

# 中国“光伏+采煤沉陷区”模式的发展研究

黄平源<sup>1</sup>, 杨红江<sup>1</sup>, 张卡<sup>1</sup>, 袁晨辉<sup>2</sup>, 谢书<sup>3\*</sup>

(1. 广东省能源集团贵州有限公司, 贵阳 550081;  
2. 华能新能源股份有限公司山西分公司, 太原 030002;  
3. 北京计鹏信息咨询有限公司, 北京 100050)

**摘要:** 中国自开展“光伏+采煤沉陷区”模式建设的探索工作以来, 多地以绿色能源创新应用带动采煤沉陷区经济转型, 研究内容聚焦在“光伏+采煤沉陷区”模式的具体项目设计实践、地基稳定性评估、综合效益评估等方面, 并取得了一些研究进展, 但目前存在一些客观问题限制了该模式的推广应用。基于文献研究法, 对中国“光伏+采煤沉陷区”模式发展的特征与规律进行了分析, 总结其发展历程, 对其推进过程中存在的客观问题进行了探索并提出了相应的解决措施。研究表明: 1) 中国“光伏+采煤沉陷区”模式的应用主要分布在具有高强度煤炭开采基础的地区。2) 该模式下, 光伏支架的选型与设计需要考虑沉陷稳定性、地层情况、洪水位及开发模式等多方面影响因素, 并需要对项目进行包含经济效益、生态效益、社会效益在内的综合效益评估。3) 该模式存在采煤沉陷区的土地性质发生变化未及时办理转用审批、电网建设滞后影响消纳通道、固定式水上光伏电站应用的便捷性与环保性有待提高等问题。4) 在项目推进过程中, 要确保光伏电站所用采煤沉陷区的土地权属合法合规; 创新就地消纳模式; 建议利用遥感和大数据手段监测水域情况, 并通过高效智能运维管理对采煤沉陷区中水上光伏电站的稳定运行作出有效保障。5) 建议在项目建设前期的采煤沉陷区治理中要优化政府财政支出, 建立采煤沉陷区治理资金使用效率评估机制; 不断拓宽资金渠道, 完善管理及监督机制, 从而提升财政补贴和项目投资在采煤沉陷区生态修复中的作用。

**关键词:** 光伏+; 采煤沉陷区; 水上光伏电站; 发展特征; 解决措施; 综合效益评估

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

## 0 引言

经济快速发展带动了能源需求增长, 但煤炭长期高强度开采, 导致产生了大规模采煤沉陷区。2017年国家发展改革委相关研究项目的统计数据显示, 中国有23个省的151个县(市、区)存在采煤沉陷区, 总面积超过2万km<sup>2</sup>, 并且以每年超过700km<sup>2</sup>的速度递增<sup>[1]</sup>。

有关采煤沉陷区现状的调查与研究一直在稳步推进。例如: 刘莎莎等<sup>[2]</sup>利用遥感技术, 对辽宁省全域开展采煤沉陷现状及恢复治理调查后发现, 辽宁省采煤沉陷区的开采主体以生产矿山和责任主体灭失矿山为主; 姬宗皓等<sup>[3]</sup>经过调

查发现, 济宁市的采煤沉陷区涉及了13个县(市、区), 采煤被损毁地类主要是耕地、水域及水利设施用地、城镇及工矿用地; 孙玉倩<sup>[4]</sup>对淮南市采煤沉陷区进行调查研究发现, 淮南市采煤沉陷区面临塌陷耕地补充资源不足、塌陷区治理资金不足、塌陷区治理难度大等问题。另外, 为全面了解采煤沉陷区的发展趋势和变化规律, 占惠珠<sup>[5]</sup>通过对不同时相的遥感影像进行解译、叠加分析, 实现了对宁夏回族自治区石嘴山市采煤沉陷区地表环境时空演化的监测; 随着深入分析, 为识别采煤沉陷区可能带来的环境影响, 张地伟等<sup>[6]</sup>对某采煤沉陷区的水土资源进行了全

收稿日期: 2024-04-17

通信作者: 谢书(1999—), 女, 硕士, 主要从事能源规划方面的研究。xieshu@nrdc-jp.cn

面评价,明确了该区域存在的水污染和土壤污染问题;为制定有效的环境保护措施和可持续发展策略,胡庭浩等<sup>[7]</sup>对徐州市采煤沉陷区进行了土地生态评价,并提出了相应的生态修复引导方式与规划实施策略。

中国加速对采煤沉陷区的治理。2018年,中共中央、国务院提出全面加强生态环境保护,2021年奋力推进采煤沉陷区高质量发展,2022年全力推进采煤沉陷区综合治理。与此同时,随着“双碳”目标提出,以煤炭为主的能源体系结构逐步向绿色低碳能源体系迈进。2023年,中国可再生能源发电累计装机容量突破性赶超火电,达到14.5亿kW,其中,太阳能发电累计装机容量达到6.1亿kW。该年光伏发电新增装机容量达到2.17亿kW,同比增长148.12%,再创历史新高。

基于上述背景,利用采煤沉陷区进行光伏发电成为发展新趋势,学术研究重点也从有关煤炭开采沉陷区现状调查评估、地表环境的时空演化监测、采煤沉陷区生态修复规划与设计等扩展到关于“光伏+采煤沉陷区”的项目规划设计、采煤沉陷区稳定性分析、项目综合效益评估等。例如:华祥等<sup>[8]</sup>依据光伏电站中构筑物的结构特点和抗变形能力,结合“地面光伏+采煤沉陷区”项目场址区域稳定性的实际情况,对其总平面布置进行了优化。为避免潜在风险,陈源<sup>[9]</sup>在综合分析地面光伏电站构筑物结构特点的基础上,考虑了普通建筑变形的阈值,从而确定了在采煤沉陷区建设地面光伏电站的适宜性分区标准,并对拟建的地面光伏电站的地基进行了稳定性评价。孙庆先等<sup>[10]</sup>根据工程地质条件和采空区稳定性评价结果,确定采用注浆技术对其所研究“水上光伏+采煤沉陷区”基地汇集站下方采空区进行加固处理,取得良好效果。为判断“光伏+采煤沉陷区”项目能否在长期运营中带来持续增长价

值,实现既定目标,王成<sup>[11]</sup>对在淮南地区的采煤沉陷区进行光伏发电建设的环境影响和社会效益进行了探索。国中桢<sup>[12]</sup>从社会效益、经济效益、生态效益3方面视角出发,建立了采煤沉陷区生态修复综合评估指标体系,对在淮南地区的采煤沉陷区建设集中式水上光伏电站的综合效益进行了分析,研究表明:利用采煤沉陷区建设集中式水上光伏电站,可充分利用自然资源,同时还可以响应国家大力发展新能源产业的政策,为国家带来可观的税收收入。

利用采煤沉陷区建设光伏电站对中国各地区采煤沉陷区的经济转型发展都具有一定程度的借鉴意义。为保障中国“光伏+采煤沉陷区”项目的顺利建设,明晰“光伏+采煤沉陷区”模式的发展局面至关重要。本文基于文献研究法,分析“光伏+采煤沉陷区”模式的特征与规律,总结其发展历程,探索目前其发展存在的客观问题并提出相应的解决措施,以期对采煤沉陷区的综合利用提供参考。

## 1 概念内涵

采煤沉陷区是一种地表沉陷现象,其是由于长期大规模地下煤层开采形成了采空区,随着采空区的面积不断扩大,煤层顶板失去支撑,顶板岩层发生弯曲、断裂、垮落,综合倾斜变形和水平移动而形成的地表沉陷;当下沉区域地下水位较高时,极易形成常年积水区域。通常采煤沉陷区大部分土地处于未利用的闲置状态,而此类区域多分布于太阳能资源丰富地区,因此对这些闲置土地进行有效开发利用具有重要的经济和环境意义。

“光伏+采煤沉陷区”基于其资源禀赋,利用采煤沉陷区土地资源,以区域电网为支撑,以输电通道为牵引,以高效消纳为目标,统筹太阳能资源、土地资源及消纳条件,从而实现采煤沉陷区的综合治理<sup>[13]</sup>。

## 2 特征与规律

### 2.1 中国“光伏+采煤沉陷区”模式的应用多分布在高强度煤炭开采基础地区

2022年,山西省、内蒙古自治区、陕西省、新疆维吾尔自治区、贵州省、安徽省的规模以上企业的原煤产量位居全国前6,占比分别为28.67%、25.75%、16.36%、9.05%、2.81%、2.45%,且各地区煤炭开采量均位居全国前列。研究表明:“光伏+采煤沉陷区”模式在山西省大同采煤沉陷区国家先进技术光伏示范基地<sup>[10]</sup>、内蒙古自治区鄂尔多斯神东布尔台煤矿的采煤沉陷区、安徽省祁南煤矿的采煤沉陷区、甘肃省的采煤沉陷区、陕北地区的采煤沉陷区、四川省攀西地区的采煤沉陷区<sup>[13-17]</sup>等已具有扎实的应用基础。

### 2.2 采煤沉陷区中光伏电站地基的稳定性关系到项目的可行性

采煤沉陷区的地表变形存在不确定性,根据时间先后可将地表变形分为3种,分别为:开采过程中随开采空间变化而产生的变形、停止开采后至稳定的剩余变形、稳定沉陷后的地表残余变形<sup>[15]</sup>。这种不确定性会影响光伏电站地基(包括光伏支架及基础等)的稳定性,导致工程设计、施工难度增大;在易发生二次沉降的特殊地区,还会极大增加光伏组件破损率。地基稳定性关系着项目的可行性,因此在一些下伏采空区的地基稳定性评估后,必要时还需要开展采空区治理行动。

### 2.3 采煤沉陷区中光伏支架及基础的设计需考虑多因素影响

光伏支架及基础是光伏组件的支撑构件,其稳定性决定着光伏电站的安全性,因此,其选型及设计需要考虑地层沉陷稳定性、地下水位、洪水位、地质条件、负荷条件等各类因素<sup>[18]</sup>。

采煤沉陷区中光伏支架的离地高度设计需要结合光伏电站的开发模式,充分考虑沉陷深度及设计洪水位的影响,确保即使发生沉陷,设计

仍能满足防洪设计要求,以保证光伏组件在洪水期不被淹没。光伏支架基础的埋藏深度需要考虑是否满足光伏支架承载力和稳定性要求,因此除考虑一般地质条件外,还需要特别关注沉陷深度和地下水位变化对光伏支架结构稳定性的影响。选择光伏支架基础型式时,要避免由沉陷带来的地层运动产生的次生作用力对光伏支架造成的影响。在易发生二次沉降的特殊地区,设计时还需考虑满足各种负荷组合作用下光伏支架的可调整性、承载力和稳定性要求。

### 2.4 保证构筑物安全稳定需掌握好光伏电站建造的关键技术要点

“光伏+采煤沉陷区”模式的关键技术包括光伏电站构筑物设计、承载结构设计及施工、锚固、水上安装等方面<sup>[19]</sup>。光伏电站构筑物的设计要规范计算常规的地基承载力和基础抗风性,然后科学选用光伏支架。

由于采煤沉陷区中浅水、滩涂、深水区交错分布、情况复杂,因此水上光伏电站中的光伏组件承载形式和锚固形式需要考虑项目所在区域的平均水深和工程效益。水上光伏电站包括固定式和漂浮式两类,其中,固定式水上光伏电站与传统的地面光伏电站类似,即光伏组件安装于光伏支架上,光伏支架安装于固定式基础(例如:桩基础)上;漂浮式水上光伏电站一般建设于水深较深的区域。目前,按形式不同,漂浮式水上光伏电站常用的漂浮系统可以分为两类:一类是“浮体+支架”形式,另一类是一体化浮筒形式。比如:对于滩涂地形区域,若水深在2m以下,采用“长桩+固定式光伏支架或跟踪光伏支架”技术;对于2~4m的深水地形,则采用“浮筒+恒应力系统”锚固技术更为理想;对于沉陷较稳定、基本不会出现明显大幅度变形的区域,使用水下锚固技术形式。

锚固技术要点需重点把握水面上下的桩基施工技术要点、安装锚固件、管桩垂直度监测。漂浮式水上光伏电站锚固系统的设计要保证光伏方

阵能够承受风荷载、波浪荷载和水流力作用产生的较大水平荷载<sup>[20]</sup>。水上安装方面，为增强水面施工的整体稳定性，保障安装质量，要科学利用水上机械化施工平台和自动化、智能化技术进行高处安装作业。

## 2.5 “光伏+采煤沉陷区”项目实施需进行综合效益评估

煤炭开采往往会对当地土地、水文、地质等自然环境条件造成严重破坏，而部门无法协调统一、农村集体土地所有权人治理态度不端正、未能因地制宜等是解决环境问题、开展“光伏+采煤沉陷区”项目时面临的阻碍<sup>[14]</sup>。“光伏+采煤沉陷区”项目实施过程中，各种内外因素都会对项目的效益产生影响，项目效益的总体评估也需要从社会效益、生态效益和经济效益多方面进行<sup>[12]</sup>。利用综合效益评估模型，对项目效益进行具体量化，并基于分析结果对“光伏+采煤沉陷区”项

目提出相应的可行性意见，可以为政府针对在采煤沉陷区开发光伏发电项目是否采取支持态度提供客观参考。

## 3 发展历程

### 3.1 中国“光伏+采煤沉陷区”模式建设不断推进

2015年起，中国开展了“光伏+采煤沉陷区”模式融合发展的探索工作；同年6月，建设规模为100万kW的山西省大同采煤沉陷区国家先进技术光伏示范基地率先得到国家支持<sup>[21]</sup>。2016年，总建设规模为550万kW的光伏领跑基地中，结合采煤沉陷区治理的项目的建设规模约占82%<sup>[21]</sup>，中国第1批光伏领跑基地在采煤沉陷区中建设实施；随后，中国“光伏+采煤沉陷区”模式的应用布局持续推进。

中国推广“光伏+采煤沉陷区”模式应用的相关政策如表1所示。

表1 中国推广“光伏+采煤沉陷区”模式应用的相关政策

Table 1 Relevant policies for promoting application of "PV + coal mining subsidence area" mode in China

发布时间	政策文件	政策要点
2021-09-23	《国务院关于“十四五”特殊类型地区振兴发展规划的批复》(国函[2021]98号)	因地制宜推广利用采煤沉陷区受损土地发展光伏发电、风电
2021-10-21	《国家发展改革委 国家能源局 财政部 自然资源部 生态环境部 住房和城乡建设部 农业农村部 中国气象局 国家林业和草原局关于印发“十四五”可再生能源发展规划的通知》(发改能源[2021]1445号)	推进光伏电站开发建设，优先利用采煤沉陷区、矿山排土场等工矿废弃土地及油气矿区建设光伏电站
2021-11-19	《国家发展改革委等部门关于印发〈“十四五”支持老工业城市和资源型城市产业转型升级示范区高质量发展实施方案〉的通知》(发改振兴[2021]1618号)	创新“光伏+”模式应用，推进光伏发电多元布局，支持包头、鄂尔多斯等地区因地制宜利用沙漠、戈壁、采煤沉陷区、关停矿区等建设风电光伏发电基地
2022-01-29	《国家发展改革委 国家能源局关于印发〈“十四五”现代能源体系规划〉的通知》(发改能源[2022]210号)	创新矿区循环经济发展模式，探索利用采煤沉陷区、露天矿排土场、废弃露天矿坑等发展风电、光伏发电、生态碳汇等产业
2022-05-14	《国务院办公厅转发国家发展改革委 国家能源局关于促进新时代新能源高质量发展实施方案的通知》(国办函[2022]39号)	大力推广生态修复类新能源项目，支持在石漠化、荒漠化土地及采煤沉陷区等矿区开展具有环境保护和修复效益的新能源项目

### 3.2 多地带动采煤沉陷区绿色能源创新转型

内蒙古自治区鄂尔多斯市的伊金霍洛旗天骄绿能50万kW采煤沉陷区生态治理光伏发电示

范项目、山东省济宁市兖州区首个采煤沉陷区漂浮式光伏发电项目——兴隆庄街道一期250MW光伏发电项目、国家电投安徽淮南潘阳40MW

漂浮式光伏发电项目、三峡新能源安徽淮南潘集150 MW水面光伏发电项目均已并网发电;鲁西南采煤沉陷区“光伏+”基地项目稳步推进;国家推进“双碳”目标布局的12个大型风电光伏基地之一的山西晋北采煤沉陷区新能源基地项目也已顺利开工建设;河北省、宁夏回族自治区等省(区、市)也积极利用采煤沉陷区受损土地开发光伏发电等新能源项目。

## 4 发展阻碍

### 4.1 土地问题

采煤沉陷区的土地性质发生了变化,导致一些采煤沉陷区的耕地丧失了农业生产能力,但由于缺乏办理征收和农用地转用审批手续,行政土地性质仍为耕地、园地、林地、草地甚至基本农田。

2023年3月28日,自然资源部、国家林业和草原局办公室、国家能源局综合司印发了《关于支持光伏发电产业发展规范用地管理有关工作的通知》(自然资办发[2023]12号),明确提出新建、扩建的光伏发电项目,不可占用永久基本农田、基本草原、I级保护林地,光伏方阵用地不得占用耕地。因此,该类采煤沉陷区的土地便无法用作光伏发电项目用地开发。

此外,采煤沉陷区的土地大部分为农村集体所有,土地权属的主体形式多元,存在分属村内两个以上农民集体所有、1个村集体所有、乡镇农民集体所有3种形式。当“光伏+采煤沉陷区”项目推进中涉及到农村集体土地利益(包含补偿机制)、土地复垦与生态修复等问题时,不同集体代表的认同感和支持程度存在差异,接受度不同,难以统一规划。

### 4.2 送出问题

采煤沉陷区的电网发展滞后,地区电网网架的建设水平一定程度上限制着消纳通道。此类地区功能原属开采煤矿,电网的结构设计能力一般较小,当煤矿电网扩容或采煤工作面变迁时,就需要改变电力系统网架结构,因此生产过程中会

经过多次扩容改造,导致供电系统缺乏整体性规划,电网结构复杂,存在安全隐患。

### 4.3 稳定性问题

在采煤沉陷区水面布局的水上光伏电站的稳定性还有待提升。利用采煤沉陷区闲置的废弃水域资源建设水上光伏电站,需要稳定的水域环境支撑,且水上光伏电站发电的稳定性会受水域环境的影响,水域中水的深度、溶解物质、悬浮物、生物群落等都是重要影响因素。但受煤矿开采方式和开采范围的影响,采煤沉陷区本身为不均匀沉降区,因此水域下的地形及地质条件的变化难以预测。

### 4.4 安装与运维问题

固定式水上光伏电站建设的便捷性与环保性有待改善。固定式水上光伏电站所需桩基数目非常多,但水面打桩效率低,且对桩基的定位精度要求高;再加上光伏支架构件需要通过船舶运输到水上,并进行高空安装,增加了安装的难度和要求。施工时,由于打桩活动频繁,易造成水体污染且无法解决,同时还会伴随产生长期的噪声污染问题<sup>[22]</sup>。

此外,在固定式水上光伏电站的运维方面,其光伏组件清洗不方便;当出现故障时,光伏支架及光伏组件更换困难。

### 4.5 收益问题

1) 与传统的地面光伏发电项目相比,在其他条件相同及采煤沉陷区治理去补贴化的大背景下,“光伏+采煤沉陷区”项目的建设成本和运维成本偏高,导致项目收益降低。采煤沉陷区的治理呈现去补贴化的趋势,除纳入中央预算内投资的采煤沉陷区治理工程项目外,其综合治理投资主要以政府投资为主。近年来,受地方财政收入下降、财政支出压力大等多重因素影响,对“光伏+采煤沉陷区”项目的总体投入不足、财政支持力度不够、资金缺口大,导致长期综合治理难以维系,直接影响了采煤沉陷区的治理进度。

2) 与传统的地面光伏发电项目相比,“地面光伏+采煤沉陷区”项目的施工难度较大,土地问题的解决较为复杂,电网送出成本较高,导致

项目总成本增高。

3) 与“地面光伏+采煤沉陷区”项目相比,“水上光伏+采煤沉陷区”项目的投资成本与运维成本偏高。目前,“地面光伏+采煤沉陷区”项目的光伏组件现货的市场报价在1元/W左右;“水上光伏+采煤沉陷区”项目中,“固定式光伏支架+基础”的单位成本约为1.28元/W,“漂浮式平台+系泊系统”的单位成本约为1.34元/W。总体来看,“水上光伏+采煤沉陷区”项目的投资成本比“地面光伏+采煤沉陷区”项目的高。另外,由于固定式水上光伏发电项目的光伏组件易受洪水位的高水位线影响,使其故障率增高;再加上光伏支架和光伏组件的更换难度大,清洗不方便,最终导致此类项目的运维成本增加。

## 5 解决措施

### 5.1 确保所用土地权属合法合规,所有者权益得到合理保障

1) 在采煤沉陷区建设新能源项目,投资者要结合最新的土地利用变更调查结果来明晰土地利用性质,做到有凭有据。

2) 政府主管部门要在已有的采煤沉陷区土地数据基础上进行土地筛选,例如:环保方面,评估是否破坏水源地、是否还存在压覆矿等。

3) 在集体土地权益保障方面,要加强信息公开,构建科学合理的土地价值评估体系。推动土地权益者与投资者之间采用以土地入股、联营等合作方式,采取集体签订、集中公证的形式,由政府作为第三方,引入工作机构进行公证,以保护双方的权益和流转合同的兑现。

### 5.2 创新就地消纳模式,加强技术创新和应用

输电通道建设问题是影响“光伏+采煤沉陷区”项目电力送出和消纳的关键因素之一。为解决地区电网建设滞后问题,要挖掘新能源就地消纳的潜力,借鉴新能源市场化项目(例如:内蒙古自治区推动新能源制氢一体化、源网荷储一体化等)经验,提升本地的新能源消纳水平。

### 5.3 考虑多方影响因素设计,创新技术助力提质增效

结合场址的特殊性,“水上光伏+采煤沉陷区”项目的布局设计应充分考虑地层沉陷稳定性、洪水位等地层因素的影响,确定适宜的光伏方阵布置形式和系泊系统的锚链长度。同时,应设置监测点,以确保项目长期运行的安全可靠。

为掌握水域稳定性情况,在漂浮式水上光伏发电项目施工前,应利用遥感和大数据手段,精准采集和实时监测全区域水位情况。

### 5.4 运维考虑全流程多要素

1) 制定特殊气候应急预案,例如:洪水期应急预案、台风期应急预案等,防止出现由水情变化导致的光伏电站资产损失。

2) 设计时应充分考虑光伏电站整体的平面布局。针对“水上光伏+采煤沉陷区”项目,应尽量靠近水域岸边布局光伏电站,且电气设备应尽量布置在岸边,当设备出现问题时,运维人员可步行到达故障点;另外,作为运维通道的水路需要加大前后排光伏组件间距,便于运维船只通过<sup>[23]</sup>。

3) 建议采用以云计算为基础的智能运维方式,结合本地监控和远程集控,精准定位光伏电站故障,实现高效运维管理。

4) 针对“水上光伏+采煤沉陷区”项目,建议在光伏电站外围安装隔离带,预防水面堆积垃圾,以防运维通道堵塞和加速设备腐蚀<sup>[24]</sup>。

### 5.5 提升财政补贴和项目投资在采煤沉陷区生态修复中的作用

“光伏+采煤沉陷区”项目建设时,采煤沉陷区系统的治理工作确保了项目区域的稳定性和生态适宜性,是光伏发电项目建设的基础。由于采煤沉陷区的治理涉及多方面的工程和长期的环境修复工作,因此需要投入相应的资金支持。为了确保项目的顺利实施和长期效益,通常需要政府、企业及社会各界的共同参与和资金支持。

1) 建议优化政府财政支出,做好系统预算和决算,确保采煤沉陷区生态修复工作的有效落实。

建立资金使用效率评估机制,制定公平合理的生态服务经济价值评估标准。

2) 建议拓宽资金渠道,积极争取采煤塌陷区治理建设的相关基金,专项专用,并做好资金使用计划。鼓励社会资本通过特许权或经营权参与到采煤沉陷区的生态修复中。完善管理及监督机制,在生态修复工作监督方面,成立由纪检监察、自然资源和规划、环保、财政等部门组成的监督检查组,健全责任追究制度,严格处理违规操作<sup>[25]</sup>。

## 6 结论

为明晰中国“光伏+采煤沉陷区”模式的发展现状,本文基于文献研究法,对中国“光伏+采煤沉陷区”模式的发展特征与规律进行了分析,总结其发展历程,对其推进过程中存在的客观问题进行了探索,并提出了相应的解决措施,得到以下结论:

1) 中国“光伏+采煤沉陷区”模式的应用主要分布在具有高强度煤炭开采基础的地区。

2) 该模式下,光伏支架的选型与设计需要考虑沉陷稳定性、地层情况、洪水位及开发模式等多方面影响因素,并对项目进行包含经济效益、生态效益、社会效益在内的综合效益评估。

3) 该模式存在采煤沉陷区的土地性质发生变化未及时办理转用审批、电网滞后影响消纳通道、固定式水上光伏电站应用的便捷性与环保性有待提高等问题。

4) 在项目推进过程中,要确保光伏电站所在采煤沉陷区的土地权属合法合规;创新就地消纳模式;建议利用遥感和大数据手段监测水域情况,并通过高效智能运维管理对采煤沉陷区中水上光伏电站的稳定运行作出有效保障。

5) 在项目建设前期的采煤沉陷区治理中,建议优化政府财政支出,建立资金使用效率评估机制;不断拓宽资金渠道,完善管理及监督机制,从而提升财政补贴和项目投资在采煤沉陷区生态

修复中的作用。

### [参考文献]

- [1] 胡炳南,郭文砚.我国采煤沉陷区现状、综合治理模式及治理建议[J].煤矿开采,2018(2): 1-4.
- [2] 刘莎莎,高俊华,尹向红,等.基于遥感的辽宁省采煤沉陷区治理调查[J].国土资源导刊,2022,19(1): 17-22.
- [3] 姬宗皓,贾秋双,张红月,等.济宁采煤沉陷区现状及治理措施[J].资源环境与工程,2020,34(1): 71-74.
- [4] 孙玉倩.淮南市顾桥采煤沉陷区现状调查及治理措施[J].冶金管理,2022(15): 67-69.
- [5] 占惠珠.基于多源遥感的惠农采煤沉陷区地表环境时空演化监测研究[D].西安:西安科技大学,2022.
- [6] 张地伟,韩金伟.采煤沉陷区水土资源评价及生态修复技术实践研究[J].煤炭技术,2024,43(6): 120-124.
- [7] 胡庭浩,杨于凡.城市采煤沉陷区生态韧性评价与修复引导策略——以徐州市为例[J].江苏师范大学学报(自然科学版),2023,41(3): 14-20.
- [8] 华祥,翟保宏,赵琦.非稳沉采煤沉陷区光伏产业治理的设计实践[J].山东煤炭科技,2019,37(5): 197-198,201.
- [9] 陈源.采煤沉陷区光伏场稳定性研究[J].电力与能源,2016,37(6): 771-775.
- [10] 孙庆先,张俊英,陈凯,等.大同采煤沉陷区光伏示范基地110 kV汇集站浅部采空区注浆治理技术[J].中国矿业,2018,27(1): 119-122.
- [11] 王成.利用采煤沉陷区建设集中式光伏电站综合效益分析[J].山东工业技术,2017(16): 67-68.
- [12] 国中祯.淮南市采煤沉陷区生态修复工程综合效益评价研究[D].淮南:安徽理工大学,2023.
- [13] 李旭东.关于甘肃省采煤沉陷区发展光伏项目的构想[J].电工技术,2023(12): 65-67,71.
- [14] 杨利平,梁彦龙.神东布尔台采煤沉陷区光伏发电外围生态治理研究[J].能源与环境,2022(2): 99-101.
- [15] 熊光东,宋培柱,谭绍鑫,等.陕北地区光伏发电与采煤沉陷区的综合治理分析[J].中国资源综合利用,2023,41(12): 219-221,227.
- [16] 朱晓飞,王康东.祁南煤矿采煤沉陷区光伏发电场地稳定性评价[J].山东工业技术,2018(22): 75-76.
- [17] 李永金.攀西采煤沉陷区发展光伏发电工程实践[J].煤炭科技,2023,44(6): 27-30,34.
- [18] 梁甜,吴继亮,廖锸,等.采煤塌陷区光伏支架及基础设计思考[J].低碳世界,2017,7(9): 34-35.
- [19] 白淑娟,陈华锋,李林林.采煤沉陷区建造光伏电站关键技术分析[J].低碳世界,2022,12(1): 49-51.
- [20] 刘喆,樊森辉,路大卫,等.采煤塌陷区水面漂浮式光伏电站的锚固系统结构分析[J].太阳能,2023(11): 65-73.
- [21] 李东侠,袁玲,董菲菲.浅谈光伏发电与采煤沉陷区治理的融合发展[J].电气时代,2022(5): 36-37.
- [22] 梁甜,吴继亮,糜文杰,等.漂浮式光伏发电系统在采煤塌陷区的应用[J].工程建设与设计,2019(21): 142-145.

- [23] 孙杰. 水上光伏电站应用技术与解决方案 [J]. 太阳能, 2017(6): 32-35.
- [24] 陈东坡. 我国水上光伏电站的新机遇、新发展和新挑战 [J]. 电子产品世界, 2017, 24(5): 3-5.
- [25] 何家林. 淮南市采煤沉陷区生态修复的财政支持研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2016.

## RESEARCH ON DEVELOPMENT OF "PV + COAL MINING SUBSIDENCE AREA" MODE IN CHINA

Huang Pingyuan<sup>1</sup>, Yang Hongjiang<sup>1</sup>, Zhang Ka<sup>1</sup>, Yuan Chenhui<sup>2</sup>, Xie Shu<sup>3</sup>

(1. *Guangdong Energy Group Guizhou Co., Ltd., Guiyang 550081, China;*  
2. *Shanxi Branch, Huaneng Renewables Co., Ltd., Taiyuan 030002, China;*  
3. *Beijing Jipeng Investment Information & Consultant Ltd., Beijing 100050, China*)

**Abstract:** Since the exploration of the construction of "PV + coal mining subsidence area" in China, many places have used green energy innovative applications to drive the economic transformation of coal mining subsidence areas. The research content is mostly focused on the specific project design practices, foundation stability assessment, and comprehensive benefits evaluation of the "PV + coal mining subsidence area" mode. Some research progress has been made, but there are currently some objective problems restricting the promotion and application of this mode. Based on the literature research method, this paper analyzes the characteristics and laws of the development of "PV + coal mining subsidence area" mode in China, summarizes its development process, explores the objective problems existing in its promotion process and puts forward corresponding solutions. The research results show that: 1) The application of "PV + coal mining subsidence area" mode in China is mainly distributed in areas with high-intensity coal mining foundation. 2) In this mode, the selection and design of PV brackets need to consider many influencing factors such as subsidence stability, stratum conditions, flood level and development mode, and it is necessary to conduct a comprehensive benefit evaluation of the project, including economic benefits, ecological benefits, and social benefits. 3) There are some problems in this mode, such as the nature of the land in the coal mining subsidence area has changed, but the approval for conversion has not been handled in time, the lagging construction of the power grid affects the consumption channel, the convenience and environmental friendliness of the application of fixed PV power station on water need to be improved. 4) During the project promotion process, it is necessary to ensure that the land ownership of the coal mining subsidence area used by the PV power station is legal and compliant. Innovative on-site consumption mode. It is recommended to use remote sensing and big data methods to monitor the water conditions, and to provide effective guarantees for the stable operation of PV power station on water in coal mining subsidence areas through efficient and intelligent operation and maintenance management. 5) It is recommended to optimize government financial expenditures and establish an evaluation mechanism for the efficiency of governance fund utilization of coal mining subsidence areas during the early stages of project construction. Constantly broaden the funding channels and improve the management and supervision mechanism, so as to enhance the role of financial subsidies and project investment in ecological restoration of coal mining subsidence areas.

**Keywords:** PV+; coal mining subsidence area; PV power station on water; development characteristics; solution measures; comprehensive benefit evaluation