西安都市圈生态空间结构特征与生态网络构建研究

Research on the Ecologic Spatial Pattern and Eco-Network Planning of Xi'an Metropolitan Area

刘恺希[1] 孙浩鑫[2] 张 沛[1*]
LIU Kaixi[1] SUN Haoxin[2] ZHANG Pei[1*]

（1.西安建筑科技大学建筑学院，西安 710055；2.陕西同济土木建筑设计有限公司，西安 710002）
（1. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, 710055; 2. Shaanxi Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, China, 710002）

文章编号：1000-0283(2025)01-0023-10
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 01. 0023. 003
中图分类号：TU986
文献标志码：A
收稿日期：2024-06-06
修回日期：2024-11-30

摘 要

面对西安都市圈发展过程中出现的生态空间碎片化问题，生态功能完善的需求及区域高质量一体化的发展目标，通过分析西安都市圈生态空间景观格局，提取其结构特征进而构建区域生态网络。利用形态学空间格局等方法提取西安都市圈生态空间结构特征，通过植被覆盖演变分析并识别潜在的具有生态功能的用地，通过设计转化阻力指标体系获得区域生态网络的构建基础。提出网络整合、廊道桥接、网络织补、生态修复4种生态网络整合策略。通过分析生态空间结构发现都市圈的生态斑块、廊道等不同类型生态功能区的分布特点，针对都市圈尺度提出多中心生态网络的规划模式，针对重要生态单元提出"核心—廊道—缓冲区"的规划模式，基于不同的整合策略调整生态用地布局及空间结构，以提高生态网络的连通性与稳定性，构建都市圈生态网络。聚焦生态空间结构演变机制分析、生态网络构建技术路径及模式探索，提出西安都市圈的生态空间结构，为生态空间规划提供新思路和新方法，这对于推动中国都市圈发展迈向更高水平具有积极意义。

关键词

西安都市圈；生态空间结构；形态学空间格局分析；最小累积阻力模型；生态网络

Abstract

Faced with the issue of fragmentation in the development of the ecological space, the demand for enhanced ecological functionality, and the goal of achieving high-quality regional integration of the Xi'an metropolitan area. This study analyzes the ecological spatial pattern of the research area to extract its structural characteristics and construct a regional ecological network. This study primarily employs the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) method to conduct research based on extracting ecological structural features. It further examines the evolution of vegetation cover dynamics for identified potential space with ecological functions. It employs a resistance index system to establish the foundation for constructing the regional ecological network. The research proposes four strategies for ecological network integration: network consolidation, corridor bridging, network patching, and ecological restoration. Analyzing spatial and resource structures identifies ecological patches and corridors' types and distribution characteristics. At the regional scale, a multi-center ecological network model is proposed. At the meso-scale, a "core-corridor-buffer zone" model is suggested. Adjusting the layout and spatial structure of ecological space based on different integration strategies to enhance the connectivity and stability of the ecological network, thereby constructing a metropolitan ecological network. Finally, this study's main conclusion focuses on analyzing the ecological space structural evolution mechanism, the technical pathways for ecological network construction, and model exploration. It presents the ecological space structure of the Xi'an metropolitan area, offering new ideas and methods for ecological space planning. These research findings have significant theoretical and practical implications for advancing the development of urban regions to a higher level.

Keywords

Xi'an metropolitan area; eco-spatial structure; morphological spatial pattern analysis (MSPA); minimum cumulative resistance model; eco-network

刘恺希
1983年生／女／陕西神木人／博士／副教授／研究方向为城乡生态空间规划与设计、蓝绿空间规划与设计、城市开放空间规划与设计

孙浩鑫
1995年生／男／陕西西安人／硕士／研究方向为生态空间规划、城市设计、风景园林规划与设计

张 沛
1968年生／男／河南三门峡人／博士／教授／研究方向为城乡规划与设计、生态空间规划与治理

*通信作者（Author for correspondence）
E-mail: tianxingjiansmx@126.com

基金项目：
科技部"十四五"国家重点研发计划"城市蓝绿空间规划与生态系统服务功能优化技术"（编号：2022YFC3802603）；陕西省自然科学基金青年项目"关中城市群潜在绿地识别与绿色空间整合机制研究"（编号：2022JQ-396）；陕西省自然科学基金面上项目"西安都市圈生态空间多层级协同发展机制及规划策略研究"（编号：2023-JC-YB-301）；西安建筑科技大学陕西省新型城镇化和人居环境研究院新型城镇化专项研究"韧性导向下的关中城市群绿色空间布局模式研究"（编号：2022SCHZ08）

1 研究背景

1.1 都市圈发展建设现状

中国城市群和都市圈建设在区域发展过程中发挥重要的战略作用，生态空间作为城市群与都市圈发展的重要功能进一步突显[1]，同时，高速发展带来的生态环境负面效应需要重点关注[2]。“十四五”规划和2035年远景目标纲要指出要以高质量发展为核心，推动绿色发展，发展壮大城市群和都市圈，科学规划布局城市绿环绿廊绿楔、增加绿化节点和公共开放空间[3]。为更好地展开都市圈生态空间规划，解决发展过程中导致的生态空间破碎化、土地低效利用、生态功能减退等问题的研究迫在眉睫[4]。

都市圈是城市群高质量发展的重要空间载体，2022年，27个都市圈的总GDP为54.9万亿元，占全国总GDP的54.2%，总人口为4.77亿人，占比33.8%。南京都市圈生态空间具有分布广、规模大、生态效能突出的特点[5]；成都都市圈着重构建多层次生态网络和推进环境联防联治[6-7]；长株潭都市圈致力于打造城市中央公园和推进生态绿心保护[6]；重庆都市圈则推动生态共建共保和长江上游生态屏障建设[7]；而西安都市圈专注于秦岭等关键生态区域的保护，科学开展区域生态整治与生态修复工作，推动都市圈生态环境一体化协同发展，架构区域生态安全格局主骨架。

本研究针对西安都市圈生态空间显现系统不完整、服务不高效、承载力不强、功能不完善、类型较单一的问题，以及新一轮发展阶段的目标要求，通过分析西安都市圈生态空间的景观格局，提取其结构特征，针对不同生态用地类型及功能提出4种整合策略，基于结构特征提出规划设计模式，为构建都市圈生态空间规划结构及规划布局提供研究基础。

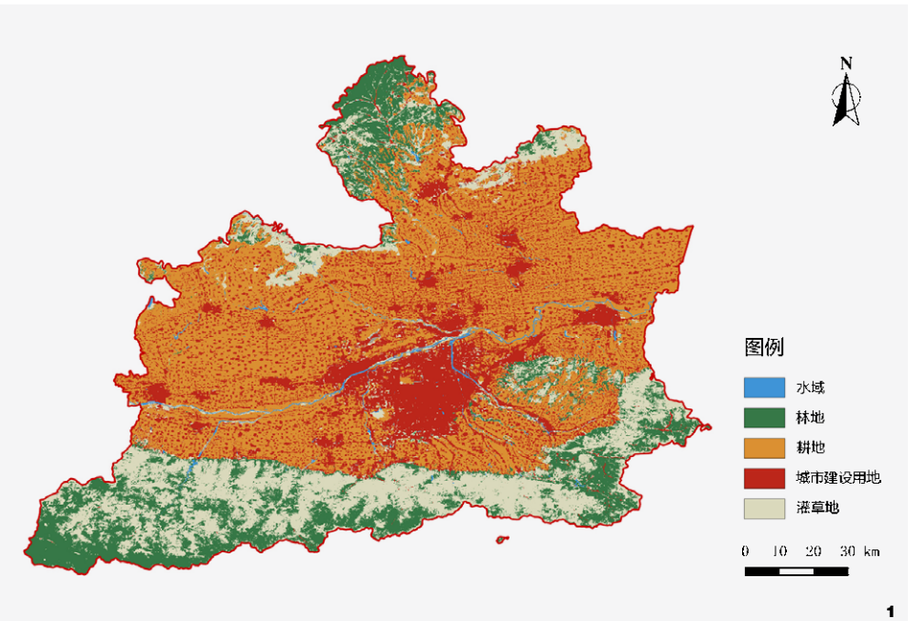


图1 西安都市圈土地利用图（2022年）
Fig. 1 Land use map of Xi'an metropolitan area (2022)

1.2 西安都市圈生态空间现状问题

西安都市圈地处关中平原地区，南距秦岭，渭河及其支流整个区域，位于国内“三横两纵”城镇化战略格局中陆桥通道横轴与包昆通道纵轴的交汇处，是黄河流域生态保护的关键区域，也是“一带一路”高质量发展的重要战略支点。其面积共计2.06×10^4 km^2，规划范围主要包括西安市全域（含西咸新区），咸阳市秦都区、渭城区、兴平市、三原县、泾阳县、礼泉县、乾县、武功县，铜川市耀州区，渭南市临渭区、华州区、富平县，杨凌示范区，2020年底常住人口1 802万人，地区生产总值约1.3万亿元。西安都市圈在水源涵养、生态保育、物种多样性等生态功能上有着不可或缺的重要价值和现实意义[8]。通过遥感数据分析2022年西安都市圈土地利用类型，可获取耕地、林地、灌草地和城市建设用地5种类型的面积（图1）。其中水域占比3.09%，林地占比15.76%，耕地占比40.43%，灌草地占比18.97%，城市建设用地占比21.76%。

西安都市圈区域生态系统相对脆弱，长期的人类活动又对原生生态环境造成严重破坏，原有城市建设模式和近年来城市空间快速扩张导致城市核心区与自然生态空间严重割裂。不同层级的问题表现不同，可归纳为：（1）生态功能单一，在市域及中心城区，生态空间总量不足，以林地、灌草地为主的生态空间以斑块化和碎片化的形式嵌入高密度城区中，生态系统服务功能及效能低下；（2）多尺度生态空间供需错配，生态源地及高功能的生态空间随时间演变和跨尺度变化，导致城市中心城区生态功能不连续、系统不稳定；（3）生态空间结构不稳定，都市圈边缘地带生态基质因受人工建设活动扰动较少，生态空间连续度较高，农田、耕地等具有一定生态功能的空间分布较广，村镇体系常以斑块形式分散其中，但在城市边缘区则存在

许多已搬迁村居、工业厂房及废弃地、荒地等未得到有效开发利用，区域空间不协同、结构失衡，未能形成高质、高效的生态空间。

2 研究方法

（1）通过识别出生态源地与潜在生态空间的方式进行空间格局分析；（2）根据生态服务供给量评估，创建生态网络转化阻力指标体系；（3）根据不同的生态用地类型及功能，以及转化阻力强度，构建生态网络整合策略，探讨针对不同形态及问题的规划和管理策略（图2）。

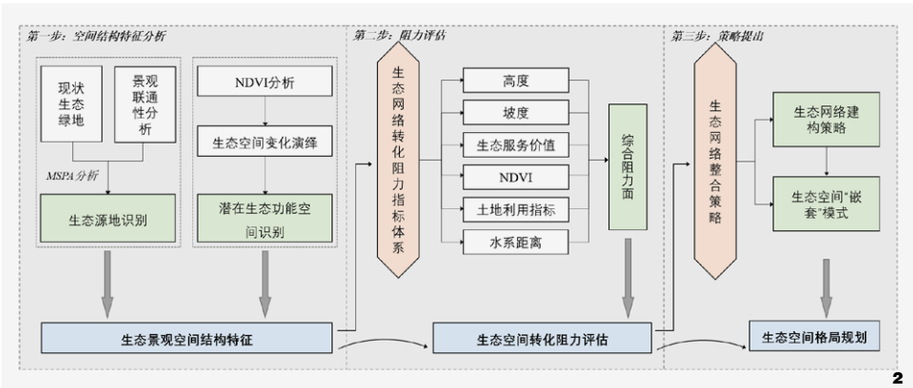


图2 技术路线图
Fig. 2 Research framework

2.1 数据来源

研究所使用的基础数据及来源详见表1。

表1 数据类型及来源
Tab. 1 Data types and sources

数据类型 Data type	数据名称 Data name	年份 Year	数据来源 Data source	单位 Unit	分辨率 Resolution ratio
栅格数据	DEM 数据	2022	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)	m	30 m
	土地利用	2022	美国环境系统研究所公司 (https://www.arcgis.com/)	—	10 m
	归一化植被指数 (NDVI)	2022	国家青藏高原数据中心 . (https://data.tpdc.ac.cn/)	—	30 m
矢量数据	行政边界	2022	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)	—	矢量数据
	河道网络数据	2022	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/)	—	矢量数据

2.2 形态学空间格局分析

形态学空间格局分析（Morphological Spatial Pattern Analysis，MSPA）是一种使用图像处理方法对空间格局进行统计、识别和分类的分析技术。该方法是Soille、Vogt[9]基于腐蚀、膨胀、开运算、闭运算等数学形态学原理，构建出的精确分辨景观类型与结构的方法。MSPA法能够识别出具有功能性和连通性的景观生态格局，并且已被证实适用于多尺度的景观场景[10-12]。该方法对土地利用数据重新分类，将林地、湿地等自然生态要素提取出来作为前景值，其他用地类型作为背景。通过MSPA法将前景数据根据空间形态识别出核心区、岛状斑块、孔隙、边缘区、桥接区、环岛和支线7种不重叠的景观类型。MSPA法被广泛应用于提取现状景观格局中的绿色基础设施要素，成为规划的核心与基础。

2.3 景观连通性计算

景观连通性计算是评估生态网络结构和功能的重要手段之一。整体连通性指数（Integral Index of Connectivity，IIC）、潜在连通性指数（Probability of Connectivity，PC）和斑块显著性指数（dPC）是目前研究景观连接度水平以及斑块对景观连接性的重要性的主要指标。这两种指数能够帮助理解和评估生态斑块之间的相互作用及其对整个生态系统连通性的影响。

*IIC*是衡量区域中所有斑块连通性的综合指标，考虑每个斑块的面积、形状以及斑块间的空间位置关系。*IIC*值范围从0到1，值越大表示整体连通性越好。*PC*值反映在给定条件下，两个随机选择的斑块之间存在连通路径的概率，这个指标有助于评估景观中斑块的可达性和连通性的潜在水平，计算见公式（1）（2）。

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

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

式中，n表示景观中斑块总数；a_i和a_j分别表示斑块i和斑块j的面积；A_L是景观的总面积；l为景观中存在景观要素时的连通性指数值；P_{ij}^{*}是物种在斑块i和斑块j直接扩散的几率。

*dPC*用于评估某个斑块对整个区域景观连通性的贡献程度。具体来说，它是通过计算移除某个斑块后，观察整个区域的*PC*值

的变化情况而得到数值，dPC值越高，斑块在区域的连通性中越重要。计算见公式（3）。

$$dPC_i = \frac{(PC_{total} - PC_{rem})}{PC_{total} \times 100} \quad (3)$$

式中，PC_{total}是包含所有斑块的整个景观的PC值；PC_{rem}是移除斑块i后的景观的PC值。

本文利用ArcGIS 10.8和Conefor 2.6软件计算IIC、PC和dPC。根据研究区域的大小及斑块的分布情况选择合适的阈值。根据西安都市圈的生境条件，参数选取基于最接近真实连通性的反映同时兼顾计算的可行性，在进行多次数据实验及验证后确定为以5 000 m作为距离阈值，连通概率为0.5。

2.4 西安都市圈生态网络转化阻力指标体系构建

通过构建西安都市圈生态网络转化阻力指标体系，可以更有效地评估土地转换的难易程度，为后续生态格局的构建提供关键参考。评价体系的建立基于对相关文献的研究，并结合现场的具体生态环境状况及收集到的数据[13]。在这一过程中，生态服务功能较高的区域通常能提供更优质的生境[14]。此外，场地的植被覆盖情况、地形特征、土地用途及其开发强度等因素，也会对生境条件以及土地转换的难度造成影响[15]。

2.4.1 阻力指标确定

生态服务价值是指生态系统通过其结构、过程和功能为人类提供各种直接或间接的生命支持产品和服务。本文的重点在于综合考量整个生态系统的服务总量，同时关注这些服务对自然资源的影响，故评估体系主要参考谢高地团队[16-17]提出的等效因子表（表2），该表展示全国范围内生态系统服务功能的平均水准。其中国家平均产量的农田每公顷自然粮食产量的经济价值是一个标准单位的生态系统服务价值等效因子的价值，这是其他土地利用类型等效因子的一个重要参考，也是区域修订的基本依据。计算见公式（4）（5）。

$$\alpha = Q/Q_0 \quad (4)$$

$$E_i = \alpha \times E_{0i} \quad (5)$$

式中，α为生态服务功能等值因子的区域修正系数；Q和Q_0分别为西安都市圈所属地区和全国单位面积耕地的粮食产量；E_i为区域修正后第i类利用地的生态服务功能等值因子；E_{0i}为全国平均值第i类利用地的生态服务功能等值因子，其中i=1，2，3，…，n，分别对应耕地、森林、草地、水体、居民点和裸地6种生态系统类型。

在同一生态系统中，其内部生态服务功能的价值存在差异。现有研究结果表明，植被覆盖与生态系统服务之间存在很大关系。为了比较基于不同城市化水平的城市蓝绿空间生态系统的生态服务水平，植被覆盖系数指数被用来对各区域的生态服务价值等效因子进行二次修订。而植被覆盖可以通过植被归一化指数（NDVI）进行测量，具体见公式（6）–（8）。

$$f = (NDVI - NDVI_{min})/(NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (6)$$

$$f_{vi} = f_{ij}/f_j,\ i = 1, 2, \cdots, n;\ j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$Ef_{vi} = E_i \times f_{vi},\ i = 1, 2, \cdots, n \quad (8)$$

其中，f是植被覆盖率；f_{vi}是4种区域流域的植被覆盖修正系数；i即城市区域、郊区、农村地区和农村自然区；f_{ij}是类别j中生态系统类型i的植被覆盖；f_j是研究区域中生态系统类型j的植被覆盖；Ef_{vi}是研究区域中类别i流域植被覆盖修正后的生态系统服务价值等效因子；E_i是土地利用类型i的生态系统服务价值等效因子。使用粮食产量比和植被覆盖系数指数对生态服务价值等效因子进行修正。基于上述区域修订，获得西安都市圈不同生态系统服务价值当量因子表（表3）。

除上述生态系统服务价值和场地NDVI因素外，还需要将高程、坡度、土地利用类型、

表2 中国不同陆地生态系统单位面积生态服务价值表（单位：元/（hm^2·a））
Tab. 2 Ecosystem service value per unit area of different terrestrial ecosystems in China

服务类型 Service type	供给服务 Provisioning service		调节服务 Regulating service			支持服务 Supporting service		文化服务 Culture service
	食物生产	原料生产	气体调节	气候调节	水文调节	土壤保持	生物多样性	美学景观
农田	884.9	88.5	442.4	787.5	530.9	1 291.9	628.2	8.8
森林	88.5	2 300.6	3 097.0	2 389.1	2 831.5	3 450.9	2 884.6	1 132.6
草地	265.5	44.2	707.9	796.4	707.9	1 725.5	964.5	35.4
水体	88.5	8.8	0.0	407.0	18 033.2	8.8	2 203.3	3 840.2
聚落	82.6	0.0	0.0	0.0	260.3	0.0	0.0	82.6
裸地	8.8	0.0	0.0	0.0	26.5	17.7	300.8	8.8

距水距离等因素纳入到评价体系。结合许峰等[18]、郭家新等[19]对各评价因子的赋值（表4），相对阻力值确定为5级（1、3、5、7、9），并采用层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）确定6项评价指标权重。

2.4.2 阻力面模型构建

阻力面采用最小累积阻力（Minimum Cumulative Resistance, MCR）模型来建立。MCR模型在生态学领域广泛应用，主要通过模拟物种在不同斑块间的移动路径，识别物种扩散的最佳路径，用于生态网络构建和优化工程，特别是那些面临生物多样性保护、生态环境修复和可持续发展挑战的地区。通过使用ArcGIS软件，本研究运用地理加权回归法构建综合阻力面模型（图3）。该模型能够有效反映物种迁移过程中遇到的不同阻力，为

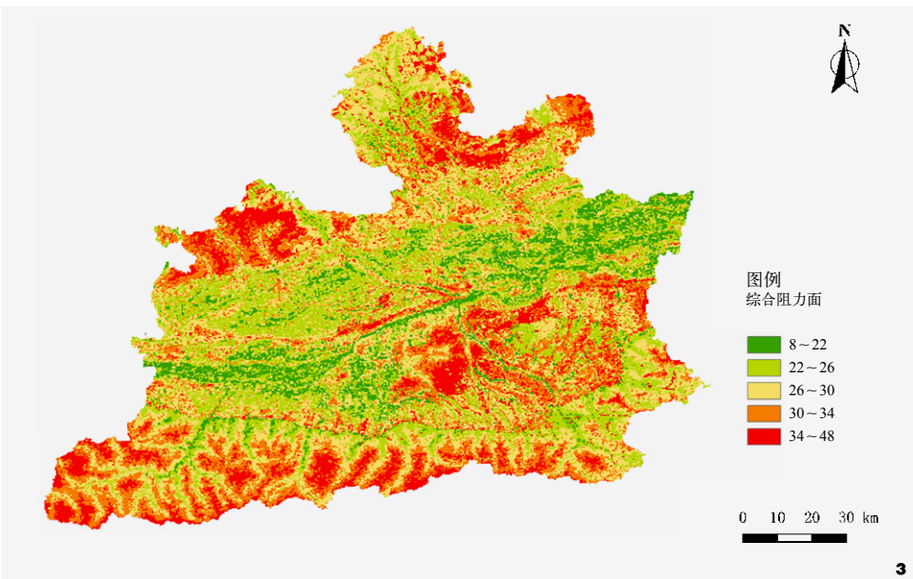


图3 综合阻力面模型
Fig. 3 Comprehensive resistance surface model

表3 西安都市圈不同生态系统服务价值当量因子表（单位：元/（$hm^2 \cdot a$））
Tab. 3 Ecosystem service value equivalency factors for different ecosystems of Xi'an metropolitan area

服务类型 Service type	供给服务 Provisioning service		调节服务 Regulating service			支持服务 Supporting service		文化服务 Culture service
	食物生产	原料生产	气体调节	气候调节	水文调节	土壤保持	生物多样性	美学景观
农田	510.76	51.08	255.35	454.55	306.44	745.68	362.60	5.08
森林	51.08	1 327.91	1 787.59	1 378.99	1 634.34	1 991.86	1 664.99	653.74
草地	153.25	25.51	408.60	459.68	408.60	995.96	556.71	20.43
水体	51.08	5.08	0.00	234.92	10 408.76	5.08	1 271.74	2 216.56
聚落	47.68	0.00	0.00	0.00	150.25	0.00	0.00	47.68
裸地	5.08	0.00	0.00	0.00	15.30	10.22	173.62	5.08

表4 西安都市圈生态空间转化阻力指标体系
Tab. 4 Ecological space conversion resistance index system of Xi'an metropolitan area

阻力因素 Resistance factor	转化阻力赋值 Conversion resistance assignment				
	1	3	5	7	9
高度 /m	337 ～ 650	651 ～ 1 100	1 101 ～ 1 550	1 551 ～ 2 050	＞2 050
坡度 /°	＜ 30	30 ～ 60	61 ～ 75	76 ～ 85	＞85
生态服务价值 /（万元 /m^2）	>24 590	18 176 ～ 24 590	5 248 ～ 18 175	4 663 ～ 5 247	＜4 663
NDVI	＞ 0.60	0.46 ～ 0.60	0.36 ～ 0.45	0.23 ～ 0.35	＜ 0.23
土地利用类型	水体	林地	草地	耕地	建设用地、未利用地
水系距离 /m	＜ 2 100	2 100 ～ 5 100	5 101 ～ 9 100	9 101 ～ 15 600	＞15 600

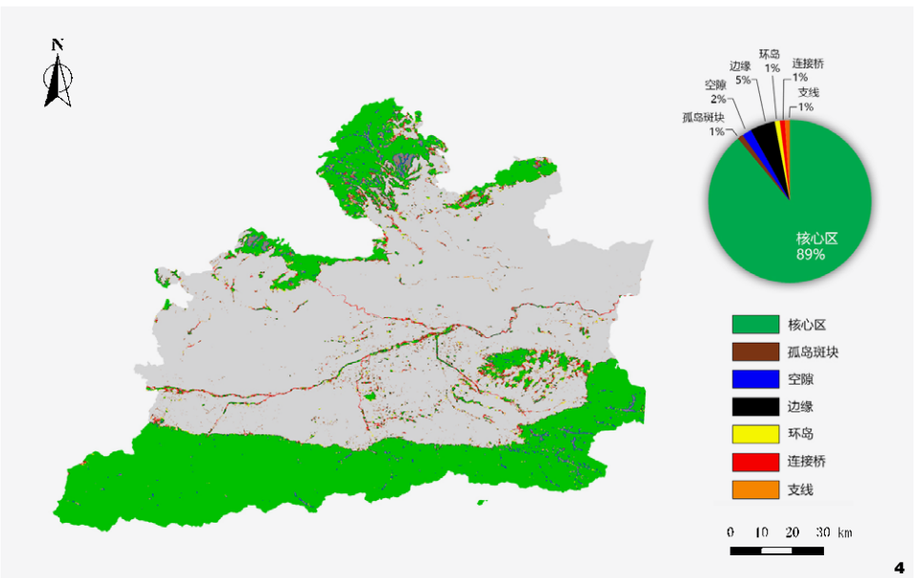


图4 基于MSPA法的景观格局分析
Fig. 4 Landscape pattern analysis based on the MSPA method

理解物种分布模式及保护规划提供了科学依据，计算见公式（9）。

$$MCR = f_{min} \sum_{j=m}^{i=n} D_{ij} R_i \qquad (9)$$

式中，D_{ij}为源点到空间单元i的距离，R_i为单元的阻力系数。

通过量化不同因素对土地转换过程的影响，为生态网络的规划与设计提供科学依据，有助于优化资源配置，提高生态恢复项目的效率和效果。通过MCR模型的应用，可以有效识别出最适合进行生态恢复和绿地建设的区域，从而促进生物多样性保护和生态系统可持续发展。

3 西安都市圈生态空间识别与结构特征提取

3.1 西安都市圈景观空间形态分析

通过MSPA法分析西安都市圈景观空间格局（图4）。结果表明，核心区面积约6 488.22 km^2，占总绿地斑块的88.89%，其主要聚集区在研究范围南部的秦岭北麓、骊山以及北部的渭北台塬一带；具有连接作用的桥接区与支线，分别占总绿地斑块的0.88%和1.32%，与主城区范围内的蓝绿空间形成紧密联系，主要集中在城区北部的渭河和泾河河道，东部的灞河、骊山和白鹿原，西部的沣河与昆明湖，形成连续的生态空间（表5）。

对识别出的斑块进行结构连通性优先级评估，以识别具有关键结构功能、能维持生境网络整体稳定性的生态源地。将这些识别出的生境源地再次输入到MCR模型中，利用最少成本路径方法来识别重要的生态廊道。将综合阻力面的分析结果赋值到景观形态格局上，可得到生态网络阻力转化的评估结果（图5）。该结果可以用于指导未来都市圈生态安全格局的规划与建设。对于阻力值较低的区域，应优先考虑增强其生态网络的连通性；而对于阻力值较高的区域，则需要对其中的绿地采取保护措施，以应对城市扩张所带来的威胁。

3.2 西安都市圈潜在生态功能空间分析

都市圈景观格局演绎分析是反映一段时间内的地表特征、生物群落和自然资源的空间分布格局变化的研究方式，揭示由于人为原因而消除的生态空间是具有一定生境恢复能力的[20]。本文主要利用NDVI值分析生态空间变化，获得生态空间的演进过程，识别出具有修复能力的潜在生态功能空间。

通过叠加对比2000–2022年5个典型年的西安都市圈内覆盖变化数据：2000年为11 039.1 km^2，2006年为13 430.54 km^2，2012年为14 964.07 km^2，2017年为13 749.81 km^2，2022

表5 景观要素面积及占比表
Tab. 5 Landscape element area and proportion table

景观要素类型 Landscape element type	面积 /km^2 Area	占比 /% Proportion
核心区	6 488.22	88.89
孤岛	95.62	1.31
环道	36.50	0.50
桥接区	64.23	0.88
孔隙	129.92	1.78
边缘	388.31	5.32
支线	96.35	1.32
总计	7 299.15	100

年为14 988.16 km²，能够发现在过去20年内西安市的植被覆盖情况是呈现上升趋势，增加了近4 000 km²的绿地。

从都市圈的植被覆盖度变化概况可以看出，都市圈内的植被变化趋势呈现一种中心向外部转移的趋势，城市和主要居住地周围的绿地在转出，尤其是西安市与咸阳市周围；反之，远离城市的自然山地区域植被呈现明显转入的情况，说明近些年的生态修复工程起到一定作用。植被覆盖转入的部分在西安市都市圈内大约有三个区域，即西安市东南的白鹿原地区、咸阳的嵯峨山地区和富平境内。而植物的转出部分是从西安市建成区周围开始变化的，在2012–2017年内的转出量最大，直到2022年有大面积的绿地转入，但城市周围仍然存在因城市扩张而减少的绿地（图6）。

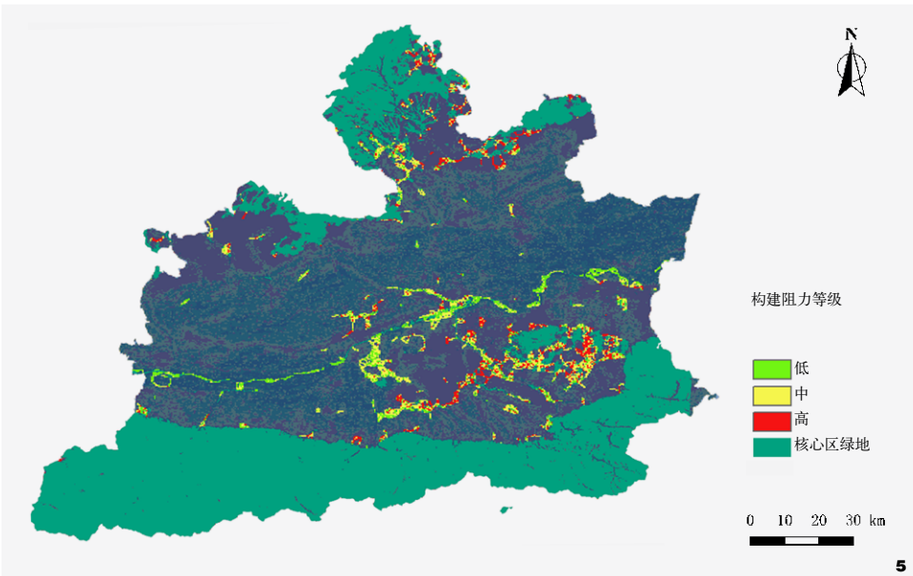


图5 生态网络转化阻力评估
Fig. 5 Ecological network conversion resistance assessment

3.3 西安都市圈生态空间结构特征分析

西安都市圈生态空间可以归为4类：生态源地、生态廊道、孤立斑块以及农田生态功能区（图7）。通过分析这4类用地的空间分布、生态功能及特点，进而揭示整体结构特征。

西安都市圈的生态源地是生态系统的核心，具有较高的连通性和生态功能，总面积约6 300.15 km²，占生态斑块总面积的97%。这些源地主要集中在三个区域：秦岭北麓是连通性最高的核心区域，铜川香山与临潼骊山区域连通性次高，dPC指数为1.5 ~ 3，具备较强的生态网络连接能力，其余源地则分布在香山和骊山周边，但连通性较低，需进一步优化网络。

生态廊道作为生态源地之间的纽带，构建了重要的物种迁徙通道，支撑基因交换与生态系统稳定性。通过自然或半自然生态系统（如河流、带状林地和湿地）的连接，增强生态网络的整体连通性，为区域生态安全提供有力保障。此外，农田生态功能区通过可持续管理，为生物多样性提供额外支持。

孤立斑块是缺乏连通性的独立生态区域，通常面积较小，生态功能较脆弱，易受外界干扰。通过连接生态廊道可提升孤立斑块的生态功能和稳定性。农田生态功能区虽生物多样性较低，但可通过保护性农业实践提升生态价值，逐步融入整体生态空间。整体生态空间结构具有层次性，源地、廊道与功能区协同作用，形成高效可持续的生态网络。

西安都市圈的生态空间结构以秦岭北麓为核心，辅以铜川香山和临潼骊山区域的生态源地，通过自然或半自然的生态廊道连接形成生态网络。核心区生态源地占生态斑块总面积的97%，是生态功能的重要载体，而孤立斑块和农田生态功能区则需通过廊道连接和可持续管理提升生态效益。

4 西安都市圈生态网络构建策略与生态空间规划布局

4.1 西安都市圈多中心生态网络构建策略

西安都市圈现状空间主要依托交通联系呈现点轴型特征[21]。而网络型空间结构具有多中心、多节点的形态特征，各节点之间的互动通过多向度、多维度的空间联系实现，同时能够发挥有效的空间协同效应。协同效应是网络结构的外部性体现，是一种有序的系统状态[22]。通过研究发现，多中心网络型生态空间是更为稳定、提供良好多样指标的模式。

构建适宜的西安都市圈生态网络可采用以下4种方法：网络整合、廊道桥接、网络织补、生态修补（图8）。利用河流、交通干道等线性绿道，有效连接都市圈内的生态公园、湿地公园、城市公园、历史文化公园乃

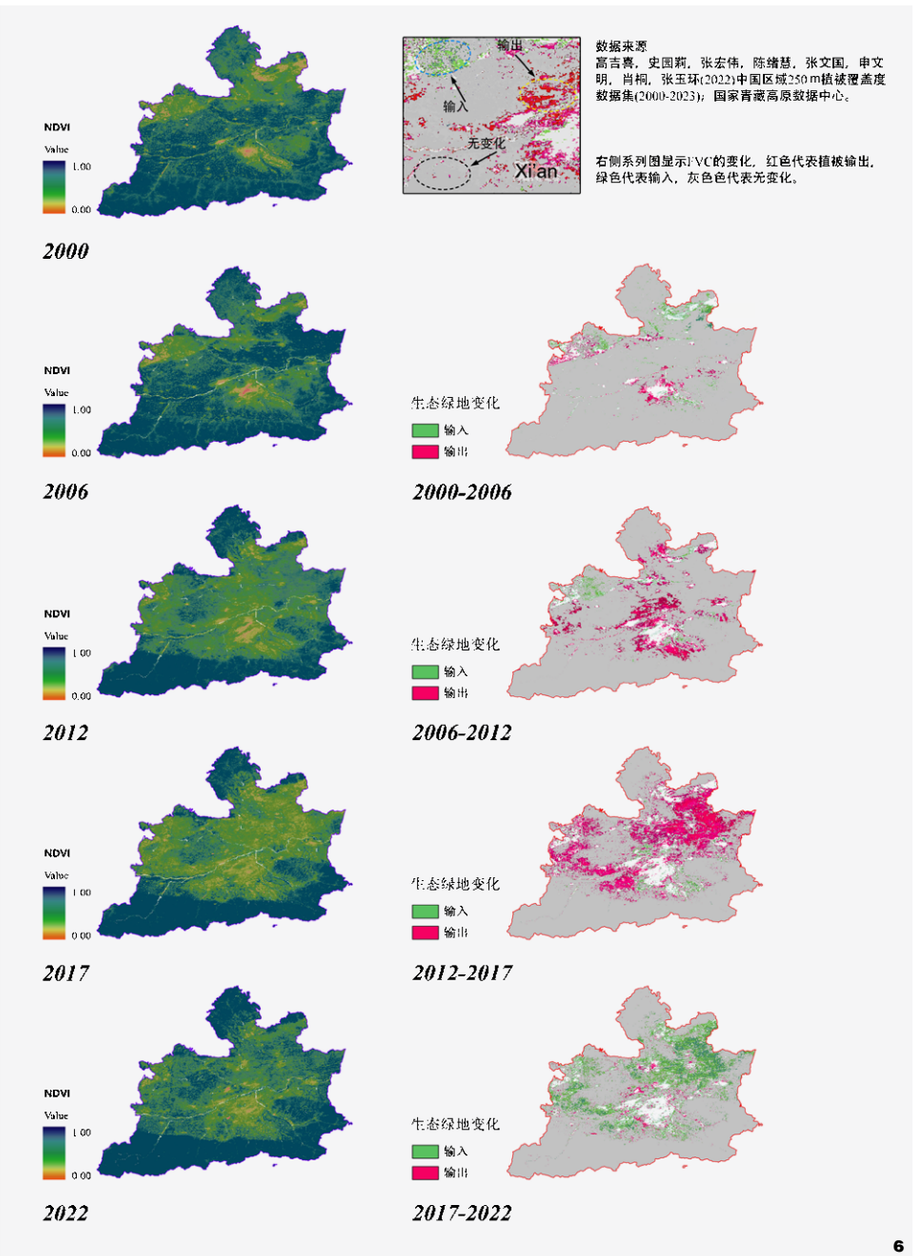


图6 植被覆盖度演变图（2000–2022年）
Fig. 6 Vegetation cover change map from 2000 to 2022

至社区公园等破碎的生态斑块，增强整体生态网络的连通性和稳定性。在西安都市圈核心生态源地建设保育区，如嵯峨山生态网络保育区和骊山生态保育区等，以保证生态源地不受到侵占和干扰。加强主要廊道的连通性，用河流、交通干道等线性绿道，将各种类型的绿色开放空间连接以形成生态绿网，促进生物迁移和基因流动。修补零散的生态斑块，建立独立的自然公园或保育林地。

4.2 西安都市圈生态空间“核心—廊道—缓冲区”规划模式

基于多中心生态网络建构策略，提出“核心—廊道—缓冲区”的生态空间布局模式（图9）。其中核心主要是两个区域，分别是以秦岭北麓生态保育区和渭北台塬生态保育区；廊道指的是基于渭河及其周边景观斑块组成的生态廊道，基于该廊道与周围的源地、生态斑块存在潜在的联系与较低的转化阻力，从主廊道分支出若干支廊道；缓冲区则是环绕西安市主要建设范围外围，集合现有的零碎斑块织补出一个完整而连续的生态缓冲区。同时，对潜在的簇状斑块进行修补扩大后能够形成一定规模的生态绿地集群。

4.3 西安都市圈生态空间规划布局构想

在西安都市圈的生态空间规划布局中，针对现有生态系统的特征和需求，提出多层级、多中心的网络优化策略，以提升区域生态系统的整体连通性、功能性和稳定性。

（1）重点对主要生态源地周边的零散斑块进行整合优化。这些斑块虽面积较小，但对生态源地功能的延续和扩展具有重要意义。通过整合这些斑块，形成更加连贯的网状生态结构，不仅显著提高生态网络的稳定性，还增强其对外界干扰的适应能力。规划需扩大生态核心的辐射范围，优化生物多样性保护效益，提升区域整体的生态服务功能。

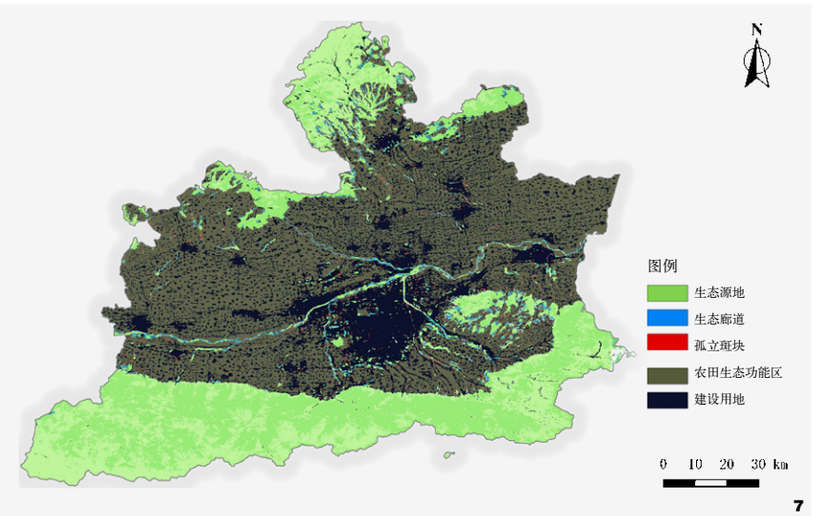
（2）以河道空间为主要对象，基于低转化阻力原则，进行生态廊道的构建与整合。以渭河、沣河、灞河、泾河和黑河等主要水系为依托，规划出一条供物质交换的廊道，将各大生态源地串联起来。这些河道廊道在

物种迁移、基因交流和水文循环中起到核心纽带作用，显著增强区域生态网络的功能连通性。河道廊道的建设还有效地维护了区域的水文稳定性，调节气候条件，并为沿河区域的生态系统提供重要的支持与保障。此外，在规划阶段可以考虑整合建成区的未开发用地、裸地，以及通过用地平衡等方式构建生态廊道。

（3）针对分布成簇状的零星斑块，通过分析与整合，构建一套规模化的绿色织补区。织补区通常位于城市建设用地的扩张边界，与城市空间的关系较为紧密。这类区域不仅需要综合考虑生态斑块之间的连通性，还需与城市发展的方向和节奏相协调。织补区的规划设计需具备较高的灵活性，以应对城市扩张对生态系统可能产生的冲击。同时，织补区的存在还可以作为城市与自然生态之间的过渡地带，为城市发展提供一定的生态弹性。

（4）根据分析发现，西安都市圈北部自然用地的增长趋势快，且有利于生态空间恢复，同时从发展过程看，现有城市建设用地所在区域曾经是利于植被生长且能够形成一定规模的生态空间。通过“化零为整”的修补方式，将孤立的生态斑块进行整合，形成更大面积、更稳定的绿地斑块。这不仅增强了这些斑块的生态功能，还有效缓解其因孤立性而面临的侵占和退化风险，从而为区域生态系统的长远稳定提供有力支持。

综上，通过源地整合、廊道构建、织补区规划和修复区优化，西安都市圈生态空间布局形成了“核心—廊道—缓冲区”的生态网络布局规划（图10）。



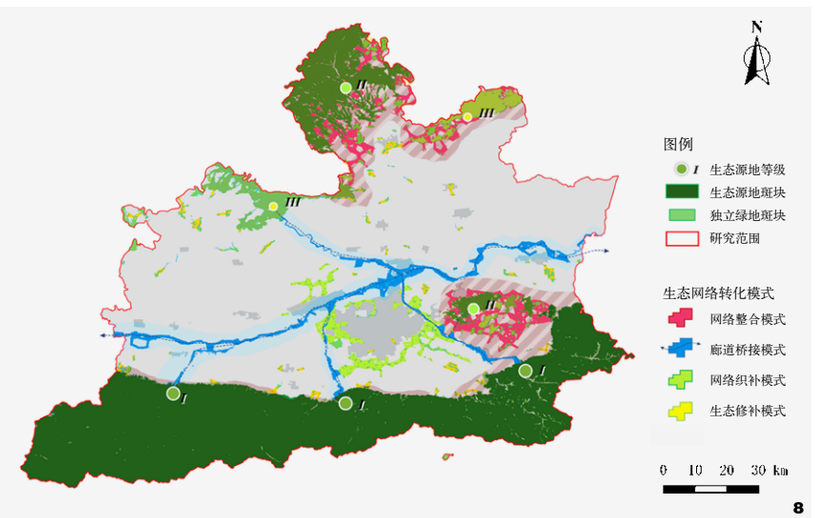


图7 西安都市生态空间结构特征
Fig. 7 Ecological space structural characteristics of Xi'an metropolitan area

图8 西安都市圈多中心生态网络构建模式图
Fig. 8 Multi-center ecological network construction model of Xi'an metropolitan area

图9 西安都市圈生态空间规划模式图
Fig. 9 Ecological space layout and structure of Xi'an metropolitan area

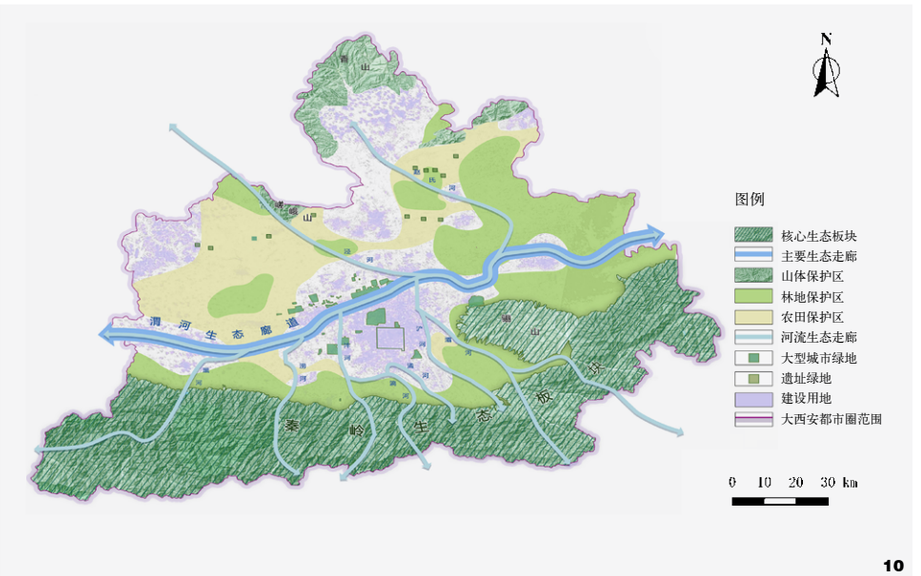


图10 西安都市圈生态空间布局规划图
Fig. 10 Ecological space layout planning map of Xi'an metropolitan area

5 结语

本文采用遥感技术与地理信息系统（GIS）相结合的方法，科学识别和分析区域尺度的生态空间要素和结构特征，为西安都市圈相关规划策略的制定提供重要依据，也为生态修复、保护与可持续发展提供有力支持。通过探索西安都市圈生态网络构建模式，为解决复杂的生态问题提供了系统的思路和方法。在理论与数据分析层面深化对西安都市圈生态空间的认知，同时在实践中为都市圈空间规划的科学性和适宜性提供前瞻性的应用示范。

本文在生态空间结构演变机制分析、生态网络构建技术路径及模式探索方面取得了丰富的理论成果。未来的研究应进一步整合多学科方法，推动动态模拟和区域协同，以满足高质量发展和可持续生态建设的需求。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 郭文尧, 刘维刚. 现代化都市圈建设的问题、国际借鉴及发展路径[J]. 经济问题, 2021(08): 104-109.
[2] 方创琳. 新发展格局下的中国城市群与都市圈建设[J]. 经济地理, 2021, 41(4): 1-7.
[3] 《西安都市圈建设三年行动计划(2023-2025年)》正式发布[J]. 新西部, 2023: 271.
[4] 黄亚平, 吴挺可. 我国都市圈研究的综合述评与展望[J]. 华中建筑, 2021, 39(04): 6-10.
[5] 刘伟, 王涵玉, 李欢欣, 等. 不同空间尺度下南京都市圈区域生态用地景观格局演变分析[J]. 西部林业科学, 2024, 53(01): 178-187.
[6] 许均, 周国华, 唐承丽, 等. 长沙都市圈空间界定的定量研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2016, 39(2): 175-180.
[7] 肖金成.《重庆都市圈发展规划》要点[J]. 中国投资(中英文), 2022(Z9): 71-74.
[8] 张博文, 唐相龙, 崔婕心, 等. 西安都市圈土地利用及生态系统服务价值多情景预测[J/OL]. 生态与农村环境学报, 1-18(2024-05-29)[2024-06-05]. https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0150
[9] SOILLE P, VOGT P. Morphological Segmentation of Binary Patterns[J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4): 456-459.
[10] NEEMA M N, OHGAI A. Multi-type Green-space Modeling for Urban Planning Using GA and GIS[J]. Environmentand Planning: Planning and Design, 2013, 40(3): 447-473.
[11] COPPOLA P M, WILLIAMS C K, TERHUNE T M, et al. Landscape Connectivity Influences Survival and Resource Use following Long - Distance Translocation of Northern Bobwhite[J]. Journal of Wildlife Management, 2021, 85(2): 369-383.
[12] VOGT P, FERRARI J R, LOOKING-BILL T R, et al. Mapping Functional Connectivity[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(1): 64-71.
[13] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 等. 生态系统服务权衡研究进展与展望[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5517-5532.
[14] 杨文越, 叶泓妤. 基于生境质量的粤港澳大湾区生态网络识别[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10430-10442.
[15] 王雨薇, 蔚芳, 周轶男, 等. 空间规划中生态系统服务评估方法研究[J]. 城市发展研究, 2021, 28(5): 19-27.
[16] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. 资源科学, 2001(06): 5-9.
[17] 谢高地, 林智钦. 生态系统资产与服务评估核算研究[J]. 中国软科学, 2024(S1): 388-393.
[18] 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.
[19] 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]. 农业机械学报, 2021, 52(03): 275-284.
[20] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 人类活动对生态系统服务功能的影响[J]. 自然资源学报, 2003(1): 118-126.
[21] 张沛, 倪用玺, 张俊杰. 大西安都市圈发展规划问题研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005(02): 223-228.
[22] 卢一沙, 王世福, 费彦. 从点轴联动走向网络协同——南宁都市圈空间结构优化研究[J]. 规划师, 2021, 37(22): 31-37.