网络的相关理论进行分析^[127]。复杂网络分析中的度、度分布、平均路径长度、聚类系数、介数、核数、连通度等统计指标可以很好的反映生态空间网络的基本静态特征,其中度、介数、核数、聚类系数等统计指标可以很好的识别网络中重要的源地和廊道。度-度相关性、聚-度相关性等统计指标可以很好的反映网络的同配性和层次性。同时,生态空间网络的动态特征也可以采用复杂网络的分析方法进行研究,例如于强等^[128]以磴口县为研究区,分析了县域生态空间网络在随机打击与恶意打击下网络鲁棒性的动态变化。基于复杂网络理论的生态空间网络研究方法可以更加全面地从多个角度研究生态空间网络的静态与动态特征,正逐渐成为该领域的热点方向。

5 绿色生态空间网络研究应用

当前,生态空间网络的研究范围越发广泛,从最初的城市规划、自然空间规划、动物保护领域逐渐扩展到防风固沙、矿区重建、水生态保护等领域。如陈春姊等^[129]采用最小费用模型和图论分析相结合的方法对新西兰基督城生态空间网络功能性连接的辨识和优先恢复途径进行了探讨;高宇等^[130]利用MSPA、可能性连接指数、网络密度分析等方法构建了招远市绿色空间生态空间网络并进行了优化;诸葛海锦等^[131]利用最小累积阻力模型等生态空间网络分析方法,研究了青藏高原高寒荒漠区藏羚羊的潜在廊道分布特征,并基于此提出了管控建议;于强等^[132]以乌兰布和沙漠东北缘沙漠-绿洲交错带为研究区,模拟了不同发展策略下生态空间网络的拓扑结构和统计特征,为区域防风固沙、生态建设与经济发展提供借鉴。侯宏冰等^[133]基于复杂网络增边

策略,对鄂榆典型矿区的生态空间网络进行优化,为矿区生态修复提供宏观上的参考与借鉴;SUNDARESAN等^[134]通过对Bangalore和Madurai湿地生态空间网络的分析,对城市的未来发展与管控提供了指导与借鉴。这些研究拓宽了绿色生态空间网络的研究范围,为绿色生态空间网络研究的多学科交叉提供了良好的思路。

当前,生态空间网络已经成为景观生态规划的重要理论体系之一,在生态空间网络规划中,以提取生境斑块与生物廊道为核心要点。生态空间网络进行生物保护时,首要因素是整个网络结构的大小,其与所保护的生物多少直接相关,进而影响到食物网以及整体生态系统。要确定生态空间网络大小,关键就是提取需要的生境斑块以及廊道。生境斑块需要依据所选择保护对象来确定,而廊道布局则应与功能性廊道相一致^[135-136]。生态空间网络规划往往与区域发展规划或土地利用规划相结合^[137],一般运用在中大尺度上,如市级、省级、国家,乃至洲际^[138]。

近年来,我国的生态空间网络研究逐渐受到关注。但由于起步较晚,基础理论研究相对匮乏,所以应结合国外的研究动态,建立适合中国特色的生态空间网络,制定完善的景观规划评价体系,进而保护生物的栖息环境、完善景观格局。

6 展望

生态空间网络经历了从萌芽、起步到进入快速发展阶段的过程,研究方法逐步趋于集成化、量化、先进化。研究重点从生态空间网络的提取构建逐步发展到网络空间与拓扑结构特征分析及生态空间网络优化,在城市、水文、防风固沙、土壤保持、矿区重建、动物保护等领域取得了众多研究成果。未来的研究重点主要包括:

(1)基础理论的发展完善。生态空间网络的相关研究出现时间较短,理论体系尚不健全,众多核心概念仍没有在学界达成共识。相关研究中“生态空间网络”、“绿色基础设施网络”、“景观生态空间网络”等相近概念仍然根据研究者的个人习惯混杂使用,对于学术交流与学科发展造成了一定程度的阻碍。厘清相关概念的内涵与外延,建立一套完备的理论体系,将是未来的研究重点。

(2)研究方法的改进与提升。景观格局分析、最小累积阻力模型、电路理论、形态学分析法、图论与复杂网络指数分析方法构成了生态空间网络相关研究的主要方法体系。相关研究方法在解决具体问题的同时也暴露出一些问题。部分方法或模型的主

观性较强,输出结果受研究者本身知识水平的限制较大,如最小累积阻力模型中阻力值的设定、生态源地筛选标准的设定、形态学分析中前景与背景地类的选取等;部分模型的运行效率不高,如最小累积阻力模型、复杂网络指数提取所花费的时间过长。提升生态空间网络提取、分析与优化中相关研究方法的科学性、客观性及运行效率,是该领域面临的挑战之一。

(3)时空尺度的拓宽。当前有关生态空间网络的研究往往选定某一研究区域,在某一时间断面采用固定的空间尺度展开,缺少空间尺度上的对比研

究与时间尺度上的演变与预测研究,生态空间网络结构与功能的尺度效应仍然有待揭示,随着生态空间网络相关领域的发展,研究的时空尺度将不断拓宽。

(4)生态空间网络与其他空间网络的关联。生态空间网络作为一种空间网络,与交通网、水网、电力网、动物迁徙网等其他空间网络必然产生相互影响。例如,生态空间网络中的某个节点可能是路网中的重要枢纽,同时也发挥着生态功能与交通运输功能。如何衡量网络生态空间网络与其他网络的相互影响,构建“多层网络”或“网络的网络”对其进行定量研究,将是未来的研究方向之一。

参 考 文 献

- [1] WANG S, GAO S, LI S, et al. Strategizing the relation between urbanization and air pollution: empirical evidence from global countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 243: 118611–118615.
- [2] MIGNON V, OLARREAGA M. Understanding how foreign direct investment inflows impact urbanization in Africa[J]. *International Economics*, 2020, 164(7): 48–68.
- [3] ZHAO M, CHENG W, ZHOU C, et al. Assessing spatiotemporal characteristics of urbanization dynamics in Southeast Asia using time series of DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 47.
- [4] MAHMUD H, RAHMAN M M, SHARMIN S. Urbanization impact on wetlands: a case study on Dhamrai Paurashava[J]. *The Jahangirnagar Review*, 2020, 41: 277–291.
- [5] 陈利顶,李秀珍,傅伯杰,等. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3129–3141.
CHEN Liding, LI Xiuzhen, FU Bojie, et al. Development history and future research priorities of landscape ecology in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3129–3141. (in Chinese)
- [6] KONG F, YIN H, NAKAGOSHI N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2010, 95(1–2): 16–27.
- [7] 牛腾,岳德鹏,张启斌,等. 潜在生态网络空间结构与特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 166–175.
NIU Teng, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. Spatial structure and characteristics of potential ecological networks[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 166–175. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190819&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.019. (in Chinese)
- [8] 刘世梁,侯笑云,尹艺洁,等. 景观生态网络研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(12): 3947–3956.
LIU Shiliang, HOU Xiaoyun, YIN Yijie, et al. Research progress on landscape ecological networks[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 3947–3956. (in Chinese)
- [9] 孔繁花,尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711–1719.
KONG Fanhua, YIN Haiwei. Developing green space ecological networks in Jinan City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1711–1719. (in Chinese)
- [10] KEELEY M, KOBURGER A, DOLOWITZ D P, et al. Perspectives on the use of green infrastructure for stormwater management in Cleveland and Milwaukee[J]. *Environmental Management*, 2013, 51(6): 1093–1108.
- [11] FATH B D, SCHARLER U M, ULANOWICZ R E, et al. Ecological network analysis: network construction[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 49–55.
- [12] BRUINDERINK G G, SLUIS T V D, LAMMERTSMA D, et al. Designing a coherent ecological network for large mammals in northwestern Europe[J]. *Conservation Biology*, 2003, 17(2): 549–557.
- [13] 张妍,郑宏媚,陆韩静. 城市生态网络分析研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(12): 4258–4267.
ZHANG Yan, ZHENG Hongmei, LU Hanjing. A review of ecological network analysis in urban ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 4258–4267. (in Chinese)
- [14] PETERSON E E, VER HOEF J M, ISAAK D J, et al. Modelling dendritic ecological networks in space: an integrated network perspective[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(5): 707–719.
- [15] YAN Z, YANG Z F, FATH B D. Ecological network analysis of an urban water metabolic system: model development, and a case study for Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4702.
- [16] POCOCK M J, EVANS D M, MEMMOTT J. The robustness and restoration of a network of ecological networks[J]. *Science*, 2012, 335(6071): 973.
- [17] ZHANG Y, YANG Z, FATH B D, et al. Ecological network analysis of an urban energy metabolic system: model development, and a case study of four Chinese cities[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(16): 1865–1879.
- [18] HOCTOR T S, CARR M H, ZWICK P D. Identifying a linked reserve system using a regional landscape approach: the Florida ecological network[J]. *Conservation Biology*, 2000, 14(4): 984–1000.

- [19] 赵秋叶,施晓清. 城市产业生态网络特征与演进规律——以北京市为例[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4873–4882.
ZHAO Qiuye, SHI Xiaqing. Characteristics and evolution of an urban industrial ecological network: a case study of Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4873–4882. (in Chinese)
- [20] DAME J K, CHRISTIAN R R. Evaluation of ecological network analysis: validation of output[J]. Ecological Modelling, 2008, 210(3): 327–338.
- [21] EVANS D M, POCOCK M J O, MEMMOTT J. The robustness of a network of ecological networks to habitat loss[J]. Ecology Letters, 2013, 16(7): 844–852.
- [22] 费建波,夏建国,胡佳,等. 南方传统农区乡村生态空间时空演变分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 143–152.
FEI Jianbo, XIA Jianguo, HU Jia, et al. Analysis on the spatial and temporal evolution of rural ecological space in southern traditional agricultural regions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 143–152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002016&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.016. (in Chinese)
- [23] GUO R, ZHU X, CHEN B, et al. Ecological network analysis of the virtual water network within China's electric power system during 2007–2012[J]. Applied Energy, 2016, 168: 110–121.
- [24] OLMSTED F L. The Town-Planning movement in America[J]. Annals of the American Academy of Political & Social Science, 1914, 51(1): 172–181.
- [25] 韩婧,李冲,李颖怡. 基于 GIS 的珠海市西区绿地生态网络构建[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(5): 243–251.
HAN Jing, LI Chong, LI Yingyi. Construction of green space ecological network based on GIS of western ecological new district in Zhuhai[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(5): 243–251. (in Chinese)
- [26] 陆明,曲艺. 基于生态系统服务功能的区域生态网络构建——以哈尔滨为例[J]. 中国园林, 2017, 33(10): 103–107.
LU Ming, QU Yi. Regional ecological network construction based on ecosystem service—a case study of Harbin[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(10): 103–107. (in Chinese)
- [27] YU Q, YUE D P, WANG Y H, et al. Optimization of ecological node layout and stability analysis of ecological network in desert oasis: a typical case study of ecological fragile zone located at Deng Kou County (Inner Mongolia) [J]. Ecological Indicators, 2018, 84: 304–318.
- [28] 王秀明,赵鹏,龙颖贤,等. 基于生态安全格局的粤港澳地区陆域空间生态保护修复重点区域识别[J/OL]. 生态学报, 2022(2): 1–12 [2021–10–08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20210909.1620.044.html>.
- [29] 郭家新,胡振琪,李海霞,等. 基于 MCR 模型的市域生态空间网络构建[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 275–284.
GUO Jiaxin, HU Zhenqi, LI Haixia, et al. Construction of urban ecological space network based on MCR model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 275–284. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210331&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.031. (in Chinese)
- [30] SU K, YU Q, YUE D, et al. Simulation of a forest-grass ecological network in a typical desert oasis based on multiple scenes [J]. Ecological Modelling, 2019, 413: 108834.
- [31] 卢杰,王戈,马骏,等. 基于复杂网络理论的西藏巴宜区森林景观空间结构研究[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 152–158.
LU Jie, WANG Ge, MA Jun, et al. Forest ecological network construction and structure evaluation based on complex network theory in Bayi District of Tibet[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 152–158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210416&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.016. (in Chinese)
- [32] MOE S J, HAANDE S, COUTURE R M. Climate change, cyanobacteria blooms and ecological status of lakes: a bayesian network approach[J]. Ecological Modelling, 2016, 337: 330–347.
- [33] STRONA G, LAFFERTY K D. Environmental change makes robust ecological networks fragile[J]. Nature Communications, 2016, 7: 12462.
- [34] SAMWAYS M J, PRYKE J S. Large-scale ecological networks do work in an ecologically complex biodiversity hotspot[J]. Ambio, 2016, 45(2): 161.
- [35] HAAK D M, FATH B D, FORBES V E, et al. Coupling ecological and social network models to assess “transmission” and “contagion” of an aquatic invasive species[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 190: 243–251.
- [36] 于强,岳德鹏,张启斌,等. 磴口县景观格局演变特征及生态网络构建[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 601–609.
YU Qiang, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. The evolution of landscape pattern and the construction of ecological infrastructure network in Dengkou, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(3): 601–609. (in Chinese)
- [37] 李平星,陈雯,邹露,等. 基于一体化生态空间格局的土地利用/覆被变化及其生态环境效应——以长三角为例[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 3905–3915.
LI Pingxing, CHEN Wen, ZOU Lu, et al. Eco-environmental effect of land use/cover change (LUCC) based on integrated ecological space: a case of Yangtze River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(10): 3905–3915. (in Chinese)
- [38] 郑群明,扈嘉辉,申明智. 基于 MSPA 和 MCR 模型的湖南省生态网络构建[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2021, 44(5): 1–10.
ZHENG Qunming, HU Jiahui, SHEN Mingzhi. Construction of ecological network in Hunan province based on MSPA and MCR models[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2021, 44(5): 1–10. (in Chinese)

- [39] 张启斌. 乌兰布和沙漠东北缘生态网络构建与优化研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
ZHANG Qibin. Study on the construction and optimization of ecological network in the northeastern margin of Ulanbuhe desert [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [40] 许峰,尹海伟,孔繁花,等. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J]. 生态学报, 2015,35(19): 6425 – 6434.
XU Feng, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Developing ecological networks based on MSPA and the least-cost path method: a case study in Bazhong western new district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(19): 6425 – 6434. (in Chinese)
- [41] 王越,林箐. 基于 MSPA 的城市绿地生态网络规划思路的转变与规划方法探究[J]. 中国园林,2017,33(5):68 – 73.
WANG Yue, LIN Qing. The transformation of planning ideas and the exploration of planning methods of urban green space ecological network based on MSPA[J]. Chinese Landscape Architecture,2017,33(5):68 – 73. (in Chinese)
- [42] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析[J]. 生态学报, 1995,15(2): 113 – 120.
FU Bojie. Spatial pattern analysis of agricultural landscape in Loess Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 1995,15(2): 113 – 120. (in Chinese)
- [43] 于强,岳德鹏,张启斌,等. 磴口县荒漠绿洲景观时空演变及其格局特征分析[J]. 生态科学,2016,35(6):73 – 83.
YU Qiang, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. Spatial-temporal evolution and pattern characteristics of desert oasis landscape in Dengkou County[J]. Ecological Science,2016,35(6):73 – 83. (in Chinese)
- [44] MCR AE B H. Isolation by resistance [J]. Evolution, 2006,60(8):1551 – 1561.
- [45] KWON O S, KIM J H, RA J H. Landscape ecological analysis of green network in urban area using circuit theory and least-cost path[J]. Land, 2021(10):1 – 23.
- [46] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992,23(1):1 – 16.
- [47] 俞孔坚,游鸿,许立言,等. 北京市住宅用地开发压力与城市扩张远景——基于阻力面的分析[J]. 地理研究,2012,31(7):1173 – 1184.
YU Kongjian, YOU Hong, XU Liyan, et al. A minimum cumulative resistance (MCR) analysis approach[J]. Geographical Research, 2012,31(7):1173 – 1184. (in Chinese)
- [48] 于强,岳德鹏,YANG Di,等. 基于 BCBS 模型的生态节点布局优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(12): 330 – 336.
YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Layout optimization of ecological nodes based on BCBS model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(12): 330 – 336. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161241&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.041. (in Chinese)
- [49] 喻锋,李晓波,王宏,等. 基于能值分析和生态用地分类的中国生态系统生产总值核算研究[J]. 生态学报,2016,36(6): 1663 – 1675.
YU Feng, LI Xiaobo, WANG Hong, et al. Account of gross ecosystem product based on emergy analysis and ecological land classification in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(6):1663 – 1675. (in Chinese)
- [50] 方敏哲,岳德鹏,张启斌,等. 基于能值分析的磴口县土地生态经济系统可持续性研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(4):178 – 185.
FANG Minzhe, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. Sustainability of land eco-economic system in Dengkou County on emergy analysis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017,32(4):178 – 185. (in Chinese)
- [51] ZHANG Q B, YUE D P, FANG M Z, et al. Study on sustainability of land resources in Dengkou County based on emergy analysis[J]. Journal of Cleaner Production,2018,171:580 – 591.
- [52] GOLDSTEIN E L, GROSS M, DEGRAAF R M. Wildlife and greenspace planning in medium-scale residential developments [J]. Urban Ecology, 1983, 7(3):201 – 214.
- [53] JONGMAN R H G. Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks [J]. Landscape & Urban Planning, 1995, 32(3):169 – 183.
- [54] MONTIS A D, BARTHELEMY M, CHESSA A, et al. The structure of inter-urban traffic: a weighted network analysis[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2005, 34(5):905 – 924.
- [55] YAN C, ZHANG Z. Dome-shaped transition between positive and negative interactions maintains higher persistence and biomass in more complex ecological networks[J]. Ecological Modelling, 2018, 370:14 – 21.
- [56] UPADHYAY S, ROY A, RAMPRAKASH M, et al. A network theoretic study of ecological connectivity in Western Himalayas [J]. Ecological Modelling, 2017, 359:246 – 257.
- [57] 曾琦芳. 高校新校区生态网络系统构建方式研究[D]. 厦门:华侨大学,2007.
ZENG Qifang. Study on the construction of ecological network system of new campus in colleges and universities[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2007. (in Chinese)
- [58] 段飞. 滨海城市高校生态网络模式研究——以青岛、深圳地区高校为例[D]. 青岛:山东建筑大学,2016.
DUAN Fei. Study on ecological network model of colleges and universities in coastal cities—a case study of colleges and universities in Qingdao and Shenzhen[D]. Qingdao: Shandong Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [59] 傅强,顾朝林. 基于生态网络的生态安全格局评价[J]. 应用生态学报,2017,28(3):1021 – 1029.
FU Qiang, GU Chaolin. Evaluation of ecological security pattern based on ecological network[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(3):1021 – 1029. (in Chinese)

- [60] 刘耕源,杨志峰,陈彬. 基于能值分析方法的城市代谢过程研究——理论与方法[J]. 生态学报,2013,33(15):4539–4551.
LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin. Urban metabolism process based on emergysynthesis: theory and method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(15):4539–4551. (in Chinese)
- [61] 闫维,李洪远,蔡喆,等. 滨海新区规划对区域生态网络结构的影响分析[J]. 城市环境与城市生态,2010(2):9–13.
YAN Wei, LI Hongyuan, CAI Zhe, et al. Influence analysis of Binhai new area planning on regional ecological network structure[J]. Journal of Safety and Environment,2010(2):9–13. (in Chinese)
- [62] 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[J]. 植物生态学报,2005,29(1):144–152.
WANG Haizhen, ZHANG Liquan. A GIS, landscape pattern and network based planning of ecological networks for Xiamen Island[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(1):144–152. (in Chinese)
- [63] 梁鑫斌,郭娜娜,连洪燕,等. 城市生态网络构建与优化——以徐州市为例[J]. 重庆建筑,2021,20(6):5–8.
LIANG Xinbin, GUO Nana, LIAN Hongyan, et al. Construction and optimization of urban area ecological network[J]. Chongqing Architecture,2021,20(6):5–8. (in Chinese)
- [64] CUI L, WANG J, SUN L, et al. Construction and optimization of green space ecological networks in urban fringe areas; a case study with the urban fringe area of Tongzhou district in Beijing[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276(2):124266.
- [65] 梁发超,胡其玉,起晓星. 基于生命共同体的景观生态风险评价与管控策略——以成渝城市群为例[J]. 经济地理,2021,41(8):152–159.
LIANG Fachao, HU Qiyu, QI Xiaoxing. Landscape ecological risk assessment and management strategy based on life community: a case study of Chengdu-Chongqing Urban agglomeration[J]. Economic Geography,2021,41(8):152–159. (in Chinese)
- [66] AN Y, LIU S, SUN Y, et al. Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory[J]. Landscape Ecology, 2020(5):2059–2076.
- [67] 张萌,李威,尔惟. 大运河文化保护传承利用视角下的国土空间管控策略研究——以天津市为例[J]. 城市,2020(12):73–79.
ZHANG Meng, LI Wei, ER Wei. Research on space control strategy from the perspective of the grand canal cultural protection, inheritance and utilization—taking Tianjin as an example[J]. City,2020(12):73–79. (in Chinese)
- [68] 裴燕如,孙炎浩,于强,等. 黄河流域典型矿区生态空间网络优化——以鄂榆地区为例[J]. 煤炭学报,2021,46(5):1541–1554.
PEI Yanru, SUN Yanhao, YU Qiang, et al. Optimization of ecological spatial network in typical mining areas of the Yellow River Basin: take Ordos and Yulin areas of Yellow River Basis as examples[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(5):1541–1554. (in Chinese)
- [69] 郭慧慧. 基于GIS的城市绿地景观格局研究与生态网络优化——以慈溪市中心城区为例[D]. 杭州:浙江农林大学,2012.
GUO Huihui. Study on spatial structure of urban greenbelt landscape and optimization of ecological network based on GIS—a case study of the central area of Cixi City[D]. Hangzhou:Zhejiang A&F University, 2012. (in Chinese)
- [70] 张远景,俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化[J]. 生态学报,2016,36(21):6969–6984.
ZHANG Yuanjing, YU Binyang. Analysis of urban ecological network space and optimization of ecological network pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(21):6969–6984. (in Chinese)
- [71] 吴榛,王浩. 扬州市绿地生态网络构建与优化[J]. 生态学杂志,2015,34(7):1976–1985.
WU Zhen, WANG Hao. Establishment and optimization of green ecological networks in Yangzhou City[J]. Chinese Journal of Ecology,2015,34(7):1976–1985. (in Chinese)
- [72] 陈涛,陈月华,覃事妮. 基于连接度评价的宁乡县城市网络规划[J]. 绿色科技,2017(4):132–136.
CHEN Tao, CHEN Yuehua, QIN Shini. Urban network planning of Ningxiang County based on connectivity evaluation[J]. Journal of Green Science and Technology, 2017(4):132–136. (in Chinese)
- [73] 贾振毅,陈春娣,童笑笑,等. 三峡沿库城镇生态网络构建与优化——以重庆开州新城为例[J]. 生态学杂志,2017,36(3):782–791.
JIA Zhenyi, CHEN Chundi, TONG Xiaoxiao, et al. Developing and optimizing ecological networks for the towns along the Three Gorges Reservoir: a case of Kaizhou new town, Chongqing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(3):782–791. (in Chinese)
- [74] 高增祥,陈尚,李典谟,等. 岛屿生物地理学与集合种群理论的本质与渊源[J]. 生态学报,2007,27(1):304–313.
GAO Zengxiang, CHEN Shang, LI Dianmo, et al. Origin and essence of island biogeography and metapopulation theory[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(1):304–313. (in Chinese)
- [75] FEINSINGER P, WOLFE J A, SWARM L A. Island ecology: reduced hummingbird diversity and the pollination biology of plants, trinidad and Tobago, West Indies[J]. Ecology, 1982, 63(2):494–506.
- [76] TIORVE E, TIORVE K M. Species-area relationship[M]. Oxford: Oxford University Press,2017.
- [77] MACARTHUR R H, WILSON E O. Biogeography and ecology in a new setting: the theory of island biogeography[J]. Science,1968,159(3810):71–72.
- [78] 武晶,余新春,刘志民,等. 科尔沁沙地“生境岛屿”面积对植物物种多样性及其分布格局的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(1):45–55.

- WU Jing, YU Xinchun, LIU Zhimin, et al. Effects of “habitat island” area on plant species diversity and its distribution pattern in Horqin sand land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 45–55. (in Chinese)
- [79] XIE Yuzuo, LI Qianxun. Optimal operation cascade reservoirs in the Qing river considering ecological flow[J]. Water Resources Research, 2021, 10(1): 1–10.
- [80] 王军, 傅伯杰, 陈利顶. 景观生态规划的原理和方法[J]. 资源科学, 1999, 21(2): 71–76.
WANG Jun, FU Bojie, CHEN Liding. Principles and methods of landscape ecological planning[J]. Resources Science, 1999, 21(2): 71–76. (in Chinese)
- [81] TUTNER M G, GARDNER R H, O NEILL R V. Landscape ecology in theory and practice[J]. Geography, 2003, 83(5): 479–494.
- [82] WIENS J A, STENSETH N C. Ecological mechanisms and landscape ecology[J]. Oikos, 1993, 66(3): 369–380.
- [83] 程迎轩, 王红梅, 刘光盛, 等. 基于最小累计阻力模型的生态用地空间布局优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 248–257.
CHENG Yingxuan, WANG Hongmei, LIU Guangsheng, et al. Spatial layout optimization for ecological land based on minimum cumulative resistance model[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 248–257. (in Chinese)
- [84] 邬建国. 景观生态学——概念与理论[J]. 生态学杂志, 2000, 19(1): 42–52.
WU Jianguo. Landscape ecological—concepts and theories[J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(1): 42–52. (in Chinese)
- [85] 陈竑, 田雷, 陈琪, 等. 强化景观生态过程与格局的连续性与完整性, 促进城市可持续发展[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2000, 17(1): 50–53.
CHEN Hong, TIAN Lei, CHEN Qi, et al. Strengthen continuity and integrity of scenery ecological process and pattern to promote sustainable development of city[J]. Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition), 2000, 17(1): 50–53. (in Chinese)
- [86] 郭晋平. 景观生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [87] RICHARD T T F, MICHEL G. Landscape ecology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [88] CHEN Youzhu, SU Ping. The explore of landscape planning and design of urban complex based on the Patch-Corridor-Matrix Model[J]. Journal of Environmental Science and Engineering A, 2012(12): 1335–1343.
- [89] 蒋依依, 王仰麟, 成升魁. 旅游景观生态系统格局: 概念与空间单元[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 910–915.
JIANG Yiyi, WANG Yanglin, CHENG Shengkui. Preliminary research on patterns of the tourism landscape ecosystem: concept and spatial units system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 910–915. (in Chinese)
- [90] 宁立新, 周云凯, 白秀玲, 等. 鄱阳湖区景观格局季相变化及其优化调控研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 439–453.
NING Lixin, ZHOU Yunkai, BAI Xiuling, et al. Research on the seasonal variations and optimization of landscape pattern in Poyang Lake Region, China[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 439–453. (in Chinese)
- [91] 陈利顶, 徐建英, 傅伯杰, 等. 斑块边缘效应的定量评价及其生态学意义[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1827–1832.
CHEN Liding, XU Jianying, FU Bojie, et al. Quantitative assessment of patch edge effects and its ecological implications[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(9): 1827–1832. (in Chinese)
- [92] FORMAN R T T, GODRON M. Patches and structural components for a landscape ecology[J]. Bioscience, 1981, 31(10): 733–740.
- [93] 张晓平, 朱道林. 城乡建设用地增减挂钩政策下的农村居民点斑块整理模式评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 244–249.
ZHANG Xiaoping, ZHU Daolin. Evaluation for consolidation model of rural residential patches based on policy of linked change of rural-urban construction land[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 244–249. (in Chinese)
- [94] ZHU Qiang, YU Kongjian, LI Dihua. The width of ecological corridor in landscape planning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(9): 2406–2412.
- [95] 李东, 由亚男, 张文中, 等. 中哈边境地区旅游廊道空间布局与发展系统[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 424–433.
LI Dong, YOU Ya’nan, ZHANG Wenzhong, et al. Spatial distribution of tourism corridor and development system in the China–Kazakhstan border area[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 424–433. (in Chinese)
- [96] 邓金杰, 陈柳新, 杨成韞, 等. 高度城市化地区生态廊道重要性评价探索——以深圳为例[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 573–582.
DENG Jinjie, CHEN Liuxin, YANG Chengyun, et al. Significance evaluation of ecological corridor in an highly-urbanized areas: a case study of Shenzhen[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 573–582. (in Chinese)
- [97] FORMAN R T T. Some general principles of landscape and regional ecology[J]. Landscape Ecology, 1995, 10(3): 133–142.
- [98] BASTOS A, PEREGON A, GANI É A, et al. Influence of high-latitude warming and land-use changes in the early 20th century northern Eurasian CO₂ sink[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(6): 065014.
- [99] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406–2413.
CHEN Liding, FU Bojie, XU Jianying, et al. Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “Source-Sink” ecological process[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2406–2413. (in Chinese)
- [100] 王明星, 张仁健, 郑循华. 温室气体的源与汇[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 75–79.

- WANG Mingxing, ZHANG Renjian, ZHENG Xunhua. Sources and sinks of greenhouse gases [J]. Climatic and Environmental Research, 2000, 5(1): 75–79. (in Chinese)
- [101] 李国煜, 林丽群, 伍世代, 等. 生态源地识别与生态安全格局构建研究——以福建省福清市为例[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(3): 120–125.
- LI Guoyu, LIN Liqun, WU Shidai, et al. Recognition of ecological source and ecological security pattern construction: a case study of Fuqing City[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(3): 120–125. (in Chinese)
- [102] FOPPEN R P B, CHARDON J P, LIEFVELD W. Understanding the role of sink patches in source-sink metapopulations: *Reed Warbler* in an agricultural landscape[J]. Conservation Biology, 2000, 14(6): 1881–1892.
- [103] 张云路, 李雄, 田野. 基于景观生态学“源-汇”理论的市域尺度生态功能分区——以内蒙古通辽市为例[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 65–72.
- ZHANG Yunlu, LI Xiong, TIAN Ye. Study on ecological function zoning in the Municipal Administrative Area based on landscape ecology source-sink theory: a case study of Tongliao, Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 65–72. (in Chinese)
- [104] STEVEN W. View Landscape pattern and productivity effects on source-sink dynamics of deer populations[J]. Ecological Modelling, 2001, 143(1): 17–32.
- [105] GUNDERSEN G, JOHANNESEN E, ANDREASSEN H P, et al. Source-sink dynamics: how sinks affect demography of sources[J]. Ecology Letters, 2010, 4(1): 14–21.
- [106] FRYXELL J M. Habitat suitability and source-sink dynamics of beavers[J]. Journal of Animal Ecology, 2010, 70(2): 310–316.
- [107] NOVARO A J, FUNES M C, WALKER R S. An empirical test of source-sink dynamics induced by hunting[J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 42(5): 910–920.
- [108] 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.
- YU Kongjian. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8–15. (in Chinese)
- [109] 陈利顶, 吕一河, 田惠颖, 等. 重大工程建设中生态安全格局构建基本原则和方法[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 674–680.
- CHEN Liding, LÜ Yihe, TIAN Huiying, et al. Principles and methodology for ecological rehabilitation and security pattern design in key project construction[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 674–680. (in Chinese)
- [110] GUO Hongqiong, YU Qiang, PEI Yanru, et al. Optimization of landscape spatial structure aiming at achieving carbon neutrality in desert and mining areas[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 322: 129156.
- [111] DU P J, XIA J, QIAN D U, et al. Evaluation of the spatio-temporal pattern of urban ecological security using remote sensing and GIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(3): 848–863.
- [112] SU Y, CHEN X, LIAO J, et al. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 19: 35–46.
- [113] 王洪成. 亚布力国家森林公园森林景观格局分析及生态评价[J]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- WANG Hongcheng. Forest landscape pattern analysis and ecological evaluation of Yabuli National Forest Park[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [114] 袁少雄, 宫清华, 陈军, 等. 广东省自然保护区生态网络评价及其生态修复建议[J]. 热带地理, 2021, 41(2): 10.
- YUAN Shaoxiong, GONG Qinghua, CHEN Jun, et al. Evaluation of an ecological network of nature reserves in Guangdong Province, and suggestions for ecological restoration[J]. Tropical Geography, 2021, 41(2): 10. (in Chinese)
- [115] 梁艳艳, 赵银娣. 基于景观分析的西安市生态网络构建与优化[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3767–3776.
- LIANG Yanyan, ZHAO Yindi. Construction and optimization of ecological network in Xi'an based on landscape analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3767–3776. (in Chinese)
- [116] 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[J]. Landscape Ecology, 2006, 21(7): 959–967.
- [117] MILO R, SHEN-ORR S, ITZKOVITZ S, et al. Network motifs: simple building blocks of complex networks[J]. Science, 2002, 298(5594): 824–827.
- [118] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138–144.
- CHEN Xiaogang, SUN Ke, CAO Yijia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138–144. (in Chinese)
- [119] 乔少杰, 韩楠, 张凯峰, 等. 复杂网络大数据中重叠社区检测算法[J]. 软件学报, 2017, 28(3): 631–647.
- QIAO Shaojie, HAN Nan, ZHANG Kaifeng, et al. Algorithm for detecting overlapping communities from complex network big data[J]. Journal of Software, 2017, 28(3): 631–647. (in Chinese)
- [120] 董迪, 安海忠, 郝晓晴, 等. 基于复杂网络的国际铜矿石贸易格局[J]. 经济地理, 2016, 36(10): 93–101.
- DONG Di, AN Haizhong, HAO Xiaoqing, et al. International copper ore trade pattern based on complex network theory[J]. Economic Geography, 2016, 36(10): 93–101. (in Chinese)
- [121] SPORNS O. The human connectome: a complex network[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2011, 1224(1): 109–125.
- [122] YANG Y, YANG H. Complex network-based time series analysis[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2008, 387(5–6): 1381–1386.

- [123] 周锐,王桂娟,邓皓天,等. 复杂网络聚类特征层次布局算法[J/OL]. 计算机应用研究;1-7[2021-10-08]. <http://www.aocmag.com/article/02-2022-02-010.html>.
ZHOU Rui, WANG Guijuan, DENG Haotian, et al. Complex network clustering feature multi-level layout algorithm[J/OL]. Application Research of Computers. 1-7[2021-10-08]. <http://www.aocmag.com/article/02-2022-02-010.html>. (in Chinese)
- [124] YAO X. Multi-network evolutionary systems and automatic decomposition of complex problems[J]. International Journal of General Systems, 2006, 35(3):259-274.
- [125] BENYOUSSEF M, EZZAHRAOUI H, BENYOUSSEF A. Optimal topology to minimizing congestion in connected communication complex network[J]. International Journal of Modern Physics C, 2017, 28(6):1-18.
- [126] 兰鑫. 时间序列的复杂网络转换策略研究[D]. 重庆:西南大学, 2015.
LAN Xin. The study of transformation from time series to complex networks[D]. Chongqing:Southwest University, 2015. (in Chinese)
- [127] 于强. 基于复杂网络理论的荒漠绿洲区生态网络研究[D]. 北京:北京林业大学, 2018.
YU Qiang. Research on ecological network of desert oasis based on complex network theory[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018. (in Chinese)
- [128] 于强,杨澜,岳德鹏,等. 基于复杂网络分析法的空间生态网络结构研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3):214-224.
YU Qiang, YANG Lan, YUE Depeng, et al. Investigation on complex spatial ecological network structure based on complex network analysis method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):214-224. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180326&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.026. (in Chinese)
- [129] 陈春娣, COKIN M D, MARIA I E, 等. 城市生态网络功能性连接辨识方法[J]. 生态学报, 2015, 35(19):6414-6424.
CHEN Chudi, COKIN M D, MARIA I E, et al. Identifying and evaluating functional connectivity for building urban ecological networks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19):6414-6424. (in Chinese)
- [130] 高宇,木皓可,张云路,等. 基于 MSPA 分析方法的市域尺度绿色网络体系构建路径优化研究——以招远市为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20):7547-7556.
GAO Yu, MU Haoke, ZHANG Yunlu, et al. Research on construction path optimization of urban-scale green network system based on MSPA analysis method: taking Zhaoyuan City as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7547-7556. (in Chinese)
- [131] 诸葛海锦,林丹琪,李晓文. 青藏高原高寒荒漠区藏羚生态廊道识别及其保护状况评估[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8):2504-2510.
ZHU GE Haijin, LIN Danqi, LI Xiaowen. Identification of ecological corridors for Tibetan antelope and assessment of their human disturbances in the alpine desert of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8):2504-2510. (in Chinese)
- [132] 于强,刘智丽,岳德鹏,等. 磴口县生态网络多情景模拟研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2):182-190.
YU Qiang, LIU Zhili, YUE Depeng, et al. Multi-scenario simulation of ecological networks in Dengkou County[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):182-190. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180224&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.024. (in Chinese)
- [133] 侯宏冰,郭红琼,于强,等. 基于 LMBA 策略的鄂尔多斯市生态空间网络优化[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(1):219-227.
HOU Hongbing, GUO Hongqiong, YU Qiang, et al. Ecospatial network optimization in Ordos based on LMBA strategy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1):219-227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.025. (in Chinese)
- [134] SUNDARESAN J, ALLEN A, JOHNSON C. Reading urban futures through their blue infrastructure: wetland networks in Bangalore and Madurai, India[J]. Urban Water Trajectories, 2018, 6(8):35-50.
- [135] PETER V, JOSEPH R, TODD R, et al. Mapping functional connectivity[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(1):64-71.
- [136] GAAFF A, REINHARD S. Incorporating the value of ecological networks into cost-benefit analysis to improve spatially explicit land-use planning[J]. Ecological Economics, 2012, 73(1):66-74.
- [137] RO B H, MART K, IB K. European ecological networks and greenways[J]. Landscape & Urban Planning, 2004, 68(2-3):305-319.
- [138] 尹海伟,孔繁花,析毅,等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10):2863-2874.
YIN Haiwei, KONG Fanhua, QI Yi, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(10):2863-2874. (in Chinese)