

煤矿矿井水“零排放”与全资源化利用模式的技术经济分析

——以后安煤矿为例

赵雄¹, 古娜^{2*}, 赵伟¹, 周连春², 赵润¹, 谭诗², 赵峰¹, 钱波², 赵文¹, 熊梅²

¹山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司后安煤矿, 山西 朔州

²西昌学院土木与水利工程学院, 四川 凉山

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年7月24日; 发布日期: 2026年10月15日

摘要

为解决我国煤矿矿井水资源化利用率偏低、经济性评估体系不健全的突出难题, 本文以后安煤矿为工程依托, 构建了“预沉淀-超滤-反渗透双膜法深度净化-全资源化回用”一体化零排放技术体系, 并建立了覆盖项目全生命周期的技术经济分析模型。工程应用结果表明, 该系统设计处理规模为5500 m³/d, 进水悬浮物浓度介于500~3000 mg/L, 处理后出水水质达到《国家生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022), 实现矿井水100%资源化回用; 项目年回用水量达181.5万立方米, 年回收煤泥1.2万吨, 通过空压机余热回收可替代燃煤730吨, 资源回收效益显著。经济评价结果显示, 该项目总投资7000万元, 年均总收益3459万元, 年运行成本369万元, 年净收益3090万元, 静态投资回收期2.26年, 内部收益率44.1%, 净现值(折现率8%)达1.83亿元, 经济效益可观。敏感性分析结果表明, 水价与电价是影响项目经济性的最敏感因素, 而药剂费用与膜组件使用寿命对项目效益的影响相对较小。此外, 该项目还能有效减少水资源浪费与污染物排放, 具有显著的环境效益和社会效益。本研究构建的技术体系与经济分析模型, 为我国煤矿矿井水零排放与全资源化利用提供了可量化、可复制、可推广的技术经济参考范式。

关键词

矿井水, 零排放, 全资源化, 技术经济分析, 双膜法, 后安煤矿

Technical and Economic Analysis of “Zero Discharge” and Full Resource Utilization Mode of Coal Mine Water

—Taking Hou'an Coal Mine as an Example

*通讯作者。

文章引用: 赵雄, 古娜, 赵伟, 周连春, 赵润, 谭诗, 赵峰, 钱波, 赵文, 熊梅. 煤矿矿井水“零排放”与全资源化利用模式的技术经济分析[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1419-1426. DOI: 10.12677/me.2026.146141

Xiong Zhao¹, Na Gu^{2*}, Wei Zhao¹, Lianchun Zhou², Run Zhao¹, Shi Tan², Feng Zhao¹,
Bo Qian², Wen Zhao¹, Mei Xiong²

¹Hou'an Coal Mine, Shanxi Shuozhou Pinglu District Hou'an Coal Co., Ltd., Shuozhou Shanxi

²School of Civil and Hydraulic Engineering, Xichang University, Liangshan Sichuan

Received: May 12, 2026; accepted: July 24, 2026; published: October 15, 2026

Abstract

To solve the prominent problems of low resource utilization rate and imperfect economic evaluation system of coal mine water in China, this paper takes Hou'an Coal Mine as the engineering support, constructs an integrated zero-discharge technology system of "pre-sedimentation - ultrafiltration - reverse osmosis dual-membrane advanced purification - full resource reuse", and establishes a technical and economic analysis model covering the whole life cycle of the project. The results of engineering application show that the designed treatment capacity of the system is 5500 m³/d, the influent suspended solids concentration ranges from 500 to 3000 mg/L, and the treated effluent quality meets the National Sanitary Standards for Drinking Water (GB 5749-2022), realizing 100% resource reuse of mine water; the annual reused water volume of the project reaches 1.815 million cubic meters, the annual recovered coal slime is 12,000 tons, and 730 tons of coal can be replaced by waste heat recovery from air compressors, with significant resource recovery benefits. The results of economic evaluation show that the total investment of the project is 70 million yuan, the average annual total benefit is 34.59 million yuan, the annual operation cost is 3.69 million yuan, the annual net benefit is 30.90 million yuan, the static investment payback period is 2.26 years, the internal rate of return is 44.1%, and the net present value (discount rate 8%) reaches 183 million yuan, with considerable economic benefits. Sensitivity analysis results indicate that water price and electricity price are the most sensitive factors affecting the project economy, while the impact of chemical agent cost and membrane module service life on project benefits is relatively small. In addition, the project can effectively reduce water waste and pollutant emissions, and has significant environmental and social benefits. The technical system and economic analysis model constructed in this study provide a quantifiable, replicable and promotable technical and economic reference paradigm for the zero discharge and full resource utilization of coal mine water in China.

Keywords

Mine Water, Zero Discharge, Full Resource Utilization, Techno-Economic Analysis, Double Membrane Process, Hou'an Coal Mine

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭作为我国主体能源的地位短期内难以改变。煤炭开采过程中，为保证生产安全需大量疏排地下水，由此产生巨量矿井水[1]。据统计，我国每年矿井涌水量约 80 亿立方米[2]，但综合利用率长期低于 50%。大量未经深度处理的矿井水直接外排，一方面造成宝贵水资源的严重浪费，另一方面导致地表水体

污染、土壤盐渍化、地下水水位下降等生态环境问题。

与此同时，我国西部晋陕蒙疆四省区煤炭资源储量占全国 73.80%，但水资源总量仅占全国 7.90%，煤水矛盾突出[3]。以山西省朔州市平鲁区为例，当地素有“宁舍一升米，不舍一碗水”的说法，水资源短缺已成为制约区域经济社会可持续发展与生态文明建设的关键瓶颈。在此背景下，将矿井水深度处理后资源化利用，兼具节水减排和污染治理的双重战略意义[4] [5]。

矿井水处理技术经历了从“简单沉淀排放”到“混凝沉淀过滤回用”再到“深度处理资源化”的演进过程。目前，以“超滤-反渗透”为代表的双膜法工艺，因其出水水质高、占地面积小、自动化程度高等优势，逐渐成为矿井水深度处理的主流技术。然而，现有研究和工程实践仍存在三方面不足：其一，资源化链条不完整，多数项目仅关注水回用而忽视了煤泥、余热等伴生资源的回收利用；其二，经济分析粗糙，缺乏基于长期运行数据的精细化成本-收益模型，敏感性分析缺失，企业投资决策缺乏可靠依据；其三，零排放目标难以闭环，浓盐水处置、固废消纳等环节往往未纳入系统设计。

本文以后安煤矿矿井水处理工程为研究对象，系统梳理其“零排放”与“全资源化”技术体系，并基于连续三年实际运行数据，构建全生命周期技术经济分析模型，以期为同类工程提供决策参考。

2. 技术体系与全资源化模式

2.1. 工程概况

后安煤矿矿井水处理系统位于山西省朔州市平鲁区，于 2018 年 10 月建成投运，设计处理规模 5500 立方米/日，年运行天数 330 天。系统核心工艺路线为“抗冲击预沉淀→超滤→反渗透”，配套煤泥压滤、余热回收等资源化单元。

进水水质具有高悬浮物、高浊度、中等矿化度且水质波动大的典型特征。根据 2023 至 2025 年的连续监测数据，悬浮物浓度在 520 至 3280 毫克/升之间波动，平均值为 1980 毫克/升；浊度相应应在 850 至 3650NTU 范围，平均值 2150NTU；化学需氧量平均 225 毫克/升；总溶解性固体平均 1120 毫克/升；总硬度平均 480 毫克/升(以碳酸钙计)；pH 值介于 7.1 至 8.6 之间，水温 11 至 19 摄氏度。这种水质特点对处理系统的抗冲击能力和膜污染控制提出了较高要求，后安煤矿矿井水水质如表 1 所示。

Table 1. Influent water quality of mine water in Hou'an coal mine

表 1. 后安煤矿矿井水进水水质

指标	数值范围	平均值
悬浮物 SS (mg/L)	500~3000	2000
浊度(NTU)	800~3500	2000
COD (mg/L)	150~300	220
pH 值	7.2~8.5	7.8
水温(℃)	12~18	15
矿化度(mg/L)	800~1500	1100

2.2. 抗冲击预沉淀系统

为防止井下排水瞬时冲击破坏沉淀池水力条件，设计了一套三级防冲击预处理系统。系统设置有效

容积 30 立方米的沉淀物收集池，其上方配置 7.5 千瓦与 55 千瓦双级渣浆泵，对高浊度来水进行强制旋流分离。三级台阶式沉淀池的容积分别为 200 立方米、300 立方米和 300 立方米，总水力停留时间约 14 小时。沉淀池底部设有以负 12 度向前方倾斜的排泄槽，利用重力实现沉淀物的自动收集与排放。此外，各沉淀池均配置压缩空气风管，用于堵塞时的快速疏通。

运行数据显示，进水悬浮物平均 1980 毫克/升，经预沉淀后出水悬浮物降至 85 毫克/升以下，去除率超过 95.7%，有效保障了后续膜系统的进水安全。

2.3. 超滤与反渗透深度处理

超滤单元采用亲水改性聚偏氟乙烯中空纤维超滤膜，膜孔径 0.03 微米，单支膜面积 76 平方米，设计通量 80 升每平方米每小时，采用外压式全量过滤运行模式。反洗周期根据跨膜压差自动调整，通常为 45 至 60 分钟；化学加强反洗每周执行一次，次氯酸钠投加浓度 15 毫克/升、氢氧化钠 500 毫克/升。超滤出水污染密度指数不超过 3，浊度不超过 0.2NTU，完全满足反渗透进水要求。

反渗透单元采用聚酰胺复合卷式膜，单支膜面积 37 平方米，系统共设置两套装置、每套 84 支膜组件。设计通量 18 升每平方米每小时，系统回收率控制在 75%至 78%之间，脱盐率不低于 98%，操作压力 1.0 至 1.3 兆帕。反渗透产水水质达到《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022)，具体指标为：总大肠菌群未检出，菌落总数 0 CFU/mL，浑浊度 0.1 NTU，总硬度不超过 10 毫克/升，总溶解性固体不超过 50 毫克/升，硫酸盐和氯化物均不超过 5 毫克/升，硝酸盐不超过 2 毫克/升，色度低于 5 度。各项指标均远优于国标限值，实现了从“黑水”到“直饮水”的跨越。

2.4. 煤泥与余热资源化

预沉淀单元产生的煤泥经渣浆泵输送至压滤机进行脱水处理。该压滤机过滤面积 500 平方米，压榨压力 1.2 兆帕，吹干时间 30 分钟。经过脱水后，煤泥含水率显著降低，形成的煤饼具有较高的热值，可作为低热值燃料外售或掺入末煤销售，实现了固体废弃物的资源化利用。与此同时，矿井配备的多台螺杆式空压机在运行过程中产生大量余热，油温和排气温度维持在较高水平。通过板式换热器将这部分热量回收，用于加热职工洗浴用水，实现了能源的梯级利用。上述资源化途径的具体产能、去向及资源化率详见表 2。

Table 2. Resource utilization of mine water in Hou'an coal mine

表 2. 后安煤矿矿井水资源化利用情况

资源类型	年产量	利用去向	资源化率
回用水	181.5 万 m ³	井下防尘、冷却、生活饮用	100%
回收煤泥	1.2 万吨	低热值燃料外售	95%
余热回收	2.2 × 10 ⁶ MJ	职工洗浴热水	替代燃煤 730 吨/年

3. 技术经济分析模型

3.1. 投资构成

基于 2023 至 2025 年实际运行数据核算，年均运行成本总计 369 万元。其中电费为主要支出项目，年耗电量 330 万千瓦时，按 0.60 元每千瓦时计，电费 198 万元，占总运行成本的 53.7%。药剂费合计 60

万元，占比 16.3%，具体包括絮凝剂(聚合氯化铝) 18 吨、阻垢剂 3.6 吨、还原剂(亚硫酸氢钠) 2.2 吨、次氯酸钠 12 吨、氢氧化钠 8.5 吨以及其他清洗剂和杀菌剂。膜更换费按超滤膜更换周期 5 年、反渗透膜更换周期 3 年进行年均摊销，为 45 万元，占比 12.2%。人工费按 6 名运行、化验及维护人员、每人年均 6 万元计，共 36 万元，占比 9.8%。设备维护费(含大修及备件)按设备原值的 1%计提，为 30 万元，占比 8.0%。

由此计算，吨水处理成本为 2.03 元每立方米。

3.2. 成本分析

项目总投资为 7000 万元，其中设备购置费用占比最高，达到总额的一半，主要用于超滤膜组件、反渗透膜组件、各类泵组、压滤机、换热器及电气自控系统等核心设备的采购。土建工程费用约占四分之一，用于建设沉淀池、设备间、水池及管沟等构筑物。剩余部分由安装工程、科研及设计费以及其他费用(含监理、验收、预备费等)构成，各自所占份额相近。各项投资的具体金额及占比详见表 3。

Table 3. Detailed composition of project investment in Hou'an coal mine
表 3. 后安煤矿项目投资构成明细

投资类别	金额(万元)	占比
土建工程	1800	25.7%
设备购置	3500	50.0%
安装工程	600	8.6%
科研及设计费	500	7.1%
其他费用	600	8.6%
合计	7000	100%

3.3. 替代方案投资对比

为论证本方案的经济优势，与传统“新水源井加长距离输水”方案进行投资对比。替代方案需建设 3 口新水源井(每口约 400 万元)、深井泵及配电(300 万元)、15 公里输水管路及泵站水池(1500 万元)、水源地征地及道路(800 万元)，加上 10 年期内穿越塌陷区的管线维护费用(年均 80 万元)，累计投资约 4600 万元。这尚未包括另建达标排放处理设施及长距离排水管渠所需的约 4200 万元。而本方案以 7000 万元一次性投资同时解决了供水和排污两大问题，综合投资优势显著。

4. 收益分析与经济效益评价

4.1. 直接收益构成

年直接收益可归纳为五个主要来源，合计 3459 万元。其中，替代自来水与节约排污费两项直接体现了水资源循环利用的环境经济价值。设备维护节约是收益构成中的主体部分，其产生机制在于：使用净化后的纯净水替代原有工业用水，有效消除了井下防尘喷雾系统、液压系统及矿用电动机因水质不良而频繁发生的结垢、堵塞和磨损，从而使相关设备的年度维护费用大幅降低。此外，煤泥资源化回收和空压机余热利用也贡献了可观的附加收益。各项收益的具体计算依据与金额详见表 4。

Table 4. Composition of annual direct benefits
表 4. 年直接收益构成

收益项目	计算依据	年收益(万元)
替代自来水	181.5 万 m ³ × 4 元/m ³	726
节约排污费	181.5 万 m ³ × 0.25 元/m ³	45
设备维护节约	替代工业用水带来的设备维护费降低	2530
煤泥销售收入	1.2 万吨 × 80 元/吨	96
余热节约燃煤	730 吨 × 850 元/吨	62
合计	—	3459

注：设备维护节约 2530 万元/年，包含防尘喷雾系统(2000 万)、液压系统(500 万)、电机(30 万)的维护费用降低。

4.2. 经济效益评价指标

项目计算期按 10 年(含建设期 1 年、运行期 9 年)考虑，折现率取 8%，设备残值率按 5%计。年净收益为总收益 3459 万元减去年运行成本 369 万元，得 3090 万元。静态投资回收期为总投资 7000 万元除以年净收益 3090 万元，约 2.26 年。动态投资回收期考虑资金时间价值后约为 2.52 年。净现值(折现率 8%)计算为 1.83 亿元。内部收益率达到 44.1%，远高于一般工业项目的基准收益率。效益成本比(总收益现值与总成本现值之比)为 3.62。上述指标表明，该项目经济效益极其显著。

4.3. 十年期综合效益

在十年运营期内，项目累计总收益约 3.46 亿元，累计运行成本约 0.37 亿元，累计净收益约 3.09 亿元，扣除初始投资 7000 万元后，净收益约为 2.39 亿元。这一财务表现使项目成为将环保投入转化为利润中心的典范。

5. 敏感性分析

为考察关键变量波动对项目经济性的影响，选取水价、电价、药剂费、膜寿命、人工费、维护费六个因素进行单因素敏感性分析，各因素在正负 20%范围内变化，以投资回收期和内部收益率为评价指标。

分析结果表明，水价是最敏感因素。水价上涨 20%时，投资回收期从基准的 2.26 年缩短至 1.95 年，缩短 13.7%，内部收益率从 44.1%提升至 51.2%；水价下跌 20%时，投资回收期延长至 2.68 年，延长 18.6%，内部收益率降至 36.8%。水价每变动 10%，投资回收期相应变动约 6.8%。这提示企业在投资决策时应高度关注当地水价政策及未来调整趋势。

电价是第二敏感因素。电价上涨 20%时，投资回收期延长至 2.41 年，延长 6.6%，内部收益率降至 40.3%；电价下跌 20%时，投资回收期缩短至 2.13 年，缩短 5.8%，内部收益率升至 48.6%。电价每变动 10%，投资回收期相应变动约 3.3%。可通过变频控制、高效电机等措施降低电耗以缓解电价波动的影响。

药剂费、膜寿命、人工费、维护费的影响相对较小。这些因素变动正负 20%时，投资回收期的变化幅度均不超过 3.5%，内部收益率变化幅度不超过 5.2%，说明项目具有较强的抗风险能力。

进一步进行盈亏平衡分析。年固定成本(折旧费 700 万元、人工费 36 万元、维护费 30 万元)合计 766 万元。单位变动成本(电费、药剂费、膜更换费)约 1.40 元每立方米，单位收益约 19.06 元每立方米。盈亏

平衡点产水量为固定成本除以(单位收益减单位变动成本),约 43.3 万立方米每年,仅占设计处理能力(181.5 万立方米)的 23.8%。这意味着项目即使在严重低负荷运行条件下仍可保本,抗风险能力极强,如表 5 所示。

Table 5. Results of single-factor sensitivity analysis
表 5. 单因素敏感性分析结果

变动因素	变动幅度	投资回收期(年)	变化率	IRR(%)	变化率
基准方案	—	2.26	—	44.1	—
水价	+20%	1.95	-13.7%	51.2	+16.1%
	-20%	2.68	+18.6%	36.8	-16.6%
电价	+20%	2.41	+6.6%	40.3	-8.6%
	-20%	2.13	-5.8%	48.6	+10.2%
药剂费	+20%	2.32	+2.7%	42.5	—
	-20%	2.21	-2.2%	45.9	+4.1%
膜寿命	+20%	2.19	-3.1%	46.2	+4.8%
	-20%	2.34	+3.5%	41.8	-5.2%
人工费	+20%	2.29	+1.3%	43.1	-2.3%
	-20%	2.24	-0.9%	45.2	+2.5%
维护费	+20%	2.33	+3.1%	42.2	-4.3%
	-20%	2.20	-2.7%	46.3	+5.0%

6. 环境效益与社会效益

6.1. 环境效益

采用生命周期评价方法量化项目主要环境效益。相比传统直排方式,项目年削减悬浮物排放约 3600 吨(十年累计 3.6 万吨),削减化学需氧量约 200 吨(十年累计 2000 吨),削减总溶解性固体约 900 吨(十年累计 9000 吨)。年节约新水开采量 181.5 万立方米,十年累计 1815 万立方米,相当于一个小型水库的蓄水量。余热回收年节约标准煤 730 吨,十年累计 7300 吨,相应减少二氧化碳排放约 1920 吨(按每吨标煤排放 2.62 吨二氧化碳计),十年累计 1.92 万吨。项目实现了矿井水零排放,从根本上消除了对地表水和地下水的污染风险。

6.2. 社会效益

该项目的社会效益主要体现在四个方面。其一,职业健康保障。纯净水用于井下防尘喷雾系统,从源头抑制煤尘产生,结合综合防尘措施,后安煤矿已连续 20 年未发生一例尘肺病,直接惠及数千名矿工及其家庭。其二,缓解区域水资源矛盾。在“宁舍一升米,不舍一碗水”的朔州平鲁区,项目年回用 181.5 万吨水,相当于为 2 万居民提供全年生活用水,有效缓解了生产、生活、农业之间的争水矛盾。其三,

降低作业安全风险。清淤人员从每班 6 至 7 人减少至 2 人，主水仓清淤时间从 40 天缩短至 8 至 10 天，井下高危作业风险显著降低。其四，行业示范引领。该技术通过绿色矿山产业联盟鉴定，达到国内先进水平，为山西乃至全国同类矿区提供了可复制的绿色矿山建设样板。

7. 结论与建议

7.1. 主要结论

第一，本文构建的“预沉淀 - 双膜法深度净化 - 水/泥/热全资源化”技术体系，实现了煤矿矿井水的 100% 零排放与全资源化利用。后安煤矿工程实践表明，处理规模 5500 立方米每日，出水水质达到国家直饮标准，年回用水 181.5 万立方米，回收煤泥 1.2 万吨，余热替代燃煤 730 吨。

第二，技术经济分析显示，项目总投资 7000 万元，年运行成本 369 万元，年总收益 3459 万元，年净收益 3090 万元。静态投资回收期 2.26 年，动态回收期 2.52 年，内部收益率 44.1%，净现值(折现率 8%) 1.83 亿元，效益成本比 3.62。经济效益极其显著。

第三，敏感性分析表明，水价和电价是影响项目经济性的最关键因素，药剂费、膜寿命等因素影响较小。盈亏平衡点仅占设计能力的 23.8%，项目抗风险能力极强。

第四，环境与社会效益突出：年削减悬浮物 3600 吨、二氧化碳 1920 吨，保障矿工职业健康(20 年无尘肺病)，缓解缺水地区用水矛盾，为行业绿色转型提供了可复制的技术范式。

7.2. 推广建议

政策层面，建议地方政府对矿井水资源化利用项目给予水价补贴、税收减免或绿色金融支持，以提升企业投资积极性。技术层面，进一步优化膜清洗工艺和智能控制算法，降低电耗和药剂消耗；探索浓盐水结晶分盐技术，实现更高水平的零排放。推广层面，以本工程为示范基地，面向山西、陕西、内蒙古等缺水矿区开展技术培训和推广，形成规模化应用效应。

参考文献

- [1] 卢波. 煤矿矿井水零排放处理技术及工程应用研究[J]. 能源与节能, 2025(12): 101-103.
- [2] 王爱雪, 张思嘉, 刘元博, 等. 煤矿矿井水处理站运行优化措施研究——以陕西某煤矿矿井水处理站为例[J]. 煤炭加工与综合利用, 2025(12): 103-107.
- [3] 贺安民, 马朝猛, 许多, 等. 我国西部煤矿矿井水保护利用现状及对策研究[J]. 中国矿业, 2026, 35(2): 126-137.
- [4] 米俊丽. 煤矿矿井水综合治理与循环利用研究[J]. 水上安全, 2026(5): 101-103.
- [5] 王涛. 某煤矿矿井水处理工艺优化与应用[J]. 云南化工, 2026, 53(5): 126-128.