



移动扫码阅读

王根锁,刘宏磊,武 强,等.碳中和背景下废弃矿山环境正效应资源化开发利用[J].煤炭科学技术,2022,50(6):321-328.

WANG Gensuo, LIU Honglei, WU Qiang, *et al.* Resource development and utilization of positive environmental impacts of abandoned mines under carbon neutrality[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 321-328.

# 碳中和背景下废弃矿山环境正效应资源化开发利用

王根锁<sup>1</sup>,刘宏磊<sup>2,3,4</sup>,武 强<sup>2,3</sup>,赵 颀<sup>2,3</sup>,段 丞<sup>1</sup>,王汉元<sup>1</sup>,章爱卫<sup>4</sup>

(1.内蒙古自治区地质调查研究院,内蒙古 呼和浩特 010020;2.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;  
3.国家煤矿水害防治工程技术研究中心,北京 100083;4.华北有色工程勘察院有限公司,河北 石家庄 050021)

**摘 要:**矿山环境正效应开发与利用是推动生态文明建设、延长矿业产业链、推进国家能源结构转型发展、实现“碳达峰”“碳中和”战略目标的重要途径。为系统化研究废弃矿山正效应资源化开发利用,从能源结构转型、碳中和视角出发,分析了矿产资源采掘及其环境负效应的碳源和碳排放,剖析了矿山环境正效应的内涵及其资源属性特征,阐述了生态资源、可回收资源、可再生资源、空间资源、旅游文化科普资源以及原位科学实验资源等正效应资源的开发利用对于削减废弃矿区碳源、增加生态碳汇及推动碳减排的潜在优势。结合内蒙古自治区“十四五”生态文明建设和碳达峰碳中和目标,讨论了开发利用正效应实现碳减排和修复自然碳汇,促进能源结构转型,助力资源型城市碳减排,助力原位科学试验和绿色低碳科技转化以及普及低碳生活能源消费知识等方面的重要作用。结合废弃矿山正效应资源化开发利用中的多元约束条件,从市场化运作和有效的竞争导向、正效应产品和产业政策引导、数字化智能化开发利用以及精准化碳核算等角度提出废弃矿山环境正效应开发利用与管理的对策建议,以期对我国建设北方生态安全屏障、推进废弃矿山资源化再利用以及实现能源行业减排增汇、绿色低碳发展和能源安全战略的有机统一提供科学依据,助力实现国家碳中和战略目标。

**关键词:**碳中和;废弃矿山;环境效应;矿山环境;固碳增汇

中图分类号:TD167 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2022)06-0321-08

## Resource development and utilization of positive environmental impacts of abandoned mines under carbon neutrality

WANG Gensuo<sup>1</sup>, LIU Honglei<sup>2,3,4</sup>, WU Qiang<sup>2,3</sup>, ZHAO Di<sup>2,3</sup>, DUAN Cheng<sup>1</sup>, WANG Hanyuan<sup>1</sup>, ZHANG Aiwei<sup>4</sup>

(1. Geological Survey Academy of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. National Engineering Research Center of Coal Mine Hazard Controlling, Beijing 100083, China; 4. North China Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** The development and utilization of positive environmental impacts (PEIs) are important ways to promote the construction of ecological civilization, extend the mining industry chain, promote the transformation of the national energy structure, and achieve the strategic goal of “carbon peaking” and “carbon neutrality”. To study the development and utilization of PEIs resources in abandoned mines, this paper analyzes the carbon sources and emissions of mineral resources extraction and its negative environmental impacts from the perspective of energy structure transformation and carbon neutrality, analyzes the connotation of positive impacts of mines and the characteristics of their resource properties, and elaborates on the development and utilization of ecological resources, recyclable resources, renewable resources, spatial resources, tourism, cultural and scientific resources, and in-situ scientific experiment resources, etc. The potential advantages of the development and utilization of PEIs resources to reduce carbon sources in abandoned mines, increase ecological carbon sinks, and promote carbon emission reduction are explained. In the context of the 14th Five-Year Plan of Inner Mongolia Autonomous Region’s

收稿日期:2021-10-02 责任编辑:周子博 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2022-0367

基金项目:内蒙古自治区科技重大专项资助项目(2020ZD0020);内蒙古自然资源厅科技创新项目计划资助项目,202004,2020-2022-104)

作者简介:王根锁(1965—),男,内蒙古呼和浩特人,高级工程师。E-mail:wgs002022@outlook.com

通讯作者:刘宏磊(1989—),男,山西太原人,博士。E-mail:liuhl@cumt.edu.cn

ecological civilization construction and carbon-neutral goal, we discuss the important role of developing and utilizing positive impacts to achieve carbon emission reduction and repair natural carbon sinks, promote energy structure transformation, resource-based cities to reduce carbon emissions, in situ scientific experiments and green low-carbon technology transformation, and popularize the knowledge of low-carbon life and energy consumption. Given the multiple constraints in the development and utilization of positive impacts of abandoned mines, we propose countermeasures and suggestions for the development and management of positive impacts of abandoned mines from the perspectives of market operation and effective competition guidance, PEIs' products and industrial policy guidance, digital and intelligent development and utilization, and accurate carbon accounting, with a view to building a northern ecological security barrier, promoting the reuse of abandoned mines, and achieving It is expected to provide a scientific basis for the construction of the northern ecological security barrier, promote the reuse of abandoned mines, and achieve the organic unity of emission reduction and sink increase, green low-carbon development and energy security strategy in the energy industry, and help to achieve the national carbon neutral strategy.

**Key words:** carbon neutral; abandoned mines; environmental impact; mine environment; carbon sequestration and sink

# 0 引言

碳中和指一定时期内 CO<sub>2</sub> 的排放量与去除量相互抵消,实现相对“零排放”<sup>[1]</sup>。自然界中碳的总量是动态平衡的,人类工程活动中大量化石燃料的燃烧使大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度逐渐远超生态环境碳汇能力,造成气候变暖。2018 年 IPCC(联合国政府气候变化专门委员会,Intergovernmental Panel on Climate Change)《全球 1.5℃ 升温特别报告》提出,为实现全球变暖幅度控制在 1.5℃ 以内的目标,必须在 21 世纪中叶实现全球净零碳排放<sup>[2]</sup>。2020 年 9 月我国承诺“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”,并在“十四五”规划中提出单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放分别降低 13.5% 和 18% 的目标<sup>[3]</sup>。碳中和已成为研究关注的热点,如碳中和实现路径与政策体系,绿色金融全体系,能源市场趋势预测、产业结构转型升级路径,高效循环利用技术、零碳能源技术、碳捕集封存技术,高耗能行业节能减排、碳汇产品研发等。

矿业工程活动使矿区碳平衡遭到严重破坏,其中有因矿山开采导致的直接碳排放,也有因开采扰动环境而间接产生的碳排放。因矿业工程活动扰动环境而造成的影响统称为“矿山环境效应”。绝大多数环境效应是负面的,如生态退化、土地沙漠化、地面塌陷、劣质矿井(坑)水、地表水污染等<sup>[4]</sup>,这些环境负效应者间接导致了矿区碳固存、碳汇能力丧失。但是,有一些扰动可以被转化和改造为积极的影响并开发利用,称为“矿山环境正效应”(以下简称“正效应”),它们以土地资源、生态资源、空间资源、清洁能源等形式分布于矿区内,对实现矿区碳源向碳汇的转变、清洁能源开发以及资源可持续性开发利用有重大的意义,并能产生一定的环境、经济和社会价值。

长期以来,我国学者侧重对矿山环境问题诱发

的环境负效应及其修复治理技术方法的研究,对矿山环境正效应的开发利用没有足够重视<sup>[5]</sup>。笔者聚焦于碳中和背景下废弃矿山正效应资源化开发利用,以矿业开发活动遗留的大量隐形和可利用的正效应资源为研究对象,系统分析矿山环境正、负效应与碳排放和碳减排之间的关联性,以内蒙古在生态环境、自然资源、区域地理等方面的优势及废弃矿山具体的工程实践为依据,明确废弃矿山的碳源与碳汇构成和环境正效应具备的减排增汇能力,并讨论其在助力矿区自然碳汇恢复、能源结构转型、城市碳减排以及原位试验研究和文化科普方面存在的优势。碳中和愿景下,将矿山环境研究领域的视角从负效应修复治理转向正效应资源化开发利用,在环境负效应与碳排放耦合关系分析的基础上,结合正效应的资源属性,剖析资源化开发利用正效应的途径,对于促进绿色低碳循环发展和助力实现碳中和具有重要意义。

## 1 矿山环境负效应与碳排放

矿山勘察、建设、开发直至闭坑废弃的全生命周期中,矿区碳排放主要包括矿产资源开发活动产生的直接碳排放和受开采扰动引起的矿山环境负效应<sup>[6]</sup>产生的间接的碳排放(图 1)。其中,直接碳排放如开采、加工、运输和利用等过程消耗煤、汽油、柴油和石油天然气等化石燃料产生的碳排放,炸药爆破引起的碳排放以及配套产业的电力能源发电燃烧过程中产生的碳排放。负效应间接造成的碳排放源自土地资源占用与破坏、水资源损毁、矿山次生地质灾害以及景观与生态破坏等负效应<sup>[7]</sup>,不仅使矿区的地表植被遭到破坏,水土流失、土地沙漠化等问题凸显,同时扰动了矿区的碳循环系统,土壤和植被原有的碳汇能力破坏、丧失,使二者从“碳汇”转化为“碳源”。可以看出,负效应与碳循环扰动均作为矿业活动对自然环境的干扰,二者之间在时间维度和

空间存在一定的耦合关系。由于采矿活动对岩土体环境、水环境和生态环境的扰动破坏的后果具有滞后性和持久性<sup>[8]</sup>,采掘扰动造成的矿山环境负效应及

其间接碳排放的时间和数量均高于采掘活动期间直接产生的碳排放,这也是矿产资源开发对碳循环产生的干扰具有长期性和无形性特征<sup>[9]</sup>的原因。

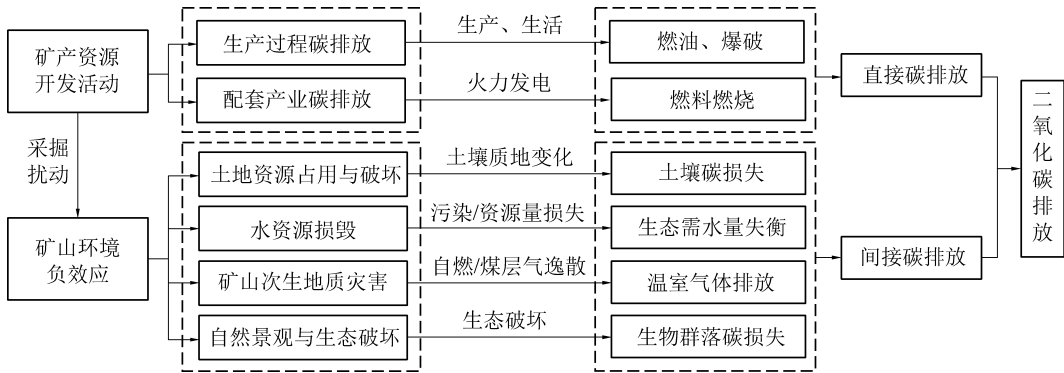


图 1 矿业工程活动及其负效应的直接和间接碳排放

Fig.1 Direct and indirect carbon emissions and negative environment impacts in mines

1.1 土地资源占用与破坏

开采活动通过物理破坏或化学污染等手段,占用、损毁了矿区土地资源,造成了土壤质地劣化和地表植被破坏,致使土壤和植被的固碳和碳汇能力损失,引起地上与地下生物量、枯落物、枯死木和土壤有机质碳库的大量释放。如宝日希勒矿区高潜水位沉陷区形成区域性积水,大雁煤矿区形成大面积塌陷坑,白云鄂博矿区遗留露天采坑,阿拉善湖盐露天矿大面积盐湖尾矿和盐溶沉陷区,直接破坏当地的土壤和植被,造成生态环境完全损毁,且暴露在空气中的废石堆在氧化和自燃过程中直接向大气排放 CO<sub>2</sub>。

1.2 水资源损毁

矿业工程活动对水资源损毁体现在 2 方面:①疏排水造成地下水量减损;②固、液废直接或间接造成水质劣化。当水资源不能满足生态环境在量与质方面的需求时,生态系统平衡就无法继续维持,间接影响生态环境的汇碳能力。如乌海、石拐等资源枯竭矿区,水资源损毁效应直接危及该地区的生态环境质量,无法承担矿区的生态涵养功能,造成生态环境退化,土壤和植被的碳汇能力也随之大幅降低。

1.3 矿山次生地质灾害

矿山次生地质灾害效应是开采活动对岩土体空间结构和形态扰动出现一系列环境问题的综合影响,如地面变形、水土流失、煤和矸石自燃、边坡失稳、煤层气逸散等。其中,当煤或矸石与空气接触时,会缓慢氧化、甚至自燃,进而产生碳排放。当煤层气逸散时,CH<sub>4</sub>等温室气体也一起排放,其温室效应是 CO<sub>2</sub> 的 25 倍,对臭氧层的破坏程度是 CO<sub>2</sub> 的 7 倍<sup>[10]</sup>。

1.4 自然景观与生态破坏

引起矿区地貌景观与生态破坏的诱因是综合的,在固废堆积、地面变形、边坡失稳的综合作用下,矿产开采活动破坏了土地原有的地貌形态和原有的土壤、植被以及动物、微生物群落,造成植被损毁、土地破坏和生物多样性减少,使矿区林地、草地、耕地等生态系统碳汇功能的急剧退化甚至丧失,并且矿区内植被作物的损毁加速死有机物质和土壤碳库的分解速率,将生物固碳释放到大气环境。

2 矿山环境正效应与碳中和

废弃矿山的正效应开发利用是实现碳中和目标的重要路径,是延长矿山产业链的重要支撑点。以内蒙古废弃矿山潜在的正效应资源为例,探讨正效应开发对于实现碳中和目标的作用。内蒙古是重要的能源、有色金属冶炼和煤化工基地。随着资源枯竭、淘汰落后产能政策实施以及矿山准入门槛提高等因素,众多不符合能源政策、生态环境标准的矿山逐步停产和关闭,截至 2020 年,全区已有各类废弃矿山 2 024 座。充分挖掘这些废弃矿山的环境正效应资源潜力,对于内蒙古能源行业碳中和具有重要意义。

矿山正效应的开发利用形式多样(图 2),根据其资源属性不同,废弃矿山中的正效应包括生态资源、可再生资源、旧采残留资源、空间资源、原位试验资源、文旅科普资源等(表 1)。正效应资源中蕴含着巨大的固碳减排潜力,从碳减排、碳替代、碳封存、碳循环的角度<sup>[11]</sup>,正效应资源化开发利用具有碳增汇和生态碳捕集、减少温室气体的排放、促进能源结构转型优化、加速推进城市碳减排、绿色低碳科技成果普及与转化等优势(图 3)。





图 2 常见的矿山环境正效应

Fig.2 Common positive environmental impacts in mines

表 1 废弃矿山环境正效应资源类型

Table 1 Type of positive environmental impacts resources in abandoned mines

序号	资源类型	矿山环境正效应开发利用内容
1	生态资源	土壤资源;生物资源;植被资源(森林、草场、农作物)、动物、微生物等
2	可再生资源	矿井热能开发、光能发电站、风力发电站、抽水蓄能电站、浅层低温热能等
3	旧采残留资源	低品位伴生资源、固体残留资源、煤层气资源、矿井水资源、“三废”资源等
4	空间资源	地表空间;可利用土地、工业建筑;地下空间:露天采坑、井工巷道、咸水层等
5	原位试验资源	原位采矿技术测试场地、地下深部科学试验场地、废弃矿山生态恢复试验场地等
6	文旅科普资源	矿山科普基地、矿山公园、矿山工业遗迹、矿山地质博物馆等

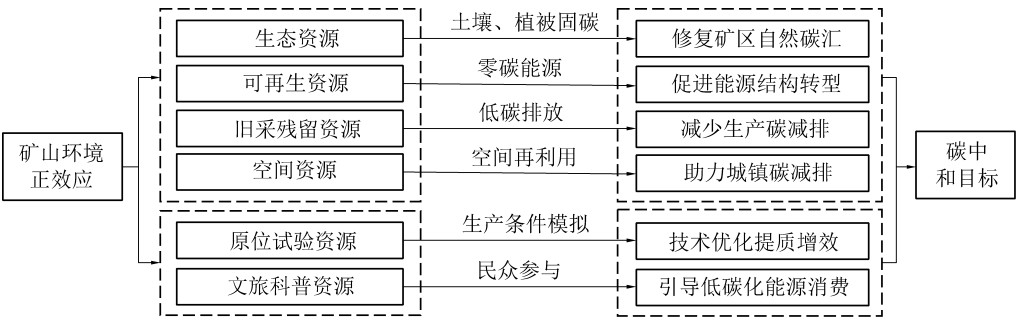


图 3 废弃矿山环境正效应及其助力碳中和的作用

Fig.3 PEIs of abandoned mines and its roles in promoting carbon neutrality

## 2.1 生态资源修复矿区自然碳汇

生态资源分为土壤资源和生物资源。废弃矿山有大量可用于林、草、木和农作物生长的土地<sup>[12]</sup>,经土壤改良、植被修复、生物多样性修复等,恢复土壤和植被的碳储存和固碳能力,将大气中CO<sub>2</sub>以无机碳或有机碳形式固定在植被和土壤中,修复矿区生态系统的碳汇功能。

内蒙古涵盖“三区四带”的黄河重点生态区和北方防沙带,加之其狭长的地理和区位特征,是北方的生态安全屏障<sup>[13]</sup>。大规模的矿产资源开发造成了矿区生态系统退化,全区废弃矿山占用、损毁土地202.47 km<sup>2</sup>,其中草地面积108.39 km<sup>2</sup>,占比

53.53%。截至2021年,废弃矿山待生态修复面积143.75 km<sup>2</sup>,相当于20 168个标准足球场大小。鉴于动、植物分布与矿区气候、水文等条件的关联性,宜结合区域特征因地开发废弃矿山生态资源。内蒙古东、西部气候条件差异显著,东部(如兴安盟、赤峰、通辽等盟市)宜以乔木、灌木植物碳汇为主,中、西部干旱、半干旱地区(如鄂尔多斯、巴彦淖尔、阿拉善等盟市)宜以乡土草本植被碳汇为主。内蒙古草地系统蕴藏着大量的土壤层碳<sup>[14]</sup>,草地总碳储量约3.76 Pg。内蒙古退化草原修复后的碳汇能力为43.55 Tg/a,可减少碳排放15.95万t,见表2。据此,废弃矿山恢复草地后碳汇潜力巨大,碳汇能力可达1.88 Tg/a。

表2 内蒙古退化草地碳汇潜力评估<sup>[15]</sup>

Table 2 Assessment of potential carbon sinks in degraded grassland in Inner Mongolia <sup>[15]</sup>				
类型	退化面积/10 <sup>2</sup> km <sup>2</sup>	土壤增汇潜力/(Tg·a <sup>-1</sup> )	地上生物固碳潜力/(Tg·a <sup>-1</sup> )	地下生物固碳潜力/(Tg·a <sup>-1</sup> )
草甸	4.59	3.60	0.73	5.00
草甸草原	2.92	4.01	0.68	4.22
典型草原	13.35	10.96	1.75	9.99
荒漠草原	4.16	0.95	0.24	1.42

通过林木草本育种栽培、改良土壤、优化林草地管理等方式开发废弃矿山的生态资源,不仅有助于增加土壤和植被吸收、储存CO<sub>2</sub>的能力,同时增加了林草植被和农作物的数量和面积,产出植被和土壤固碳汇集产品,成为碳抵消信用交易体系的组成部分。

## 2.2 可再生资源促进能源结构转型

可再生资源是能源结构中降低化石能源消费的主要替代资源。预计到2050年,风能、太阳能等可再生能源在全球能源消费量占比达48%<sup>[16]</sup>。2021年,内蒙古规模以上工业企业可再生能源发电量达1 095亿kWh,占工业发电量的18.4%,与等量火电相比,减少碳排放88.9 Mt。虽然可再生能源短期尚不足以替代以煤炭为主的能源消费,但随着风电、光伏电能装机容量的提升,高耗能行业燃煤排碳将逐渐降低。

废弃矿山中开发可再生资源优势显著,如减少新建工程对场地环境的扰动、基础设施循环利用以及大面积地表和地下可利用空间等。光、风发电对矿山场地有良好的适应性,如开采沉陷区、矸石堆,露天矿排土场、采坑边帮和台阶等区域均可灵活布置太阳能电池板和风力发电机组。内蒙古光、风资源丰富,大部分地区年日照时数大于2 700 h,全区总辐射量4 800~6 400 MJ/m<sup>2</sup>,平均年大风天数为10~40 d,锡林郭勒、乌兰察布局部地区可达50 d以

上。但是,风、光电接入电网后,其波动性和间歇性给电力系统运行和电网消纳带来一些问题,如冬季风、光电大发期与供热期重叠,夜间低谷时段风电出力较大,弃风、弃光显著。结合矿井的势能优势和抽水、压缩空气蓄能等技术,将具有地表蓄水和地下稳定空间的金属矿井改造为抽水蓄能发电站,配合传统能源形成“风光火储”发电模式,为风光电并入地区电网或者离网型风光蓄能系统的稳定提供条件。

此外,不少废弃矿山深达数百米,甚至超千米,拥有丰富的低温热能资源。利用矿区水文钻孔、地质钻孔或竖井、斜井等,结合单井、井群等换热技术,这些蕴藏在矿井水或含水层中的低温热能可用作建筑物、生态农业大棚、牲畜养殖等供暖和制冷。

## 2.3 旧采残留资源减少生产碳排放

旧采残留资源包括残留矿产资源、低品位伴生矿产资源、“三废”资源及矿井水资源等,这些资源的回收与再利用,能够减少新建矿井对环境的扰动及生产中的碳排放。内蒙古早期矿井采用房柱式采煤法,采出率约30%,约有2/3以上的煤炭以残留煤柱、护顶煤等形式残留井下。据估计,仅鄂尔多斯市东胜区、伊金霍洛旗和准格尔旗境内,房柱式开采遗留煤柱量就超过23亿t<sup>[17]</sup>。随着开采技术、煤炭气化技术、煤柱回收技术的优化,相当数量的“三下”压煤、各类残留煤柱体、遗留零散煤炭、不可采或不好采煤炭等资源,依托原有竖井、巷道和通风、运输

和供电等设施,无需开拓和占用新的场地,减少勘探、矿井开拓、巷道掘进,是减少开采过程碳排放的重要途径。另外,我国8个煤层气资源储量超过万亿方的含煤盆地,有3个位于内蒙古境内,分别为东部海拉尔盆地、中部二连盆地和西部鄂尔多斯盆地,境内2 000 m以浅以煤层气为主的气体资源储量约9.18 万亿  $\text{m}^3$ ,约占全国资源总量的25%,其中低煤阶煤层气资源量约7 万亿  $\text{m}^3$ ,约占全国资源总量的49%<sup>[18]</sup>。废弃煤矿巷道和煤层富含低浓度煤层气资源,如不进行回采收集,部分煤层气将从煤层或岩层表面细小的裂隙中溢出,造成甲烷等温室气体的直接释放。依托于低透性煤层瓦斯抽采、低浓度瓦斯抽采、乏风瓦斯回收等技术,在采前、采后利用地面瓦斯抽采技术,生产中采用井下抽采技术,建立地上、地下分布式瓦斯集输管网和产业化利用体系,经过抽采和浓缩后可将瓦斯当作气体燃料直燃供热或发电。

此外,废弃矿山水资源丰富,有沉陷区积水、采坑人工湖以及地下水库等。结合矿井水控制,处理,利用,回灌与生态环保“五位一体”矿井水资源化利用技术<sup>[19]</sup>,解决水资源、生态环境、产业结构之间的可持续发展难题,将矿井水用作土壤涵养、木草养护、农业灌溉、水产养殖以及各加工环节的水源,在保护地下水资源的同时调蓄与利用矿井水。

#### 2.4 空间资源助力城镇碳减排

废弃矿山空间资源分为地表与地下两种空间类型,是开发其他各类正效应资源的基础,既能助力城镇碳减排,又能缓解土地和空间资源紧缺的现状。2018年,我国建筑全过程碳排放量达49.3 亿 t,占碳排放总量的51.3%<sup>[20]</sup>,其较高的碳排放量主要是由建造过程资源消耗大、建造方式粗放所致。针对内蒙古资源型城市碳减排战略,再利用城镇周边矿山内保存完善的办公楼、工业建筑、电力、水利、道路等设施可减少新建建筑工程产生的碳排放。内蒙古《城市地下空间开发利用“十三五”综合规划》,提出引导城市开发利用地下空间资源纵向发展,解决城镇生存空间拥挤、交通堵塞、环境恶化等问题。相比地面建筑,矿山地下空间有防空、隔热、保温、抗辐射等优点,同时具备通风、供电、逃生、排水等设施,其开发能够有效减少新建工程和运维的碳排放。如利用固体矿山地下空间温、湿度相对稳定的特点,开发地下农业、水产养殖业等,或者作为仓储、流体和有害气体处理、固废无害填埋等场所;在空间紧缺型城镇周边矿山地下空间建设物流仓储、停车场、地下疗养院、酒店等城市服务场所;利用CCUS等深度脱碳

技术,将超临界状态  $\text{CO}_2$  注入废弃的油气田、咸水层等地下空间,用于碳封存<sup>[21-23]</sup>。

#### 2.5 原位科学试验促进技术提质增效

碳中和目标的实现离不开科学技术体系的支撑。而矿产资源采掘洗选加工以及生态修复等环节的节能减排和提质增效离不开原位试验。有些矿业领域的试验可能影响矿山的安全生产,难以在生产矿山开展。废弃矿山是最接近实际生产条件的研究场所,对优化工业工程设计、技术工艺参数具有关键作用。如利用井下空间模拟围岩失稳、矿井突涌水、冲击地压等条件,开展地质、采矿、水文以及岩土等学科试验,以及应急逃生和安全演习等。再如,废弃矿山中空旷的渣堆、矸石山、尾矿库等,对培育适应贫瘠土壤条件、恶劣自然环境的植被育、选种试验提供了原位试验场所,有利于培养固碳能力良好的植被、农作物以及土壤改良技术优化,如呼伦贝尔东明露天煤矿、锡林郭勒胜利东二号和西二号露天煤矿等在排土场设立的原位生态修复育种试验基地,研发出适应于寒区草原气候的排土场土壤改良和生态修复技术。

#### 2.6 文旅科普资源推动低碳化能源消费

碳中和目标不仅依靠能源结构转型,也需要公众生态环保和节能减排意识的增强。废弃矿山具有工业旅游和文化科普价值,如内蒙古扎赉诺尔露天矿山公园、大井国家矿山公园、古力脑包地质公园等,将地质地貌景观、古生物化石等地质遗迹和机械设备、巷道等工业遗迹开发为矿山公园、矿山博物馆等,展示矿山生产系统和设施,普及地质学常识、矿山开采历史和技术等内容,使公众在游览的同时增强生态环保的意识。此外,传播与气候变化和碳减排相关知识,提升民众节能减排、引导低碳化生活能源消费意识,普及日常生活节能减排的方式,使公众通过直观和切身的感受强化节能减排的观念。

### 3 矿山环境正效应开发利用与管理对策

从我国能源结构转型发展的角度,碳中和背景下正效应资源化开发利用要确保开发方式的可持续和绿色低碳,防止负效应加重产生新的碳源;从城镇发展的需求,要服务矿山周边的国土空间规划与社会经济结构,助力城镇碳减排;从资源立体化利用的角度,要将地下和地上空间综合利用起来,减少工程建设碳排放。围绕这些约束条件与正效应的资源属性优势,笔者提出4项正效应开发利用与管理的对策。

1) 强化正效应产业政策导向作用。完善激励



政策,引导碳中和背景下废弃矿山正效应开发的产业政策、投资方向、科技攻关等,发展工艺先进、生产效率高、资源利用效率高、环境保护水平高的资源化正效应开发产能。建立正效应资源的监管机制,形成企业与政府联动,构建正效应产业推广平台和信息化推广渠道,将矿山环境正效应资源的开发利用作为矿业转型经济市场建设的一部分,引导正效应多元化发展。

2) 发挥市场和绿色循环经济的“引擎”功能。碳排放权交易市场和产品的成熟将推动正效应中优质碳汇产品货币化,创造环境效益的同时产生经济价值。单纯依靠政府财政补贴和政策激励难以缓解正效益资源化开发中工业设计、设备和技术研发、人才培养等环节的资金压力。在市场驱动下倡导绿色循环经济导向,引导社会资本有序进入矿山环境正效应资源化开发的上下游市场协助能源结构转型,建立生态碳汇产品供应、消费、运行机制,加快标准制定、技术研发、产业合作等,构建正效应示范工程和产业示范,建设推广可再生能源与生态、农业、供热、储能等产业融合,增强企业碳减排内生动力。

3) 推进正效应数字化与产业链智能化应用。将大数据、云计算、区块链、物联网等数字技术应用于正效应开发利用,实现与能源电力、工业、交通、建筑等重点碳排放领域深度融合。建立矿山碳排放数字化自动核算模型和数据智能监管,控制矿业活动的直接碳排放,提升可再生能源、储能产业链分配与消纳智能化水平,提升风、光资源的利用效率,解决可再生能源供需关系不平衡和难消纳等问题。完善正效应领域绿色低碳技术评估、交易体系和科技创新服务平台,利用云计算、人工智能等优化能源系统,推动正效应数字化产业与绿色信贷、绿色债券、绿色基金、碳交易碳期货等领域的协同发展,逐步实现“低排放、高碳汇、高效益”的矿山环境正效应资源开发利用发展态势。

4) 拓展废弃矿山碳汇与正效应产能减排核算。结合矿产资源开发生命周期精准核算正效应资源化开发利用的碳汇与绿色产能,既能确保能源供给的安全与稳定,同时合理利用各类正效应资源缓解碳排放压力。矿山在闭坑前可预估矿山废弃后的生态系统碳汇和可再生能源减排能力,从碳的支出端建立碳排放监测、计算、统计体系,避免重复计算,精准、动态掌控废弃矿山的碳排放和减排情况,及时调控正效应开发中的能源安全不确定因素。

## 4 结 语

碳中和目标已纳入建设美丽中国和推进生态文

明建设的战略布局。矿山环境正效应资源具有资源和环境双重效应,符合“碳中和”目标下经济和社会对生态、可再生资源、城镇低碳排放等方面的要求,为我国应对气候变化与经济社会发展战略、供给侧结构性改革和低碳转型、生态环境保护创造生态安全保障和能源提供新的“减排”和“增汇”路径。正效应资源化开发利用也是矿业领域新的发展转折点,市场化运作、政策指引导向、数字化建设以及精细化绿色产能核算等将推动正效应多元碳汇产业化发展。

## 参考文献(References):

- [1] 余碧莹,赵光普,安润颖,等.碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 17-24.  
YU Biying, ZHAO Guangpu, AN Runying. Research on China's CO<sub>2</sub> emission pathway under carbon neutral target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social sciences edition), 2021, 23(2): 17-24.
- [2] ALLEN M, BABIKER M, CHEN Y, et al. IPCC SR15: Summary for policymakers [R/OL]. (2020-01-25) [2022-04-26]. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>.
- [3] 樊大磊,李富兵,王宗礼,等.碳达峰、碳中和目标下中国能源矿产发展现状及前景展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 1-8.  
FAN Dalei, LI Fubing, WANG Zongli, et al. Development status and prospects of China's energy minerals under the target of carbon peak and carbon neutral[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(6): 1-8.
- [4] 武强,李松营. 闭坑矿山的正负生态环境效应与对策[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 21-32.  
WU Qiang, LI Songying. Positive and negative environmental effects of closed mines and its countermeasures[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 21-32.
- [5] 武强,刘宏磊,陈奇,等. 矿山环境修复治理模式理论与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1085-1092.  
WU Qiang, LIU Honglei, CHEN Qi, et al. Theoretical study of mine geo-environmental restoration model and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1085-1092.
- [6] 武强,陈奇. 矿山环境问题诱发的环境效应研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 81-85.  
WU Qiang, CHEN Qi. An analysis of environmental effects induced by environmental problems in mines[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(5): 81-85.
- [7] 武强. 我国矿山环境地质问题类型划分研究[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(5): 107-112.  
WU Qiang. Study of classification of geologic environmental problems in mines in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(5): 107-112.
- [8] 刘宏磊. 矿山环境修复治理和开发利用模式的理论与实践研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2020.  
LIU Honglei. Research on the theory and practice of the restoration

- and utilization model for the mine environment[D]. Beijing:China University of Mining and Technology-Beijing,2020.
- [9] 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 ecosystem in coal mining area uder the carbon neutrality[J]. China Mining Magazine,2021,30(5):1-9.
- [10] 张博,陈国谦,陈彬. 甲烷排放与应对气候变化国家战略探析[J]. 中国人口资源与环境,2012,22(7):8-14.  
ZHANF Bo,CHENGGuoqian,CHEN Bin. National strategies for addressing climate change via methane emissions[J]. China Population,Resources and Environment,2012,22(7):8-14.
- [11] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.  
ZHOU Xiaoxin,LU Zongxiang,LIU Yingmei,*et al.* Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):4999-5008.
- [12] 武强,刘宏磊,赵海卿,等. 解决矿山环境问题的“九节鞭”[J]. 煤炭学报,2019,44(1):10-22.  
WU Qiang,LIU Honglei,ZHAO Haiqing,*et al.* Discussion on the nine aspects of addressing environmental problems of mining[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(1):10-22.
- [13] 钱赫. 内蒙古举行《构筑我国北方重要生态安全屏障规划(2021-2035年)》发布会[EB/OL]. [2021-08-31]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/gssxwfbh/xwfbh/neimenggu/Document/1711621/1711621.htm>.
- [14] 任继周,梁天刚,林慧龙,等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究[J]. 草业学报,2011,20(2):1-22.  
ZHOU Jizhou,LIANG Tiangang,LIN Huilong,*et al.* Study on grassland's response to global climate change and its carbon sequestration potentials[J]. Acta Prataculturae Sinica,2011,20(2):1-22.
- [15] 庄洋,赵娜,赵吉. 内蒙古草地碳汇潜力估测及其发展对策[J]. 草业科学,2013,30(9):1469-1474.  
ZHUANG Yang,ZHAO Na,ZHAO Ji. Estimation on grassland carbon sink potential and development countermeasure in Inner Mongolia[J]. Pratacultural Science,2013,30(9):1469-1474.
- [16] 中国建筑能耗研究报告2020[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(2):1-6.  
China Building Energy Consumption Annual Report 2020[J]. Journal of BEE,2021,49(2):1-6.
- [17] 内蒙古自治区人民政府. 内蒙古自治区人民政府办公厅关于印发自治区“十四五”应对气候变化规划的通知(内政办发[2022]60号)[EB/OL]. [2022-03-01]. <https://www.nmg.gov.cn/zwgk/zfxgk/zfxgkml/202111/W020211111484478233425/mobile/index.html#p=1>.
- [18] 内蒙古自治区能源局. 关于印发《内蒙古自治区煤炭工业发展“十四五”规划》的通知[EB/OL]. [2022-02-25]. <http://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=39&id=136490>.
- [19] 武强,王志强,郭周克,等. 矿井水控制、处理、利用、回灌与生态环保五位一体优化结合研究[J]. 中国煤炭,2010,36(2):109-112.  
WU Qiang,WANG Zhiqiang,GUO Zhouke,*et al.* A research on an optimized five-in-one combination of mine water control, treatment,utilization,back-filling and environment friendly treatment[J]. China Coal,2010,36(2):109-112.
- [20] 刘常平,张时聪,杨芯岩,等. “十三五”我国建筑领域煤炭消耗总量计算研究[J]. 中国能源,2021,43(2):28-33,77.  
LIU Changping,ZHANG Huicong,YANG Xinyan,*et al.* Calculation study of total coal consumption in the construction field in China during the 13th Five-Year Plan period[J]. Energy of China,2021,43(2):28-33,77.
- [21] 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.
- [22] 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 13th Five-Year Plan period and future prospects[J]. Coal Science and Technology,2021,49(9):1-8.
- [23] 孙腾民,刘世奇,汪涛. 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J]. 煤炭科学技术,2021,49(11):10-20.  
SUN Tengmin,LIU Shiqi,WANG Tao. Research advances on evaluation of CO<sub>2</sub> geological storage potential in China[J]. Coal Science and Technology,2021,49(11):10-20.