

# 景观生态网络国内外研究进展及发展趋势

朱春风, 宋宏利\*, 张启斌, 宋 朕, 张贝贝

河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2022年4月5日; 录用日期: 2022年5月6日; 发布日期: 2022年5月13日

## 摘 要

生态网络作为当今景观生态学中重要的热点问题, 围绕着他的理论体系、模型构建和分析方法也在随着时代的进步, 一直处在学术探讨的旋涡当中。本文着重对生态网络中有关景观生态学的理论支撑、生态网络构建分析、模型模拟方法研究进行分析分类, 并对其发展趋势进行展望。主要介绍景观生态网络在栖息地保护、生态物种多样性的保护、城市生态安全格局构建等方面的应用。

## 关键词

生态网络, 空间异质性, 景观连接度, 生物多样性, 生态安全

# Research Progress and Development Trend of Landscape Ecological Network at Home and Abroad

Chunfeng Zhu, Hongli Song\*, Qibin Zhang, Zhen Song, Beibei Zhang

School of Geosciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: Apr. 5<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 6<sup>th</sup>, 2022; published: May 13<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

As an important hot issue in landscape ecology today, the ecological network has been in the whirlpool of academic discussion with the progress of the times around its theoretical system, model construction and analysis methods. This paper focuses on the analysis and classification of the theoretical support of landscape ecology in the ecological network, the analysis of ecological network construction and the research on model simulation methods, and prospects its development trend. This paper mainly introduces the application of landscape ecological network in the protec-

\*通讯作者。

tion of mine habitat, the protection of ecological species diversity, and the construction of urban ecological security pattern.

## Keywords

Ecological Network, Spatial Heterogeneity, Landscape Connectivity, Biodiversity, Ecological Security

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国著名学者邬建国在 2007 年就曾强调景观生态学要与航空摄影测量学、生态学和地理学相结合进行综合研究[1]。随着其他学科的发展,景观生态学也更加强调时空尺度、生态学过程和空间格局在互馈机理下的相互作用。随着近些年,城市化进程的不断加快,景观破碎化现象严重、生态环境问题开始日益加剧[2],生态网络逐渐成为景观生态学、地理学、城市建设与规划中的研究热点。

针对生态网络的研究,众多学者根据各自领域和研究目的的不同,主要研究有生态网络的结构[3]和功能[4] [5]、生态网络的构建[6]、评价[7]及优化[8]。对于区域尺度而言,建立生态网络的目的是为了生物多样性、维持生态服务功能[9]。对于次级县市的发展,从能值、生态系统服务功能价值角度评估与构建景观生态网络的方式为其策略研究提供了一定程度的参考[10]。生态网络也经历了从定性到定量的研究,最小耗费阻力模型因其具有模型简单、算法清晰等优点,已经成为生态网络构建和优化的普遍用法[11] [12] [13] [14]。

目前国内外学者对景观生态网络的概念尚未达到统一,针对不同研究尺度和目的选择合适的分析方法,仍是该领域的研究热点之一。本文通过阅读大量相关文献,基于前人的研究,对景观生态网络的概念、理论研究、分析方法、应用进展等方面进行系统的归纳和回顾,并进行一定的总结和概括[15],进一步探讨生态网络与景观生态学的内在联系,对比分析当前并提出我国在景观生态网络研究方面存在的一些主要问题,为人们在接下来的景观生态网络研究和应用中提供借鉴。

## 2. 景观生态网络概念的形成

### 2.1. 景观的概念

景观的含义极其丰富,以景观为研究对象,其所具有的空间异质性[16]、地域性、可辨识性、可重复性、功能一致性、尺度性和多功能性等特性也是景观生态学研究的重要方向[17]。

美国的 Forman 认为,景观是指一组以相似方式重复出现的相互作用的生态系统所组成的异质性地表区域[18]。以色列生态学家 Naveh 提出,强调景观是人类生存空间内可见的客体,是将地理圈与人类圈和生物圈综合为一体的[19]。美国景观生态学家 Wiens 认为,无论从微观还是宏观角度上看,景观在不同尺度上是不均匀的,可以将其看做具有异质性或镶嵌性的空间单元[20]。无论是哪种说法,景观都与生态密切相关。

在 1939 年,德国著名生物地理学家 Troll [21]就提出,把景观正式的引入生态学中,认为景观是人类在其所生活的环境空间的总体和其视觉所能看见的一切整体,并强调景观生态学是与刚发展不久的航空

摄影测量学、生态学和地理学结合在一起的一项综合研究[22]。

我国著名景观学者邬建国也对景观的概念进行了狭义和广义的分类，狭义的景观暗含着人类自身的视角，主要指以 Forman 为代表的将空间范围限定在几公里至几百公里的景观。广义的景观主要是以美国景观生态学家 Wiens 和 Risser 为代表的生物感知视角，强调景观的空间异质性，对空间范围没有限制。随着遥感技术、GIS 技术、航空摄影测量技术的迅猛发展，景观也与其进行了技术和理论的融合，渐渐的广义景观的概念为多数生态学家所接受，之后出现的生态网络也不仅仅局限于空间尺度的研究。

景观生态学作为一门交叉学科，它与生态学、地理学、环境学有着综合的交叉领域。景观要素借助着由节点和廊道相互交叉连接形成的景观网络，进行着能量流、信息流、物质流的交换[23]。

## 2.2. 生态网络的概念

生态网络的这一概念由来已久，它最初是从生物保护领域发展而来。早在 1895 年，达尔文在他撰写的《物种起源》一书中就描绘了一个“纷繁的河岸”：那里林木交错、虫鸟欢叫、蚯蚓蠕动，这是何等交互依存的复杂场景[24]！而后在 1887 年，生物学家 Forbes 就提出了：动植物是相互联系的，并处在共存与一个有机复杂体系的状态，而他们的相互作用又影响着这个复杂体系的状态，这或许就是生态网络的萌芽[25]。早些时期的人们，对于生物保护的措施和理念还仅仅局限于设立国家生物公园和自然保护区，以某块片状区域作为生物保护的\*\*中心地带。但是在长期的管理实践中，人们渐渐的开始察觉到单独、片面的将野生动植物的栖息地保护起来，难以应对城市发展对野生动植物保护所造成的影响。在这种情况下，人们开始意识到通过将景观连接起来从而恢复各个区域生态系统的动态性要比在非连接的状态下单独片面的建造生物保护区的措施更加有利于保障动植物生态系统的可持续性[26]。

目前对于生态网络的概念界定，学术界还没有统一的定义，不同领域的专家学者对于生态网络理解和功能都有着自己独特的见解和立场。总体来说不同专家学者眼中的生态网络有助于维持生态过程的这一一致性[27]。同时也具有以下特征：第一，生态网络作为网络的结构是具有连接性的。第二，生态网络是从生物保护领域发展而来的，具有一定的生态功能，能够维持生态系统的动态性[26]。第三，生态网络是由发挥重要连接功能的生态廊道所组成的，生态廊道的空间结构是线性的。第四，生态网络具有整体性，网络的节点、边、基质构成了系统的整体性[28]。考虑到这些网络特征，本文将生态网络定义为基于景观生态学原理，利用空间中各种线性的空间廊道，以维持区域内生态系统动态、保护生物多样性及景观完整性为目的，将景观破碎斑块进行有机的连接在一起，形成系统的整体性。

## 2.3. 景观生态网络的概念

景观生态的概念最初是由欧洲传入北美，1939 年，Troll 在用航空照片研究东非土地利用问题时，首次提出景观生态这一词，并从一开始就强调这是一项从地理学和生物学两种科学思想中得出来的[29]。接着在 1983 年，Troll 又对景观生态的概念进行了补充，他提出景观生态学绝不是一个新的学科或是一个学科新的分支，而是一项各领域综合研究的特殊观点[30]。之后随着二战的爆发，景观生态学的研究也停滞了一段时间。

但是在二战后，人们渐渐的投入到建设“新家园”的时代，环境问题、粮食、人口问题也愈加严重。这些问题的产生，也促进了生态学一词慢慢走近大众的视野，逐渐变成家喻户晓的词汇。为了解决这些问题，一系列的土地资源的调查、开发、研究及利用等工作在各个国家纷纷开展起来。此时，以土地为主要研究对象的景观生态学也引起了学术界的\*\*热浪[31]。直到 20 世纪 80 年代初，中欧一直是景观生态学研究的主要阵地。表 1 [23]为景观生态网络概念的发展过程，不同时间段，人们遇到的问题不同、研究目标和内容不同、产生的生态网络结构也不同，但都有一个共同点，就是强调生态过程的一致性[32]。

**Table 1.** The development of landscape ecological network concept [23]**表 1.** 景观生态网络概念的发展[23]

来源 ources	角度 Aspect	生态网络含义 Meaning of ecological network
[33]	网络的重要性	提供人们接近居住地的开放空间连接乡村与城市空间，并将其连成一个循环系统
[34]	廊道的连接性	连接公园、自然保护区、文化景观或历史遗迹之间及其聚落的开放空间
[35]	生态系统的多重稳定性	连接开放空间的景观链，认为生态网络是具有自然特征的廊道集文化、生态、娱乐于一体
[36]	生态过程的一致性	由多种类型的生态节点和连接各节点的生态廊道组成的空间连贯的生态系统系统中的生物有机体之间进行有机交流其目的是为了维持生态系统系统中的生物有机体之间进行有机交流其目的是为了维
[37]	土地规划及生态网络的功能性	由线性要素组成的土地网络是为了多种用途而规划、设计和管理，应用保护生物学和景观生态学来解决生物多样性保护问题的生态学
[38]	生物多样性的保护	思想，能有效缓解生物多样性保护需求和人类对自然资源需求之间的思想，能有效缓解生物多样性保护需求和人类对自然资源需求之间的矛盾

### 3. 生态网络与景观生态学的内在联系

#### 3.1. 景观要素与生态网络

景观要素是构成景观的基础，作为景观的个体组成成分，其大致可分为社会文化因素和自然要素部分。若想进一步对景观要素进行分析，可以分为自然景观要素、历史人文景观要素、工程设施景观要素 [39]。不同于景观学中，单独对景观要素的色彩、形态进行分析。景观生态网络中，主要对于景观要素进行识别，以助于完成生态网络构建的第一步——生态源地的识别。生态源地的识别需要对景观要素进行提取，再根据不同的研究区状况，对识别后的景观要素进行一定的筛选。景观要素不仅对生态网络中生态源地的识别有重要的影响，同样也影响着生态廊道的选取和潜在生态廊道的构建。

#### 3.2. 景观结构与生态网络

景观结构是景观组分和要素的数量构成，以及他们在空间上的排列和组合方式及分布特征。其中构成景观的不同类型的生态系统的空间结构特征也被称作景观格局。景观结构的着重点不再是单个类型的景观要素和组分，而是他们的空间布局 and 分布特征。在景观生态学中常用“斑块 - 基质 - 廊道” [40] [41] [42] 这一模式来表达景观的空间结构，而这一模式首先在外形就与网络相似。景观生态学研究表明，斑块是景观模式的基本组成部分，与周围背景不同，是指相对均匀的非线性表面区域。根据其形成原因和机制，可以相应的分为：干扰斑块、残存斑块、环境资源斑块、引进斑块等 [43]。用来衡量斑块尺度的指标有：斑块数量、斑块面积、斑块形状、斑块内源比、斑块的空间构型。廊道指的是不同于周围景观基质的线状或带状的景观要素，河流廊道也属于廊道中的一种表现形式。基质是景观中面积最大、连接性最好的景观要素类型 [44]。要想成为基质需具备以下三种特性：第一，相对面积，基质作为控制景观中主要的流，通常所属景观要素所占的面积要比其他景观要素大的多 [45]；第二，连接度，当景观中的某一要素

连接的较为好的时候,并环绕着其他景观要素时,可以认为该景观要素为基质;第三,动态控制,当景观中某一要素对景观的动态控制程度要比其他的景观要素类型大时,可以认为该景观要素为基质。

生态网络是用来描述在生态系统中,不同分室间物质、能量流动的结构[46],其基本构成单元是分室和路径。将生态系统中具有特定的功能单位叫做分室,路径则是指不同分室间物质、能量流动的结构[47]。

### 3.3. 尺度 - 过程 - 格局与生态网络

景观尺度、过程与格局(Landscape Scale, Process and Pattern, LSPP)作为景观生态学理论研究的重要内容,它主要强调时空尺度、生态学过程和空间格局在互馈机理下的相互作用,注重时空异质情况下人与自然的耦合作用[48]。LSPP已然成为景观生态学研究内容中最为活跃的方向之一。

LSPP中的尺度一词,大致分为空间上、时间上和组织上的。组织尺度的概念多应用于生态学中组织层次(如个体、种群、群落、生态系统、景观)纵向组成的组织系统中[49]。在景观生态学上主要是用幅度和粒度来表示的,景观中最小能够辨别单元所代表的特征长度和体积被称为空间粒度,将某一现象和事件所发生的时间间隔和频率称为时间粒度[50]。“幅”字多用于形容领土和疆域范围,“度”字多用于计量单位。研究对象在空间和时间的持续性的范围和长度用幅度来表示。LSPP中的过程主要是强调生态学中某一现象和事件发生和发展时的动态特征,也是景观生态系统内部与不同系统之间的物质、能量或信息的流动及其进行迁移转化的总体过程[51][52]。LSPP中的格局主要是指空间格局,它包括了景观组成单元类型、数目以及空间分布与配置[53]。空间格局可以粗略的分为随机型、规则型和聚集型。空间格局体现了景观中的异质性,也是各种生态过程在不同尺度下作用的结果,其呈现也影响着过程的变化[54]。

对于景观生态网络而言,LSPP的尺度从一开始就决定了网络的大小、网络的特征,明确了构建生态网络的目的。景观生态学的大尺度主要反映大气候分异,国际长期生态研究计划(ILTER)主要依据研究站进行生态系统过程与格局方面的研究,国际上目前存在的观测网络,大部分都是基于长期定位观测,收集有关生态系统的综合数据[55]。中尺度主要反映地表结构分异,多应用于城市生态网络结构演变分析[56],小尺度主要反映土壤、植物和小气候分异[57]。生态网络的作用主要体现在城市绿化区域建设和自然保护区生态多样性的保护[58][59]。因为过程强调的是现象或者事物发生、发展的程序和动态特征,其生态网络也蕴涵一定的信息流动的动态属性,如种子或生物体的传播、捕食者和猎物的相互作用、干扰扩散、群落演替、种群动态[60]。景观格局与过程往往是紧密相连、不可分割的存在,他们同时依赖于景观尺度[61]。

### 3.4. 空间异质性与生态网络

笼统的来讲,空间异质性定义为生态系统或系统属性在空间上的复杂性和变异性[62],生态系统的缀块性和环境梯度的变化是空间异质性的表现形式[63]。生态学所涉及到的任何变量,如生态系统类型、植物覆盖、生物量、土壤养分等都可以称作系统属性。复杂性主要涉及到对系统特征进行定性的描述,变异性主要涉及到对系统特征进行定量的描述。只考虑系统特征复杂性和变异性的结构特征时,空间异质性称为结构异质性[64],只考虑到生态学过程和功能作用时,空间异质性则称为功能异质性[65]。

空间异质性的原因和结果是景观生态学关注的焦点,空间尺度的具体范围则不是其关注所在,然而,生态系统空间异质性的程度如何却依赖于尺度[66]。空间异质性是生态学家研究不同尺度的生态系统功能和过程中最感兴趣的问题之一[65][67][68][69][70]。小尺度的空间异质性格局及其动态对大尺度景观现状评价和动态监测是非常必要的[71][72]。一般认为,一定范围内的异质性增高有助于提高景观的稳定性,而进行有意识的增加和维持区域范围内的景观异质性是有必要的[71]。各组分所构成的斑块之间,也具有明显的异质性特征,但他们之间互相依存,又相互制约,为了维持、发展合适的空间异质性,实现斑块

的完整性, 只能揭示这些组分之间的相互关系[73] [74] [75]。由此可知, 生态整体性的动态维持和空间异质性的持续构建便是可持续利用的实质。有关于空间异质性的研究也从一开始的定性分析转向定量分析, 表 2 列举的是针对不同数据类型, 采用相应的分析方法和测定指标等来进行空间异质性的定量描述。如相关图、趋势面分析等可以描述格局如何随尺度进行变化。

**Table 2.** Quantitative methods of spatial heterogeneity for different data types

**表 2.** 不同数据类型的空间异质性定量方法

数据类型 Type of data	主要分析方法 Main analysis methods	具体方法或指标 Specific methods or indicators
景观类型图	斑块组成 结构复杂性	斑块类型的数目与比例 斑块的形状、大小 景观组分的优势度 相对丰富度、破碎度、聚集度、亲和度等
数值图	空间统计学方法	巢状样方分析、半方差图/相关图、分形方法、 趋势面分析、谱分析等
复杂、多变量数据	多元分析方法	直接梯度分析/回归分析 间接梯度分析/排序 分类、聚类分析等

## 4. 景观生态网络的分析方法

网络与景观生态学的结合, 使空间中相互联系的斑块、廊道与节点所构成的实体, 以线状要素组合起来形成生态系统, 以此用更加直观和客观的视角来研究景观生态学。景观生态网络分析方法已经成为景观生态学的主要热点之一[76]。本文着重围绕景观连接度、格局指数、模型模拟和复杂网络拓扑结构分析来介绍当今景观生态网络分析的主要内容和方法。

### 4.1. 景观连接度

景观破碎化程度加剧伴随着的空间异质性促使景观格局连续性下降、干扰了正常的景观生态过程和生态调控能力[77] [78] [79] [80] [81]。景观连接度在一定程度上能够有效地规划和管理景观要素的数量、比例及时空配置, 使景观中资源组合在结构和功能上接近或达到最优化, 提高景观的稳定性[82]。目前国际景观生态学上使用最多的景观连接度的概念是 Taylor 等人于 1993 提出的定义, 认为景观连接度是景观促进或阻碍生物体或某种生态过程在源斑块间运动的程度[83]。该定义也显示了景观要素对某种水平运动过程的抑制作用。景观连接度水平的高低也需要根据具体的研究对象或目的, 在一定的研究尺度下将景观格局分析与过程研究相结合来进行确定[84]。目前景观连接度的度量方法主要有最邻近距离法、空间格局指数法、尺度 - 面积比法、图论法、缓冲半径和关联函数模型法、观察迁入/迁出或扩散率法 6 类[85], 表 3 是由 Calabrese 和 Fagan 将这 6 类方法针对数据要求、研究方法及优缺点进行总结[86]。

国内对于景观连接度的研究起步较晚, 基于国外学者对景观连接度度量方法的提出, 逐渐将研究目的从景观规划为主延伸到物种保护上; 研究范围从热门城市市域到中西部敏感脆弱区涉及; 研究方法主要从结构连接度偏向功能连接度。在目前已有的生态网络研究中, 也不乏景观连接度与生态过程相结合的研究成果[84] [87] [88] [89] [90]。目前针对不同的研究目的、尺度来选择几种景观连接度度量方法, 更加准确完善地反映景观的结构和过程, 进一步提高景观生态网络中的连通性和可达性, 仍是接下来研究的焦点。

**Table 3.** The data dependent classification framework of connectivity metrics [86]  
**表 3.** 连接度度量的数据依赖分类框架[86]

连接度度量 Connectivity metrics	连接度类型 Type of connectivity	生境数据 Habitat-level data	物种数据 Species-level data	研究方法 Methodology
最邻近距离法	结构连接度	最邻近距离	斑块占据性	特定斑块的野外调查
空间格局指数法	结构连接度	空间直观	无	地理信息系统/遥感
尺度 - 面积比法	结构连接度	无	基于点或栅格的事件	事件数据库, 存在与 否信息的采集
图论法	潜在连接度	空间直观	扩散能力	地理信息系统/ 遥感 + 扩散研究
缓冲半径和关联函 数模型法	潜在连接度	空间直观, 包含 斑块面积	斑块占据性和 扩散能力	结合扩散研究对特定 斑块进行多年的野外 调查或对斑块单年的 占据性研究
观察物种的迁入/ 迁出或扩散率法	真实连接度	根据研究方法不同 而改变	运动路径或特定位置 上的扩散能力	跟踪物种的运动路径 或者利用标记 - 释放 - 回捕技术

#### 4.2. 景观格局指数

景观格局指数是指高度浓缩的景观格局信息, 用来定量的表达景观格局和生态过程之间联系的研究方法[91]。对于一个景观生态网络来说, 景观格局指数能够更直观, 定量的反映其网络结构, 以方便对其进行评价。早期的景观格局指数以生物过程为对象, 在空间分析、空间拓扑、分形几何等理论上发展起来的, 随后的工作, 学者们又对度量标准进行补充, 从而增进了不少景观格局指数, 现已形成一套综合的景观指标和软件程序(FRAGSTATS 软件)帮助完成空间格局分析。FRAGSTATS 软件主要是从斑块水平指数(patch)、斑块类型水平指数(class)和景观水平指数(landscape)来计算一系列的景观格局指数[92][93], 以此来量化景观斑块的面积大小和空间分布特征, 再根据研究区具体的景观生态问题和景观数据特征, 对斑块和边界进行分类和划分, 并选择合理的景观幅度和粒度[94]。

著名生态学家 Levin 指出格局和尺度已经成为生态学的核心问题[22], 格局和过程往往伴随着不同的尺度, 异质性和尺度又是景观格局分析的核心。我国对于尺度问题的研究主要是借鉴国外的现有研究成果, 目前解开异质性和尺度的相互依赖关系仍然是国内外学者未来研究的一大挑战。景观格局指数的研究也主要依赖不同时期或者长时间序列的综合数据进行景观格局动态分析和驱动力分析。异质性和尺度是景观格局分析的核心, 作为反映生态网络结构组成和空间配置特征的定量指标, 只采用单一的景观格局指数往往难以对生态过程进行全面和准确的解释[95]。将景观格局指数集合与 GIS 和 RS 等多平台数据相结合, 完成对景观格局指数数据更好的信息挖掘工作, 以此更好的对生态过程进行解释, 实现景观指标与生态过程的紧密联系, 仍是当前和未来的研究重点。

#### 4.3. 景观生态网络模型模拟

景观生态网络由空间上节点的排列、廊道的相互交叉连接所组成, 凭借着该网络, 景观要素之间得以进行物质的流动、能量的循环、信息的交流等。对于景观生态网络模型模拟及方法的研究, 主要在于如何合理识别、选取生态源地及模拟生态廊道[96]。形态学空间格局(morphological spatial pattern analysis, MSPA)分析法从景观类型、格局等角度出发, 可较为科学、精确地识别栖息地斑块。根据研究目的的不

同, 利用 MSPA 模型作为选取生态源地和区分其重要程度的方法已经普遍应用构建景观生态网络构建的第一步[97] [98] [99] [100]。关于生态廊道的构建运用最多的模型是最小累计阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)和电路模型。表 4 是最小累计阻力模型和基于电路理论的连接度模型在应用中的比较[101], 这两种模型的共同点是: 都是基于物种运动行为的功能连接度模型和图论的数据结构; 不同之处在于对物种运动行为的假设和衡量景观连接性的方法[101]。最小累计阻力模型考虑物种在穿越异质景观的时候, 会选择一条最优路径, 用最小成本路径的累计成本距离衡量景观连接性[76]。国内学者近几年常基于最小累计阻力模型模拟潜在廊道, 结合重力模型、景观连接度指数、图谱理论等识别出具有生态学重要意义的廊道, 来评价和优化生态网络[102] [103] [104]。电路模型是基于随机游走理论来定义物种的运动行为, 认为在缺少景观先知的前提下, 物种穿越异质景观不一定会选择最优路径, 而会有多条路径可供选择, 以电阻距离代替最小成本距离。

**Table 4.** Comparison of two models in the application  
**表 4.** 两种模型在应用中的比较

模型 Model	运动行为 假设 Hypothesis of movement	数据结构 Data structure	连接度度量 Measure of connectivity	适用性 Applicability		应用优势 Application of advantages	应用短板 Application of disadvantages
				最小成本 廊道识别	廊道重要性 识别		
最小累计阻力模型	选择最优路径	节点和连接组成的网络	成本路径	简单、直观	不能直接识别	考虑到物种运动行为也受周围环境的影响	阻力赋值主观性较强、单一路径与实际情况存在些许差异、尺度选择影响阻力模型模拟精度
基于电路理论的连接度模型	随机游走	节点和电阻组成的电路	电阻路径	无法识别	简单、直观	考虑了廊道网络的重复性、更符合生物体的行为特征	需大量详细数据、土方利用分类精度要求高

#### 4.4. 复杂生态网络

生态系统作为维持物种多样、能量流动和物质循环的系统, 其也是一个有着很强的自组织、自发展的复杂网络系统[105]。景观生态网络同样也具有复杂网络的一些特点, 针对这种复杂系统的研究, 复杂网络分析方法主要是将节点以及连接节点的边的集合, 复杂系统的基本单元为节点, 而边就代表着这各个单元之间的相互作用[106]。在景观生态网络研究中, 复杂网络所具备的网络结构要点是: 节点和节点之间相互影响的关系[107]。李医民[108]等根据这种结构要点, 构建食物链网络模型并观察其变化。将复杂网络分析方法运用到景观生态网络中, 国内的研究学者近几年在该研究领域内做出了不少成果。于强[11] [109]、王戈[110] [111]、牛腾[112]等人将复杂网络分析方法运用到复杂生态网络上, 探究其空间拓扑结构和鲁棒性等特征分析。将复杂网络分析方法运用到对景观生态网络的构建和优化上, 已经成为目前生态网络研究领域的前沿方向之一。

### 5. 景观生态网络的应用进展及主要问题

#### 5.1. 生物多样性保护

近年来, 人类活动的干预使景观破碎化现象日益严重, 其被割裂的自然景观残存斑块成为了一座座

“生态孤岛”，种群被迫分割成一个个小种群，导致许多物种逐渐消失[113]。要想解决生物多样性保护的问题，就要加强各个自然保护区之间的连接，维持孤立斑块之间的流动性，构建潜在生态廊道形成生态网络。

生物多样性的保护主要有以物种为中心的途径和以生态系统为中心的途径。前者主要针对濒危物种其本身进行保护，后者主要强调自然栖息地和景观系统整体的保护[114]，主要关注景观的整体特征和景观的连续性、异质性和景观的动态变化[115]。欧洲规划[116]、东部伦敦绿网规划[117]等都是以维持生物多样性、加强生态系统完整性为目的的生态网络构建案例。相比于欧美国家，我国对生态廊道的研究以及生态网络的建设起步较晚，但目前生态多样性保护已经在我国引起了高度重视，2021年10月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于进一步加强生物多样性保护的意見》[118]。近年来，运用最小累积阻力模型进行生态廊道的构建已被国内外学者广泛应用。孙珊等[119]利用最大信息熵模型对大湘南区域的云豹生境进行了适宜性评价分析，并根据适宜性评价分析结果利用地理信息系统软件(ArcGIS)的最小累积阻力模型构建云豹保护廊道。李维平等[120]运用专家模型依据栖息地变量中的主要影响因子进行东北虎栖息地质量评价，并运用 ArcGis 以及 Linkage Mapper [121]分析得到东北虎核心栖息地之间的生态廊道，以期为东北虎栖息地恢复和种群扩散提供科学依据。

## 5.2. 城市生态安全格局

国内关于城市生态安全格局的定义，还主要来自于 1999 年俞孔坚将其定义为景观中具有安全意义的某些关键性的局部，位置和空间联系所构成的整体。在众多学者的研究下逐渐形成了由某些关键的点线面所构成的潜在格局，对于维护和控制某些生态过程、保护生态系统结构功能的完整性、生态系统服务的维持具有重要意义[122] [123]。生态安全格局涉及的领域也从单一的土地利用结构调整向生态空间要素博弈、区域生态功能提升等诸多方面扩展[124] [125] [126]。

目前，生态安全格局的构建和优化方法已经日趋完善。基于“生态源地提取-生态阻力面构建-生态廊道识别”的网络框架逐渐成为当前生态安全格局相关研究的基本范式[127] [128] [129]。朱霞等[130]以武汉市农业生态区为研究对象，基于 PSR 模型构建生态安全评价指标体系，计算生态安全指数并分析生态安全空间特征。蒙吉军等[131]通过分析贵阳市生态需求和景观连通性确定生态源地，利用 MCR 模型得到了生态廊道网络，构建了当地的景观生态安全格局。邱硕等[132]利用 MCR 模型，引入不同等级源的权重系数，将综合生态安全格局作为阻力因子，分别确定了在生态约束性、经济增长型和生态经济并重型 3 种不同模式下唐山市的可能发展范围。郭成久等[133]结合景观格局速度变化、景观结构变化和景观破碎度变化，利用 MCR 模型进行构建抚顺西露天矿区景观生态安全格局，改善受损的生态功能，为以矿产资源为主的资源枯竭城市优化景观格局提供科学参考。

## 5.3. 主要问题

景观生态网络作为维持城市居住、生活、生产空间与城市自然、城市社会属性间平衡与协调的重要机制[134]。在近二十年的学术研究中，引发了学术热潮，取得了很多研究成果，但我国对于景观生态学的研究还存在一些需要进一步去解决的问题。1) 对于景观生态网络的概念至今还没有非常明晰的定义，对定义进行进一步的廓清，依据清晰的概念更有针对性的开展景观生态网络的研究和应用会是该研究领域的一个热点；2) 目前景观生态网络的尺度研究主要涉及到时间尺度和空间尺度，但是在时间尺度上的研究一般是某个时间截面的静态研究，对于连续的动态时间尺度研究少有涉及。空间尺度上的研究基于某个固定的空间范围，对于多维、多层次的空间尺度研究还不够，构建多尺度多目标的生态网络将是其深入研究的必经途径；3) 目前景观生态网络的分析方法较多，但是依据研究区域的情况和目的，如何选

取最适合、最具科学性的分析方法还需要将分析方法与生态学解释进行进一步的探索。分析方法中所涉及到的地理空间信息数据量大,在算法运行时,也带来不小的时间成本,如何改进分析算法,降低运算时间,提高运行效率也是急需解决的问题;4)景观生态网络的研究要与实践相发展,与规划建设紧密结合,落实生态保护举措。在针对不同研究情形优化生态预案时,多种因素的影响、多区域数据的融合、多模型方法的结合都需要接下来学者们的升入研究和探索。

## 6. 结语

景观生态网络的构建和分析对于从整体上有助于生态斑块的保护、增强土地资源利用配置上的把握,提供土地利用规划和决策的知识。利用空间格局和生态网络分析已经成为研究景观生态网络的主要分析方法,但对于复杂生态网络分析还存在一些需要深入研究的问题,并且想要建立各尺度,多功能的复合景观生态网络,根据我国的绿色发展理念,实现“绿水青山”的愿望还需要国内学者的不断探索和努力。

## 参考文献

- [1] 何贤芬. 城市高架道路景观的尺度研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [2] 周锐, 胡远满, 王新军, 等. 快速城镇化地区生态用地演变及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(6): 1012-1020.
- [3] Bascompte, J. (2010) Structure and Dynamics of Ecological Networks. *Science*, **329**, 765-766. <https://doi.org/10.1126/science.1194255>
- [4] Baguette, M., Blanchet, S., Legrand, D., et al. (2013) Individual Dispersal, Landscape Connectivity and Ecological Networks. *Biological Reviews*, **88**, 310-326. <https://doi.org/10.1111/brv.12000>
- [5] Saterberg, T., Sellman, S. and Bo, E. (2013) High Frequency of Functional Extinctions in Ecological Networks. *Nature*, **499**, 468-470. <https://doi.org/10.1038/nature12277>
- [6] Gurrutxaga, M., et al. (2010) GIS-Based Approach for Incorporating the Connectivity of Ecological Networks into Regional Planning. *Journal for Nature Conservation*, **18**, 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2010.01.005>
- [7] Pocock, M.J.O., et al. (2012) The Robustness and Restoration of a Network of Ecological Networks. *Science*, **335**, 973. <https://doi.org/10.1126/science.1214915>
- [8] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 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.
- [9] 曲艺, 陆明. 生态网络规划研究进展与发展趋势[J]. 城市发展研究, 2016, 23(8): 29-36.
- [10] 张小飞, 王仰麟, 李正国, 等. 区域尺度生态功能网络构建——以中国台湾岛为例[J]. 地理科学进展, 2007, 26(3): 18-28.
- [11] 于强, 刘智丽, 岳德鹏, 等. 磴口县生态网络多情景模拟研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 182-190.
- [12] 魏聪礼, 张建军, 程明芳, 等. 基于最小阻力模型的武安市景观安全格局研究[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(12): 1417-1421+1408.
- [13] 李潇然, 李阳兵, 王永艳, 等. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区——以奉节县为例[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1959-1967.
- [14] 魏伟, 颀耀文, 魏晓旭, 等. 基于 CLUE-S 模型和生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1306-1315.
- [15] 王嘉, 高静, 袁睦茜, 等. 生物保护视角下乡村景观生态安全格局构建——以山西省临汾市汾西县永安镇后加楼村为例[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 155-161.
- [16] Wang, Q., Li, L., Liu, X., et al. (1998) Spatial Heterogeneity of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen in an Xilin River Basin Grassland, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, **22**, 409-414.
- [17] 王亚军. 生态园林城市规划理论研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [18] Godron, M., Baudry, J. and Forman, R.T. (1995) Thermodynamic Foundation and Information Theory in Understanding Landscape Heterogeneity. *Chinese Journal of Ecology*, **14**, 27-36.
- [19] Naveh, Z. (1982) Landscape Ecology as an Emerging Branch of Human Ecosystem Science. *Advances in Ecological Research*, **12**, 189-237. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60079-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60079-3)

- [20] 角媛梅, 肖笃宁, 郭明. 景观与景观生态学的综合研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 91-95.
- [21] Naveh, Z. and Lieberman, A.S. (1994) *Landscape Ecology: Theory and Application*. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2331-1>
- [22] 邬建国. 景观生态学: 格局, 过程, 尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [23] 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.
- [24] 杨锡福. 森林中的鼠-种子互作网络[J]. 大自然, 2019(3): 20-21.
- [25] Woodward, G. and Bohan, D.A. (2014) *Ecological Networks in an Agricultural World*. Elsevier, Amsterdam.
- [26] 陈璟如. 生态网络研究进展[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(8): 123-125.
- [27] Jongman, R.H.G. (1995) Nature Conservation Planning in Europe: Developing Ecological Network. *Landscape and Urban Planning*, **32**, 169-183. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(95\)00197-O](https://doi.org/10.1016/0169-2046(95)00197-O)
- [28] 张启斌. 乌兰布和沙漠东北缘生态网络构建与优化研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [29] 黄庆生. 永安市城市绿地系统景观生态规划[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2007.
- [30] 梁存柱. 东北农牧交错区景观结构、功能与区划[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2003.
- [31] 许慧, 王家骥. 景观生态学的理论与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
- [32] Jongman, R., Lipsky, Z., et al. (1995) Ecological Networks in Europe; Strategies, Criteria and Perspectives. *Proceedings of the Symposium Scenario Studies for the Rural Environment*, Wageningen, 12-15 September 1994.
- [33] Reilly, W.K. (1987) *Americans Outdoors: The Legacy, the Challenge: Report of the President's Commission, with Case Studies*. Island Press, Washington DC.
- [34] Little, C.E. (1990) *Greenways for America*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- [35] Bunting, S.C. and Hudson, W.E. (1991) Landscape Linkages and Biodiversity. *Journal of Range Management*, **46**, 190. <https://doi.org/10.2307/4002282>
- [36] Opdam, P., Foppen, R. and Vos, C. (2001) Bridging the Gap between Ecology and Spatial Planning in Landscape Ecology. *Landscape Ecology*, **16**, 767-779. <https://doi.org/10.1023/A:1014475908949>
- [37] Ahern, J. (1995) Greenways as a Planning Strategy. *Landscape and Urban Planning*, **33**, 131-155. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(95\)02039-V](https://doi.org/10.1016/0169-2046(95)02039-V)
- [38] Thomas, C.D. (2000) Dispersal and Extinction in Fragmented Landscapes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **267**, 139-145. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.0978>
- [39] 王艳丽. 景观要素构成分析及应用[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(3): 56-59.
- [40] Forman, R.T.T. and Godron, M. (1981) Patches and Structural Components for a Landscape Ecology. *Bioscience*, **31**, 733-740. <https://doi.org/10.2307/1308780>
- [41] Vincent, P. (1981) From Theory into Practice: A Cautionary Tale of Island Biogeography. *Area*, **13**, 115-118.
- [42] 汤虹. 产城融合理念下的古浪县城市总体布局研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [43] 苏伟忠, 杨英宝. 基于景观生态学的城市空间结构研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [44] 庄志民. 复合生态系统理论视角下的文化与旅游融合实践探索——以上海为例[J]. 旅游科学, 2020, 34(4): 31-45.
- [45] 雷冬梅, 徐晓勇, 段昌群. 矿区生态恢复与生态管理的理论及实证研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2012.
- [46] 韩博平. 关于生态网络分析理论的哲学思考[J]. 自然辩证法研究, 1995(7): 42-45.
- [47] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 等. 生态网络分析方法研究综述[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5396-5405.
- [48] 邬建国. 生态学范式变迁综论[J]. 生态学报, 1996(5): 449-459.
- [49] 周霞, 张林艳, 叶万辉. 生态空间理论及其在生物入侵研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 588-592.
- [50] 孙雁. 土地细碎化及其对土地可持续利用的影响[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [51] 王让会. 景观尺度、过程及格局(LSP)研究的内涵及特点[J]. 热带地理, 2018, 38(4): 458-464.
- [52] 张永红. 黄土高原半干旱丘陵区山羊牧道景观发育与植物群落演替研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [53] 巫木旺. 浙江传统村落景观生态技法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [54] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1135-1142.
- [55] 赵苗苗, 赵师成, 张丽云, 等. 大数据在生态环境领域的应用进展与展望[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1727-

- 1734.
- [56] 刘祥平, 张贞, 李玲玉, 等. 多维视角下天津市生态网络结构演变特征综合评价[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1554-1562.
- [57] 谢跟踪, 邱彭华, 谌永生. 基于 PSR 模型的海南岛生态环境综合评价[C]//自然地理学与生态建设"学术研讨会. 乌鲁木齐: 中国地理学会, 2006: 86-92.
- [58] 方文. 基于不同空间尺度的重庆都市圈城市森林生态网络与群落特征研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [59] 闫维, 张良. 滨海新区生态网络的植物配置研究[C]//2015 年中国环境科学学会学术年会. 北京: 中国环境科学出版社, 2015: 5506-5513.
- [60] 张树礼. 煤田开发环境影响后评价理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [61] 蔡青. 基于景观生态学的城市空间格局演变规律分析与生态安全格局构建[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [62] Li, H. and Reynolds, J.F. (1994) A Simulation Experiment to Quantify Spatial Heterogeneity in Categorical Maps. *Ecology*, **75**, 2446-2455. <https://doi.org/10.2307/1940898>
- [63] 邬建国. 景观生态学——概念与理论[J]. 生态学杂志, 2000, 19(1): 42-52.
- [64] Dutilleul, P. (1993) Spatial Heterogeneity against Heteroscedasticity: An Ecological Paradigm versus a Statistical Concept. *Oikos*, **66**, 152-167. <https://doi.org/10.2307/3545210>
- [65] Kolasa, J., Pickett, S.T. and Allen, T. (1991) Ecological Heterogeneity. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3062-5>
- [66] Pickett, S.T.A., Cadanasso, M.L. 景观生态学: 生态系统的空间异质性[J]. 生态学杂志, 1999, 18(6): 71-74.
- [67] Turner, G.M. (1987) Fire, Grazing, and the Landscape Heterogeneity of a Georgia Barrier Island. Springer, New York, Chapter 5, 85-101. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4742-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4742-5_5)
- [68] Turner, M.G. and Gardner, R.H. (1991) Quantitative Methods in Landscape Ecology: The Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity. Springer-Verlag, Berlin. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4244-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4244-2_1)
- [69] 江志兵, 朱旭宇, 高瑜, 等. 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3340-3350.
- [70] 凌静, 吴迪, 辜彬, 等. 野生动物栖息地保护与营建措施在城镇密集区域生态绿地设计中的应用[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6683-6685.
- [71] 顾磊, 江晓霞, 陈智华. 生态学空间异质性研究进展[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2005(S1): 11-15.
- [72] 陈玉福, 董鸣. 生态学系统的空间异质性[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 346-352.
- [73] McKenzie, N.J. and Ryan, P.J. (1999) Spatial Prediction of Soil Properties Using Environmental Correlation. *Geoderma*, **89**, 67-94. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00137-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00137-2)
- [74] 于冰沁, 田舒, 车生泉. 从麦克哈格到斯坦尼兹——基于景观生态学的风景园林规划理论与方法的嬗变[J]. 中国园林, 2013, 29(4): 67-72.
- [75] 王伟霞. 基于区域发展的生态环境胁迫评价及空间调控——以泰州市为例[D]: [硕士学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2009.
- [76] 谢莹. 基于 CLUE-S 模型和景观安全格局的重庆市渝北区土地利用情景模拟和优化配置研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [77] Turner, G.M. (1989) Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process. *Annual Review of Ecology & Systematics*, **20**, 171-197. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.20.110189.001131>
- [78] Likens, G.E., Driscoll, C.T., Buso, D.C., et al. (2002) The Biogeochemistry of Sulfur at Hubbard Brook. *Biogeochemistry*, **60**, 235-315. <https://doi.org/10.1023/A:1020972100496>
- [79] Nagendra, H., Munroe, D.K. and Southworth, J. (2004) From Pattern to Process: Landscape Fragmentation and the Analysis of Land Use/Land Cover Change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **101**, 111-115. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.003>
- [80] Seppelt, R. and Schröder, B. (2006) Pattern and Processes of Dynamic Mosaic Landscapes. *Ecological Modelling*, **199**, 377-378. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.06.011>
- [81] 孟庆华, 傅伯杰. 景观格局与土壤养分流动[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 116-121.
- [82] 邹雨函, 贺怡, 王雪宏, 等. 道路对黄河三角洲河口湿地景观连接度的影响[J]. 鲁东大学学报: 自然科学版,

- 2022(1):9-17.
- [83] Taylor, P.D., Fahrig, L. and Merriam, H.G. (1993) Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, **68**, 571-573. <https://doi.org/10.2307/3544927>
- [84] 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[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 12-16.
- [85] 梅泽文. 基于图论的滇金丝猴栖息地景观连通性动态研究[J]. 林业调查规划, 2018, 43(1): 52-56.
- [86] Calabrese, J.M. and Fagan, W.F. (2004) A Comparison-Shopper's Guide to Connectivity Metrics. *Frontiers in Ecology & the Environment*, **2**, Article No. 529. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0529:ACGTCM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0529:ACGTCM]2.0.CO;2)
- [87] 吴晶晶, 栗云召, 于良巨, 等. 黄河三角洲自然湿地景观连接度动态变化及其驱动因素分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 71-78.
- [88] 杨秀芹, 钟平安, 夏可政. 1960-2005 年南四湖流域气候变化趋势及其突变分析[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 801-806.
- [89] 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.
- [90] 沈润, 史正涛, 何光熊, 等. 纳板河自然保护区景观连接度变化分析[J]. 林业资源管理, 2021(1): 103-110.
- [91] 朱槐文, 孟庆香, 宋二红, 等. 景观格局-生态过程研究进展[J]. 湖北农业科学, 2010(1): 211-214.
- [92] 刘士余. 降雨与植被变化对赣西北大坑小流域水文特征的影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [93] 袁轶男, 金云峰, 聂晓嘉, 等. 基于 Fragstats4 的上海市城市景观格局指数动态研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2020, 51(6): 1-6.
- [94] 周自翔. 延河流域景观格局与水文过程耦合分析[D]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [95] 李树元. 海河流域生态环境关键要素演变规律与脆弱性研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [96] 徐伟振, 黄思颖, 耿建伟, 等. 基于 MCR 和重力模型下的厦门市生态空间网络构建[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 264-272.
- [97] 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.
- [98] 孔阳, 王思元. 基于 MSPA 模型的北京市延庆区城乡生态网络构建[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(7): 113-121.
- [99] 王玉莹, 沈春竹, 金晓斌, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的江苏省生态网络构建与优化[J]. 生态科学, 2019, 38(2): 138-145.
- [100] 陈竹安, 况达, 危小建, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的余江县生态网络构建[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1199-1207.
- [101] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [102] 贾振毅, 陈春娣, 童笑笑, 等. 三峡沿岸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.
- [103] 陈南南, 康帅直, 赵永华, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的秦岭(陕西段)山地生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1545-1553.
- [104] 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 139-147.
- [105] 刘海, 雷彬. 国内外基于网络文本分析的旅游研究综述[J]. 中外企业家, 2018(30): 59-60.
- [106] 苏凯, 岳德鹏, 等. 基于改进力导向模型的生态节点布局优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 215-221.
- [107] 周涛, 柏文洁, 汪秉宏, 等. 复杂网络研究概述[J]. 物理, 2005, 34(1): 31.
- [108] 李医民, 李鑫, 华静. 基于复杂网络的生态系统稳定性与生态多样性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1700-1706.
- [109] 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]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 214-224.
- [110] 王戈, 于强, 等. 基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 258-266, 312.
- [111] 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]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 152-158.
- [112] 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]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 166-175.
- [113] 单楠, 周可新, 潘扬, 等. 生物多样性保护廊道构建方法研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 411-420.

- [114] 蒋志刚, 谢宗强. 物种的保护[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [115] 俞孔坚, 李迪华, 段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径[J]. 生物多样性, 1998, 6(3): 45-52.
- [116] Evers, D. and De Vries, J. (2008) Metropolitan Government and Governance in the Dutch Randstad: New Perspectives and Lessons from Abroad. *AESOP-ACSP Joint Congress*, "Bridging the Divide: Celebrating the City", Chicago.
- [117] Zhang, Y.B. and Wu, R.-W. (2007) The Theory and Practice of Greenway Construction in Europe. *Chinese Landscape Architecture*, 8, 33-38.
- [118] 张修玉, 庄长伟, 胡习邦, 等. 保护生物多样性, 重点工作有哪些?——推动落实《关于进一步加强生物多样性保护的意見》的有关思考[J]. 中国生态文明, 2021(4): 42-43.
- [119] 孙珊, 齐增湘, 周敏, 等. 野生哺乳动物生态廊道构建——以云豹为例[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(7): 81-84+96.
- [120] 李维平, 包衡, 张明海. 中国东北虎栖息地分析与潜在生态廊道构建[J]. 兽类学报, 2017, 37(4): 317-326.
- [121] Hobbs, M.I. (1999) A Framework for Conceptualizing Human Effects on Landscapes and Its Relevance to Management and Research Models. *Conservation Biology*, 13, 1282-1292. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97509.x>
- [122] 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.
- [123] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [124] 黄隆杨, 刘胜华, 方莹, 等. 基于“质量-风险-需求”框架的武汉市生态安全格局构建[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 615-626.
- [125] 王佳楠, 陈庆锋, 程启先, 等. 1999~2019 年我国生态安全格局研究进展与热点综述[J]. 环境保护前沿, 2020, 10(6): 845-854. <https://doi.org/10.12677/aep.2020.106102>
- [126] 朱琪, 袁泉, 于大炮, 等. 基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3463-3473.
- [127] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [128] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 等. 基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6486-6494.
- [129] 潘竟虎, 李磊. 利用 OWA 和电路模型优化黄河流域甘肃段生态安全格局[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 259-268.
- [130] 朱霞, 李振林. 基于 PSR 模型的大都市外围乡村生态安全空间格局优化——以武汉市为例[J]. 现代城市研究, 2021(10): 118-124.
- [131] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [132] 邱硕, 王宇欣, 王平智, 等. 基于 MCR 模型的城镇生态安全格局构建和建设用地开发模式[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 257-265, 302.
- [133] 郭成久, 刘宇欣, 李海福, 等. 抚顺西露天矿区景观格局变化与生态安全格局构建[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(4): 442-450.
- [134] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 284-292.