绿色矿山建设碳源/汇与减排增汇研究进展

王金满[1,2]，杨　曼[1]，刘　彪[1]，朱秋萍[1]

(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)

摘　要: 为应对长期以来矿业开采导致的环境问题，绿色矿山理念及配套政策逐步发展。碳达峰碳中和目标导向下，绿色矿山倡导低碳化生产、生态开采等新的发展要求。为探究新时期绿色矿山建设在节能减排目标下的重要方向和关键问题，助力碳中和目标与绿色矿山建设的协同发展，该研究以绿色矿山、碳源/汇与减排增汇为关键词开展文献计量分析，总结“双碳”目标下绿色矿山建设内涵与要求，分析绿色矿山建设背景下碳源/汇与减排增汇研究进展，梳理矿区碳源与碳汇核算方法，探究绿色矿山减排增汇策略。得出：绿色矿山在理论与应用方面均具有较为丰富的研究及实践成果，具有良好基础以面对新的发展挑战；绿色矿山现存管理方案与考评体系成果完整，整体偏定性和基础推荐性要求；矿山碳足迹核算中，基于生命周期理念、采用排放因子法的核算模式已较为成熟，但在生命周期划分与核算因子选取过程中仍需慎重，注意加强因子的本地化选取；针对减排增汇目标，绿色矿山在策略上需重视能源与技术视角。在“双碳”目标下，当前绿色矿山相关验收标准在减排方面的关注度有待增强，指标体系的定量化程度与执行力有待提高；煤炭矿山的碳足迹核算与减排潜力分析是未来绿色矿山研究的重点之一；矿山减排研究中，由复垦产生的碳源与碳汇核算及矿山全生命周期的减排方案设计需得到更多关注。

关键词: 碳达峰与碳中和; 绿色矿山; 碳足迹; 碳源; 碳汇

中图分类号: TD212　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−9993(2024)03−1597−14

Carbon sources/sinks and emission reduction and sink enhancement in green mining

WANG Jinman[1,2], YANG Man[1], LIU Biao[1], ZHU Qiuping[1]

(1.*School of Land Science and Technology*, *China University of Geosciences*, *Beijing*　100083, *China*; 2.*Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing*　100035, *China*)

Abstract: In response to the long-standing environmental problems caused by mining, some green mining concepts and policies have been gradually developed. Nowadays, under the goal of carbon peaking and carbon neutrality, green mining is facing some new requirements such as low carbon production and ecological mining. It is necessary to explore the critical directions and key issues of green mining in the new era under the goal of energy saving and emission reduction, and to help the synergistic development of carbon neutrality and green mining. Taking green mining, carbon sources/sinks, emission reduction and sink enhancement as key focuses, through literature review and inductive analysis, the connotation and requirements of green mining under the “dual carbon” goal were summarized, and the research progress on carbon sources/sinks and emission reduction and sink enhancement under the background of green mining was analyzed, the research techniques related to carbon source and carbon sink accounting in mining areas were reviewed, and the strategies

收稿日期: 2023−11−28　**修回日期:** 2023−12−28　**责任编辑:** 韩晋平　**DOI:** 10.13225/j.cnki.jccs.XH23.1628

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42277474)

作者简介: 王金满 (1979—), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: wangjinman@cugb.edu.cn

通讯作者: 杨　曼 (1999—), 女, 河南南阳人, 硕士研究生。E-mail: yangman199911@163.com

引用格式: 王金满, 杨曼, 刘彪, 等. 绿色矿山建设碳源/汇与减排增汇研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1597−1610.
WANG Jinman, YANG Man, LIU Biao, et al. Carbon sources/sinks and emission reduction and sink enhancement in green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1597−1610.

移动阅读

for the reduction of emission and increase of sink in green mining were explored. Green mining research has achieved abundant theoretical and practical results, and has a good foundation to face new development challenges. The existing management programs and assessment systems of green mining is complete, while the overall system is qualitative with basic recommended requirements. The method of accounting for the carbon footprint of mines based on the life cycle concept and the IPCC method is relatively mature, but some cautions are still needed in the process of life cycle division and accounting factor selection. Green mining should focus on energy and technology aspects to achieve the goal of emission reduction and sink enhancement. Under the background of "carbon peaking and carbon neutrality", the attention of green mining related acceptance standards in energy saving and emission reduction needs to be enhanced, and the degree of quantification and enforceability of the index systems needs to be improved. The coal industry is crucial to both the carbon neutrality target and the green mining development, and needs to strengthen the carbon footprint accounting and emission reduction potential analysis of coal mines. In the study of mine emission reduction, more attention needs to be paid to the analysis of carbon source and carbon sink accounting generated by the reclamation and the scheme design for emission reduction in the whole life cycle of the mine.

Key words: carbon peaking and carbon neutrality; green mining; carbon footprint; carbon source; carbon sink

能源是国家繁荣和经济可持续发展的基础和支撑,在过去几十年中,我国国民经济与矿业发展之间始终保持着一种唇齿相依的依赖关系[1-3]。然而矿产开采长期以来都被视为对环境的掠夺行为,经过半个多世纪的大规模资源开采 (其中很长时期是超负荷生产和低端粗放式开采),我国矿业特别是煤炭行业遗留下非常多的矿山环境问题,产生了水土流失、地质地貌破坏、大气污染等诸多环境问题[4]。中国作为世界第一产煤大国,为了解决矿业发展中日渐突出的经济与环境、短期效益与长远发展的矛盾,逐渐形成了绿色开采理念和绿色矿山政策。绿色矿山理念在 21 世纪不断发展升级,逐渐成为平衡矿业经济与环境矛盾的重要方式和国家绿色发展政策的重要部分。时至今日,绿色矿山理念仍不断在新的社会形势下丰富和发展。

当下,应对气候变化、能源危机已成为全球共识,其中碳达峰碳中和 (以下简称"双碳") 问题备受关注。自 2015 年《巴黎协定》提出温控 2 ℃,力争实现 1.5 ℃的目标,要求各缔约方自主减排后,多个国家陆续作出碳中和目标承诺。据统计,截至 2022 年 6 月底,已有 6 个国家自主实现净零,有 126 个国家或地区陆续从法律规定 (17 个)、政策宣示 (32 个)、发表声明与承诺 (18 个)、或提议讨论层面 (59 个) 提出碳中和目标,对目标年的设定大致可分为 3 类[5]: 2030—2049 年实现、2050 年实现、2051—2070 年实现。作为全球气候治理的重要参与者和贡献者,中国于 2020 年在联合国大会一般性辩论会上提出"碳达峰碳中和"的目标,明确"中国将力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和"。我国也陆续发布了《2030 年前碳达峰行动方案》、碳达峰碳中和"1+*N*"体系等政策要求,将"双碳"行动作为政策宣示和国家战略持续推进。

面对国内外"双碳"新形势,绿色矿山的建设也应提档升级,尤其在减排降耗、科学开采方面,"双碳"目标给予了新的指示和更加严格的要求。然而国内各省份现行绿色矿山管理办法的出台大部分早于"双碳"目标,对生产减碳化关注度不足,亟需更加规范的矿山碳排放核算办法、明确的减排增汇方向和管理对策。综上,笔者通过梳理绿色矿山的发展历程,总结其概念内涵、研究特点与现存标准方案,并结合矿山碳源/汇、减排增汇相关研究技术,探讨"双碳"背景下绿色矿山的发展方向,以期为推动我国减碳目标导向下绿色矿山的丰富与发展路径建设提供参考。

1 绿色矿山发展及碳源/汇要求

1.1 绿色矿山发展历程与内涵演变

广义上,我国绿色矿山概念的提出与形成经历了一个漫长的过程,不同社会发展时期和思想意识下重点关注的问题有所区别,大体上经历了从"开源 (找矿) 与节流 (管理监督)"并重,到重视"矿山地质环境治理与生态建设",随后出现绿色矿城、绿色开采与绿色矿业关键词[6],直至 2007 年,真正意义上的绿色矿山时代全面开启[7]。

此后,绿色矿山内涵逐渐全面、清晰,绿色采矿技术不断完善[8],各项战略与政策不断提出、开展和升级。至今其发展进程可划分为 2 个阶段,即先锋期 (始自《全国矿产资源规划 (2008—2015)》,即二轮矿规) 和深化期 (始自《全国矿产资源规划 (2016—2020)》,即三轮矿规)。绿色矿山的先锋期仅经历了不到 10 a,这期间绿色矿山从明确内涵、提出条件要求,

逐渐上升为国家战略, 并陆续展开四批矿山试点。此后绿色矿山进入深化期, 这一关键词迅速列席国家规划和行业规划。内蒙古、辽宁、江苏、安徽、重庆等多地区发布绿色矿山管理办法, 绿色矿业示范区逐步建立, 细化至各行业的建设规范逐渐发布, 绿色矿山建设与管理步入常态化。

绿色矿山的内涵经历了一个由泛化到细化的过程。2000 年时任原国土资源部副部长的寿嘉华[9]提出“绿色矿业”并将其主要内容定义为开发前的评价规划、开采中技术工艺创新与开发后的矿山环境治理和生态修复 3 个方面。2003 年钱鸣高院士[10]基于我国煤炭开采实践及问题提出绿色开采理念, 侧重于技术层面的“科学采矿”内涵; 同期 A. K. GHOSE[11]在钱鸣高的启发下也提出应在采矿工业中加入绿色开采 (Green Mining) 的要求[12]。2007 年举办的中国国际矿业大会上, 徐绍史明确提出“发展绿色矿业”倡议, 自此学术界开始从不同角度进行“绿色矿山”的解读 (表 1)。

表 1　绿色矿山概念内涵

Table 1　The connotations of green mining

学者	年份	内涵解读
寿嘉华[9]	2000	在矿山环境扰动量小于区域环境容量前提下，实现矿产资源开发最优化和生态环境影响最小化
汪云甲[13]	2005	矿区资源与环境作为一个整体，是一个开放的复杂大系统，强调矿区资源的立体、综合、协调开发，需解决大量基础理论、技术工艺、系统优化及政策法规等方面问题
黄敬军等[14-15]	2009	矿山资源环境一体化、突出生态园林矿山、强化经营绿色，倡导循环经济
朱训[6]	2013	绿色矿业问题是一个可持续发展的问题，要解决的主要问题:① 资源的合理开发与节约利用;② 良好的矿山生态环境
刘建兴[16]	2014	绿色矿山，一方面是环境友好型矿山或环保型矿山，即矿产资源开发的客体保持良好的生态系统，不因经济开发而根本改变和破坏；另一方面，矿山环境保护不排斥经济发展，即矿山经济体系“绿色化”或生态化
李国政[17]	2018	矿山企业以绿色生态手段进行矿产资源开采利用，在此过程中实现环境效益最大化
CHEN Jinhui等[18-19]	2020	一种以资源、环境和社会经济效益的可持续性为中心的采矿模式，其目的是开发和应用技术和工艺，提高环境绩效，同时在从勘探到关闭后的整个采矿周期内保持竞争力
柳晓娟等[20]	2021	以生态优先为原则，通过资源节约、环境友好型的矿产资源开发利用的技术方法，实现经济社会系统与生态环境系统协调发展的矿业发展模式

为探寻绿色矿山研究领域的研究现状, 挖掘领域研究前沿, 以“绿色矿山”为主题在中国知网 (CNKI) 进行搜索, 包含期刊论文、学位论文、标准等在内, 相关发文量于 2007 年开始超过 50 篇, 此后逐年递增, 2022 年达 461 篇。学者们从多个视角形成了丰富的研究成果 (图 1)。其中, 钱鸣高[10]、许家林[4, 21]等主要关注从技术层面实现煤矿的绿色开采; 黄敬军[22]、闫志刚[23]等则对绿色矿山的考评方面进行了深入探究, 分别构建了性量结合的评价体系。一些研究专注于宏观层面的建设模式[24]与改进规划[7, 25]; 更细化的层面, 当前也有对于绿色矿山建设伦理与责任[26]、管控与监管[27]方面的深入研究。值得一提的是, 此间煤炭矿山研究占据重要比例。在有关学者统计的已发表文献的关键词词频分布前 10 名结果中, “煤矿”赫然在列[28-29]。2011—2014 年原国土资源部评选公布的四批共 661 家国家级绿色矿山试点名单中, 煤炭资源单位为 219 家, 占比达 33.13%。

总体而言, 绿色矿山研究在政策的支持与引导下, 于近 20 a 得到了迅速发展, 绿色矿山已成为一个理论基础深厚、内涵丰富、多维度、全方位的矿山生态环境保护与治理理念。同时已具有丰富的应用实践基础, 有能力和条件在不断变化的时代背景下为新要求、新目标的播种与结果提供重要土壤。理论方面, 从矿产资源本身的生态、社会双属性特征出发, 在诸如“矿业可持续发展”(强调代际公平)、“矿业循环经济”(强调资源合理利用)[30]、“低碳矿业”(强调清洁能源结

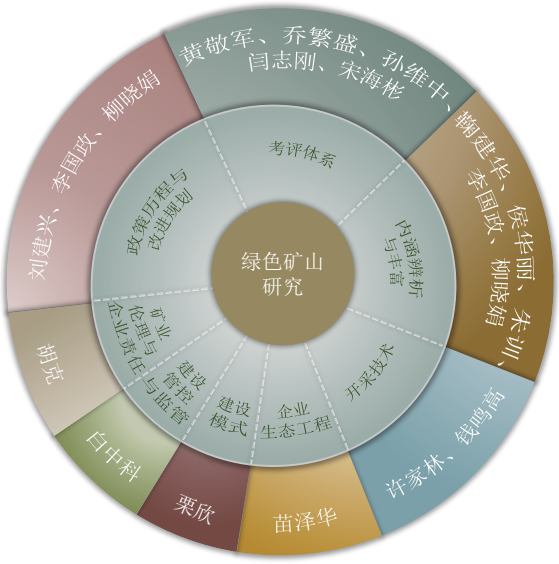

图 1　绿色矿山主要研究视角及学者

Fig.1　Major research perspectives and scholars on green mining

构)[31]等理论的发展基础上,如今的绿色矿山至少包含环境友好和经济有利 2 个方面,即“在保护中发展,在发展中保护”。空间尺度上,绿色矿山的落实对象是单个矿山的生产经营;而从时间尺度上,绿色矿山的建设与要求应包含从地质勘探、矿山规划设计与建设,采选,冶加工,到矿山闭坑后的生态环境恢复重建的全过程[16, 20, 32]。

1.2 “双碳”目标下绿色矿山发展形势

节能减排与碳中和的议题已上升到前所未有的国际高度,各国政府与学者对其展开了极大的政策倾斜与讨论关注[33-35]。根据 Our World in Data 对当前各行业碳排放形势的研究,能源行业相关的碳排放占 73.2%[36],这个数据不容忽视,充分反映能源方面的碳减排对国际碳中和目标的实现举足轻重。从资源产出与流动的角度,能源减排途径包括 2 个方面:① 绿色开采:从开采和运输端减少燃料燃烧和土地损毁;② 能源消费结构调整:从消费端清洁高效利用化石资源、增加清洁能源使用规模。其中,目前可再生能源存在能量密度低、时空分布不均衡、不稳定、成本较高等特点,其规模化应用仍存在瓶颈,总体能源消费结构的调整必然是渐进、缓慢的。未来一段时间内,化石能源仍将在世界能源结构中发挥重要作用,对我国尤其如此[37-38]。作为能源产业链的最上游,矿产资源的生产则不可避免地成为能源结构低碳化过程的重要一环[2]。因此,对于“双碳”目标,矿山部分的绿色低碳循环发展也应引起注意。

对此,国际上众多能源资源矿业巨头企业如力拓 (Rio Tinto)、必和必拓 (BHP)、嘉能可 (Glencore)、淡水河谷 (Vale)、巴里克 (Barrick)、纽蒙特 (NEM) 等纷纷公开提出减碳战略目标,并针对性制定行动计划[39]。国内各矿业公司同样做出积极应对。中铝集团自 2017 年始连续 6 年举办降碳节,并于 2021 年发布 2025 碳达峰、2035 年降碳 40% 的目标与行动方案。中国石油 2022 年发布《绿色低碳发展行动计划 3.0》。紫金矿业、中国神华与中煤能源等也针对减碳目标采取了一系列行动措施。后续矿企与矿山的绿色低碳行动的计划管理、效果检验与措施调整将极大依赖实际数据表现,因此,矿山运行的碳排放核算与针对性减排措施研究尤为重要。

1.3 碳源/汇视角的绿色矿山评价标准

绿色矿山建设的重要性不言而喻,明确合理的评价标准与建设要求是其付诸实践的重要基础[40]。学界中对绿色矿山的评价研究总体是从安全性、效率性和环境质量的维度展开的[41-42]。黄敬军等[22]从资源利用、开采方式现代化、矿山管理等方面对绿色矿山提出了“八化”标准要求;闫志刚等[23]从矿山生产、节能与环保、管理与安全 3 个方面细化提出了 43 项定量定性相结合的考评指标;GUO Jia[43]提出了绿色煤矿建设的外部动力和内生动力共 8 个方面的考评方向;JISKANI[44]提出的指标框架包括环境保护、污染控制、废物管理、能源和资源消耗、技术启用和实施、战略和管理效率 6 个方面。

国家政策文件方面,自 2010 年《国家级绿色矿山基本条件》中提出包括依法办矿、规范管理、资源综合利用、技术创新、节能减排、环境保护、土地复垦、社区和谐、企业文化九大方面建设要求后,至今已有 2 部绿色矿山考评指标体系成果。2014 年发布的《国家级绿色矿山试点单位验收评价指标及评分表》(中矿联发〔2014〕38 号),包括了规范管理、科技创新、节能减排等 10 个方面 35 项指标。以煤炭矿山为例,其定量指标仅包括采出率、选矿回收率、选煤数量效率、单位能耗、科技创新投入比例、选矿废水重复利用率、绿化覆盖率 7 项。2020 年自然资源部印发《绿色矿山评价指标》可视作 2014 年版本的升级细化版本,同样采取评分制,评分表共 100 项,达标要求包括总分数与一级指标得分比例 (75%)(也就意味着一试点即便在某一项二级或三级指标完全瘸腿也仍有达标的可能)。具体结合自然资源部发布的《煤炭行业绿色矿山建设规范》(DZ/T 0315—2018)[45]等行业标准或技术规范进行核查 (表 2)。

综合来看,当前绿色矿山的相关考评中,不论是相关研究还是政策文件均有完备方案,各方案对于矿业生产的各方面均已完整涉及。但既存的评价体系中,明显有“定性多定量少”,“基准多拔高少”的特征;而结合“双碳”背景,当前节能环保导向下的减碳定量评价仅采用单位产量能耗指标,考虑到已发布的安徽、重庆等地区级绿色矿山管理办法与考评方案对于减排方面同样关注较浅,当前绿色矿山考评仍需补充加强针对温室气体排放的具体数据要求,这些需要大量的实际矿山碳排放与碳固定测算研究用以支撑。

2 绿色矿山碳源/汇核算

2.1 碳源核算

绿色矿山要实现针对温室气体排放的具体数据要求,就必须开展矿山碳源/汇核算。碳排放的核算是有效开展各项减排工作、促进经济绿色转型的基本前提。通过直接量化碳排放数据,有利于分析不同部门与环节碳源情况,帮助获取各部分减排潜力环节与减排途径,对“双碳”目标的实现与碳交易市场的运行至

关重要。目前国内外常用的碳排放核算方法主要包括实测法、质量平衡法、投入产出法 (Input-Output Analysis, IOA)、排放因子法 (IPCC 法)5 种。各种方法的原理、特点、适用条件有很大区别 (表 3)。

表 2　绿色矿山节能减排/降耗指标要求 (煤炭行业)

Table 2　Index requirements for energy saving, emission reduction or consumption reduction in green mining (coal industry)

评价指标	数据要求	文件参考
单位产品能耗	现有井工矿11 kgce/t 新建井工矿7 kgce/t 现有露天矿8.2 kgce/t 新建露天矿6.5 kgce/t	2014年《国家级绿色矿山试点单位验收评价指标及评分表》
国家重点节能技术推广采用成果	定性(是否突出)	
选矿废水重复利用率	≥90%	
矿山固体废弃物综合利用率	定性(是否先进)	
全过程能耗核算体系	定性(是否建立)	2020年《绿色矿山建设评价指标》 《煤炭井工开采单位产品能源消耗限额》(GB 29444—2012)[46] 《煤炭露天开采单位产品能源消耗限额》(GB 29445—2012)[47]
能源管理计划	定性(有无计划；是否下发指标到部门、车间等)	
单位产品能耗	现有井工矿11.8 kgce/t 新建井工矿7.0 kgce/t 现有露天矿8.2 kgce/t 新建露天矿6.5 kgce/t	
能源管理体系认证	定性(是否取得证书)	

表 3　碳排放核算方法

Table 3　Accounting methods for carbon emissions

方法	原理	适用尺度	优点	缺点
实测法[48]	通过具体监测手段或国家有关部门认定的连续计量设施，从实地测定得到数据；包括现场测量与非现场测量	微观	中间环节少，结果准确性高	数据获取难度大，成本高；应用范围小，不适用于监测稀有气体
质量平衡法[48-49]	理论依据为质量守恒定律，对生产环节中使用的物料情况进行定量分析。碳排放量为输入碳含量与非CO_2输出量之差	中宏观	明确区分各类实施设备之间和单个与部分设备之间的差异	需要完备的数据统计与记录；中间环节多，使用条件复杂、严格
生命周期法(LCA)[50-51]	自下而上，通过获取产品或服务在生命周期内所有的输入及输出数据得出总的碳排放量	微观	计算过程详细、结果准确	易受边界限制及生命周期确定等方面的影响；易发生重复计量；属于静态评价，缺乏时间可变性
投入产出法(IOA)[51-54]	自上而下，利用投入产出表计算，通过平衡方程反映初始、中间及总的投入与产出之间的关系	中宏观	原理明确、中间过程清晰、结构完整性强	模型所需数据量较大；编制投入产出表耗时大，结果有滞后性
排放因子法(IPCC)[51, 55-57]	使用IPCC编制的国家温室气体清单以及对应排放因子来计算各种温室气体的排放量。碳排放量=活动数据×排放因子	各尺度	数据获取方便，计算过程较简便；有利于特定区域情况的宏观把控；已有大量应用实例可作参考	排放因子测度易出现误差影响结果；仅适用于封闭的孤岛系统，无法从消费角度计算隐含碳排放

由于实测法、质量平衡法对于数据的收集与统计具有严格要求，较难广泛操作，目前相关应用实例并不丰富。投入产出法所需数据量大、制表复杂，在部门与区域类中宏观层面应用较多[52]。因此，对于矿山，许多学者选择采用 IPCC 法进行碳排放测算。而在具体研究中，生命周期理念作为重要理论基础被广泛采用[58]，核心原理是对采矿进行全过程分析。这种研究范式对探索矿产全生命周期中各阶段的碳排程度与减排潜力具有重要作用。下面两小节对生命周期理念和排放因子法进行详细介绍。

2.1.1　生命周期法

生命周期法 (Life Cycle Assessment, LCA) 自 20 世纪 60 年代开始应用，作为一种基于过程、“从摇篮到坟墓”的分析方法，正越来越多地被用来分析评价人类活动所产生的环境问题[59]。生命周期法的核心在于考虑了包括原材料资源化、开采、运输、制造/加

工、分配、利用/再利用/维护以及废弃物处理等全生命周期内各子过程的能源输入与输出[50]，自下而上，得出总的环境影响。生命周期评价在碳足迹相关研究中备受关注，目前已成为微观层面特别是产品尺度最主要的碳足迹核算理念[52, 60-61]。生命周期法的技术框架包括目标与范围的确定、生命周期清单分析、影响评价和结果解释 4 个部分 (图 2)。

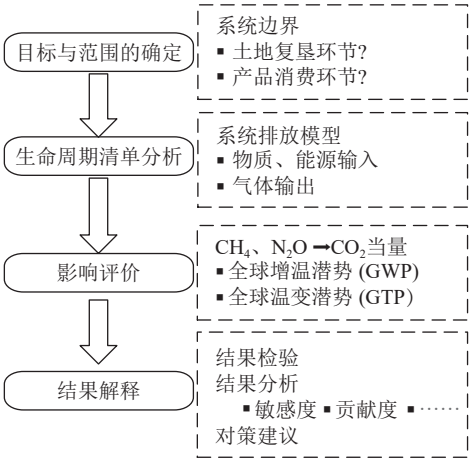

图 2 生命周期法技术框架

Fig.2 Technical framework of the life cycle assessment

生命周期法最大的问题在于极易产生重复计量的结果，它的重要部分在于清单分析，需要仔细分析每个环节的碳排放源与碳排放量，避免多次累加。而清单分析的基础是对系统边界的划分，然而事实上即便是同一行业，不同学者对于其生命周期的边界与定义也有所区别。表 4 以煤炭行业为例，总结了一些应用生命周期理念计算矿业碳足迹的研究。

这些研究基本形成共识：露天煤矿开采的温室气体源主要包括 5 个方面，电耗带来的间接排放、燃料燃烧与炸药爆破的直接排放、开采过程中的 CH_4 逸散排放、煤炭与煤矸石氧化产生的温室气体溢散、以及矿山开采扰动 (压实、塌陷、裂缝、边坡松散等) 导致的矿区固碳能力改变[2, 55, 62-64]。矿区碳汇主要来源于复垦，即复垦后排土场的植被与土壤固碳，和采坑改造 (主要改造为湿地) 后的生态系统固碳[65-67](图 3)。然而即便拥有相似的立场，在实证研究中对生命周期的边界定义 (是否包括矿山复垦与能源消费) 与划分清单的尺度 (粗分和细分) 的不同，使得碳排放分布结果存在差异。大多研究是以较为粗放的阶段划分，仅作单一评价用，较少细分生命周期并针对各部分的减排空间进行详细分析。另外，少有研究关注矿山复垦环节的碳源与碳汇，而这在整个能源生产过程中是不容忽视的一环。

表 4 全生命周期煤矿碳排放研究实例

Table 4 Studies on the whole life cycle carbon emissions of coal mines

学者	研究区	生命周期(供应链)
杨娅双[68]	平朔矿区	开采、运输、排弃、复垦
YANG Boyu[69]	安家岭煤矿 平朔矿区	剥离、开采、运输、排弃、复垦
罗广芳[66]	武安市	开采、加工、运输、消费*
张振芳[2]	安家岭、伊敏河、黑岱沟、布沼坝煤矿	穿孔、爆破、采装、破碎、运输*、排土、辅助、逸散、自燃
Álvaro RESTREPO 等[70]	巴西煤田	开采(底切、钻孔、爆破和装载)、选矿(破碎、洗筛)、通风、水处理、ROM运输
AGUIRRE-VILLEGAS 等[71]	印度尼西亚	露天采矿、运输、加工、产品运输至市场、支持运营、水处理
BURCHART-KOROL[72]	波兰	采矿和运输、加工、废物管理、辅助活动(通风、甲烷排放等)
王莉莉[49]	永城矿区	生产*、洗选、发电*
刘静静[73]	山西某煤炭企业	开采*、洗选、运输
曾繁伟[74]	龙口矿务局洼里煤矿	原煤开采*、原煤短途运输、原煤洗选、煤炭产品外运销售

注：标*项为该研究生命周期内碳排放占比最高的环节。

2.1.2 IPCC 法

IPCC 法也称排放因子法，通过活动数据 (如燃料燃烧) 与温室气体排放因子进行计算，并引入全球增温潜势 (Global Warming Potential, GWP)(或全球温变潜势 GTP[75-76]) 将不同温室气体的环境影响进行量化，可以较为全面地核算不同化石燃料燃烧导致的温室气体排放，数据获取方便，计算过程较简便，适用于各尺度的能源碳足迹核算[52]。自 1996 年政府间气候变化专门委员会编写发布第 1 版国家温室气体清单指南以来，IPCC 法已逐步成为国际公认和通用的碳排放估算方法。目前是将《2019 年修订版指南》对《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》补充更新后共同使用。

根据排放因子确定的方式，IPCC 指南中划分了 3 种碳排放计算方法，适用于不同的数据基础 (图 4)。方法 1 属于基准法、区段法，方法 2 和方法 3 均属于自下而上法[49]。3 种方法以数据的收集难度递增，目前多数研究根据数据实际情况对这 3 种方法组合使用[2]，即部分采用缺省数据，部分考虑特定区域情况 (如国家煤炭氧化率、区域电网等)，或加入部分实测数据。

燃料燃烧的 CO_2 排放因子计算公式为

$$F(CO_2) = C_C O_F \times 44/12 \tag{1}$$

式中，$F(CO_2)$ 为燃料的 CO_2 排放因子，tCO_2/t 燃料；C_C 为燃料的含碳量，tCO_2/t 燃料 (固体和液体燃料)，

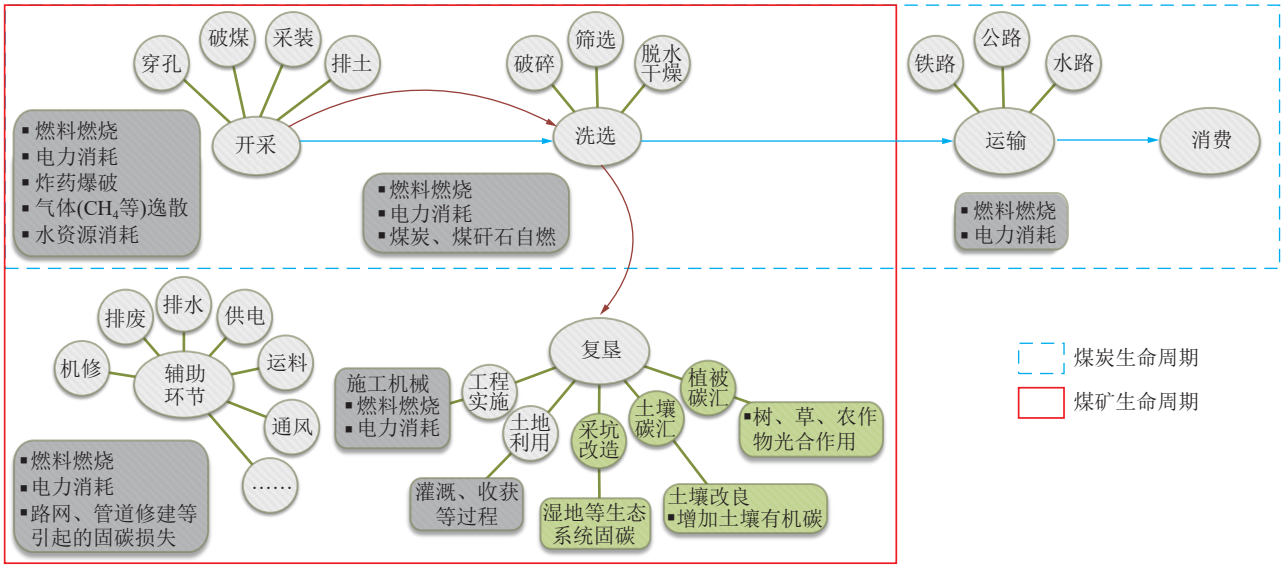

图 3　煤炭与煤矿全生命周期碳源/汇足迹

Fig.3　Full life-cycle carbon source/sink footprint of coal and coal mines

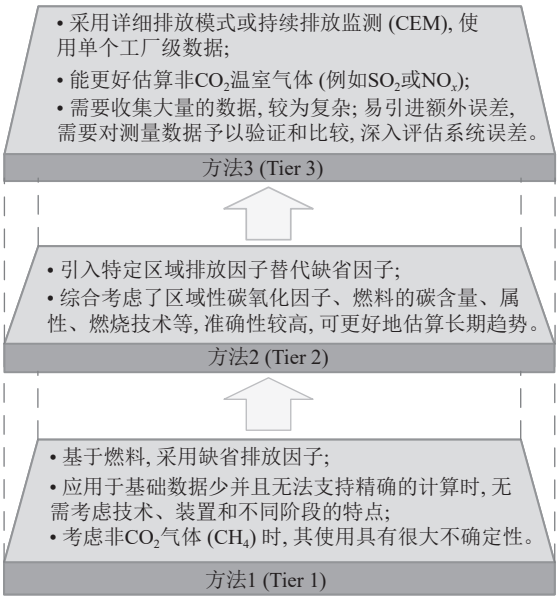

图 4　IPCC 碳排放计算方法

Fig.4　IPCC carbon emissions calculation methodology

tC/万 Nm^3(气体燃料); O_F 为燃料的碳氧化率, 取值为 0～1; 44 /12 为 CO_2 与碳 (C) 的分子量转换系数。

C_C 若无条件实测, 可通过式 (2) 计算:

$$C_C = V_{NC} E_F \tag{2}$$

式中, V_{NC} 为燃料的低位发热量, 通过实测获取或使用缺省值; E_F 为单位热值含碳量缺省值。

表 5 列举了几项碳排放有关的公共文件与研究中部分常用固体、液体、气体燃料的碳排放因子。不同燃料碳排放因子的差异暂且不论, 即便是同一种燃料, 不同研究与数据来源算出的排放因子也有较大区别。如炼焦煤, 其排放因子最高与最低差异可达 0.74 tCO_2e/t, 若贸然选用不符合真实情况的排放因子, 势必会对核算结果与减排策略产生极大影响。

很明显, 统一采用排放因子计算使得 IPCC 法具备数据量小、计算简便、多尺度适用的优点, 但也造成其结果数据的科学性将极大依赖于排放因子选取的合理性。生产技术水平、燃料类型、能源品质、燃烧效率等差异都会对区域性排放因子的实际值造成影响, 如中国煤炭总体灰分高, 含碳量与碳氧化率低, 其燃烧的实际排放因子远低于 IPCC 公布的缺省值, 有学者计算出适用于中国煤炭的因子平均比 IPCC 默认值低约 40%, 意味着一直以来用 IPCC 清单缺省值计算的中国能源碳足迹与实际排放相比偏高[78]。因此, 对于排放因子的选取, 区域化、本地化至关重要。以燃料燃烧为例, 目前最为准确的是通过实测其含碳量或净发热值进行碳排放因子计算。

2.2　生态碳汇核算

陆地生态系统的碳汇主要来自于系统的光合作用、呼吸作用和生物质流通等过程, 包括植被碳汇和土壤碳汇 2 部分, 不同植被、不同土地利用类型的碳汇能力不同, 土地利用类型的相互转移会产生碳储存的增加或流失[79-80]。因此当前对于矿区碳汇的研究, 主要通过分别计算各土地覆被的植被−土壤碳汇进行。这里的碳汇专指一定时期内碳储量 (存量) 的变化量 (流量)。

2.2.1　植被碳汇

对植被碳汇的核算一直是碳循环、碳减排研究的重要部分。《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》引入了“生物量碳储量变化”来代表碳汇流量, 提出了生物量排放因子法 (BEFs) 进行核算, 并在新的 2019

表 5 几种常用燃料的 CO_2 排放因子

Table 5 CO_2 emission factors of several common fuels

燃料	CO_2排放因子	单位	数据来源
炼焦煤	94 600	$kgCO_2e/TJ$	IPCC(基于净发热值28.2 TJ/Gg)约2.67 tCO_2e/t
	2.43	tCO_2e/t	MOHAN[57]
	2.68	tCO_2e/t	张振芳[2]
	2.96	tCO_2e/t	WANG Bing等[77]
	3.17	tCO_2e/t	英国环境部《温室气体报告：2022年转换系数》
天然气	56 100	$kgCO_2e/TJ$	IPCC(基于净发热值48.0 TJ/Gg)约2.69 tCO_2e/t
	2.02	$kgCO_2e/m^3$	英国环境部《温室气体报告：2022年转换系数》
	2.16	$kgCO_2e/m^3$	《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》；《中国产品温室气体排放系数集》；WANG Bing等[77]
	2.70	tCO_2e/t	张振芳[2]
柴油	74 100	$kgCO_2e/TJ$	IPCC(基于净发热值43.0 TJ/Gg)约3.19 tCO_2e/t
	3.10	tCO_2e/t	WANG Bing等[77]
	3.15	tCO_2e/t	《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》；《中国产品温室气体排放系数集》；曾繁伟和刘静静[74]
	3.19	tCO_2e/t	才庆祥等[62]
	3.20	tCO_2e/t	MOHAN[55]；张振芳[2]
	3.21	tCO_2e/t	英国环境部《温室气体报告：2022年转换系数》；王莉莉[49]
车用汽油	69 300	$kgCO_2e/TJ$	IPCC(基于净发热值44.3 TJ/Gg)约3.07 tCO_2e/t
	2.93	tCO_2e/t	WANG Bing等[77]
	3.04	tCO_2e/t	《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》；《中国产品温室气体排放系数集》；曾繁伟和刘静静[74]
	3.08	tCO_2e/t	张振芳[2]
	3.15	tCO_2e/t	英国环境部《温室气体报告：2022年转换系数》
	3.19	tCO_2e/t	才庆祥等[62]
	3.24	tCO_2e/t	王莉莉[49]

注：① IPCC指南获得的缺省排放因子，需结合燃料的净发热值计算以得到与其他数据相似的t/t单位的碳排放因子；② 为方便比较，部分数据经过计算或单位转化(如将英国的炼焦煤数据单位由kg/t转化为t/t，并进行四舍五入以保留两位小数)；③ 此表均为常规缺省情况下燃料燃烧排放数据，也有一些详细区分了燃烧设备、燃烧工艺条件等情况的排放因子数据库，如美国环境保护署(USEPA)与欧洲环境署(EEA)等均有各自的排放指导手册。

年修订版中增加了异速生长模型法和生物量密度图法计算不同类型植被碳汇[81]。此间产生了一些具有代表性的研究成果，如方精云研究团队[82]结合遥感和清查数据，对 1981—2000 年间中国森林、草地、灌草丛以及农作物等陆地植被碳汇的核算成果。

不同类型的植被产生的碳汇效果有所区别。当前研究普遍证实森林的碳汇能力在一众生态系统类型中较为突出，森林损失所造成的碳储量损失巨大[83-84]。然而对于矿区，并非所有排土场均有复垦为森林的条件，现实中一般视矿区受损程度与现存土壤、水资源等自然条件情况，将其复垦为森林、(灌) 草地、耕地，也有部分矿区采煤塌陷区改造后形成湿地。因此对于矿区碳汇能力的计算，所涉及的土地覆被类型与陆地生态系统并无二致。

$$F_{\mathrm{v}}=\sum F_i=\sum \alpha_i S_i \tag{3}$$

式中，F_{v} 为年植被碳汇量；F_i 为第 i 种土地覆被类型的植被碳汇分量；α_i 为第 i 种土地覆被类型的植被碳汇系数；S_i 为第 i 种土地覆被类型的土地面积。

计算不同植被种类的碳汇，引入生物量与含碳系数进行碳储量计算是多数方法的基础理念。以森林为例，某一树种碳储量 = 某一树种生物量×树种含碳系数。对耕地，常引入含碳率、含水率、根冠比、经济系数等作物碳储量估算参数[83, 85]，但也有研究出于作物的收获期短、较快还田分解或返回生态系统的考虑，认为其碳汇效果不明显，将农作物的碳汇设定为 0。对于草地，研究者们主要采用生物量密度法、遥感模型法及野外样地调查等方法估算生物量，后借助草地平均含碳率进行碳汇计算[83, 86]。至于矿山生态修复中常涉及的灌草地，目前有 2 种主流思路[82]：① 通过建立跨植被类型的植被生产力 (NPP) 和碳汇之间的

函数关系, 由 NPP 计算植被碳汇; ② 引入碳汇效率 (CSE) 这一概念用以代表植被每单位 NPP 所产生的碳汇, 结合已发表的 NPP 和碳汇数据总结不同地域的 CSE 从而计算碳汇。湿地碳汇的计算方式与林草地等差别不大, 但计算中应考虑所释放的 CH_4 气体的影响。

当前也有研究直接采用相关研究区的植被碳汇系数, 结合土地植被类型面积进行碳汇的概算[79]。这类方式对研究区匹配程度有较大限制, 计算结果精准程度易受影响, 可能偏离实际结果, 但计算过程简单, 数据需求小。

对于长时间尺度的区域生态系统, 由于林草等不同植被的自然衰落或人为原因导致的生物量降低等情况都将导致生态系统实际的碳蓄积量并没有诸多核算结果那么乐观。以森林生态系统为例, 有研究表明, 受林龄结构的影响, 当前中国森林的碳汇水平仅能维持 15 a, 大部分森林在幼龄和中龄阶段, 具有较高的碳吸收能力, 在老龄阶段逐渐下降[87]。因此, 在进行生态系统碳汇计算与长期预测时, 需要特别关注不同植被类型的固碳时间周期, 以便更准确地评估生态系统的碳汇能力和未来的变化趋势。

2.2.2　土壤碳汇

土壤碳库作为陆地生态系统最大的碳贮库, 其减碳方面的巨大潜力使得其碳汇计算对于我国“双碳”目标的实现具有重要意义[88]。据 CAMERON 等[89]的研究, 预计到 2050 年, 土壤碳汇潜力为 23 亿～53 亿 tCO_2/a。

国内对土壤碳汇的测定数据较少, 相关研究主要关注农田土壤固碳作用, 对自然土壤碳汇的计算尚浅。许多学者依据 IPCC 发布的 3 种土壤碳汇的核算方法成果, 开展土壤固碳潜力研究。而常用的大尺度土壤碳汇计算方法主要有 Meta 分析[90-92](采用已有文献中的相关数据进行总结分析)、土壤调查数据差减[93](实测数据)、过程模拟[94-95](可用于预估假定情景下的土壤固碳潜力) 等类型[96]。有学者将测得的地上植被 (林地、草地等) 碳汇乘以比例系数 (如 1/2) 来得到相应覆被类型下的土壤碳汇值[79]。也有研究通过引入土壤有机碳量, 结合实测土壤容重及土层深度计算土壤碳汇[86], 公式为

$$F_s = \sum F_i = \sum D_{SOC_i} S_i \tag{4}$$

$$D_{SOC} = 0.001 SOC \gamma H_T \tag{5}$$

式中, F_s 为年土壤碳汇量; D_{SOC} 为土壤有机碳密度; SOC 为土壤有机碳量含量; γ 为土壤容重; H_T 为土层深度。

3　绿色矿山减排增汇策略

减排、增汇是绿色矿山助力“双碳”目标的重要途径。减排是指通过能源节约提效、能源替代和资源回收等途径减少 CO_2; 增汇是指通过矿山修复措施与碳捕集、利用与封存技术 (CCUS) 进行生态固碳与技术固碳 (图 5)。

(1) 能源节约提效。作为最有效的减少绿色矿山排放的战略之一, 主要通过提高和优化能源密集型设备的使用效率, 采取环境友好型技术和管制手段来减少能源浪费。例如, 投资于新的、更节能的技术与设备, 以煤炭开采为例, 包括推进煤炭的分质分级梯级利用, 推广煤炭地下气化[97]、井下洗选技术、高效照明、节制冷却水等技术, 增加节能型变压器、空载运行自停装置等更有利于经济运转和节能降耗的机器设备使用等, 从而减少温室气体排放。

(2) 能源替代。使用清洁能源和环保材料来替代传统的化石燃料, 通过采用环境友好型产品 (开发光伏、太阳能和风能等新能源) 来减少或避免对土壤、空气、水资源等自然环境的破坏, 削减污染物的产生, 从而推进矿山的可持续开采。主要途径包括推进光伏扬水系统等矿区光伏行业、发展“绿电”项目等。目前已有诸多应用实例, 如安徽阜阳市颍上县充分利用刘庄煤矿采煤沉陷形成的水面开展了漂浮式光伏电站项目; 山西忻州市代县开展了排土场光伏绿电项目以推动绿色矿山建设。

(3) 降低废物排放与回收利用。在矿产开采中优先考虑资源的回收利用, 仍以煤炭开采为例, 包括尾矿加工、碳矿化和资源化利用, 采用充填开采等技术实现减沉开采, 采用煤与瓦斯共采技术以降低瓦斯污染并提升资源利用率[10, 12], 采用保水开采以提高水资源利用效率并减少对地下水层的破坏等方面[10]。这也是诸多资源型城市能源产业高质量发展的重要要求, 如在长治、临汾等市的能源产业发展目标方向中均有明确强调。

(4) 通过矿区绿化和矿山生态修复增加碳汇。通过对矿山开展地灾治理、土壤改良、植被重构等自然环境修复和人工干预措施, 逐渐恢复矿区以及周边地区的生态系统[98], 并在矿山周围实施绿化措施, 通过种植植物、建造防护林等手段改善土地生态环境, 增加碳汇、提升储碳能力的同时促进水源保护和空气净化。

(5) 碳捕集、利用与封存。作为二氧化碳的“负排放”技术, 毫无疑问其将成为我国实现碳中和目标不可或缺的关键性技术之一[99]。采用本技术将矿山生产过程中排放的二氧化碳进行捕获和提纯, 投入到新

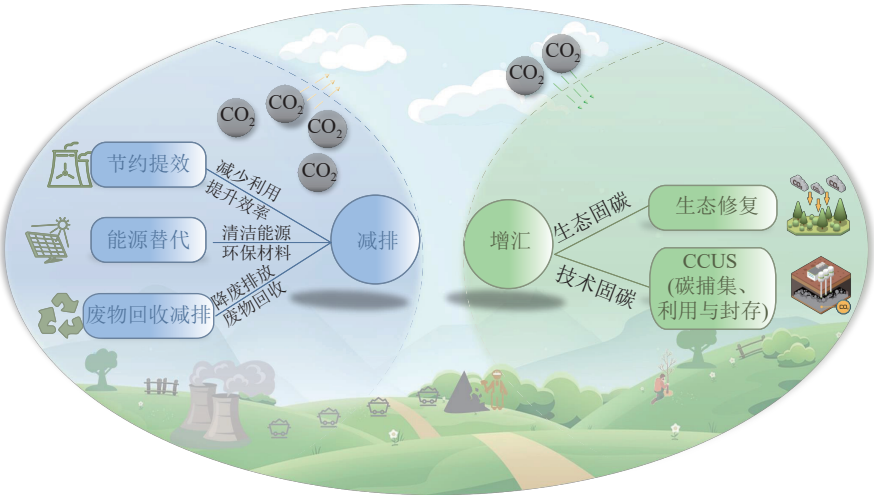

图 5 绿色矿山减排增汇策略

Fig.5 Strategies for reduction of emission and enhancement of sink in green mining

的生产过程中进行循环再利用,或永久封存。但目前国内 CCUS 技术仍处于工业示范阶段,尤其在应对矿山这类分散型排放源所需的直接空气捕集技术(DAC)方面,发展仍然滞后,因此,其大规模商业化应用仍需等待进一步的技术创新和经济可行性验证。

4 结论与展望

(1) 绿色矿山理念经过多年的发展和应用,在理论研究与实践应用方面均产生了丰富成果,且具有成体系的行业评价考核标准。然而当下受到空前重视的碳中和目标,对绿色矿山的减排增汇提出了更加严格的要求。现存的管理方案、考核标准与评价体系中,在减排方面仅有基础性的能耗要求,整体属于推荐性标准,强制执行力较弱,且没有针对温室气体排放的定量指标要求。

(2) 在我国能源消费结构调整难以一蹴而就、未来较长一段时期内我国以煤炭为主的能源生产与消费格局仍不会改变的现实背景下,煤炭行业的减排仍是重中之重;另一方面,无论是绿色矿山的政策倾向还是学术研究,煤矿都占有重要地位,因此煤炭行业的绿色低碳开采研究对于助力碳中和目标的实现和绿色矿山的建设都至关重要。

(3) 当前对于煤矿的碳足迹核算研究,基于生命周期理念、结合 IPCC 法的核算模式应用广泛、案例丰富。其中,IPCC 法的计算精度完全取决于数据源的详细与否和排放因子对研究区的适配程度;另外,目前对于生命周期的划分大多粗放,较少针对性的分析煤矿开采各阶段各子过程的碳排分布与减排潜力。其中关键的是,面向“双碳”目标的矿山复垦环节的碳源碳汇测算分析研究仍然较少。

(4) 绿色矿山的减排可通过能源节约提效、能源替代和资源回收等途径进行;增汇可从生态固碳与技术固碳两方面开展矿山修复措施与 CCUS 技术。

由此,对“双碳”新形势下的绿色矿山建设管理与研究,提出以下几点展望:

(1) 针对性增强对于温室气体排放与固定的指标要求,进一步增加更直接指示碳排放数据、更加严格而非基本标准性的绿色矿山考评指标设计,如对不同产量级矿山增加对应单位产量碳排放、复垦面积及碳汇效果等指标要求。同时增强评价体系标准执行力。此间需注意不同类型、规模、发展阶段矿山的适应性管理。这些需要大量的研究数据用以支撑。

(2) 加强煤炭矿山的碳足迹核算与减排潜力分析,需对大型煤矿基地与小型煤矿采取差异性研究。研究中深化、细化煤矿全生命周期的划分,科学、精准进行碳排放核算,明晰各阶段各来源的碳排放与减排空间,探索区分不同生产工艺、设备、能源选用下的碳排放情况及相应的经济、时间效益。另外,加强对于减排途径的效果评价,通过可行性分析、模拟减排方案碳足迹、对比各方案生态与经济效益等,在此基础上探索更高效、可落地实施、适用于煤矿的减排方案。

(3) 增加对矿山复垦环节的碳源与碳汇的关注。在矿山全生命周期碳排放核算中,将土地复垦工程实施中的燃料燃烧、电力消耗及土地利用中的灌溉、收获等方面产生的碳源纳入考虑,同样作为绿色生产中需低碳化的一环。此外,增加矿山复垦后不同年期的植被、土壤碳汇计算与监测,其结果将对矿山土地复垦方向选择与地区减碳计划管理有重要意义。

参考文献(References):

[1] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测

[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949−1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949−1960.

[2] 张振芳. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
ZHANG Zhenfang. Study on carbon emissions accounting and carbon emission reduction approach of surface coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.

[3] 谢和平, 刘虹, 吴刚. 经济对煤炭的依赖与煤炭对经济的贡献分析[J]. 中国矿业大学学报 (社会科学版), 2012, 14(3): 1−6.
XIE Heping, LIU Hong, WU Gang. A quantitative analysis of dependent index and contribution rate between China's economic and coal development[J]. Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences), 2012, 14(3): 1−6.

[4] 许家林, 钱鸣高. 绿色开采的理念与技术框架[J]. 科技导报, 2007(7): 61−65.
XU Jialin, QIAN Minggao. Concept of green mining and its technical framework[J]. Science & Technology Review, 2007(7): 61−65.

[5] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88−97.
ZHANG Yaxin, LUO Huilin, WANG Can. Progress and trends of global carbon neutrality pledges[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 88−97.

[6] 朱训. 关于发展绿色矿业的几个问题[J]. 中国矿业, 2013, 22(10): 1−6.
ZHU Xun. Several issues of green mining development[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(10): 1−6.

[7] 鞠建华, 强海洋. 中国矿业绿色发展的趋势和方向[J]. 中国矿业, 2017, 26(2): 7−12.
JU Jianhua, QIANG Haiyang. The trend and direction of green development of the mining industry in China[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(2): 7−12.

[8] LI Shuai, YU Lifeng, JIANG Wanjun, et al. The recent progress China has made in green mine construction, Part I: Mining groundwater pollution and sustainable mining[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022: 19(9).

[9] 寿嘉华. 走绿色矿业之路——西部大开发矿产资源发展战略思考[J]. 中国地质, 2000(12): 2−3.
SHOU Jiahua. Take the road of green mining - Thinking about the development strategy of mineral resources for Western Development[J]. Geology in China, 2000(12): 2−3.

[10] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 5−10.
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 5−10.

[11] GHOSE A K. Green mining: A unifying concept for mining industry[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2004, 52(12): 393.

[12] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1−15.
XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1−15.

[13] 汪云甲. 论矿区资源绿色开发的资源科学基础[J]. 资源科学, 2005(1): 14−19.
WANG Yunjia. On the green exploitation of natural resources in mining areas of China[J]. Resources Science, 2005(1): 14−19.

[14] 黄敬军, 倪嘉曾, 宋云飞, 等. 绿色矿山建设考评指标体系的探讨[J]. 金属矿山, 2009, 38(11): 147−150.
HUANG Jingjun, NI Jiaceng, SONG Yunfei, et al. Discussion on the evaluation index system for green mine construction[J]. Metal Mine, 2009, 38(11): 147−150.

[15] 黄敬军. 论绿色矿山的建设[J]. 金属矿山, 2009, 38(4): 7−10.
HUANG Jingjun. On the construction of green mines[J]. Metal Mine, 2009, 38(4): 7−10.

[16] 刘建兴. 绿色矿山的概念内涵及其系统构成研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(2): 51−54.
LIU Jianxing. The connotation of green mine and it's system structure[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(2): 51−54.

[17] 李国政. 绿色矿业: 内涵界定、模式探索与实现路径[J]. 矿产保护与利用, 2018(6): 1−8.
LI Guozheng. Green mining: Connotation definition, model exploration and implementation path[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(6): 1−8.

[18] CHEN Jinhui, JISKANI Izhar Mithal, JINLIANG Chen, et al. Evaluation and future framework of green mine construction in China based on the DPSIR model[J]. Sustainable Environment Research, 2020, 30(1): 13.

[19] CHEN Jinhui, JISKANI Izhar Mithal, LIN Aiguo, et al. A hybrid decision model and case study for comprehensive evaluation of green mine construction level[J]. Environment, Development and Sustainability, 2023, 25(4): 3823−3842.

[20] 柳晓娟, 侯华丽, 孙映祥, 等. 关于中国绿色矿业内涵与实现路径的思考[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(10): 180−186.
LIU Xiaojuan, HOU Huali, SUN Yingxiang, et al. Thinking about the connotation and realization path for green mining in China[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(10): 180−186.

[21] XU Jialin, ZHU Weibing, LAI Wenqi. Green mining techniques in the coal mines of China[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2004, 52(12): 395−398.

[22] 黄敬军, 倪嘉曾, 赵永忠, 等. 绿色矿山创建标准及考评指标研究[J]. 中国矿业, 2008(7): 36−39.
HUANG Jingjun, NI Jiaceng, ZHAO Yongzhong, et al. Study on green mine construction standard and its check and evaluation index[J]. China Mining Magazine, 2008(7): 36−39.

[23] 闫志刚, 刘玉朋, 王雪丽. 绿色矿山建设评价指标与方法研究[J]. 中国煤炭, 2012, 38(2): 116−120.
YAN Zhigang, LIU Yupeng, WANG Xueli. Evaluation criterion and method of green mine[J]. China Coal, 2012, 38(2): 116−120.

[24] 栗欣. 我国绿色矿山建设实践、问题及对策[J]. 矿产保护与利用, 2015(3): 1−5.
LI Xin. The construction practice, problems and countermeasures of green mine in our country[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015(3): 1−5.

[25] 李杏茹, 禚传源, 赵祺彬, 等. 基于标准比较的我国绿色矿山建设国际化水平与质量提升[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(4): 224−232.
LI Xingru, ZHUO Chuanyuan, ZHAO Qibin, et al. Study on the internationalization level and quality improvement of China's green mine construction based on standards comparison[J]. Mining Re-

search and Development, 2023, 43(4): 224−232.

[26] 胡克, 黄煦, 栗欣, 等. 关于构建我国矿业伦理的思考[J]. 中国矿业, 2014, 23(3): 1−5.
HU Ke, HUANG Xu, LI Xin, et al. A thinking on building the mining ethics in China[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(3): 1−5.

[27] 白中科, 杨侨, 白甲林. 论绿色矿山建设的源头管控与过程监管[J]. 中国矿业, 2018, 27(8): 75−79.
BAI Zhongke, YANG Qiao, BAI Jialin. Discussions of source control and process supervision for green mine construction[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(8): 75−79.

[28] 龚鹏, 张洪岩, 赵奎涛. 全国绿色矿业研究文献统计分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(10): 104−107.
GONG Peng, ZHANG Hongyan, ZHAO Kuitao. A bibliometrical analysis of the green mine research in China[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(10): 104−107.

[29] LI Mingyang, CHENG Hong, WANG Bin, et al. Bibliometric analysis of China's green mining development based on CNKI database[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(2): 22019.

[30] 崔彬, 李赋屏, 王琴, 等. 矿业循环经济模式[J]. 资源·产业, 2005(6): 42−44.
CUI Bin, LI Fuping, WANG Qin, et al. Model of mining recycling economy[J]. Resources & Industries, 2005(6): 42−44.

[31] 龚兴祥. 中国矿业低碳化发展的思考[J]. 资源与产业, 2011, 13(5): 140−144.
GONG Xingxiang. Views on low carbon development of China's mining sector[J]. Resources & Industries, 2011, 13(5): 140−144.

[32] LI Xin, YANG JunJie, YAN Hongcai, et al. Study on Evaluation Index System of Green mine construction[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 94(1): 12182.

[33] IPCC. Global Warming of 1.5 °C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[34] 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”?[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107−113.
DENG Xu, XIE Jun, TENG Fei. What is carbon neutrality?[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107−113.

[35] CHEN Ru, ZHANG Ruoyan, HAN Hongyun. Where has carbon footprint research gone?[J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106882.

[36] RITCHIE Hannah, ROSER Max, ROSADO Pablo. “CO_2 and Greenhouse Gas Emissions”[EB/OL]. https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions.

[37] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197−2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197−2211.

[38] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1−6.
SUN Xudong, ZHANG Leixin, ZHANG Bo. Research on the coal industry development and transition in China under the background of carbon neutrality[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 1−6.

[39] 赵迤琳. “双碳”目标下中国矿山的发展与建设模式[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(3): 83−89.
ZHAO Yilin. Development and Construction Model of Chinese Mines under “Dual Carbon” Goal[J]. China Mine Engineering, 2022, 51(3): 83−89.

[40] QI Rui, LI Sha, QU Lu, et al. Critical factors to green mining construction in China: A two-step fuzzy DEMATEL analysis of state-owned coal mining enterprises[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 122852.

[41] SHANG Delei, YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, et al. Analysis for Green Mine (phosphate) performance of China: An evaluation index system[J]. Resources Policy, 2015, 46: 71−84.

[42] ZHOU Yongli, ZHOU Wei, LU Xiang, et al. Evaluation Index System of Green Surface Mining in China[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2020, 37(4): 1093−1103.

[43] GUO Jia. Research on Dynamic Mechanism of Green Coal Mine Construction: Energy Engineering and Environment Engineering[C]//Feroz S. 2nd International Conference on Energy Engineering and Environment Engineering (ICEEEE). 2014, 535: 610−613.

[44] JISKANI Izhar Mithal, CAI Qingxiang, ZHOU Wei, et al. Green and climate-smart mining: A framework to analyze open-pit mines for cleaner mineral production[J]. Resources Policy, 2021, 71: 102007.

[45] 自然资源部. 煤炭行业绿色矿山建设规范: DZ/T 0315—2018[S]

[46] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤炭井工开采单位产品能源消耗限额: GB 2944—2012[S].

[47] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤炭露天开采单位产品能源消耗限额: GB 29445—2012[S].

[48] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248−258.
LIU Mingda, MENG Jijun, LIU Bihan. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248−258.

[49] 王莉莉. 永煤集团煤炭矿区碳排放核算及减排对策研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
WANG Lili. Study on the carbon emissions accounting and reduction measures of Yongmei Group Coal Mining Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[50] 夏德建, 任玉珑, 史乐峰. 中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J]. 统计研究, 2010, 27(8): 82−89.
XIA Dejian, REN Yulong, SHI Lefeng. Measurement of life-cycle carbon equivalent emissions of coal-energy chain[J]. Statistical Research, 2010, 27(8): 82−89.

[51] 付伟, 罗明灿, 陈建成. 碳足迹及其影响因素研究进展与展望[J]. 林业经济, 2021, 43(8): 39−49.
FU Wei, LUO Mingcan, CHEN Jiancheng. Research progress and prospects of carbon footprint and its influencing factors[J]. Forestry Economics, 2021, 43(8): 39−49.

[52] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 696−708.
ZHANG Qifeng, FANG Kai, XU Ming, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis[J]. Journal of Nat-

ural Resources, 2018, 33(4): 696−708.

[53] YU Man, WIEDMANN Thomas, CRAWFORD Robert, et al. The carbon footprint of Australia's construction sector[J]. Procedia Engineering, 2017, 180: 211−220.

[54] WIEDMANN Thomas. Editorial: Carbon footprint and input-output analysis-an introduction[J]. Economic Systems Research, 2009, 21(3): 175−186.

[55] 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 Boyu, BAI Zhongke. 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.

[56] FU Wei, LUO Mingcan, CHEN Jiancheng, et al. Carbon footprint and carbon carrying capacity of vegetation in ecologically fragile areas: A case study of Yunnan[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2020, 120: 102904.

[57] MOHAN Riya Rachel. Time series GHG emission estimates for residential, commercial, agriculture and fisheries sectors in India[J]. Atmospheric Environment, 2018, 178: 73−79.

[58] SEGURA-SALAZAR Juliana, LIMA Francisco Mariano, TAVARES Luís Marcelo. Life cycle assessment in the minerals industry: Current practice, harmonization efforts, and potential improvement through the integration with process simulation[J]. Journal of cleaner production, 2019, 232: 174−192.

[59] FINNVEDEN Göran, HAUSCHILD Michael Z, EKVALL Tomas, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(1): 1−21.

[60] 丁宁, 杨建新. 中国化石能源生命周期清单分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1592−1600.
DING Ning, YANG Jianxin. Life cycle inventory analysis of fossil energy in China[J]. China Environmental Science, 2015, 35(5): 1592−1600.

[61] 杨万成, 杨卫华, 王毅萌. 碳足迹研究的知识图谱——基于 CiteSpace 与 WoS 核心合集[J]. 节能, 2020, 39(8): 123−126.
YANG Wancheng, YANG Weihua, WANG Yimeng. Knowledge mapping for carbon footprint research - Based on CiteSpace and WoS core collection[J]. Energy Conservation, 2020, 39(8): 123−126.

[62] 才庆祥, 刘福明, 陈树召. 露天煤矿温室气体排放计算方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 103−106.
CAI Qingxiang, LIU Fuming, CHEN Shuzhao. Calculation method of greenhouse gas emission in open pit coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 103−106.

[63] LUO Guangfang, ZHANG Jianjun, RAO Yongheng, et al. Coal supply chains: A whole-process-based measurement of carbon emissions in a mining city of China[J]. Energies, 2017, 10(11): 1855.

[64] LIU Liyuan, JI Hongguang, LÜ Xiangfeng, et al. Mitigation of greenhouse gases released from mining activities: A review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(4): 513−521.

[65] 付梅臣, 郭卫斌, 李建民, 等. 我国煤矿区低碳型土地复垦现状与展望[J]. 中国矿业, 2015, 24(5): 49−52.
FU Meichen, GUO Weibin, LI Jianmin, et al. Low-carbon land reclamation in China's coal mining areas: Current situation and prospect[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(5): 49−52.

[66] 罗广芳. 矿业城市煤炭供应链碳排放研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.
LUO Guangfang. Study on carbon emissions of coal supply chains in a mining city[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

[67] 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.
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.

[68] 杨娅双. 基于生命周期评价理论的露天煤矿采—运—排—复阶段环境影响研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2019.
YANG Yashuang. Study on environmental impacts of mining-transport-discarding-reclaiming stages in a large opencast coal mine based on life cycle assessment theory[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.

[69] YANG Boyu, BAI Zhongke, ZHANG Junjie. Environmental impact of mining-associated carbon emissions and analysis of cleaner production strategies in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(11): 13649−13659.

[70] RESTREPO Álvaro, BAZZO Edson, MIYAKE Raphael. A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 92: 179−186.

[71] AGUIRRE-VILLEGAS Horacio A, BENSON Craig H. Case history of environmental impacts of an Indonesian coal supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 157: 47−56.

[72] BURCHART-KOROL Dorota, FUGIEL Agata, CZAPLICKA-KOLARZ Krystyna, et al. Model of environmental life cycle assessment for coal mining operations[J]. Science of The Total Environment, 2016, 562: 61−72.

[73] 刘静静. 大型煤炭企业的碳排放测算及评价[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2014.
LIU Jingjing. Calculation and evaluation of carbon emissions of large coal enterprises[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2014.

[74] 曾繁伟, 刘静静. 煤炭产品的碳足迹计算方案研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(12): 169−172.
ZENG Fanwei, LIU Jingjing. Study of carbon footprint calculation scheme for coal products[J]. Coal Engineering, 2017, 49(12): 169−172.

[75] 王长科, 罗新正, 张华. 全球增温潜势和全球温变潜势对主要国家温室气体排放贡献估算的差异[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 49−54.
WANG Changke, LUO Xinzheng, ZHANG Hua. Differences between the shares of greenhouse gas emissions calculated with GTP and GWP for major countries[J]. Climate Change Research, 2013, 9(1): 49−54.

[76] 巢清尘. "碳达峰和碳中和"的科学内涵及我国的政策措施[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(2): 14−19.
CHAO Qingchen. Scientific connotation of "carbon peak and carbon neutrality" and the policy measures of our country[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(2): 14−19.

[77] WANG Bing, CUI Chaoqun, ZHAO Yixin, et al. Carbon emissions

accounting for China's coal mining sector: Invisible sources of climate change[J]. Natural Hazards, 2019, 99(3): 1345−1364.

[78] LIU Zhu, GUAN Dabo, WEI Wei, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524(7565): 335−338.

[79] 安英莉, 卞正富, 戴文婷, 等. 煤炭开采形成的碳源/碳汇分析——以徐州贾汪矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 415−422.
AN Yingli, BIAN Zhengfu, DAI Wenting, et al. Analysis on the gas carbon source and carbon sink in coal mining: A case study of Jiawang, Xuzhou[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2): 415−422.

[80] LAI Li, HUANG Xianjin, YANG Hong, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010[J]. Science Advances, 2016, 2(11): e1601063.

[81] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等.《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 1−11.
CAI Bofeng, ZHU Songli, YU Shengmin, et al. The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8): 1−11.

[82] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804−812.
FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, et al. Estimation of terrestrial vegetation carbon sinks in China from 1981 to 2000[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2007, 37(6): 804−812.

[83] 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 Liming, ZHANG Shaoliang, HOU Huping, 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.

[84] HARRIS Nancy L, BROWN Sandra, HAGEN Stephen C, et al. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions[J]. Science, 2012, 336(6088): 1573−1576.

[85] 谷家川, 查良松. 皖江城市带农作物碳储量动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(12): 1507−1513.
GU Jiachuan, ZHA Liangsong. Research on dynamic change of vegetation carbon storage of crops in the Wan Jiang City Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(12): 1507−1513.

[86] 刘鹤云. 矿区生态减排能力评估与提升对策研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.
LIU Heyun. Assessment of mine ecological emission reduction capability and promotion strategies-a case study of Pingshuo mine area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

[87] SHANG Rong, CHEN Jing M, XU Mingzhu, et al. China's current forest age structure will lead to weakened carbon sinks in the near future[J]. The Innovation, 2023, 4(6): 100515.

[88] 周璞, 侯华丽, 张惠, 等. 碳中和背景下提升土壤碳汇能力的前景与实施建议[J]. 环境保护, 2021, 49(16): 63−67.
ZHOU Pu, HOU Huali, ZHANG Hui, et al. The development prospects and implementation suggestions of increasing soil carbon storage in the context of carbon neutrality[J]. Environmental Protection, 2021, 49(16): 63−67.

[89] HEPBURN Cameron, ADLEN Ella, BEDDINGTON John, et al. The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal[J]. Nature, 2019, 575(7781): 87−97.

[90] PAN G X, XU X W, SMITH P, et al. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 136(1−2): 133−138.

[91] 田康, 赵永存, 邢喆, 等. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究——基于长期试验点的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 433−440.
TIAN Kang, ZHAO Yongcun, XING Zhe, et al. A meta-analysis of long-term experiment data for characterizing: The topsoil organic carbon changes under different conservation tillage in cropland of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 433−440.

[92] 田康, 赵永存, 徐向华, 等. 不同施肥下中国旱地土壤有机碳变化特征——基于定位试验数据的 Meta 分析[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3735−3743.
TIAN Kang, ZHAO Yongcun, XU Xianghua, et al. A meta-analysis of field experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different fertilization treatments in uplands of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3735−3743.

[93] YAN X Y, CAI Z C, WANG S W, et al. Direct measurement of soil organic carbon content change in the croplands of China[J]. Global Change Biology, 2011, 17(3): 1487−1496.

[94] TANG H J, QIU J J, VAN RANST E, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model[J]. Geoderma, 2006, 134(1−2): 200−206.

[95] YU Y Q, HUANG Y, ZHANG W. Modeling soil organic carbon change in croplands of China, 1980−2009[J]. Global and Planetary Change, 2012, 82−83: 115−128.

[96] 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 191−197.
ZHAO Yongcun, XU Shengxiang, WANG Meiyan, et al. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: Review, challenge, and research suggestions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 191−197.

[97] 刘淑琴, 张尚军, 牛茂斐, 等. 煤炭地下气化技术及其应用前景[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 97−102.
LIU Shuqin, ZHANG Shangjun, NIU Maofei, et al. Technology process and application prospect of underground coal gasification[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 97−102.

[98] 马迅, 张爱伟, 黄磊, 等. "双碳"目标下矿山生态修复减排增汇措施研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(6): 109−115.
MA Xun, ZHANG Aiwei, HUANG Lei, et al. Research on measures for reducing emissions and increasing sinks in mine ecological restoration under the goals of carbon peak and carbon neutrality[J]. China Coal, 2023, 49(6): 109−115.

[99] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70−80.
ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 70−80.