DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.03.023

我国煤矿矿井水全生命周期保护与利用研究

武强[1,2,3]，高俊莲[4*]，曾一凡[1,2,3]，程洋[4]

（1. 中国矿业大学（北京）国家煤矿水害防治工程技术研究中心，北京 100083；2. 矿山水防治与资源化利用国家矿山安全监察局重点实验室，北京 100083；3. 中国矿业大学（北京）内蒙古研究院，内蒙古鄂尔多斯 017010；4. 中国矿业大学（北京）管理学院，北京 100083）

摘要：煤矿矿井水既是宝贵的战略性水资源，又是重要的隐蔽致灾因素，其科学保护与高效利用对保障煤矿安全生产、推动煤炭行业绿色低碳转型和助力国家“双碳”目标实现具有重要意义。本文基于煤炭行业高质量发展需求，系统研究了矿井水全生命周期保护和利用问题。从系统工程视角出发，明确了矿井水全生命周期保护和利用的科学内涵，即统筹矿井水“产生–运移–利用–循环”全过程，形成源头减量化、过程无害化、末尾资源化、终端回灌化（“四化”）的综合治理模式；梳理了我国煤矿矿井水在“四化”各环节保护与利用的技术发展现状，总结了面临的技术创新不足、市场机制不完善、政策标准与技术规范缺失等挑战。在此基础上，构建了以资源战略、产业战略、生态战略为导向的矿井水资源保护和利用战略体系，提出了源头控制提效、处理过程提质、综合回用提值、终端处置提容的治理思路，系统部署了核心技术攻关、全链条示范引领、市场化产用协同、生态安全保障、智慧管理平台建设等五大工程体系，以形成技术创新驱动、工程建设支撑、市场运营保障、生态安全护航、智慧管理赋能的协同推进格局。研究建议，构建现代化治理体系、突破核心技术瓶颈、推进产业转型升级、完善标准评价体系、强化协同治理机制，为推动煤炭行业绿色转型和矿井水由废水管理向战略性水资源转变提供系统性解决方案。

关键词：矿井水；全生命周期管理；源头减量化；过程无害化；末尾资源化；终端回灌化

中图分类号：TD74　　**文献标识码：**A

Life-Cycle Protection and Utilization of Coal Mine Water in China

Wu Qiang[1,2,3], Gao Junlian[4*], Zeng Yifan[1,2,3], Cheng Yang[4]

(1. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Mine Water Control and Resources Utilization, National Mine Safety Administration, Beijing 100083, China; 3. University of Mining and Technology (Beijing) Inner Mongolia Research Institute, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 4. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Mine water is both a valuable water resource of strategic significance and a significant hidden disaster factor. Its scientific protection and efficient utilization are crucial for ensuring coal mine safety production, promoting green and low-carbon transformation of the coal industry, and contributing to the national carbon peaking and carbon neutrality goals. Based on the demand for high-quality

收稿日期：2025-03-23；**修回日期：**2025-04-20

通讯作者：*高俊莲，中国矿业大学（北京）管理学院副教授，研究方向为能源与环境智能决策；E-mail: junliangao@cumtb.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“黄河流域矿井水全生命周期保护与资源化综合利用战略研究”(2024-XZ-90)；国家自然科学基金项目(72404270)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

development in China's coal industry, this study focuses on the protection and utilization of coal mine water across its full life cycle. From the perspective of systems engineering, it clarifies the implications of full life-cycle management of mine water, namely, the comprehensive management model of "source reduction, process detoxification, end-stage resource recovery, and terminal reinjection," coordinating the entire process of mine water generation, migration, utilization, and recycling. By analyzing the current development status of protection and utilization technologies for mine water in China's coal mines across the four key stages, this study identifies key challenges such as lack of technological innovation, incomplete market mechanisms, and deficiency of well-established policy frameworks and technical standards. On this basis, a strategic framework for mine water resource protection and utilization is established, guided by resource, industrial, and ecological strategies. It proposes a governance approach of source control for efficiency enhancement, treatment processes for quality improvement, comprehensive reuse for value increment, and terminal disposal for environmental capacity expansion. Additionally, five major engineering systems are systematically deployed: core technology breakthroughs, full-chain demonstrations, market-oriented production–use synergy, ecological safety support, and intelligent management platform development. This forms a coordinated promotion pattern driven by technological innovation, supported by engineering construction, secured by market operations, safeguarded by ecological safety, and empowered by smart management. Furthermore, development suggestions are proposed, including constructing a modern governance system, achieving breakthroughs in core technologies, promoting industrial transformation and upgrading, improving standard evaluation systems, and strengthening collaborative governance mechanisms. These suggestions provide a systematic solution to support the coal industry's green transition and facilitate the transformation of mine water management from "wastewater management" to "strategic water resource utilization."

Keywords: mine water; lifecycle management; source reduction; process detoxification; end-stage resource recovery; terminal reinjection

一、前言

随着我国能源结构的持续优化调整和绿色低碳发展战略的深入实施，煤炭作为保障国家能源安全的“压舱石”，其开发利用面临着提升资源效率与强化生态保护的双重任务。在这一背景下，矿井水作为煤炭开采过程中的伴生资源，既是主要隐蔽致灾因素之一[1,2]，又是可开发和利用的重要非常规水源。在碳达峰、碳中和战略目标的驱动下，煤炭行业正面临前所未有的低碳转型压力。矿井水全生命周期的保护与高效利用，不仅是解决水资源短缺与环境污染问题的重要途径，也是推动煤炭行业降低碳排放、实现绿色转型的关键依托。系统优化矿井水管理，在提升水资源利用效率的同时，可以显著增强碳减排的协同效益，为矿区生态修复和行业可持续发展提供有力支撑[3]。

近年来，我国矿井水保护与利用政策体系持续完善，聚焦高效利用与生态保护双重目标，形成了多层次的政策框架。2021年，我国施行《地下水管理条例》，要求强化超采区治理，通过节水、水源置换等措施实现采补平衡，对矿井水管理提出了间接约束。本研究团队参与制定的《关于加强矿井水保护和利用的指导意见》（简称《指导意见》），于2024年由国家发展和改革员会等八部门联合发布；《指导意见》明确提出，2025年基本建立政策体系和市场机制，黄河流域矿井水利用率力争达68%以上，并推动分质处理、综合利用及市场定价机制创新。在地方层面，内蒙古等省份提出了非常规水源利用量目标，积极推进工业节水改造。尽管我国初步建立了矿井水资源保护和利用的政策标准和管理体系，但仍存在诸多亟待解决的问题，如法规标准不健全、管理职能交叉、超采地下水现象屡禁不止、水资源保护与开发缺乏统筹、矿井水利用率不高、矿区水生态系统退化等。据统计，全国煤矿平均富水系数地区间差异较大[4]，吨煤开采导致的地下水破坏量远大于矿井水的产生量。目前，全国矿井水综合利用率长期不足50%，究其根源是我国矿井水管理主要侧重于治理和达标排放[5~7]。传统末端治理模式存在系统性缺陷，全生命周期技术链断层等问题严重制约矿井水从“被动防控”向“资源化利用”的转型升级。进一步突破传统末端治理思维，构建覆盖矿井水全生命周期保护与利用的发展战略，成为推动绿色矿山建设、发展水资源循环经济的迫切课题。

目前，有关矿井水保护与利用的研究多聚焦于单一环节或技术层面，如在源头减量方面的保水开采技术[8,9]、特定方案设计[10]以及水资源属性开发等[11~13]，矿井水处理方面的水质净化处理[14,15]、绿色处理[16]、智能化处理[17]等技术，矿井水资源化利用的梯级利用[18,19]，矿井水回灌方面的理论和应用实践研究相对较弱[20]等，缺乏开展煤矿矿井水开发和利用的综合解决方案[21,22]，未能从全生命周期和系统工程视角构建矿井水保护与利用的战略框架。基于此，本文阐释矿井水全生命周期保护和利用的科学内涵，系统分析我国矿井水保护和利用现状及面

临的挑战。在此基础上，深入探讨矿井水全生命周期保护和利用的战略体系构建，从技术创新、示范引领、市场运营、生态修复、智慧管理等维度提出系统性解决方案，为推动矿井水由废水管理向战略性水资源转变、实现煤炭行业绿色高质量发展提供决策参考。

二、煤矿矿井水全生命周期保护和利用的内涵

从水资源管理的角度，本研究关注矿井水“产生–运移–利用–循环”的全生命周期过程，而非煤矿开采活动的全生命周期（勘探–建设–生产–闭坑）。因此，本研究所探讨的煤矿矿井水全生命周期聚焦生产矿井的矿井水管理过程，即从矿井水产生到最终利用处置的全过程。需要特别指出的是，闭坑矿井水管理是煤矿开发全生命周期中的重要环节，但是考虑到闭坑矿井水管理的特殊性和复杂性，其全生命周期的管理可成为一个独立且复杂的研究领域[23]，需要专门的研究框架和技术体系，故本研究未将其纳入讨论范围。矿井水及相关概念是界定煤矿矿井水全生命周期保护和利用内涵的基础。矿井水在不同领域、不同标准中的定义和内涵存在差异，导致相关研究和实践对矿井水存在认知模糊、混淆等问题，不利于精准把握矿井水的特性和应用潜力，也制约了矿井水保护与利用方式的系统优化。

通过梳理现有标准和规范中关于矿井水及其相关概念的定义（见表1），可以发现：① 在概念属性方面，矿井水、矿井涌水、疏干（降）水等概念存在混用[24,25]。矿井水为静态存量概念，矿井涌水和疏干（降）水则体现的是动态流量。② 各标准或规范在水体来源界定方面存在显著差异。对矿井水来源的界定不一，部分纳入地表渗透水和生产排水，部分仅限于井下抽排水；对矿井涌水的理解也有差异，既有广义流入水，也有聚焦于具有规律性充水因素的狭义定义。本研究认为，从水源维度看，煤矿矿井水应涵盖所有与矿井开采相关的水体，包括地下涌水（正常涌水和突水）、地表渗透水（正常渗透和倒灌）、井下生产用水（采矿作业过程中产生的各类用水）、疏干（降）排水（为保证安全开采而主动抽排的地下水）。

表1　矿井水相关术语及定义汇总

术语	定义	来源
疏干排水	对含水介质进行疏干	《水资源术语》（GB/T 30943—2014）
矿井（坑）水	汇集于采场、巷道内的水体	《水文地质术语》（GB/T 14157—2023）
疏干工程排水量	在规定的疏干时间内，将一定范围内的水位降到某一规定标高时，所需的疏干排水强度	《水文地质术语》（GB/T 14157—2023）
矿井（坑）涌水量	矿山在开拓及开采过程中，单位时间内流入矿坑（包括井、巷和开采系统）的水量	《水文地质术语》（GB/T 14157—2023）
矿井（坑）涌水量	有变化规律的充水因素（不含井巷突水、地表水倒灌等）所形成的矿井（坑）涌水量	《矿区水文地质工程地质勘查规范》（GB/T 12719—2021）
矿井水	在矿山建设和开采过程中，由地下涌水、地表渗透水、生产排水汇集所产生的水	《矿井水综合利用技术导则》（GB/T 41019—2021）
煤矿矿井水	在煤矿建井和煤炭开采过程中，由地下涌水、地表渗透水、井下生产排水（防尘、灌浆、设备冷却等外排水）汇集所产生的水	《煤矿矿井水分类》（GB/T 19223—2015）、《煤矿矿井水利用技术导则》（GB/T 31392—2022）
矿井水	在煤矿建设和煤炭开采过程中产生并从井下抽排到地面的水，包括井下涌水、井下生产过程中产生的废水	《环境影响评价技术导则 煤炭采选工程》（HJ 619—2011）
露天煤矿疏干水	在露天煤矿剥离和开采过程中（或提前），产生的煤矿排水	《环境影响评价技术导则 煤炭采选工程》（HJ 619—2011）
露天煤矿矿坑水	在露天煤矿剥离和开采过程中，由地下涌入或地表汇入采矿坑内的积水	《环境影响评价技术导则 煤炭采选工程》（HJ 619—2011）

矿井水全生命周期保护和利用的思想是本研究团队早期提出的煤–水–热多资源协调开发理念在水资源维度的具体体现[26~29,13]。煤–水–热多资源协调开发理念是基于矿区资源系统的整体性和关联性，运用系统工程方法，统筹考虑煤炭资源开采与水资源、地热能开发以及其他伴生资源利用等，从而开展多种资源的协同开发与综合利用，最终实现资源效益最大化和生态影响最小化目标。其中，水资源作为连接煤炭开采和地热能利用的重要纽带，其科学管理直接影响多资源协调开发的整体效果。基于此，开展矿井水全生命周期的保护和利用的管理思路探讨，可为实现多资源协调开发提供水资源维度的系统解决方案。

经过长期实践探索，本研究团队提出了集矿井地下水控制、处理、利用、回灌与生态保护于一体的“五位一体”管理模式，构建了涵盖源头、过程、末尾与终端的矿井水全流程管理体系[27,30]，初步形成了矿井水全生命周期保护与利用的理论雏形和顶层设计，并为后续提出的源头减量化、过程无害化、末尾资源化、终端回灌化（“四化”）理念奠定了基础。本研究从时空维度进一步界定了矿井水全生命周期保护与利用的内涵（见图1）。矿井水全生命周期保护与利用可以划分为6个阶段：源头阶段、形成阶段、处理阶段、利用阶段、回灌阶段和生态循环阶段，充分展现了矿井水从自然水体向非常规水资源转化，再回归自然循环的过程。矿井水全生命周期保护与利用各阶段的管理重点与“四化”理念高度契合：源头与形成阶段注重灾害预测防控与扰动最小化，实现源头减量化；处理阶段采用分质分级策略，确保过程无害化；利用阶段推动资源多元化开发，实现末尾资源化；回灌阶段通过工程手段科学补给，达成终端回灌化，有助于区域水文地质平衡和生态修复。

我国煤矿矿井水全生命周期保护和利用“四化”理念的落地实施可以显著促进矿井水资源管理与碳减排协同发展，为实现“双碳”目标提供重要支撑。源头减量化通过减少矿井涌水量，直接降低抽排及处理环节的能源消耗与碳排放；过程无害化通过采用低能耗技术和可再生能源供能，可以有效降低水处理碳足迹；末尾资源化通过用矿井水替代常规水资源，可以减少传统水资源开发带来的碳排放，并通过生态修复增强区域碳汇；终端回灌化在维持地下水位平衡、减少生态碳汇损失的同时，于特定地质条件下促进CO_2地质封存与碳酸盐矿物沉淀，实现碳的长期固定[31]。需要特别指出的是，我国煤矿地质及水文地质条件极为复杂，不同煤矿区的矿井水特征存在显著差异[22,32]。因此，本研究提出的“四化”综合治理模式在实际应用中应充分考虑区域特征，进行差异化调整和实施，如在不同的煤矿区可能需要侧重不同的治理环节，甚至并非所有环节都需要进行同等程度的实施。

三、我国煤矿矿井水全生命周期保护与利用的现状和挑战

为全面梳理我国煤矿矿井水全生命周期保护与

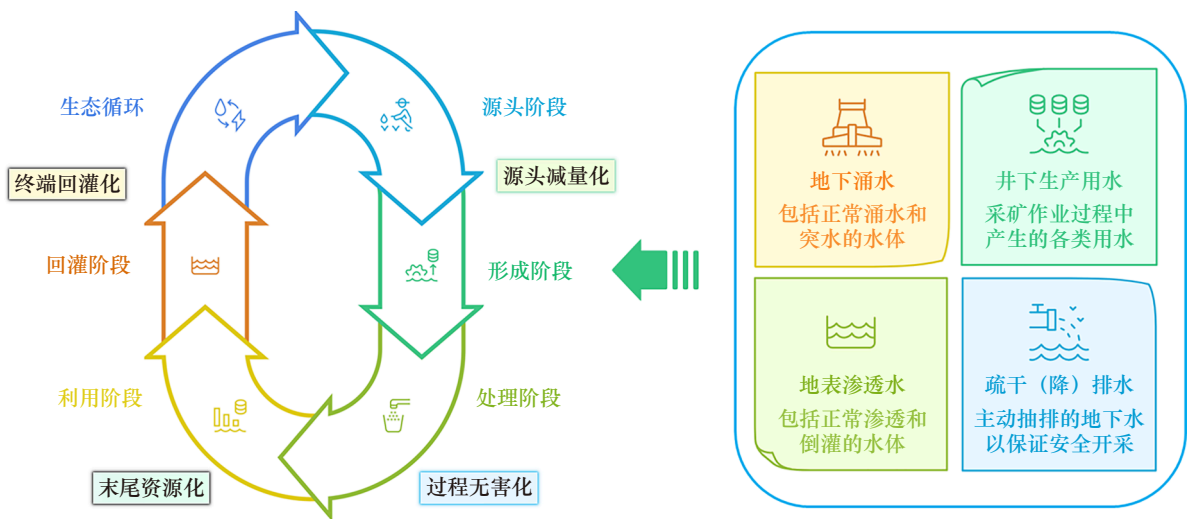

图1 煤矿矿井水全生命周期保护与利用的内涵示意图

利用各阶段的发展基础和面临的挑战，本研究以“四化”为分析框架，从技术路径、工程实践及其适应性出发，聚焦矿井水保护与利用的关键技术体系，梳理典型经验与应用实践，总结技术适用性、工程可行性与运行稳定性等，同时兼顾政策标准、产业机制与认知接受度等外部约束因素，为构建科学、可行、系统的矿井水保护与利用“四化”路径提供基础。

（一）源头减量化

1. 发展现状

我国矿井水源头减量化经历了理念与实践的持续演进。早期，煤矿矿井水以灾害治理为主，将其视为采矿过程中的灾害性因素；2000年以来，随着“三位一体”“五位一体”构想的提出[26,30]，开始关注矿井水的资源属性[33]，通过限高开采、充填技术以实现狭义保水开采，这标志着矿井水源头减量化由理念向实践转变。随后进入广义保水阶段，主要是加固、再造或新建关键隔水层的堵截法和地表径流疏导的疏导法，提高资源开发效率。这一技术演进过程展现了从单一治理向系统管理、从被动应对向主动协同的转变，推动了矿井水资源利用效率的整体提升。

目前，矿井水源头减量化技术体系以“地质适配性”为核心，覆盖“地质评估–工艺优化–工程防控–监测预警”全链条技术框架[34]（见图2）。其中，地质保障技术通过水文地质精细勘探和采煤对含（隔）水层扰动评价[35~37]，为源头减量提供基础性支撑[38,39]。开采工艺优化技术以限高开采、减小工作面斜长和充填开采等为核心，从根本上控制采动扰动范围[9,38,40]。工程防控技术主要依托地面和井下注浆封堵或地下连续隔水墙等措施[41]，实现关键部位的水力阻隔：采前在垂直方向可对充水含水层侧向帷幕截流，在水平方向预注浆实现隔水层加固与含

图2　矿井水源头减量化技术体系及应用实例

水层改造；采后注浆则针对阻水能力劣化的隔水层进行隔水层再造修复，对“原生天窗”进行隔水层新建[42]，并可对采动覆岩离层实施注浆充填[43]。此外，采前通过使用局部轻微爆破松散或注水软化等煤层覆岩地质塑性化处理技术，可减轻导水冒裂带发育高度。在超前水体保护方面，超前疏放水技术可实现关键区域水力疏导[12]，同时可以通过地表径流疏导、河底防渗及地下水截取补给等措施预先保护可能受影响的水体。最后，智能监测预警技术融合涌（突）水实时监测与导水裂隙带发育高度预测，构建动态风险防控体系[44,45]，形成从评估到实施再到监测的闭环管理模式。

2. 面临的挑战

（1）技术方案普适性不足

煤矿区水文地质条件的复杂多样性严重制约了源头减量化技术的推广应用。不同煤矿区的含水层特征存在显著差异[39]，导致现有源头减量化技术难以形成标准化解决方案，进而增加了技术方案的设计成本、延长了实施周期。因此，针对不同类型的煤矿区，开发适用性强、可推广的减量化技术方案，是当前矿井水源头减量面临的重要挑战[34]。

（2）安全生产与保水目标平衡难度大

矿井水源头减量化与安全生产的部分场景存在技术矛盾。以富水煤层开采为例，顶板承压水疏放会显著改变煤岩应力分布状态，可能诱发煤与瓦斯突出等动力灾害。虽然数值模拟技术为应力变化预测提供了技术支撑，但在实际应用时，在确保安全生产的前提下实现保水目标，仍是矿井水源头减量面临的重大挑战。特别是对于排水边界应力与富水异常区角度关系的精准控制问题，需要在安全与保水目标之间寻求最优平衡点[46]。

（3）经济效益与环境保护的平衡难度大

矿井水源头减量在技术实施过程中存在显著的经济性制约。一方面，技术的应用显著提升了煤炭开采的环境友好性，有效保护了水资源与生态环境；另一方面，相关技术的实施带来了成本增加和产能下降等经济性问题。例如，充填保水开采技术的应用导致部分矿区每吨煤的开采成本增加约100 元[9,44]。在保护水资源环境和维持煤炭生产经济性之间寻求最优平衡点，构建兼顾生态效益和经济效益的技术应用模式，是源头减量技术推广面临的重要挑战。

（二）过程无害化

1. 发展现状

矿井水过程无害化处理是实现矿井水资源有效利用和保护的重要途径。通过无害化处理，矿井水中的有害物质被有效去除，水质得到提升，从而能够广泛应用于农业灌溉、工业生产、生态补水等领域，实现水资源的多元化利用。聚焦水质特征与处理技术的适配性，可以将矿井水分为洁净水、含悬浮物水、高矿化度水、酸性水和含特殊污染物水5类。接下来，将针对这5类矿井水无害化处理的发展现状进行分析（见图3）。

（1）洁净矿井水处理

洁净矿井水指在煤矿开采过程中，自然的地下水（如奥陶系灰岩水、石炭系灰岩水等）未受到工业污染，具有水质良好、pH 呈中性、矿化度低且通常不含有毒有害物质等特征。这类矿井水通过简单的消毒处理后即可作为生活、生产用水，必要时可进行混凝沉淀、过滤处理[29,47]。

（2）含悬浮物矿井水处理

目前，在我国北方重点国有煤矿区，含悬浮物矿井水的 pH 多呈中性、矿化度较低[48]，在总排水量中占主导地位（约占 60%）[49]。近年来，针对含悬浮物矿井水处理，我国逐步构建了一套系统的技术体系，涵盖从传统物理化学处理到先进膜分离的多维度处理技术[7]。

高悬浮物矿井水处理工艺有传统的“混凝–沉淀–过滤”工艺、“多级沉淀+过滤”工艺以及直滤工艺。传统工艺存在能耗高、占地面积大、膜污染[50]等问题，亟需进行技术升级和优化[51]。具体来看，在传统混凝技术方面，发展了重介质混凝沉淀技术[52]，包括瓷砂混凝工艺（利用高效旋流器回收再利用瓷砂）、磁混凝（通过磁鼓回收再利用磁种）以及超磁分离（减少了斜板（管）沉淀池）。在沉淀技术方面，相关研究关注了生物因素（如鱼类）对沉淀过程的影响，并发现在鱼类群落结构稳定且浮游生物食性鱼类比例适当时，沉淀池的沉淀效率会更高[53]。另外，地下水库利用破碎煤岩体的吸附作用，显著降低出水悬浮固体含量[54]。在过滤技术方面，近年来，膜分离技术实现了新的突破和升级。柔性陶瓷膜和无机陶瓷膜在采空区“多级沉淀+过滤”技术中得到应用，但受进水质量限制和出水水质不稳定因素影响，应用场景受限。在直滤

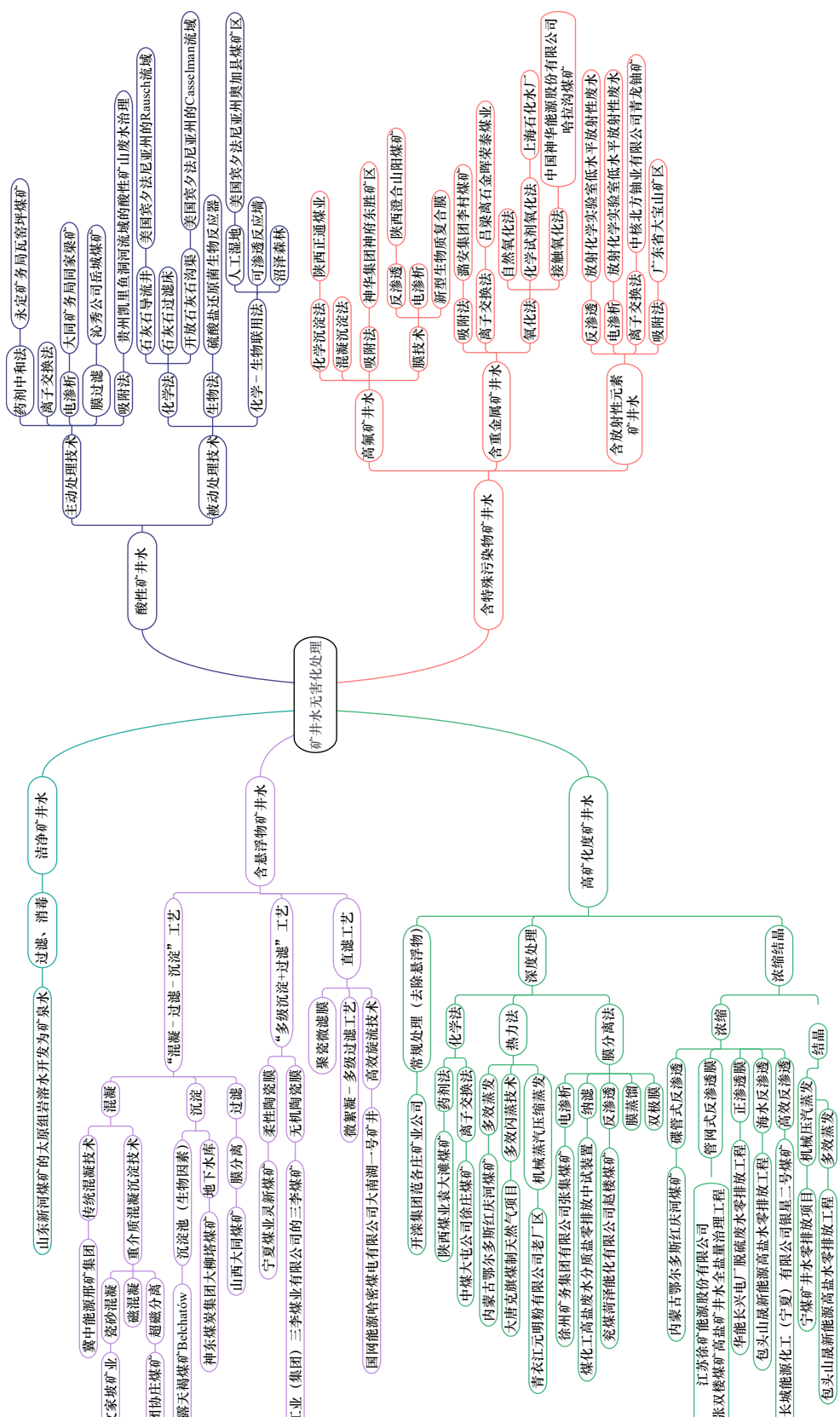

图 3　矿井水过程无害化处理技术体系及应用实例

技术方面，聚瓷微滤膜可直接截留悬浮颗粒且无需投加药剂，可取代“混凝沉淀–过滤–超滤”[16]。此外，微絮凝–多级过滤工艺将传统“混凝–沉淀–过滤”三级工艺简化为一级微絮凝过滤工艺，显著降低了处理时间[55]。高效旋流技术则利用离心力分离高浓度煤粉与岩粉，代替了传统的“混凝–沉淀–过滤”处理工艺[49]。

（3）高矿化度矿井水处理

在我国干旱半干旱区，特别是陕西、甘肃、宁夏、新疆、内蒙古等西北地区，以及山西、河南、两淮地区等的传统煤炭基地，高矿化度矿井水分布广泛[48]。依据《高矿化度矿井水处理与回用技术导则》（GB/T 37758—2019），高矿化度矿井水一般按照分级处理方式回用，优先将矿化度要求较低的应用场景纳入再利用体系，如煤炭分选、井下消防、降尘用水和景观用水均可采用常规处理，其他用途需要采用深度处理，若达到零排放的标准，还需要进行浓缩结晶处理[56]。常规处理对含盐量无限制要求，以去除悬浮物为目的；深度处理工艺以除盐为核心；浓缩结晶是对浓盐水的后处理，使盐分结晶固化，达到零排放。

高矿化度矿井水深度处理按照原理不同，可以分为化学法、热力法和膜分离法[49]。其中，药剂法和离子交换法是化学法的常用方法，离子交换法适用于盐质量浓度低于 500 mg/L 的矿井水。热力法主要包括多效蒸发、多效闪蒸和机械蒸汽压缩蒸发等技术[57]。常用的膜分离法包括电渗析、纳滤膜、反渗透、双极膜和膜蒸馏。新型电渗析已发展出选择性电渗析、置换渗析和发电渗析等技术形式[58]。在实际应用中，反渗透电耗较高。纳滤膜可根据需求，灵活选择不同的脱盐率膜以满足节能要求。双极膜技术通过将低附加值的盐转化为高附加值的酸碱，实现了工艺链的价值延伸[59]。膜蒸馏是以疏水膜两侧蒸汽压力差为驱动力的分离技术，具有脱盐率高、成本低、操作简单等优势。电芬顿–膜蒸馏耦合可以利用电化学氧化降解难处理有机物（如酚类），同时通过膜蒸馏回收高纯度水，适用于高盐且含有机污染物的矿井水[60]。

在浓缩处理方面，主要采用碟管式反渗透膜、管网式反渗透膜、正渗透膜等不同构型的膜组件[56]。在结晶方面，我国应用较为广泛的方法是机械蒸汽压缩、多效蒸发结晶技术[61]。

（4）酸性矿井水处理

酸性矿井水主要集中在南方省份，这与高硫煤层的开采密切相关，这种分布特征与德国、美国等煤炭开采国家具有相似性[48]。其处理技术体系主要包括主动处理技术和被动处理技术，两者在技术原理、适用条件及成本投入上存在显著差异[49]。主动处理技术依赖设备设施和持续的人工维护，包括药剂中和法、离子交换法、吸附法（壳粉、生物炭以及黏土吸附材料等）、电渗析法和膜过滤法等，虽然处理效果显著但运营成本较高[62]。相较之下，被动处理技术通过自然界的化学及生物反应，在低维护条件下实现矿井水的自净化，可分为化学法（如石灰石导流井、石灰石过滤床及开放石灰石沟渠等）、生物法（如硫酸盐还原菌生物反应器[63]）和化学–生物联用法（如人工湿地、可渗透反应墙、沼泽森林等）。其中，人工湿地作为最具发展潜力的被动处理技术，广泛应用于低成本酸性矿井水治理。类似人工湿地，沼泽森林可以进一步降低成本，利用天然有机废物，减少化学品的使用[64]。酸性矿井水中蕴含的硫酸、金属和稀土元素等具有资源化利用潜力。目前运用综合性技术，集成预氧化、铁还原、碱调节生物矿化、石灰石中和等多个步骤，可以回收铁和硫元素[65]。在实现水资源回用的同时，未来通过开发经济可行且环境友好的其他资源提取技术，可进一步提升酸性矿井水治理的综合效益。

（5）含特殊污染物的矿井水处理

矿井水污染物种类复杂，其中高氟、重金属、放射性元素等特殊污染物因其显著的环境危害性和生物毒性，成为矿井水处理领域的重点与难点问题。

高氟矿井水的处理方法包括化学沉淀法、混凝沉淀法、吸附法、膜技术法等[49]。其中，吸附法因效果明显、成本较低，是现场广泛应用的方法，吸附材料如活性炭、生物炭、沸石等较为成熟，但稳定性较差。近年来，改性羟基磷灰石因其生物兼容性强、吸附容量大，成为研究热点。此外，膜技术（如反渗透和电渗析）对氟离子去除率能达到 90% 以上，新型生物质复合膜可以提高对氟化物的吸附能力[66]，但处理成本较高。在处理高氟矿井水时，需要考虑到放射性物质的存在。通过水热法制备的氧化镁–二氧化硅–氟化物共掺杂羟基磷灰石复合材料，可以提高含氟矿井水处理过程中对铀的吸附

能力[67]。此外，还可以通过去铁酮配体络合从含氟矿井水中高效回收铀[68]。

含重金属的矿井水主要是含铁锰矿井水，处理技术主要有自然氧化法、化学试剂氧化法、接触氧化法、吸附和离子交换等。

含放射性元素矿井水主要源于煤层中的天然铀、钍、镭等放射性元素及其衰变产物，表现为总α、β放射性超标。为防止泄漏风险，可采用反渗透、电渗析、离子交换法、吸附法等工艺处理，但传统工艺普遍存在处理成本高、放射性污泥处置困难等技术瓶颈。同时，由于环保监管要求尚未完全到位，相关处理技术的工程应用相对滞后。

2. 面临的挑战

（1）水质复杂性增加

矿井水水质复杂化与多元化趋势日益凸显。随着煤炭资源开采向深部延伸，地下水文地质条件更趋复杂，导致矿井水的矿化度呈显著上升趋势，同时伴生的特殊污染物（如氟化物、重金属等）含量也不断攀升。此外，受区域地质构造、含水层特征、采矿工艺等多重因素影响，不同矿区矿井水的水质特征呈现出明显的异质性和动态变化特征。这种水质的多样性和复杂性对处理工艺的适应性、选择性提出了更高要求，也为技术创新和工艺优化带来了新的挑战。特别是在面对多组分协同处理时，传统单一处理工艺的局限性日益突出，亟需发展兼具高效性和针对性的综合处理技术体系。

（2）处理成本高昂

在含悬浮物矿井水处理方面，传统的地面处理工艺不仅需要大量场地，还涉及双向输送环节，导致能耗和运行成本显著提升。在高矿化度和高氟矿井水处理方面，尤其是在我国西北部矿区，主流处理工艺如反渗透、纳滤等膜处理技术以及多级闪蒸、机械蒸汽压缩等蒸发结晶工艺均存在投资成本高、运行费用高等问题，同时衍生的浓盐水和固体危废处置难题进一步加剧了经济负担。此外，我国西南地区（特别是云南和贵州）的酸性矿井水治理也面临类似困境，由于当地煤矿多为小型矿区，涌水量较小，采用主动处理技术所需的基础设施投入、后续维护成本与矿区规模不相匹配。随着矿井水外排标准的提升，进一步加大了成本投入，增加了煤矿企业的经营负担[49]。

（3）技术成熟度不高

现有处理工艺以传统的混凝沉淀、化学氧化除铁除锰等技术为主，普遍面临污泥产量大等问题；在工程实践中，面临基础设施如调节池的预沉效果不理想、一体化净水设备性能参差不齐，工程质量控制亟待规范等挑战。虽然膜蒸馏和低温多效蒸发等新兴技术在高矿化度矿井水处理方面展现出一定的应用潜力，但相关研究在深度和工程实践经验方面仍显不足。同时，设备选型与运行管理也面临诸多挑战，如滤料堵塞导致维护成本增加，井下处理所需的空间利用、安全防爆、自动控制等技术难题。在膜处理技术领域，我国高品质纳滤膜的研发与制造相对滞后，关键材料仍主要依赖进口，且在工程应用方面积累不足，高性能膜材料的自主创新和工程化应用亟需突破[7]。

（三）末尾资源化

煤矿矿井水具有多元化的属性特征，应用潜力广阔。从资源属性角度看，矿井水可以作为重要的水资源替代品用于工农业生产和生活用水等多个领域；从生态和环境属性看，经处理的矿井水排放后，可有效改善区域水环境质量，促进矿区生态系统的修复与重建。此外，矿井水还具备显著的能源和医疗价值：通过热泵技术可将其转化为可再生地热能源[13,69,70]；而富含特定矿物质（如锶、硒、偏硅酸盐等）的矿井水则可开发为矿泉饮用水，有助于提升人体健康[5]；高温、富含特殊组分的矿井水，可以用于医疗康养，为治疗慢性病和皮肤病等提供新途径[71]。煤矿矿井水的多元化属性特征使矿井水的综合利用具有显著的社会、经济和环境效益，为实现矿区水资源的可持续利用提供了重要方向。

1. 发展现状

矿井水的利用主要集中在工业和生态领域，约占90%的利用份额；而在农业和生活方面，由于水质要求较高、处理成本较大，其应用比例相对较低；部分矿井水还可进行热能利用，但整体占比有限[72]。现有矿井水的资源化利用方式如图4所示。

（1）工业用水

矿井水的工业利用主要遵循“井下–地面”处理与就地复用的原则，充分利用煤矿开采过程中形成的特殊地下空间，如采空区及基于采空区构建的地下水库，实现矿井水在井下的初步处理与直接利

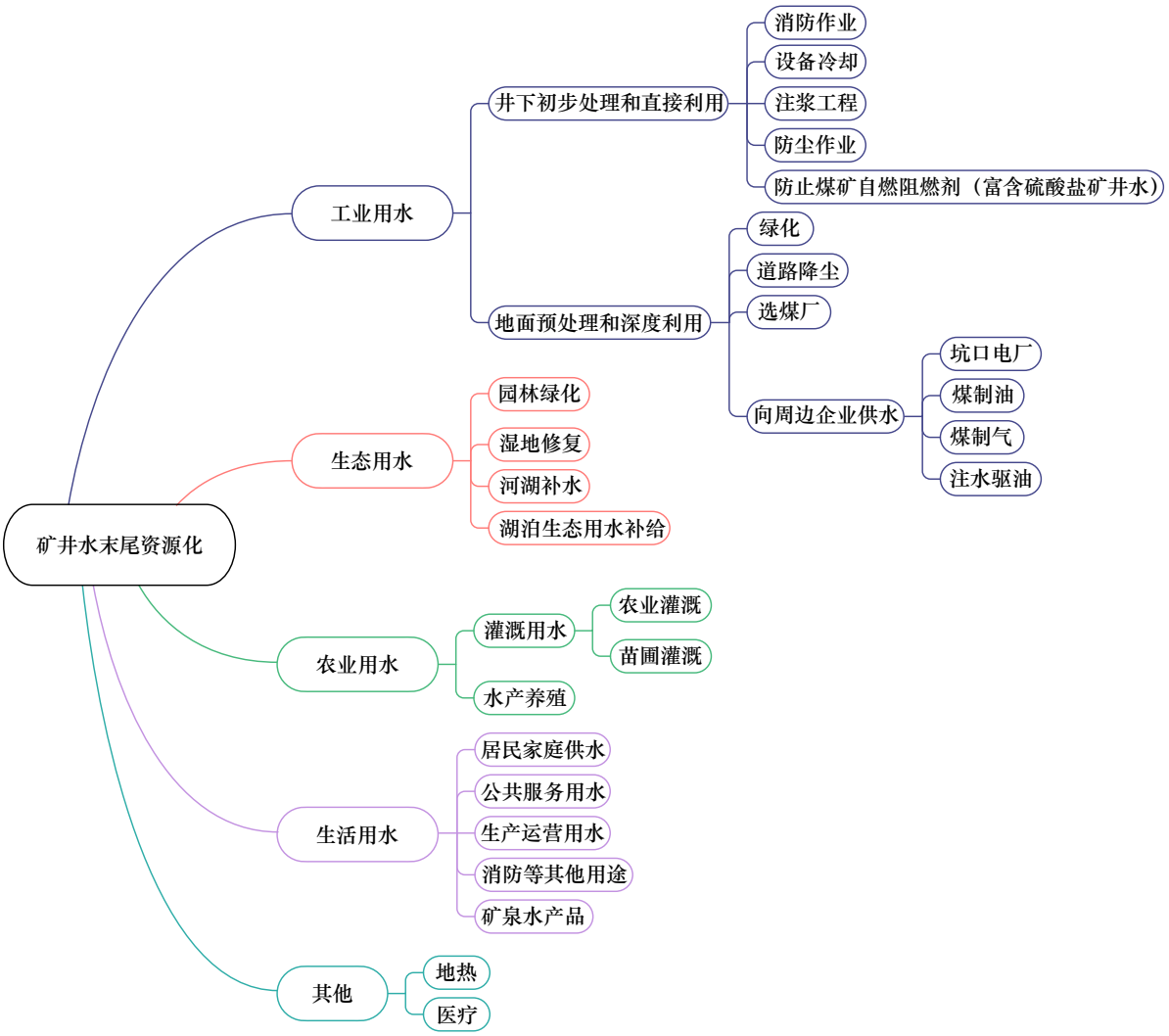

图4　矿井水末尾资源化利用的方向

用，通常用于消防作业、设备冷却、注浆工程、防尘作业等；对于井下无法完全处理的余水，则通过输送至地面，进行预处理和深度处理，以满足绿化、道路降尘、选煤厂等的用水需求[52]。在部分涌水量较大的矿井，经过工艺处理的矿井水产水量通常大于煤矿自身工业用水需求，多余水量主要通过外排输送管线向周边企业供水，如坑口电厂，煤制油、煤制气及注水驱油等项目[18]。例如，滇东白龙山煤矿通过将处理后的矿井水分别用于煤矿生产及燃煤机组循环补水，实现了矿井水的资源化利用与零排放目标[73]。近年来，矿井水的工业应用领域不断拓展，如富含硫酸盐的矿井水可作为防止煤矿自燃的阻燃剂，为矿井水资源化利用开辟了新的途径[74]。

（2）生态用水

在天然水资源相对匮乏的地区，经过适当处理后的煤矿矿井水可达到地表水环境质量标准，应用于园林绿化、湿地修复和河湖补水等生态工程。例如，位于毛乌素沙漠地区的神府–东胜矿区通过采用煤矿地下水库净化技术，为矿区提供了 339 km^2 的生态治理恢复用水，并建立了采空沉陷区沙棘生态修复示范基地，有效改善了区域生态环境[49]。此外，还可以将处理后的矿井水用于湖泊生态用水补给，进一步改善脆弱的湖泊生态环境[75]。

（3）农业用水

经过适当处理，矿井水在确保水质达到农业灌溉标准后可以用作灌溉水源，并在国内外农业用水领域广泛应用。葡萄牙圣佩德罗–达科瓦废弃煤矿矿井水中的铁、锰及其他污染物含量偏高，经处理后可用于农业灌溉[76]；孟加拉国 Barapukuria 煤矿对地下巷道水进行了长达 13 年的评估，结果表明，尽

管水体因岩石风化和蒸发等自然过程影响含有少量镁离子，但整体水质仍满足农业灌溉需求[77]；澳大利亚昆士兰州成功应用处理后的矿井水进行农业灌溉，并建议将其重新注入农业含水层[78]，以实现水资源的公平利用和经济效益提升；我国内蒙古乌兰木伦煤矿成功将处理的矿井水用于苗圃灌溉[79]。此外，矿井水在水产养殖领域也有应用，如美国西弗吉尼亚州、马里兰州和宾夕法尼亚州等地区，已有商业机构利用矿井水养殖虹鳟鱼和北极红点鲑[80]。

（4）生活用水

在矿井水生活利用方面，国外的相关研究起步较早，国内相关探索则相对滞后。生活用水主要涵盖居民家庭供水、公共服务用水、生产运营用水、消防用水等用途。对于低矿化度且含有悬浮物的矿井水，因其处理成本低、排污费用较少，经适当处理后可直接满足生活用水需求；而对于富含有益微量元素的低矿化度矿井水或弱碱性小分子团水，则可开发为矿泉水产品，如阜新矿业（集团）有限责任公司的桶装水[49]、北京“九龙山”牌和徐州“新河”牌矿泉水[48]。

2. 面临的挑战

（1）产业发展不成熟

目前，矿井水资源化利用的产业基础仍较为薄弱，缺乏统一的定价机制和交易平台、政府支持政策落实不到位以及激励措施效果有限；下游用水企业与矿井水供给方之间缺乏稳定的供需对接机制，导致市场运行效率低下。同时，相关项目由于普遍存在前期投资大、运营成本高且市场回报周期较长等问题，特别是小规模项目难以形成规模效应，综合成本居高不下，这种经济效益的不确定性进一步削弱了产业链的稳定性和抗风险能力。

（2）社会认知不足

矿井水资源化利用面临显著的社会认知挑战。受传统观念影响，公众对矿井水资源化利用的认知程度普遍不足，对其安全性和可靠性存在疑虑。这种认知障碍在生活用水领域表现得尤为突出，消费者对矿井水处理后的接受度较低，担心其水质标准和健康风险。同时，相关科普教育和示范工程的宣传力度不足，未能有效消除公众的顾虑和误解，这在很大程度上限制了矿井水资源化利用的市场空间，制约了其在更广泛领域的推广应用。

（3）利用协调机制不完善

矿井水资源化利用在实践中面临多层次协调难题。虽然已形成了“清污分流、水质处理、分级应用”的基本利用原则，以及“先井下后地面、先工业后生活和农业”的利用顺序，但在具体实施过程中仍缺乏灵活有效的协调机制。特别是在干旱半干旱区，目前尚未建立起矿井水利用与生态约束的协调机制，使矿井水资源化利用难以在经济效益和生态价值之间取得最优平衡，影响了资源利用的系统效益最大化[81]。

（四）终端回灌化

终端回灌是矿井水全生命周期管理的关键环节，主要针对由于技术、经济因素不适宜而进行常规资源化利用的矿井水[20]。适合回灌处理的矿井水主要包括4类：① 处理成本高、常规利用经济性差的高含盐矿井水，这类水体虽然技术上可处理但是经济效益低，回灌成为其合理的处置方式；② 农业灌溉淡季等需求低时段产生的季节性剩余水量，通过回灌可实现跨季节水资源调节；③ 经过资源化利用后的剩余尾水，通过回灌系统完成全生命周期的闭环管理；④ 矿井突水等紧急情况下产生的应急水源，由于瞬时水量大，常规处理系统难以及时消纳，进行回灌可以提供应急处置途径。矿井水回灌技术通过将矿井水重新注入地下含水层，实现了水资源循环利用、减少地表排放并保护地下水环境的目的。终端回灌不仅是一种水资源管理手段，更是一种生态修复方式，对于维护区域水循环平衡、防治地表沉降、保护地下水环境具有重要意义。

1. 发展现状

在矿井水回灌技术的工程实践与学术研究中，其成功实施需严格满足多重水文地质与工程约束条件。① 目标含水层的水文地质参数（如有效储水厚度、渗透系数及导水能力）需具备显著的地下水调蓄潜力，以确保回灌水体在含水层中的有效运移与储存。② 回灌水质需与含水层原生水体的地球化学相容性匹配，避免因离子交换、矿物溶解 / 沉淀等反应引发孔隙堵塞或含水层介质劣化。此外，回灌工程需通过精细化数值模拟来优化注水速率、压力及空间布局，最大限度降低对天然水动力场的扰动风险。限于技术门槛与工程复杂性，我国矿井水回

灌规模化应用案例有限[6]，仅有峰峰集团有限公司的梧桐庄矿[27,82]、河北钢铁集团的中关铁矿[83]、陕西陕煤曹家滩煤矿[84]等。此外，现有研究多聚焦于小尺度试验性回灌的可行性论证，而对长期回灌效能监测、含水层地球化学演化规律及大尺度水–岩相互作用机制的研究仍存在显著空白。矿井水终端回灌化处理技术体系如图5所示。

（1）水文地质勘察与评估

水文地质勘察与评估通过进行含水层特征分析、地下水动态监测、水化学特性评估、地质构造研究等，系统梳理矿区含水层的空间分布、厚度、渗透性、封闭性、横向连贯性、地下水位、流向及水质特征等关键参数，并对回灌工程的适宜性和潜在风险进行综合评估，为回灌工程的可行性论证提供科学依据[85]。

（2）回灌工艺设计

回灌工艺设计包括目标回灌层选择、回灌井结构设计、回灌参数优化、水质控制等关键内容。通过水文地质分析和数值模拟，可以确定最适宜的回灌层位；对渗透性不足的目标层，可以采用压裂技术改善其水文地质特性，通过高压注入压裂液形成裂隙网络以提升渗透性和储水能力；基于地质条件，优化井型选择和井身结构；综合考虑回灌流量、压力和周期等运行参数；配套建立水质预处理和监测系统，确保回灌水质满足国家相关标准要求且优于目标含水层原有水质，并辅以自动化控制和数据管理平台，从而实现回灌工程的高效、安全和可持续运行[6,86,87]。

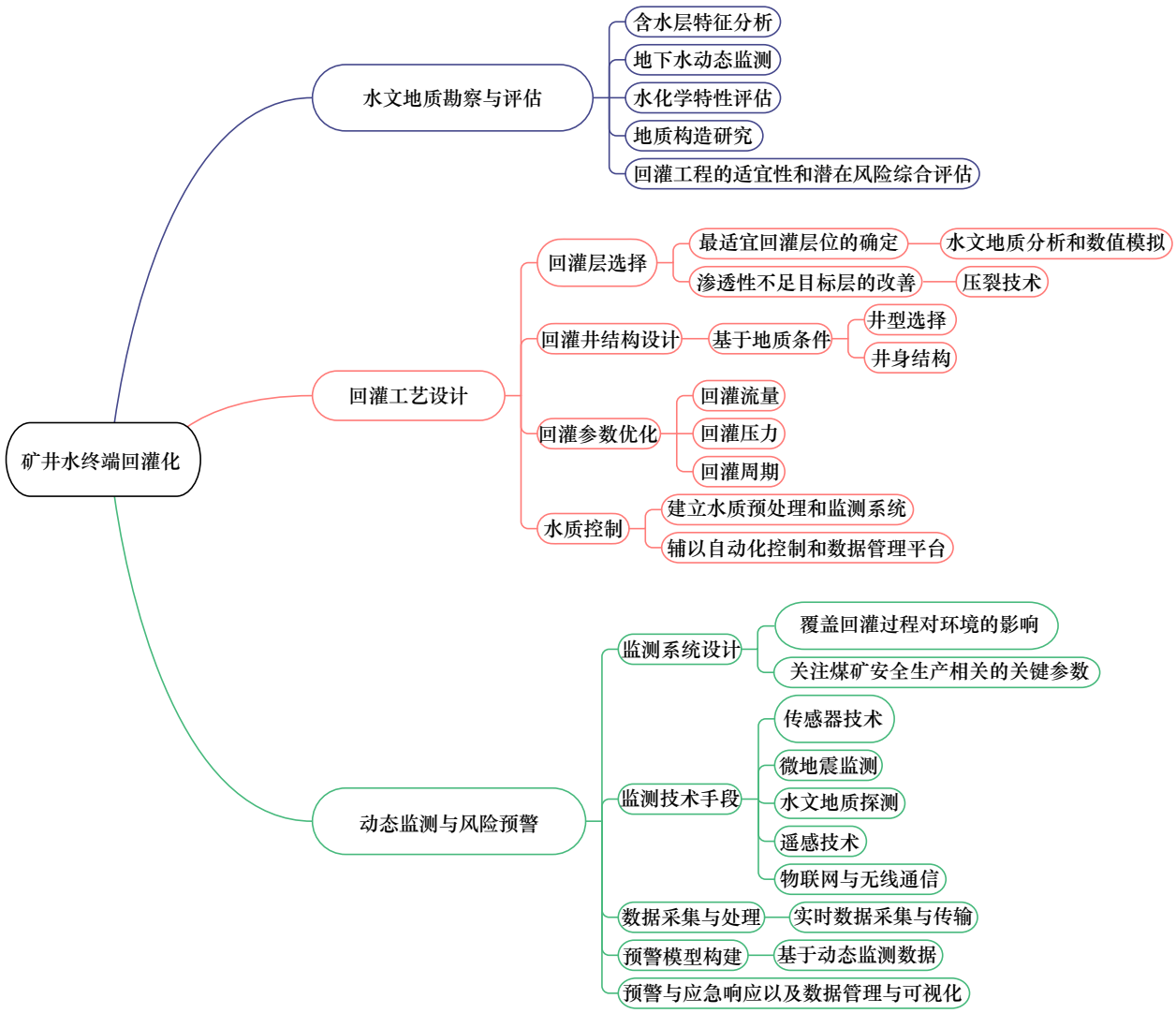

图5　矿井水终端回灌化处理技术体系

（3）动态监测与风险预警

动态监测与风险预警技术体系包括监测系统设计、监测技术手段、数据采集与处理、预警模型构建、预警与应急响应、数据管理与可视化等内容。在设计动态监测系统时，不仅要覆盖回灌过程对环境的影响，还需关注与煤矿安全生产有关的关键参数，以确保回灌不会诱发安全事故。相关监测参数通常包括地下水位与水压、水质指标、地层压力与应力、采空区水位与积水、地表沉降与形变。目前可以采用的监测技术手段包括传感器技术、微地震监测、水文地质探测、遥感技术、物联网与无线通信等，将监测设备联网，实现数据的远程传输和集中管理。动态监测数据采集与处理系统包括实时数据采集与传输，基于动态监测数据，可以构建预警模型。

2. 面临的挑战

（1）水文地质条件要求严苛

矿区地质构造多样，含水层条件千差万别，包括岩性组合、构造裂隙发育程度、水文地质参数（渗透性、储水性）、水化学特征等都存在显著差异。现有回灌技术在面对地质环境多样性时，往往表现出适应性不足。回灌目标含水层需具备高渗透性、大储水空间、稳定的地质结构，但实际矿区常面临含水层非均质性强、裂隙／孔隙连通性差等问题，导致人工压裂、增渗、增容技术的适用性与长效性不足，难以满足规模化回灌需求；在高承压含水层中，可能因回灌导致水压异常升高，增加突水风险。同时，不同地层的水化学背景差异显著，回灌水与原生地下水的混合可能引发次生化学反应，造成水质恶化或地层堵塞[88,89]。

（2）长效监测与效能评估体系缺失

现有研究多聚焦短期回灌试验，缺乏对回灌后含水层渗透性动态衰减、水质迁移转化规律及生态影响的系统性监测。多场耦合（水动力–化学–力学）作用机制尚不明确，回灌方案设计多依赖短期试验数据和经验参数，难以精准预测长期储水容量变化与环境风险[90]。这不仅会增加工程实施的不确定性，还可能带来潜在的环境或安全生产问题（如突水、地质失稳、水质污染），削弱矿井水回灌技术的可信度和推广价值。特别是在生态敏感或地质条件复杂的矿区，缺乏长期效应研究的支撑使技术应用面临较大阻力[91,92]。

（3）政策标准与技术规范缺乏

政策标准与技术规范的不完善是制约矿井水回灌技术发展的又一重要挑战。我国在政策层面强调矿井水保护与利用并重，如《煤炭行业绿色矿山建设规范》（DZ/T 0315—2018）明确要求水资源紧缺矿区矿井水利用率要达到100%[48]，但专门针对矿井水回灌的标准体系尚未建立。在水资源管理层面，《中华人民共和国水法》《取水许可和水资源费征收管理条例》对矿山疏干排水行为进行了规范；在生态环境层面，《中华人民共和国水污染防治法》对矿井水处理和排放提出了具体要求；在发展规划层面，《矿井水利用发展规划》《水污染防治行动计划》等政策文件鼓励提高矿井水利用率。然而，这些政策标准与技术规范的内容较为分散，缺乏系统性和针对性。相比之下，国际上已有相关经验可循，如2009年澳大利亚发布了基于风险管理的地下水人工回灌指南，作为其国家水质管理战略的重要组成部分[93]。我国在矿井水回灌方面仍缺乏统一的技术标准、质量控制规范和监管制度，致使在工程实践中需要参照其他领域的标准执行，难以有效指导和规范回灌工程的设计、施工和运行管理，影响了技术的规范化推广和应用。

四、我国矿井水全生命周期保护与利用的实施路径

（一）矿井水资源保护与利用的指导思想和战略定位

矿井水全生命周期保护与利用应坚持以水资源高效利用为核心，构建源头减量化、过程无害化、末尾资源化、终端回灌化的系统治理框架。通过技术创新驱动和数字智能赋能，推进矿井水分质分级处理与多层次梯级利用，建立完善的标准规范体系，创新市场发展机制，形成政府引导、企业协同、市场驱动、社会参与的多元共治格局，为煤炭行业高质量发展和生态环境保护提供水资源保障。

1. 资源战略定位

将矿井水作为重要的非常规水资源，纳入区域水资源统一配置体系。通过科学管控和合理利用，实现由矿井涌水治理向水资源开发利用的转变，推动矿井水由废水向战略性水资源的定位提升。重点发挥矿井水在缓解矿区及周边地区水资源短缺、替

代地表水和地下水开采、保障工农业生产用水等方面的战略价值。

2. 产业战略定位

将矿井水保护和利用作为推动煤炭行业绿色转型的重要依托。通过构建矿井水处理和利用产业链，培育专业化水处理服务企业，发展矿井水综合利用新业态，打造集“煤炭开采–水资源利用–生态修复”为一体的循环经济产业模式。重点发展智能化处理装备制造、水质监测技术服务、矿区生态修复等新兴产业，实现煤炭产业链的绿色延伸和价值提升。

3. 生态战略定位

将矿井水保护和利用作为维护区域水生态安全的关键举措。通过源头减量与末尾回灌，减少煤炭开采对地下水系统的扰动；通过达标处理与梯级利用，降低矿井水直接排放对地表水环境的影响；通过生态补水与湿地建设，促进矿区生态系统修复。重点强化矿井水在改善区域水环境质量、修复地下水系统、维护生态系统稳定等方面的生态功能。

（二）矿井水资源保护与利用的系统性实施路径构建

针对煤矿开采过程中的水资源问题，需树立系统观念，强化全过程治理。以源头控制提效、处理过程提质、综合回用提值、终端回灌提容为核心导向，构建贯穿矿井水“产生–运移–利用–循环”全链条的系统性治理战略，推动水治理模式向“四化融合、多维协同”升级，形成覆盖“减量–净化–升值–再生”全周期的生态文明治理路径。基于此，本研究系统构建煤矿矿井水全生命周期保护与利用战略的实施路径（见图6）。该路径以技术创新为驱动、工程建设为支撑、市场运营为保障、生态安全为目标、智慧管理为依托，形成了核心技术攻关工程、全链条示范引领工程、市场化产用协同工程、生态系统修复保障工程、智慧管理平台建设工程等五大协同推进的重点工程。

1. 核心技术攻关工程

聚焦矿井水治理的技术瓶颈，突破源头减量化、过程无害化、末尾资源化和终端回灌化等关键

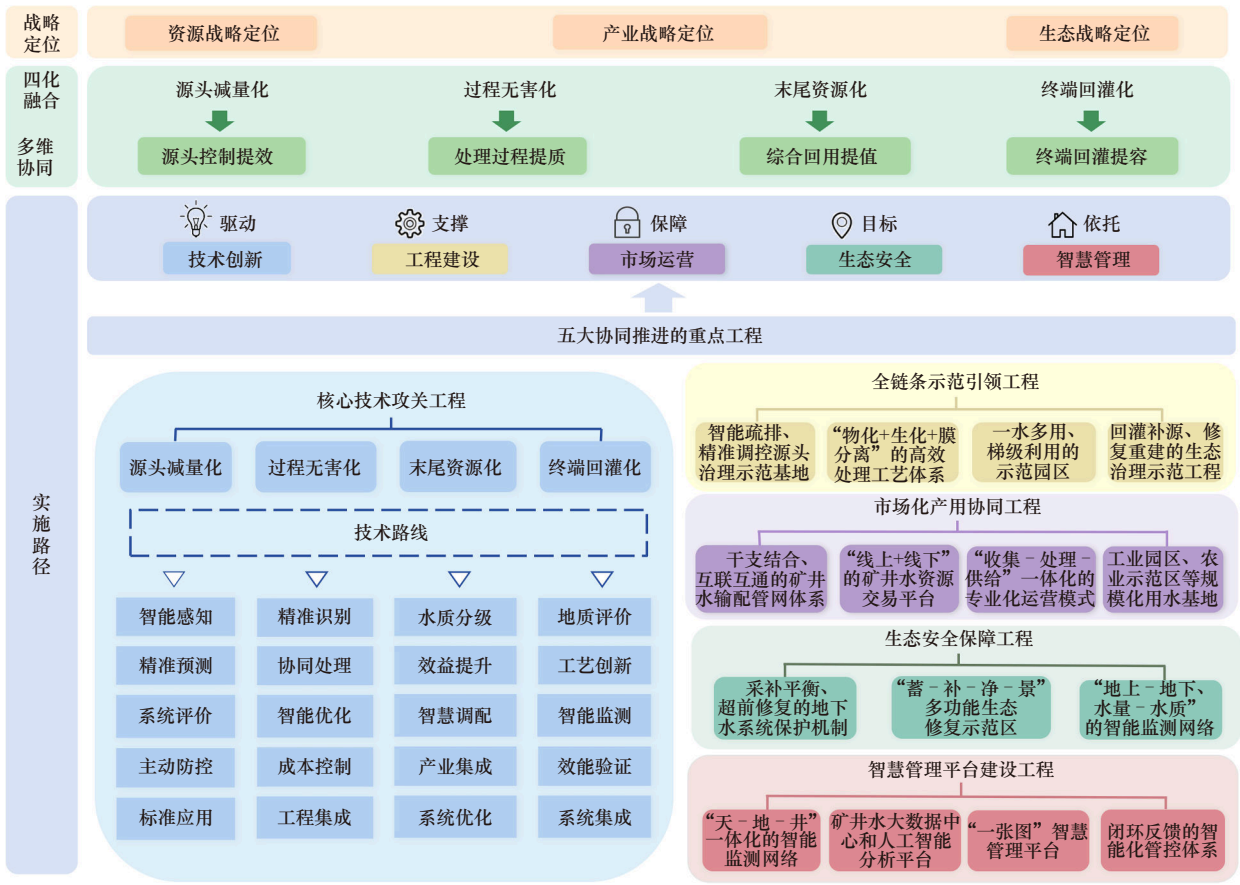

图6　矿井水全生命周期保护与利用战略的实施路径

核心技术，构建自主创新技术体系，推进核心技术攻关工程建设。

（1）源头减量化

以智能感知、精准预测、系统评价、主动防控、标准应用为技术路线，构建分层递进的矿井水源头减量化技术体系。① 在感知层面，研发基于多源信息融合的智能监测网络，通过突破异构传感数据的智能融合与协同分析技术，实现微震信号、孔隙水压、地层位移等关键参数的实时采集与传输，建立矿井水灾害立体化监测预警体系；② 在预测层面，开发耦合模型，融合深度学习算法，创新性构建多维度预测指标体系，突破复杂地质条件下的涌水量动态预测技术，提升水害预警的时空精度与可靠性；③ 在评价层面，创新含水层破坏机理研究方法，建立导水裂隙带发育过程的多场耦合分析模型，基于地质力学原理构建水害风险分级评价体系，实现风险源的精准识别与动态评估；④ 在防控层面，研发采动影响下的定向疏放与精准注浆技术，针对不同地质条件建立分区、分类的防控技术标准，形成主动防控技术集成方案；⑤ 在标准化层面，构建“基础性+适应性”的技术方案库，建立不同水文地质条件下的技术参数体系，完善快速匹配与优化机制，推动源头减量化技术的规范化应用与成果转化。

（2）过程无害化

以精准识别、协同处理、智能优化、成本控制、工程集成为技术路线，构建分层递进的矿井水过程无害化技术体系。① 在识别层面，开发基于光谱分析和在线监测的水质快速诊断技术，建立多参数智能分析模型，实现矿井水水质特征的精准识别与动态评估，为处理工艺优化提供数据支撑；② 在处理层面，研发“物化–生物–膜分离”多级协同处理技术，创新开发低能耗、高选择性的新型处理材料与工艺，实现多污染物的梯级处理与资源化利用；③ 在优化层面，构建基于机器学习的智能运行控制系统，开发工艺参数自适应优化算法，实现处理单元的协同调控与系统优化，提升处理效率与稳定性；④ 在成本层面，研发井下原位处理技术与装备，创新混凝沉淀、过滤分离等节能工艺，开发国产化膜材料与高效蒸发设备，降低处理成本与运行能耗；⑤ 在工程层面，建立模块化、标准化的一体化处理设施，突破井下防爆、自动控制等关键技术，形成系统完整的工程应用解决方案，实现技术成果的规模化应用。

（3）末尾资源化

以水质分级、效益提升、智慧调配、产业集成、系统优化为技术路线，构建分层递进的矿井水末尾资源化技术体系。① 在分级层面，研发基于水质特征的智能分类技术，建立矿井水多级利用的水质标准体系，开发水质快速评价与分级匹配模型，实现有价值组分回收与水质精准调控；② 在效益层面，创新开发高附加值利用技术，突破低成本矿井水提取稀有金属等关键工艺，研发矿井水深度处理与综合利用装备，拓展资源化利用途径；③ 在调配层面，构建基于大数据的智慧化调度平台，开发供需动态匹配算法，建立一水多用、梯级利用模式，实现井下生产生活用水、工业冷却、选矿洗煤、农业灌溉等多级配置；④ 在集成层面，研发模块化处理与利用设施，开发标准化的工程应用技术，创新矿井水分质分类利用工艺，推动形成系统集成解决方案；⑤ 在优化层面，建立水质水量平衡模型，突破多目标协同优化技术，实现资源化利用效率的持续提升。

（4）终端回灌化

以地质评价、工艺创新、智能监测、效能验证、系统集成为技术路线，构建分层递进的矿井水终端回灌技术体系。① 在评价层面，研发基于多源地质数据的智能评价技术，建立含水层结构与水文地质参数的三维评价模型，开发地层适应性与风险预警技术，实现回灌目标层的精准识别与评估；② 在工艺层面，创新压裂增渗与定向注入技术，突破高承压含水层回灌控制技术，研发水质调控与防堵塞新工艺，开发智能化回灌设备，提升回灌工程的适应性与稳定性；③ 在监测层面，构建回灌过程多参数实时监测网络，开发水动力–化学–力学耦合监测技术，研发基于光纤传感的地层变形监测系统，实现回灌过程的全方位动态监控；④ 在验证层面，开发含水层长期效应评估技术，建立渗透性衰减与储水容量变化预测模型，研发水质迁移转化规律模拟技术，实现回灌工程的长效性评估；⑤ 在集成层面，研发模块化回灌工程装备，创新回灌参数优化技术，突破回灌工程系统集成技术，形成标准化的工程应用方案。

2. 全链条示范引领工程

围绕“建设现代化矿井水治理体系、打造全过

程示范标杆”的矿井水全生命周期保护与利用的建设思路，在黄河流域等重点区域，系统布局各个环节的示范工程。① 在源头环节，建设一批智能疏排、精准调控的矿井涌水源头治理示范基地，实现矿井水的科学减量与精准管控；② 在处理环节，建设一批处理规模大的智能化处理中心，构建“物化+生化+膜分离”高效处理工艺体系，配套建设大数据中心和智能化运营平台；③ 在利用环节，建设一批一水多用、梯级利用的综合利用示范园区，创新发展矿井水制备新材料、提取有价组分等高附加值利用模式；④ 在生态环节，布局一批回灌补源、修复重建的生态治理示范工程，探索构建“采–补–修”的生态平衡新模式。

3. 市场化产用协同工程

围绕构建高效协同的矿井水资源市场体系的战略思路，以市场机制创新为引领，系统推进矿井水供给侧与需求侧的深度融合。① 在设施网络方面，构建干支结合、互联互通的矿井水输配管网体系，建设覆盖矿区及周边区域的资源配置骨干网，实现跨矿区、跨流域的资源优化调配；② 在供需对接方面，搭建“线上+线下”的矿井水资源交易平台，建立水质、水量、水价等信息实时发布机制，推动供需双方精准对接与高效匹配；③ 在运营模式方面，创新“收集–处理–供给”一体化的专业化运营模式，培育以水务公司为主的市场化运营主体，完善优质优价、梯级定价的市场化定价机制；④ 在用水布局方面，规划建设一批工业园区、农业示范区等规模化用水基地，创新发展高品质工业用水、生态景观用水、农业灌溉用水等差异化利用模式。通过市场化改革与产用协同，构建“优水优用、质效统一”的矿井水资源配置新格局，推动矿井水由单一污染治理向战略性水资源转变，实现资源的规模化利用与价值最大化。

4. 生态安全保障工程

围绕维护区域水生态安全、重构矿区生态平衡的战略思路，以系统修复为导向，统筹推进地下水修复、生态重建和安全预警三大任务。① 在地下水修复方面，建立采补平衡、超前修复的地下水系统保护机制，实施地下水回灌工程，优化回灌井网布局，开展含水层修复与地表沉降治理，构建地下水系统动态平衡新格局；② 在生态重建方面，打造“蓄–补–净–景”多功能生态修复示范区，建设人工湿地、生态水系等生态基础设施，推进采煤塌陷地的生态修复，恢复区域水生态系统结构与功能；③ 在监测预警方面，构建覆盖“地上–地下、水量–水质”的智能监测网络，建立地下水动态、地表生态、环境风险等多维监测体系，开发基于大数据的生态安全预警平台，实现对区域水生态系统的全方位监控与风险防控。

5. 智慧管理平台建设工程

围绕打造智能化矿井水治理新范式的战略目标，以数字技术为支撑，构建“感知、分析、决策、执行”四位一体的智慧管理体系。① 在感知层面，部署“天–地–井”一体化的智能监测网络，实现对矿井涌水、处理系统、输配管网、利用终端、生态环境等全要素的实时监测；② 在分析层面，建设矿井水大数据中心和人工智能分析平台，构建水量平衡、水质演变、生态响应等多维预测模型，提供智能化分析决策支持；③ 在决策层面，开发“一张图”智慧管理平台，整合水资源配置、处理设施运行、市场化交易、生态安全预警等多系统功能，实现跨部门、跨区域的协同管理；④ 在执行层面，配套建设智能化调度指挥系统，打通各环节的控制链条，构建闭环反馈的智能化管控体系。

五、推动我国煤矿矿井水全生命周期保护与利用的举措

（一）构建现代化治理体系

立足国家水资源监管要求，以数字化转型为引领，构建现代化矿井水治理体系。在智慧化管控方面，建设国家级矿井水大数据中心，推动矿井水管理与国家水资源监控平台深度融合，实现跨部门、跨区域数据共享，建立矿区地下水动态评价体系，开发智能预警与决策支持系统，建设全方位数字化监管平台。在市场化运营方面，创新“水权交易+差别定价+生态补偿”的市场化配置模式，设立矿井水资源开发基金并引导社会资本参与，探索“投资–建设–运营–转让”等多元化特许经营模式，形成市场驱动的可持续发展机制。

（二）突破核心技术瓶颈

聚焦矿井水治理的关键环节，系统布局技术创新路线。在源头减量方面，重点突破基于深度学习

的智能预警技术、精准化导水裂隙带控制技术、定向疏放与精准注浆技术等，建立矿井水灾害立体化监测预警体系；在过程无害化方面，创新开发低能耗高效膜分离技术、新型处理材料、智能化运行控制系统等，突破井下原位处理等关键技术，实现处理效率与成本的优化平衡；在末尾资源化方面，重点攻关高附加值利用技术、稀有金属提取工艺、智能化调配技术等，拓展资源化利用新途径；在终端回灌化方面，突破高承压含水层回灌控制、水质调控与防堵塞、地层长期效应评估等关键技术，提升回灌工程的适应性与稳定性。同时，加强技术集成与工程化研究，推进核心技术装备的国产化与产业化发展。

（三）推进产业转型升级

围绕矿井水资源化利用，推动产业转型升级与创新发展。在创新平台建设方面，组建国家级矿井水治理技术创新联盟，建设矿井水处理装备制造产业园，突破核心装备制造瓶颈，加快科技成果转化，构建“产学研用”深度融合的创新体系；在产业培育方面，大力发展专业化水务服务、环境修复、生态养护等新兴产业，推动矿井水高附加值利用，培育新材料制备、农业种植等产业链，创新“水处理+新能源”耦合发展模式，打造新兴产业增长极。

（四）完善标准评价体系

针对矿井水治理的规范化需求，构建科学完备的标准评价体系。在标准建设方面，系统制定矿井水处理、利用、生态修复等全过程技术标准，建立矿井水产品质量分级与认证体系，积极参与国际标准制定，提升行业话语权，形成全链条标准支撑；在评价机制方面，构建“资源–环境–经济”综合评价指标体系，建立第三方评估认证机制，完善企业环保信用评价体系，健全科学规范的考核体系。

（五）强化协同治理机制

基于区域协同发展要求，创新矿井水治理的协同机制。在区域协同方面，建立跨区域矿井水资源调配机制，推动区域性矿井水处理中心建设，构建区域生态补水与修复网络，实现资源优化配置；在多元参与方面，建立政府引导、企业主体、社会参与的协同治理机制，推广生态环境导向的开发模式，完善公众参与和社会监督机制，形成多方共治格局。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 23, 2025; **Revised date:** April 20, 2025

Corresponding author: Gao Junlian is an associate professor from School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing. Her major research field is intelligent decision support for energy and environmental management. E-mail: JunlianGao@cumtb.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Full Life-cycle Protection and Utilization of Mine Water in China” (2024-XZ-90); National Natural Science Fund Project (72404270)

参考文献

[1] 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国不同类别煤层顶板水害致灾机理与防控路径 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1539–1555.
Zeng Y F, Zhu H C, Wu Q, et al. Disaster-causing mechanism and prevention and control path of different types of coal seam roof water disasters in China [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1539–1555.

[2] 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国不同类别煤层底板水害致灾机理与防控远景导向 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1073–1099.
Zeng Y F, Zhu H C, Wu Q, et al. Disaster-causing mechanism and prevention and control vision orientation of different types of coal seam floor water disasters in China [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1073–1099.

[3] Wang X, Zhang C, Yuan J, et al. Life cycle assessment of mine water resource utilization in China: A case study of Xiegou coal mine in Shanxi Province [J]. Sustainability, 2025, 17(1): 229.

[4] 武强, 赵苏启, 孙文洁, 等. 中国煤矿水文地质类型划分与特征分析 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 901–905.
Wu Q, Zhao S Q, Sun W J, et al. Classification of the hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 901–905.

[5] 孙亚军, 徐智敏, 李鑫, 等. 我国煤矿区矿井水污染问题及防控技术体系构建 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 1–16.
Sun Y J, Xu Z M, Li X, et al. Mine water drainage pollution in China’s coal mining areas and the construction of prevention and control technical system [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 1–16.

[6] 张春晖, 赵桂峰, 苏佩东, 等. 基于“深地–井下–地面”联动的煤矿矿井水处理利用模式初探 [J]. 矿业科学学报, 2024, 9(1): 1–12.
Zhang C H, Zhao G F, Su P D, et al. Treatment and utilization of coal mine water based on “deep ground–underground–surface ground” linkage system [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(1): 1–12.

[7] 薛罡, 刘建奇, 强志斌, 等. 煤矿矿井水处理和资源化利用的关键问题及对策 [J]. 工业水处理, 2025, 45(1): 1–8.
Xue G, Liu J Q, Qiang Z B, et al. Key issues and countermeasures of coal mine water treatment and recycling [J]. Industrial Water

Treatment, 2025, 45(1): 1–8.

[8] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1–4.
Miao X X, Pu H, Bai H B. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 1–4.

[9] 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1711–1717.
Fan L M, Ma X D, Ji R J. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711–1717.

[10] 赵春虎, 王世东, 姬中奎, 等. 榆神矿区中深煤层开采松散含水层地下连续墙侧向截水帷幕可行性分析 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1062–1072.
Zhao C H, Wang S D, Ji Z K, et al. Feasibility analysis of lateral water interception curtain in loose aquifer during deep coal seam mining in Yushen mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1062–1072.

[11] 张东升, 李文平, 来兴平, 等. 我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 36–43.
Zhang D S, Li W P, Lai X P, et al. Development on basic theory of water protection during coal mining in northwest of China [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 36–43.

[12] 曾一凡, 孟世豪, 吕扬, 等. 基于矿井安全与生态水资源保护等多目标约束的超前疏放水技术 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3091–3100.
Zeng Y F, Meng S H, Lyu Y, et al. Advanced drainage technology based on multi-objective constraint of mine safety and water resources protection [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3091–3100.

[13] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤–水–热”正效协同共采理论与技术构想 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538–550.
Zeng Y F, Liu X X, Wu Q, et al. Theory and technical conception of coal–water–thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538–550.

[14] 李福勤, 王丛, 郑叟州, 等. 煤矿矿井水处理技术现状与展望 [J]. 工业水处理, 2024, 44(9): 1–8.
Li F Q, Wang C, Zheng J Z, et al. Current situation and prospect of coal mine water treatment technology [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(9): 1–8.

[15] 郑海平, 王淑民, 王吉坤, 等. 我国煤矿矿井水处理技术研究进展及建议 [J]. 煤化工, 2024, 52(1): 92–96.
Zheng H P, Wang S M, Wang J K, et al. Research progress and suggestion on coal mine water treatment technology in China [J]. Coal Chemical Industry, 2024, 52(1): 92–96.

[16] 何绪文, 王绍州, 张学伟, 等. 煤矿矿井水资源化绿色短流程关键技术与装备 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 958–966.
He X W, Wang S Z, Zhang X W, et al. Key technologies and equipment for green short process of coal mine drainage resource utilization [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 958–966.

[17] 屈波, 刘杰, 张世明, 等. 煤矿智能型水处理净化站的应用 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S1): 609–614.
Qu B, Liu J, Zhang S M, et al. Application of intelligent water treatment and purification station in coal mines [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 609–614.

[18] 苗立永, 王文娟. 高矿化度矿井水处理及分质资源化综合利用途径的探讨 [J]. 煤炭工程, 2017, 49(3): 26–28, 31.
Miao L Y, Wang W J. Discussion on treatment and graded comprehensive utilization methods for high-salinity mine water [J]. Coal Engineering, 2017, 49(3): 26–28, 31.

[19] 谢国良, 廉开元, 严明林, 等. 生态脆弱矿区矿井水特征及资源化适宜性研究 [J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(4): 278–288.
Xie G L, Lian K Y, Yan M L, et al. Study on characteristics of mine water and suitability for resource utilization in ecologically fragile mining area [J]. Mining Research and Development, 2025, 45(4): 278–288.

[20] 孙亚军, 李鑫, 冯琳, 等. 鄂尔多斯盆地煤–水协调开采下矿区水资源异位回灌–存储技术思路 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3547–3560.
Sun Y J, Li X, Feng L, et al. Technical thinking on ectopic injection and storage of mine area water resources under the coordinated exploitation of coal and water background in Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3547–3560.

[21] 马怡斋, 王海燕, 武亚凤, 等. 黄河流域煤矿矿井水综合利用问题分析及管控建议 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 122–130.
Ma Y Z, Wang H Y, Wu Y F, et al. Status analysis and control suggestions on comprehensive utilization of mine water in the Yellow River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(1): 122–130.

[22] 孙亚军, 郭娟, 徐智敏, 等. 我国煤矿区矿井水水质空间分布特征及矿井水处理技术思路 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 584–599.
Sun Y J, Guo J, Xu Z M, et al. Spatial distribution characteristics of mine water quality in coal mining areas of China and technological approaches for mine water treatment [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 584–599.

[23] 孙文洁, 任顺利, 武强, 等. 新常态下我国煤矿废弃矿井水污染防治与资源化综合利用 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2161–2169.
Sun W J, Ren S L, Wu Q, et al. Waterpollution’s prevention and comprehensive utilization of abandoned coal mines in China under the new normal life [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2161–2169.

[24] 张楠, 郭欣伟, 李皓冰. 关于矿井水相关概念与定义的探讨 [J]. 工业安全与环保, 2020, 46(9): 94–97.
Zhang N, Guo X W, Li H B. Discussion on the concept and definition of mine water [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2020, 46(9): 94–97.

[25] 寇嘉玮, 薛亚莉, 张高锋, 等. 陕西非常规水源利用问题及对策研究 [J]. 中国水利, 2023 (13): 14–17.
Kou J W, Xue Y L, Zhang G F, et al. Research on unconventional water resources utilization issues and strategies in Shaanxi Province [J]. China Water Resources, 2023 (13): 14–17.

[26] 武强, 李铎. “煤—水”双资源矿井建设与开发研究 [J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(3): 32–35, 62.
Wu Q, Li D. Research of “Coal–water” double-resources mine construction and development [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(3): 32–35, 62.

[27] 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 Q, Wang Z Q, Guo Z K, 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.

[28] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795–805.
Wu Q. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795–805.

[29] 武强, 申建军, 王洋. “煤–水”双资源型矿井开采技术方法与工程应用 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 8–16.
Wu Q, Shen J J, Wang Y. Mining techniques and engineering application for “coal – water” dual-resources mine [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 8–16.

[30] Wu Q, Dong D L, Shi Z H, et al. Optimum combination of water drainage, water supply and eco-environment protection in coal-accumulated basin of North China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 43(2): 122–131.

[31] Zhang H T, Xu G Q, Zhan H B, et al. Identification of hydrogeochemical processes and transport paths of a multi-aquifer system in closed mining regions [J]. Journal of Hydrology, 2020, 589: 125344.

[32] 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 423–437.
Sun Y J, Zhang L, Xu Z M, et al. Multi-field action mechanism and research progress of coal mine water quality formation and evolution [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 423–437.

[33] 曾一凡, 包函, 武强, 等. 新近系保德组沉积薄弱区红土阻水性能及其资源开发意义 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(10): 62–71.
Zeng Y F, Bao H, Wu Q, et al. Water-blocking performance of laterite in weak deposition areas of Neogene Baode Formation and its significance of resource exploitation [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(10): 62–71.

[34] 范立民, 孙强, 马立强, 等. 论保水采煤技术体系 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 196–204.
Fan L M, Sun Q, Ma L Q, et al. Technological system of water-conserving coal mining [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 196–204.

[35] 武强, 樊振丽, 刘守强, 等. 基于GIS的信息融合型含水层富水性评价方法——富水性指数法 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1124–1128.
Wu Q, Fan Z L, Liu S Q, et al. Water-richness evaluation method of water-filled aquifer based on the principle of information fusion with GIS: Water-richness index method [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1124–1128.

[36] 武强, 许珂, 张维. 再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图–双预测法” [J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1341–1347.
Wu Q, Xu K, Zhang W. Further research on “three maps–two predictions” method for prediction on coal seam roof water bursting risk [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1341–1347.

[37] 武强, 徐华, 赵颖旺, 等. 基于“三图法”煤层顶板突水动态可视化预测 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2968–2974.
Wu Q, Xu H, Zhao Y W, et al. Dynamic visualization and prediction for water bursting on coal roof based on “three maps method” [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2968–2974.

[38] 范立民, 马雄德, 吴群英, 等. 保水采煤技术规范的技术要点分析 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 81–87.
Fan L M, Ma X D, Wu Q Y, et al. Analysis on technical points of water-preserving coal mining technical specifications [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 81–87.

[39] 曾一凡, 于超, 武强, 等. 煤矿防治水“三区”划分方法及其水害防治意义 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3605–3618.
Zeng Y F, Yu C, Wu Q, et al. “Three zones” method for coal mine water hazard control and its significance [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3605–3618.

[40] 简煊祥, 李云飞, 杨永均. 煤矿保水开采技术现状及其发展 [J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(1): 47–50.
Jian X X, Li Y F, Yang Y J. Present situation and development of water-preserved mining technology [J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(1): 47–50.

[41] 董书宁, 郭小铭, 刘其声, 等. 华北型煤田底板灰岩含水层超前区域治理模式与选择准则 [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 1–10.
Dong S N, Guo X M, Liu Q S, et al. Model and selection criterion of zonal preact grouting to prevent mine water disasters of coal floor limestone aquifer in North China type coalfield [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 1–10.

[42] 曾一凡, 孟世豪, 武强, 等. 天窗补给型衍生式矿井动力突水模式及其评价与治理技术 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3776–3788.
Zeng Y F, Meng S H, Wu Q, et al. Derivative mine dynamic water inrush mode of skylight leakage and its evaluation and control technology system [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3776–3788.

[43] 徐良骥, 张坤, 刘潇鹏, 等. 离层注浆开采关键层变形特征及地表沉陷控制效应 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 931–942.
Xu L J, Zhang K, Liu X P, et al. Deformation characteristic of key strata and control effect of surface subsidence in mining with grouting into overburden bed-separation [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 931–942.

[44] 罗文, 王庆雄. 浅埋强富水区下绿色高效保水开采技术 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 31–47.
Luo W, Wang Q X. Green and efficient water conservation mining technology in shallow and strongly water-rich areas [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 31–47.

[45] 靳德武, 赵春虎, 段建华, 等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2256–2264.
Jin D W, Zhao C H, Duan J H, et al. Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2256–2264.

[46] Li F H, Gu Y M, Cheng Y H, et al. Influence of roof confined water drainage on stress distribution in coal seam [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 24040.

[47] 袁存忠, 陈锦如. 水资源与矿井水处理利用 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(S1): 927–929, 933.
Yuan C Z, Chen J R. Disposal and use of shaft drainage as water resource [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2000, 23(S1): 927–929, 933.

[48] 王皓, 董书宁, 尚宏波, 等. 国内外矿井水处理及资源化利用研究进展 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 222–236.
Wang H, Dong S N, Shang H B, et al. Domestic and foreign progress of mine water treatment and resource utilization [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 222–236.

[49] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304–316.
Sun Y J, Chen G, Xu Z M, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304–316.

[50] 郭中权, 毛维东, 肖艳, 等. 矿井水处理中聚丙烯酰胺残留物对反渗透膜污染的贡献 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 986–992.
Guo Z Q, Mao W D, Xiao Y, et al. Contribution of polyacrylamide residue to reverse osmosis membrane pollution in mine water treatment [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 986–992.

[51] 何绪文, 王绍州, 张学伟, 等. 煤矿矿井水资源化利用技术创新 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 523–530.
He X W, Wang S Z, Zhang X W, et al. Coal mine drainage resources utilization technology innovation [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 523–530.

[52] 梁旭, 张兆, 白振荣, 等. 煤矿井下处理高浊矿井水工艺技术的研究 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2024 (5): 81–84.
Liang X, Zhang Z, Bai Z R, et al. Research on a technology for treating high turbidity mine water underground in coal mines [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2024 (5): 81–84.

[53] Skrzypczak A, Tandyrak R. Biotic aspects of suspended solid reduction in sedimentation ponds [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(56): 65066–65077.

[54] Zhang H T, Jiang B B, Zhang H Q, et al. Water-rock interaction mechanisms and hydrochemical evolution in the underground reservoirs of coal mines [J]. ACS Omega, 2024, 9(43): 43834–4384.

[55] 张溪彧, 董书宁, 王锐, 等. 含悬浮物矿井水微絮凝 – 多级过滤工艺研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 222–230.
Zhang X Y, Dong S N, Wang R, et al. A study of the microflocculation-multistage filtration technology of mine water containing suspended solids [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 222–230.

[56] 刘遵义, 李小亮. 高矿化度矿井水处理技术应用现状 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 436–441.
Liu Z Y, Li X L. Application status of mine water treatment technology with high salinity [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 436–441.

[57] 靳德武, 葛光荣, 张全, 等. 高矿化度矿井水节能脱盐新技术 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 12–18.
Jin D W, Ge G R, Zhang Q, et al. New energy-saving desalination technology of highly-mineralized mine water [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 12–18.

[58] 张海琴, 李庭, 李井峰. 电化学技术在矿井水处理中的应用与展望 [J]. 中国煤炭, 2021, 47(2): 70–75.
Zhang H Q, Li T, Li J F. Application and prospect of electrochemical technology in mine water treatment [J]. China Coal, 2021, 47(2): 70–75.

[59] 刘兆峰, 郭强, 王霄, 等. 基于双极膜电渗析的膜集成技术的高矿化度矿井水资源化处理 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2462–2471.
Liu Z F, Guo Q, Wang X, et al. Resource utilization of high-salinity mine water through the membrane-integrated process based on bipolar membrane electrodialysis [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2462–2471.

[60] Li K L, Zhu S C, Liu Z M, et al. Simultaneous desalination and glyphosate degradation by a novel electro-Fenton membrane distillation process [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(47): 19023–19032.

[61] 毛维东, 周如禄, 郭中权. 煤矿矿井水零排放处理技术与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 205–210.
Mao W D, Zhou R L, Guo Z Q. Zero liquid discharge treatment technology and application for coal mine drainage water [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 205–210.

[62] Mosai A K, Ndlovu G, Tutu H. Improving acid mine drainage treatment by combining treatment technologies: A review [J]. Science of The Total Environment, 2024, 919: 170806.

[63] Jiang Y Y, Di J Z, Gao M Q, et al. Study on the new slow-release carbon source biochemistry and its improvement of SRB on the acid mine drainage treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 122860.

[64] Noor I, Arifin Y F, Priatmadi B J, et al. Laboratory simulation of the swampy forest system for the passive treatment of acid mine drainage in coal mine reclamation areas [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 6077.

[65] Jiang F, Lu X Y, Zeng L J, et al. The purification of acid mine drainage through the formation of schwertmannite with Fe(0) reduction and alkali-regulated biomineralization prior to lime neutralization [J]. Science of The Total Environment, 2024, 908: 168291.

[66] Lei Y, Li W Y, Han Y H, et al. Biomimetic ZrO_2-modified seaweed residue with excellent fluorine/bacteria removal and uranium extraction properties for wastewater purification [J]. Water Research, 2024, 252: 121219.

[67] Wu W J, Wang J L. High efficiency adsorption of uranium by magnesia-silica-fluoride co-doped hydroxyapatite [J]. Chemosphere, 2024, 352: 141398.

[68] Li J L, Hu Y Z, Shen Z W, et al. Efficient uranium(VI) recovery from fluorinated wastewater *via* deferiprone ligand complexation [J]. Water Research, 2025, 271: 122884.

[69] Chudy K. Mine water as geothermal resource in nowa Ruda Region (SW Poland) [J]. Water, 2022, 14(2): 136.

[70] Menéndez J, Ordónez A, Fernández-Oro J M, et al. Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings [J]. Renewable Energy, 2020, 146: 1166–1176.

[71] 薄本玉, 杨朝阳, 谭肖波, 等. 关于地热水理疗评价指标沿革的探讨 [J]. 山东国土资源, 2024, 40(11): 37–41.
Bo B Y, Yang Z Y, Tan X B, et al. Study on the evolution of geothermal water physiotherapy evaluation indicators [J]. Shandong Land and Resources, 2024, 40(11): 37–41.

[72] 闫佳伟, 王红瑞, 赵伟静, 等. 我国矿井水资源化利用现状及前景展望 [J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 117–123.
Yan J W, Wang H R, Zhao W J, et al. Current status and prospect

of mine water reutilization in China [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 117–123.

[73] 李亚娟, 余耀宏, 卢剑, 等. 滇东白龙山煤矿矿井水处理工艺及回用分析 [J]. 煤炭工程, 2021, 53(9): 16–19.
Li Y J, Yu Y H, Lu J, et al. Treatment and recycling process of mine water in Bailongshan Coal Mine in Eastern Yunnan [J]. Coal Engineering, 2021, 53(9): 16–19.

[74] Liu Y, Zhao W B, Zhang Y S, et al. Influence of high sulfate mine water on spontaneous combustion of coal [J]. ACS Omega, 2022, 7(50): 46347–46357.

[75] Liu C S, Liang L L, Wang L, et al. Allocation and utilization of coal mine water for ecological protection of lakes in semi-arid area of China [J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9042.

[76] Mansilha C, Melo A, Flores D, et al. Irrigation with coal mining effluents: Sustainability and water quality considerations (São Pedro da cova, north Portugal) [J]. Water, 2021, 13(16): 2157.

[77] Farhad Howladar M, Deb P, Huqe Muzemder A S. Monitoring the underground roadway water quantity and quality for irrigation use around the Barapukuria coal mining industry, Dinajpur, Bangladesh [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2017, 4: 23–34.

[78] Monckton D, Cavaye J, Huth N, et al. Use of coal seam water for agriculture in Queensland, Australia [J]. Water International, 2017, 42(5): 599–617.

[79] 樊龙斌. 乌兰木伦煤矿矿井水综合利用工程技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(S2): 42–44.
Fan L B. Study on engineering technology of comprehensive utilization of mine water in wulanmulun coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S2): 42–44.

[80] Geller W. Case studies and regional surveys [C]// Geller W, Schultze M, Kleinmann R, et al. Acidic pit lakes. Heidelberg: Springer, 2012: 265–435.

[81] Chi M B, Zhang D S, Zhao Q, et al. Determining the scale of coal mining in an ecologically fragile mining area under the constraint of water resources carrying capacity [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 279: 111621.

[82] 潘雷坤, 张青果. 保水开采开全国矿井水零排放先河 [N]. 河北经济日报, 2009-12-10(02).
Pan L K, Zhang Q G. Water conservation mining creates a national precedent of zero mine water discharge [N]. Hebei Economic Daily, 2009-12-10(02).

[83] 于兴社, 韩贵雷, 赵晓明. 中关铁矿矿坑水回灌试验研究 [J]. 矿业工程, 2016, 14(2): 46–48.
Yu X S, Han G L, Zhao X M. Recharge test study of Zhongguan iron ore pit water [J]. Mining Engineering, 2016, 14(2): 46–48.

[84] 赵彩凤, 杨建. 高矿化度矿井水地下回灌对毛乌素沙漠地下水水质的影响 [J]. 煤矿安全, 2018, 49(3): 29–32.
Zhao C F, Yang J. Influence of groundwater recharge with high salinity mine water on groundwater quality in mu us desert [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 29–32.

[85] Dillon P, Zheng Y, Alley W, et al. Managed aquifer recharge: Overview and governance [M]. London: International Association of Hydrogeologists Special Publication, 2022.

[86] 李志明. 高矿化度矿井水回灌技术分析 [J]. 中国煤炭, 2010, 36(11): 111–113.
Li Z M. Analysis of the super mineralized mine-water back-filling technology [J]. China Coal, 2010, 36(11): 111–113.

[87] Cook P G, Miller A D, Wallis I, et al. Facilitating open pit mine closure with managed aquifer recharge [J]. Groundwater, 2022, 60(4): 477–487.

[88] Schafer D, Sun J, Jamieson J, et al. Model-based analysis of reactive transport processes governing fluoride and phosphate release and attenuation during managed aquifer recharge [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(5): 2800–2811.

[89] Rizzo P, Bucci A, Monaco P, et al. Investigating the potential impact on shallow groundwater quality of oily wastewater injection in deep petroleum reservoirs: A multidisciplinary evaluation at the val d'Agri oilfield (southern Italy) [J]. Sustainability, 2023, 15(12): 9161.

[90] Chen G, Xu Z M, Rudakov D, et al. Deep groundwater flow patterns induced by mine water injection activity [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(23): 15438.

[91] Wu P P, Comte J C, Zhang L J, et al. Effect of surface water level fluctuations on the performance of near-bank managed aquifer recharge from injection wells [J]. Water, 2021, 13(21): 3013.

[92] Palma Nava A, Parker T K, Carmona Paredes R B. Challenges and experiences of managed aquifer recharge in the Mexico City metropolitan area [J]. Groundwater, 2022, 60(5): 675–684.

[93] Dillon P, Page D, Vanderzalm J, et al. Lessons from 10 years of experience with Australia's risk-based guidelines for managed aquifer recharge [J]. Water, 2020, 12(2): 537.