



移动扫码阅读

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.

# 碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题

李树志<sup>1</sup>,李学良<sup>2,3</sup>,尹大伟<sup>4</sup>

(1.中国煤炭学会土地复垦与生态修复专业委员会,北京 100013;2.煤炭科学研究总院,北京 100013;  
3.中煤科工生态环境科技有限公司,北京 100013;4.山东科技大学,山东 青岛 266510)

**摘要:**我国作为世界上最大的煤炭生产国和消费国,能源结构仍以煤炭、石油、天然气等传统化石燃料为主,碳排放量高,且其能源格局预计短时间内不会发生实质性改变。能源领域减排是我国实现碳达峰、碳中和的关键之处,但这并不意味着化石能源就要完全退出。目前,实现碳中和已上升到国家战略层面,碳中和是国家提出的一个顶层目标,落实到实际的产业层面,将会给传统的高耗能企业转型和新能源及绿色产业带来巨大的发展机遇,同时从一定程度上极大地推动环境保护与生态修复。推进碳中和,对我国现代化建设、对全球气候治理、对人类命运共同体建设,都具有极其重要的理论与实践意义。以我国的能源结构组成与碳排放现状为主要切入点,介绍了我国现阶段碳中和的具体背景,分析了生态修复与碳中和的内在联系,讨论了煤炭矿山生态修复的生态逻辑、应遵循的基本原则与实施的总体要求,同时强调了消除地质安全隐患、自然恢复、辅助再生、生态重建等矿山生态修复技术措施的内涵及分类。传统煤矿开采不仅造成了地表植被破坏、土壤质地变化,而且导致碳汇损失,在开采与选洗过程中直接和间接的导致了碳的大量排放,通过科学的矿山生态修复可较大程度改善土壤质地、增加植被覆盖率,提高减排增汇水平,实现“低碳源、高碳汇、高效益”的发展状态,有效助力碳中和的实现。

**关键词:**碳中和;碳排放;矿山开采;矿山生态修复;环境保护

**中图分类号:**X171.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2022)01-0286-07

## Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality

LI Shuzhi<sup>1</sup>, LI Xueliang<sup>2,3</sup>, YIN Dawei<sup>4</sup>

(1. Professional Committee of Land Reclamation and Ecological Restoration of China Coal Society, Beijing 100013, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. China Coal Science and Technology Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 4. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510)

**Abstract:** As the world's largest coal producer and consumer, China's energy structure is still dominated by traditional fossil fuels such as coal, oil, and natural gas, and its carbon emissions rank first in the world, and its energy pattern is not expected to undergo substantial changes in a short period of time. The energy sector is the key to achieving carbon peak and carbon neutrality in China, but this does not mean that fossil energy will be completely withdrawn. At present, achieving carbon neutrality has risen to the national strategic level. Carbon neutrality is a top-level goal proposed by the country. When implemented at the actual industrial level, it will bring benefits to traditional high-energy-consuming enterprises and emerging new energy and green industries. Huge development opportunities, while greatly promoting environmental protection and ecological restoration to a certain extent. Promoting carbon neutrality has extremely important theoretical and practical significance for China's modernization, global climate governance, and the building of a community with a shared future for mankind. Taking China's energy structure composition and carbon emissions status as the main entry point, this paper introduces the specific background of China's current carbon neutrality, analyzes the internal relationship between ecological restoration and carbon neutrality, and then discusses the ecological logic of ecological restoration of coal mines. The basic principles to be followed and the overall requirements for implementation, while emphasizing the connotation and classification of mining ecological restoration technical measures

收稿日期:2021-11-10;责任编辑:黄小雨

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501105);天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项青年资助项目(2018-TD-QN041)

作者简介:李树志(1960—),男,河北定州人,研究员,博士生导师。E-mail: lishuzhi9686@163.com

such as the elimination of geological safety hazards, natural restoration, auxiliary regeneration, and ecological reconstruction. Coal mining not only caused the destruction of surface vegetation and changes in soil texture, resulting in carbon loss, but also directly and indirectly caused a large amount of carbon emissions during the process of mining and washing. Scientific mine ecological restoration can greatly improve soil texture. Increase vegetation coverage, increase the level of emission reduction and sink increase and realize the development status of “low carbon source, high carbon sink, and high efficiency”, which effectively contributes to the realization of carbon neutrality.

**Key words:** carbon neutrality; carbon emission; mining; ecological restoration of coal mines; environmental protection

## 0 引言

碳中和是指人类活动总碳量(主要指二氧化碳 $\text{CO}_2$ )进出大气达到0的平衡状态,但在2020年,大气中的 $\text{CO}_2$ 体积分数超过了0.04%,全球地表平均温度比19世纪的基线升高了约1.25℃,比1981—2010年的参考期升高了0.6℃,逼近2016年的最热记录,因此在全球范围内控制碳排放量迫在眉睫<sup>[1-3]</sup>。我国 $\text{CO}_2$ 排放量位居世界各国之首,中国政府在温室气体减排方面面临前所未有的国际压力。2020年9月,习近平总书记多次在公开讲话中提及中国将提高自主贡献力量,力争温室气体排放于2030年前达到峰值,争取在2060年前实现碳中和的目标。据资料显示,欧盟在20世纪90年代、美国在2007年左右已经达到了碳排放的峰值,他们设定的碳中和时间与碳达峰之间预留了40~60 a,而我国从2030年碳达峰的目标到2060年碳中和的目标之间只有30 a,时间短,任务重。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》(简称“十四五”规划)中定量提出了单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放分别降低13.5%、18%的目标,体现我国对碳达峰、碳中和工作的决心和魄力。

煤炭作为我国的主体能源的地位短期内不会发生改变,截至2020年底,我国现有煤矿约4 700处,同比2019年下降11.3%,全国累计退出煤矿5 500处左右、退出落后煤炭产能10亿t/a以上。在碳达峰、碳中和背景下,无论是正在生产还是退出煤矿的生态环境问题都是不容忽视的,煤矿受损区生态修复作为恢复与完善其区域生态系统功能的重要环节,对固碳释氧具有积极影响,同时对实现碳中和目标具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。笔者就碳中和背景下煤矿区生态修复的几个问题进行梳理探讨。

## 1 我国碳排放现状

据国际能源署数据显示,2019年全球碳排放总量约330亿t,2020年因新冠疫情的影响,全球碳排放总量有所降低,但仍达到306.9亿t,远高于2010年

以来的平均水平;1900—2020年,120 a间全球年碳排放量增长了15.6倍。据英国石油公司(BP)发布的《世界能源统计年鉴2021》统计数据显示,2009—2020年,我国碳排放总量由77.1亿t升至99.0亿t(图1),可见我国在经济社会全面发展的同时,碳排放总量较高也成为了全社会必须关注的问题。

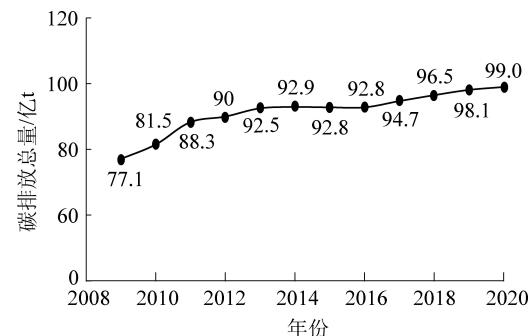


图1 2009—2020年我国碳排放总量变化趋势

Fig.1 Change trend of China's total carbon emission from 2009 to 2020

从能源消耗和碳排放现状来看,化石能源依旧是能源结构的主要组成部分,而且在未来很长一段时间内,该能源结构难以发生实质性变化<sup>[6-9]</sup>。在现阶段我国社会的主要矛盾是人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分发展之间的矛盾,其中能源需求是满足一切发展的基础,不断增长的能源需求和以石化能源为主的能源消费结构导致我国 $\text{CO}_2$ 排放量较高。

目前,我国碳排放的主要来源是煤炭,煤炭燃烧造成的碳排放占全国总碳排放60%左右。在碳排放结构中,工业生产是第一大碳排放源,在能源使用造成的 $\text{CO}_2$ 排放中,每年有近36%来源于此;生活耗能是 $\text{CO}_2$ 第二大排放来源,约占26%;交通出行是第三大碳排放源约占25%。

## 2 生态修复与碳中和的关系

### 2.1 碳中和背景分析

碳中和是指将因社会活动产生的 $\text{CO}_2$ 排放量与通过商业碳汇或碳减排信用等活动所吸收的 $\text{CO}_2$ 量等量,从而使两方相互抵消,净碳排放量趋于零。政府间气候变化专门委员会(IPCC)于2018年发布的《全球1.5℃升温特别报告》中指出,为实现全球变

暖温度控制在1.5℃以内的目标,必须在21世纪中叶实现全球范围内净零碳排放,即碳中和。目前,很多国家做出了碳中和承诺并展开行动,全球应对气候变化行动取得积极进展。

我国对实现碳达峰、碳中和也做出了积极响应,已正式将碳中和理念纳入顶层布局。2015年6月,李克强总理在法国访问期间,宣布了中国的减排承诺,即在2030年左右实现碳达峰;2020年9月,在第75届联合国大会上,习近平总书记郑重宣布中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,力争2030年前实现CO<sub>2</sub>排放达峰,2060年前实现碳中和;2021年3月,李克强总理在《2020年政府工作报告》中提出,要扎实做好碳达峰、碳中和各项工作,制定2030年前碳排放达峰行动方案,优化产业结构和能源结构,实施金融支持绿色低碳发展专项政策,设立碳减排支持工具。

2021年9月,中共中央、国务院发表的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中提出了到2025、2030、2060年的主要目标,要求加快煤炭减量步伐,统筹煤电发展和保供调峰,巩固生态系统碳汇能力、提升生态系统碳汇增量,抓紧修订节约能源法、电力法、煤炭法、可再生能源法、循环经济促进法等。

我国生态文明建设已经进入以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、加快构建清洁低碳安全高效能源体系、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。

## 2.2 生态修复对碳中和的作用

我国对生态文明建设和生态环境保护提出了目标,到2035年,生态环境根本好转,美丽中国目标基本实现;到21世纪中叶,生态文明全面提升,实现国

家治理体系和治理能力现代化。2021年3月,习近平总书记在主持召开中央财经委员会第九次会议时发表重要讲话指出:实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局。碳达峰、碳中和作为生态文明建设的历史性任务,两者之间密切相关。实现上述目标,需从生态系统整体性出发,注重综合治理、系统治理、源头治理,加快构建减污降碳一体谋划、一体部署、一体推进、一体考核的机制。

长期以来,由于煤炭资源的大规模、高强度开采,给我国土地资源带来了负面影响,使原有的土地条件发生改变,绝大多数土地向不利于植物生长的方向发展。在东部山东、安徽等地区,煤炭开采主要为井工开采,完全垮落管理顶板,由于区域地表潜水位普遍较高,开采后极易形成季节性或永久性积水,大幅降低了原有的植被覆盖率;在西部新疆、内蒙古、青海等地区,植被本身生存条件较为恶劣,不易存活,加之该地开采多为露天开采,给原有植被的生存环境造成毁灭性破坏,修复难度极大。综上所述,煤炭开采不仅造成了地表植被破坏、土壤质地变化,而且对生态环境造成破坏,这些影响也体现在“碳效应”方面。一方面植被的破坏影响了矿区碳的吸收转化能力,另一方面作为地球三大碳库之一的土壤,受煤炭开采影响其质地产生变化,进而可能影响土壤中的碳循环。因此,科学实施煤炭矿山生态修复,持续提高区域性林、草等植被对生态系统的质量和稳定性极为重要<sup>[10-13]</sup>,也迫在眉睫。

生态修复将助力碳中和目标的实现,为了达到碳中和目标,既要减排(碳源),也要增汇(碳汇),碳汇是指通过植树造林等方式吸收大气中的CO<sub>2</sub>,从而减少温室气体在大气中浓度的过程、活动或机制(图2)<sup>[14]</sup>。

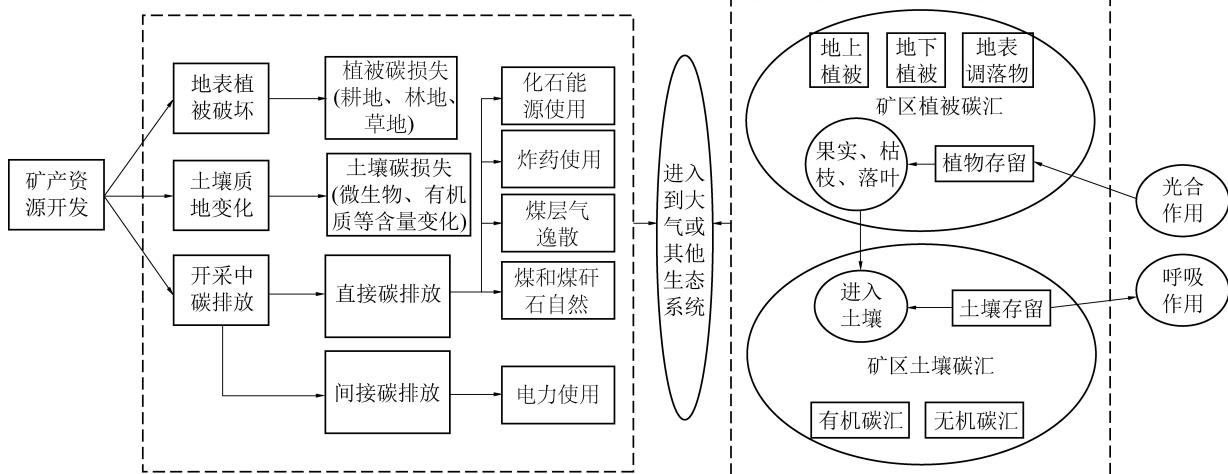


图2 矿区碳源/汇交换过程

Fig.2 Carbon source / sink exchange process in mining area

煤炭矿山生态修复能够有效地增强修复后土壤碳储存和植物固碳能力,对实现碳中和发挥着重要作用,具体体现在以下4个方面:①通过生态修复,可缓解已破坏的生态系统,修复后的耕地、林地、草地等生态系统结构和功能较之前相对完整,在固碳释氧、缓冲气候变化影响等方面能够发挥积极作用;②在生态修复过程中,需进行土地整治,土壤重构作为土地整治的一个重要环节对土壤中有机碳的积累有着重要作用,通过土地整治等工程能够有效提高修复区土壤质量,增加储碳潜力;③将矿区破坏的或达到生产年限的建筑废弃地复垦利用,建设用地具有碳源功能,将其整治成林草地、湿地等,增加植被覆盖率,实现碳源向碳汇转换;④将矸石山特别是易自燃矸石山进行生态治理后综合利用,不仅可直接减少碳排放、降低对环境的污染,而且还避免了土地资源的浪费。

### 3 矿山生态修复的技术体系

#### 3.1 矿山生态修复的定义

笔者正在编制的行业标准《矿山生态修复技术规范》将矿山生态修复定义为:依靠自然力量或通过人工措施干预,对因矿产资源开采活动造成的地质安全隐患、土地损毁和植被破坏等矿山生态问题进行修复,使矿山地质环境达到稳定、损毁土地得到复垦利用、生态系统功能得到恢复和改善。其目标是把因矿产资源开采而破坏的生态系统作为一个整

体,依据矿山周边区域生态系统功能重要性、人居环境与经济社会发展状况,综合考虑自然条件、地形地貌条件、矿山生态问题及其危害程度等,坚持山水林田湖草一体化保护修复的理念,依靠自然恢复能力,结合必要的人工修复措施,对矿产资源开发造成的生态破坏进行修复与治理,消除地质安全隐患,改善水土环境,有效恢复生态功能<sup>[15-18]</sup>。

#### 3.2 矿山生态修复的生态逻辑

生态修复是矿山环境保护和综合治理、增加碳储量、提升区域生态系统固碳能力的有效途径。为避免和减少对环境的破坏,需依据矿山不同开采时期的技木特点和自然环境等因素,制定和调整相应的技术方案,做到采矿与生态修复的一体化、同步化,最终实现矿山生态功能的修复,助力碳中和。生态修复一定要从单一的土地整治与复绿过渡到生态功能的全面修复,总体上重新建立一个完整的功能性生态系统。恢复生态系统功能,不仅仅是简单的植被重建,而是强调已经破坏或者退化生态系统功能的整体提升<sup>[19-20]</sup>,从而使得区域生态系统的固碳、储碳能力得到提升,实现矿区的局部碳汇。

矿山生态修复主要有以下特点(矿山生态修复的生态逻辑如图3所示):强调遵循自然规律和生态逻辑开展矿山生态修复工程;以损毁土地的复垦与地质环境的恢复治理为基本内容;以自然恢复为主,辅助人工修复与生态重建<sup>[21-22]</sup>;从生态系统的角度进行整体保护、系统修复、综合治理。



图3 矿山生态修复的生态逻辑

Fig.3 Ecological logic of mine ecological restoration

### 4 碳中和背景下的生态修复理论与技术

#### 4.1 煤炭矿山生态修复的基本原则

由于采煤引起的生态环境问题具有区域性、地域性、复杂性等特点,煤炭矿山生态修复方法也各不相同,但总的来讲其需要遵循的基本原则具体如下:

1)尊重科学,顺应自然,保护自然。尊重生态系统自然演替规律,改变单纯工程修复思维,坚持自然恢复为主,人工修复为辅,最大限度发挥自然修复能力。

2)整体保护,系统修复,综合治理。统筹考虑

矿山所处区域生态功能以及各生态要素相互依存、相互影响、相互制约等特点,统筹兼顾,系统设计,综合治理,逐步修复受损生态功能。

3)因地制宜,分类施策,分区治理。统筹考虑煤炭矿山生态问题的多样性、复杂性、多因性和地域性特征,充分发挥国土空间规划引领作用,依据规划确定的土地用途,宜林则林、宜耕则耕、宜水则水、宜建则建、宜荒则荒。

4)恢复耕地,融合产业,保障安全。针对煤矿开采引发的生态环境问题通常具有规模大、地类多、程度重、时间长等特点,应充分考虑土地复垦、资源

开发利用、城市功能建设、产业导入转型等不同建设要求,通过地上地下协调治理布局,确保生态修复区域的地质稳定安全。

5)经济合理,技术可行,注重成效。按照经济合理、技术可行的原则,合理确定生态修复方向、方式和措施,提高投入产出效率,最大限度发挥废弃矿山修复后的长期效益。

#### 4.2 碳中和背景下煤炭矿山生态修复的总体要求

煤炭开采活动扰动影响剧烈,造成的生态破坏规模大、范围广,涉及到气候、土地类型、土壤类型、水文条件及安全隐患等众多因素,引发的土地功能、地质环境、生态系统损毁程度不尽相同,煤炭矿山的生态修复应分区分类、因地施策、地上地下综合治理,一般均需要通过人工干预和工程措施才能达到理想的效果<sup>[23-24]</sup>。

1)开采塌陷的山地地区和生态脆弱区林草地及其他未利用地的生态修复,应尽量减少二次扰动,充分发挥生态自然恢复功能,采取生态自修复、人工干预促进、局部生态治理等综合措施,构建优于或不低于煤炭开采前的矿区生态环境,巩固区域生态环境承载力。

2)开采塌陷的平原和丘陵地区的生态修复,依靠自然恢复通常很难完全得到修复,应在尊重自然、顺从自然的前提下,主要采取辅助再生、人工干预修复、生态重建等措施,通过自然恢复与工程措施相结合的方式进行矿山生态修复,尽可能恢复破坏前生态系统固碳、储碳能力。

3)露天采场、排土场、排矸场和工业场地等区域扰动剧烈,应坚持仿自然地貌整形、土壤重构、植被重建、景观格局优化、生物多样性保育重组一体化综合治理原则,采取辅助再生、生态重建等措施,修复和恢复受损的生态功能,实现生态系统的正向演变,实现由碳源向碳汇的转变。

#### 4.3 煤炭矿山生态修复减排增汇的技术路径

##### 4.3.1 消除地质安全隐患,为生态恢复夯实基础

针对不同的地质安全隐患与治理利用方向,采取合理的技术措施保障生态修复区域的地质稳定。消除由采矿活动引发或加剧的对人居、生命、财产安全构成威胁的危岩体、不稳定边坡、废弃矿井、地面塌陷、地表开裂等地质安全问题。

主要包括以下5个方面:①消除采煤塌陷地质安全隐患的措施,根据治理利用方向采取削坡、回填、挖深垫浅、整平以及抗变形建设等措施;②消除地下采空区地质安全隐患的措施,根据采动地基稳定性评价成果,采取地下采空区注浆充填、覆岩离层

带注浆充填、监测预警等工程措施;③消除排土场和排矸场地质安全隐患的措施,包括削坡、清理、拦挡、固化、压实等;④消除露天采场地质安全隐患的措施,包括削坡卸荷、坡体锚固、回填压脚、疏导排水等;⑤消除工业场地废弃矿井地质安全隐患技术措施,包括立井、斜井、平硐的封堵、回填、设置标志等。

##### 4.3.2 自然恢复,守住自然生态安全边界

所谓自然恢复,是对生态系统停止人为干扰,以减轻负荷压力,依靠生态系统的自我调节能力和自我组织能力使其向有序的方向自然演替和更新恢复,提高其生态系统中植物的固碳潜力。煤炭矿山生态修复宜采用自然恢复措施的区域:①干旱半干旱区煤矿轻度采煤塌陷地、中度采煤塌陷林草地和其他未利用土地;②山地区煤矿轻度采煤塌陷地、中度采煤塌陷林草地和其他未利用土地;③丘陵区煤矿轻度采煤塌陷林草地和其他未利用土地。

##### 4.3.3 辅助再生,提升受损区域生态抗逆性

辅助再生是在充分利用生态系统的自我恢复能力的基础上,辅以人工促进措施,使退化、受损的生态系统逐步恢复并进入良性循环,从而提高受损区域生态系统的抗逆性、环境承载力,增加碳储存能力。煤炭矿山生态修复宜采用辅助再生措施的区域包括:①干旱半干旱区煤矿中度采煤塌陷地、重度采煤塌陷林草地和其他未利用土地;②山地区煤矿中度采煤塌陷地、重度采煤塌陷林草地和其他未利用土地;③丘陵区煤矿中度采煤塌陷林草地和其他未利用土地。

##### 4.3.4 生态重建,恢复受损区域生态功能

生态重建措施是煤炭矿山生态修复的主要技术措施,在绝大多数采煤塌陷地及所有的排矸场、排土场、露天采场、煤矿工业场地的矿山生态修复中均应采用的技术措施。对因采矿破坏导致生态功能受损、生态系统自我恢复能力丧失或发生不可逆变化的,以人工措施为主,通过生物、物理、化学等方法,围绕修复生境、恢复植被、生物多样性重组等过程,重构生态系统并使生态系统进入良性循环。

生态重建措施包括地貌重塑、土壤重构、植被重建3个方面,可进一步提高生态系统“碳汇”能力,每个方面的具体工作内容应因地制宜,具体按以下各类场地分别进行布设:①采煤塌陷地的非积水、积水和季节性积水区等;②排矸场的平台、坡面以及自燃与非自燃区等;③排土场的平台、坡面等;④露天采场的道路、平台、边坡与坑底等;⑤煤矿工业场地不同区域等。

## 5 结 论

1) 我国作为世界上碳排放量最大的国家,现在已把碳中和上升到国家战略,在规定时段内实现碳中和,任重道远,需要从政策、管理、技术等多个方面协同推进。矿山开发造成的碳排放与碳流失通过土地复垦与生态修复措施可得到有效缓解,其是减少碳源、提升碳汇,实现碳中和的有效手段之一。

2) 矿山生态修复意义重大,需要考虑众多因素,以往生态功能修复的目标除了考虑植被的恢复和生物多样性的修复,同时还需要兼顾自然生态系统和社会经济系统两大方面,然而现在碳中和概念的提出,无疑给矿山生态修复带来了新的挑战,生态修复过程有时也是一个促进碳排放的过程,如何权衡其中的关系,需要去做更多的工作找到一个合理的最佳平衡点。

3) 在矿山生态修复过程中,“自然恢复为主”是基本方针,也是生态修复必须首要考虑、全程考虑的原则,其理念不仅适用于具体修复案例,更适用于整体修复规划。坚持“自然恢复为主”,充分考虑生态修复的艰巨性、复杂性、长期性,把握好节奏和平衡,有计划的开展矿山生态环境治理工作,持之以恒推进生态文明建设,才能有效助力碳中和。

4) 在后续的矿山生态修复工作中,减少碳源、增加碳汇,尽早实现碳中和,需要加强科技支撑,建立面向碳中和的生态修复理论体系,加强关键技术攻关;完善生态系统长期动态监测,丰富生态系统碳通量监测、碳循环模拟等内容,全面掌握矿山生态修复对碳中和的作用机理及有效程度;实时动态更新调整技术手段,寻求切实有效的矿山生态修复方法。

### 参考文献(References):

- [1] 苏健,梁英波,丁麟,等.碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J].中国科学院院刊,2021,36(9):1001-1009.  
SU Jian, LIANG Yingbo, DING Lin, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9):1001-1009.
- [2] 徐伟涛.“碳中和”背景下木质林产品碳汇能力提升路径研究[J].林产工业,2021,58(9):81-83.  
XU Weitao. Study on the Pathway of Improving Carbon Sink Capacity of wood forest products under the background of “Carbon Neutralization” [J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(9): 81-83.
- [3] 杨伟超,高吉喜,田美荣,等.气象驱动生态修复技术探讨[J].江苏农业科学,2017,45(4):5-9.  
YANG Weichao, GAO Jixi, TIAN Meirong, et al. Discussion on meteorological driven ecological restoration technology [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(4): 5-9.
- [4] 彭苏萍,毕银丽.黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J].煤炭学报,2020,45(4):1211-1221.  
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [5] 何江浩,蔡玉林,秦鹏.二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析[J].科学通报,2020,65(S1):194-202.  
HE Jianghao, CAI Yulin, QIN Peng. Spatial and temporal variations of carbon dioxide and its influencing factors [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(S1): 194-202.
- [6] 邓丽君.碳中和绿色转型、绿色投资与生态环境质量[J].统计与决策,2021,37(18):55-58.  
DENG Lijun. Carbon neutral green transformation, green investment and ecological environment quality [J]. Statistics & Decision, 2021, 37(18): 55-58.
- [7] 李勇,高岚.中国“碳中和”目标的实现路径与模式选择[J].华南农业大学学报(社会科学版),2021,20(5):77-93.  
LI Yong, GAO Lan. Implementation path and mode selection of China's "carbon neutralization" goal [J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2021, 20(5): 77-93.
- [8] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J].煤炭科学技术,2021,49(9):1-8.  
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.
- [9] 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 Heiping, 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.
- [10] 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.
- [11] 王双明,侯恩科,谢晓深,等.中深部煤层开采对地表生态环境的影响及修复提升途径研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1):19-31.  
WANG Shuangming, HOU Enke, XIE Xiaoshen, et al. Study on influence of surface ecological environment caused by middle deep coal mining and the ways of restoration [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 19-31.
- [12] 杨俊哲.神东矿区井上井下生态环境综合治理技术[J].煤炭科学技术,2020,48(9):56-65.  
YANG Junzhe. Comprehensive treatment technology of ecological environment in Shendong Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 56-65.
- [13] 胡振琪,肖武.关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考—基

- 于生态修复视角[J].煤炭科学技术,2020,48(4):35-42.
- HU Zhenqi, XIAO Wu. Some thoughts on green development strategy of coal industry: from aspects of ecological restoration [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 35-42.
- [14] 李树志.我国采煤沉陷土地损毁及其复垦技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2014,42(1):93-97.
- LI Shuzhi. Present status and outlook on land damage and reclamation technology of mining subsidence area in China [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 93-97.
- [15] 王军,应凌霄,钟莉娜.新时代国土整治与生态修复转型思考[J].自然资源学报,2020,35(1):26-36.
- WANG Jun, YING Lingxiao, ZHONG Lina. Thinking for the transformation of land consolidation and ecological restoration in the new era [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 26-36.
- [16] 胡振琪.我国土地复垦与生态修复30年:回顾、反思与展望[J].煤炭科学技术,2019,47(1):25-35.
- HU Zhenqi. The 30 years' land reclamation and ecological restoration in China: review, rethinking and prospect [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 25-35.
- [17] 李树志.我国采煤沉陷区治理实践与对策分析[J].煤炭科学技术,2019,47(1):36-43.
- LI Shuzhi. Control practices and countermeasure analysis on coal mining subsidence area in China [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 36-43.
- [18] 张绍良,米家鑫,侯湖平,等.矿山生态恢复研究进展-基于连续三届的世界生态恢复大会报告[J].生态学报,2018, 38(15): 5611-5619.
- ZHANG Shaoliang, MI Jiaxin, HOU Huping, et al. Research progress of mine ecological restoration-based on the reports of three consecutive world conferences on ecological restoration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5611-5619.
- [19] 胡振琪,龙精华,王新静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报,2014,39(8):1751-1757.
- HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Self-restoration, natural restoration and artificial restoration of coal mining ecological environment [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1751-1757.
- [20] 李廷梅,于鲁冀,吕晓燕.针对城市河流功能需求的生态修复技术概述[J].环境工程,2016,34(6):6-9.
- LI Tingmei, YU Luji, LYU Xiaoyan. An overview of ecological restoration technologies for urban river function requirement [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(6): 6-9.
- [21] 杨勤学,赵冰清,郭东罡.中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J].生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.
- YANG Qinxiue, ZHAO Bingqing, GUO Donggang. A review on vegetation restoration of opencast coal mine areas in northern China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34 (4): 1152-1157.
- [22] 张弥,温学发,于贵瑞,等.二氧化碳储存通量对森林生态系统碳收支的影响[J].应用生态学报,2010,21(5):1201-1209.
- ZHANG Ni, WEN Xuefa, YU Guirui, et al. Effects of carbon dioxide storage flux on carbon budget of forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1201-1209.
- [23] 陈浮,于昊辰,卞正富,等.碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J].煤炭学报,2021,46(6):1808-1820.
- CHEN Fu, YU Haochen, BIAN Zhengfu, et al. How to handle the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1808-1820.
- [24] 刘智.碳中和目标下低碳会展实践与推进策略[J].求索,2016(6):85-89.
- LIU Zhi. Low-carbon exhibition practice and promotion strategy under the goal of carbon neutrality [J]. Seeker, 2016 (6): 85-89.