

DOI: 10.5846/stxb202205171397

耿瑜爽, 李巍, 乐荣武. 呼包鄂榆城市群耦合空间碳排放生态网络构建. 生态学报, 2023, 43(10): 4086-4097.

Geng Y S, Li W, Yue R W. Ecological network construction of coupling spatial carbon emissions in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4086-4097.

呼包鄂榆城市群耦合空间碳排放生态网络构建

耿瑜爽, 李 巍*, 乐荣武

北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

摘要: 构建生态网络是维持景观连通性、提升包括固碳在内的生态系统服务功能的重要手段。为了更好地响应固碳增汇目标及其政策要求, 有必要将空间碳排放因素纳入区域生态网络分析框架。选择高能耗、高碳排且生态脆弱的呼包鄂榆城市群作为研究区, 采用生态系统服务和连通性分析识别生态源地, 并结合电路理论和重力模型提取生态廊道, 得到区域景观生态格局; 通过获取夜间灯光数据模拟得到城市群栅格尺度碳排放空间格局, 并与景观生态格局进行空间叠加, 以此补充“生态-碳排”耦合节点和规划廊道, 进而构建考虑区域碳排放空间格局的城市群生态网络。结果表明: 1) 仅考虑生态因素构建的区域生态网络东西两侧生态源地连通性不足, 网络呈“中部阻断型”分布; 2) 区域碳排放存在明显空间特征, 高值区出现在人为生态扰动显著的中部矿产资源开发区和主要城镇地区; 3) 通过耦合区域碳排放格局, 补充了 23 个“生态-碳排”耦合节点和 67 条规划廊道, 生态网络结构由树状转变为蜂巢状, 网络闭合度、线点率和连接度分别提升了 92%、30.48% 和 27.45%。因此, 通过耦合空间碳排放因素改进的生态网络构建方法, 对于提高生态网络的多功能性和稳定性, 以及促进以增加碳汇能力为目标的生态保护与修复均具有重要意义。

关键词: 生态网络; 空间碳排放; 生态-碳排耦合节点; 生态系统服务; 固碳增汇

Ecological network construction of coupling spatial carbon emissions in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration

GENG Yushuang, LI Wei*, YUE Rongwu

State Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Constructing an ecological network is an important means to maintain landscape connectivity and improve ecosystem services, including carbon sequestration. To better respond to the goal of carbon sequestration and its policy requirements, it is necessary to incorporate spatial carbon emission factors into the framework of regionally ecological network analysis. Taking the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration with high energy consumption, high carbon emissions and fragile ecology as the study area, the ecological sources were identified based on ecosystem services and connectivity analysis, and ecological corridors were extracted by combining circuit theory and the gravity model to obtain the regional landscape ecological pattern. The grid-scale carbon emission spatial pattern of the urban agglomeration was simulated by obtaining nighttime light data, spatially superimposed with the landscape ecological pattern to supplement the “ecology-carbon emission” coupling nodes and planning corridors, and then constructing the urban agglomeration ecological network considering the regional carbon emission spatial pattern. The results showed that 1) the regionally ecological network constructed by only considering ecological factors had insufficient connectivity between ecological sources on the east and west sides, and it showed a “central-blocking” distribution. 2) Regional carbon emissions had obviously spatial

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72050001)

收稿日期: 2022-05-17; 采用日期: 2022-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weili@bnu.edu.cn

characteristics, and high-value areas appeared in the central mineral resource development zones and the major urban areas with significantly anthropogenic ecological disturbances. 3) By coupling the regional carbon emission pattern, 23 “ecology-carbon emission” coupling nodes and 67 planned corridors were added, the ecological network structure changed from tree-like to honeycomb-like, and network circuitry, line-to-node ratio, and network connectivity increased by 92%, 30.48%, and 27.45%, respectively. Therefore, the improved ecological network construction method coupling spatial carbon emission factors is of great significance for improving the multiple functions and stability of the ecological network, as well as promoting ecological protection and restoration aimed at increasing carbon sequestration and sinks.

Key Words: ecological network; spatial carbon emissions; ecology-carbon emission coupling nodes; ecosystem services; carbon sequestration

我国陆地生态系统具有巨大碳汇,在“碳中和”目标的实现中将发挥巨大作用^[1]。然而近年来,城市化地区高强度的开发导致生态空间破碎化、孤岛化,阻碍了生态流的扩散,削弱了生态系统服务能力,生态系统碳汇功能受到严重威胁^[2]。生态网络能够促进生态系统物质、能量流动^[3],减少景观破碎化的负面影响,保障生态系统服务供给^[4]。因此构建生态网络已成为维持景观连通性、提升包括固碳在内的生态系统服务功能的重要手段。

有关生态网络的研究在生态系统服务功能维持^[5]、生物多样性保护^[6]、游憩环境改善和绿色基础设施建设^[7]、生态空间管控^[8]、生态修复优先区诊断^[9]、生态安全格局^[10]、国土空间治理^[11]等方面已取得较多进展,并形成“生态源地识别-生态阻力面构建-生态廊道提取”的基本范式^[12]。生态源地识别通常选取自然保护区、生态保护红线等自然斑块^[13]或利用生态系统服务^[14]、生态敏感性^[15]、生境质量^[16]、形态学空间格局分析^[17]等方法进行提取。生态阻力面构建多基于土地利用类型赋值^[18-19],但是该方法易忽略同种土地利用类型间的内部差异^[20],因此有学者引入夜间灯光数据^[21]、地形因素^[22]、连通性指数^[23]等指标进行修正。生态廊道的提取方法包括最小累积阻力模型(MCR)^[17]、电路理论^[24]、重力模型^[16]等。总体来看,生态网络构建的研究已日趋成熟,在各领域应用研究不断积累。但在全球气候变化的大背景以及我国碳达峰碳中和(“双碳”)的政策要求下,学者们有必要关注如何在生态网络构建分析框架中耦合碳排放因素,以提高生态网络的多功能性和稳定性,并促进以固碳增汇为目标的生态保护与修复。目前已有研究将产业格局纳入生态网络构建中^[16,25],设置生态-经济战略节点,为本研究提供了实践和理论依据。呼包鄂榆城市群是我国典型的快速城市化地区,引领我国中西部经济发展^[26]。城市群矿产资源富集,以工业化带动经济发展的特征明显,尤其以煤电、煤化工、钢铁等能源开采和高耗能高排放(“两高”)行业为主导,是碳排放的高强度地区,减排任务迫在眉睫^[27]。同时,呼包鄂榆城市群地处农牧交错带,生态本底脆弱^[28],资源开采、城市用地扩张等导致生态用地破碎化,加剧了区域内防风固沙和碳储存等生态系统服务功能的下降^[29],引发了生境破坏、污染加剧等一系列生态问题。在《黄河流域生态保护与高质量发展规划纲要》(2021年10月8日)的政策引领下,呼包鄂榆城市群是当前生态系统保护修复的热点区,对其进行耦合空间碳排放的生态网络构建的研究极具重要性和紧迫性。

综上,本研究以呼包鄂榆城市群为研究区,基于生态系统服务和连通性评价识别生态源地,利用空间主成分分析确定研究区生态阻力面,采用电路理论和重力模型提取生态廊道,得到区域景观生态格局;通过获取夜间灯光数据模拟得到城市群栅格尺度碳排放空间格局,并与景观生态格局进行空间叠加,以此补充“生态-碳排”耦合节点和规划廊道,进而构建考虑区域碳排放空间格局的城市群生态网络,以期城市群固碳增汇的生态保护修复提供技术支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

呼包鄂榆城市群包括内蒙古自治呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市和陕西省榆林市(图1),空间范围为

106°28'E—122°18'E, 36°48'N—42°44'N, 总面积 17.5 万 km²。研究区属温带大陆性季风气候,地跨我国干旱半干旱生态脆弱区,土地利用类型以草地为主,约占总面积的 54.5%,耕地次之,占总面积的 17.9%。经济发展方面,城市群拥有两个国家级千万千瓦级煤电基地和两个国家级现代煤化工产业示范区,以工业带动经济发展的特征突出。

1.2 数据来源

采用的数据包括 2020 年土地利用类型数据、DEM 数据、归一化植被指数、夜间灯光数据、GDP 数据等。其中土地利用数据、归一化植被指数和 GDP 数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), DEM 数据来源于中国科学院地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 夜间灯光数据来源于全球 NPP-VIIRS 合成数据集 (<https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD>), 空间分辨率均为 1km×1km; 各县区(旗)能源消费数据来源于《呼和浩特统计年鉴》(2017—2021)、《包头统计年鉴》(2017—2021)、《鄂尔多斯统计年鉴》(2017—2021)、《榆林统计年鉴》(2017—2021)等。

针对研究区本底状况,选取 5 种生态系统服务,包括水源涵养、碳储存、土壤保持、防风固沙和生境质量服务,各服务的计算方法及数据来源如表 1 所示,其中气象数据均采用 2015—2020 年的 5 年平均值。



图 1 研究区土地利用类型
Fig.1 Land use type of the study area

表 1 生态系统服务计算方法及数据来源

Table 1 Calculation methods and data sources of ecosystem services			
生态系统服务类型 Ecosystem Services	计算方法 Method	单位 Unit	数据来源 Data Sources
水源涵养 Water conservation	水量平衡方程	mm/ km ²	国家气象科学数据中心; 生态保护红线划定技术指南
碳储存 Carbon storage	InVEST-Carbon 模块	tC/ km ²	文献 ^[30—32]
土壤保持 Soil conservation	RUSLE 方程	t/ km ²	国家气象科学数据中心; 联合国粮食及农业组织《Soil Bulletin》
防风固沙 Sand fixing	修正风蚀模型	t/ km ²	基于 HWSO 的中国土壤数据集 (v1.1); 国家气象科学数据中心; 国家冰川冻土沙漠科学数据中心——中国雪深长时间序列数据集; 生态保护红线划定技术指南
生境质量 Habitat quality	InVEST-Habitat Quality 模块	指数	Bigemap 中的遥感图像; 中国科学院资源与环境科学数据中心

2 研究方法

旨在“双碳”背景下,面向固碳增汇目标,通过耦合空间碳排放因素改进生态网络构建方法,分为 3 个步骤(图 2)。首先是按照“生态源地识别-生态阻力面构建-生态廊道提取”的基本范式构建区域景观生态格局;

其次基于碳排放量核算结果,通过夜间灯光数据模拟得到栅格尺度碳排放空间格局;最后对前 2 步所生成的景观生态格局和碳排放空间格局进行叠加分析,在二者的空间冲突处设置“生态-碳排”耦合节点,并依据现有生态源地、生态廊道和“生态-碳排”耦合节点补充规划廊道,以此构建耦合空间碳排放的生态网络。

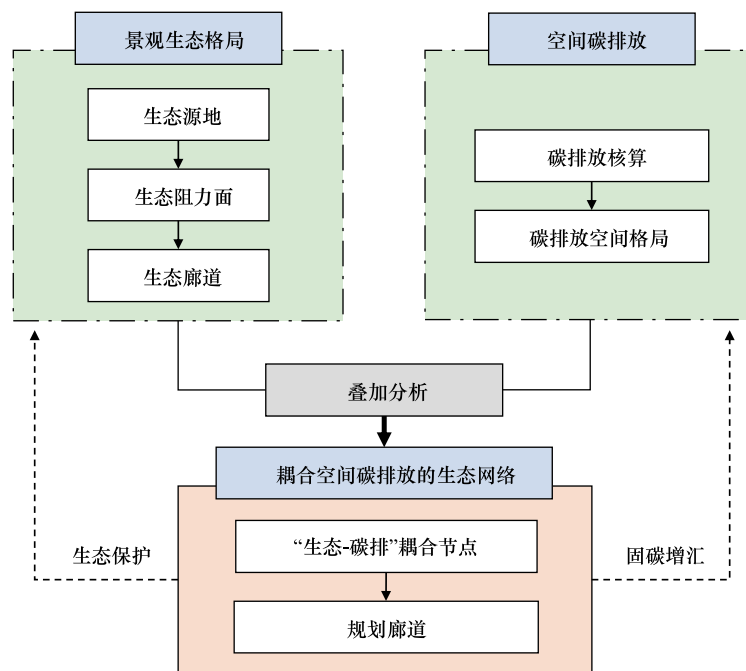


图2 生态网络构建框架

Fig.2 The analytical framework of ecological network construction

2.1 基于生态系统服务的景观生态格局构建

2.1.1 生态源地识别

生态源地的识别是构建生态网络的基础^[33]。通过测算生态系统服务供给水平,筛选出研究区内具有较高生态系统服务功能的斑块作为生态源地。首先采用表 1 所示方法核算水源涵养、碳储存等 5 种生态系统服务,选取每种生态系统服务前 20% 的斑块,取并集后作为生态斑块^[34],采用 ArcGIS 空间分析中的 Getis-Ord G_i^* 统计法进行热点分析,对生态系统服务的高值或低值集聚情况进行空间识别,提取 95% 置信水平上的生态斑块作为生态源地备选区。其次考虑到面积较小的斑块较为破碎且辐射功能弱^[14],因而将面积大于 25km² 的斑块视作生态源地。最后利用 Conefor 软件计算斑块连通性指数(dPC),并按照自然断点法依次划分为核心源地、重要源地、一般源地。

2.1.2 生态阻力面构建

阻力面的设置是生态廊道准确提取的关键^[35]。在自然阻力指标、人类干扰指标等常用的阻力指标的基础上,纳入生态系统服务指标(表 2),各个阻力因子指标对景观格局的影响由小到大分为 5 级,分别赋值为 1、3、5、7、9(图 3)。利用 ArcGIS 中的空间主成分分析方法,不仅能够对生态阻力面构建的阻力指标进行降维处理,还可以将每个主成分所对应的方差贡献率作为其权重^[36],从而得到生态阻力综合指数,公式为:

$$ERI = \sum_{j=1}^m P_{ij} w_j \quad (1)$$

式中,ERI 为第 i 个栅格的生态阻力综合指数, P_{ij} 为第 i 个栅格的第 j 个阻力指标, w_j 为各指标的权重, m 为通过主成分分析选中的指标个数。

表 2 生态阻力指标评价体系
Table 2 Ecological resistance index evaluation system

阻力因子 Resistance factors	阻力系数 Resistance value				
	1	3	5	7	9
高程 Altitude/m	0—1110	1110—1278	1278—1443	1443—1646	1646—2295
土地利用类型 Land use	林地	草地、水体	耕地	未利用地	建设用地
归一化植被指数 NDVI	0.51—0.92	0.35—0.51	0.25—0.35	0.16—0.25	0—0.16
土壤保持量 Soil conservation/(t km ⁻² a ⁻¹)	>3.92	1.86—3.92	0.78—1.86	0.22—0.78	<0.22
水源涵养量 Water conservation/(mm km ⁻² a ⁻¹)	>330	234—330	148—234	55—148	<55
防风固沙量 Sand fixing/(t km ⁻² a ⁻¹)	>2.39	1.87—2.39	1.52—1.87	1.06—1.52	<1.06
碳储量 Carbon storage/(t km ⁻² a ⁻¹)	>270	202—270	58—202	18—58	<18
生境质量 Habitat quality	>0.85	0.6—0.85	0.4—0.6	0.25—0.4	<0.25

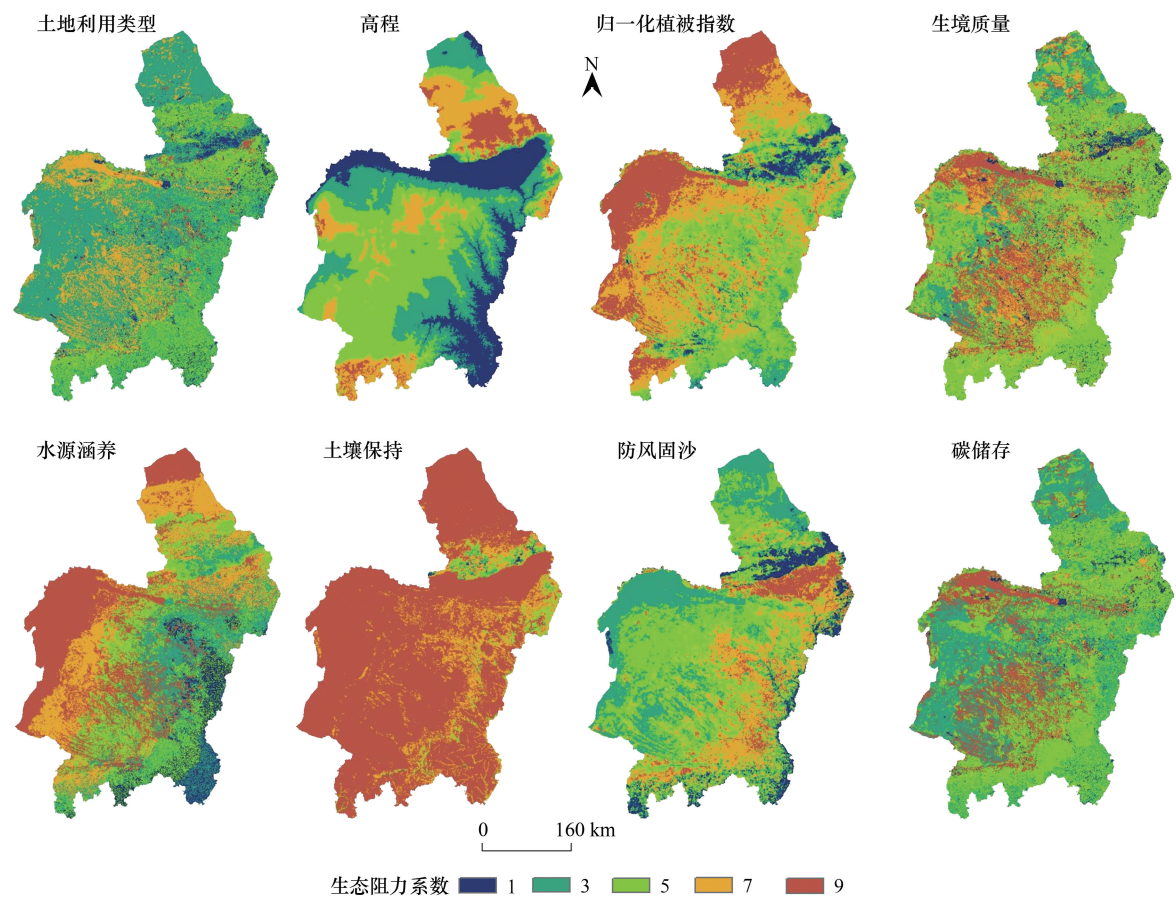


图 3 生态阻力单要素评价结果
Fig.3 Evaluation results from single factor of ecological resistance

最后利用 ArcGIS 中的重分类工具将生态阻力综合指数按自然断点法进行等级划分,划为 5 个等级:低阻力、较低阻力、中等阻力、较高阻力、高阻力。

2.1.3 生态廊道提取

生态廊道用于连通破碎的生态斑块,增加生态系统中物种及能量的流通^[37]。基于电路理论,采用 ArcGIS 工具 Linkage Pathways Tool 模块提取生态廊道,首先将生态源地两两配对,基于最小累积阻力模型识别每对生态源地间的最小成本路径,最后将经过其他生态源地的最小成本路径剔除,最终生成研究区潜在生态廊道。并通过重力模型定量评价生态源地间的相互作用强度,根据相互作用力大小来判定廊道的重要性,将相互作用力大于 10 的生态廊道作为重要生态廊道。

2.2 碳排放核算

呼包鄂榆城市群的碳排放主要来源于能源的使用,同时大部分的学者也将能源消费碳排放作为区域实际碳排放加以研究^[38]。因此本研究将能源消费产生的碳排放视作区域实际碳排放量。在 IPCC 提供的计算国家温室气体排放量指南的基础上,结合城市群各市统计年鉴所统计的能源类型,选取原煤、焦炭、汽油和柴油 4 种能源对呼包鄂榆城市群各区县(旗)能源消费产生碳排放量进行核算(表 3),公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^4 E_i \varepsilon_i k_i \quad (2)$$

式中, C 为各县区(旗)碳排放量, E_i 为第 i 类能源的消费量, ε_i 为第 i 类能源的标准煤换算系数, k_i 为第 i 类能源的碳排放系数。

表 3 各种能源碳排放参考系数

Table 3 Reference coefficients of various energy carbon emissions

能源种类 Energy type	原煤 Raw coal	焦炭 Coke	汽油 Gasoline	柴油 Diesel fuel
标准煤换算系数 Standard coal coefficient/(kgce/kg)	0.1743	0.9714	1.4714	1.4571
碳排放系数 Carbon emission factor/(kg/kgce)	0.7599	0.855	0.5538	0.5921

标准煤换算系数源自《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008);碳排放系数源自《IPCC 国家温室气体清单指南》和《省级温室气体清单编制指南》

相关研究结果表明,同一区域碳排放量与夜间灯光指数呈现正相关的关系^[39—40]。以呼包鄂榆城市群各县区(旗)的能源碳排放为基础,通过夜间灯光数据将各县区(旗)碳排放总量展布到各栅格,公式如下:

$$C_r = \frac{DN_r}{DN_c} \times C_c \quad (3)$$

式中, C_r 、 DN_r 分别为栅格尺度碳排放、夜间灯光指数, DN_c 、 C_c 分别为该栅格所处县区(旗)夜间灯光指数、碳排放之和。

2.3 生态网络构建

在景观生态格局和碳排放空间格局的叠加分析基础上,设置“生态-碳排”耦合节点:(1)在碳排放高值区与最小成本路径存在空间冲突处(相交或相切);(2)最小成本路径交汇处;(3)碳排放高值区聚集区周围。并设计现有生态源地、生态廊道和“生态-碳排”耦合节点间的规划廊道,以促进物质、能量、信息的流动,提高社会-经济-自然复合生态系统的韧性。

3 结果与分析

3.1 景观生态格局分析

3.1.1 生态源地识别

通过 InVEST 模型等方法定量评价生态系统服务,得到呼包鄂榆城市群生态系统服务空间格局(图 4)。水源涵养服务主要受降水量的影响,呼包鄂榆城市群的东南部降水偏多,因此高值区位于呼包鄂榆城市群的东南部,主要集中于榆林市东南部各县区,低值区位于达尔罕茂明安联合旗、杭锦旗、鄂托克旗等西北部地区。防风固沙服务受风速等气候因素和植被覆盖的多重影响,高值区较为分散,分布在呼和浩特市西北部,榆林市东部及南部各区域。生境质量较高的区域位于城市群北部及西部。土壤保持与气候、土壤和植被等因素有关,并且与地理高程密切相关,高值区主要分布于呼和浩特市和包头市,多集中在和林格尔县、清水河县、石拐区、新城区北部、回民区北部等,西南部土壤侵蚀强度较高。碳储存服务高值区分布于呼包鄂榆城市群东部和北部,土地利用类型是影响碳储存服务的主导因素。

基于生态系统服务的评价结果,共识别出 52 个生态源地,面积共计 7303km²,占呼包鄂榆城市群土地总面积的 4.17%(图 5)。其中,呼和浩特市生态源地分布面积最大,占研究区生态源地面积的 46.27%,且重要

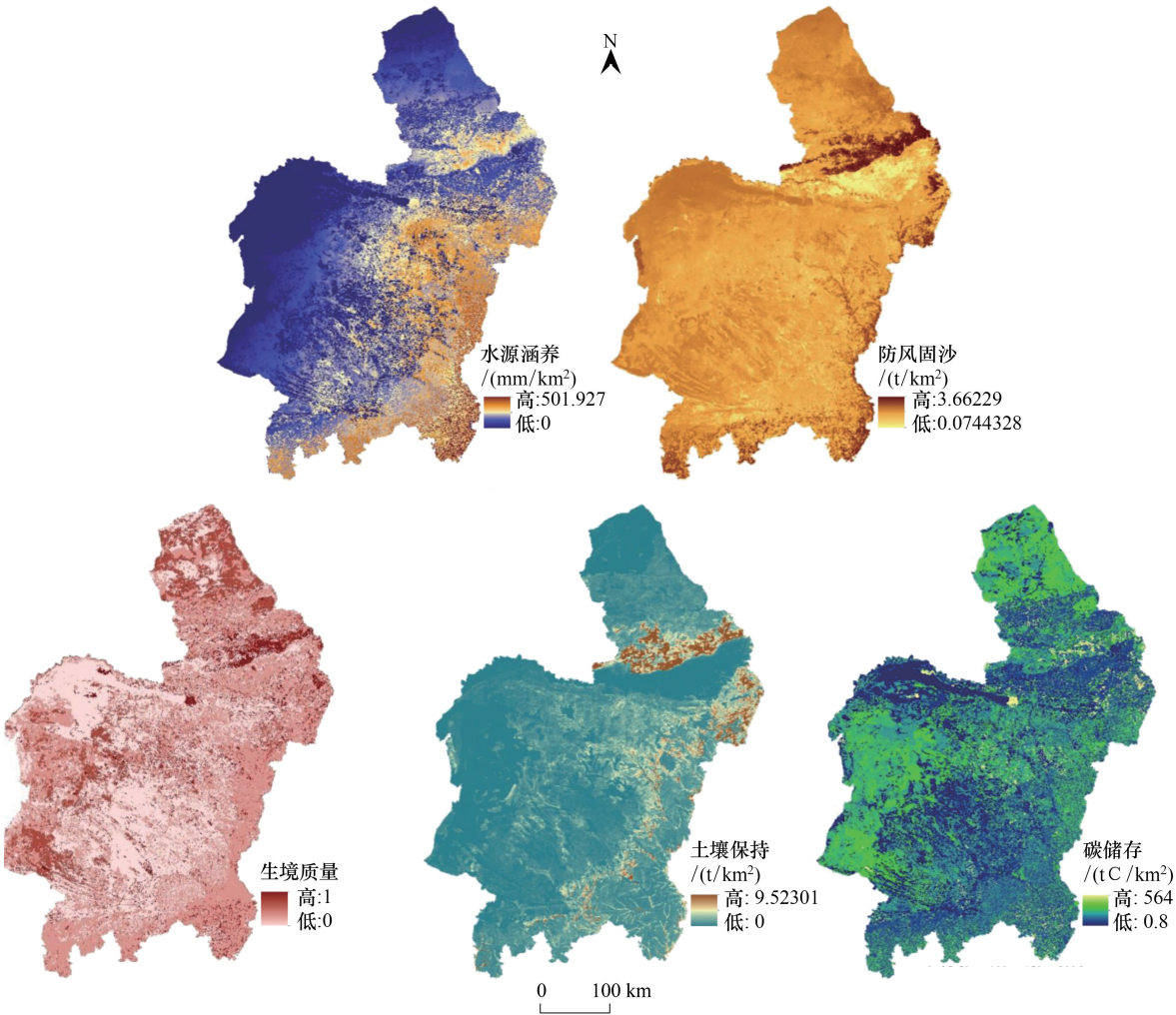


图 4 生态系统服务空间格局

Fig.4 Spatial pattern of ecosystem services

生态源地多集中于此;而鄂尔多斯市少有生态源地分布,占比 5.52%,面临较高的生态风险。生态源地土地利用类型以林地和草地为主,其中林地面积 3811km²、草地面积 2523km²,分别占生态源地总面积的 52.18%和 34.55%,其余地类为耕地和水域。

3.1.2 生态阻力面构建

经过主成分变换后,呼包鄂榆城市群生态阻力的每 1 个主成分包含原 8 个变量的信息载荷。从表 4 可以看出,前 5 个主成分因子的累计贡献率达到了 92.70%,因此前 5 项主成分已经能够较为全面的表征研究区生态阻力面的组成。

表 4 主成分的特征值及其贡献率

Table 4 Eigenvalues of the principal components and their contribution rates

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rates/%	累计贡献率 Accumulative contribution rates/%	主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rates/%	累计贡献率 Accumulative contribution rates/%
1	1.6552	45.63	45.63	5	0.0858	5.98	92.70
2	1.2864	19.94	65.57	6	0.0608	4.23	96.93
3	1.1731	12.06	77.63	7	0.0396	2.76	99.69
4	1.1306	9.09	86.72	8	0.0045	0.31	100

进一步分析各主成分在原始指标上的载荷(表5),发现第1主成分在生境质量、水源涵养、土地利用类型上的载荷较大,第2主成分在水源涵养上的载荷较大,第3主成分在土地利用类型和生境质量上的载荷较大,第4主成分在碳储存、归一化植被指数和土地利用类型上的载荷较大,第5主成分在碳储存和防风固沙上的载荷较大。综合考虑主成分载荷矩阵分析结果,生境因子、水资源因子、土地利用因子和碳储存因子是影响研究区生态安全的主要因素,符合研究区实际情况。

人类对于资源的不合理利用给生态环境带来了极大的破坏,距离居民点、道路、工业用地越近,受到人类活动的压力影响越大,生境破碎化越严重;对于地处干旱半干旱地区的区域而言,水资源无疑是影响生态环境的主要因素,研究区气候干燥,水资源稀缺,加之地处农牧交错带以及人类不合理灌溉,使得生态环境敏感脆弱;工业化带动城市化的发展,导致建设用地不断扩张,占用生态用地,从而破坏了生态环境;最后,碳储存因子也是影响资源型城市群的重要因素,呼包鄂榆城市群资源禀赋极高,能源开采行业和“两高”行业拉动经济快速发展,导致碳排放居高不下,给生态环境带来了较大的压力。

SPCA 分析得到的各因子的方差贡献率作为权重,采用式(1)对前5个主成分进行加权求和,从而获得呼包鄂榆城市群生态阻力综合指数及其空间分布。利用 ArcGIS 重分类工具,将研究区生态阻力分为5个等级(图6),高阻力的区域面积为3.40万 km²,占区域总面积的19.44%;较高阻力的区域面积为7.36万 km²,占区域总面积的42.04%,呼包鄂榆城市群总体生态阻力水平较高。



图5 呼包鄂榆城市群生态源地

Fig.5 The ecological sources of the study area

表5 主成分载荷矩阵

Table 5 Principal component load matrix

约束因子 Restraint factor	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
土地利用类型 Land use	0.435	-0.315	0.714	-0.444	-0.038	-0.051	-0.005	-0.004
高程 Altitude	0.046	0.128	-0.059	-0.174	0.343	-0.782	0.463	0.068
归一化植被系数 NDVI	0.147	0.462	-0.133	-0.478	0.178	0.525	0.455	-0.060
防风固沙 Sand fixation	0.012	-0.160	0.103	0.330	-0.591	0.044	0.706	-0.077
土壤保持 Soil conservation	0.027	0.030	0.013	0.014	-0.069	0.081	0.044	0.992
碳储存 Carbon storage	0.359	-0.165	0.117	0.577	0.643	0.213	0.196	0.004
水源涵养 Water conservation	0.480	0.718	0.172	0.286	-0.241	-0.213	-0.197	-0.031
生境质量 Habitat quality	0.653	-0.320	-0.644	-0.143	-0.153	-0.104	-0.045	0.002

PC:为主成分 Principal component

3.1.3 生态廊道提取

基于生态源地和生态阻力面的构建,结合电路理论和重力模型,共提取生态廊道76条,全长4115.94km。其中,重要生态廊道20条,长度共1034.89km,可分为两部分,一部分贯穿呼和浩特市东部,另一部分从包头市达尔罕茂明安联合旗沿城市群西部生态源地一直连通到榆林市定边县和靖边县;一般生态廊道56条,长度

共 3081.05km, 与重要生态廊道类似, 一般生态廊道同样呈现南北贯通的特点, 北连达尔罕茂明安联合旗, 南至榆林市清涧县(图 7)。

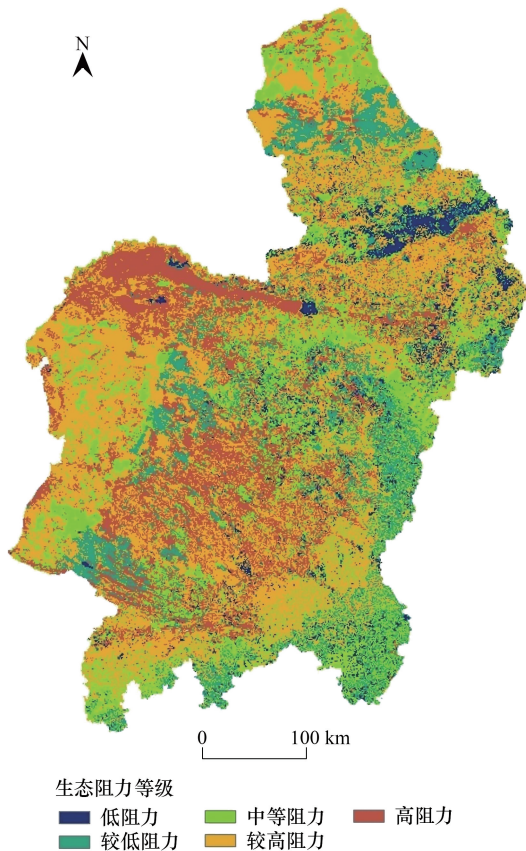


图 6 呼包鄂榆城市群生态阻力等级划分
Fig.6 Division of ecological resistance level

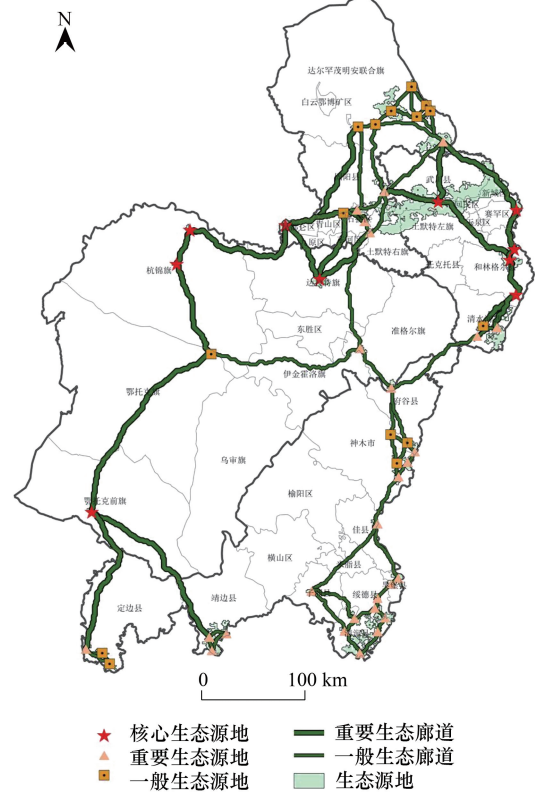


图 7 呼包鄂榆城市群基础生态廊道
Fig.7 Basic ecological corridors in the study area

从目前生态廊道的分布情况来看, 呼包鄂榆城市群的景观生态格局呈现出非对称且不稳定的结构。现有廊道主要从最北端生态源地分别沿着东西两侧生态源地向南延展, 但是在中部地区发生了阻断。此外, 由于中部地区生态源地分布较为稀疏、间隔较远, 未能形成连通的廊道。所以, 呼包鄂榆城市群的景观生态格局呈“中间阻断型”分布, 存在非对称、中部生态源地稀疏、连通性弱的问题。

3.2 碳排放空间格局分析

呼包鄂榆城市群作为我国能源供应基地, 能源在开采及使用过程中的碳排放量巨大, 该地区也成为我国重点减排区域。就 4 个城市而言, 碳排放量最大的是鄂尔多斯市, 其次是榆林市, 最后是包头市和呼和浩特市, 且二者碳排放总量相差不大。从县域尺度来看, 准格尔旗碳排放量最大, 达 2367.88 万 t, 其次是东胜区 (2033.17 万 t), 接下来依次为榆阳区 (1854.14 万 t)、伊金霍洛旗 (1621.38 万 t) 和神木市 (1464.21 万 t) 等(图 8)。碳排放总量达千万吨级的县域主要集中于城市群东中部, 以及鄂尔多斯市鄂托克旗和榆林市定边县。榆林市东南部各县区碳排放量较低, 是由于这些县区经济较为落后导致碳排放较少。

呼包鄂榆城市群碳排放存在显著的空间差异, 高值区较为突出, 出现在人为生态扰动显著的中部矿产资源开发区和主要城镇地区。集聚范围较大的高值区位于呼和浩特市 4 大市区 (新城区、回民区、玉泉区和赛罕区) 以及包头市 4 大市区 (东河区、昆都仑区、九原区和青山区) 交界区域、鄂尔多斯市东部及榆林市西北部。

3.3 生态网络构建

在获得景观生态格局和碳排放空间格局后, 建立“生态-碳排”耦合节点, 剔除距离相近的节点后, 最终设

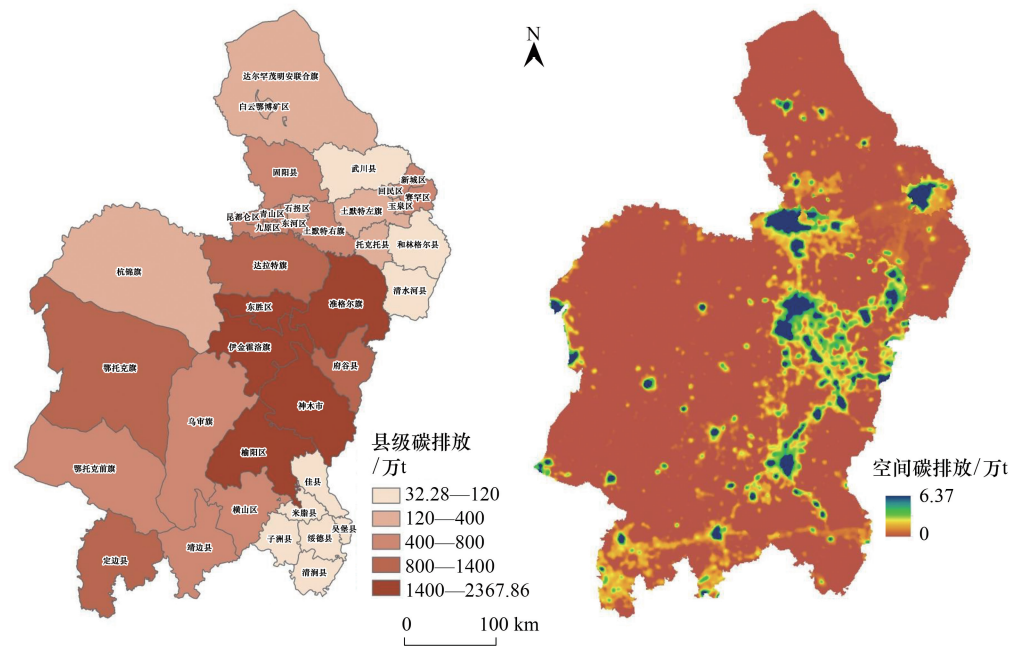


图 8 碳排放空间格局

Fig.8 Spatial pattern of carbon emissions

置 23 个(图 9)。基于最小累计阻力模型,在生态源地、生态廊道和“生态-碳排”耦合节点之间补充规划廊道,共 67 条,总长 3732.63km。规划廊道主要分布在碳排放较高的中部地区,如准格尔旗、东胜区、神木市、榆阳区等;规划廊道大致沿东西方向延展,可以有效地将两侧提供重要生态功能的生态源地连通。增加碳排放缓冲区及生态安全区之间的连通性,可以在降低生态阻力的同时实现经济发展和生态保护的协调发展。

对比布局战略节点前后,呼包鄂榆城市群生态网络闭合度、线点率和连接度较原有的生态网络都得到了较大程度的提升(表 6),规划后的生态网络中节点的连线数和网络回路数量均大幅增加,网络结构由树状转变为蜂巢状。可见,战略节点和规划廊道的增设有效补充了原有生态网络,保证了城市群东西两侧生态要素流的连通,景观生态格局得到了完善。

表 6 战略节点布局前后网络指数

Table 6 Network index comparison after the establishment of strategic nodes

网络指数 Network index	网络闭合度 Network circuitry	网络线点率 Line to node ratio	网络连接度 Network connectivity
布局前 Before layout	0.25	2.92	0.51
布局后 After layout	0.48	3.81	0.65
变化率 Rate of change/%	92.00	30.48	27.45

4 讨论

在我国提出的“双碳”目标背景下,固碳增汇成为生态空间统筹规划的重要部分,本研究提出将碳排放因素纳入生态网络的构建,以提升生态系统服务功能,尤其是固碳能力。现有研究还未对碳排放因素和生态网络进行综合考量,但是已有研究将产业格局和生态网络进行了叠加分析,为构建耦合其他因素的生态网络提供了方法支撑,即通过 2 种空间格局的叠加分析设置战略节点。因此本研究利用夜间灯光数据将县级碳排放量栅格化并得到碳排放空间格局,将其与景观生态格局进行叠加分析,增设“生态-碳排”耦合节点与规划廊道,由此构建区域生态网络,在促进生态保护的同时推动碳减排工作的开展。在此基础上,可进一步对生态系

统碳源碳汇平衡加以研究,构建基于碳流的生态网络格局。

呼包鄂榆城市群景观生态格局显示,生态源地主要聚集于南北两侧,在中部地区呈零散分布;生态廊道呈现南北贯通的趋势连接生态源地,但中部连通性差,表明中部地区生态系统服务功能差,能量流、物质流等生态过程受到抑制。同时,碳排放空间格局显示,中部地区正是碳排放高值区显著集聚的区域,可以判定该地区经济生产活动阻断了生态要素流通。因此,通过规划战略节点和规划廊道可以降低生态阻力,提升生态网络连通性,从而保障固碳等生态系统服务,为生态服务功能供给和经济活动价值生产的融合共生创造空间,促进生态和经济的长期协同发展。

在黄河流域生态保护和高质量发展战略的统领下,呼包鄂榆城市群要加大对生态环境的保护修复力度。根据生态网络构建结果,现有生态源地和生态廊道应当加以重点保护并分级管控,增设的“生态-碳排”耦合节点和规划廊道应以提升生态质量和修复生态环境为目标,并通过建设绿色基础设施来落实。建立集中绿地或水面等节点,如湿地公园、森林公园等,由于所识别出的大部分节点位于碳排放高值区附近,被建设用地或是工业用地包围,脆弱的节点又不利于生态网络的稳定性,因此应划定开发红线,扩大缓冲区范围,避免经济活动对其的干扰与破坏。在此基础上,建立节点间的以防护林、带状公园、道路附属绿地为主的多种规划廊道,提升景观连通性,保护生物多样性,增强城市群生态韧性。

5 结论

随着“双碳”目标的提出,如何将碳排放因素纳入生态网络的构建成为亟待深入研究的问题。针对固碳增汇目标,提出耦合空间碳排放构建生态网络的方法,将景观生态格局和碳排放空间格局进行空间叠加,补充“生态-碳排”耦合节点和规划廊道,拓展生态网络的构建框架,更好地提升生态系统的固碳功能从而响应固碳增汇的目标,指导地区生态保护与修复工作的开展。以呼包鄂榆城市群为研究区构建耦合空间碳排放的生态网络,结论如下:1)呼包鄂榆城市群生态源地分布不均衡,中部分布稀疏且间隔较远,生态廊道呈“南北贯通”分布,在中部连通性差,出现了“中部阻断型”生态格局,存在非对称、中部生态源地稀疏、连通性弱的问题。2)区域碳排放存在明显空间特征,高值区出现在人为生态扰动显著的中部矿产资源开发区和主要城镇地区。呼包鄂榆城市群碳排放存在显著的空间差异,高密度集聚区较为显著。3)根据生态景观格局和碳排放空间格局的空间冲突结果,补充了23个“生态-碳排”耦合节点及67条规划廊道,网络结构由树状转变为蜂巢状,且规划后的网络闭合度、线点率和连接度较原有的生态网络均有了大幅提升。表明战略节点和规划廊道的增设有效补充了原有生态网络,保证了城市群生态要素流的连通,增强了景观多功能性和生态网络的稳定性。

参考文献(References):

- [1] Wang Y L, Wang X H, Wang K, Chevallier F, Zhu D, Lian J H, He Y, Tian H Q, Li J S, Zhu J X, Jeong S, Canadell J G. The size of the land

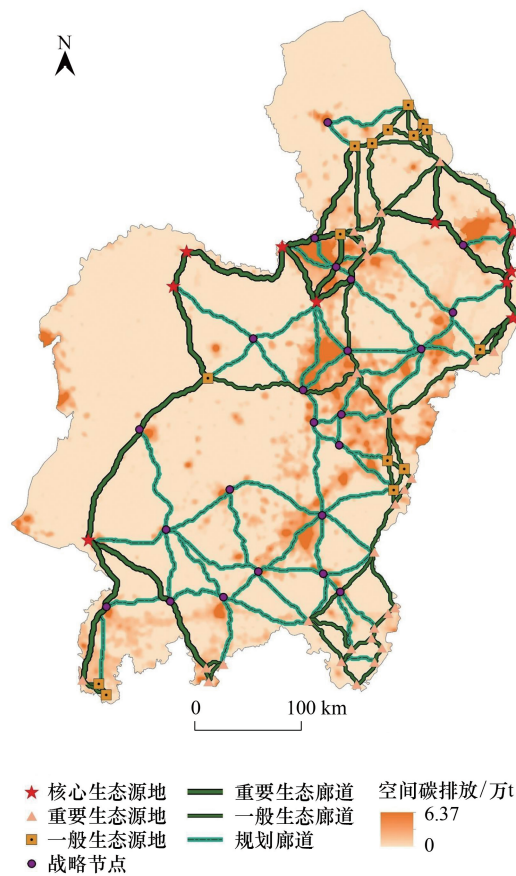


图9 呼包鄂榆城市群生态网络格局

Fig.9 Ecological network pattern of the study area

- carbon sink in China. *Nature*, 2022, 603(7901): E7-E9.
- [2] 梁晨, 曾坚, 沈中健, 王倩雯. 快速城市化生态系统服务格局分析与空间管控——以厦门市为例. *生态学报*, 2021, 41(11): 4379-4392.
- [3] 刘世梁, 侯笑云, 尹艺洁, 成方妍, 张月秋, 董世魁. 景观生态网络研究进展. *生态学报*, 2017, 37(12): 3947-3956.
- [4] 姜虹, 张子墨, 徐子涵, 丹宇卓, 叶玉瑶, 李家志, 彭建. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建. *生态学报*, 2022, 42(05): 1981-1992.
- [5] 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. *中国园林*, 2017, 33(10): 103-107.
- [6] 汉瑞英, 赵志平, 肖能文. 生物多样性保护优先区生态网络构建与优化——以太行山片区为例. *西北林学院学报*, 2021, 36(02): 61-67.
- [7] 高宇, 木皓可, 张云路, 田野, 汤大为, 李雄. 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. *生态学报*, 2019, 39(20): 7547-7556.
- [8] 李红波, 黄悦, 高艳丽. 武汉城市圈生态网络时空演变及管控分析. *生态学报*, 2021, 41(22): 9008-9019.
- [9] 焦胜, 刘奕村, 韩宗伟, 周可婧, 胡亮, 刘铁雄. 基于生态网络-人类干扰的国土空间生态修复优先区诊断——以长株潭城市群为例. *自然资源学报*, 2021, 36(09): 2294-2307.
- [10] 马才学, 杨蓉蓉, 柯新利, 马智宇. 基于生态压力视角的长三角地区生态安全格局构建与优化. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(01): 135-147.
- [11] 陈清清. 基于生态安全格局的国土空间生态修复策略研究——以滨江市为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [12] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 杨晓晶, 许晓君, 李潇, 胡中民, 周厚云. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [13] 徐德琳, 邹长新, 徐梦佳, 游广永, 吴丹. 基于生态保护红线的生态安全格局构建. *生物多样性*, 2015, 23(06): 740-746.
- [14] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. *地理学报*, 2018, 73(04): 701-710.
- [15] 汤峰, 张蓬涛, 张贵军, 赵丽, 郑宇, 魏明欢, 简卿. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建. *应用生态学报*, 2018, 29(08): 2675-2684.
- [16] 王海云, 匡耀求, 文薪荐, 宋兆璞, 刘德华. 粤港澳大湾区生态网络构建及廊道优化. *中国环境科学*, 2022, 42(5): 2289-2298.
- [17] 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 曾令权, 姜晓桦. 基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化. *水土保持通报*, 2021, 41(06): 139-147.
- [18] 田雅楠, 张梦晗, 许荡飞, 张圣微. 基于“源-汇”理论的生态型市域景观生态安全格局构建. *生态学报*, 2019, 39(07): 2311-2321.
- [19] Zhao S M, Ma Y F, Wang J L, You X Y. Landscape pattern analysis and ecological network planning of Tianjin City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 46: 126479.
- [20] 李晟, 李涛, 彭重华, 黄宗胜, 齐增湘. 基于综合评价法的洞庭湖区绿地生态网络构建. *应用生态学报*, 2020, 31(08): 2687-2698.
- [21] 汤峰, 王力, 张蓬涛, 付梅臣. 基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建. *农业工程学报*, 2020, 36(09): 263-272.
- [22] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3126-3136.
- [23] 杨彦昆. 基于连通度指数的生态安全格局构建及优化——以三峡库区重庆段为例[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [24] 李久林, 徐建刚, 储金龙. 基于 Circuit 理论的城市生态安全格局研究——以安庆市为例. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(08): 1812-1824.
- [25] Dai L, Liu Y B, Luo X Y. Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 141868.
- [26] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 邬建国. 中国快速城市化干燥地区的生态系统服务权衡关系多尺度分析——以呼包鄂榆地区为例. *生态学报*, 2016, 36(15): 4881-4891.
- [27] Zhou S Y, Li W, Lu Z G, Lu Z Y F. A technical framework for integrating carbon emission peaking factors into the industrial green transformation planning of a city cluster in China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 344: 131091.
- [28] 薛晓玉, 王晓云, 段含明, 颜耀文. 北方农牧交错带植被 NPP 的时空变化及其驱动因子分析. *水土保持研究*, 2021, 28(02): 190-197.
- [29] 王莉雁, 肖焱, 饶恩明, 江凌. 全国生态系统食物生产功能空间特征及其影响因素. *自然资源学报*, 2015, 30(02): 188-196.
- [30] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [31] 张靖, 同丽嘎, 李政海, 鲍雅静, 孙振, 胡志超, 周丽娜. 内蒙古乌审旗有机碳库变化及其增汇调控途径. *生态学报*, 2016, 36(09): 2552-2559.
- [32] Zheng Y M, Niu Z G, Gong P, Dai Y J, Shangguan W. Preliminary estimation of the organic carbon pool in China's wetlands. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(6): 662-670.
- [33] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 孔繁花. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建. *自然资源学报*, 2020, 35(08): 1986-2001.
- [34] 和娟, 师学义, 付扬军. 基于生态系统服务的汾河源头区域生态安全格局优化. *自然资源学报*, 2020, 35(04): 814-825.
- [35] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化. *自然资源学报*, 2021, 36(02): 342-355.
- [36] 范春苗, 王志泰, 汤娜, 邓国平. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建. *生态学报*, 2022(16): 1-13, doi: 10.5846/stxb202012213241.
- [37] 王正伟, 王宏卫, 杨胜天, 刘勤, 高一薄, 衡嘉尧, 张惠婷. 基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例. *生态学报*, 2022, 42(01): 91-104.
- [38] 武娜, 沈镭, 钟帅. 基于夜间灯光数据的晋陕蒙能源消费碳排放时空格局. *地球信息科学学报*, 2019, 21(07): 1040-1050.
- [39] 苏泳娴. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的中国能源消费碳排放研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.
- [40] 杜海波, 魏伟, 张学渊, 纪学朋. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据. *地理研究*, 2021, 40(07): 2051-2065.