农业资源与环境学报 CSCD核心期刊 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

# 内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径

阎仲康, 曹银贵, 李志涛, 刘孝阳

引用本文:
阎仲康,曹银贵,李志涛,刘孝阳. 内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 570–582.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0713

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

铁矿生态修复区生态系统服务价值增量评估
叶尔纳尔·胡马尔汗, 马伟波, 徐向华, 迪丽努尔·托列吾别克, 方颖, 李海东
农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 594–600 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0197

内蒙古玉米主产区农业热量资源变化及其对策探讨
张宝林, 高聚林, 王志刚, 池梦雪, 赵俊灵, 郭佳, 彭健
农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 757–765 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0229

内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果
田佳榕, 马伟波, 戚旭东, 许素, 徐雁南, 李海东
农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 601–608 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0331

矿区复垦地土壤改良研究进展
赵鹏, 史兴萍, 尚卿, 谭菁, 王夕刚, 黄占斌
农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 1–14 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0805

基于土地利用的北方农牧交错区碳固定和土壤保持时空变化
常虹, 杨武, 石磊, 刘亚红, 邱晓, 伊风艳, 孙海莲
农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 484–493 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0310

关注微信公众号，获得更多资讯信息

阎仲康, 曹银贵, 李志涛, 等. 内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3):570-582.
YAN Z K, CAO Y G, LI Z T, et al. Ecological restoration of mines in eastern grassland area of Inner Mongolia, China: Key technologies and carbon reduction paths[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 570-582.

# 内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径

阎仲康[1], 曹银贵[1,2*], 李志涛[3*], 刘孝阳[3]

(1.中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2.自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 3.生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012)

**摘 要**:随着"双碳"目标的提出,我国的生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向的新阶段。内蒙古东部草原区位于我国内蒙古自治区东部,对于保障国家能源安全、生态安全和如期实现碳中和目标具有重要作用。但该区生态环境具有酷寒、半干旱、表土稀缺等特征,同时矿产资源开采引起的生态环境问题严重制约了区域能源可持续开发与生态安全,针对内蒙古东部草原区开展矿山生态修复研究十分必要。本文梳理了国内外矿山生态修复的研究历程,总结了内蒙古东部草原区矿山生态修复已有研究,归纳了内蒙古东部草原区矿山生态修复的先进技术,分析了碳中和背景下内蒙古东部草原区矿山生态修复的路径与模式,初步明确了现今内蒙古东部草原区矿山生态修复研究中存在的问题与不足,并对其未来的研究趋势进行展望,以期为今后研究内蒙古东部草原区及国内外相似地区的矿山生态修复提供参考。

**关键词**:碳中和;土地复垦;生态修复;草原矿区

**中图分类号**:X171.4 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2023)03-0570-13 **doi**: 10.13254/j.jare.2022.0713

## Ecological restoration of mines in eastern grassland area of Inner Mongolia, China: Key technologies and carbon reduction paths

YAN Zhongkang[1], CAO Yingui[1,2*], LI Zhitao[3*], LIU Xiaoyang[3]

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 3. Technical Centre for Soil, Agricultural and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

**Abstract**: With the proposal of "dual carbon" goals, China′s construction of an ecological civilization has entered a new stage with the focus on reducing carbon. The eastern grassland area of the eastern Inner Mongolia Autonomous Region plays an important role in ensuring national energy security, ecological security, and achieving the goal of "carbon neutrality" as scheduled. However, the ecological environment in this area is characterized by extreme cold, semi-arid conditions, and a scarcity of topsoil. Furthermore, the ecological environment problems caused by mineral resources exploitation seriously restrict the sustainable development of regional energy and ecological security. Therefore, it is necessary to perform research on ecological restoration of mines in the grassland area in eastern Inner Mongolia. This paper reviews the research process of mine ecological restoration at home and abroad, summarizes the existing research on mine ecological restoration and the advanced technologies of mine ecological restoration in the grassland area of eastern Inner Mongolia, and analyzes the path and mode of mine ecological restoration in the grassland area under the background of carbon neutrality. This paper preliminarily clarifies the existing problems and deficiencies in the research of mine ecological restoration in the eastern grassland area of

**收稿日期**:2022-10-10 **录用日期**:2022-12-26

**作者简介**:阎仲康(1997—),男,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为国土空间生态修复。E-mail:yzk1116@163.com
***通信作者**:曹银贵 E-mail:caoyingui1982@126.com; 李志涛 E-mail:lizhitao@tcare-mee.cn

**基金项目**:内蒙古自治区科技重大专项(KBA007007)
**Project supported**: The Science and Technology Major Project of Inner Mongolia Autonomous Region (KBA007007)

Inner Mongolia and considers the prospects of future research trends, with the goal of providing reference for future generations to study the ecological restoration of mines in these grasslands and similar areas both at home and abroad.

**Keywords**: carbon neutrality; land reclamation; ecological restoration; grassland mining area

由于化石能源不合理开发利用和土地利用变化等原因引起的气候变化是当前全世界面临的重大挑战[1-2]。为应对全球气候变化、促进低碳转型发展，2020年我国提出二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，2060年前实现碳中和[3]。“十四五”时期，我国的生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向的新阶段。

据《BP世界能源统计年鉴2020》数据显示，我国是世界上最大的煤炭生产国、消费国。据2020年国家统计局初步核算，我国煤炭消费量占能源消费总量的56.8%。煤炭使用过程中排放的$CO_2$占我国人为$CO_2$排放量的72%，占全球$CO_2$排放量的19%[4]。我国采矿过程占用损毁土地约$3.6\times10^5\ km^2$，占矿区面积的一半以上[5]。采矿活动会大量损毁土地、破坏地表植被，导致矿区碳固存能力下降甚至是丧失。矿山生态修复既是恢复矿山生态系统的必由之路，又是增强矿区碳汇能力的重要手段。

由于我国中东部地区能源的不断消耗，内蒙古的供能作用日益凸显，成为支撑我国经济社会长远发展的国家能源战略基地[6]。内蒙古东部草原区（以下简称“蒙东草原区”）煤电基地位于我国内蒙古自治区东部，地处“两屏三带”中北方防沙带的东部，在“三北”地区乃至全国的防风固沙和减碳增汇工作中作出重要贡献[7]。该区域汇集了我国呼盟、锡盟煤电基地和蒙东煤炭基地，年产能超$4\times10^8$ t，约占东北区产能的57%[8]。其中，蒙东草原区的西部锡林浩特北郊分布有胜利煤矿，中部有白音华和霍林河矿区，北部呼伦贝尔市周边有伊敏、扎赉诺尔、大雁、宝日希勒矿等。

蒙东草原区属半干旱、酷寒气候，表土厚度仅30 cm，年降水量低于400 mm，同时矿产资源开采和城市化扩张引发土地沙化、植被破坏、水土流失、地下水位下降等一系列生态问题[9]。这不但严重制约了蒙东草原区能源保障和生态屏障作用的发挥，还带来大量碳排放，不利于我国如期完成碳中和目标，如何通过生态修复使地貌景观恢复甚至优于原地貌，是蒙东草原区乃至全国生态文明建设的重大工程技术难题。

目前国内外对于城市、海洋、河湖、草原、矿山等领域的理论内涵、修复技术、效果评价等方面的研究进展已有较为全面的梳理[10-15]，但结合碳中和目标，系统归纳蒙东草原区矿山生态修复相关问题的研究仍相对欠缺。本研究试图在碳中和背景下，梳理国内外矿山生态修复研究历程，总结蒙东草原区已有研究，从生态本底问题出发归纳关键技术，分析碳中和背景下蒙东草原区矿山生态修复的路径与模式，以期为今后蒙东草原区矿山生态修复理论研究与实践提供参考借鉴。

## 1 矿山生态修复概述

### 1.1 矿山生态修复研究历程

在中国知网（CNKI）数据库中，通过关键词“矿山生态修复”进行检索，发现中文总库中共有1 864条检索结果。如图1所示，21世纪初，国内研究者开始关注该领域。2012年，生态文明建设开始提升到前所未有的高度，矿山生态修复方面的研究稳步增长。2017年5月，国土资源部等五部委联合印发《关于加快建设绿色矿山的实施意见》，矿山生态修复方面的研究也随之持续高速增长，观察近5年的发展趋势，得出结论：未来矿山生态修复方面的研究将会越来越受到重视，学者们对于这个领域的研究热情会持续提高。

为进一步探究国内外矿山生态修复领域的研究热点与发展趋势，本研究以CNKI和Web of Science核心数据库为研究载体，中文以矿山（区）生态修复、矿山（区）土地复垦、矿山（区）治理为关键词，英文以ecological restoration of mines（areas），mine（area） land reclamation，mine（area） control为关键词进行检索，筛选研究起始年份至今的期刊文献，人工排除无关主题或无作者的文献后，中文检索出1 343篇文献，英文检索出1 068篇文献。运用CiteSpace软件对检索出的全部文献进行关键词聚类分析，得到国内外矿山生态修复关键词时间线图谱（图2、图3），并在此基础上对国内外矿山生态修复的发展阶段进行对比（图4）。时间线图中右侧标签代表聚类主题，横轴代表各主题时间线，圆圈定位年份代表关键词首次出现的年份，圆圈越大说明关键词出现频次越高，连线代表该关键词在后续年份与其他关键词的共现关系。

如图2和图4所示，国内矿山生态修复的发展可划分为3个阶段：第一阶段（1986—2004年）为起步

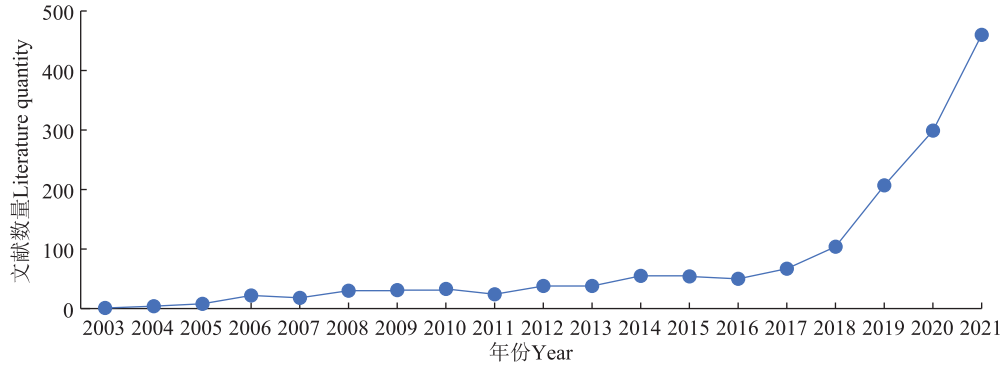


图1 国内矿山生态修复文献数量

Figure 1 Quantity of literature on mine ecological restoration in China

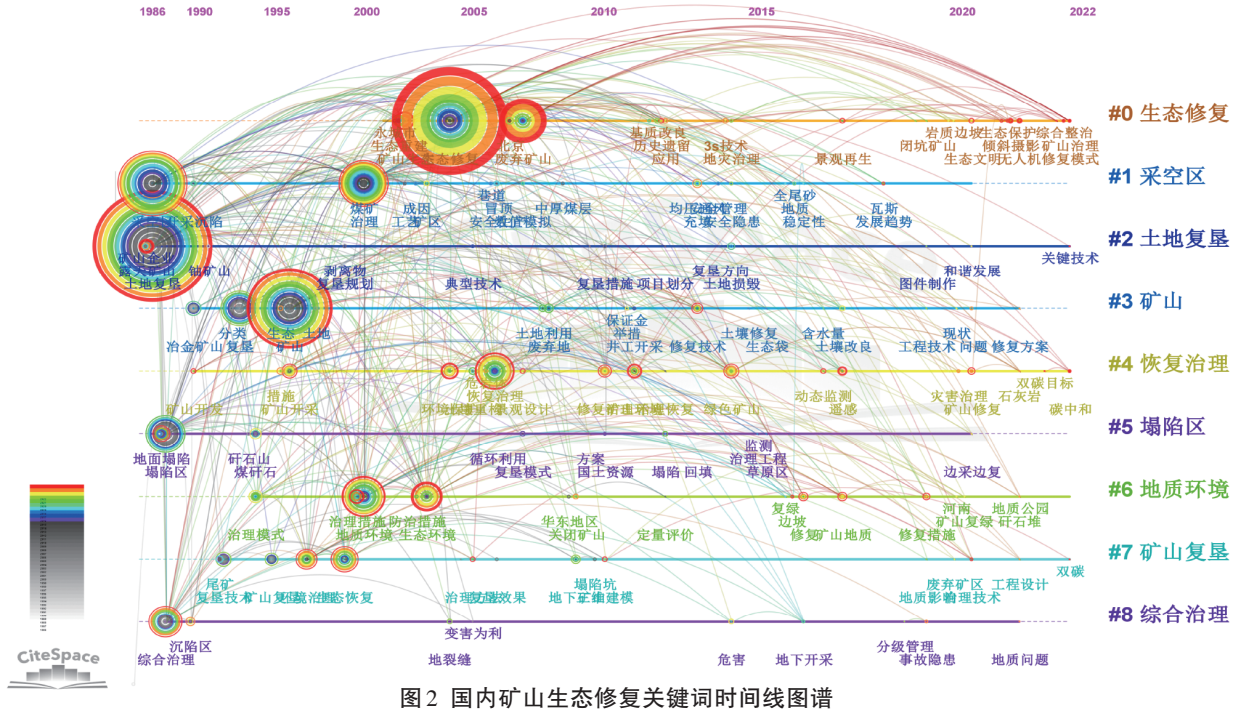


图2 国内矿山生态修复关键词时间线图谱

Figure 2 Keywords time line map of mine ecological restoration in China

期，主要关键词为土地复垦、采空区、综合治理、煤矿等，这一时期确定了本领域最早的专用术语——土地复垦，更多关注的是采空区、塌陷区的治理。1995年国家环保局组织“矿区生态环境破坏与恢复重建调查研究”，使矿山生态恢复成为研究热点；第二阶段（2004—2014年）为稳步发展期，主要关键词有生态修复、废弃矿山、地质灾害、恢复治理等，2004年“生态修复”首次出现，并取代土地复垦，成为出现频次最多、与其他主题联系最密切的节点，受到最广泛关注。本时期是矿山生态修复内涵逐步发展、完善的阶段；第三阶段（2014—2022年）为高速发展期，主要关键词有绿色矿山、遥感、无人机、倾斜摄影、碳中和等。这一时期矿山生态修复的研究主题更加多元化，学者们开始将新兴技术用于矿山生态修复领域。由2022年关键词可知，“碳中和”初次出现在矿山生态修复领域，并成为同年出现频次最高的新关键词，随着碳达峰、碳中和概念深入人心，该热点可能会受到持续关注。

如图3和图4所示，国际矿山生态修复的发展可划分为3个阶段：第一阶段（1991—2000年）为起步期，主要关键词为land reclamation，community，soil，heavy metal等，这一时期土地复垦、修复、群落、生态系统等重要概念大量出现，主要开展土壤重金属修复、土地复垦、植被群落恢复等方面的研究；第二阶段（2000—2009年）为稳步发展期，主要关键词有biodiversity，land use，forest，dynamics等，2000年ecological

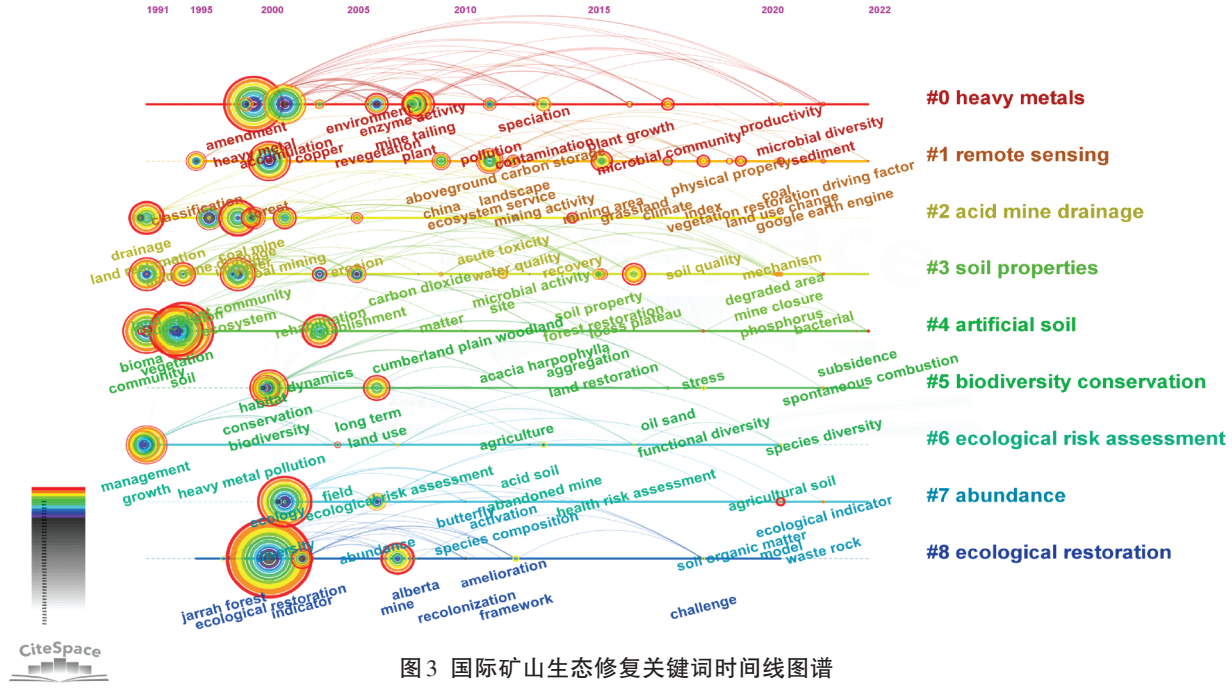


图3　国际矿山生态修复关键词时间线图谱

Figure 3　International mine ecological restoration keywords timeline map

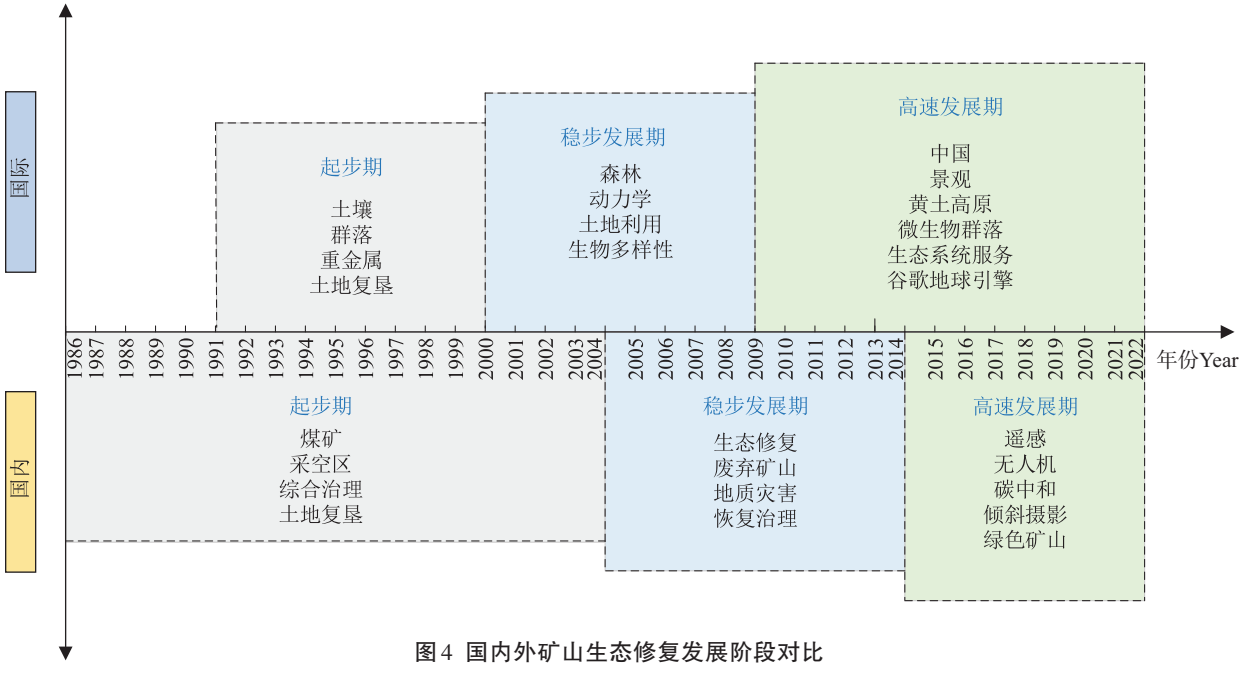


图4　国内外矿山生态修复发展阶段对比

Figure 4　Comparison of development stages of mine ecological restoration at home and abroad

restoration首次出现，同样成为国际矿山生态修复领域出现频次最多的节点。本时期研究的深度、广度持续增加，由前一阶段的土壤、植被、群落拓展到尾矿库、森林、土地利用、生物多样性方面；第三阶段（2009—2022年）为高速发展期，主要关键词有ecosystem service，microbial community，landscape等。这一时期的研究视角由单一要素发展到景观和生态系统服务等，研究尺度也加入了微观的微生物群落。关键词Google earth engine，Loess Plateau和China的出现说明国际学者们将新技术引入矿山生态修复领域，我国矿山生态修复的研究在国际上开始占有一席之地。

### 1.2　内蒙古东部草原区研究概况

在梳理总结近20年60余篇以往文献对蒙东草原区的研究后发现：①从矿区层面：目前关于宝日希勒、

胜利、白音华、伊敏等矿区的研究数据较为翔实，对于霍林河、大雁、扎赉诺尔等矿区的研究相对较少。②要素层面：对于各矿区的研究多集中在土壤理化性质的空间异质性分析、植物群落的物种组成及其空间分布特征、景观生态格局演变与评价模型的构造、生态敏感区与生态安全等级的划定等，地貌重塑和水资源保护方面的研究相对欠缺。③程序层面：多是开采后的调查、评价研究，对于开采前的规划、监测研究较少。④理论与实践结合层面：从限制性因子理论出发，当前研究集中于如何修复限制性作用最大的土壤和植被因子；在生态位理论指导下，学者对于矿区的优势种、常见种、最佳配置模式展开研究；从群落演替理论出发，蒙东草原区循序渐进地开展修复工作；将基于自然的设计理念引入蒙东草原区，开展近自然地貌重塑、仿自然植被布设等研究。蒙东草原区主要研究成果和进展如表1所示。

综上所述，前人对蒙东草原区的研究已颇具规模，但目前蒙东草原区矿山生态修复领域存在哪些先进技术还鲜有人归纳总结。

## 2　内蒙古东部草原区矿山生态修复技术

蒙东草原区大型露天矿占开采规模的90%以上，且露天开采比井工开采对生态环境的影响更大。因此在研究技术之前，首先分析了蒙东草原区矿山生态修复面临的主要难点，从而以问题为导向，探讨解决问题的关键技术。

蒙东草原区大型煤电基地的露天开采模式加上采剥工程与修复工程脱节，使得该地土壤极易发生退化，生态系统遭到极度破坏，亟需开展源头减损、过程控制、采后治理的生态减损型采-排-复一体化工艺研究[30]。

蒙东草原区煤电基地的采-排-复过程形成的传统“梯田式”内排土场占地面积大、景观破碎[31]，利用传统方法重塑的地貌在整体上未与周边自然地貌相融合，易引发表土水蚀、土地退化等问题。因此，基于师法自然（Nature-based Solutions，NbS）设计理念，研究近自然地貌重塑技术十分必要。

蒙东草原区由于表土稀缺，排土场存在大片裸露地带，严重制约矿区的土地复垦和生态修复。粉煤灰是火力发电厂的主要固体废物，排放量巨大，对环境造成污染。如何解决表土稀缺问题及合理消纳固废，对于生态修复与环境保护至关重要。

蒙东草原区露天矿排土场的覆土方式稳定性差、透水持水能力不足、养分含量低，不利于植被生长。

**表1　蒙东草原区主要研究汇总**

Table 1　Summary table of main studies in the steppe area of eastern Mongolia

| 研究对象 Object | 年份 Year | 主要研究内容 Research content | 参考文献 Reference |
|---|---|---|---|
| 地貌 | 2012 | 席莎最先对宝日希勒矿区地面塌陷的特征、分布、成因等进行分析总结，为后续的塌陷治理工作提供参考 | [16] |
| | 2019 | 李树志等对比了宝日希勒矿区3种边坡整形方式的修复效果，最终发现仿自然地貌的波浪式整形方法效果最好，填补了蒙东草原区排土场地貌重塑的空白 | [17] |
| | 2019 | 李恒等在胜利矿基于自然边坡模型构建反S型边坡，并验证其优势，丰富了国内排土场坡型重塑的研究 | [18] |
| 土壤 | 2016 | 尹璐对扎赉诺尔矿区的土地荒漠化时空演变进行研究，发现井工矿会降低荒漠化程度，为露井联采技术的应用提供支撑 | [19] |
| | 2018 | 李强等在伊敏矿区初步确定了菌根菌剂的最优施用量，为东部草原区利用菌根菌剂改良土壤提供参考 | [20] |
| | 2019 | 况欣宇在胜利矿区筛选出适用于蒙东草原区的土壤重构配方，实现了经济与生态的双赢。 | [21] |
| 植被 | 2013 | 牛星在伊敏矿区研究发现了最适合此矿区的植被模式，填补了蒙东草原区植被配置模式研究的空白 | [22] |
| | 2017 | 梁肖对霍林河矿区的研究表明，降水量是导致矿区植被覆盖度变化的主要因素 | [23] |
| | 2020 | 春风等总结了白音华矿区植被的优势种与常见种，丰富了植被重建研究 | [24] |
| | 2021 | 夏嘉南等以胜利矿区为例，提出基于对象学习的植株近自然布设方法，填补了近自然方法在蒙东草原区植被重建中应用的空白 | [25] |
| 景观生态 | 2005 | 胡振琪等在霍林河矿区利用LSMM、决策树和BP神经网络等方法，完成了草地荒漠化信息提取，为后续信息提取工作提供借鉴 | [26] |
| | 2006 | 马从安等在胜利矿区构造了露天矿区生态评价模型，提出了生态评价指标及其等级划分与赋值标准，对类似矿区生态环境评价具有指导意义 | [27] |
| | 2019 | 邢龙飞采用空间分析方法识别胜利矿区生态源地、生态廊道和生态节点，构建了用以连接破碎化的斑块，提升了景观功能 | [28] |
| | 2021 | 孟峰等在宝日希勒矿区建立了景观生态健康CVORE评价模型与景观干扰识别方法，丰富了马从安等对矿区生态评价的研究 | [29] |

植被的生长和演替与生态稳定性和景观功能密切相关，且植被可以通过吸收大气中的$CO_2$增加矿区碳汇。因此，研究植被恢复技术对于生态系统稳定性提升和碳中和目标的实现很有必要。

本文针对蒙东草原区矿山生态修复面临的难点问题，从采-排-复一体化、近自然地貌重塑、土壤构建与改良、植被恢复4个方面总结蒙东草原区矿山生态修复的关键技术及初步成果，以期为后续蒙东草原区或其他相似地区的矿山生态修复研究提供参考（图5）。

### 2.1 采-排-复一体化技术

露天矿的开采实质上是将岩土破碎成的松散土石混合体进行采-排-复，在水、温、堆载等综合作用下，对松散土石混合体进行重塑的过程。

尚涛等[32]于2001年分析了端帮采煤与采排工程的时空关系，计算得出超前剥离和滞后排土可以提高端帮采煤产量和回采率的结论，但该理论未经过生产实际检验。才庆祥等[33]于2002年提出了露天矿采矿与生态重建一体化理论，与只考虑采排对生产的影响不同，该理论将“修复”引入生产系统中统筹考量。神华准能集团项目组于2013年创造性提出了采-排-复一体化理论及技术，并在哈尔乌素露天矿进行了实地研究[34]。赵红泽等[30]于2022年提出了露天矿采-排-复一体化协同采矿技术的概念，在采-排-复一体化的基础上引入协同思想，把单个露天矿的采、排、复工作推广到露天矿群，并在卡布其露天矿群实地应用。

针对蒙东草原区，李胤达等[35]为减少运输成本，建立了适用于多种运输方式并存的露天矿采场中部搭桥技术体系，减少运输距离；尚涛等[36]为减少挖损空间，研发了靠帮开采-快速回填技术和倾斜基底内排技术，减少挖损空间约10%；李全生[7]从优化开采程序着手，针对宝日希勒矿的作业方式，提出了多煤层差异露煤的工作帮开采程序，节约运输成本，给予排土场生态修复更充足的空间。采-排-复一体化技术突破了传统方式的闭坑后再治理的局限性，实现了开采、治理同步进行，具有污染低、效率高的特点。

综上所述，国内学者对于蒙东草原区采-排-复一体化技术的研究已经初见成效，有效提高了生态修复的效率和效益。未来可将采-排-复一体化协同采矿技术引入蒙东草原区实地运用，同时将碳排放额纳入采排全过程中计算、考量，确保碳排放工作有的放矢、精准管控，实现生态修复与减碳增汇的双赢。

### 2.2 近自然地貌重塑技术

地貌重塑、土壤重构、植被重建是土地复垦与生态重建的三大技术体系，其中，地貌重塑又是后面二者的基础，直接影响甚至决定了修复区的水土保持效果。近自然地貌重塑是以矿区废弃地周边的自然地

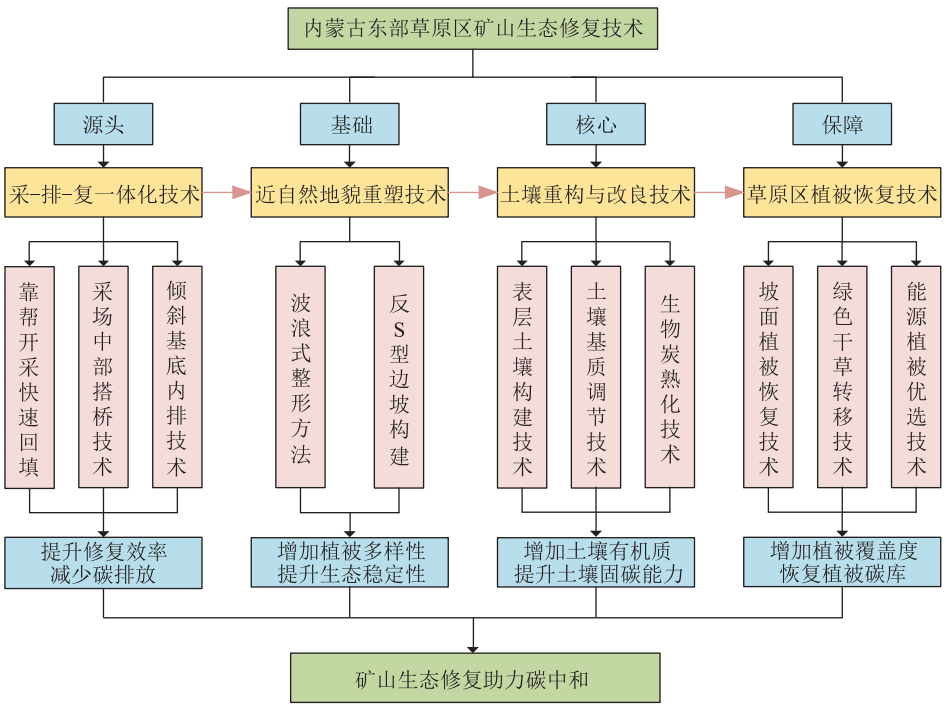


**图5 内蒙古东部草原区矿山生态修复技术逻辑及其与碳中和的联系**

Figure 5 Logic of mine ecological restoration technology and its relationship with carbon neutrality in the eastern grassland area of Inner Mongolia

貌为参照物进行重塑工作，国外学者在这方面已有深入研究，国内起步较晚，但随着NbS理念日益主流化，且与我国生态文明建设理念高度一致，国内学者也陆续开展对于近自然地貌重塑技术的研究。

为克服传统地貌重塑方法不能显著改善水质、增加植被多样性和修复后稳定性较差等弊端，国外学者开发出GeoFluv模型作为近自然地貌重塑的主要工具，并应用于美国新墨西哥州大型露天矿区的地貌重建实践[37]。重塑地貌的水质监测结果切实证明了该模型用于地貌设计是有效的[38]。在此之后，GeoFluv模型被广泛应用于采损区地貌重塑，且塑形效果在美国新墨西哥州和怀俄明州[39]、西班牙[40]、澳大利亚[41]等均得到良好检验。

李树志等[17]以宝日希勒矿为例，比较了3种边坡重塑方法的成效，最终发现仿自然地貌的波浪式整形边坡生态恢复性能和边坡稳定性最好，此研究填补了蒙东草原区排土场地貌重塑的空白。陈航[37]以胜利矿为例，提取自然地貌的特征参数，构建反S型边坡和近自然地貌，最后分别通过WEEP模型和CliDE模型模拟验证，发现近自然方法构建的边坡与地貌的水土保持能力均优于传统地貌重塑方法。

当前，国内对于近自然地貌重塑的研究主要集中于以水文为基础的毁损地构建，对矿区排土场等坡面形态重塑的研究较少，且大都停留在理论与模拟层面，实地研究较为匮乏。未来应加大对矿区排土场等的实地研究，探索如何在保证重塑地貌水土保持能力的基础上，实现重塑结果与周边自然稳定地貌“无缝”融合和降低施工成本的双赢。

### 2.3 土壤重构与改良技术

土壤重构指运用适当的措施，重新构造适宜的土壤剖面和土壤肥力条件，快速提高重构土壤生产力，优化重构土壤环境条件。土壤重构材料既包括土壤和母质，也包括粉煤灰、煤矸石等矿山废弃物。

国外对粉煤灰改良土壤的研究较早，主要涉及粉煤灰用作土壤改良剂和养料。Bulot等[42]对草原生态系统中重构土壤的微生物和有机质进行研究，认为土壤重构可以更好地维持土壤微生物活性与土壤肥力。Garampalli等[43]将不同比例的粉煤灰加入土壤，发现作物根系生物量明显提高。

国内方面，西北农林科技大学利用土壤膨胀实验证明了粉煤灰可以改良土壤结构[44]。胡振琪[45]对重构土壤的概念、理论与方法进行了研究。王金满等[46]和张振佳等[47]对黄土区重构土壤理化性质展开了深入研究。况欣宇[21]在前人研究的基础上针对蒙东草原区，利用盆栽实验的结果实例验证利用煤矸石等作为土壤重构材料切实可行，且得出表土、煤矸石及岩土剥离物以3∶3∶4比例混合、分层构建为最佳重构方法，弥补了以往研究的不足。王玲玲等[48]和王凡等[49]在况欣宇[21]的研究基础上，以生物炭施用与重构土壤化学性质及苜蓿抗旱性耦合关系为切入点进行研究，发现当生物炭的热解温度为300 ℃或400 ℃、添加量为24 g时，重构土壤组的苜蓿在干旱条件下存活率显著提高。

综上所述，在蒙东草原区利用粉煤灰等资源进行土壤重构与改良，不但能够降低粉煤灰对环境的污染，还能有效解决蒙东草原区的表土稀缺问题，符合以减量化、再利用、资源化为原则的循环经济模式。

### 2.4 草原区植被恢复技术

蒙东草原区排土场所采取的坡面植被恢复技术大多针对未经恢复的裸露坡面，对于这类坡面，研究人员设计了液压喷播植草、客土喷播、植被毯护坡、三维植被网护坡和多孔植被混凝土等多项技术[50-53]。但上述技术并不适用于已采取恢复措施、缺乏草本层的排土场坡面。对此类情形，国外学者研究发现绿色干草转移技术是单位面积产生最多种子和最多物种种类的方法，并且是恢复地物种建立最为迅速、植被恢复最为成功的方式，且恢复后的群落与种子收获区的草本群落最为相似[54-56]。蒙东草原区未来应加大对于已有恢复措施的排土场坡面植被恢复技术的研究，从而最大限度地提高草本群落的恢复能力和坡面生态稳定性。

在能源植被优选技术方面，20世纪80年代，柳枝稷作为极具潜力的能源植物受到美国能源部的关注[57-59]。20世纪90年代柳枝稷引入我国黄土高原地区，目前已在陕西、宁夏、内蒙古、吉林等地成功引种种植。高伟等[60]研究了重金属Cd、Cu对柳枝稷的耦合影响效应，结果表明柳枝稷能较好适应重金属污染的土壤。赵春桥等[61]对干旱条件下柳枝稷的生长过程开展研究，发现柳枝稷抗旱能力较好，可以适应干旱、半干旱地区的气候条件；其还研究了多种盐胁迫条件对柳枝稷生理特性的影响，发现柳枝稷具有一定耐盐碱性，且$NaHCO_3$对柳枝稷的生长限制作用最强，NaCl最弱[62]。综上所述，能源植物柳枝稷具有极佳的耐旱性、耐重金属性和耐盐碱性，是蒙东草原区植被恢复的优选物种，对蒙东草原区生态系统结构和功能恢复具有积极意义。

## 3　碳中和背景下内蒙古东部草原区矿山生态修复的路径与模式

长期的采煤活动导致矿山生态系统的结构、功能遭受破坏[63]，并对植被、土壤碳库造成剧烈扰动，影响矿区碳排放。矿山生态修复既是恢复生态系统结构功能的必然选择，也是提高矿区生态系统碳汇能力的必要路径[64]，在生态文明建设与碳中和战略双重背景下，必将迎来蓬勃的发展机会。碳中和背景下内蒙古东部草原区矿山生态修复的路径与模式如图6所示。

### 3.1　“边采边复”减少矿区碳排放

采矿业是典型的高污染、高碳排放行业，复杂的开采活动给矿山生态系统带来了大量碳排放[63]。在矿山生态修复过程中，通过采-排-复一体化可以达到源头减排的效果[65]。经过山东、安徽等地的实践验证，“边采边复”比“末端治理”可多恢复耕地10%~40%[66]，最终达到“既要金山银山，也要绿水青山”的状态。胡振琪等[67]和肖武[68]针对高潜水位矿区土地复垦提出“边采边复”概念与内涵，后经过露天矿的采-排-复一体化、井工矿边采边复等若干阶段后，边采边复的理念与技术已扩展至露天矿生态修复领域。

对于蒙东草原区而言，边采边复的核心是以降低生态损伤和提升生态修复质量为目标，科学规划覆土方式与岩土剥离方式，改变传统末端治理理念，减少土地损伤，缩短修复周期，增加复垦与固碳效益。在开采工艺方面，将绿色开采的理念和技术用于蒙东草原区，推广应用绿色开采设备，选用节能减排的开采方式，在源头减少碳排放和对周边环境的污染破坏；在空间层面上，合理安排排土场布局，减少不必要的土地压占，使作为碳源的建设用地数量尽量减少，降低碳排放；在时间层面上，提高生态修复效率，尽早内排、到界治理，及时将排土场等地类修复为草地或耕地等，使得该地块由“碳源”变“碳汇”。未来需从碳中和的角度考虑边采边复的综合效益，加强新技术、新方法与边采边复技术的融合，及时修复因采矿而受损的生态环境，获得整体价值的最大化，助力矿山行业低碳生产与绿色转型。

### 3.2　土壤重构与植被重建提高矿区碳汇能力

土壤重构是矿山生态修复的核心，其本质是采取适当的技术工艺，人为地构造土壤，使被矿山毁损的土壤得以恢复[69]。蒙东草原区土壤重构所使用的物料多为岩土剥离物、煤矸石、粉煤灰等矿山废弃物，通过土壤重构可以有效解决蒙东草原区表土稀缺的本底问题，且利用矿山固废重构土壤可以减少固废对环境的污染破坏。Reintam等[70]研究了采石场碎渣区域重构土壤有机质的形成，发现有机质在土壤重构之后不

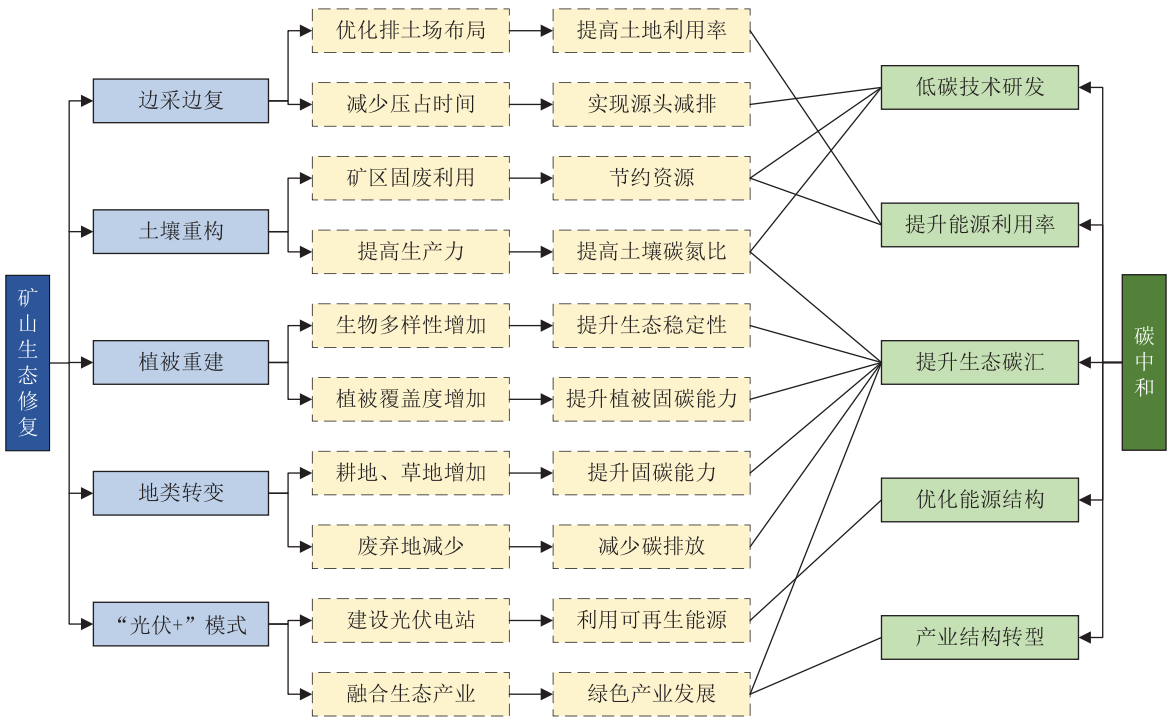


图6　矿山生态修复助力碳中和的路径与模式

Figure 6　Path and mode of mine ecological restoration to help carbon neutrality

断累积，对土壤环境的改良起到重要作用。王玲玲等[71]对胜利矿的研究表明，复垦地重构土壤的碳氮比显著大于未毁损地，且碳氮比与土壤有机质含量呈显著正相关。这说明重构后的土壤可以有效提高土壤有机质含量，且碳氮比高于未毁损地原土壤，有利于提升土壤碳库的固碳量，助力碳中和目标的实现。

植被重建是矿山生态修复的有力保障，在地貌重塑和土壤重构基础上进行先锋植物和适生植物的选择、模式配置、栽培与管护，使重建后的植被群落持续稳定[72]。王志云等[73]的研究表明，“乔灌草”模式的群落搭配，无论在提升土壤有机质还是增加生物多样性方面，效果都优于“灌草”群落和草本群落。王婷等[74]对科尔沁沙地的研究表明，樟子松固沙林在植被重建后土壤有机质含量明显提高。对于蒙东草原区而言柳枝稷是植被重建的优选物种，樟子松、沙棘、紫花苜蓿、大针茅乔灌草复合林模式的植被恢复效果最好。植被类型不同，储碳能力也不同，且植被类型还会通过影响土壤质地与理化性质而影响土壤碳库。未来的植被重建工作应将固碳能力纳入植被筛选的考核指标中。

### 3.3 土地利用类型转变使矿区“碳源”变“碳汇”

土地利用类型转变是决定陆地生态系统碳储量的关键因素，矿山生态修复改变了土地利用类型，将采矿废弃地转变为耕地、草地、林地等。杨博宇等[75]的研究表明矿区碳源包括植被退化、土壤结构破坏、土地利用类型转变和化石燃料消耗导致的碳排放，碳汇主要是排土场复垦后的重建植被与重构土壤带来的碳汇。张黎明等[76]研究发现矿区生态修复可以减少矿产资源开采导致的碳排放，修复后土地比原地貌的碳汇能力显著增强。Anderson等[77]研究发现在干旱少雨的矿区，草地在生态修复初期的土壤碳固存优于林地和耕地。杨元合等[78]的研究表明，森林是陆地碳汇的主体，灌丛、湿地生态系统和农田土壤整体表现出碳汇功能，但草地的碳源、汇功能尚不明确。戴尔阜等[79]研究发现，2001—2012年内蒙古草原的净碳总量达到0.55 Pg，碳汇区面积占草地总面积的60.28%，固碳潜力巨大。根据蒙东草原区的自然条件，未来的矿山生态修复工作可将废弃地优先修复为耕地、草地等，获得经济与固碳效益的最优解。

总体来说，多数学者认为将工矿用地或废弃地转变为草地或耕地基本表现为碳汇[80-81]。故矿山生态修复后土地利用类型的转变，可以促使矿山生态系统由“碳源”变“碳汇”，且随着生态修复年限增加，矿区土地固碳能力不断增加，甚至能优于修复前的原地貌，推动实现碳中和目标[75]。

### 3.4 矿山生态修复的“光伏+”模式

目前，清洁能源约占我国能源结构的25%，但要实现到2060年占80%的目标，还需要尽快调整能源结构，提高清洁能源占比，这也是未来矿山生态修复的新切入点。

我国煤矿区土地资源丰富，通过在采煤沉陷区建设光伏电站，可以利用太阳能等可再生能源治理采煤沉陷区，有效优化当地能源产业结构[82]。在塞尔维亚的生态脆弱地区，利用光伏发电可以替代43%的火力发电量，每年可以减少$1.2\times10^6$ t $CO_2$排放量[83]。在内蒙古地区，韩梦瑶等[84]的研究表明，到2030年集中式光伏电站累计减排量可达$1.2\times10^8$ t，减碳效益显著。Leon等[85]对“光伏+番茄”种植模式的$CO_2$排放量进行测算，发现该模式$CO_2$排放量小于传统的种植模式。吴川东等[86]对干旱、半干旱区的研究表明，大型光伏设施对局地的植被种群密度和固碳能力都有所促进。刘昌华等[87]结合扎赉诺尔矿排土场的实际情况，拟定了将其复垦为中草药基地的基本方案，预计年利润为10 069.39万元，达到既改善生态环境又创造经济效益的目的。

故笔者认为未来的蒙东草原区矿山生态修复可以实行“光伏+”模式，因地制宜地发展“光伏+旅游”“光伏+农业”“光伏+草牧”等多种模式。这种新的修复模式，一方面可以减少火力发电量，推动当地能源结构优化调整；另一方面可以增加本地居民收入，促使传统的高耗能企业转型，同时“光伏+”修复模式可能比传统的单一发展模式的碳减排效益更好，最终实现生态与经济双赢。

## 4 结论与展望

当前，我国的生态文明建设已进入以降碳为重点战略方向的新阶段。蒙东草原区对于保障国家能源安全、生态安全和如期实现碳中和目标具有重要作用。本文在碳中和视角下，首先梳理国内外矿山生态修复的研究历程；其次对蒙东草原区矿山生态修复过往研究进行总结；再次对蒙东草原区矿山生态修复的关键技术等进行对比总结；最后对碳中和背景下蒙东草原区矿山生态修复的路径和模式进行探讨，以期为蒙东草原区及国内外相似地区的矿山生态修复研究提供参考。

目前，学界对于生态修复的研究已经初具规

模,但针对蒙东草原区矿山生态修复的研究仍显不足,故提出当下研究的不足与未来重点研究方向:

(1)矿山生态修复目标更多考虑的是能否恢复到可供利用的状态,对于节能、减排、增汇重视不足。未来应丰富目标体系,将减碳增汇效果纳入矿山生态修复评价指标中统筹考量,加强全过程碳管理,建立科学的碳源/汇核算体系,加强矿区碳排放和碳固存影响因素研究。

(2)蒙东草原区矿山生态修复基础理论研究有待深入,未来应加快建立基于蒙东草原区矿山生态修复本底状况且面向碳中和的生态修复理论体系。虽然矿山生态修复的相关名词术语繁多,但本质都是强调对环境的保护和更好地为人类利用,重点是对内涵的认知以及能够在实践中得到检验和发展。

(3)我国矿山生态修复面临修复后的生态系统结构和功能稳定性较差、极易退化等问题,同时缺乏长时序的监测及适宜性评价,未来应开展多学科、多领域的合作,对修复后的矿山生态系统进行长期、系统的观测及适宜性评价,建立科学、合理、可操作的评价体系。

(4)我国矿山生态修复的责任主体是政府,矿山生态修复的资金缺口较大。未来应按照"谁修复,谁受益"的原则吸引社会资本参与矿山生态修复,构建矿山生态修复投融资新模式,如将矿山生态修复与土地增减挂钩,与碳交易市场相衔接,提高社会资本参与的积极性。

**参考文献:**


[1] HUANG J P, YU H P, HAN D L, et al. Declines in global ecological security under climate change[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 10651.

[2] ALLEN M R, FRAME D J, HUNTINGFORD C, et al. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne[J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1163-1166.

[3] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(3版). XI J P. Statement at the general debate of the 75th session of the United Nations general assembly[N]. People's Daily, 2020-09-23(3rd Edition).

[4] WANG Q, LI R R. Journey to burning half of global coal: Trajectory and drivers of China's coal use[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 341-346.

[5] 梁天昌, 欧莉莎, 张朝玉. 矿山废弃地生态修复技术研究[J]. 环保科技, 2021, 27(5): 59-64. LIANG T C, OU L S, ZHANG C Y. Research on ecological restoration technology of abandoned lands of mines [J]. *Environmental Protection and Technology*, 2021, 27(5): 59-64.

[6] 马一丁, 付晓, 田野, 等. 锡林郭勒盟煤电基地开发生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4505-4510. MA Y D, FU X, TIAN Y, et al. Analysis of the ecological vulnerability of the coal-electricity base area in Xilinguole League[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4505-4510.

[7] 李全生. 东部草原区大型煤电基地开发的生态影响与修复技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3625-3635. LI Q S. Progress of ecological restoration and comprehensive remediation technology in large-scale coal-fired power base in the eastern grassland area of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3625-3635.

[8] 李全生. 东部草原区煤电基地开发生态修复技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7049-7053. LI Q S. Research on ecological restoration technology of coal-power base in eastern steppe of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7049-7053.

[9] 马永茂, 鞠兴军. 呼伦贝尔市矿山地质环境问题及防治措施[J]. 露天采矿技术, 2012(1): 85-88. MA Y M, JU X J. Mine geological environment problems and prevention measures in Hulunbuir City[J]. *Opencast Mining Technology*, 2012(1): 85-88.

[10] 高吉喜, 杨兆平. 生态功能恢复:中国生态恢复的目标与方向[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(1): 1-6. GAO J X, YANG Z P. Restoration of ecological functions: Goal and orientation of ecological restoration in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(1): 1-6.

[11] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 等. 国土空间生态修复布局研究进展[J]. 地理科学进展, 2021, 40(11): 1925-1941. WANG C X, LIU Y X, YU C Y, et al. Research progress on the arrangement of territorial ecological restoration[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(11): 1925-1941.

[12] 徐菲, 王永刚, 张楠, 等. 河流生态修复相关研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 515-520. XU F, WANG Y G, ZHANG N, et al. Advances in the assessment of river ecological restoration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 515-520.

[13] 陈克亮, 吴侃侃, 黄海萍, 等. 我国海洋生态修复政策现状、问题及建议[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 170-178. CHEN K L, WU K K, HUANG H P, et al. Marine ecological restoration policies in China: Status, problems and suggestions[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(1): 170-178.

[14] 李锋, 马远. 城市生态系统修复研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9144-9153. LI F, MA Y. Research progress of urban ecosystem restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(23): 9144-9153.

[15] 陈敏, 张大超, 朱清江, 等. 离子型稀土矿山废弃地生态修复研究进展[J]. 中国稀土学报, 2017, 35(4): 4461-468. CHEN M, ZHANG D C, ZHU Q J, et al. Ionic rare earth mine of abandoned land of ecological restoration of research progress[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2017, 35(4): 461-468

[16] 席莎. 内蒙古自治区煤炭矿区地面塌陷严重程度分析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2012. XI S. Severity analysis of coal mine ground subsidence in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012.

[17] 李树志, 郭孝理, 李学良, 等. 我国东部草原区露天矿排土场仿自然地貌土地整形方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3636-3643. LI S Z, GUO X L, LI X L, et al. Land reshaping method of imitating natural geomorphology for open-pit mine dump in eastern grassland area of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3636-

3643.

[18] 李恒, 雷少刚, 黄云鑫, 等. 基于自然边坡模型的草原煤矿排土场坡形重塑[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12):3830-3838. LI H, LEI S G, HUANG Y X, et al. Reshaping slope form of grassland coal mine dump based on natural slope model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12):3830-3838.

[19] 尹璐. 扎赉诺尔矿区土地利用格局及其土地退化演变分析[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016. YIN L. The analysis of land use and degradation changes in Zhalainur mining area[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2016.

[20] 李强, 刘利军. 菌根菌对伊敏矿区土壤性状及披碱草生长的影响[J]. 露天采矿技术, 2018, 33(2):89-93. LI Q, LIU L J. Effects of mycorrhizal fungus on soil properties and growth of elymus in Yimin mining area[J]. *Opencast Mining Technology*, 2018, 33(2):89-93.

[21] 况欣宇. 基于采矿固废的东部草原表土稀缺矿区土壤重构试验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020. KUANG X Y. Research on soil reconstruction of eastern grassland surface scarce mining area based on mining solid waste[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing), 2020.

[22] 牛星. 伊敏露天煤矿废弃地植被恢复及其效果研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013. NIU X. Studies on revegetation and restoration effects of Yimin opencast mining wasteland[J]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2013.

[23] 梁肖. 霍林河矿区植被覆盖度信息提取及时空变化分析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017. LIANG X. Fractional vegetation cover information extraction and analysis of temporal and spatial variation in Huolinhe open-cast coalmine[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing), 2017.

[24] 春风, 包钢, 张卫青, 等. 白音华矿区草地群落主要物种组成及空间分布[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10):3395-3403. CHUN F, BAO G, ZHANG W Q, et al. Composition and spatial distribution of main species in grassland community of Baiyinhua mining area, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10):3395-3403.

[25] 夏嘉南, 李恒, 雷少刚, 等. 胜利矿区周边自然草原坡面植被分布模拟及复垦应用[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9):3007-3016. XIA J N, LI H, LEI S G, et al. Simulation of vegetation distribution on natural grassland slopes around Shengli mining area and its application in reclamation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(9):3007-3016.

[26] 胡振琪, 杨玲, 王广军. 草原露天矿区草地沙化的遥感分析——以霍林河矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1):9-13. HU Z Q, YANG L, WANG G J. Research on desertification of grassland in Prairie coalmine based on remote sensing data:Case study of Huolinhe coalmine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(1):9-13.

[27] 马从安, 王启瑞. 大型露天矿区生态评价模型研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2006(4):446-451. MA C A, WANG Q R. Ecological evaluation model for large opencast mine and its application[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006(4):446-451.

[28] 邢龙飞. 基于GIS的露天矿区景观生态网络格局研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019. XING L F. Study on landscape ecological network pattern of open-pit mining area based on GIS[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2019.

[29] 孟峰, 张周爱, 陈树召. 宝日希勒矿区煤炭资源开发的生态环境影响评价[J]. 中国煤炭, 2021, 47(9):16-25. MENG F, ZHANG Z A, CHEN S Z. Ecological environment impact assessment of coal resources development in Baorixile mining area[J]. *China Coal*, 2021, 47(9):16-25.

[30] 赵红泽, 郭锦桦, 刘元旭, 等. 再论露天矿群开采-采排复一体化协同采矿技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2):47-55. ZHAO H Z, GUO J H, LIU Y X, et al. Discussion on coordination of open-pit mine group mining and integration of mining-dumping-reclaiming[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2):47-55.

[31] 夏嘉南, 李根生, 卞正富, 等. 水文保留曲面下草原露天矿内排土场地貌近自然重塑[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7):2756-2767. XIA J N, LI G S, BIAN Z F, et al. Reshaping of near-natural landform of the internal dump in the grassland open-pit mine based on HPCS[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7):2756-2767.

[32] 尚涛, 舒继森, 才庆祥, 等. 露天矿端帮采煤与露天采排工程的时空关系[J]. 中国矿业大学学报, 2001(1):29-31. SHANG T, SHU J S, CAI Q X, et al. Space time relationship between end slope coal extraction and dumping and mining of open pits[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2001(1):29-31.

[33] 才庆祥, 马从安, 韩可琦, 等. 露天煤矿生产与生态重建一体化系统模型[J]. 中国矿业大学学报, 2002(2):55-58. CAI Q X, MA C A, HAN K Q, et al. Integrative model of open-pit mine production and ecological reconstruction[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002(2):55-58.

[34] 周伟, 罗怀廷, 才庆祥, 等. 生态减损型采排复一体化理论与技术[R]. 鄂尔多斯:神华准格尔能源集团有限责任公司, 2020. ZHOU W, LUO H T, CAI Q X, et al. Theory and technology of mining-dumping-reclaiming of ecological impairment type[R]. Erdos: Shenhua Group Zhungeer Energy Co., Ltd., 2020.

[35] 李胤达, 韩流, 尚涛, 等. 近水平煤层露天矿中间搭桥高度研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8):45-52. LI Y D, HAN L, SHANG T, et al. Study on height of pit-middle bridge in open-pit mine with flat seam deposit[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8):45-52.

[36] 尚涛, 韩流, 舒继森, 等. 节地减损开采模式下边坡结构及应力发展规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12):3644-3654. SHANG T, HAN L, SHU J S, et al. Slope structure and stress development rule under mining mode of land saving and ecological detraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12):3644-3654.

[37] 陈航. 草原露天煤矿内排土场近自然地貌重塑模拟研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019. CHEN H. Research on near-natural landform reshaping simulation of inner dump of the open-pit coal mine in grassland areas:A case of Shengli No. 1 open-pit coal mine[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2019.

[38] BUGOSH N, EPP E. Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic reclamation watersheds at La Plata mine[J]. *Catena*, 2019, 174:383-398.

[39] FLEISHER K R, HUFFORD K M. Assessing habitat heterogeneity and vegetation outcomes of geomorphic and traditional linear-slope methods in post-mine reclamation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255:109854.

[40] ZAPICO I, LARONNE J B, SANCHEZ CASTILLO L, et al. Drainage network evolution and reconstruction in an open pit Kaolin mine at the edge of the Alto Tajo natural park[J]. *Catena*, 2021, 204:105392.

[41] MASAREI M I, ERICKSON T E, MERRITT D J, et al. Engineering restoration for the future[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 159:106103.

[42] BULOT A, PROVOST E, DUTOIT T. A comparison of different soil transfer strategies for restoring a Mediterranean steppe after a pipeline leak(La Crau plain, south-eastern France)[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71:690-702.

[43] GARAMPALLI R, DEENE S, REDDY C N Infectivity and efficacy of *Glomus aggregatum* and growth response of *Cajanus cajan*(L.) Millsp. in flyash amended sterile soil[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2005, 26(4):705-708.

[44] 霍晓君. 配施粉煤灰等三种废弃物改良包头砂化土壤生态特性研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2006. HUO X J. Study on the soil ecosystem of amended with mixture of characterization research of three solid wastes in Baotou City, Inner Mongolia[D].Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2006.

[45] 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 Z Q. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7):2499-2515.

[46] 王金满, 张萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4):230-238. WANG J M, ZHANG M, BAI Z K, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(4):230-238.

[47] 张振佳, 曹银贵, 王舒菲, 等. 平朔黄土露天矿区复垦地表层土壤微生物与酶活性分析[J]. 生态学报, 2021, 41(1):110-123. ZHANG Z J, CAO Y G, WANG S F, et al. Characteristics and differences of surface soil microbial population and enzyme activities in opencast mining area of Pingshuo[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1):110-123.

[48] 王玲玲, 况欣宇, 曹银贵, 等. 内蒙古草原露天矿区复垦地重构土壤碳氮比差异及影响因素研究[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(6):8-12. WANG L L, KUANG X Y, CAO Y G, et al. Study on difference and influencing factors of soil carbon and nitrogen ratio in reclaimed land of Inner Mongolia grassland open-pit mining area[J]. *Opencast Mining Technology*, 2020, 35(6):8-12.

[49] 王凡, 廖娜, 曹银贵, 等. 基于生物炭施用的土壤改良研究进展[J]. 新疆环境保护, 2020, 42(2):12-23. WANG F, LIAO N, CAO Y G, et al. Research advances in biochar application on soil improvement[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2020, 42(2):12-23.

[50] 吴和政, 郑薇. 我国矿山生态环境及生态恢复技术的现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007(S1):35-37. WU H Z, ZHENG W. The situation of eco-environment and its resumption techniques in mining area of our country[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007(S1):35-37.

[51] 陈俊, 陈昊, 潘艺华. 我国边坡绿化技术的发展及应用现状[J]. 内蒙古科技与经济, 2020(10):71-72, 74. CHEN J, CHEN H, PAN Y H. The development and application of slope revegetation technology in China[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2020(10):71-72, 74.

[52] 王丽萍. 客土喷播技术在乌兰察布地区退化草原生态修复中的应用[J]. 当代畜禽养殖业, 2021(6):48-49. WANG L P. Application of soil spraying technique in ecological restoration of degraded grassland in Ulanqab area[J]. *Modern Animal Husbandry*, 2021(6):48-49.

[53] 张贵. 生态多孔混凝土孔隙结构与植被生长规律的结构相容性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2018. ZHANG G. The research on the compatibility of pore structure and laws of vegetation growth in eco-porous concrete[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.

[54] TOEROEK P, MIGLECZ T, VALKO O, et al. Fast restoration of grassland vegetation by a combination of seed mixture sowing and low-diversity hay transfer[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44:133-138.

[55] KLIMKOWSKA A, KOTOWSKI W, VAN DIGGELEN R, et al. Vegetation re-development after fen meadow restoration by topsoil removal and hay transfer[J]. *Restoration Ecology*, 2010, 18(6):924-933.

[56] BISCHOFF A, HOBOY S, WINTER N, et al. Hay and seed transfer to re-establish rare grassland species and communities: How important are date and soil preparation?[J]. *Biological Conservation*, 2018, 221: 182-189.

[57] GUO Z P, GAO Y N, CAO X L, et al. Phytoremediation of Cd and Pb interactive polluted soils by switchgrass(*Panicum virgatum* L.)[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(14):1486-1496.

[58] WANG Q Z, GU M Y, MA X M, et al. Model optimization of cadmium and accumulation in switchgrass (*Panicum virgatum* L.): Potential use for ecological phytoremediation in Cd-contaminated soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(21): 16758-16771.

[59] PLECHA S, HALL D, TIQUIA-ARASHIRO S M. Screening for novel bacteria from the bioenergy feedstock switchgrass(*Panicum virgatum* L.)[J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(13/14):1895-1904.

[60] 高伟, 归静, 刘娟, 等. 重金属Cd、Cu以及干旱胁迫对柳枝稷的影响分析[J]. 家畜生态学报, 2016, 37(9):65-70. GAO W, GUI J, LIU J, et al. Effects of Cd, Cu and drought on switchgrass(*Panicum virgatum* L.)[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2016, 37(9): 65-70.

[61] 赵春桥, 陈敏, 侯新村, 等. 干旱胁迫对柳枝稷生长与生理特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3):126-130. ZHAO C Q, CHEN M, HOU X C, et al. Effect of drought stress on the growth and physiological characteristics of *Panicum virgatum* L.[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3):126-130.

[62] 赵春桥, 李继伟, 范希峰, 等. 不同盐胁迫对柳枝稷生物量、品质和光合生理的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(19):6489-6495. ZHAO C Q, LI J W, FAN X F, et al. Effects of salt stress on biomass, quality, and photosynthetic physiology in switchgrass[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19):6489-6495.

[63] 高云飞, 王义, 王国青, 等. "双碳"目标下煤炭企业绿色矿山建设路径探究[J]. 中国煤炭, 2022, 48(1):16-20. GAO Y F, WANG Y, WANG G Q, et al. Exploring on the construction paths to green mine in coal enterprises towards the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. *China Coal*, 2022, 48(1):16-20.

[64] 郭冬艳, 杨繁, 高兵, 等. 矿山生态修复助力碳中和的政策建议[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(10):50-54. GUO D Y, YANG F, GAO B, et al. Policy suggestions for mine ecological restoration contributing to carbon neutrality[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2022, 48(1):16-20.

[65] 张媛. 煤炭开采对矿区生态系统的碳排放效应研究[D]. 晋中：山西农业大学, 2019. ZHANG Y. Study on carbon emission effect of coal mining in mining area ecosystem[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019.

[66] 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 Z Q, XIAO W, ZHAO Y L. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 351-359.

[67] 胡振琪, 肖武, 王培俊, 等. 试论井工煤矿边开采边复垦技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 301-307. HU Z Q, XIAO W, WANG P J, et al. Concurrent mining and reclamation for underground coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(2): 301-307.

[68] 肖武. 井工煤矿区边采边复的复垦时机优选研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京), 2012. XIAO W. Optimization of reclamation time for concurrent mining and reclamation in underground coal mining area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2012.

[69] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤, 2005(1): 8-12. HU Z Q, WEI Z Y, QIN P. Concept of and methods for soil reconstruction in mined land reclamation[J]. *Soils*, 2005(1): 8-12.

[70] REINTAM L, KAAR E, ROOMA I. Development of soil organic matter under pine on quarry detritus of open-cast oil-shale mining[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 171(1): 191-198.

[71] 王玲玲, 况欣宇, 曹银贵, 等. 内蒙古草原露天矿区复垦地重构土壤碳氮比差异及影响因素研究[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(6): 8-12. WANG L L, KUANG X Y, CAO Y G, et al. Study on difference and influencing factors of soil carbon and nitrogen ratio in reclaimed land of Inner Mongolia grassland open-pit mining area[J]. *Opencast Mining Technology*, 2020, 35(6): 8-12.

[72] 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 Z K, ZHOU W, WANG J M, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. *China Land Science*, 2018, 32(11): 1-9.

[73] 王志云, 陆耀东, 温达志, 等. 不同植被恢复模式对生物多样性及土壤有机质的影响[J]. 中国城市林业, 2009, 7(5): 45-47. WANG Z Y, LU Y D, WEN D Z, et al. Impacts of different models of vegetation restoration on biodiversity and soil organic matters[J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2009, 7(5): 45-47.

[74] 王婷, 吕刚, 魏忠平, 等. 科尔沁沙地南缘樟子松固沙林更新迹地土壤理化特性演变研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1332-1338. WANG T, LÜ G, WEI Z P, et al. Evolution of soil physicochemical characteristic in regeneration site with *Pinus sylvestris* var. Mongolica in the south edge of Horqin sandy land[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(6): 1332-1338.

[75] 杨博宇, 白中科. 碳中和背景下煤矿区土地生态系统碳源/汇研究进展及其减排对策[J]. 中国矿业, 2021, 30(5): 1-9. YANG B Y, BAI Z K. Research advances and emission reduction measures in carbon source and sink of land ecosystems in coal mining area under the carbon neutrality[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(5): 1-9.

[76] 张黎明, 张绍良, 侯湖平, 等. 矿区土地复垦碳减排效果测度模型与实证分析[J]. 中国矿业, 2015, 24(11): 65-70. ZHANG L M, ZHANG S L, HOU H P, et al. Evaluation model and empirical study of carbon emission reduction effect from mining land reclamation[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(11): 65-70.

[77] ANDERSON J D, INGRAM L J, STAHL P D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2): 387-397.

[78] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学：生命科学, 2022, 52(4): 534-574. YANG Y H, SHI Y, SUN W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Scientia Sinica(Vitae)*, 2022, 52(4): 534-574.

[79] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 21-24. DAI E F, HUANG Y, WU Z, et al. Analysis of spatio-temporal features of a carbon source/sink and its relationship to climatic factors in the Inner Mongolia grassland ecosystem[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 21-24.

[80] 唐洪松, 马惠兰, 苏洋, 等. 新疆不同土地利用类型的碳排放与碳吸收[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 486-492. TANG H S, MA H L, SU Y, et al. Carbon emissions and carbon absorptions of different land use types in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 486-492.

[81] 张梅, 赖力, 黄贤金, 等. 中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究[J]. 资源科学, 2013, 35(4): 792-799. ZHANG M, LAI L, HUANG X J, et al. The carbon emission intensity of land use conversion in different regions of China[J]. *Resources Science*, 2013, 35(4): 792-799.

[82] 白淑娟, 陈华锋, 李林林. 采煤沉陷区建造光伏电站关键技术分析[J]. 低碳世界, 2022, 12(1): 49-51. BAI S J, CHEN H F, LI L L. Analysis of key technology of building photovoltaic power station in coal mining subsidence area[J]. *Low Carbon World*, 2022, 12(1): 49-51.

[83] DOLJAK D, POPOVIĆ D, KUZMANOVIĆ D. Photovoltaic potential of the city of Požarevac[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73: 460-467.

[84] 韩梦瑶, 熊焦, 刘卫东. 中国光伏发电的时空分布、竞争格局及减排效益[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1338-1351. HAN M Y, XIONG J, LIU W D. Spatio-temporal distribution, competitive development and emission reduction of China's photovoltaic power generation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1338-1351.

[85] LEON A, ISHIHARA K N. Assessment of new functional units for agrivoltaic systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 226: 493-498.

[86] 吴川东, 苏泽兵, 刘鹄, 等. 干旱、半干旱区光伏发电设施的生态-水文效应研究评述[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 690-701. WU C D, SU Z B, LIU H, et al. Eco-hydrological effects of photovoltaic power generation facilities on dryland ecosystems: A review[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(3): 690-701.

[87] 刘昌华, 胡振琪, 谢宏全, 等. 扎赉诺尔露天煤矿排土场复垦与中草药基地建设初探[J]. 中国煤炭, 2004(7): 47-48. LIU C H, HU Z Q, XIE H Q, et al. A preliminary study on reclamation of Zhalainur open pit coal mine drainage field and construction of herbal medicine base[J]. *China Coal*, 2004(7): 47-48.