

人为扰动下矿区生态系统功能价值评估体系的构建与应用验证

王雪晴¹, 张绍良^{1,2}, 侯湖平¹, 艾珂², 陈明威², 王杏²

(1. 中国矿业大学公共管理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: [目的] 针对开采活动引发的生态损失及矿区生态修复产生的生态效益难以量化的问题, 构建科学、可信的矿区生态系统价值评估体系, 为矿区生态价值提质增效及生态环境恢复治理提供科学参考。[方法] 针对现有生态服务价值评估方法对开采扰动和生态修复作用敏感性不足的问题, 提出基于“概念框架—指标选择—体系构建—应用评估与校验”逻辑思路的矿区生态系统价值评估体系, 以“物质生产—能量流动—物质循环—信息传递”4类功能价值为核心, 并在内蒙古不连沟矿区对评估体系进行应用验证。[结果] ①矿区生态系统的4大功能中, 以采矿产业驱动的能量流动功能对矿区生态系统价值有显著贡献, 2022年达到68 831.79万元/km²。②矿区水源涵养、防风固沙等构成的物质循环功能受复合扰动的影响更为显著, 物质生产功能和信息传递功能受到的影响较低。③自2019年集中性生态修复对矿区生态系统功能价值具备正向提升效果, 修复区生态价值平均增加9.80万元/km²; 采矿扰动导致的生态系统价值损失呈现波动降低。④4种生态功能价值与开采强度整体呈现U形变化趋势。[结论] 能量流动功能显著影响矿区生态系统价值总量, 而物质循环功能是矿区生态系统价值空间异质的关键影响因素, 不连沟矿区仍需强化生态修复以提升其生态系统价值。

关键词: 生态系统价值; 生态功能; 评估体系; 矿区开采与修复

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)05-0199-12

中图分类号: TD88, X171.1

文献参数: 王雪晴, 张绍良, 侯湖平, 等. 人为扰动下矿区生态系统功能价值评估体系的构建与应用验证 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 199-210. Wang Xueqing, Zhang Shaoliang, Hou Huping, et al. Construction and application verification of an assessment system for ecosystem functional values in mining areas subject to anthropogenic disturbance [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 199-210. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.034; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.034.

Construction and application verification of an assessment system for ecosystem functional values in mining areas subject to anthropogenic disturbance

Wang Xueqing¹, Zhang Shaoliang^{1,2}, Hou Huping¹, Ai Ke², Chen Mingwei², Wang Xing²

(1. School of Public Policy & Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: [Objective] To address the difficulties in quantifying the ecological losses caused by mining activities and the ecological benefits resulting from ecological restoration in mining areas, a scientific and credible assessment system for the ecosystem value of mining areas were constructed, in order to provide scientific references for enhancing the ecological value and ecological environment restoration and management in these areas. [Methods] To address the insufficient sensitivity of existing assessment methods for ecological service value to mining disturbances and ecological restoration effects, this study proposed an assessment system for the ecosystem value of mining areas based on the logical framework of ‘conceptual framework-indicator selection-system construction-application evaluation and verification’, focusing on four core functional values: ‘material production, energy flow, material cycling, and information transmission’. The assessment system was applied

收稿日期: 2025-03-31

修回日期: 2025-07-11

采用日期: 2025-07-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“生态保护修复市场化促进生态产品价值实现的机理与策略研究”(22BJY064); 内蒙古自治区科技计划项目“矿区高时空遥感生态环境监测评估与植被修复技术研究”(2022YFHH0071; HDSZ/LSDT/2024/FW/009)

第一作者: 王雪晴(1998—), 女(汉族), 江苏省徐州市人, 博士研究生, 研究方向为碳收支与生态系统评估。Email: xqw0825@cumt.edu.cn。

通信作者: 张绍良(1968—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 教授, 主要从事矿区生态修复研究。Email: slzhang@cumt.edu.cn。

and validated at Buliangou mining area, Inner Mongolia. [Results] ① Among the four major functions of the mining area ecosystem, the energy flow function, driven by mining activities, contributed significantly to ecosystem value, reaching 688.317 9 million yuan/km² in 2022. ② The material cycling function, which included water conservation, windbreak, and sand fixation, was more significantly affected by compound disturbances, while the material production and information transmission functions were less affected. ③ Since the implementation of concentrated ecological restoration in 2019, the functional value of the mining area's ecosystem had shown a positive improvement, with the ecological value in restored areas increasing by an average of 9.80×10^4 yuan/km². The ecological value loss caused by mining disturbances exhibited a fluctuating decline. ④ The values of the four ecological functions demonstrated an overall “U-shaped” trend in response to variations in mining intensity. [Conclusion] The energy flow function significantly affects the total ecosystem value, while the material cycling function is a key influencing factor of the spatial heterogeneity of the ecosystem value in the mining area. The Buliangou mining area still requires enhanced ecological restoration to improve its ecosystem value.

Keywords: ecosystem value; ecological functions; assessment system; mining and ecological restoration

矿区生态系统指在开采作业区及其周边形成的、由自然和人工要素共同构成的复合型生态系统,以开采扰动和生态修复两类突出的人类活动为特征^[1-3]。矿区开采会引起地表沉陷,地下水流失,土壤污染,植被群落退化,土地挖损与压占等,产生生态价值损失^[1]。而生态修复会消除各种生态扰动,恢复生态系统功能和结构,产生生态效益^[4]。如何准确量化矿区生态损失与修复效益,已成为矿企与生态管理部门面临的核心问题之一。

目前,估算矿区生态损失和生态效益的方法研究已积累了一定成果。已有研究从生态、经济和社会等维度构建指标体系对矿山综合效益进行评估^[5-6],或依托遥感技术定量评估矿区生态效益的演化特征^[7],利用综合评估模型分析生产活动对生态效益的扰动^[1]。这些研究多从生态服务功能角度切入,主要采用生态系统服务价值评估方法^[8]和生态产品价值评估方法^[9]。生态系统服务评估侧重生态系统可为人类提供各种有形和无形产品的集合体,而非生态系统本身因扰动或修复而发生的功能变化。此外,这类方法存在一定的局限性。如Cui等^[10]研究表明生态服务价值评估具有尺度效应。一些大尺度阈值和非线性特征的服务功能(如气候变化、气体调节等)对矿区生态系统状况的表征能力有限。如平朔矿区2020年的净化环境功能仅占总生态价值的1.69%^[11],鹤岗矿区的气体调节功能在研究期间贡献率最高仅为4.3%^[12]。神府矿区的气候调节功能不足5%^[13],难以有效指示局部开采扰动对生态系统功能的直接破坏。此外,应用广泛的生态服务价值当量法^[8]对土地利用因子高度依赖^[7],未能充分体现采矿等扰动对矿区生态功能过程的驱动机制。如张瑞等^[14]采用价值当量法发现霍东矿区2000—2020年的生态服务价值仅变化了0.33%,其中土地利用

(LULC)变化程度贡献率达到50%。与此同时,生态产品价值因其可货币化特征受到关注,自自然资源部发布《关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见》以来,其在矿区生态系统的实现机理备受关注。研究发现矿区生态产品更侧重通过市场交易或政府管理等手段实现的经济价值^[15],关注的是“生产能力”或“产品”本身,这与矿区生态修复主要恢复的是生态系统“功能”的目标存在差异。难以准确量化生态修复带来的功能性价值提升,亦无法准确反映开采导致的生态系统功能退化程度。

综上所述,现有评估方法或难以捕捉采矿活动对生态系统功能的直接扰动,或在评估修复效益方面存在局限,特别是在剥离土地利用变化与尺度效应等混杂影响方面尚显不足。这限制了其对矿区扰动—响应过程的有效反映与生态价值量化能力。为此,本文提出一种基于生态功能过程变化的矿区生态价值评估方法,旨在弥补传统方法在人为扰动响应识别与功能性价值刻画方面的不足。研究遵循“概念框架—指标选择—体系构建—应用评估与验证”的逻辑思路开展研究:①界定矿区生态系统功能价值概念;②基于开采扰动和生态修复对矿区生态系统功能(物质生产、物质循环、能量流动和信息传递)的作用机制,构建具有针对性和适用性的矿区生态系统价值评估体系;③将新体系应用到鄂尔多斯不连沟矿区,验证评估系统的有效性和合理性。

1 矿区生态系统价值与评估体系

1.1 理论基础

厘清矿区生态系统关键构成要素与核心功能,提高矿区典型人为扰动(采矿、修复等)与生态系统功能交互过程的认知,是构建矿区生态系统价值评估体系的基础。矿区生态系统是在一定空间中共同

栖居着的所有生物(生产者、消费者、分解者)以及其与非生物环境(土壤、水体、岩石、气候等)相互作用的复杂整体^[1],具备物质生产、能量流动、物质循环及信息传递4项基本生态功能^[16]。这些功能在矿区特定背景下相互作用与影响,是衡量系统稳定性与演化潜力的关键维度。①物质生产功能。主要指矿区生态系统中的植被(包括自然恢复和人工种植)通过光合作用固定CO₂,合成有机物的过程^[16]。矿区土壤条件、水分状况、植被类型以及开采强度等人类活动会显著影响该功能^[1]。例如,采矿活动会破坏原有土壤结构,降低肥力,影响物质生产的基础^[17];而生态修复通过引入适宜植物和改良土壤,则能逐步恢复甚至提升物质生产能力。物质生产不仅为生态系统内其他生物提供食物来源,也是固碳功能的基础^[2],其产出(如林木、草场产品)直接关联矿区经济价值。②能量流动功能。该功能是矿区生态系统维持运行的核心机制,起点同样为初级生产者的光合作用。其路径包括能量在生物体(如植食性动物、分解者)间的转移,及在扰动背景下的人为输入输出(如资源开采、废弃物处理等)^[11]。开采扰动往往改变系统的能量平衡格局,而修复过程则通过植被恢复^[4]、能流重构提高能量利用效率^[18],进而支撑物质与信息过程的持续运行。③物质循环功能。该功能涉及碳、氮、磷等元素在生物-非生物之间的迁移和转化,是反映矿区生态系统调控能力与恢复能力的重要维度。在矿区,水体污染、土壤重金属积累、植被凋落物流失等使物质循环显著异化。其中,水循环(包括降水、地表径流、地下水补给等)直接影响水源涵养能力。碳循环则受采矿碳排放与植物碳汇双向调控^[19],化石燃料燃烧是矿区碳循环的主要驱动力^[16]。矿区扰动显著改变地表形态和土壤结构,强化了沉积循环过程中的风蚀与水蚀作用^[17],推动物质在空间上的重新分布与积累物质循环实质上反映了矿区生态系统的物质稳定性,是评估其退化与修复成效的重要指标。④信息传递功能。该功能体现为生态系统中生物-环境间通过感知、响应、适应等机制进行的信息交换。在矿区,信息传递不仅表现为物理或化学信号(如地貌^[2]、水体格局^[20]、植被景观等^[3]),也包括生态修复、景观营造所传递的社会-文化意涵^[6]。例如,矿山公园或生态景观工程通过提升感知体验与环境认知,推动人地关系重构,是文化服务的重要实现路径^[6,16]。信息流动不仅为物质与能量过程提供调控机制,也促进了生态系统与人类社会之间的持续互动。

矿区生态系统的物质生产、能量流动、物质循环

及信息传递4大功能相互交织,共同维系系统稳定。物质生产为能量流动提供载体,物质循环为能量流动提供物质基础,而信息传递则可能影响人类对物质生产和物质循环过程的管理决策。鉴于生态系统评估的本质目标是为管理决策提供科学依据,因此充分认识扰动对矿区生态系统服务功能的影响至关重要^[3,21]。矿区生态系统受到采矿、修复等人为扰动后,其关键生态组分(如土壤、植被)发生变化,进而打破这些功能的平衡^[12]。在人为活动为主导的复合扰动下,矿区生态系统的生物与非生物组分的耦合关系重构^[17](图1),对功能系统造成动态影响^[11]。理解扰动作用机制与功能响应路径,是实现价值科学量化的核心前提。基于此,本研究将矿区生态系统功能价值的概念描述为采矿、修复等复合扰动下,引起的矿区生态系统功能(物质生产、能量流动、物质循环、信息传递)变化而涉及的可货币化及存在潜在货币化的各种服务及惠益的价值化形式。该界定汲取生态系统服务、生态系统功能、生态产品等核心概念^[11]。但强调以功能变化驱动的价值效应为核心逻辑,既涵盖直接服务于人类需求的物质产出^[15](如资源产能),也囊括对系统健康起基础性支撑但未被市场直接定价的功能(如固碳、水源涵养等)^[6,11]。此定义强调扰动情境下系统运行机制的动态响应,强化功能与价值的理论关联。

1.2 评估体系的构建

基于对矿区生态系统4大功能及其构成要素的理解,研究构建了具有针对性的矿区生态系统功能价值评估体系。该体系选取代表性指标进行“物质量-价值量”评估。前者反映功能强度与响应能力^[22],后者则通过价值转化体现其生态经济意义^[7]。体系构建以客观性、公正性和可操作性为原则,在参考有关指标体系构建研究成果^[9,23-24]的基础上,采用德尔菲法和专家打分法^[25],最终确定了10个关键指标(表1)。所选指标具备以下特征:①功能关联性强,能有效反映典型生态过程的动态变化;②数据获取相对可行,便于后续区域尺度推广;③代表性突出,即便非穷尽性覆盖,也能反映矿区生态系统运行的核心特征。

各项指标与4大功能的对应关系及解释:①物质生产功能。研究选取了“农林牧渔产出”和“物种多样性”作为核心评估指标。农林牧渔等产出体现生态系统初级/次级生产水平,是矿区生态系统维持生命活动的基础^[9]。同时,其物质供给变化也能够综合反映土壤肥力、水分等要素的改善或恶化趋势^[1]。后者与生态系统初级生产力密切相关^[2],为维持生态系统结构稳定与服务功能持续供给的生物基础,是

衡量生产潜力与系统恢复力的重要生态属性指标。

②能量流动功能。选取“矿产产量”和“废弃物处理量”两项指标。前者代表矿区人为输入的能量驱动,作为采矿扰动下的系统能流主导变量^[26];后者反映能量流动末端的再利用和处置过程,体现系统的能量管理效率与恢复能力^[18]。相比自然生态系统基于食物网传递能量,矿区生态系统主要通过资源的开采、生产、运输、废弃物(废渣、废气等)处理、再生等产业链传递能量^[16]为典型特征。

③物质循环功能。覆盖“保水量”“CO₂汇集量”“固沙量”与“土壤保持量”。保水量揭示水资源调蓄与利用能力,水源涵养对调节区域水循环和地表水文过程具有重要作

用^[17,27];CO₂汇集量衡量矿区碳固定功能^[2]。相比于自然生态系统的碳循环,矿区生态系统存在大量由于燃料燃烧输出的CO₂,同时植被、土壤等修复对矿区碳固定功能具有显著影响^[28];土壤保持量与固沙量分别体现水蚀与风蚀控制^[11],进而表征矿区沉积扰动下土壤稳定能力与抵御风力侵蚀退化的潜力^[17]。

④信息传递功能。选取“地质/矿山公园数量”与“矿区景观”两项指标。前者是基于人与人的信息交互进而高效配置矿区环境资源,是生态系统文化服务价值的重要载体^[6]。后者是从自然景观到受益者的信息传递,对提升区域生态感知与公众认同具有直接意义。

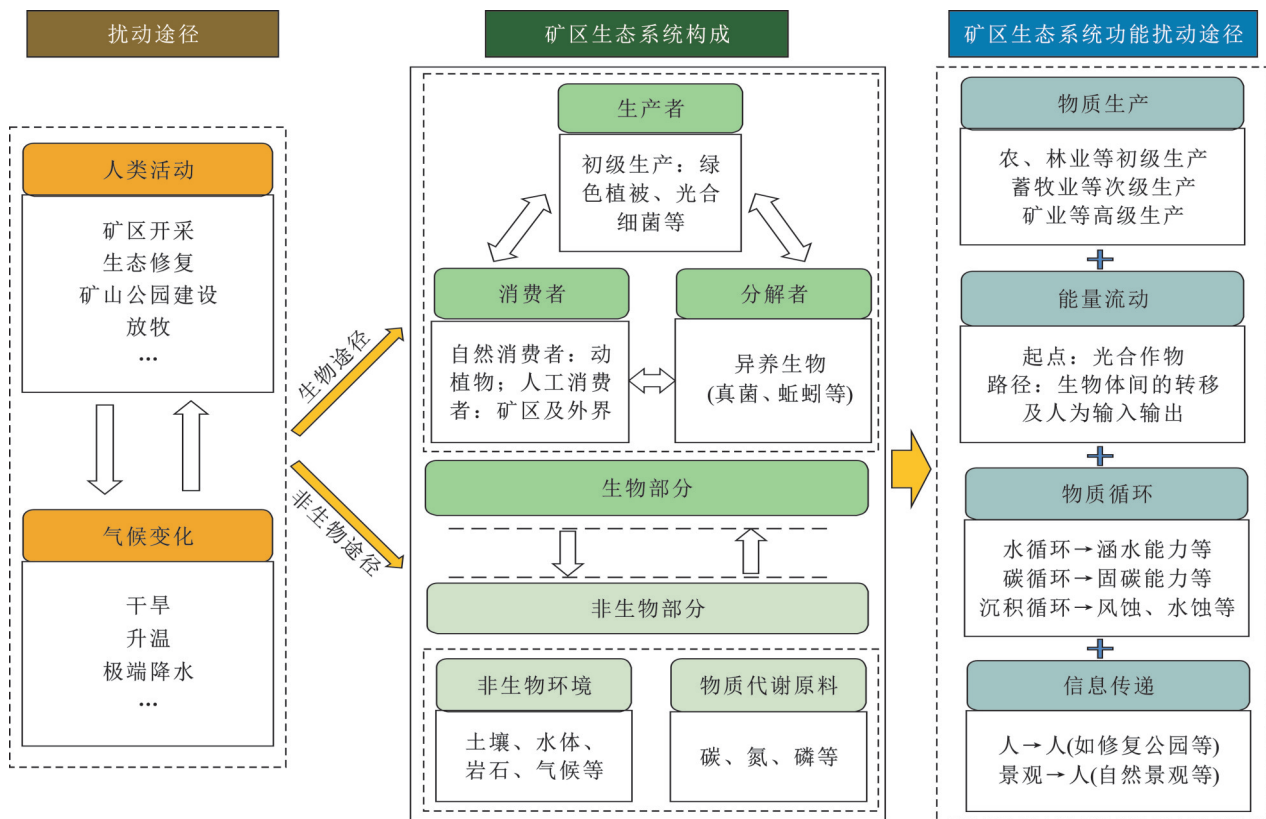


图1 复合扰动下矿区生态系统扰动—构成—功能响应概念框架

Fig.1 Conceptual framework of disturbance-composition-function response of ecosystems in mining areas under compound disturbances

1.3 核算体系

评估指标对应的核算方法是价值评估的关键。矿区生态系统价值作为典型的综合评估体系,离不开多维度、复合型的核算方法支撑。当前,学者对矿区生态系统价值评估方法主要分为价值量评估和物质量评估^[22]。物质量评估主要基于生态过程或服务产出的实物量(如防风固沙量等);而价值量评估则通过市场价值、替代成本、影子价格等方法将生态产品和服务货币化表达^[24,27]。基于各自的优势与不足,物质量与价值量的融合测算研究案例逐渐增

多^[9]。本研究依据所构建的矿区生态系统价值评估体系,综合参考《生态系统评估:生态系统服务评估方法(GB/T 43678—2024)》^[23]、生态产品价值核算等^[5]研究成果与规范性文件(表2),采用“物质量-价值量”双层核算体系。其中,由于矿区能量流动过程中产生的生态负外部性(如生态破坏等)。参考已有研究,本文选取扣除产能价值和废弃物处理价值的4%作为生态成本^[29],剩余价值作为矿区生态系统中的能量流动功能的正向价值。

在指标权重确定方面研究采用AHP-CRITIC组

合赋权法^[25]。其中,AHP通过专家打分构造判断矩阵并检验一致性,确保主观权重科学可靠;同时引入CRITIC法从数据变异性与相关性出发提取客观权重,融合两者可兼顾经验判断与数据驱动,提升指标

赋权的合理性与适用性。

最后,通过分项汇总获取矿区生态系统价值,最大限度降低因核算方法的差异导致的评估结果准确性与真实性的下降。

表 1 矿区生态系统价值评估体系

Table 1 Assessment system of ecosystem value at mining areas

生态功能	物质质量	价值量/(万元·km ⁻²)	指标表征说明	指标符号
物质生产	物种多样性/个	物种多样性价值	物质生产功能阈值	I-SD
	农林牧渔等产出量/t	物质供给价值	物质产出能力	I-BS
物质循环	CO ₂ 汇集量/t	固碳价值	碳固定与调节能力	II-CS
	保水量/m ³	水源涵养价值	水资源调蓄能力	II-WC
	固沙量/t	防风固沙价值	风蚀影响下地表稳定性	II-WS
	土壤保持量/t	土壤保持价值	水蚀控制与土壤保持潜力	II-SC
能量流动	废弃物处理量/t	废弃物处理价值	末端能量再利用水平	III-WD
	矿产产量/t	产能价值	矿区生态系统的外部附加能量	III-CC
信息传递	地质/矿山公园/个	地质/产业文化价值	人与人之间信息传递	IV-GI
	矿区景观/处	景观美学文化价值	人与自然之间信息传递	IV-LA

其计算公式如下:

$$D(\alpha_i, \beta_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \beta_i)^2} \quad (1)$$

$$D(\alpha, \beta)^2 = (a - b)^2 \quad (2)$$

$$a + b = 1 \quad (3)$$

$$\omega_i = a \cdot \alpha_i + b \cdot \beta_i \quad (4)$$

$$V = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot v_i \quad (5)$$

式中: n 为指标个数; α_i 为第*i*个指标的主观权重(AHP获取); β_i 为第*i*个因子的客观权重(CRITIC获取); a, b 分别为主客观偏好系数; ω_i 为组合权重结果。经计算得到主观偏好程度系数 $a=0.54$,客观偏好程度系数 $b=0.46$ 。将各数值代入上述公式得到各指标综合权重值(表2)。V为矿区生态系统总价值(万元/km²); v_i 为第*i*个指标的价值量(万元/km²)。

表 2 矿区生态系统物质质量及价值量核算方法

Table 2 Methods for accounting material quantity and value of ecosystems at mining areas

生态功能	指标	物质质量核算方法	价值量核算方法	AHP权重	CRITIC权重	综合权重
物质生产	I-SD	统计调查	市场价值法 ^[24]	0.14	0.12	0.13
	I-BS	统计调查	市场价值法 ^[30]	0.12	0.11	0.11
物质循环	II-CS	固碳机理模型 ^[28]	市场价值法 ^[24]	0.16	0.13	0.14
	II-WC	水量平衡法 ^[28]	影子工程法 ^[30]	0.14	0.12	0.13
	II-WS	修正风力侵蚀模型 ^[31]	替代成本法 ^[24]	0.12	0.10	0.11
	II-SC	水土流失方程 ^[28]	替代成本法 ^[24]	0.14	0.11	0.12
能量流动	III-WD	统计调查	市场价值法 ^[24]	0.04	0.07	0.05
	III-CC	统计调查	市场价值法 ^[24]	0.02	0.05	0.03
信息传递	IV-GI	统计调查	旅行费用法 ^[32]	0.09	0.10	0.09
	IV-LA	统计调查	条件价值法 ^[19]	0.10	0.09	0.10

2 矿区生态系统价值核算案例

2.1 研究区概况

不连沟矿区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格

尔旗,总面积约 33 km²,地形纵横起伏,以黄土丘陵和沟谷为主要地貌单元。矿区属中温带大陆性干旱气候,地带性土壤以栗钙土和黄绵土为主,植被覆盖度较为稀疏,主要为暖温型草原植被。矿井于 2007 年

开工建设,2010年投产运营,开采方式为井工开采。煤炭储量 1.15×10^9 t,煤矿建设规模为 1.00×10^7 t/a。截至2022年,矿区内所涉及开采工作面如图2所示,根据开采年份及开采顺序对其进行编号(10-1—22-6)。除南部多为2020年后后期开采外,中北部绝大部

分距今大于2.5 a,属于为稳沉区。目前,不连沟矿区因煤炭开采导致的地质灾害主要有地面塌陷、地裂缝等,主要位于研究区北部。矿区自2019年逐步开展集中修复,截至2022年共开展3个修复区,分别位于井田的西部与东部,总治理面积约 321.66 hm^2 。

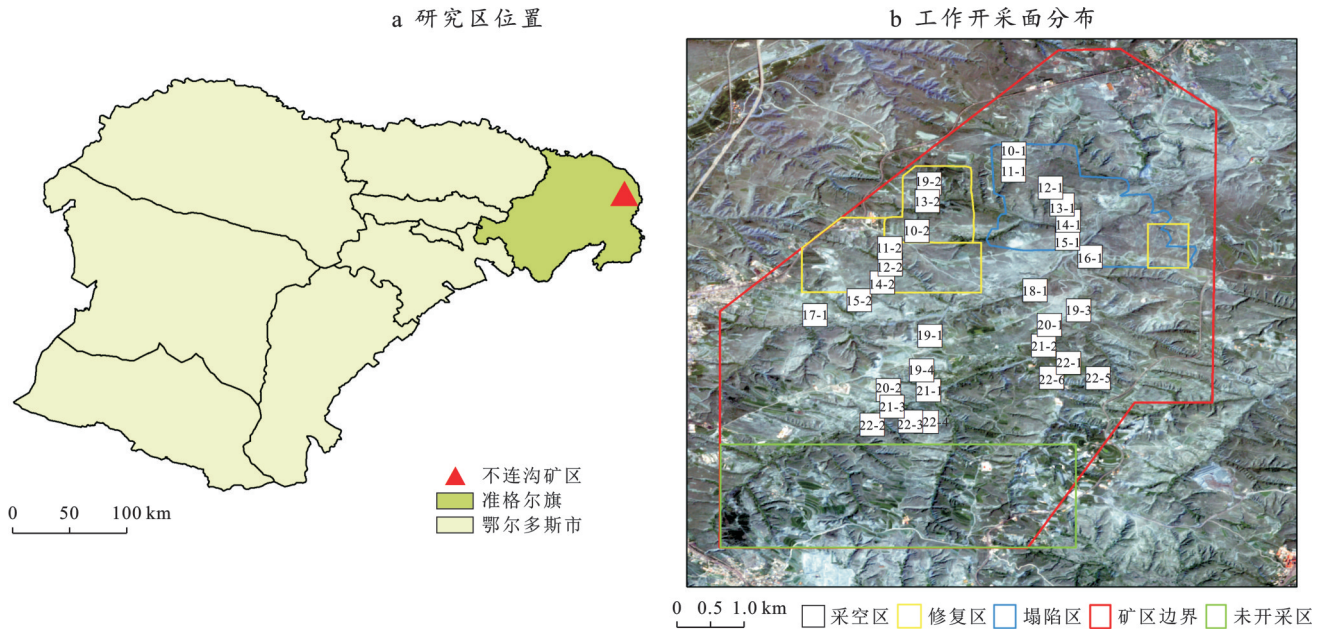


图2 不连沟矿区概况和工作开采面分布

Fig.2 Overview of Buliangou mining area and distribution of working mining faces

2.2 数据来源

数据信息的准确性和丰富程度直接影响着生态系统评估结论的可靠性。本文所用的数据主要包括气象数据(气温、降水、风速、太阳辐射、蒸散发等, <https://data.cma.cn/>)、高程数据(ASTER GDEM V2数据, <http://www.gscloud.cn/>)、土壤数据(1:100万土壤数据库, <https://www.gscloud.cn/>)、植被指数数据(2007—2022年的MOD13A2和MOD17A3产品, <https://www.gscloud.cn/>)、2007—2022年土地利用数据(<https://zenodo.org/record/8176941>)、地面调查数据(课题组多年野外样点采样数据)和社会经济数据(2007—2023年《内蒙古自治区统计年鉴》、政府工作报告、中国物价年鉴等)等,统一为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率,主要用于矿区生态系统的物质量和和价值量相关参数计算与模型模拟。本文应用ArcGIS软件进行类型赋值和空间插值等方法将统计数据由表格形式转化为矢量数据,进而统一转化为TIFF格式的栅格数据,最终实现空间分析。

2.3 核算结果

2.3.1 矿区生态系统价值核算

基于矿区生态系统评估体系核算结果可知(表3),持续增长的产能价值驱动研究区生态系统价值

不断提升,然而内部不同功能的生态价值呈现差异性演化特征。物质生产功能和信息传递功能价值基本保持稳定。物质循环、能量流动等功能价值在2010年正式投产开采后出现加大波动。2010年水源涵养价值大幅下降至 $69.07 \text{ 万元}/\text{km}^2$,2011年进一步降至 $31.12 \text{ 万元}/\text{km}^2$ 。这可能是初期集中开采扰动导致土壤结构破坏,削弱土壤与植被调蓄功能,致使生态系统的水源调节功能减弱。2011—2018年的防风固沙价值呈缓慢下降趋势,最低达到 $15.75 \text{ 万元}/\text{km}^2$ 。但自2019年生态修复工作开始后,上述指标均呈现出恢复上升的趋势。其中水源涵养价值的提升尤为显著,表明通过植被恢复和水土保持等措施,有效改善了地表状况和涵水能力^[17]。产能价值自开采后显著增长,2022年达到 $68831.79 \text{ 万元}/\text{km}^2$ 。废弃物处理价值自2010年的 $79.04 \text{ 万元}/\text{km}^2$ 增加至2018年的 $203.24 \text{ 万元}/\text{km}^2$,并在后续年度保持这一水平。由于不连沟矿区内暂未建设矿山公园等,因此信息传递功能中并未核算产业文化价值。

受能量流动功能价值的影响,研究区生态系统价值虽持续增加,但采矿、生态修复等复合扰动导致不同阶段研究区的生态系统价值时空分布呈现显著异质性(图3)。伴随2010年的投产开采,开采区从研

究区北部的10-1,10-2开采工作面逐渐向南部拓展。2007—2010年研究区生态系统价值高值与低值规律相对一致,表明采矿初期对生态环境影响相对较低。伴随采矿活动自北向南的推进,2013年不连沟矿北部生态系统价值低值区域显著扩大。2016—2019年

北部生态系统高值区域比例逐渐回升。2022年南部新开采区域(21-1,21-2,22-3,22-4)的生态系统价值相对较低,而北部区域可能由于开采较早进入稳定阶段,以及有效的生态修复导致其生态系统价值相对较高。

表3 不连沟矿2007—2022年生态系统价值统计

Table 3 Statistics of ecosystem value of Buliangou mining area from 2007 to 2022

单位:万元/km²

年份	物质生产		物质循环				能量流动		信息传递		合计
	I-SD	I-BS	II-CS	II-WC	II-WS	II-SC	III-WD	III-CC	IV-LA	IV-GI	
2007	6.36	4.36	0.12	61.32	19.08	0.22	—	—	2.80	—	94.26
2008	6.35	4.31	0.12	59.30	19.05	0.24	—	—	2.79	—	92.16
2009	6.82	4.50	0.12	80.04	18.91	0.19	—	—	3.00	—	113.58
2010	7.32	4.31	0.11	69.07	18.24	0.19	79.04	15 723.52	3.22	—	15 905.02
2011	7.11	4.09	0.12	31.12	17.57	0.16	112.91	24 660.21	3.13	—	24 836.42
2012	7.67	4.39	0.12	47.95	16.59	0.28	135.50	25 545.45	3.38	—	25 761.33
2013	7.86	4.47	0.15	21.05	16.02	0.26	146.79	23 016.19	3.47	—	23 216.26
2014	7.63	4.28	0.13	47.36	15.75	0.20	158.08	21 835.88	3.37	—	22 072.68
2015	7.08	3.87	0.13	54.91	15.88	0.16	169.37	18 698.40	3.12	—	18 952.92
2016	7.59	4.10	0.14	45.91	15.99	0.27	180.66	22 594.65	3.35	—	22 852.66
2017	6.92	3.74	0.14	31.52	15.74	0.22	191.95	32 503.90	3.06	—	32 757.19
2018	7.45	4.15	0.15	32.43	16.04	0.25	203.24	35 174.67	3.29	—	35 441.67
2019	8.14	4.71	0.15	40.15	16.91	0.19	203.24	31 868.58	3.61	—	32 145.68
2020	9.32	5.48	0.16	100.12	19.25	0.24	203.24	30 784.61	4.11	—	31 126.53
2021	9.81	5.82	0.15	136.58	19.94	0.11	203.24	55 824.20	4.32	—	56 204.17
2022	11.03	6.49	0.15	156.66	20.86	0.36	203.24	68 831.79	4.85	—	69 235.43

2.3.2 采矿与修复扰动对矿区生态系统价值的影响

为进一步分析采矿和生态修复等扰动对矿区生态系统价值的影响,研究选取南部未开采区作为对照区,与采矿区域、修复区域开展生态系统价值差值对比(图4)。不连沟矿区井田面积仅33 km²,因此研究区的气候、植被、土壤等自然本底条件相对一致,暂不考虑自然因素对生态系统价值的影响。研究发现自2010年开采以来,采空区生态系统价值减量呈现先增后降的趋势,2022年采空区价值减量相比于2018年降低了68.75%,反映出开采活动对矿区生态系统功能的损害逐渐降低。2019年,生态修复示范区启动修复工作,修复区的生态系统价值增量持续增加,由2019年的9.77万元/km²增加到2022年的11.84万元/km²,表明生态修复措施对提升区域生态系统价值具有积极作用,也印证了生态修复工作的有效性和必要性。

在此基础上,对单位煤产量的不同生态系统功能价值变化量进行统计(图5),并进行了开发强度与生态系统功能价值的耦合协调度分析(D)^[26](图6),以深入分析采矿扰动对矿区不同生态功能价值的影

响。研究选取未开采时期(2007,2008和2009年)的4种功能价值年均值为基准值,计算2010—2022年实际对应生态功能价值与基准值的差值,进而核算单位煤产量的生态系统价值变化量(图5)。研究发现采矿扰动对物质生产和信息传递功能的影响较低,2010—2018年单位煤产量的物质循环功能价值损失量呈现先增后波动降低,2019—2022年变化量为正值且逐渐回升。此阶段可能由于技术创新、生态修复等影响,采煤扰动对物质循环功能的负向影响逐渐降低。研究期间单位煤产量的能量流动功能价值先降后增,表明采矿活动对矿区生态系统能量流动功能的正向驱动效果提升。

由图6可知,研究区4种生态功能价值、综合生态系统价值与开采强度整体呈现U形变化趋势。2010—2017年生态环境治理效果与力度未能跟上重工业的快速发展,导致前期矿区生态系统价值和矿区开采濒临失调,其中物质循环功能与矿区开采间的矛盾最为突出。2018—2022年伴随生态保护意识的提升以及生态修复措施,矿区生态系统功能与开采活动的耦合协调度得到有效提升。

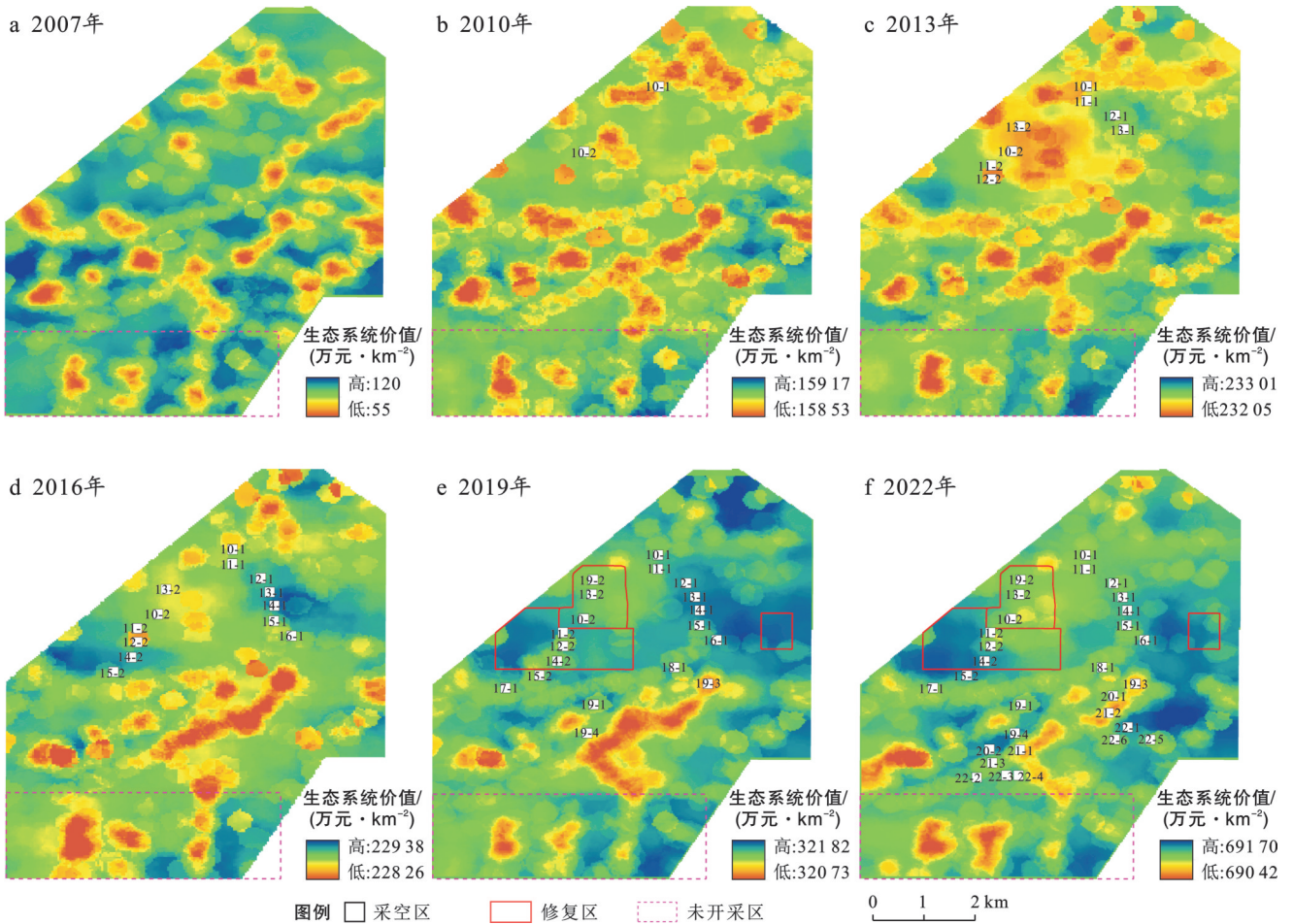


图 3 不连沟矿区生态系统价值总量时空分布

Fig.3 Spatiotemporal distribution of total ecosystem value at Buliangou mining area

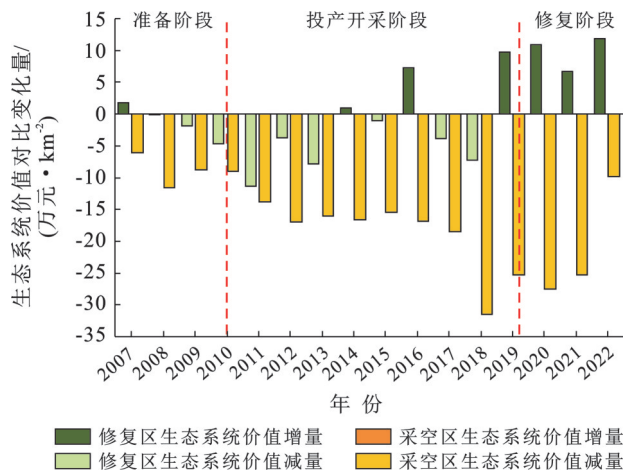


图 4 不连沟矿区生态修复区、采空区与对照区的生态系统价值对比

Fig. 4 Comparison of ecosystem values of ecological restoration zones, goaf zones and control zones at Buliangou mining area

3 讨论

3.1 研究特色与对比分析

本研究基于“功能响应—价值转化”逻辑,构建

了具有适应性与空间敏感性的矿区生态系统价值评估体系,系统考虑矿区开采与生态修复等复合扰动对生态系统功能的影响路径。①在指标选取方面,本文从物质生产、能量流动、物质循环和信息传递4类核心功能出发,筛选出10个功能关联性强、数据获取性好、代表性突出的评估指标。已有研究表明,人类活动对生态系统过程与功能的影响在不同尺度上存在差异^[7,27]。国家或区域尺度的宏观决策对气候调节等功能影响显著,而在中小尺度矿区,局地扰动对气候调节能力的影响相对有限^[11]。因此,本研究构建的评估降低了对宏观指标的依赖,强化了矿区尺度扰动响应的表达精度,相比传统生态服务价值评估体系更具针对性和适配性。②研究引入了产能价值和废弃物处理价值,体现出矿区能量流动功能的产业特征与现实意义。尽管产能价值和废弃物处理价值虽相对较高,但作为矿区生态系统和能量流动的重要组成部分^[23],其存在具有生态合理性。矿产开采是矿区生态经济系统的核心驱动力^[9],而废弃物处理则在维持生态稳定、降低环境负面影响方面发挥关键作用^[18]。值得注意的是,这两个指

标主要表现为面板统计数据,而其他生态功能价值(如固碳、水源涵养、土壤保持等)具有显著的空间分布特征^[24]。这种数据维度上的互补,增强了评估体系的稳健性与兼容性,避免了单一数据结构所带来的偏倚风险,从而使评估结果更具全面性与科学性。

③实证结果验证了体系的适用性与可靠性。

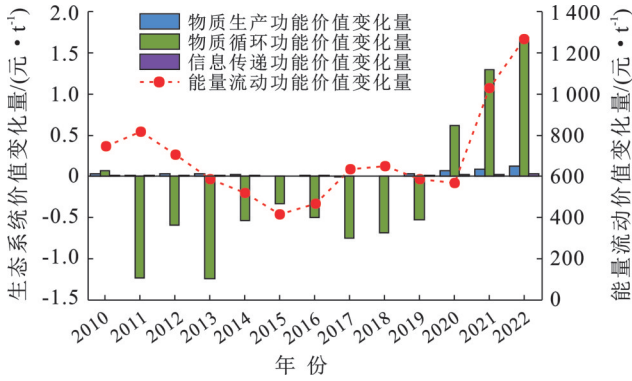


图 5 不连沟矿区单位煤产量的各功能生态系统价值变化量统计

Fig.5 Statistics of ecosystem service value variations of different functions under per unit of coal production at Buliangou mining area

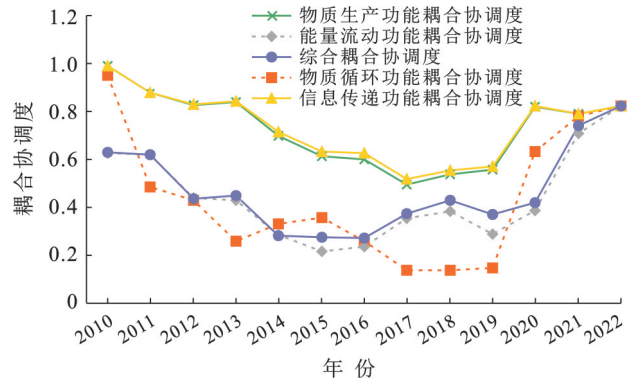


图 6 不连沟矿区开采强度与各功能生态系统价值耦合协调度统计

Fig.6 Statistics of coupling coordination degree between mining intensity and ecosystem service values of different functions at Buliangou mining area

本研究以内蒙古不连沟矿区为案例区,对矿区生态系统价值评估体系展开应用并与已有研究成果对比分析,显示体系具备良好的适应性及对扰动的敏感性:①物质质量维度上,本研究中土壤保持年均物质量为 91 758 t/km²,与 Tang Zhixiong 等^[33]核算结果(105 010 t/km²)数值相近。固碳物质量(11.48 t/km²)相比 Liang Jia 等^[34]核算的西北石羊河流域同期固碳功能略低(27.37 t/km²),数值差异处于合理范围。②价值量维度上,研究核算的水源涵养年均值(100.41 万元/km²)对比王宁等^[20]核算的内蒙古自

治区年均水源涵养价值量(77.44 万元/km²)数值略高但相近。生物多样性(9.32 万元/km²)、生物质供给(5.48 万元/km²)以及美学景观(4.11 万元/km²)与孙康康等^[35]核算的同期对应指标结果(10.64, 12.67, 4.76 万元/km²)相近。③时空分布特征方面(图 7),评估结果反映出采空区生态系统功能不同程度受损,相比之下,人为扰动程度较低的未开采区生态系统高价值区域比例相对较高。不连沟矿区的生态修复示范区于 2019 年正式建设,生态价值相比周围区域相对较高。矿区生态系统价值时空分布特征与复合扰动特征的一致性也表明评估体系的合理性与可靠性。

研究结果与已有研究存在一定差异,主要源于研究尺度、评价指标选取、权重设置与核算方法的不同等。例如,本文将产能价值纳入指标体系,而未考虑气体调节、环境净化等指标。此外,不同研究区域的自然环境条件和管理措施亦可能对评估结果造成影响^[2]。尽管研究采用了 AHP-CRITIC 组合赋权法^[25]以提升权重设置的科学性与可解释性,但与其他研究相比,权重结构仍存在一定客观差异。

3.2 不足与展望

矿区生态系统及其评价是高度复杂的问题,其评估框架与指标体系难以在所有区域保持一致适用。由于不同区域的矿区其矿产资源类型和自然环境条件的差异,扰动涉及的生态功能及价值构成也不尽相同^[11]。因此,必要构建一个基于生态功能视角,对具备通用性与可扩展的标准化核算体系^[9],以支持多区域、多类型矿区的生态系统价值评估。

在当前体系构建基础上,仍存在局限需进一步完善。尽管研究已通过土壤保持、保水能力等指标在一定程度上反映了地质扰动效应^[17],但未单独设定地质灾害类指标。未来可结合遥感监测、地质调查等手段,补充扰动强度或地质风险因子,以增强评估体系对生态安全风险的识别与响应能力。其次,社会经济类数据在空间分辨率和可获取性方面受限,制约了小尺度下生物多样性及农林牧渔等生态产品价值的精细化评估^[24],后续研究可融合多源数据、大数据技术与高分遥感,以提升评估的空间精度与时效性。

虽然本体系在鄂尔多斯不连沟矿区得到了有效应用,但在不同地理环境与资源类型矿区的适应性尚未充分检验。未来可开展跨区域比较研究,以优化指标权重体系、评估核算机制与区域修正参数,提升体系的普适性与鲁棒性。

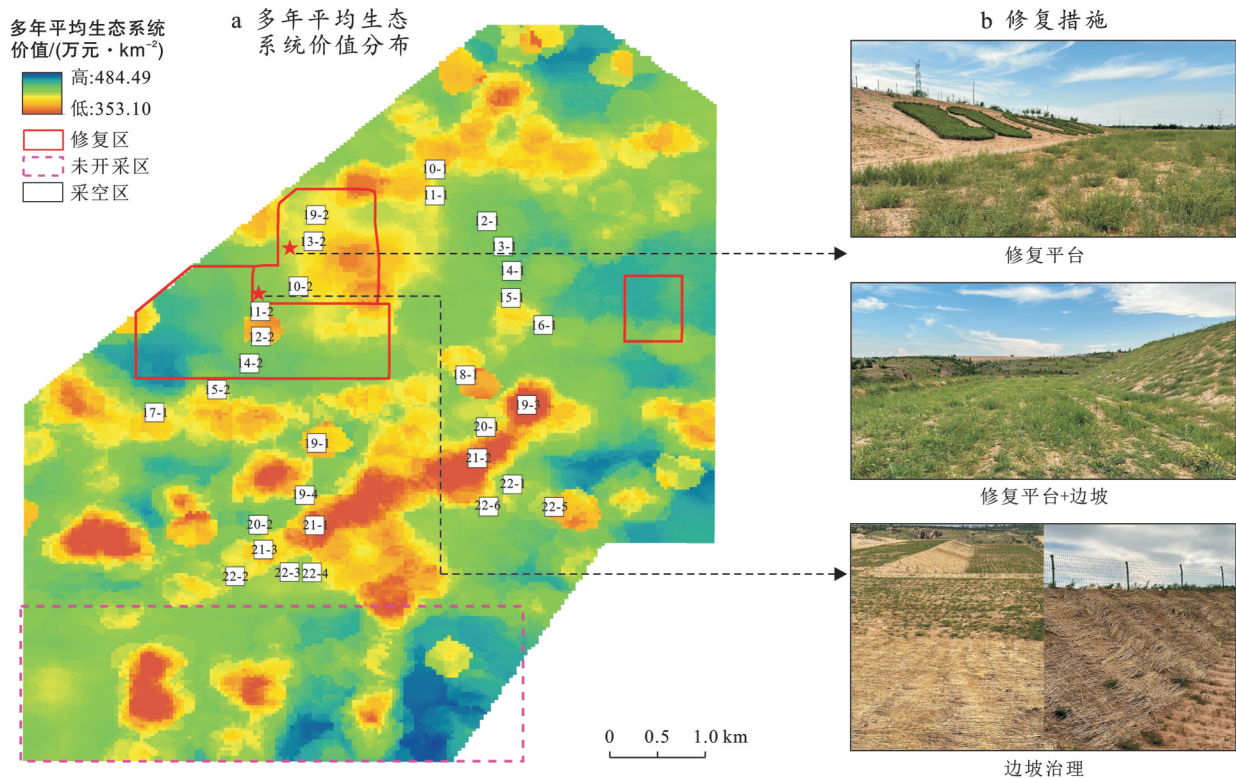


图 7 不连沟矿区生态系统价值多年平均值时空分布

Fig.7 Long-term average ecosystem value distribution at Buliang mining area

4 结论

(1) 研究将“矿区生态系统价值”定义为复合扰动下生态功能变化所引致的可货币化或具潜在货币化属性的服务总量,突出其基于生态功能过程的客观性与可量化特征,强调了人为扰动与生态系统功能之间的动态耦合关系,为价值量化提供了科学依据。

(2) 根据其概念及其内涵,基于生物生产、物质循环、能量流动和信息传递功能视角,研究构建了矿区生态系统价值评估指标体系,采用 AHP-CRITIC 组合赋权法与“物质量-价值量”双层核算框架,确保指标权重分配的科学性及其评估结果的可比性。

(3) 案例应用结果表明,采矿活动显著干扰水源涵养、土壤保持等功能价值,但自 2019 年实施生态修复以来,上述指标整体呈恢复性上升趋势,尤其水源涵养功能提升明显,验证了评估体系在扰动响应识别上的敏感性与有效性。

(4) 进一步对比物质量与价值量核算结果与已有研究成果基本一致,同时矿区生态系统价值与人为扰动强度在时序与空间格局上高度匹配,表明本评估体系具备良好的精度、科学性与实践可行性,为矿区生态补偿、修复评估与资源开发决策提供量化支持。

参考文献 (References)

- [1] Bi Yinli, Liu Tao, Pei Yanru, et al. Landscape analysis and assessment of ecosystem stability based on land use and multitemporal remote sensing: A case study of the Zhungeer open-pit coal mining area [J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(7):1162.
- [2] Wang Xueqing, Zhang Shaoliang, Ding Zhongyi, et al. Driving mechanisms and evolutionary characteristics of carbon sink disturbance risk in urban ecosystem: A case study of Ordos [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2025, 84(8):213.
- [3] 周甲男, 马苏, 郑颖娟, 等. 基于生态产品价值视角的矿区植被恢复成效评估: 以神东矿区为例 [J]. *环境科学研究*, 2023, 36(9):1728-1736.
Zhou Jianan, Ma Su, Zheng Yingjuan, et al. Evaluation of vegetation restoration effect in mining area from the perspective of ecosystem product value: A case study of Shendong mining area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(9):1728-1736.
- [4] Chen Yixin, Yu Xiaoyu, Xu Dongmei, et al. A spatial machine learning approach to exploring the impacts of coal mining and ecological restoration on regional ecosystem health [J]. *Environmental Research*, 2025, 264: 120379.
- [5] Gao Feifei, Zhou Jinsheng, Jiang Hongdian, et al. Assessing the true value of ecological restoration in

- mining areas: An input-output approach based on ecosystem service valuation [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166:112591.
- [6] Zhang Yuxin, Fu Bin, Sun Juying, et al. Quantifying supply and demand of cultural ecosystem services from a dynamic perspective [J]. *Land Use Policy*, 2025, 148: 107414.
- [7] 解铭威,周慧荻,陈耸,等.银川市生态系统服务价值评估及多情景模拟[J].*水土保持研究*,2025,32(1):294-304.
- Xie Mingwei, Zhou Huidi, Chen Song, et al. Valuation of ecosystem service value and multi-scenario simulation in Yinchuan City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025,32(1):294-304.
- [8] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].*自然资源学报*,2015,30(8):1243-1254.
- Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015,30(8):1243-1254.
- [9] 白杨,李晖,王晓媛,等.云南省生态资产与生态系统生产总值核算体系研究[J].*自然资源学报*,2017,32(7):1100-1112.
- Bai Yang, Li Hui, Wang Xiaoyuan, et al. Evaluating natural resource assets and gross ecosystem products using ecological accounting system: A case study in Yunnan Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017,32(7):1100-1112.
- [10] Cui Fengqi, Tang Haiping, Zhang Qin, et al. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: A case study in Hulunbuir, China [J]. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984.
- [11] 孟宪文.平朔矿区生态系统服务的权衡与协同关系[J].*山西师范大学学报(自然科学版)*,2024,38(1):70-75.
- Meng Xianwen. Analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in the Pingshuo mining area [J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2024,38(1):70-75.
- [12] 龙精华,张卫,付艳华,等.鹤岗矿区生态系统服务价值[J].*生态学报*,2021,41(5):1728-1737.
- Long Jinghua, Zhang Wei, Fu Yanhua, et al. The value of ecosystem services in Hegang coal mining area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(5):1728-1737.
- [13] 肖武,张文凯,吕雪娇,等.西部生态脆弱区矿山不同开采强度下生态系统服务时空变化:以神府矿区为例[J].*自然资源学报*,2020,35(1):68-81.
- Xiao Wu, Zhang Wenkai, Lyu Xuejiao, et al. Spatiotemporal patterns of ecological capital under different mining intensities in an ecologically fragile mining area in western China: A case study of Shenfu mining area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(1):68-81.
- [14] 张瑞,李晶,邵嘉豪,等.霍东矿区生态服务价值时空特征与成因分析[J].*山西大学学报(自然科学版)*,2024,47(1):214-226.
- Zhang Rui, Li Jing, Shao Jiahao, et al. Spatiotemporal characteristics of ecosystem service value and causes in Huodong mining area [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2024,47(1):214-226.
- [15] 谭丽萍,张凤仪.矿区生态产品价值实现典型模式与运行机理[J].*上海国土资源*,2024,45(2):16-20.
- Tan Liping, Zhang Fengyi. The typical models and operating mechanisms for realizing the ecological products value in mining areas [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2024,45(2):16-20.
- [16] 郝成元,马守臣,聂小军,等.矿区生态系统康复与生态文明建设[M].北京:科学出版社,2017.
- Hao Chengyuan, Ma Shouchen, Nie Xiaojun, et al. *Ecological Restoration of Mine Area Ecosystems and Construction of Ecological Civilization* [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [17] 王义,张俊娥,程洋,等.煤矿区植被-水-土响应关系研究进展分析[J].*干旱区资源与环境*,2023,37(11):82-91.
- Wang Yi, Zhang June, Cheng Yang, et al. Progress in research of vegetation-water-soil response relationship in coal mine area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023,37(11):82-91.
- [18] 奚弦,桑树勋,刘世奇.煤矿区固废矿化固定封存CO₂与减污降碳协同处置利用的研究进展[J].*煤炭学报*,2024,49(8):3619-3634.
- Xi Xian, Sang Shuxun, Liu Shiqi. Progress in research of CO₂ fixation and sequestration by coal mine solid waste mineralization and co-disposal of pollution and carbon reduction [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024,49(8):3619-3634.
- [19] 沈彦,杜林峰,张玉琴.基于生态价值的大水坑东信采矿废弃地修复效果评估[J].*亚热带水土保持*,2021,33(2):1-8.
- Shen Yan, Du Linfeng, Zhang Yuqin. Evaluation on the repair effect of Dongxin mining wasteland based on the ecological values at dashuikeng of Shenzhen City [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2021,33(2):1-8.
- [20] 王宁,杨光,韩雪莹,等.内蒙古1990—2018年土地利用变化及生态系统服务价值[J].*水土保持学报*,2020,34(5):244-250.
- Wang Ning, Yang Guang, Han Xueying, et al. Land use change and ecosystem service value in Inner Mongo-

- lia from 1990 to 2018 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5):244-250.
- [21] Xu Hailiang, Xu Fujun, Lin Tao, et al. A systematic review and comprehensive analysis on ecological restoration of mining areas in the arid region of China: Challenge, capability and reconsideration [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154:110630.
- [22] 陈东军, 钟林生. 生态系统服务价值评估与实现机制研究综述[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(1):84-94.
Chen Dongjun, Zhong Linsheng. Review of the value evaluation and realization mechanism of ecosystem services [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(1):84-94.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生态系统评估: 陆地生态资产核算技术指南: GB/T 43677—2024 [S]. 2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Ecosystem assessment: Technical guidelines for terrestrial ecosystem asset accounting: GB/T 43677—2024 [S]. Beijing: State Quality Inspection Administration, 2024.
- [24] 张海燕, 樊江文, 黄麟, 等. 近20年北方草原生态价值核算及其时空差异特征[J]. *生态学报*, 2024, 44(6):2337-2350.
Zhang Haiyan, Fan Jiangwen, Huang Lin, et al. Spatio-temporal variation characteristics of grassland ecosystem values and their differences in northern China from 2000 to 2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(6):2337-2350.
- [25] 闫天亮, 王承武, 陈梦茜, 等. 基于土地生态敏感性评价的生态产品价值分区实现研究: 以阿勒泰市为例[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(4):612-621.
Yan Tianliang, Wang Chengwu, Chen Mengxi, et al. Implementation of ecological product value zoning based on land ecological sensitivity assessment: Using Altay City as an example [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(4):612-621.
- [26] 卞正富, 于昊辰, 雷少刚, 等. 黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5):1378-1391.
Bian Zhengfu, Yu Haochen, Lei Shaogang, et al. Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River basin, China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5):1378-1391.
- [27] 黄杰诗, 汤崇军, 伍冰晨, 等. 南方典型红壤区竹节沟生态系统服务功能评价及经济价值[J]. *水土保持通报*, 2025, 45(2):171-180.
Huang Jieshi, Tang Chongjun, Wu Bingchen, et al. Assessment of ecosystem services and economic valuation of bamboo-shaped ditches in typical red soil region of Southern China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(2):171-180.
- [28] 孙灏, 高金华, 崔希民, 等. 大型煤炭基地生态系统服务功能遥感评估及演变分析[J]. *遥感学报*, 2024, 28(4):926-939.
Sun Hao, Gao Jinhua, Cui Ximin, et al. Remote sensing of ecosystem service function in large coalmining base [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(4):926-939.
- [29] 丁欣, 程宏伟, 彭茜. 生态成本补偿的国际比较研究: 基于煤炭采选业上市公司案例[J]. *资源开发与市场*, 2016, 32(11):1347-1351.
Ding Xin, Cheng Hongwei, Peng Xi. International comparison of ecological-cost compensation: A study based on listed enterprises of coal mining and selection [J]. *Resource Development & Market*, 2016, 32(11):1347-1351.
- [30] Li Jiahui, Huang Lin, Cao Wei. An influencing mechanism for ecological asset gains and losses and its optimization and promotion pathways in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(10):1867-1885.
- [31] 宋昌素, 欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值GEP核算研究: 以青海省为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(10):3207-3217.
Song Changsu, Ouyang Zhiyun. Gross Ecosystem Product accounting for ecological benefits assessment: A case study of Qinghai Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10):3207-3217.
- [32] Sinclair M, Mayer M, Woltering M, et al. Valuing nature-based recreation using a crowdsourced travel cost method: A comparison to onsite survey data and value transfer [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 45:101165.
- [33] Tang Zhixiong, Zhou Zixiang, Wang De, et al. Impact of vegetation restoration on ecosystem services in the Loess Plateau: A case study in the Jinghe Watershed, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142:109183.
- [34] Liang Jia, Pan Jinghu. Identifying carbon sequestration's priority supply areas from the standpoint of ecosystem service flow: A case study for northwestern China's Shiyang River basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 927:172283.
- [35] 孙康康, 吴勇, 靳诚, 等. 基于当量因子模型的江阴市生态服务价值核算研究[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(13):59-63.
Sun Kangkang, Wu Yong, Jin Cheng, et al. Estimation of ecological service value in Jiangyin based on equivalent factor model [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(13):59-63.