

# “双碳”视角下我国露天煤矿的 绿色可持续发展

付恩三<sup>1,2</sup>, 白润才<sup>1</sup>, 刘光伟<sup>1</sup>, 郭伟强<sup>1</sup>, 赵浩<sup>3</sup>

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000

2. 应急管理部信息研究院, 北京 100029

3. 应急管理部研究中心, 北京 100013

**摘要** 为发挥我国煤炭能源兜底作用和露天煤矿的弹性特征, 并提出低碳视角下未来我国露天煤矿绿色可持续发展的对策, 总结了当前露天煤矿分布、储量和煤种、生态环境、产能调节韧性等特征, 以及面临的生态扰动、端帮压煤、小设备作业以及剥采时空失调等问题, 提出了解决采矿源头低碳绿色生态减损可持续发展的8项关键技术与发展对策。

**关键词** 露天煤矿; 低碳; 绿色发展

我国能源结构概括起来为“富煤、贫油、少气”<sup>[1]</sup>, 长期以来煤炭、石油等化石燃料在能源消耗中占有重要比重, 为国家发展做出了巨大贡献, 同时也给环境治理带来严峻挑战<sup>[2]</sup>。绿色低碳发展是当今时代科技革命和产业变革的鲜明特征, 是推动我国经济社会高质量发展的内在要求<sup>[3]</sup>。党的十八大以来, 习近平总书记围绕绿色发展发表了一系列重要论述。我国力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和<sup>[4]</sup>。未来一段时期内, 煤

炭产业需进行广泛而深刻的产能结构调整。在煤炭开采中, 针对露天矿山开采一直存在不同的声音, 而我国露天煤矿从1904年的抚顺露天煤矿开始, 发展延续至今已有将近120年的历史<sup>[5]</sup>。露天煤矿开采具有资源回收率高、生产能力强、建设工期短、吨煤投资低、劳动效率高、利于安全生产等优点而得到迅猛长久发展。与此同时, 存在被动开展环境保护工作的矛盾、资源开发与矿权划分的矛盾、超能力生产造成矿区可持续发展困难以及露天

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2022-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974144); 辽宁工程技术大学学科创新团队项目(LNTU20TD-07)

作者简介: 付恩三, 博士研究生, 研究方向为矿山开采理论与技术、智能化矿山总体规划及应急管理, 电子信箱: 429001709@qq.com

引用格式: 付恩三, 白润才, 刘光伟, 等. “双碳”视角下我国露天煤矿的绿色可持续发展[J]. 科技导报, 2022, 40(19): 25-35; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.19.003

煤矿资源开发土地征用与复垦中的诸多问题<sup>[6]</sup>。

国内学者对我国煤炭矿区低碳发展和绿色开采进行深入研究,钱鸣高等<sup>[7-11]</sup>提出了绿色开采的概念,刘峰等<sup>[12]</sup>提出低碳生态矿山建设的概念,宋子岭等<sup>[13-14]</sup>在绿色开采的基础上,提出了露天煤矿绿色开采生态环境评价体系,黄麟淇等<sup>[15]</sup>、李夕兵等<sup>[16]</sup>对我国有色金属的可持续发展进行了研究,赵浩等<sup>[17-18]</sup>提出了露天煤矿绿色开采的技术,为我国露天煤矿绿色开采提供了指导意义<sup>[19-23]</sup>。本文是在上述学者研究的基础上进行展开,从分析露天矿山面临的问题入手,最突出、最主要的问题源自于环境保护与可持续发展。为了实现碳减排目标,露天煤矿开发对绿色低碳开采提出了更高的要求。因此,有必要探讨当前我国露天煤矿的总体分布特征、生态环境、植被特征、面临问题以及基于低碳视角下未来我国露天煤矿绿色可持续发展的对策,实现露天矿的生态平衡圈、实现矿区资源和环境承载力相协调,从开采环节源头上,减污、扩绿、低碳协同发展,确保矿区生态环境保持健康状态,充分发挥露天矿山产能调节的弹性和韧性,发挥好能源补给和应急扩充能力。

## 1 我国露天煤矿分布及特征

### 1.1 露天煤矿地域分布

截止 2021 年 12 月,全国在籍的露天煤矿有 361 处,分布在内蒙古、新疆、山西、陕西、云南等 15 省<sup>[21]</sup>。其中大型露天煤矿有 42 处占全国露天煤矿数量的 11.57%,中型露天煤矿 104 处,占全国露天煤矿数量的 28.65%,小型露天煤矿 215 处,占全国露天煤矿数量的 59.78%,30 Mt/a 以上的露天煤矿有 6 处。

### 1.2 露天煤炭资源储量及煤种

虽然我国煤炭资源丰富,但适合露天煤矿开采资源有限仅占 5%<sup>[24]</sup>,露天煤矿区资源分布具有北富南贫的显著特征。全国大型煤炭基地中适合露天开采的主要集中在蒙东基地、新疆基地、晋北基地、神东基地、云贵等基地。新疆和内蒙基地累计

地质储量和累计可采储量分别占全国露天煤矿累计地质储量和累计可采储量的 95.56% 和 95.41%。国内露天开采的煤种以褐煤、长焰煤、不黏煤和弱黏煤为主,其他煤种的储量不大。其中蒙东地区、小龙潭矿区以褐煤为主;平朔矿区以气煤为主;准格尔矿区以长焰煤为主。

### 1.3 露天煤矿生态环境特征

我国 361 处露天煤矿主要分布在新疆地区的准格尔盆地温带干旱荒漠区、塔里木盆地暖温带极端干旱荒漠区、内蒙古河西走廊—阿拉善高原温带干旱荒漠区、内蒙古阴山北麓风蚀草地区、内蒙古浑善达克沙地区、内蒙古呼伦贝尔草原区、蒙辽破碎化草地区、山西—陕西高原沟壑区、土石山区及河谷平原区以及云南地区。

可以看出,我国露天矿山分布地区属干旱、荒漠、高原以及草原地带,分布区域干旱少雨,整体生态属脆弱区,生态弹性力小<sup>[25-27]</sup>,32 处矿区气候植被及煤质特征见表 1 所示。

### 1.4 露天矿产能调节韧性特征

2021 年,受国际大宗商品价格持续上涨等因素影响,国内煤炭消费超预期增长,多省电力供需紧张,特别是冬季供暖期到来后,煤炭供需更趋紧张,保供形势严峻。国家矿山安全监察局严格按照《关于加快做好释放煤炭先进产能有关工作的通知》《关于实行核增产能置换承诺加快释放优质产能的通知》等相关政策,10 月审核筛选 153 处符合安全增产保供条件的煤矿增加产能 2.2 亿 t/a,其中,47 处露天煤矿,共释放产能 1.15 亿 t/a。

从上述数据可以看出露天煤矿在产能调节方面具有独特优势,究其原因主要有以下 2 个方面:(1) 露天矿山由于其安全系数高,加之开采活动具有机动灵活等特性,产能扩增容易实现;(2) 露天矿山煤质主要为褐煤,煤炭主要用作发电和供暖,地处内蒙古东北部地区的露天煤矿在保障东北能源运行平稳方面具有地域和距离优势。因此,在释放科学产能、供暖期煤炭能源调节保供方面,露天煤矿在能源供应链条中所表现的弹性和韧性凸显明显,在煤炭产能调节中,露天煤矿具有强烈的“缓冲仓”作用。

表1 32处矿区的气候植被特征

序号	矿区名称	气候植被特征	煤质	序号	矿区名称	气候植被特征	煤质
1	神东	高原半干旱、半沙漠气候	不黏、长焰煤	17	宝清朝阳	寒温带大陆性季风气候,干燥	褐煤
2	准格尔	大陆性干燥性气候	长焰煤	18	平朔	温带大陆性季风气候	气煤
3	扎赉诺尔	高寒干旱,大陆性气候	褐煤	19	小龙潭	亚热带气候,旱季、雨季分明	褐煤
4	宝日希勒	大陆性亚寒带气候		20	伊吾淖毛湖		
5	伊敏			21	三塘湖	戈壁沙漠	
6	胡列也吐	中温带大陆性季风气候	褐煤、长焰煤	22	大南湖西区		
7	诺门罕			23	沙尔胡		长焰煤
8	元宝山	中温带半干旱大陆性季风气候区		24	库木塔格	气候分区为温带极干旱区,降雨量小,蒸发量大,温差大	
9	霍林河	寒冷、半干旱大陆性气候		25	托克逊黑山		
10	白音华	中温带干旱、半干旱气候		26	五彩湾	矿区属大陆干旱荒漠气候,年温	
11	胜利	大陆性半干旱气候	褐煤	27	大井	差和昼夜温差变化很大	
12	贺斯格乌拉	大陆性气候冬冷夏热,干旱少雨		28	将军庙	冲积戈壁平原荒漠地带	不黏煤
13	吉林郭勒	草原干旱大陆性气候		29	西黑山		
14	白音乌拉	温带大陆性季风气候		30	北塔山	矿区属大陆干旱荒漠气候	
15	准哈诺尔	草原干旱大陆性气候	褐煤、长焰煤	31	伊犁伊宁	天山温性草原、森林	长焰煤
16	陕北地区	温带大陆性季风气候	不黏、长焰煤	32	苏拉哈马	大陆干旱荒漠气候,温差大	

2 我国露天煤矿低碳绿色发展面临的问题

低碳绿色露天煤矿应具备:开采环节的低能耗、耗能环节的低排放、排放环节的低污染和生态环节的低扰动4个特征。目前,我国露天矿山在实现低碳绿色矿山发展的目标和路径过程中存在如下问题。

2.1 生态扰动

露天煤矿开采环境问题复杂、多样、特殊、敏感,对矿业城市地质环境和生态环境的影响较大。露天矿山在开采之前,已形成自己特有的生态平衡,随着矿区开采范围内的土地开挖,导致原始地形地貌植被受到破坏、大量土地征占,开挖后的露天矿坑易造成地表裂缝和沉陷等地质灾害,高陡边坡易造成滑坡,大量露煤易造成煤层自燃,爆破、采掘、卡车运输、排弃等环节易造成尘土飞扬和燃油废弃排放,若露天矿选采效果不理想,造成资源浪费、疏干排水打破地下水稳态平衡,滞后土地复垦

造成生态环境恶化等一系列问题<sup>[28-30]</sup>,因此受开采环节、耗能环节、排放环节等多种因素影响,导致露天矿山在生产过程中造成生态扰动问题突出。

2.2 端帮压煤

露天矿山在开采过程中,形成永久端帮,露天矿山端帮下部压覆大量残煤,端帮残煤造成资源浪费、经济效益造成损失。端帮残煤治理失效,导致大量端帮煤自燃,污染环境,同时影响边坡的稳定性。尤其在同一矿权内,相同矿权人和不同矿权人的相邻露天矿端帮压煤严重,由于相邻露天矿时空位置关系的差异性,当相邻矿山同时内排压帮时,造成矿权内相邻露天矿永久压煤<sup>[31-35]</sup>,并未达到资源合理高效开发的目标。因此,回收和治理露天煤矿端帮煤是露天矿山需要面对和必须解决的问题,也是进一步提升露天矿山资源回收率,优化开采方法,降低开采过程中的残煤污染。典型的相邻露天煤矿如白音华一号和白音华二号露天矿,端帮压煤示意如图1所示。

2.3 小型设备

为实现露天矿山低碳绿色发展,要先从采矿工



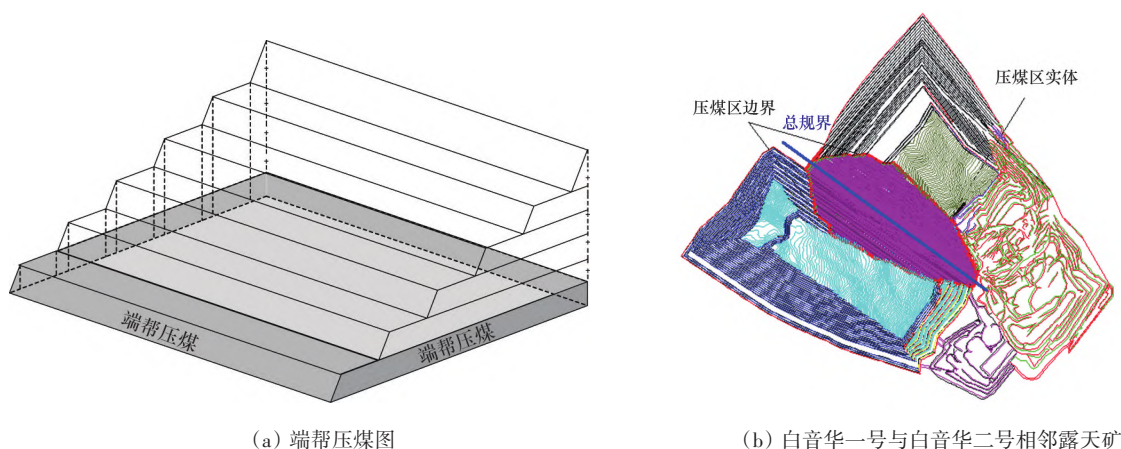


图1 相邻露天矿端帮压煤图

艺源头进行综合优化。大型设备在安全、高效、环保等方面具有显著优势,但目前我国大多数露天矿山普遍存在外包队伍协同参与完成矿山生产任务的现象。外包队伍设备能力相较矿山自营设备生产能力小、更新换代速度快、设备数量多且相互交织影响大、安全隐患大,采用燃油的动力方式,排放大量尾气,造成矿坑环境恶劣。加之外包设备以蚂蚁搬家方式移运物料,装载、运输、排弃环节扬尘增加,导致矿坑内多终端设备数量增多,安全事故发生概率增加,高耗能、高污染点源增加,导致耗能环节高排放、排放环节高污染。小型设备应用问题在外包参与的矿山和小型露天矿山尤为明显。

#### 2.4 剥采时空失调

根据露天煤矿煤层赋存情况分为分区纵采、分区横采以及分期开采方式。我国露天煤矿主要以分区纵采的开采方式。由于分区纵采初期见效快,经济效果好,露天矿山设计人员以及矿权人优先选择此种方式。采用纵采的开采方式,内排空间快速释放,但内排空间利用率低、内排滞后,易造成大量剥离物外排,侵占土地,从露天矿山全生命周期角度来看,虽然初期经济效益明显,但剥采时空协调关系呈现前期强扰动、后期弱扰动的特征,扰动时空特性不可逆。部分矿权人在市场利好时期,追逐短期利益,超能力生产造成剥采失调、后续资源接续困难、采厚弃薄,采易弃难,造成煤炭资源巨大的损失与浪费。因此,剥采时空失调造成露天矿山一定时期、一定范围内的生态剧烈扰动,并未实现全

生命周期内矿区生态的平稳均衡发展,易造成开采扰动强烈,而生态恢复持续滞后的局面,严重制约露天煤矿的低碳绿色可持续发展。

### 3 采矿源头低碳绿色生态减损关键技术

露天煤矿低碳绿色发展,需要在露天采矿源头融入更好的低碳生态开采技术和生态减损技术,以提高煤炭资源回收效率。围绕露天煤矿区面临的问题和矿区开采过程中碳来源、扰动矿区影响范围及周边生态等环节,从矿山资源回收、内排扰动、降低能耗、优化复垦、源头减污等方面提出8项关键技术以实现低碳视角下未来我国露天煤矿绿色可持续发展的技术途径。当前我国露天煤矿低碳绿色发展面临问题与采矿源头低碳绿色生态减损关键技术关联关系如图2所示。采矿源头低碳绿色生态减损要具备协同治理的理念,各项关键技术的实施和研究要综合考量露天矿山的可落地性和可实施性,始终针对不可再生的煤炭资源合理利用和可持续利用进行研究。

#### 3.1 可持续循环经济理念与模式

打破传统露天矿单纯依靠产煤-售煤的经营模式,坚持可持续循环经济理念与模式。以“开采方式科学化、资源利用高效化、企业管理规范化、生产工艺环保化、开发环境生态化”为要求,从根本上转变发展和经济增长方式,实现资源效益、环境效

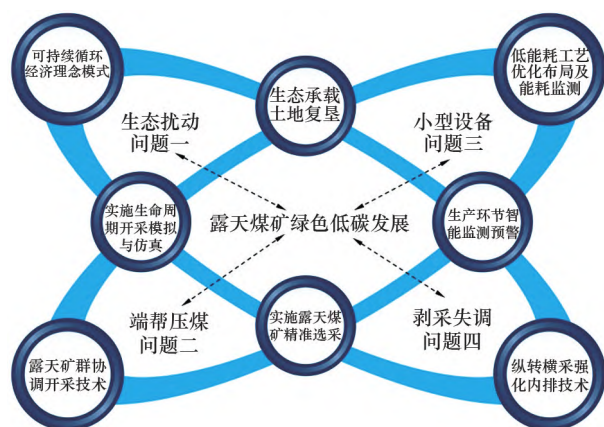


图2 问题与关键技术关联关系

益、经济效益、社会效益协调统一发展模式。首先,强化共伴生资源的开发和资源的综合利用;其次,发展采煤与煤炭清洁高效利用一体化产业;最后,对露天矿山排土场进行生态总体功能区规划,即科学规划养殖区、耕地区、发电区、碳回收区、旅游区和科研区,如图3所示。充分考虑新技术、新工艺,重视矿山生态规划,采取节能减排、资源循环利用等措施,实施可持续循环经营理念与模式。

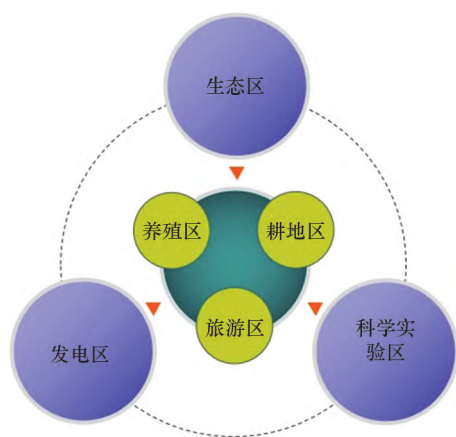


图3 露天矿总体功能区区域规划

### 3.2 实施生命周期开采模拟与仿真

露天矿山开采过程中,需要根据矿山总体规划,确定露天矿山总体规划境界以及开采境界和排土场境界。露天矿仿真开采规划,涉及到采区的推进强度与工作线布置及形态、相邻采区转向、矿山生产能力接续、边坡稳定性研究、运输系统布设、物

料流规划、运输功优化、内排空间利用、外排土地征用、矿山土地开采扰动以及环境综合治理等一系列问题,露天矿全生命周期分析流程如图4所示。通过实施生命周期开采模拟与仿真,关联露天矿山生产设备数据,将计划任务下载至终端设备,分析露天矿设备工况数据,优化露天矿山总体规划和外包队伍租赁和自营设备分配、提升矿山精准开采、经济效益、成本分析和生命周期内的过程和流程管理,智能采矿生产计划开采仿真流程如图5所示。

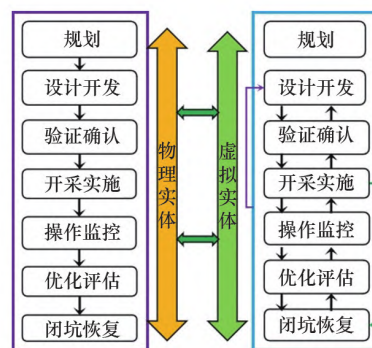


图4 露天矿全生命周期分析流程

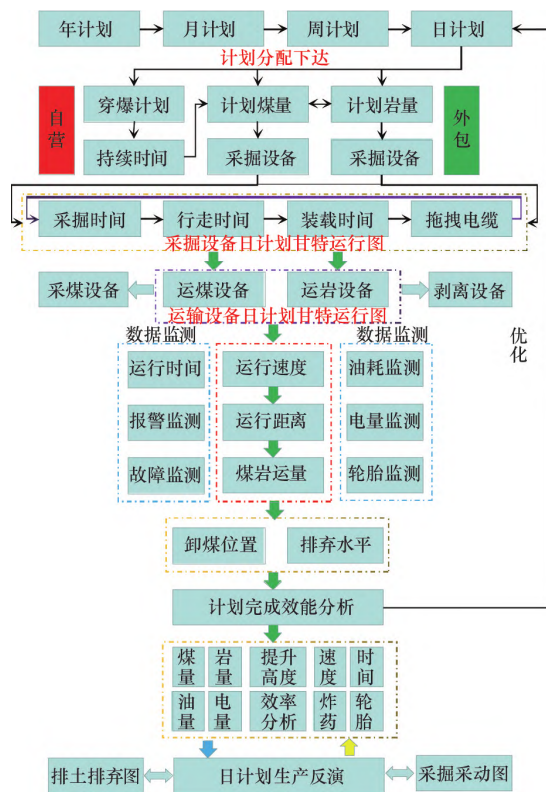


图5 智能采矿生产计划开采仿真流程



### 3.3 露天矿群协调开采技术

通过科学优化露天矿山开采程序,采用合理的分期、分区开采、陡帮开采、强化内排、端帮以及相邻矿山协调开采等一系列措施,全面提升资源回收率,提高矿山经济效益,减少因排弃造成的土地占用、环境污染及相关其他危害等。2022年自然资源部发布的《关于简化证件办理手续,出台相邻井田边界优化调整政策,促进煤矿资源合理开发利用的提案》中明确表示:支持或鼓励同一矿业权人相邻矿业权作相应调整,对井田边界进行优化,达到资源合理高效开发的目的。政策的出台为实施露天矿群协调开采提供了保障。为解决露天矿群协调开采需要完成的主要工作有:(1) 根据相邻矿山开采现状,优化端帮被打通、贯通采场的开采程序,确保贯通期间端帮边坡的稳定性;(2) 优化贯通采场后的双环运输路线,搭接运输排土桥;(3) 建立资源回收经济置换的分配机制:对相邻端帮回采资源按照当年售价、成本进行当年、当量折算分配补偿;(4) 优化两矿内排土场边坡形态及内排容积的充分利用。露天矿群协调开采贯通采场程序流程如图6所示。

### 3.4 实施露天煤矿精准选采

实施露天煤矿精准选采,可提升煤炭资源回收率、增加境界内可采储量、延长服务年限;降低混入排土场的残煤燃烧所带来的环境污染;减少矸石混

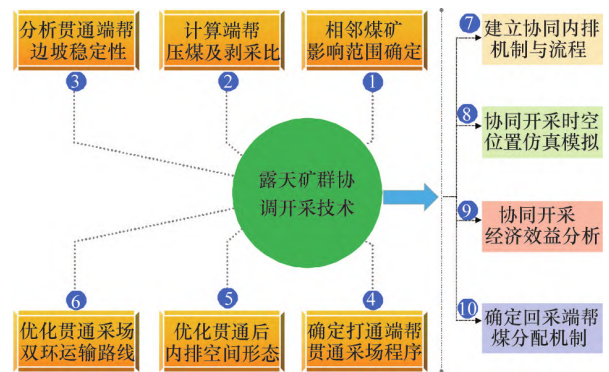


图6 贯通采场的程序流程

入,提升原煤发热量,降低洗选成本,有助于实现低碳绿色发展。露天煤矿精准选采的实施需要从以下4个方面考虑:(1) 薄煤层及矸石精准建模,构建煤层厚度 $>0.5\text{ m}$ ,矸石厚度 $>0.3\text{ m}$ 的精准地质模型。赋予煤层灰分、挥发分、发热量、含硫量等属性信息,确定薄煤层开采范围,为薄煤层开采和选采提供基础数据支撑;(2) 根据不同开采工艺建立薄煤层选采程序及流程;(3) 建立相应成本、售价经济模型与煤层厚度、煤质关联关系模型,进一步动态优化可选采的煤层厚度及开采范围;(4) 优化薄煤层爆破方式,减少煤岩交界处的矸石混入。露天煤矿精准选采流程如图7所示。

### 3.5 纵转横采强化内排技术

实施优化露天矿山开采程序是实现低碳绿色开采的核心。研究露天矿山一定开采周期内时间

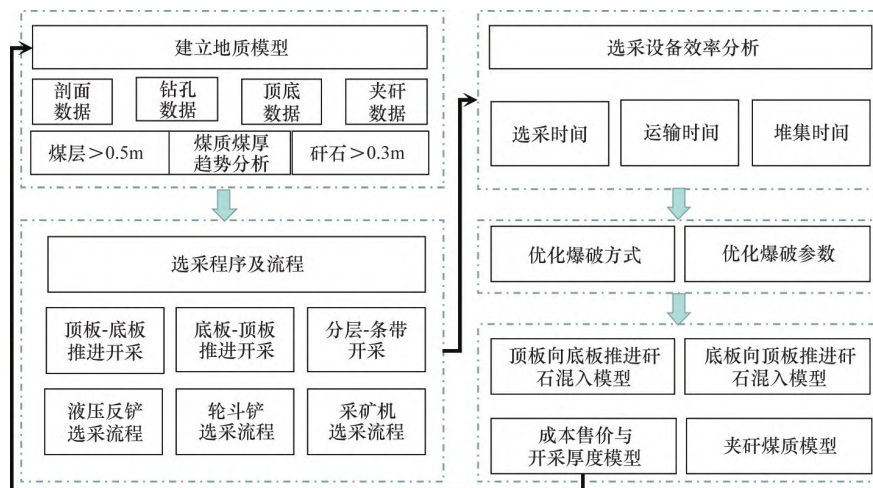


图7 露天煤矿精准选采流程

与空间的置换关系,提升露天矿山内排空间利用率,减少外排量和外排征地,从而有效降低露天开采扰动。实施纵采转横采强化内排技术的关键点如下:(1)统筹协调实施内排前横采区与纵采区工作线形态与产能分配比例<sup>[36-37]</sup>。(2)优化设计部分内排时内排土场工作线形态。(3)优化确定全部内排时相邻端帮的内排留沟高度。通过优化调整开采程序和工作线形态,快速实现内排土场的建立,降低外排土地征占。

### 3.6 生态承载分析及土地复垦

生态承载分析及土地复垦是高水准建设绿色低碳生态矿山的重要部分,生态建设是实现可持续发展的重要途径。从我国露天矿山生态地域分布来看,北方地区多为荒漠、高原和草原脆弱区;南方地区为云南亚热带气候,植被富足。强烈的土地开挖扰动,打破原始地区生态稳态平衡。因此,需从生态修复、环境治理、可持续发展的角度对矿区进行开发建设。(1)重点研究南北生态脆弱区生态特征,甄选适宜当地气候特征的内外排土场土地复垦植被,推进荒漠区植被改造工程,形成开发一矿区,绿化一矿区的发展模式;(2)构建露天矿区生态承载分析模型,从矿区碳排放、碳回收等方面开展研究,将环境保护贯穿于露天煤矿资源开发的规划布局、资源的开采以及矿山闭坑后土地利用的全过程,积极开发生态产业,在减小对环境扰动破坏的同时,提高企业经济效益。构建以生态承载弹性分析评价指标体系,涵盖了资源要素、环境要素层面的评价内容;建立南北生态脆弱区压力度评价方式,从增强矿区可持续发展能力的角度出发,注重矿区生态保护与循环经济综合利用,逐步提升矿区生态承载力和土地复垦效能。

### 3.7 生产环节智能监测预警

露天矿山生产环节智能监测预警主要实现对边坡、爆破、设备故障、疏干水等主要环节的智能预警、决策支持以及移动监测应用<sup>[38-48]</sup>。生产环节智能监测预警系统架构流程如图8所示。生产环节智能监测预警主要体现在3个方面:(1)实现对生产环节的感知数据的全量接入,融合露天矿山开采



图8 露天矿山生产监测预警架构流程

空间位置信息,为监测预警提供数据支撑;(2)构建符合露天矿山特定生产场景的算法模型,如基于时间序列的边坡预警模型、矿用重型设备故障诊断等模型;(3)形成智能监测预警信息综合展示、预警发布、预警研判、应急决策等全流程管控预警机制。与此同时,需要建立露天矿山全息生态系统的能源流向及耗能环节的能源体系和监测系统。露天矿全息生产系统能源环节及耗能终端设备和能源种类如图9所示。通过能源在线监测系统,以时间切片的方式对全矿能源消耗和能源流向进行分析,生成能源消耗分析图,如图10。通过建立吨煤介质能耗评价方式,如公式(1)所示。同时根据露天矿山全息能源流向消耗体系,建立露天矿山生产全过程能源消耗模型,如公式(2)所示。通过分析上述能源消耗和流向模型,可掌握露天矿能源结构和能源转换环节,清晰展示露天矿高耗能环节,优化开采工艺和开采方式,降低高耗能环节,实现低碳开采。



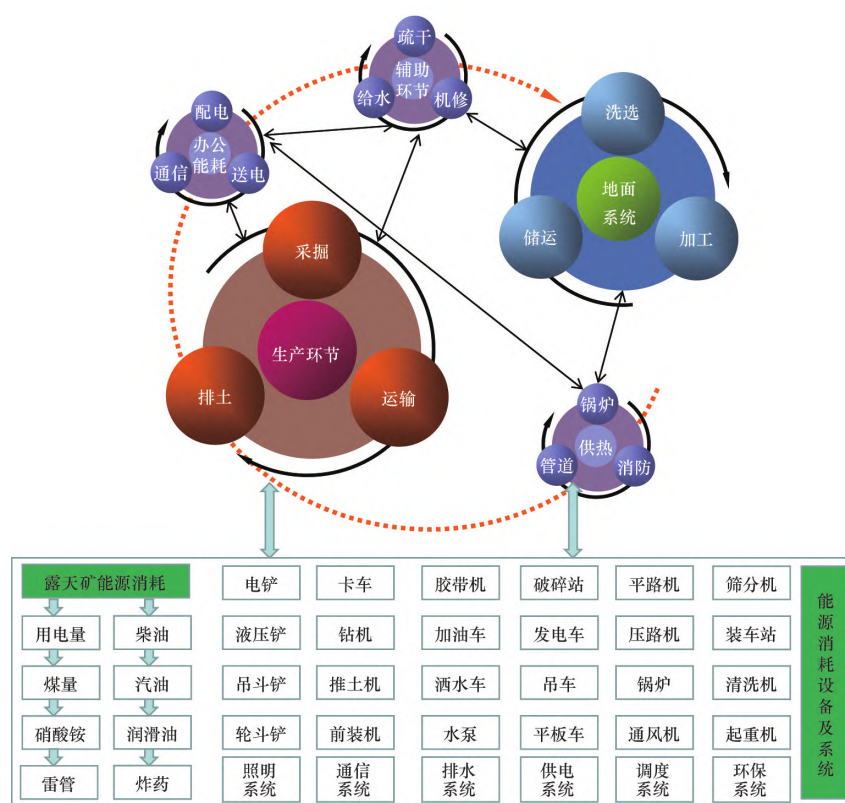


图9 露天矿能源消耗终端及系统

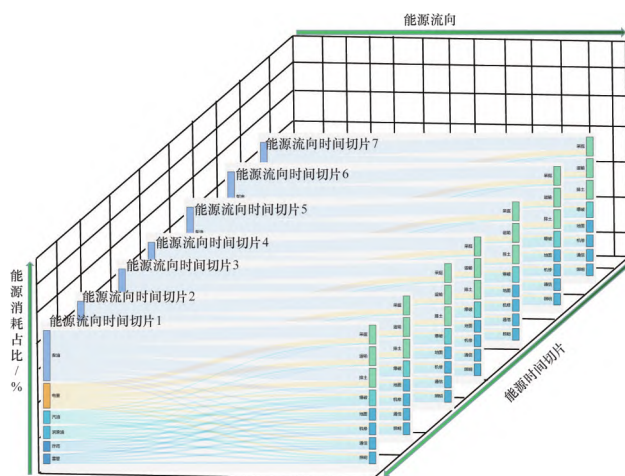


图10 能源消耗和能源流向分析图

吨煤能耗分析指数=生产煤炭投入的能源总量/总煤量 (1)

露天矿能源消耗总量=穿孔+爆破+采掘+运输+排土+地面+辅助+... (2)

### 3.8 低能耗工艺优化布局

在优化开采程序的基础上,逐步优化露天矿山

开采工艺。随着露天矿山开采深度的逐步加大,大型露天煤矿基本实现单斗-卡车-半固定破碎站半连续工艺的应用。露天矿山间断工艺条件下,重型卡车氮氧化物排放、燃油、轮胎消耗等方面是露天矿山高能排放、高污染的源头。为降低工艺环节的高能耗,需将采、运、排环节紧密衔接起来。在实现低碳绿色发展进程中,露天矿山在工艺变革过程中需要在低能耗、连续工艺等方面进行深入研究。(1) 针对高寒地区、富水区域、高温差地区连续开采工艺环节的适用性、应用性、可靠性等方面进行深入分析与研究,通过连续工艺环节改善间断设备运输带来的粉尘、碰撞、违章、有毒气体等问题,如图11是采用长距离带式输送机运煤系统;(2) 针对不适宜连续开采工艺的露天矿山,创新应用电动矿卡技术,改变设备动力方式,降低燃油卡车碳氧化物排放,降低有毒有害气体排放,降低设备源头污染;(3) 加快推进无人驾驶技术的落地应用,提升设备运行效率,减少运输环节能源消耗,提升安全水平。





图 11 长距离带式输送机

## 4 结论

我国露天煤矿主要分布在内蒙古、新疆、山西等北方区干旱、荒漠、高原以及草原地带,分布区域干旱少雨,整体生态属脆弱区,生态弹性力小。露天煤矿,在释放科学产能、供暖期煤炭能源调节保供、能源供应链条中的弹性和韧性凸显,在产能调节中,具有强烈的“缓冲仓”作用。本文在“双碳”视角下对未来我国露天煤矿绿色可持续发展进行问题总结和关键技术分析,得到如下结论:1) 目前我国露天煤矿低碳绿色发展过程中面临生态扰动、端帮压煤、小型设备以及剥采时空失调等问题,上述问题严重制约了我国露天煤矿绿色低碳发展。2) 结合当前露天煤矿低碳绿色发展面临问题,构建采矿源头低碳绿色生态减损关键技术与问题的逻辑关联关系。提出基于采矿源头低碳绿色生态减损8项关键技术,涵盖实施可持续循环经济理念模式、生命周期模拟仿真、露天矿群协调开采、精准选采、强化内排、生态承载、智能监测预警以及低能耗工艺优化。

## 参考文献 (References)

[1] 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.

[2] 王忠鑫, 王金金, 王卫卫. 露天矿开采扰动效应评价指标体系及评价模型[J]. 露天采矿技术, 2018, 33(2): 11-15.

[3] 王家臣, 王忠鑫, 王卫卫, 等. 露天矿开采扰动效应:概念、特征与评价指标体系框架[J]. 煤炭学报, 2017, 42 (Supl2): 295-301.

[4] 卞正富, 于吴辰, 韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 449-459.

[5] 中国煤炭工业协会煤炭工业技术委员会, 中国煤炭学会露天开采专业委员会, 煤炭工业规划设计研究院有限公司. 中国露天煤炭事业百年发展报告(1914—2013) [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015.

[6] 王家臣, 刘峰, 王蕾. 煤炭科学开采与开采科学[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2651-2660.

[7] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1-13.

[8] 钱鸣高. 加强煤炭开采理论研究实现科学开采[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 615.

[9] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007(1): 1-7.

[10] 钱鸣高. 绿色开采的概念与技术体系[J]. 煤炭科技, 2003(4): 1-3.

[11] 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(4): 5-10.

[12] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-15.

[13] 宋子岭, 范军富, 赵东洋, 等. 露天煤矿生态恢复环节作业方式与参数确定方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(Suppl1): 104-111.

[14] 宋子岭, 范军富, 王来贵, 等. 露天煤矿开采现状及生

- 态环境影响分析[J]. 露天采矿技术, 2016, 31(9): 1-4+9.
- [15] 李夕兵, 黄麟淇, 周健, 等. 硬岩矿山开采技术回顾与展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1828-1847.
- [16] 李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(6): 1236-1262.
- [17] 赵浩, 白润才, 刘光伟. 低碳经济下的露天煤矿建设[J]. 能源环境保护, 2011, 25(2): 46-48.
- [18] 赵浩, 白润才, 曲业明. 露天煤矿绿色开采技术[J]. 矿业工程研究, 2011, 26(3): 19-22.
- [19] 杨天鸿, 孙东东, 胥孝川, 等. 新疆大型露天矿绿色安全高效开采存在问题及对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 1-12.
- [20] 邵亚琴. 基于多源动态监测数据的草原区煤电基地生态扰动与修复评价研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- [21] 闻彩焕, 王文栋. 基于无人机倾斜摄影测量技术的露天矿生态修复研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 212-217.
- [22] 夏冬, 李富平, 袁雪涛, 等. 露天矿岩质边坡生态重建技术研究现状及发展趋势[J]. 金属矿山, 2018(1): 1-10.
- [23] 胥孝川. 生态成本内生化的金属露天矿境界-开采计划整体优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [24] 赵浩, 毛开江, 曲业明, 等. 我国露天煤矿无人驾驶及新能源卡车发展现状与关键技术[J]. 中国煤炭, 2021, 47(4): 45-50.
- [25] 孙琦. 大型露天煤矿土地损毁生态风险评价及空间防范措施[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [26] 闫浩, 孙世国, 金松丽, 等. 布沼坝露天矿生态复垦工程[J]. 煤矿安全, 2013, 44(1): 150-152.
- [27] 张强. 哈尔乌素露天煤矿非扰动区降尘方式研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- [28] 王运敏. 金属矿采矿工业面临的机遇和挑战及对策[J]. 现代矿业, 2011(1): 1-14.
- [29] 古德生, 李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [30] 樊俊, 郭源阳, 成永生. 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”攻关目标与任务剖析[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 919-926.
- [31] 白润才, 刘闯, 薛应东, 等. 相邻露天矿边帮压煤协调开采技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2001-2006.
- [32] 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.
- [33] 赵红泽, 郑群飞, 赵博深. 露天矿群协调开采模式研究[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(9): 1-5.
- [34] 曾祥玉, 王忠鑫, 苏迁军, 等. 相邻露天矿协调开采中设备的协调配置[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(8): 18-21+25.
- [35] 白润才, 郭伟强, 刘光伟, 等. 露天矿相邻采区间先压帮后留沟内排方式研究[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(6): 16-20.
- [36] 才庆祥, 尚涛, 周伟, 等. 大型露天矿规模化开采新工艺研究[J]. 科技资讯, 2016, 14(10): 174-175.
- [37] 付恩三, 刘光伟, 赵浩, 等. 智慧露天矿山总体框架及关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(8): 27-32.
- [38] 付恩三, 刘光伟, 王新会, 等. 基于“互联网+”智慧露天煤矿建设发展新构想[J]. 中国煤炭, 2020, 46(2): 35-41.
- [39] 孙健东, 张瑞新, 马力, 等. 露天矿综合开采工艺系统多级联动调节机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1233-1240.
- [40] 张瑞新, 赵红泽. 中国露天矿山信息化现状及发展趋势[J]. 露天采矿技术, 2014(9): 1-4.
- [41] 付恩三, 刘光伟, 白润才, 等. 智能露天矿山评价体系研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(5): 1-8.
- [42] 付恩三, 刘光伟, 邸帅, 等. 露天矿山无人驾驶技术及系统架构研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(1): 34-39.
- [43] 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.
- [44] 才庆祥. 我国亿吨露天煤矿群及露天煤矿绿色开采技术[C]//第七次煤炭科学技术大会文集(上册). 2011: 255-264.
- [45] 李克民. 我国煤炭露天开采技术与装备发展趋势[C]//现代露天采矿装备现场研讨会论文集, 2010: 13-15.
- [46] 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.
- [47] 孙健东, 张瑞新, 马力, 等. 露天矿综合开采工艺系统多级联动调节机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1233-1240.
- [48] 张瑞新, 赵红泽. 中国露天矿山信息化现状及发展趋势[J]. 露天采矿技术, 2014(9): 1-4.

# Countermeasures and thinking of green and sustainable development of open-pit coal mines in the future from the perspective of "double carbon"

FU Ensan<sup>1,2</sup>, BAI Runcai<sup>1</sup>, LIU Guangwei<sup>1</sup>, GUO Weiqiang<sup>1</sup>, ZHAO Hao<sup>3</sup>

1. Liaoning Technical University, Fuxin 12300, China

2. Information Institute, Ministry of Emergency Management of the PRC, Beijing 100029, China

3. Research Center of Emergency Management Department, Beijing 100013, China

**Abstract** To give full play to the bottom-up role of China's coal energy and give full play to the elastic and tough characteristics of open-pit coal mines, this paper discusses the countermeasures for the green and sustainable development of China's open-pit coal mines in the future from the perspective of low carbon. By collecting relevant data, this paper summarizes the characteristics of the current open-pit coal mine distribution, coal reserves, ecological environment, production capacity adjustment toughness, etc., as well as the ecological disturbance, end-to-side coal pressing, small equipment operation, and temporal and spatial imbalance of stripping. Eight key technologies and development countermeasures to solve the low-carbon, green and sustainable development of mining sources are proposed. They can provide relevant key technologies and decision-making references for green and low-carbon mining of open-pit coal mines under the new situation.

**Keywords** open-pit coal mines; low carbon; green development ●



(责任编辑 祝叶华)