

# 高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化、功能化利用构想与实践

袁亮<sup>1,2,3</sup>, 徐良骥<sup>1,2,3</sup>

(1. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽淮南 232001; 2. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽淮南 232001; 3. 煤矿生态环境保护国家工程实验室, 安徽淮南 232001)

**摘要:** 高潜水位矿区井工开采往往造成地表大面积沉陷积水, 矿区生态环境发生变化, 沉陷区国土资源由以土地资源为主转变为水资源为主、水土资源共存的局面。目前, 采煤沉陷区水资源开发利用不充分, 可再生能源开发、多能互补利用和废弃矿井抽水蓄能等方面具有得天独厚的条件和巨大发展潜力, 采煤沉陷区国土空间功能也需结合现有条件重新定位与建构。在此背景下, 提出高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化和功能化利用构想。系统阐述了“三化”面临的科学问题, 如采煤沉陷水域水资源量和水生态环境演变规律、地表残余变形规律; “三化”涉及的关键技术与模式, 包括监测与评价技术, 如“天-空-地-水-井”一体化协同监测技术体系、采煤沉陷区水生态环境调查评价方法、采煤沉陷区建设场地地基稳定性评价方法, 以及治理利用技术及模式, 如采煤沉陷区水生态环境修复技术模式、采煤沉陷区水资源保持与高效利用技术模式、水资源区域协调开发与高效利用技术模式、风光互补模式、制氢-合成氨-掺氨燃烧发电模式、废弃矿井抽水蓄能模式、农业用地功能构建(复垦地土壤重构)技术、建设用地功能构建(采空区注浆地基加固)技术、生态用地功能构建(地表水系重构与生态湿地建设)技术; 并从产业融合、资金筹集、科技创新、区域统筹等方面提出了具体的政策建议。

**关键词:** 高潜水位; 采煤沉陷区; 资源化; 能源化; 功能化

中图分类号: TD88 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0065-10

## Conception and practice of resource utilization, energization and functionalization of coal mining subsidence areas with high groundwater level

YUAN Liang<sup>1,2,3</sup>, XU Liangji<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. National Key Laboratory of Deep Coal Safety Mining and Environmental Protection, Huainan 232001, China; 3. National Engineering Laboratory for Protection of Coal Mine Eco-Environment, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Underground coal mining often leads to surface subsidence and water accumulation, changes in the ecological environment, as well as in the spatial pattern of land and water resources, in high groundwater level mining areas. At present, in coal mining subsidence areas, the utilization of water resources is insufficient, and the potential for development in renewable energy, multi energy complementarity, and pumped storage in abandoned mine is huge. The spatial functions of coal mining subsidence areas need to be reconstructed. Under this background, the concept of resource utiliza-

收稿日期: 2023-10-13 修回日期: 2024-01-25 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1277

基金项目: 中国工程院重大咨询研究资助项目(2017-ZD-03, 2018-XY-19)

作者简介: 袁亮(1960—), 男, 安徽金寨人, 中国工程院院士。E-mail: yuanl\_1960@sina.com

引用格式: 袁亮, 徐良骥. 高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化、功能化利用构想与实践[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 65-74.

YUAN Liang, XU Liangji. Conception and practice of resource utilization, energization and functionalization of coal mining subsidence areas with high groundwater level[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 65-74.



移动阅读

tion, energization and functionalization was proposed. The relevant scientific issues and key technologies were systematically elaborated. The former comprises the evolution laws of water resources and water ecological environment as well as the residual deformation laws of the surface in coal mining subsidence areas. The latter includes the technology of monitoring and evaluation together with the technology of treatment and utilization. And specific policy recommendations were proposed from aspects such as industrial integration, fund raising, regional coordination, and technological innovation.

**Key words:** high groundwater level; coal mining subsidence area; resource utilization; energization; functionalization

习近平总书记指出,“能源的饭碗必须端在自己手里”。富煤、贫油、少气的资源禀赋和“2个大局”交织的外部环境,决定了我国能源生产和消费以煤为主的基本格局短期内不会改变。尽管煤炭在能源消费总量中的占比有所下降,但鉴于可再生能源短期内难以大规模替代传统化石能源,煤炭仍将是我国能源安全的“压舱石”,未来相当长时间内我国对煤炭的年需求量将保持在35亿~42亿t。同时,煤炭是重要的工业原料,扮演着实体经济“原料库”的角色。此外,煤炭还是初级产品供给的“新宝藏”,目前已发现的173种矿产中,超过80种与煤炭相伴生赋存。

高潜水位煤矿区(以下简称“高潜水位矿区”),即潜水位较高(潜水埋藏深度较浅),且蕴藏有煤炭资源的地区。高潜水位矿区在我国主要分布于东部的河北、河南、安徽、山东、江苏等省,区内有十四大煤炭基地中的两淮基地、鲁西基地、河南基地、冀中基地和蒙东(东北)基地,地形以平原为主,土地肥沃,人口众多,粮食产量占全国的34.18%,人口密度是全国平均水平的3.73倍,是典型的煤粮复合区,浅层地下水埋深5~15m,埋深较小的区域不足3m。因此,高潜水位矿区煤炭井工开采通常导致地表大面积沉陷积水。据预计<sup>[1]</sup>,我国高潜水位矿区采煤最终造成的沉陷面积将达 $318 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,积水面积将超过 $191 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。开采沉陷改变了高潜水位矿区生态环境,造成土地(耕地)资源减少,但必须辩证地看到,沉陷积水区的形成过程也是矿区土-水资源转换过程,客观上增加了地表水资源存储空间和水资源量,具有缓解区域水资源短缺的巨大潜力;利用沉陷区开发清洁能源,发展风力发电和水面光伏发电,建设风光互补的可再生能源基地,有着得天独厚的条件;统筹规划沉陷区国土空间,因地制宜差异化治理,将沉陷区不同区域分别打造成农业用地、建设用地和生态用地,其多元功能价值属性将进一步凸显。

国外在采煤沉陷区治理利用方面起步较早,美国、德国从20世纪20年代就开始开展相关工作,逐渐形成相对完备的技术和制度体系<sup>[2]</sup>。20世纪60年代以来,国外采煤沉陷区治理主要是采用生态修复技术构建后工业园林类景观新空间。20世纪70年代后期开

始,国外更加关注矿山开采引起的生态环境问题和矿业城市生态转型<sup>[3]</sup>。20世纪90年代以后,国外侧重于从城市规划、土地利用、景观改造等角度考虑矿区废弃地的治理利用<sup>[4]</sup>。最近几十年,国外更加注重开采损毁土地的优化利用和土地生产力提升,更加注重资源开采和土地利用间的利弊权衡。我国采煤沉陷区治理利用,特别是针对高潜水位采煤沉陷区治理利用的研究和实践,虽然起步较晚但发展迅速。早期以恢复耕地和建筑用地为主,先后形成一批实用的复垦治理技术,如充填复垦、挖深垫浅、生物复垦和边采边复等<sup>[5-7]</sup>。随着国家对生态文明建设的日益重视和矿业城市转型发展,打造高生态服务价值的人工湿地和矿山公园成为重要方向。

面向未来,立足高潜水位采煤沉陷区土地-水资源转换特征,统筹区域国土空间规划和功能定位,坚持“两山”理念,推动系统治理,使治理后的沉陷区资源价值最大化,能源清洁、低碳化,土地功能多元化,是必然趋势。鉴于此,笔者提出高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化和功能化(统称“三化”)利用构想,针对“三化”利用面临的关键科学技术问题展开讨论,并给出具体的政策建议。

## 1 “三化”构想提出

### 1.1 提出背景

(1) 高潜水位矿区开采沉陷引发一系列生态环境和社会问题。高潜水位矿区长期煤炭高强度开采导致地表大面积沉陷积水,带来如下问题:

① 生态环境发生变化。陆生生物生存空间受到压缩,水生生物和两栖类动物生存空间有所增加,矿区生态系统由陆生向水陆复合型转变。

② 耕地和建(构)筑物受损。大量优质耕地因开采沉陷受损,轻者出现裂缝、起伏不平影响耕种,重者因为积水无法耕种。目前,两淮采煤沉陷区面积已达80多万亩(合5万多公顷),其中80%以上为耕地。据预测,现有矿井全部开采结束时两淮矿区因开采沉陷累计减少耕地将达200多万亩(合10多万公顷)。同时,开采沉陷也会造成大量地面建(构)筑物受到破坏,部分村庄不得不搬迁。

③ 社会不稳定因素增加。高潜水位矿区人口密集,开采沉陷使矿区耕地减少,建设用地更加紧张,人地矛盾加剧,同时村庄搬迁问题如果处理不好,也会使矿农矛盾更加突出,增加社会不稳定因素。

(2) 高潜水位采煤沉陷区水资源开发利用不充分。我国水资源空间分布不均,大部分煤矿城市都存在不同程度的缺水问题,特别是淮河以北,缺水形势十分严峻。淮北市作为东部地区重要的煤炭基地和安徽省经济重镇,是全国 114 个严重缺水城市之一,近年来,随着煤电化产业加速发展,工业用水需求量急剧增加,缺水形势更加严峻。与此同时,开采沉陷导致高潜水位矿区水资源库容和水资源量大幅增加,两淮矿区开采沉陷新增水资源量预估 8 亿~12 亿 m<sup>3</sup>,这对于缓解区域水资源短缺有着巨大潜力。但是,目前采煤沉陷区水资源开发利用仍不充分,制约了区域产业转型和高质量发展。

(3) 高潜水位采煤沉陷区可再生能源开发和多能互补利用具有巨大潜力。利用采煤沉陷水域开阔的水面进行光伏发电,不仅节约土地资源,还可以提高发电效率,降低安装和运行成本,且对生态环境影响也较小。此外,沉陷区一般无高大建筑物遮挡,可以发展风电。利用风光绿电电解水制备绿氢,再用绿氢合成绿氨,将绿氨输送至附近火力电厂进行掺氨减煤

燃烧发电,可以降低煤炭用量和碳排放量,减少氮氧化物排放,提高能源利用率,减轻环境污染。

(4) 高潜水位采煤沉陷区国土空间需进行功能重构。开采沉陷使高潜水位矿区国土空间结构失衡、原有功能退化,沉陷区修复治理本质而言就是优化结构、重构功能。因此,必须结合当地转型发展和“三区三线”管控,立足沉陷区实际条件,对国土空间进行统筹规划,对不同区域进行功能定位和重构,从而使治理后的沉陷区国土空间整体功能最优化。

### 1.2 “三化”概念及研究框架

资源化,就是将高潜水位矿区水资源,特别是开采沉陷新增的水资源进行优化配置和高效利用,更好地服务区域经济社会发展和生态环境建设。

能源化,是将高潜水位采煤沉陷区建设成风光互补的可再生能源基地,打造制氢-合成氨-掺氨燃烧发电产业链,推动废弃矿井抽水蓄能工程研究与示范,为发展清洁能源和电力保供调峰做出贡献。

功能化,即统筹全域国土空间开发与保护,对采煤沉陷区国土空间进行统筹规划和功能重构,将不同区域分别治理成农业用地、建设用地和生态用地。

对采煤沉陷区进行“三化”利用,必须要解决一系列直接相关的科学和技术难题。为此,有必要进行深入研究,研究框架如图 1 所示。

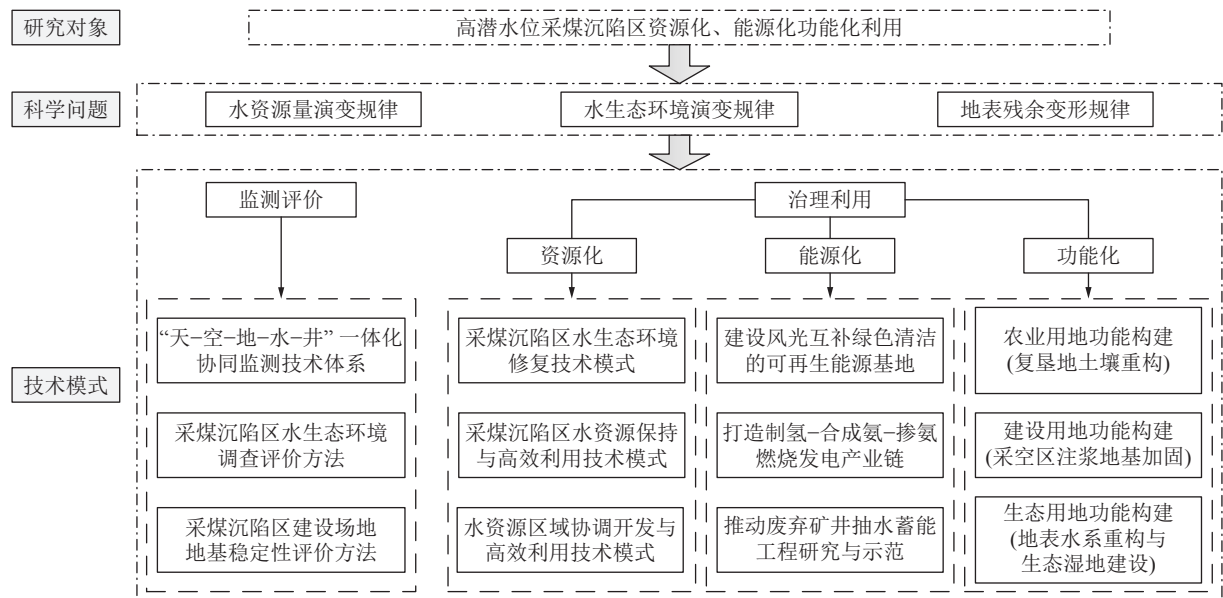


图 1 研究框架

Fig.1 Research framework

## 2 关键技术

### 2.1 监测与评价关键技术

高潜水位矿区煤炭开采导致地表土-水资源发生转换,采煤沉陷区治理利用有挑战也有机遇。掌握水

资源量和水生态环境演变规律,以及地表残余变形规律,是高潜水位采煤沉陷区“三化”利用的基础和前提,有必要通过多平台协同监测精准获得采煤沉陷区水资源量,通过科学的调查研究掌握沉陷区水生态环境演变规律,并对老采空区地表稳定性进行评价,从而

为“三化”利用提供理论和数据支撑。

### 2.1.1 “天-空-地-水-井”一体化监测技术体系

构建“天-空-地-水-井”一体化监测技术体系，可以弥补传统监测手段的不足，有助于摸清采煤沉陷水域水资源家底，掌握其分布特征和变化趋势，为优化配置和集约利用奠定坚实基础。

“天-空-地-水-井”一体化监测技术体系如图 2 所示，包括基于“无人机-无人船-GIS”的采煤沉陷水域水资源协同监测技术、基于 InSAR-地表移动观测站-分布式光纤传感的开采沉陷协同监测技术，以及基于长时序遥感的采煤沉陷水域时空演变研究方法。

(1) 基于“无人机-无人船-GIS”的采煤沉陷水域水资源协同监测技术。高潜水矿区，开采沉陷影响范围广、面积大，沉陷水域分布零散，传统的测量手段难以高效、精准地完成采煤沉陷水域水资源量勘测。笔者团队采用无人机低空摄影测量技术对两淮矿区 500 多 km<sup>2</sup> 采煤沉陷区内的水域面积进行了监测，监测速度可达 30~50 km<sup>2</sup>/d，误差控制在 3.5% 以内；采

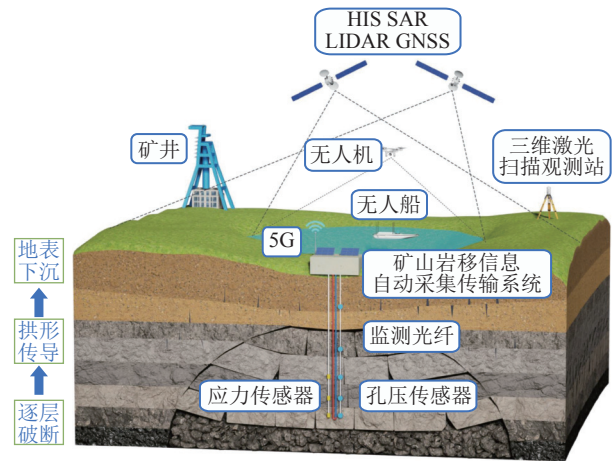


图 2 “天-空-地-水-井”一体化监测

用无人船测量设备对沉陷水域水下地形进行了勘测，速度可达 3~5 km<sup>2</sup>/d，误差控制在 1.5% 以内；采用顾及地形特征的无人船点云数据内插方法，建立了采煤沉陷水域水下地形 DEM，实现沉陷水域水下地形三维重建和水资源量精准计算，如图 3 所示。

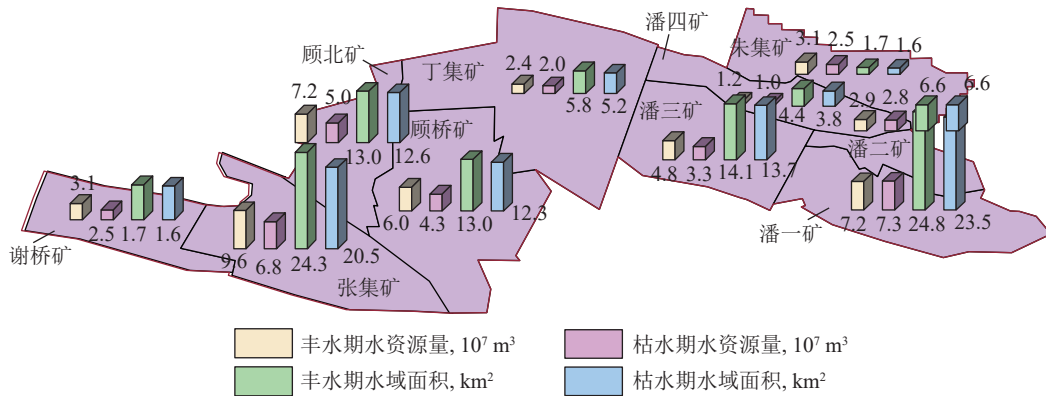


图 3 淮南潘谢矿区采煤沉陷水域水资源量分布

Fig.3 Distribution of water resources in the subsidence area of Huainan Panxie Coal Mining District

(2) 基于 InSAR-地表移动观测站-分布式光纤传感的开采沉陷协同监测技术。掌握厚松散层高潜水位矿区覆岩破断-松散层变形-地表沉陷传导规律，获取地表下沉预计参数，是进行开采沉陷预计和未来水资源量预测的基础。基于分布式光纤传感技术，可实现覆岩移动和松散层微变形的精准监测，如图 4 所示，精度达 0.001 mm/m；基于 InSAR-地表移动观测站，可实现毫米级地表沉陷面域监测。笔者团队采用相关技术对淮北矿区童亭、信湖等矿井部分工作面进行了监测，揭示了厚松散层高潜水位矿区采动过程中基岩内部呈拉伸-压缩、厚松散层内部呈压缩-拉伸-压缩的变形特征，以及厚松散层失水固结沉降特征<sup>[8]</sup>，得到地表下沉系数 (0.9~1.3) 和水平移动系数 (0.3~0.4)。在此基础上，基于分层建模、分区赋参，构建了

松散层失水固结条件下地表沉陷预计模型，再将沉陷积水下沉临界值与当地潜水位埋深相结合，建立了采煤沉陷水域未来水资源量预计方法。

(3) 基于长时序遥感的采煤沉陷水域时空演变研究方法。基于融合多光谱多特征的遥感技术，可对高潜水位矿区过去一段时期采煤沉陷水域时空演变规律进行分析，如图 5 所示。此外，结合单一/多波段组合的水体深度反演方法，可以得到采煤沉陷水域水资源量动态变化的总体趋势。

### 2.1.2 采煤沉陷区水生态环境调查评价方法

高潜水位矿区开采沉陷积水，导致地表生态系统由陆生向水陆复合型转变。由于沉陷水域形成时间短，且形成过程、形成条件不同于天然湖泊，其生态系统尚未成熟，环境质量仍不稳定。

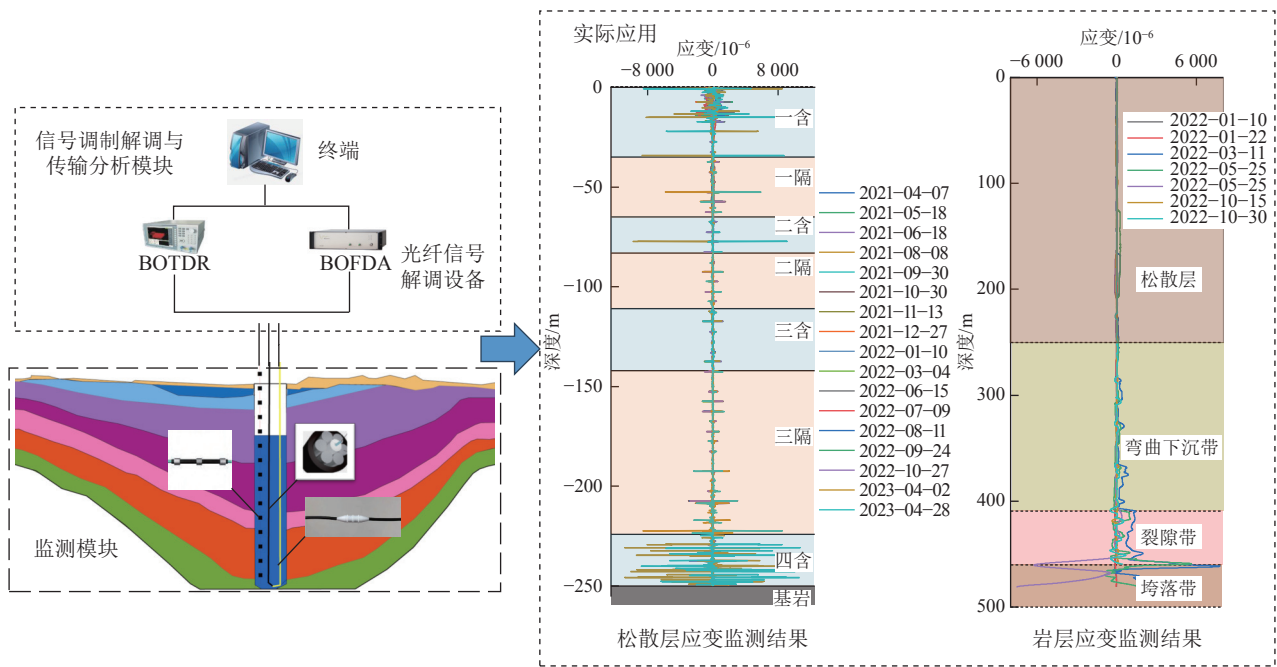


图 4 光纤监测示意

Fig.4 Fiber optic monitoring schematic

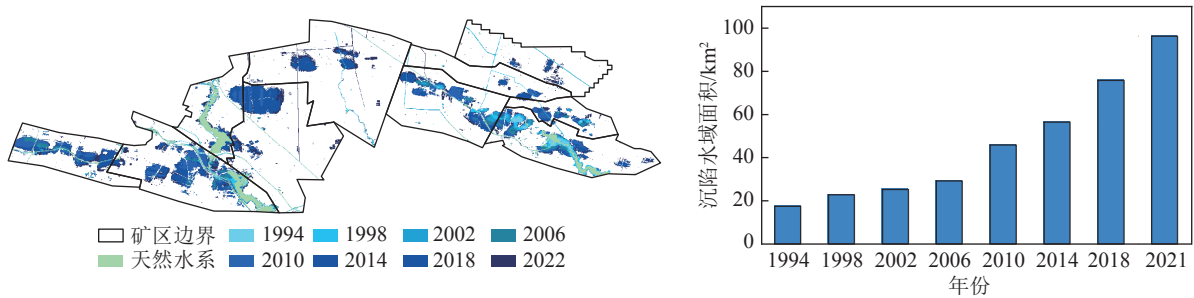


图 5 淮南潘谢矿区采煤沉陷水域时空演变

Fig.5 Temporal and spatial evolution of coal mining-induced subsidence water bodies in Huainan Panxie Mining Area

为更有针对性地开展采煤沉陷区水资源环境调查评价,安徽理工大学与淮北矿业集团合作,联合起草了《采煤塌陷区水资源环境调查与评价方法》,并获批发布成为国家标准(GB/T 37574—2019)。

该标准将采煤沉陷水域划分为开放型和封闭型,将沉陷因素、污染源和积水区资源环境要素纳入调查范围,分类设置水质监测断面和水资源量监测网络(单个网格面积小于  $10^4 \text{ m}^2$ ),从而形成采煤沉陷区水资源环境监测方法体系(图 6),并建立了基于水质、水化学特征和营养状态分析的水质评价方法体系。

针对采煤沉陷水域生态演替规律的特殊性,通过长期监测,分析沉陷水域生物群落多样性及其与水环境质量的相关性,揭示不同类型沉陷水域生态系统演替规律,建立以“生命”为表征的水生态环境评价指标体系,阐明采煤沉陷水域生命系统和生态环境的互馈机制。

### 2.1.3 采煤沉陷区建设场地地基稳定性评价方法

地基稳定是进行工程建设的前提,采煤沉陷区开

发为建设用地,首先要进行建设场地地基稳定性评价。影响地基稳定性的因素主要有地表残余沉降、建(构)筑物附加荷载、采空区岩体活化,以及饱和与非饱和填土固结沉降等,需综合考虑这些因素的影响,建立地基稳定性评价模型,对采煤沉陷区建设场地地基稳定性进行分区评价,为分区规划设计、选择适当的地基加固措施提供依据。

## 2.2 治理与利用技术模式

### 2.2.1 资源化

(1) 水生态环境修复技术模式。

采煤沉陷水域分布较为零散,面积大小不一,所处下沉阶段、与其他水体连通情况、点源与面源污染汇入情况各有不同,因此,不同沉陷水域水质和水生态环境质量存在明显差异。做好污染水体的生态环境修复,是采煤沉陷水域水资源规模化利用的前提。

整体而言,在没有点源污染汇入情况下,采煤沉陷水域水质尚可,以 III 类、IV 类水为主,部分指标

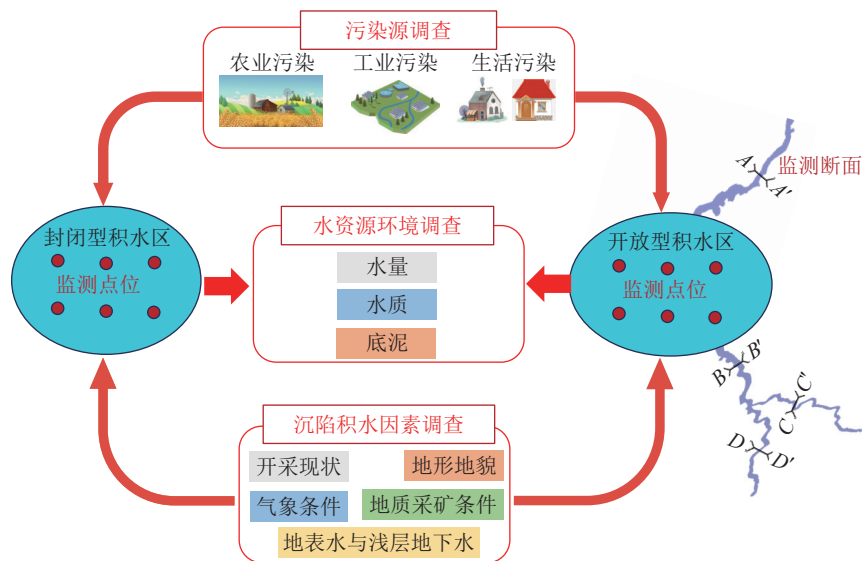


图 6 采煤沉陷区水资源环境监测示意

Fig.6 Schematic diagram of water resources environmental monitoring in coal mining subsidence areas

(如总氮、氨氮) 偏高。部分养殖水域, 由于养殖密度过大, 加之投放大量饵料, 导致化学需氧量 COD (Chemical Oxygen Demand) 偏高, 水体呈中度或重度富营养化。

采煤沉陷水域水生态环境修复应优先考虑“局部水污染控制+区域再生水循环利用”模式, 对局部污染水体采用自动巡航智能监测系统进行快速监测, 通过纳米磁性絮凝、生物接触氧化、植物过滤等组合工艺高效处理污染水体; 通过设置水泵、引水沟渠和输水涵管, 改善局部水循环, 让沉陷区的水流动起来; 充分利用沉陷坡地和水陆交错带, 构建“乔+灌+草”植被截留系统阻截面源污染, 设置潜流净化台地和表流湿地进一步净化水质。

### (2) 水资源保持与高效利用技术模式。

高潜水位矿区虽属于我国水资源相对丰富的区域, 但由于人口稠密, 工业发达, 需水量大, 且需水量与降水量、蓄水量存在时空分布不均的现象<sup>[9]</sup>, 区内工业城市存在不同程度的缺水问题。特别是淮北市, 作为全国 114 个严重缺水城市之一, 近些年随着煤电、煤焦、煤化工等项目陆续实施, 用水需求量逐年增加, 缺水形势更加严峻。采煤沉陷区有着巨大的蓄水空间和可观的水资源量, 加之松散层内部存在稳定的隔水层<sup>[10]</sup>, 能够有效存储水资源, 具备建设平原水库缓解当地生产用水紧缺的巨大潜力。

保持水资源量基本稳定对保证水资源高效可持续利用至关重要。采煤沉陷水域水资源主要由浅层地下水和大气降水补给, 为增加补给来源, 强化平原水库的供水、除涝、防洪、灌溉等功能, 笔者团队提出了基于天然水系-人工水系-沉陷水域连通循环的水

资源保持与高效利用技术模式, 通过水利工程措施, 将区内天然河流与沉陷水域相连通, 从而实现水资源稳定供给和灵活调配。利用相关技术成果, 建成临涣采煤沉陷区平原水库, 如图 7 所示, 库容量约 500 万 m<sup>3</sup>, 有力保障了临涣工业园区的用水需求。

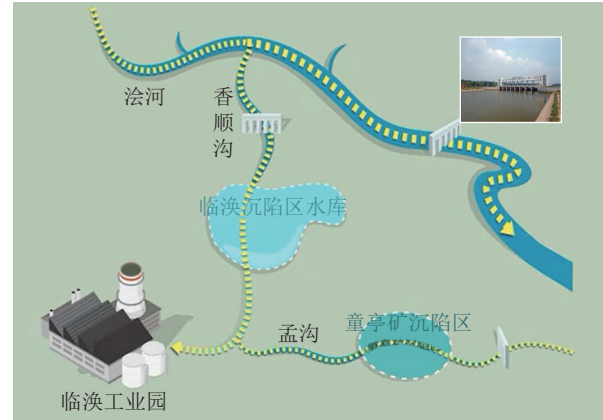


图 7 淮北临涣采煤沉陷区平原水库

Fig.7 Plain reservoir in the coal mining subsidence area of Linhuan, Huaibei

### (3) 水资源区域协调开发与高效利用技术模式。

我国水资源空间分布不均, 南多北少, 东多西少, 为此, 可采用跨流域调水的方式, 将水资源丰富地区的水调到缺水地区, 以便更加合理、高效地利用水资源。引江济淮、淮水北调就属于此类跨流域调水工程。

引江济淮工程从长江下游干流引水, 向安徽江淮、皖北地区和河南豫东地区供水, 连通长江、淮河两大水系, 自南向北分为引江济巢、江淮沟通、江水北送 3 段。其中, 江水北送段西淝河输水线路, 经过淮南矿区西淝河片采煤沉陷区<sup>[11]</sup>。淮水北调工程(引江济淮

延伸工程),自蚌埠五河站从淮河干流抽水,引向皖北,跨蚌埠、宿州、淮北3市7县(区),输水线路经过淮北矿区采煤沉陷区。

引江济淮、淮水北调沿线采煤沉陷区(含连片的天然湖洼)总蓄滞库容10亿 $\text{m}^3$ 以上,具有巨大的调蓄潜力。今后可进一步研究,将沉陷区调蓄利用纳入引江济淮、淮水北调配套工程,统筹规划建设,充分发挥沉陷区调蓄功能,提高工程调度灵活性,控制跨流域调水规模,更好地做到水资源区域协调开发与高效利用。

### 2.2.2 能源化

#### (1) 建设风光互补绿色清洁的可再生能源基地。

风能、太阳能属于绿色清洁的可再生能源,零排放,无污染,能缓解化石能源匮乏带来的危机。近年来,在相关政策支持下,我国风、光发电量大幅增长。由于风、光具有不稳定性,随之而来的弃风弃光问题日益突出。但是,风能和太阳能在时间上具有互补性,采用风光互补模式,可有效缓解弃风弃光现象,提高可再生能源利用率。

我国东部高潜水位采煤沉陷区,分布范围广,积水面积大,光照条件好,区内无高大建筑物阻挡,具备风光互补发电的条件。要综合考虑沉陷区气流和地形要素特征,合理布置风力发电机组;充分利用沉陷水域水面,建立光伏电站;因地制宜探索新型储能模式,做好并网、调峰、消纳,将采煤沉陷区建设成可再生能源基地。

#### (2) 打造制氢—合成氨—掺氨燃烧发电产业链。

氢能是一种二次清洁能源,具有长周期储能特性,可以提高电网和分布式供能的稳定性。利用沉陷区的风光绿电电解水制备绿氢,可以很好地消纳沉陷区可再生能源,解决弃风、弃光问题。绿氢进一步与氮气合成绿氨<sup>[12]</sup>,然后将绿氨输送至附近火电厂进行掺氨燃烧发电。掺氨燃烧可以提高燃烧效率,降低煤炭使用量和碳排放量<sup>[13]</sup>,减少氮氧化物排放,从而缓解温室效应,减少环境污染,提高能源利用率。

高潜水位矿区可以将氢氨经济作为重要发展方向,把可再生能源发电与绿氢、绿氨制备相结合,推进沉陷区风电、光电冗余电量制氢、合成氨,打造“沉陷区风力发电/水面光伏发电—电解水制氢—合成氨—附近电厂掺氨燃烧发电”产业链。

#### (3) 推动废弃矿井抽水蓄能工程研究与示范。

抽水蓄能是在用电低谷时,利用电网过剩的电力驱动水泵,将水从下水库抽到上水库,电能转换为水的重力势能;用电高峰时,上水库放水,推动水轮机转

动发电,水的重力势能重新转换成电能,并输送回电网。废弃矿井地上地下有着巨大的落差和存储空间,并且在开采过程中涌出大量矿井水,具备建设抽水蓄能电站的基础条件,如图8所示。

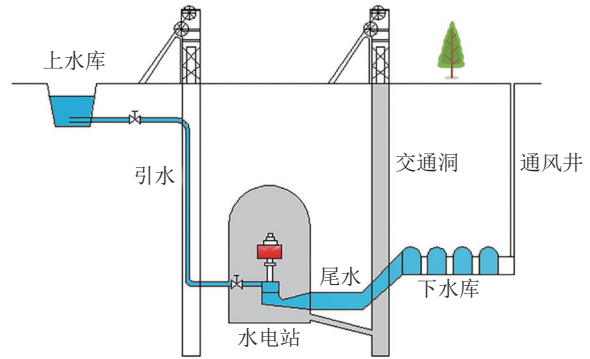


图8 废弃矿井抽水蓄能示意

Fig.8 Schematic diagram of pumped storage in abandoned mines

我国废弃矿井资源丰富,随着煤炭有序减量替代,废弃矿井数量还将进一步增长。据不完全统计,到2030年废弃矿井将达1.5万处。利用废弃矿井抽水蓄能,有利于提高储能能力,破解高比例清洁能源入网调频困难、消纳不足难题;有利于构建废弃矿井“抽水蓄能+”多能互补能源子系统,建设多源协同微电网;有利于一揽子推进废弃矿井地下空间等资源利用、生态碳汇创造,推动废弃矿区生态修复和资源型城市转型,协同推进降碳、减污、扩绿、发展。

中国工程院组织开展了“我国煤矿安全及废弃矿井资源开发利用战略研究”,提出“露天矿坑全地表模式”“塌陷矿井半地表模式”“废弃矿井全地下模式”等3种废弃矿井建设抽水蓄能电站模式及其技术路径。中国矿业大学、安徽理工大学、国家电网公司、国家能源集团等单位进一步组织了系统深入的研究。但与美国、德国、英国等国家相比,我国在废弃矿井抽水蓄能工程应用方面仍有一定差距<sup>[14]</sup>,要从战略的高度,把废弃矿井抽水蓄能、储能作为“双碳”工作重要组成部分,结合我国废弃矿井资源状况,加快推进工程研究与示范。

### 2.2.3 功能化

#### (1) 农业用地功能构建。

农业用地功能构建,即通过工程措施将采煤沉陷区治理成农业用地(主要是耕地),恢复或重构其农业生产功能,主要涉及复垦土壤重构技术。高潜水位采煤沉陷区经常采用的复垦技术主要有挖深垫浅复垦技术、充填法复垦技术、沉陷地土地平整技术、梯田式复垦技术和疏排法复垦技术等<sup>[15]</sup>。土地复垦的主要工作包括土壤重构、地貌重塑和植被恢复,其中,土壤重构与地貌重塑密切相关,并直接影响植被恢复效

果,是土地复垦的核心<sup>[16]</sup>。土壤重构的关键是重构土壤剖面,笔者团队设计了基于充填基质结构组分差异和不同覆土厚度的充填复垦土壤剖面重构模式,如图 9 所示,并通过田间试验证实两淮矿区煤矸石充填复垦最佳覆土厚度为 50 cm。团队还研发了“表土层-生

物活性层-细粒径煤基固废层-熟土层-粗粒径煤基固废层”夹心层式复合结构充填复垦土壤剖面重构技术,如图 10 所示,提出了采复协同保土复垦技术思路,并与淮南、淮北矿业集团合作,在两淮矿区推广应用,复垦耕地 2 万多亩(合 1 000 多公顷)。

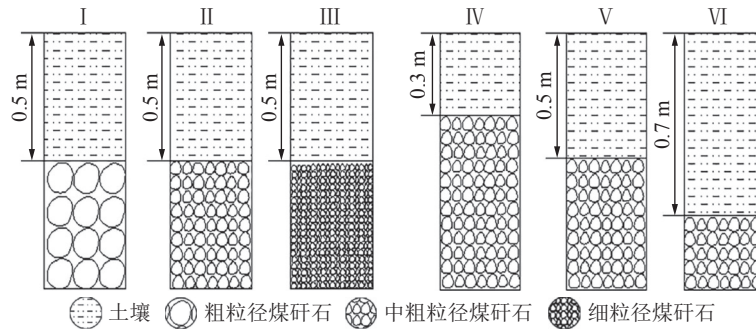


图 9 不同结构组分和不同覆土厚度的充填复垦土壤剖面重构模式

Fig.9 Reconstruction model of soil profile in reclamation with fill material of different structural components and varying overburden thickness

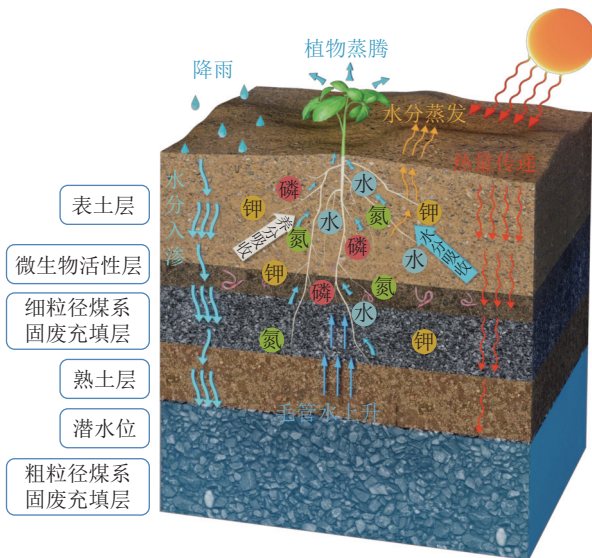


图 10 夹心层式复合结构充填复垦土壤剖面重构模式

Fig.10 Reconstruction model of soil profile in reclamation with sandwich layered composite structure fill material

### (2) 建设用地功能构建。

建设用地功能构建,即通过工程措施强化采空区地表的建设用地功能,或者将不适合复垦为耕地的沉陷区治理为建设用地。建设用地功能构建,关键是防止矿区新增建筑物荷载引发老采空区“活化”,进而导致地表不均匀沉降,威胁建筑物安全,通常采用采空区注浆地基加固技术(图 11)进行处理,从而提高采空区地基承载能力,实现采空区上方高层建筑群规模化建设,进而提升沉陷区土地的经济价值。淮北矿业集团采用该技术在采空区上方建成高层办公楼和多层住宅楼。

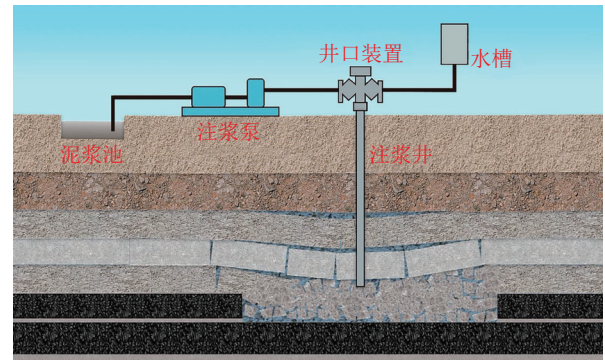


图 11 采空区注浆地基加固示意

Fig.11 Grouting foundation reinforcement schematic in mined-out area

### (3) 生态用地功能构建。

生态用地功能构建,是以采煤沉陷积水区为主体,基于景观生态安全格局理论和最小耗费距离模型,打造仿自然地表水系连通路和生态景观渠,重构水生生物群落,建设人工湿地。笔者团队提出高潜水位采煤沉陷区湿地生态、文化、休闲多元功能开发理念,协助地方申报国家矿山公园建设项目并获批,建成“煤矿文化-地质遗迹-生态景观”一体化,集科普教育、休闲观光等多功能于一体的淮北国家矿山公园(全国首批 28 个之一)。此外,徐州潘安湖国家湿地公园、安徽迪沟国家湿地公园和邹城太平国家湿地公园等,都是高潜水位采煤沉陷区综合治理与生态用地功能构建的典型案列。

## 3 政策建议

(1) 支持产业融合发展,促进转型升级。高潜水位



采煤沉陷区治理利用,要坚持系统观念,统筹推进山水林田湖草矿全要素综合治理。通过沉陷区治理利用,拓宽“两山”转化通道,打造发展新动能和新增长点,推动新型城镇化建设,促进产业转型升级,实现绿水青山和金山银山相互转化、一二三产业融合发展。具体建议:

① 通过沉陷区治理,盘活废弃土地资源,做好土地确权和经营权流转,以“村集体+公司+农户”模式因地制宜发展特色农业和文旅产业。

② 鼓励沉陷区申报国家矿山公园和国家湿地公园建设项目,其申报不受所在省(自治区)申报名额限制。

③ 鼓励“风力发电+光伏发电+现代农业”的“农能互补”模式和“水面发电+水下养鱼”的“渔能互补”模式,支持沉陷区“农、渔、风、光”融合发展。

(2) 完善矿山地质环境治理恢复基金制度,支持多途径筹集资金。采煤沉陷区综合治理需要强有力的资金保障,单靠矿业开发企业和地方政府财力难以解决,而中央政府所能提供的财政支持也十分有限。必须按照“谁破坏谁治理,谁投资谁受益”的原则,完善相关政策法规,拓宽融资渠道,实现多方参与,共同治理。具体建议:

① 各地应结合当地实际,完善矿山地质环境治理恢复基金制度实施细则,加强动态监管,确保制度得到有效落实<sup>[17]</sup>。

② 探索多元化融资渠道和运营模式,如: EOD 项目模式、政府债券模式、政府设立基金或投资运营公司模式、创新型贷款模式、多边银行(亚投行等)政策性贷款模式等。

(3) 鼓励科技创新,破解沉陷区治理关键技术难题。高潜水位采煤沉陷区综合治理与生态修复是世界性难题,沉陷区治理利用离不开科技创新,要完善相关支持措施,加快关键核心技术攻关,破解沉陷区治理利用技术难题。具体建议:

① 各级、各类科研基金与项目在立项时适当向沉陷区治理利用新技术方向倾斜。

② 矿业企业设立专项科研基金,或每年从营业额中拨付一定比例用于沉陷区治理关键技术攻关。

(4) 适度核减或区域统筹耕地保有量和基本农田保护率。我国东部高潜水位矿区多为煤粮复合区,土地肥沃,人口众多,开采沉陷造成地表大面积积水,大量耕地损毁,沉陷区治理后耕地保有量很难恢复到开采前水平,为确保国家 18 亿亩(合 1.2 亿公顷)耕地红线不突破,应适当完善报损核减政策<sup>[18]</sup>,调整国土空间规划。具体建议:

① 在据实调查的基础上由省级自然资源主管部门在全省范围内调整优化耕地保有量,确实无法在省内范围内统筹平衡的,自然资源部可以在国土空间总体规划中统筹考虑。

② 在据实调查和认定的基础上,采煤沉陷区永久基本农田确实无法恢复的,可根据《中华人民共和国土地管理法》和《基本农田保护条例》等有关规定<sup>[19]</sup>,按照“布局基本稳定、面积不减少、质量不降低”的要求<sup>[20]</sup>,结合沉陷区国土综合整治的实际需要,调整完善国土空间规划,划入同等数量和质量的耕地作为永久基本农田。

### 参考文献(References):

- [1] 袁亮,彭苏萍,武强,等.我国东部采煤沉陷区综合治理及生态修复战略研究[M].北京:科学出版社,2020.
- [2] 张文敏.国外土地复垦法规与复垦技术[J].有色金属(矿山部分),1991(4):41-46.  
ZHANG Wenmin. Land reclamation regulations and reclamation technologies abroad[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 1991(4): 41-46.
- [3] 张玮.两淮采煤塌陷区土地复垦模式及其工程技术研究[D].合肥:安徽农业大学,2009:4-9.  
ZHANG Wei. The coal mines collapse area land reclamation pattern and the project technical standard research of Huainan and Huaibei cities[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2009: 4-9.
- [4] 于硕.徐州市采煤塌陷湿地空间演变与优化策略研究[D].徐州:中国矿业大学,2018:8-12.  
YU Shuo. Study on the spatial evolution and optimal strategies of coal-mining subsided Wetlands in Xuzhou[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018: 8-12.
- [5] 唐本玲,胡振琪,王亚平.不同黄河泥沙充填复垦土壤剖面对土壤与作物中元素分布的影响[J].煤炭学报,2021,46(S2):915-924.  
TANG Benling, HU Zhenqi, WANG Yaping. Effects of different Yellow River sediment filling reclaimed soil profiles on the distribution of elements in soil and crops[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 915-924.
- [6] 赵会顺,胡振琪,袁冬竹,等.基于土方平衡的挖深垫浅复垦开挖深度研究——以赵固矿区采煤塌陷地为例[J].中国矿业大学学报,2019,48(6):1375-1382.  
ZHAO Huishun, HU Zhenqi, YUAN Dongzhu, et al. Initial digging depth of deeping-digging and shallow-filling reclamation based on earthwork balance: A case study of collapse in Zhaogu Mining area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6): 1375-1382.
- [7] 胡振琪,李根生,袁冬竹.东部煤粮复合区采煤沉陷地边采边复时机[J].煤炭学报,2023,48(1):373-387.  
HU Zhenqi, LI Gensheng, YUAN Dongzhu. Timing of concurrent mining and reclamation in coal-grain overlapping areas with mining-

- induced subsidence, Eastern China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 373–387.
- [8] 徐良骥, 曹宗友, 刘潇鹏, 等. 基于分布式光纤的松散含水层失水沉降规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 231–241.  
XU Liangji, CAO Zongyou, LIU Xiaopeng, et al. Study on water loss settlement law of loose aquifer based on distributed optical fiber[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 231–241.
- [9] 肖武, 陈文琦, 何厅厅, 等. 高潜水位煤矿区开采扰动的长时序过程遥感监测与影响评价[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 922–933.  
XIAO Wu, CHEN Wenqi, HE Tingting, et al. Remote sensing monitoring and impact assessment of mining disturbance in mining area with high undergroundwater level[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 922–933.
- [10] 严家平, 程方奎, 官传刚, 等. 淮北临涣矿区平原水库建设及水资源保护利用[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(8): 158–162.  
YAN Jiaping, CHENG Fangkui, GONG Chuangang, et al. Plain reservoir construction and water resources protection and utilization of Linhuan Mining Area in Huaibei[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(8): 158–162.
- [11] 陈昌才. 引江济淮工程沿淮湖洼调蓄方案与布局[J]. *治淮*, 2015(9): 23–25.  
CHEN Changcai. The plan and layout of water diversion from the Yangtze River to the Huaihe River project along the Huaihe Lake and depression for regulation and storage[J]. *Governance of the Huai River*, 2015(9): 23–25.
- [12] 杨国山, 朱杰, 宋汶秦, 等. 基于伊藤过程的电制氢合成氨负荷随机最优控制[J]. *中国电力*, 2023, 56(7): 66–77.  
YANG Guoshan, ZHU Jie, SONG Wenqin, et al. Flexible load stochastic optimal control of wind power-based hydrogen production and ammonia synthesis systems based on the Itô process[J]. *Electric Power*, 2023, 56(7): 66–77.
- [13] XU Y, WANG H, LIU X, et al. Mitigating CO<sub>2</sub> emission in pulverized coal-fired power plant via co-firing ammonia: A simulation study of flue gas streams and exergy efficiency[J]. *Energy Conversion and Management*, Oxford: Pergamon-Elsevier Science Ltd., 2022, 256: 115328.
- [14] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 14–20.  
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 14–20.
- [15] 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.
- [16] 卞正富. 我国煤矿区土地复垦与生态重建研究[J]. *资源·产业*, 2005(2): 18–24.  
BIAN Zhengfu. Research on the recultivation and ecological reconstruction in coal mining area in China[J]. *Resources & Industries*, 2005(2): 18–24.
- [17] 李小娜. 矿山环境治理恢复基金法律制度研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2021: 17–22.  
LI Xiaona. Research on mine environmental governance recovery fund legal system[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics, 2021: 17–22.
- [18] 黄先栋. 高潜水位采煤沉陷耕地报损核减标准与制度设计[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017: 27–33.  
HUANG Xiandong. The verification-reduction standard and system design of subsided farmland in high groundwater coal mines[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2017: 27–33.
- [19] 李周. 中国农业绿色发展: 制度演化与实践行动[J]. *求索*, 2022(5): 97–105.  
LI Zhou. Green agricultural development in China: Institutional evolution and practical action[J]. *Seeker*, 2022(5): 97–105.
- [20] 陈文广, 张青璞, 孔祥斌, 等. 基于“三线”统筹的省域永久基本农田布局优化规则与实证研究[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(15): 248–257.  
CHEN Wenguang, ZHANG Qingpu, KONG Xiangbin, et al. Optimizing rules and empirical research of provincial permanent basic farmland layout based on the “Three-line” coordination[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(15): 248–257.