

“一带一路”共建国家矿区生态修复碳汇潜力评估

陈 浮¹, 夏 依¹, 邹 铭¹, 巩人杰², 骆占斌¹

(1. 河海大学 公共管理学院, 江苏 南京 211000; 2. 中国矿业大学 矿山生态修复教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘 要:“一带一路”的共建促进了国家间的产业发展与经济互补, 扩大了能源资源需求。然而, 能源资源开发通常会引发生态退化、景观破碎和水体污染等诸多问题, 威胁全球生态安全, 促使气候恶化。目前, 有关“一带一路”共建国家矿区生态变化及修复潜力的研究相对较少。为此, 基于 Google Earth Engine(GEE) 云平台 and 全球环境科学数据库估算“一带一路”共建国家矿区净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) 变化, 并采用随机森林 (RF) 模型评估生态修复固碳增汇潜力。结果表明: 2000—2020 年“一带一路”共建国家采矿区 NEP 总量呈显著的阶段性波动下降趋势, 以碳当量计 (下同) 净减少量为 282.1 Gg/a, 降幅高达 30.6%; “一带一路”共建国家 53.1% 的矿区表现为 NEP 净减少, 总减少量达 2 262.5 Gg/a, 减少量为 151.2 g/(m² · a), 逐年攀升的 NEP 减少量反映采矿活动对共建国家生态的负面影响持续加深; “一带一路”共建国家矿区具有一定的碳汇修复潜力, NEP 修复潜力为 10.8 g/(m² · a), 最大修复潜力可达 269.7 g/(m² · a), 但不同区域矿区 NEP 修复潜力差异显著, 南美洲共建国家的 NEP 修复潜力最大, 高达 16.1 g/(m² · a), 欧洲共建国家 NEP 修复潜力最低, 仅为 7.9 g/(m² · a); 土壤有机碳、年降水量和总初级生产力是 NEP 恢复的最重要驱动因子, 不同区域自然条件差异极大, 亟需采取差异化生态修复策略和适应性管理模式。本研究厘清了“一带一路”共建国家矿区生态变化及修复潜力, 为应对全球气候变化和受损矿区生态修复、规划决策提供了科学依据。

关键词: 一带一路; 受损矿区; 生态修复; 净生态系统生产力; 碳汇潜力

中图分类号: TD88 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)06-2789-13

Assessment of carbon sequestration potential for ecological restoration of mining areas in the Belt and Road Countries

CHEN Fu¹, XIA Yi¹, ZOU Ming¹, GONG Renjie², LUO Zhanbin¹

(1. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211000, China; 2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The Belt and Road Initiative (BRI) promotes industrial development and economic complementarities among countries, increasing demand for energy resources. However, developing these resources can result in numerous ecological and environmental issues, such as ecological degradation, landscape fragmentation, and water pollution, which threaten global environmental security and exacerbate climate change. Few studies have focused on the environmental damage and restoration potential of mineral development among the countries and regions involved in BRI. Therefore, the net ecosystem productivity (Net Ecosystem Productivity, NEP) loss resulting from mining activities in the BRI countries was estim-

收稿日期: 2025-03-12 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2025.0298

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52374170, 42377465)

作者简介: 陈 浮 (1974—), 男, 江苏射阳人, 教授, 博士生导师。E-mail: chenfu@hhu.edu.cn

引用格式: 陈浮, 夏依, 邹铭, 等. “一带一路”共建国家矿区生态修复碳汇潜力评估[J]. 煤炭学报, 2025, 50(6): 2789-2801.

CHEN Fu, XIA Yi, ZOU Ming, et al. Assessment of carbon sequestration potential for ecological restoration of mining areas in the Belt and Road Countries[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(6): 2789-2801.



移动阅读

ated using the Google Earth Engine (GEE) cloud platform and the Global Environmental Science Database, with ecological recovery potential assessed through the Random Forest (RF). The results indicate that: From 2000 to 2020, the total NEP of mining areas in the countries jointly building the Belt and Road Initiative showed a significant phased fluctuating downward trend. Measured in terms of carbon equivalent (the same below), the net reduction was 282.1 Gg/a, with a decrease rate as high as 30.6%. 53.1% of the mining areas in the countries co-constructing the Belt and Road exhibit a net NEP loss, with an overall loss of 2 262.5 Gg/a, an annual loss of 151.2 g/(m² · a), and the increasing NEP loss highlights the worsening negative impacts of mining activities on the ecosystems of these regions. The mining areas in the BRI countries possess a certain degree of ecological recovery potential, with an average annual NEP recovery potential of 10.8 g/(m² · a) and a maximum recovery potential of 269.7 g/(m² · a). However, there are significant regional disparities in the NEP recovery potentials across different mining areas, with the highest NEP recovery potential found in the South American countries of BRI, reaching up to 16.1 g/(m² · a). The lowest NEP recovery potential was found in the European countries of BRI, which was only 7.9 g/(m² · a). Soil organic carbon, annual precipitation, and gross primary productivity are the primary driving factors for NEP recovery. Given the substantial variation in natural conditions across different regions, it is essential to implement differentiated ecological management strategies and adaptive management models. This study elucidates the ecological damage and restoration potential stemming from mining in the BRI countries, providing a scientific foundation for ecological restoration and planning decision-making in response to global climate change and damaged mining areas.

Key words: the Belt and Road; damaged mining areas; ecological restoration; net ecosystem productivity; carbon sequestration potential

0 引 言

“一带一路”倡议为参与该倡议的共建国家构筑了一个互利共赢的重要合作平台,该平台不仅增强了国家间的沟通与协作,还为全球经济互联互通、资源优化配置及绿色发展注入了强劲动力。参与“一带一路”共建的国家在诸多领域具备高度互补性^[1],对推动全球经济繁荣和社会发展意义重大,尤其是在能源资源等领域合作的前景广阔。不断增长的国际贸易会促进“一带一路”共建国家加速矿产资源的开发,但大规模矿产资源的开采、运输、加工和利用不仅会损毁农田、导致地表形变,还会影响植被生长、加剧水土流失^[2-3],从而破坏生态平衡,造成生物多样性锐减。当前,一些“一带一路”共建国家的环境规制尚不健全,矿产开发造成的环境影响及其生态修复潜力的大小等问题尚不清晰,亟待科学、及时地评估矿产开发造成的生态影响及修复潜力。

矿产开发对生态系统的影响具有复杂性,既包含采矿活动对植被、土壤的破坏,也包含其他人为或自然干扰,如矿区土地利用变化、废弃物外溢及景观退化等^[4]。这些影响通常会随时间的推移持续放大,最终导致矿区生态系统濒临崩溃。目前,采矿活动对生态系统影响的研究分微观尺度和宏观尺度 2 个方面,其中微观尺度研究一般为实地采样分析。例如:毕银丽等^[5]利用野外调查研究发现,煤炭开采会在一定范

围内对土壤养分产生较大影响,采矿活动显著降低了矿区周边植物的多样性、群落相似性及土壤养分,使得矿区周边土壤具有明显的退化趋势。王金满等^[6]研究发现采矿活动造成的土壤压实问题不仅降低了土壤孔隙间的连接度和持水保肥能力,加剧水土流失风险,还对植被生长造成了不可逆的损害,从而诱发矿区生态失衡。王双明等^[7]研究发现,采动裂缝会造成覆岩破坏与地表损坏,降低土壤黏粒和有机质含量,加大周边土壤可蚀性,土壤理化改变会干扰土壤微生物群落多样性与功能稳定性。此外,采煤沉陷导致的大量裂缝会造成植物根系拉伤,加剧了土壤水分的蒸发^[8],从而影响矿区小气候,削弱生态系统的稳定性。宏观尺度研究多采用遥感或干涉合成孔径雷达技术监测地表形变或生态参数变化。例如, LATIFOVIC 等^[9]利用 Landsat 和 AVHRR 卫星数据量化矿区土地覆被的变化情况,发现矿区植被退化严重,并随着地表温度的变化呈持续升高趋势。SONTER 等^[10]统计了全球 62 381 个采矿区,发现采矿活动大约影响着地球表面 5 000 万 km² 的土地,一些矿区与自然保护区、生物多样性敏感区及荒野区重叠,凸显采矿活动对生态系统的威胁具有全球性与普遍性。采矿活动通常会对生态系统的健康产生长期的负面影响,这些损害不只局限于矿点,还会沿着生态走廊,呈线性、面状及网络发展趋势,形成更为严重的局域性甚至全域性生态问题。研究表明,全球 11.5% 的陆地面积受到采矿

活动的影响,全球 71.0% 的直接森林砍伐与煤炭和黄金开采有关^[10]。联合国“生态系统恢复 10 a”行动计划将矿山生态恢复与修复列为重要领域,通过科学的种植植被、土壤管理及针对性生态恢复措施,减缓生态退化问题,并显著提升退化矿区的生态功能^[11]。从现有研究来看,受损矿区生态系统研究多聚焦于修复技术及小尺度生态损害监测与评价,而对大尺度矿区生态损害缺乏监测,有关修复潜力评估研究则更少。

“一带一路”共建国家多为新兴经济体和发展中国家,一些矿业企业对环境、社会和公司治理 (Environmental, Social and Governance, ESG) 缺少科学理念和评价标准,对生态系统、生物多样性保护等造成负面影响,也为全球气候变化与温室气体减排等带来巨大压力^[12]。因此,科学评估“一带一路”共建国家采矿活动的生态影响及修复潜力,对提升矿区生态功能、维护全球生态安全及联合国可持续发展目标的实现具有重要意义。

“一带一路”共建国家覆盖全球,气候与生态类型多样,一些区域生态环境非常脆弱,采矿损害的空间异质性极大,已成为共建国家可持续发展目标实现的硬约束^[13]。此外,“一带一路”共建国家的经济发展水平、矿山开采技术及生态修复能力等差异显著^[14],也进一步加剧了生态修复的复杂性。鉴于此,“一带一路”绿色发展国际联盟倡议构建全球绿色治理体系,倡导低碳发展模式^[15],推动共建国家实现绿色可持续发展目标,并积极应对全球气候与生态挑战。为实现上述目标,共建国家必须加强矿区生态监测和修复^[16],以应对全球气候变化状况下受损矿山生态系统带来的不确定性挑战。鉴于此,文中利用多源遥感数据监测评估“一带一路”共建国家 2000—2020 年主要矿区

净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) 及其变化,采用随机森林 (Random Forest, RF) 模型预测生态修复碳汇潜力,为“一带一路”共建国家开展矿区生态修复、挖掘碳汇潜力效益、加强生态环保合作及提升全球生态修复话语权提供宏观决策指导。

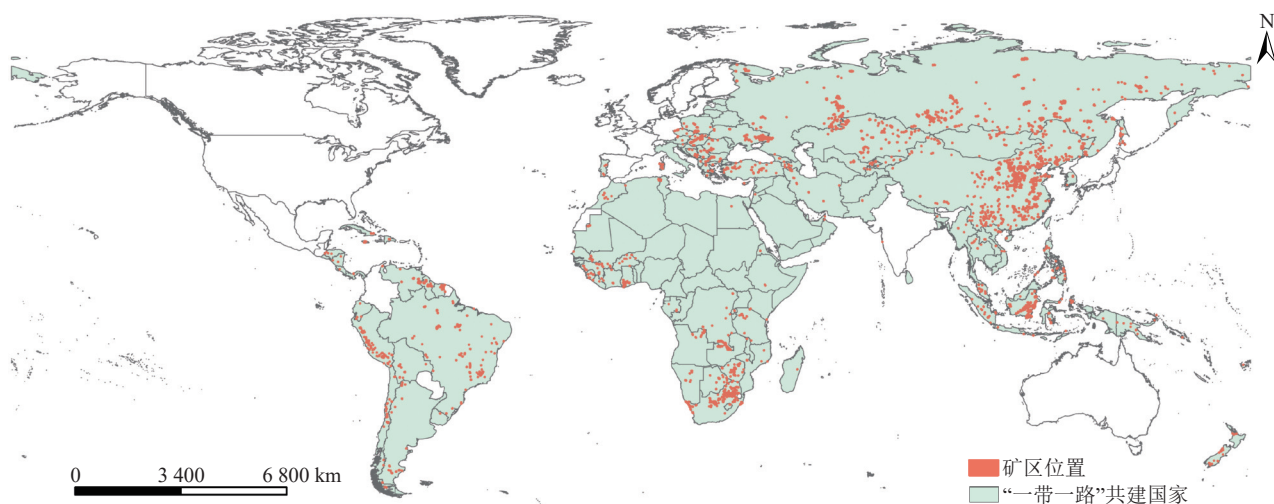
1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

“一带一路”共建国家分布广泛,从倡议之初的 30 余个国家开展国际合作,截止 2024 年 12 月共涉及 155 个国家 (图 1),已覆盖全球约 3/4 的地区和超过 60% 的总人口。但大部分国家普遍面临经济发展失衡、基础设施相对落后等问题。“一带一路”地区横跨环太平洋成矿域、特提斯—喜马拉雅成矿域以及中亚—蒙古成矿域三大重要成矿域^[17],拥有丰富的煤炭、金属矿产及稀有矿产资源,是全球矿产资源的重要供应地。随着国际合作的深化与“一带一路”倡议的推进^[18],各国逐渐加快矿产资源的开采速度。然而,多数共建国家位于亚洲和非洲,地理环境差异,干旱且生态环境相对脆弱。随着全球气候变化的加剧,一些地区承受着严峻的生态压力,高频率的极端气候事件对共建国家的经济发展与生计可持续性带来多重挑战^[19]。各种资源和矿产的开采以及高强度的人类活动导致区域碳排放逐年增加,严重破坏了生态系统的碳循环,并驱动地表气温不断升高^[20]。当前,“一带一路”共建国家正面临着不同程度的土地退化、水资源短缺、生物多样性减少及生态系统功能减弱等环境危机^[21]。

1.2 数据来源

文中采用的“一带一路”共建国家矿区数据集来



注: 基于自然资源部标准地图服务网站下载, 审图号为 GS(2016)1666 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 1 “一带一路”共建国家及主要矿区位置

Fig.1 Location of countries and major mining areas of the Belt and Road Initiative (BRI)

自全球环境科学数据发布网站 (<http://pangaea.de>), 该数据集对全球范围内直接用于采矿的区域进行了明确的空间估算, 尽管未涵盖全球所有的采矿区, 但已包含大部分采矿区的空间范围, 主要为煤矿和金属矿。数据集结合 Sentinel-2 (de-clouded)、Bing Imagery 和 Google Satellite 提供的卫星图像, 确定了采矿区矢量边界, 包括采矿坑、尾矿库、废石堆、池塘、矿山加工基础设施、矿山工业场地和生活场地及开采沉陷区等区域, 信息提取总体准确率为 88.4%^[22]。由于受卫星数据分辨率的限制, 不同矿山可能会存在轻微边界误差。但其仍是当前全球采矿土地利用研究中最全面的信息来源。基于该数据集及笔者前期构建的我国矿区数据集^[11], 筛选出“一带一路”共建国家中面积大于或等于 1 km² 的采矿区, 最终大约涵盖 90% 的露天矿与井工矿, 并将其作为文中研究的对象。

为科学化“一带一路”共建国家采矿区生态修复固碳增汇修复潜力, 采用净生态系统生产力数据进行评估和预测。NEP 是光合作用吸收的碳与植物、土壤呼吸作用释放的碳的差值, 用于量化生态系统内净碳通量或碳储量变化速率, 即固碳速率^[23]。NEP 作为衡量生态系统是碳源或碳汇的关键指标, 负值表示碳源, 正值表示碳汇^[24]。文中研究使用国家地球系统科

学数据中心 (<http://www.geodata.cn>) 提供的 NEP 数据集, 该数据中心提供了 2000—2020 年全球陆地生态系统的 NEP 数据, 包含经纬度、空间分辨率 (500 m)、时间分辨率 (1 a, g/(m² · a))^[25]。该数据集结合全球通量网络的净生态系统碳交换 (Net Ecosystem Carbon Exchange, NEE) 数据及影响其时空变化的环境因素数据, 采用数据驱动的机器学习模型估算了全球通量站点的月度 NEE, 并通过空间网络预测变量计算得到全球尺度的月度 NEP。最终将月度 NEP 累积为年度 NEP。空间分辨率为 500 m, 月度 NEP 的估算精度在五折交叉验证中的 R^2 为 0.72, 均方根误差为 0.96 g/(m² · a)。尽管受空间和时间分辨率的限制, 但该数据集是唯一的长时间序列、覆盖全球的 NEP 产品。因此, 成为研究“一带一路”共建国家矿区 NEP 变化及碳汇潜力的唯一选择。

1.3 影响因素

采矿区 NEP 受多重因素的综合影响, 明确这些因素对于科学评估矿区生态修复机制和修复潜力具有重要意义。文中选取了涵盖气候、生态和经济 3 方面的 11 个相关指标 (表 1), 通过多个指标因素的综合考量, 旨在识别影响 NEP 的多维驱动因素, 为评估矿区生态修复碳汇潜力及制定差异化修复策略提供科学依据。

表 1 矿区 NEP 修复潜力评估指标
Table 1 Indicators for assessing NEP restoration potential in mining areas

指标类型	指标	数据来源
气候指标	标准化降水蒸散指数	SPEI基础数据集
	年降水量	http://www.geodata.cn
	矿区最高温度	http://www.geodata.cn
	矿区最低温度	http://www.geodata.cn
生态指标	植被总初级生产力	VODCA2GPP数据集
	土壤有机碳含量	https://data.apps.fao.org/glosis
	海拔高度	https://www.gebco.net
	地形曲率	利用DEM计算
经济指标	矿区面积	利用矿区矢量边界计算
	人口密度	http://ghsl.jrc.ec.europa.eu/index.php
	国内生产总值	CHEN和GAO发布的数据集 ^[26]

在变量选取方面, 选取标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)、年降雨量以及矿区的最高、最低温度作为气候指标。SPEI 用于衡量气候的湿润或干旱程度, 以标准化变量 (均值为 0, 以方差为单位) 表示当前气候平衡 (降水量与潜在蒸散量的差值) 与长期平衡的偏差程度。SPEI 越大, 表明气候越湿润。矿区的最高和最低温度

是影响生态系统碳固定和植物生长的关键环境因素。生态指标包括植被总初级生产力、土壤有机碳含量、海拔高度和地形曲率。总初级生产力反映植物通过光合作用在单位时间内固定的二氧化碳量, 体现了植物合成有机物 (如碳水化合物) 的总能力, 是生态系统碳循环与植被生长的重要指标。土壤有机碳含量反映了土壤的碳储存能力, 是评估土壤质量、碳汇功能

和生态系统服务功能的关键参数。海拔高度和地形曲率因素潜在影响矿区的微气候条件、土壤稳定性及植被分布,进而影响生态恢复的难度和效果。经济指标选取矿区面积、人口密度和矿区的国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)。其中,矿区面积直接决定了生态修复的范围和难度。而人口密度反映区域内人类活动强度及其对生态系统的压力,不仅决定土地利用类型,也影响生态修复过程中可能面临的人为干扰和修复难度。GDP 作为国家或地区经济实力的标志,与矿产资源开采强度和生态修复投入之间存在直接关联,进而影响生态修复的效率和效果。

1.4 研究方法

1.4.1 NEP 变化估算

NEP 对量化生态系统碳固存能力和阐明碳循环机制至关重要,有助于有效地监测和调节二氧化碳的吸收、储存及释放过程。为计算采矿区 NEP 变化,以 2000 年 NEP 作为标准参考值,计算矿区每单位面积 NEP 的变化。文中选择未受采矿活动干扰的 NEP 变化作为参照生态系统,计算矿区 NEP 实际变化的差值以表示矿区 NEP 的变化量。该方法能够有效剔除环境因子对 NEP 变化的影响,取得单位面积 NEP 变化,从而消除矿区与周边区域之间不均等性的影响,为矿区 NEP 动态变化提供准确的计算方法。

以 2001 年为例,具体计算如下: A 和 A' 分别为 2000 年和 2001 年参照生态系统内单位面积的 NEP, B 和 B' 分别为 2000 年和 2001 年矿区内单位面积的 NEP。用 A 、 A' 、 B 和 B' 分别计算 2000 年和 2001 年参照生态系统及矿区内单位面积 NEP 变化。最终,参照生态系统和矿区 NEP 变化值的差值即为矿区的 NEP 减少量(图 2)。

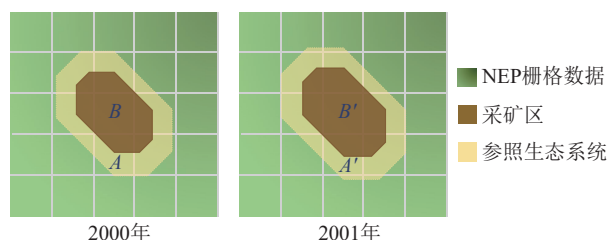


图 2 单位面积 NEP 变化量计算

Fig.2 Calculation of NEP loss per unit area

矿区 NEP 减少量的计算过程如下:

$$P_t = Q_t - Q_{2000} \quad (1)$$

$$W_t = O_t - O_{2000} \quad (2)$$

$$S_t = P_t - W_t \quad (3)$$

式中: t 为年份; Q_t 为当年矿区单位面积 NEP, $g/(m^2 \cdot a)$; O_t 为当年参照生态系统单位面积 NEP, $g/(m^2 \cdot a)$; P_t 为 2000 年至 t 年矿区单位面积 NEP 变化量, $g/(m^2 \cdot a)$; W_t 为 2000 年至 t 年参照生态系统单位面积 NEP 变化量, $g/(m^2 \cdot a)$; S_t 为 2000 年至 t 年矿区单位面积 NEP 减少量, $g/(m^2 \cdot a)$ 。

矿区 NEP 总减少计算过程如下:

$$H_t = S_t U \quad (4)$$

式中: H_t 为 2000 年至 t 年各矿区 NEP 总减少量, $g/(m^2 \cdot a)$; U 为矿区总面积, m^2 。

1.4.2 NEP 修复潜力预测

目前,机器学习已成为评估碳汇潜力的重要工具。随机森林(Random Forest, RF)模型是一种集成式机器学习方法,具备较强的泛化能力,能够通过构建多个决策树来整合不同的数据集,从而提高预测准确性,有效防止模型产生过拟合情况。RF 模型已广泛应用于生态学研究,如碳储量估算、物种生境预测和土地覆被分类等。此外,RF 模型能高效处理数据中的非线性关系,结合多种数据源进行综合分析,在决策树的每个节点,RF 算法会评估随机选择的预测变量子集,从而确定最佳分割点。每个决策树都会根据输入数据独立预测目标变量,并汇总所有决策树的预测结果,以降低其对训练集变化的敏感性(图 3)。

鉴于上述优势,采用 RF 模型评估“一带一路”共建国家的生态修复潜力。NEP 修复潜力是指采矿区通过生态修复措施能够提升的 NEP。为预测 NEP 修复潜力,矢量化处理 11 项指标的栅格数据,并将其添加至数据集。鉴于原始数据的正态分布特性较差,采用 Yeo-Johnson 变换方法转换处理原始数据,转换公式如下:

$$Y = \begin{cases} \lg(X+1), & \lambda = 0, X \geq 0 \\ \frac{(X+1)^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0, X \geq 0 \\ -\lg(-X+1), & \lambda = 2, X \leq 0 \\ \frac{-[(-X+1)^{(2-\lambda)} - 1]}{2-\lambda}, & \lambda \neq 2, X \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: X 为随机变量; λ 为通过极大似然估计确定的变换系数; Y 为变换后的值。

在估算矿区 NEP 变化量的基础上,从中随机选取 2000 个 NEP 增量大于 $100 g/(m^2 \cdot a)$ 的矿区作为样本集,这些矿区代表生态保护与修复能够实现的最佳固碳量。其中,将 85% 的样本作为模型的训练集。每次训练时从训练集中随机抽样,并创建新的训练子集,采用这种方式构建多个决策树模型,并利用决策

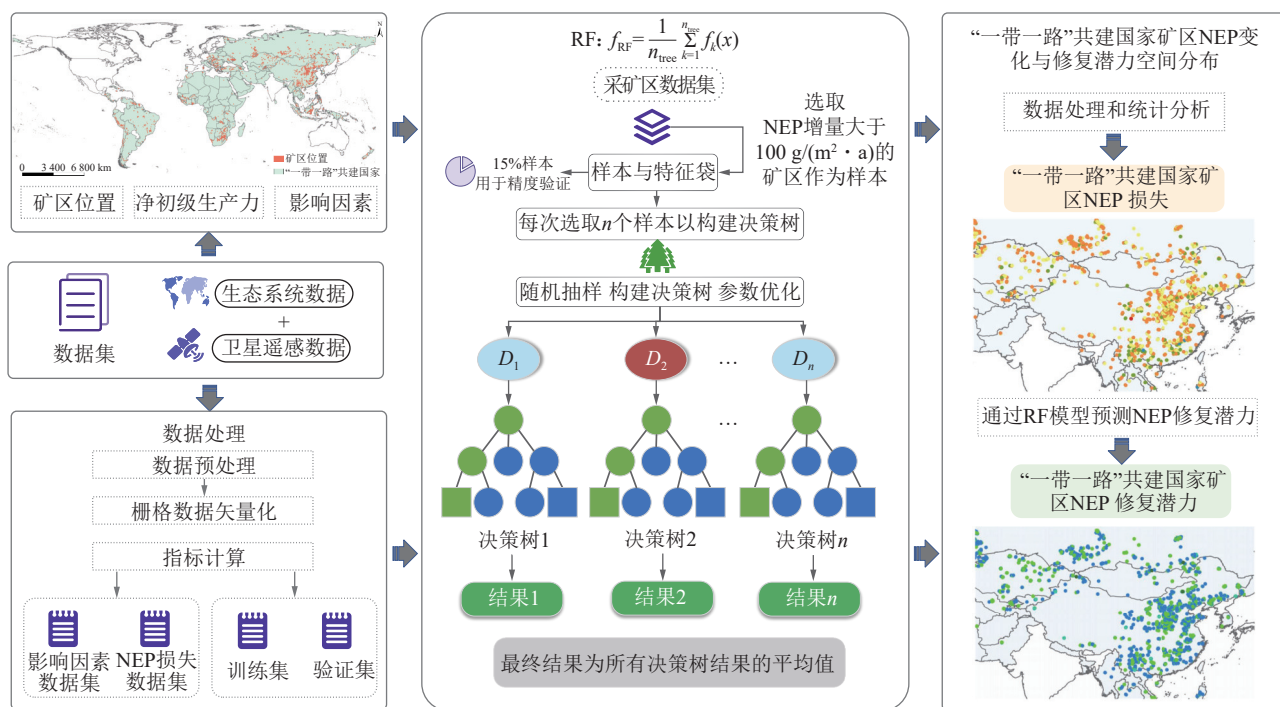


图3 技术路线

Fig.3 Technology road

树集合从平均结果中获取 NEP 修复潜力的最终预测值。此外,设置随机森林模型的参数,通过 3 次交叉验证进行超参数优化,从而获得最优模型。最后,将 15% 的样本作为验证集,用于精度验证。采用均方根误差 (E_{RMS}) 评估模型性能, E_{RMS} 越小,表示模型性能越好,最终选择交叉验证 E_{RMS} 最低的模型。

使用 RF 模型评估具有不同重要程度的驱动因子,通过计算和比较所有选定的预测变量的条件替代重要性,量化每个驱动因子的相对重要性。具体而言,通过系统地将每个预测变量随机替换为对照变量,并测量模型精度的下降幅度,从而量化该变量的条件替代重要性。条件替代重要性值越高,表明相应预测变量在预测 NEP 修复潜力中的作用越显著。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年“一带一路”共建国家矿区 NEP 变化

研究发现,2000—2020 年,“一带一路”共建国家的矿区 NEP 整体呈现显著波动下降趋势,最高降幅达 30.6%(图 4)。2007 年,共建国家的矿区 NEP 总量为 2 713 Gg,是这 21 a 间的最高值,而最低值出现在 2019 年,共建国家的矿区 NEP 总量仅为 1 883 Gg。此外,共建国家矿区 NEP 随时间变化主要分为 3 个阶段:① 2000—2006 年,NEP 总量波动变化较大,总体呈现阶段性增长趋势,由 2001 年的 2 104 Gg 波动上

升至 2 695 Gg;② 2007—2014 年,进入急速下降阶段,相对降幅达到 18.9%,线性回归拟合 R^2 为 0.77,共建国家矿区 NEP 总量逐年下降,直至 2014 年达到阶段性最低值 2 198 Gg;③ 2015—2020 年,共建国家矿区 NEP 总量呈现持续下降、短期反弹趋势,波动性较大,相对下降幅度为 16.2%,变化不稳定;2019 年降至最低值,2020 年有所回升,恢复至 2 112 Gg,但恢复总体不高,2013 年共建“一带一路”重大倡议提出后,矿产开采速度有所增加,但 NEP 恢复存在滞后性。

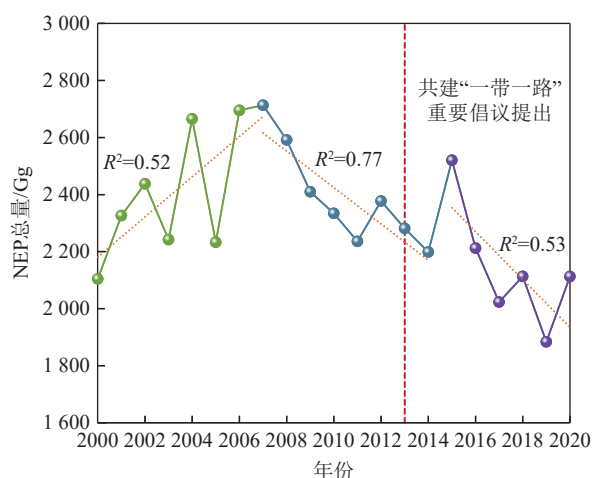


图4 2000—2020 年“一带一路”共建国家矿区 NEP 总量

Fig.4 Total NEP of mining areas in BRI countries from 2000 to 2020

2000—2020 年“一带一路”共建国家的 NEP 减

少与增长情况如图5所示。由图5可知:共建国家矿区的NEP净减少量为282.1 Gg/a。具体而言,共建国家全部矿区中53.1%的矿区表现为NEP减少,减少量高达2 262.5 Gg/a,平均减少量为151.2 g/(m²·a)。其余46.9%的矿区NEP有所增加,增加量为1 980.4 Gg/a,平均增加量为133.7 g/(m²·a)。图5中柱状小图显示,“一带一路”中超过半数国家的矿区NEP处于减少状态,整体生态碳汇功能大范围削弱。同时,大多数矿

区NEP减少了0~200 g/(m²·a),占共建国家NEP减少总量的71.9%。相较之下,仅少数国家矿区的NEP增长趋势良好,但增长量极为有限,表明当前矿区生态系统整体碳汇恢复能力仍然较弱,尚未形成良性恢复趋势。此外,部分国家矿区的NEP降幅较大,反映出严重的生态退化和长期采矿活动的累积负面效应。因此,亟需增强区域碳汇功能,提升生态系统恢复力,促进矿区生态的可持续发展。

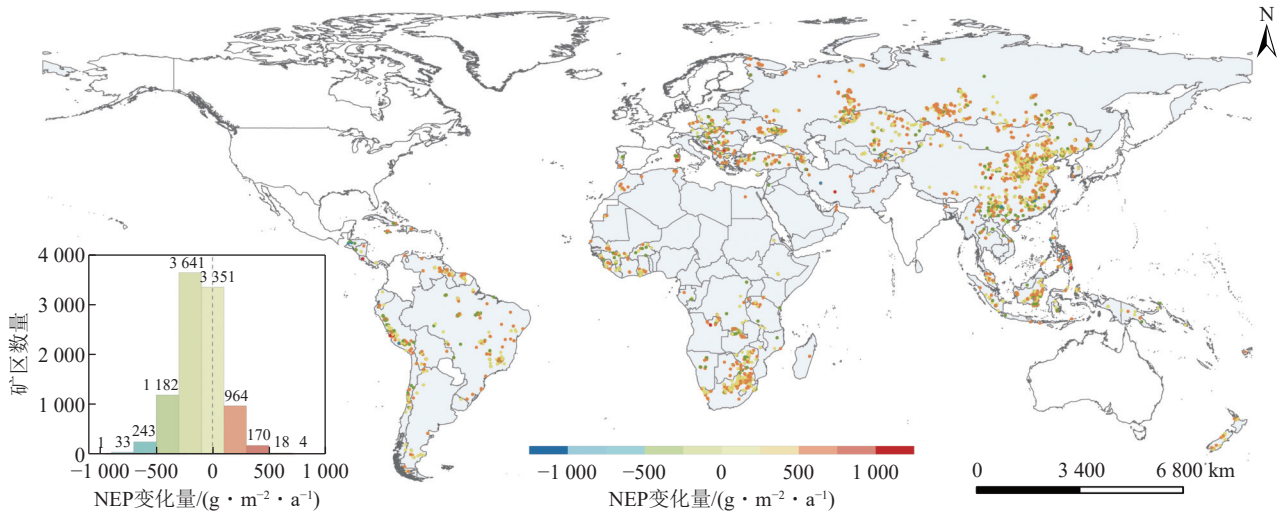


图5 2000—2020年“一带一路”共建国家矿区NEP减少与增加变化空间分布

Fig.5 NEP losses and growth in mining areas in BRI countries from 2000 to 2020

2000—2020年“一带一路”共建国家矿区NEP变化如图6所示。图6中正值表示NEP减少,负值表示NEP增加。2001—2020年,“一带一路”共建国家矿区的NEP变化波动较大,最大减少量为1 077.1 g/(m²·a),最大增加量为1 060.3 g/(m²·a)。从NEP减少均值来看,NEP仍表现为持续减少状态,且减少程度呈逐年攀升趋势,至2019年达研究期间的减少高值15.99 g/(m²·a),表明采矿活动对生态的

负面影响持续加深并扩大。2013年“一带一路”倡议后,共建国家矿区NEP减少均值呈现波动变化趋势,但减少的增速明显有所减缓。由于生态修复具有一定的滞后性,至2020年,共建国家矿区NEP减少量为15.04 g/(m²·a),仍处于较高的减少状态。

2.2 “一带一路”共建国家矿区NEP修复潜力预测

通过RF模型预测“一带一路”共建国家矿区的NEP修复潜力,结果显示不同地区生态修复潜力存在较大差异(图7)。共建国家矿区NEP的修复潜力为10.8 g/(m²·a),最高修复潜力可达269.7 g/(m²·a),总的修复潜力为103.574 kg/(m²·a)。整体而言,大多数矿区NEP修复潜力集中在0~100 g/(m²·a),这反映出生态系统仍处于较低的恢复水平。此外,共建国家中41.1%的矿区不具备修复潜力,这些矿区仍处于持续的净碳汇减少状态,生态退化趋势尚未得到有效的遏制。相比之下,仅有少数矿区表现为高的修复潜力,具备较强的碳汇能力。然而,不同矿区的修复潜力差异显著,需采取针对性生态修复措施来整体提升区域碳汇功能。“一带一路”共建国家自然条件各有不同,矿区生态系统的修复潜力亦有所差异(图8)。欧洲共建国家矿区的NEP修复潜力相对较低,大多数

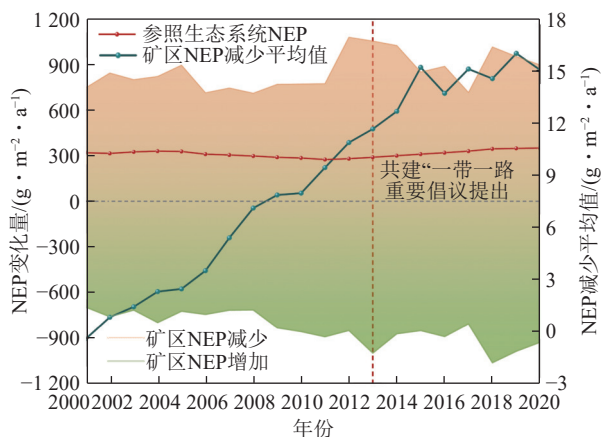


图6 2000—2020年“一带一路”共建国家矿区NEP变化

Fig.6 Relationship between the growth and losses of NEP in mining areas in BRI countries from 2000 to 2020

矿区的修复潜力低于 $7.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。相较之下,南美洲共建国家矿区的修复潜力最高,修复潜力达到 $16.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。亚洲共建国家矿区的修复潜力为 $10.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,与“一带一路”整体恢复水平相当。然而,亚洲不同地区之间的修复潜力差异较大。其中,东南亚矿区的修复潜力仅为 $5.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,处于极低水平,而东亚地区拥有世界上最密集的矿区分布,修

复潜力为 $10.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。北美洲共建国家矿区的修复潜力与亚洲相近,修复潜力为 $10.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。非洲与大洋洲共建国家矿区修复碳汇潜力水平相当,碳汇潜力分别为 12.3 和 $12.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。其中,非洲南部矿区的修复潜力明显高于非洲其他地区。总体而言,不同地区矿区的 NEP 修复潜力受多种因素的影响,呈现出显著的区域性差异。

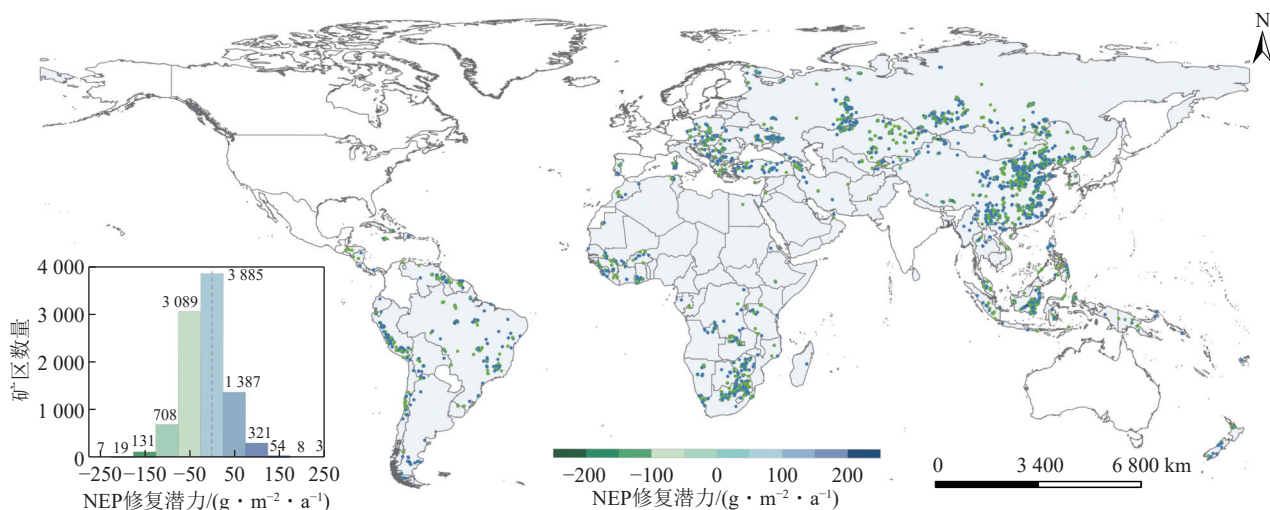


图7 “一带一路”共建国家矿区 NEP 修复潜力预测空间分布

Fig.7 Projected NEP restoration potential of mining areas in BRI countries

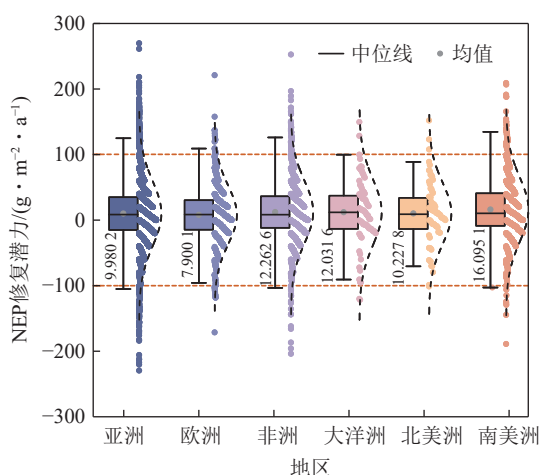


图8 不同地区“一带一路”共建国家 NEP 修复潜力

Fig.8 NEP Recovery Potential in different continents

2.3 “一带一路”共建国家矿区 NEP 恢复的驱动因素

全球气候变化背景下,共建国家矿区 NEP 修复潜力受多种因素综合影响,且修复潜力呈现较大差异。文中计算了 RF 模型中 11 个驱动因子的重要性。结果表明,土壤有机碳、年降水量和总初级生产力是影响 NEP 修复潜力的主要驱动因素(图 9)。土壤有机碳是陆地生态系统碳循环的重要部分,有机碳含量高的土壤通常具有良好的功能,有利于植被恢复和生态

系统正向演替。标准化降水蒸散指数和年降水量代表植被生长所需的水量,是植物生长的关键指标,也是矿区 NEP 恢复的主要驱动因子。充足降水能够促进矿区植物的生长和光合作用,从而更有利于碳固定和生物量的积累,表现出较高的 NEP 修复潜力。此外,总初级生产力作为植被生长的重要指标之一,也是矿区 NEP 修复潜力的重要驱动因子。当总初级生产力较高时,生态系统碳输入增加,能够有效促进生态恢复与抗干扰能力的提升,推动受损系统从碳源向碳汇转变。

年均气温与年均降水量的交互作用对植被恢复过程中土壤特性和有机碳具有积极影响。这可能是由于更高的温度和更大的水可用性是促进植物生长的重要因素,土壤湿度与生理、生态和光合作用过程直接相关,二者都会影响植物生长和生物量的产量,从而间接影响土壤有机碳和养分的积累。而受损矿区土壤有机碳储量的提高主要取决于年均降雨量和植被恢复的时间,植被恢复过程中,微生物的协同作用在生态系统修复和固碳能力方面具有重大潜力^[27]。因此,在开展矿区生态修复时,应综合考虑多种因素,充分发挥植被的降污固碳效应,针对性地提升矿区生态系统的稳定性。

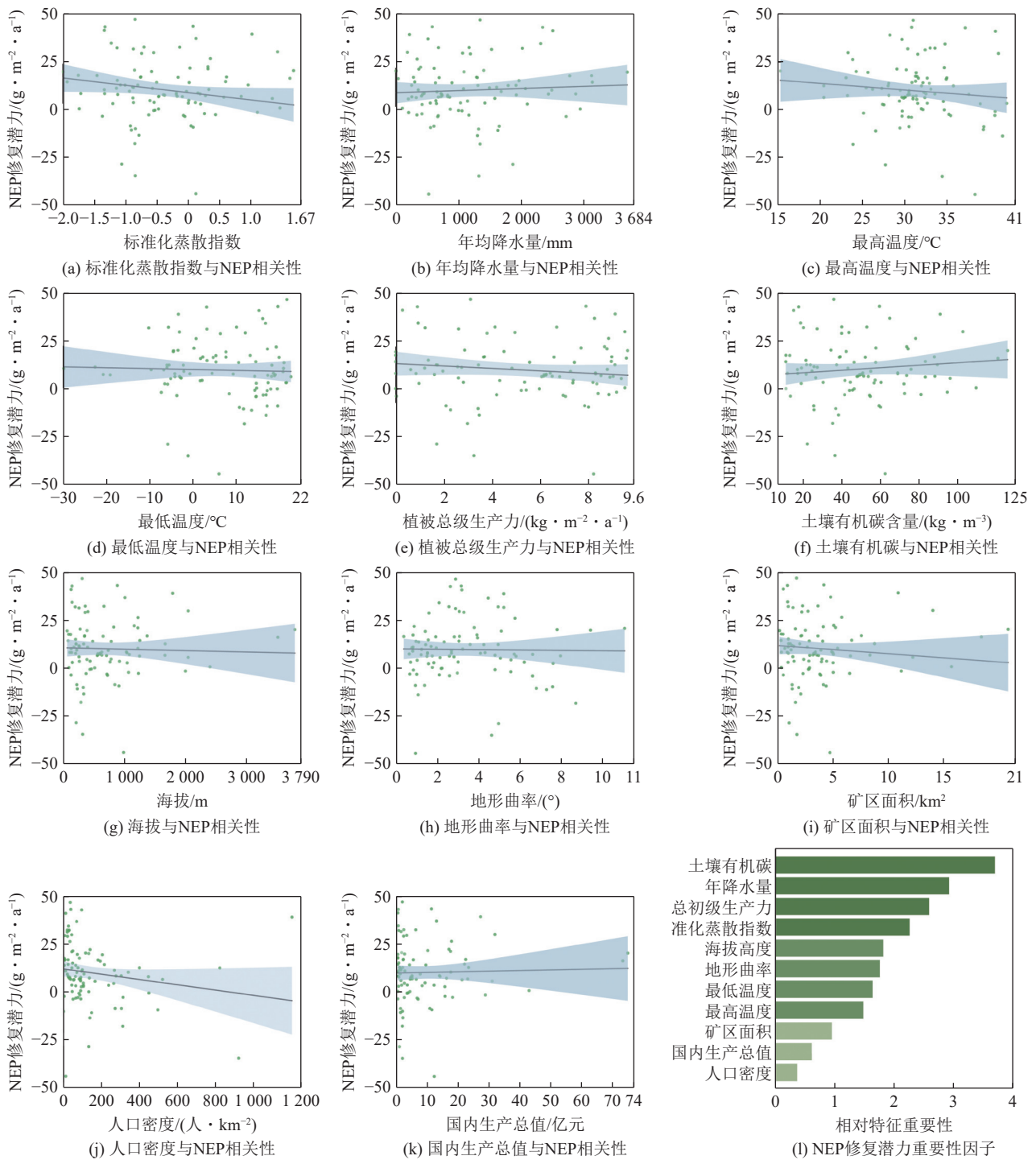


图9 不同驱动因子与NEP修复潜力之间相关关系

Fig.9 Correlation between each driving factors and NEP recovery potential

3 讨 论

3.1 采矿活动对生态系统及生产力的影响

煤炭开采引发的生态扰动通常沿着矿点延伸至线、面、网状发展,并造成更为严重的局部甚至全域性生态损害^[28],进而引发全球生态系统的大量碳损失。土壤作为地球最大的活跃碳库,在陆地碳循环中发挥着关键作用。生态系统通过吸收二氧化碳,并将同化

碳存储于植物组织或土壤有机质中,避免其被微生物分解,从而增强碳固存能力^[29]。然而,矿山开采过程中,通常会造成土壤的占用、剥离、压实和侵蚀,破坏天然土壤结构和地层结构,改变原有的土壤系统功能^[30]。这些扰动不仅影响土壤有机碳的储存与稳定性,还加速土壤侵蚀过程中的有机碳流失,进而提高碳的矿化速率^[31],削弱区域碳汇能力。此外,高强度矿产开发触发土地退化、水土流失及景观破碎等一系

列生态连锁反映,特别是在环境脆弱的地区,生态矛盾尤为突出。矿区退化土壤常表现出板结、养分不足、结构不良和保水能力差等问题,显著限制了土壤的生产力。同时,采矿过程中释放的重金属污染物,如铅、汞、镉等在土壤中持续累积,不仅改变了土壤的微环境,还抑制了微生物活性与群落结构,从而影响土壤碳循环。另一方面,废弃矿山土壤可能成为碳源,长期释放 CO_2 ,裸露土地的升温效应能够改变局部微气候,形成生态系统的恶性循环。研究表明,开采沉陷与岩土损伤是导致生态环境变化的根源,尤其在露天矿区表现最为显著,露天开采不仅导致区域地下水位下降,还通过粉尘的扩散作用在更大范围内影响生态环境^[32]。部分矿区的酸性矿山排水还会导致水体酸化,形成持久性水污染,严重威胁周边人居环境的安全。此外,有研究指出,矿山所处的生命周期阶段、地貌类型和矿区相对高差等因素也会对会生态系统及生产力造成影响^[11]。

“一带一路”共建国家的不同矿区在 NEP 减少程度上差异较大,其主要受气候条件和植被类型的影响。而温度和降水是限制植被生长的关键因子,不同植被类型的固碳能力也存在显著差异^[33]。研究表明,相较于其他生态系统,森林生态系统具有更高的固碳潜力

和稳定性,不同气候带森林固碳量同降水、气温条件存在一定的响应关系^[34]。此外,人类活动干预也对生态系统的碳储量产生直接影响。在黄土高原矿区混合种植模式能够耦合不同植被类型的生长优势,提升增汇能力^[35]。生态修复初期,草本植物的快速生长有助于抑制有机碳的快速分解,而随着单一草地恢复的土壤有机碳封存率下降,种植乔灌木混合植被有助于建立更为稳定的土壤有机碳库。因此,在“一带一路”共建国家的矿区修复过程中,应结合不同地区的气候条件与生态损害程度,选择适宜的植被恢复模式,以提升固碳潜力和生态恢复速率。

3.2 “一带一路”共建国家矿区生态恢复多情景策略

尽管采矿活动造成了大范围的生态损害,但“一带一路”共建国家受损矿区仍有较好的修复潜力,尤其是南美洲和东亚部分共建国家的 NEP 修复潜力远高于整体平均水平。然而,气候和降水条件差异,不同矿区受损状况与生态修复潜力不一。考虑到矿区自然条件差异和植被恢复的难易程度,设定多种恢复情景,并实施适应性管理。生态修复策略应因地制宜,权衡长期效益与短期效果,并结合恢复目标、技术手段和资源可行性制定适宜方案,以实现更高效的生态恢复(图 10)。



图 10 “一带一路”共建国家矿区生态恢复多情景策略

Fig. 10 Multi-scenario strategies of ecological restoration for mining area in BRI countries

对南美洲和大洋洲等生态修复潜力较高、自然条件良好的共建国家应侧重于加速自然恢复,充分利用土壤、植被固碳增汇潜力,以实现更高的固碳速率^[36]。

激发受损矿区生态系统的恢复力,综合土层重构、地貌重塑、植被重建等关键技术,提升重建生态系统的稳定性^[37-38]。对于欧洲和东南亚等生态修复潜力较

低的共建国家矿区土壤退化严重,恢复速度较慢,可依据土壤适宜性选取恢复植被,配合施肥、覆盖物等措施,增强养分保持能力。此外,还应重点关注土壤重构问题,通过改善土壤理化性状,为植被恢复提供支持^[39]。随着复垦年限的增长,土壤微生物多样性及群落稳定性将有所提升^[40]。非洲一些共建国家面临水资源和气候条件的双重约束,矿区多位于干旱区,可根据矿区生态受损状况,适度引导生态恢复。前期引种耐旱植被,再逐渐转向自然恢复,促进生态系统正向演替^[41]。矿山生态修复是一个长期系统性问题,“一带一路”共建国家多处于生态脆弱区和发展中国家,面临治理和发展双重严峻挑战。因此,应摒弃“先污染,后治理”的发展模式,围绕自然要素和空间环境两大主体,采取源头预防的主动控制与边开采边修复的动态修复策略,推进绿色矿山建设^[42-43]。共建国家生态修复潜力的差异表明,生态修复策略应具备灵活性与针对性。修复潜力较高的地区应加速自然恢复以实现固碳增汇,而修复潜力较低的地区则需投入更多资源和精细化管理,以增强生态系统的韧性。但处于全球变化条件下,生态系统更加复杂多变,相同的干预措施可能会出现难以预测的变化,当修复效果偏离预期时,应及时干预调整,如采用基于自然的解决方案(Nature based Solutions, NbS),以强化实施适应性管理^[44]。此外,共建国家应完善治理体系,依托“一带一路”绿色发展国际联盟,推动国际合作,建立多维度生态恢复政策、技术支持与资金网络。借鉴国际先进治理经验,加强生态修复全周期的动态监测,从而实现综合修复效益的最大化。

3.3 不足与展望

文中重点评估了“一带一路”共建国家矿区的NEP变化与修复潜力,所使用的数据基于全球采矿区遥感数据集,属于宏观大尺度研究。尽管该数据集覆盖范围广,但仍未涵盖共建国家的全部矿山。此外,该数据集缺少矿山所处生命周期的阶段数据,不同时期法律规定不同,无法分析矿山所处生命周期的不同阶段对矿区NEP减少量的影响。研究表明,在采矿规划中纳入矿山关闭时间可以有效减少额外的环境损害^[45]。因此,将矿山所处生命周期的阶段作为影响NEP修复潜力的一个重要因素,而文中尚未考虑该因素。尽管如此,文中的研究仍具有重要价值:生态修复方面,能够为各国科学制定矿区生态修复策略提供量化依据与理论支撑,提升生态系统碳汇功能,改善区域生态环境质量;经济发展方面,可深度挖掘矿区碳汇资源的经济方面的影响,为绿色矿业产业的转型升级以及碳汇交易市场的规范化、规模化发展提供专

业指导,推动区域经济的可持续增长;国际合作方面,有助于促进“一带一路”共建国家在生态环保领域开展协同创新与务实合作,共同构建绿色、低碳、循环的“一带一路”生态经济体系,以提升各国在全球生态修复格局中的参与度与话语权。

未来研究应重点扩展数据来源并加强长期监测,针对共建国家的特定区域采用高光谱数据与长时间序列数据耦合,并将矿山所处的生命周期阶段纳入评估过程,从而更准确地计算NEP的变化情况。此外,矿山类型也需全部考虑,目前矿山数据集仅分为煤矿和金属矿2类,缺少特定矿类的精细分类。因此,无法对不同类型矿山进行对比,今后要充分挖掘全球矿山数据资源,持续监测NEP变化,从而更加全面评估不同矿山生态损害状况,以制定更具针对性的修复策略。

4 结 论

1) 2000—2020年“一带一路”共建国家采矿区NEP总量呈显著的波动性下降趋势,降幅高达30.6%,期间最高值为2 713 Gg,最低值仅1 883 Gg,NEP净减少量为282.1 Gg/a。

2) 2000—2020年“一带一路”共建国家中53.1%的矿区表现为NEP减少,减少量为 $151.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。共建国家NEP减少均值持续攀升,2019年达最大值 $15.99 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

3) “一带一路”共建国家采矿区具有一定的生态修复碳汇潜力,NEP增加碳汇潜力为 $10.8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最高区域的碳汇潜力可达 $269.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。土壤有机碳、矿区年降水量和总初级生产力是NEP增加碳汇潜力的重要驱动因子,但不同地区碳汇潜力差异较大。

参考文献(References):

- [1] 张鹏岩,常迎辉,刘宇,等.中国与“一带一路”沿线国家化石能源贸易格局及效率[J].资源科学,2024,46(9):1836–1851.
ZHANG Pengyan, CHANG Yinghui, LIU Yu, et al. Patterns and efficiency of fossil energy trade between China and countries along the Belt and Road[J]. Resources Science, 2024, 46(9): 1836–1851.
- [2] ZHANG C, BAI Q S, HAN P H. A review of water rock interaction in underground coal mining: Problems and analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(5): 157.
- [3] XU D, ZHAO Y X, JIANG Y D, et al. Using improved edge detection method to detect mining-induced ground fissures identified by unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3652.
- [4] FILIPIAK M, GABRIEL D, KUKA K. Simulation-based assessment of the soil organic carbon sequestration in grasslands in relation to management and climate change scenarios[J]. Heliyon, 2023, 9(6):

- e17287.
- [5] 毕银丽, 李向磊, 彭苏萍, 等. 露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 205–213.
- BI Yinli, LI Xianglei, PENG Suping, et al. Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 205–213.
- [6] 王金满, 张丽娜, 冯宇, 等. 基于 CT 扫描技术预测露天煤矿区不同压实土壤水分特征曲线[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1296–1305.
- WANG Jinman, ZHANG Li'na, FENG Yu, et al. Prediction of the soil water characteristic curve in an opencast coal mining area based on CT scanning technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1296–1305.
- [7] 王双明, 杜麟, 宋世杰. 黄河流域陕北煤矿区采动地裂缝对土壤可蚀性的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 3027–3038.
- WANG Shuangming, DU Lin, SONG Shijie. Influence of mining ground fissures on soil erodibility in Northern Shaanxi coal mining area of Yellow River basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 3027–3038.
- [8] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1439–1450.
- LI Jing, YAN Xingguang, YAN Xiaoxiao, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River Basin based on GEE cloud platform[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1439–1450.
- [9] LATIFOVIC R, FYTAS K, CHEN J, et al. Assessing land cover change resulting from large surface mining development[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(1): 29–48.
- [10] SONTER L J, DADE M C, WATSON J E M, et al. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4174.
- [11] CHEN F, ZHU Y F, BI Y L, et al. High-priority actions to improve carbon sequestration potential for mining ecological restoration in China[J]. *Engineering*, 2025, 47: 16–21.
- [12] 陈敏鹏, 刘强, 高美勋, 等. “一带一路”共建国家气候变化的技术需求评估及推动南南技术合作的政策建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(9): 1387–1397.
- CHEN Minpeng, LIU Qiang, GAO Meixun, et al. Climate technology demand assessment for participating countries in Belt and Road Initiative and policy recommendations for promoting South-South technology cooperation[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(9): 1387–1397.
- [13] 李树志, 李学良, 尹大伟. 碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 286–292.
- LI Shuzhi, LI Xueliang, YIN Dawei. Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 286–292.
- [14] 陈赞旭, 周来, 张绍良, 等. “一带一路”沿线国家矿山生态修复能力评价研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(7): 50–57.
- CHEN Zanzu, ZHOU Lai, ZHANG Shaoliang, et al. Evaluation of mines ecological restoration capacity of the countries along the Belt and Road[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(7): 50–57.
- [15] 翟东升, 蔡达. 绿色“一带一路”建设: 进展、挑战与展望[J]. 宏观经济管理, 2022(8): 7–15.
- ZHAI Dongsheng, CAI Da. Greening the Belt and Road: progress, challenges and prospects[J]. Macroeconomic Management, 2022(8): 7–15.
- [16] YANG Y J, DONG J, TANG J J, et al. Mapping foliar C, N, and P concentrations in an ecological restoration area with mixed plant communities based on LiDAR and hyperspectral data[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(9): 1624.
- [17] 唐金荣, 张涛, 周平, 等. “一带一路”矿产资源分布与投资环境[J]. 地质通报, 2015, 34(10): 1918–1928.
- TANG Jinrong, ZHANG Tao, ZHOU Ping, et al. An analysis of mineral resources distribution and investment climate in the ‘One Belt, One Road’ countries. Geological Bulletin of China, 2015, 34(10): 1918–1928.
- [18] 张伟波, 黄霞, 陈秀法, 等. 我国矿产资源勘查开发“走出去”形势分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(12): 1–5, 62.
- ZHANG Weibo, HUANG Xia, CHEN Xiufa, et al. Analysis on the situation of China's mineral exploration and exploitation “going global” [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(12): 1–5, 62.
- [19] FU B J, STAFFORD-SMITH M, WANG Y F, et al. The global-DEP conceptual framework: Research on dryland ecosystems to promote sustainability[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 48: 17–28.
- [20] 张井勇, 何静, 张丽霞, 等. 面向碳中和的“一带一路”气候变化主要特征与灾害风险研究[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(9): 1371–1386.
- ZHANG Jingyong, HE Jing, ZHANG Lixia, et al. Main climate change characteristics and disaster risks oriented towards carbon neutrality over the Belt and Road regions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(9): 1371–1386.
- [21] 傅伯杰, 刘焱序, 赵文武. “一带一路”生态环境保护 and 可持续发展科技合作重点领域[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(9): 1273–1281.
- FU Bojie, LIU Yanxu, ZHAO Wenwu. Key areas for scientific and technological cooperation in ecological and environmental protection and sustainable development in the Belt and Road Initiative. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(9): 1273–1281.
- [22] MAUS V, GILJUM S, DA SILVA D M, et al. An update on global mining land use[J]. *Scientific Data*, 2022, 9: 433.
- [23] 张怡, 王志慧, 卢小平, 等. 黄土高原生态系统碳汇时空变化及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 266–274, 284.
- ZHANG Yi, WANG Zhihui, LU Xiaoping, et al. Evolution of ecosystem carbon sink and its driving factors in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 266–274, 284.
- [24] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 等. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7648–7658.
- ZHAO Ning, ZHOU Lei, ZHUANG Jie, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7648–7658.
- [25] HUANG N, WANG L, ZHANG Y L, et al. Estimating the net ecosystem exchange at global FLUXNET sites using a random forest model[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Obser-*

- ventions and Remote Sensing, 2021, 14: 9826–9836.
- [26] CHEN J D, GAO M, CHENG S L, et al. Global 1 km $\times$ 1 km gridded revised real gross domestic product and electricity consumption during 1992–2019 based on calibrated nighttime light data[J]. *Scientific Data*, 2022, 9: 202.
- [27] GUO J W, HE T T, ZHANG W K, et al. Evaluation of surface coal mines reclaimed to different vegetation types and their stability in semi-arid areas[J]. *Catena*, 2025, 250: 108770.
- [28] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 再论矿区生态系统恢复重建[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(11): 1–9.
- BAI Zhongke, ZHOU Wei, WANG Jinman, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. *China Land Science*, 2018, 32(11): 1–9.
- [29] WEI X D, YANG J, LUO P P, et al. Assessment of the variation and influencing factors of vegetation NPP and carbon sink capacity under different natural conditions[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108834.
- [30] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2499–2515.
- HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2499–2515.
- [31] 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 等. 碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2237–2240, 2242–2250.
- LIU Xianghong, YAN Yongjun, LIU Wei, et al. System construction and the function improvement of ecological carbon sink in coal mining areas under the carbon neutral strategy[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2237–2240, 2242–2250.
- [32] 彭苏萍, 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 57–64.
- PENG Suping, BI Yinli. Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 57–64.
- [33] 曹云, 孙应龙, 姜月清, 等. 黄河流域净生态系统生产力的时空分异特征及其驱动因子分析[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(11): 2101–2110.
- CAO Yun, SUN Yinglong, JIANG Yueqing, et al. Analysis on temporal-spatial variations and driving factors of net ecosystem productivity in the Yellow River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(11): 2101–2110.
- [34] 谢立军, 白中科, 杨博宇, 等. 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J]. *地学前缘*, 2023, 30(2): 447–462.
- XIE Lijun, BAI Zhongke, YANG Boyu, et al. Carbon sequestration assessment methods at home and abroad for terrestrial ecosystems: Research progress in achieving carbon neutrality[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(2): 447–462.
- [35] 陈浮, 朱燕峰, 马静, 等. 黄土高原矿区生态修复固碳机制与增汇潜力及调控[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 502–513.
- CHEN Fu, ZHU Yanfeng, MA Jing, et al. Mechanism, potential and regulation of carbon sequestration and sink enhancement in ecological restoration of mining areas in the Loess Plateau[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 502–513.
- [36] 雷少刚, 夏嘉南, 卞正富, 等. 论露天矿区近自然生态修复[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(4): 2021–2030.
- LEI Shaogang, XIA Jianan, BIAN Zhengfu, et al. Near-natural ecological restoration in open-pit mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(4): 2021–2030.
- [37] 王金满, 冯宇, 叶甜甜, 等. 基于 NbS 的全生命周期矿山生态修复理论框架及技术路径[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(1): 377–391.
- WANG Jinman, FENG Yu, YE Tiantian, et al. The theoretical framework and technical pathway for the integrated ecological restoration throughout the overall life cycle of mining based on NbS[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(1): 377–391.
- [38] QIU S, YU Q, NIU T, et al. Restoration and renewal of ecological spatial network in mining cities for the purpose of enhancing carbon Sinks: The case of Xuzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109313.
- [39] ADELI A, BROOKS J P, READ J J, et al. Post-reclamation age effects on soil physical properties and microbial activity under forest and pasture ecosystems[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(1): 20–34.
- [40] 马静, 华子宜, 尤云楠, 等. 东部平原矿区复垦土壤微生物多样性驱动土壤多功能性变化[J]. *土壤学报*, 2025, 62(2): 528–542.
- MA Jing, HUA Ziyi, YOU Yunnan, et al. The microbial diversity of reclaimed soil drives its multifunctional variation in the eastern plain mining area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(2): 528–542.
- [41] 卞正富, 于昊辰, 韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 449–459.
- BIAN Zhengfu, YU Haochen, HAN Xiaotong. Solutions to mine ecological restoration under the context of carbon[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 449–459.
- [42] 胡振琪, 肖武, 赵艳玲. 再论煤矿区生态环境“边采边复”[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 351–359.
- HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 351–359.
- [43] 李全生, 刘举庆, 李军, 等. 矿山生态环境数字孪生: 内涵、架构与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(10): 3859–3873.
- LI Quansheng, LIU Juqing, LI Jun, et al. Digital twin of mine ecological environment: Connotation, framework and key technologies[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3859–3873.
- [44] 杨崇曜, 王军, 张骁, 等. 基于自然的解决方案的生态保护修复前沿进展与实践路径研究[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(12): 2753–2767.
- YANG Chongyao, WANG Jun, ZHANG Xiao, et al. Research on frontier advances and implementation pathway of ecological conservation and restoration with nature-based solutions[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(12): 2753–2767.
- [45] ZHU Y F, WANG L P, MA J, et al. Assessment of carbon sequestration potential of mining areas under ecological restoration in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 921: 171179.