



中深层地热水开发的环境影响及清洁利用途径 ——以陕西关中地区为例

王永军¹, 刘文革¹, 王少彬², 袁建明¹, 穆根胥³, 张育平^{4,5}, 赵晓峰⁶

1. 陕西省 139 煤田地质水文地质有限公司, 陕西 渭南 714000;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源利用与环境修复重点实验室, 北京 100101;

3. 陕西省地质调查院水工环地质调查中心/陕西省地热协会, 陕西 西安 710068;

4. 陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西 西安 710021; 5. 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021; 6. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055

摘要: 以陕西关中地区为例, 基于典型中深层地热资源利用的区域环境调查资料, 系统总结中深层地热水开发利用过程对水环境、土壤环境、生物环境、热环境以及大气环境的影响。在典型案例基础上, 重点关注中深层地热水回灌技术及地热尾水污染物处理技术在解决地热开发对环境污染中的作用, 提出中深层地热水清洁利用的途径和政策建议, 为今后地热资源可持续开发利用提供科学依据。

关键词: 地热水; 环境影响; 清洁利用; 地热水回灌; 陕西省

Environmental impact and clean utilization approach of middle-deep geothermal water development: A case study of Guanzhong area, Shaanxi Province

WANG Yong-jun¹, LIU Wen-ge¹, WANG Shao-bin², YUAN Jian-ming¹, MU Gen-xu³,
ZHANG Yu-ping^{4,5}, ZHAO Xiao-feng⁶

1. Shaanxi No. 139 Coal Geology and Hydrogeology Co., Ltd., Weinan 714000, Shaanxi Province, China; 2. Key Laboratory of Resources Utilization and Environmental Restoration, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Hydrogeology, Engineering Geology and Environment Geology Survey Center of Shaanxi Geological Survey Institute Shaanxi Geothermal Association, Xi'an 710068, China; 4. Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an 710021, China; 5. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, China; 6. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, CGS, Beijing 100055, China

Abstract: Taking Guanzhong area of Shaanxi Province as an example, the influences of development and utilization of middle-deep geothermal water on water, soil, biological, thermal and atmospheric environment are systematically summarized according to the regional environmental survey data of typical middle-deep geothermal resources utilization. Based on typical cases, the paper focuses on the role of middle-deep geothermal water recharge technology and

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-11-23. 编辑: 李兰英.

基金项目: 陕西省一三九煤田地质水文地质有限公司科研项目“关中地区中深层地热水有益有害组分及其开发的环境效应与对策”。

作者简介: 王永军(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事地热及水文地质研究, 通信地址 陕西省渭南市临渭区站北路 6 号, E-mail//254776016@qq.com

通信作者: 王少彬(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事工业企业污染防治、资源可持续利用及环境健康效应研究, 通信地址 北京市朝阳区大屯路甲 11 号, E-mail//wangshaobin@igsr.ac.cn

引用格式: 王永军, 刘文革, 王少彬, 袁建明, 穆根胥, 张育平, 赵晓峰. 中深层地热水开发的环境影响及清洁利用途径——以陕西关中地区为例[J]. 地质与资源, 2025, 34(3): 371-379.

Wang Y J, Liu W G, Wang S B, Yuan J M, Mu G X, Zhang Y P, Zhao X F. Environmental impact and clean utilization approach of middle-deep geothermal water development: A case study of Guanzhong area, Shaanxi Province [J]. Geology and Resources, 2025, 34(3): 371-379.

geothermal tailwater pollutant treatment technology in solving environmental pollution caused by geothermal development, and puts forward suggestions for ways and policy of clean utilization of middle-deep geothermal water, so as to provide scientific basis for the sustainable development and utilization of geothermal resources in the future.

Key words: geothermal water; environmental impact; clean utilization; geothermal water recharge; Shaanxi Province

0 前言

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》^[1]将地热列为“可再生能源低成本规模化开发利用”的优先主题,是新能源的重要组成部分.与传统化石能源相比,中深层地热能具有绿色、环保、清洁可再生等优势.对地热能的开发利用有助于实现绿色、稳定、可靠且安全的能源供应.地热能的开发基本上都以地热水为载体,因此,对地热水尤其是中深层地热水的研究十分重要.中深层地热水一般矿化度较高,由于高温和深循环过程中的水-岩相互作用,其一般含有硫化氢等有害气体以及氟、铅、砷、汞等重金属元素^[2-5].在地热资源的大规模开发利用过程中,地热尾水的不合理排放会对大气环境、水环境、土壤环境等造成损害和污染^[6-10],进而对人体健康造成风险^[11-12].因此,地热资源开发的环境影响及清洁利用已成为国内

外日益关注的问题.

陕西关中地区地热资源丰富,是我国最早进行开发利用的地区之一.关中断陷盆地储热层的发育与其沉积环境关系密切,大多数热储经过河流-湖泊环境及湖水的蒸发浓缩过程,可溶性离子经过富集使地下水尤其是深层热水矿化度增高,加之其多处滞流环境,深层热水中各类离子含量比较高,全区地热水矿化度为0.22~35.52 g/L,平均值为3.95 g/L(图1).随着地热供暖迅速发展,大量高矿化度的地热水被抽取并不合理排放,不仅造成地表水环境、土壤环境、热环境以及农作物和养殖业等污染,而且使深层地下水水位下降,造成资源匮乏等问题.关中地区地热开发快速增长,但对其开发所带来的环境影响研究比较薄弱.充分了解中深层地热开发利用过程中的环境效应,探讨环境保护技术途径,对合理开发利用地热资源、保证可

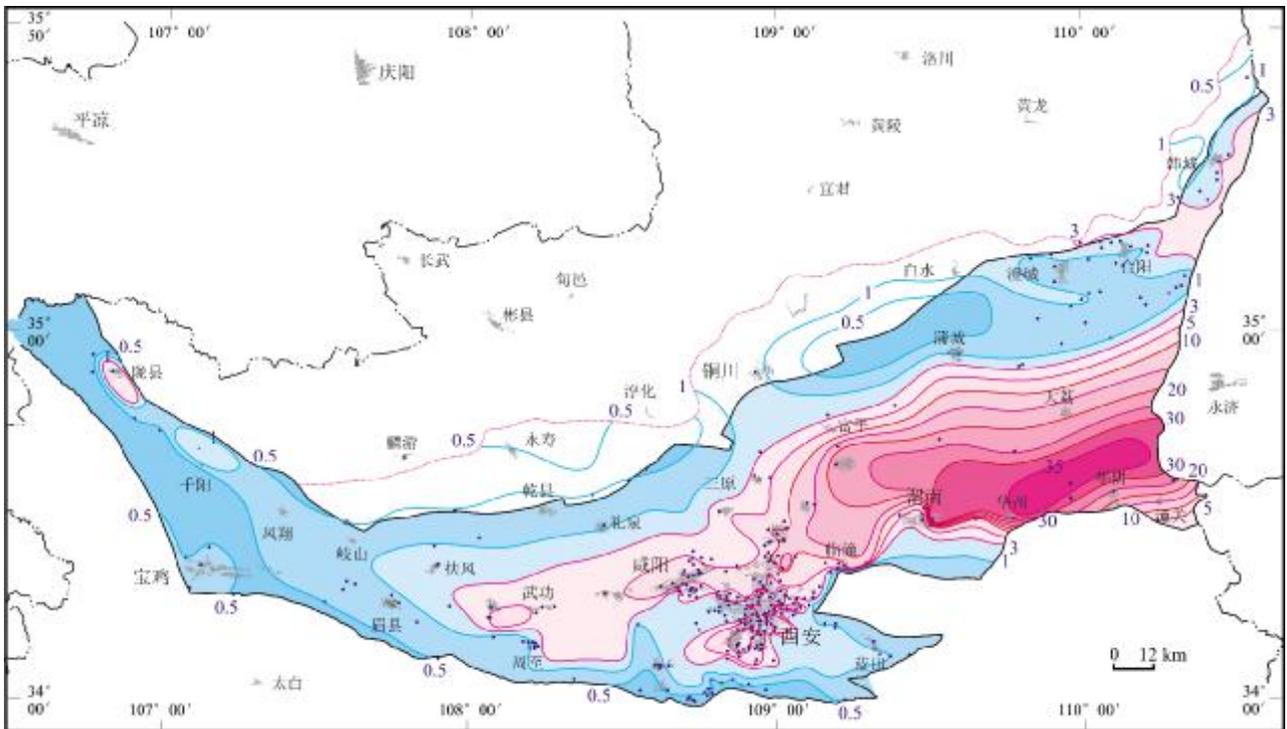


图1 陕西关中地区中深层地热水矿化度等值线图

Fig. 1 Contour map of mineralization degree of middle-deep geothermal water in Guanzhong area, Shaanxi Province

持续发展、保护环境具有重要意义. 本文以陕西关中地区为例, 基于陕西省地质环境监测总站、陕西省地质调查院以及陕西省煤田地质集团有限公司调查资料, 分析中深层地热资源开发的环境影响, 根据对中深层地热水清洁开发利用技术的梳理和案例研究, 进一步提出有针对性的可持续发展对策建议.

1 中深层地热水开发的环境影响

1.1 水环境影响

1.1.1 地表水水质影响

关中地区新生界孔隙型地热水的 pH 值为 8.6~9.0, 均呈碱性到弱碱性; 常规离子中钠离子(Na^+)、硫酸根离子(SO_4^{2-})、氯离子(Cl^-)相对较高, 一些地热井水中钠离子和硫酸根离子超标; 总溶解性固体(TDS)、砷(As)、钼(Mo)、偏硅酸(H_2SiO_3)和总硫化物含量相对较高, 个别地热井水中含有硫化氢(H_2S)气体, 部分地热井水化学需氧量(COD)超标; 氟离子(F^-)浓度 5.49~17.9 mg/L, 参照地表水和地下水质量标准, 其超标率达 100%. 目前, 关中深层地热水利用后的尾水一般不经处理直接排放. 西安、咸阳、宝鸡和渭南等城区及其周边城市化程度较高的郊区, 如长安、临潼、鄠邑、郭杜、泾河工业园等, 都排入污水管道与城市污水混合, 最终排至渭河或其支流. 靠近秦岭山前的地热水集中开发利用地段, 如宝鸡市眉县西汤峪、西安市长安区东大和蓝田县东汤峪(表 1), 以及地热井零星分布的其他地区, 如华州、罗敷、华阴等地, 地热尾水均就近排入外部环境, 对浅表水环境造成影响.

1.1.2 地下水水质影响

关中地区新生界孔隙裂隙型地热水对浅表水环境影响明显的地区多位于秦岭山前地带. 长安东大地区地热水利用比较集中, 据 5 个热水井及其附近 7 组地下水样分析成果显示, 浅层地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 而地热水水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型; 地热水的标志性元素氟化物含量 7.64~13.02 mg/L, 浅层地下水的氟化物含量均小于 1.0 mg/L, 其他成分也多无相关性. 据陕西省地质环境监测总站调查资料, 长安区东大上漆村有地热尾水污染现象. 该村处于山前洪积扇前缘, 村南地热尾水沿村西水渠外排, 蓄积在村西 3 个废弃鱼池中, 热水中 COD 和 F 含量分别为 43.124 mg/L 和 0.75 mg/L, 导致地下水中两者含量亦

达 43.124 mg/L 和 0.10 mg/L, 说明地热水尾水的随意排放使地下水中化学需氧量及氟化物含量超标(表 2).

1.2 土壤环境影响

1.2.1 土壤 pH 异常

深层孔隙型高矿化度地热水以多种方式利用后, 大量尾水排入地表水体, 灌溉农田, 对土壤环境产生了不同程度的影响. 由于混入地热尾水的灌溉水源 pH 值较高, 导致土壤 pH 值增加, 如长安东大地区灌溉水源的 pH 值为 7.13~8.76, 影响区的表层土壤 pH 值 7.35~8.31, 北大村北稻田中氟化物含量随深度增加总体增大; 而非影响区的表层土壤 pH 值在 7.0 左右, 如五星乡旱田中随深度的增加而减小, 落家庄的荒地中随深度的增加而增大. 综上所述, 受地热水影响的表层土壤(0~20 cm)中 pH 值均高于非影响区, 表土受地热水氟化物及 pH 值影响明显.

1.2.2 土壤重金属污染

地热水开发影响区表层土壤中 As、Cr 含量明显低于非影响区, 而 Cu、Pb 及 Zn 含量高于非影响区; 垂向上 5 种元素含量易在表层土壤聚集, 随深度的增加而减小, 对深部土壤影响不甚明显. 在地热水开发影响的耕作区, 表层土壤中 Cu、Pb 及 Zn 含量高于非地热水开发影响区, 尤其是山前洪积扇. 由于影响区的土壤质地较细, 比山前洪积扇的粗颗粒物更易吸附积累 Cu、Pb 及 Zn 元素, 且化学吸附的 Cu、Pb 及 Zn 迁移能力较弱. 测试结果显示, As、Cr、Cu、Pb 及 Zn 五种元素在表层土壤聚集, 其含量总体随土壤深度增加而减小, 但 Cr 含量随着土壤深度增加而增大. 因此, 研究地热水资源开发对土壤环境的影响, 主要考虑氟化物含量变化, 其次为 pH 值. 另外, 对影响土壤环境质量的重金属元素 As、Cr、Cu、Pb、Zn 等也应关注.

1.3 生物环境影响

1.3.1 农作物影响

地热水中含有多种重金属和其他有害元素, 如 F、Cr、Cd、Cu、Pb、As 等, 尤其是 F 含量超过了《农田灌溉水质标准(GB5084—2021)》^[13](2.0 mg/L)和《渔业用水评价标准(GB11607—1989)》^[14](1.0 mg/L). 长安区东大地热水氟化物含量超标严重, 地热水开发利用影响区内的农作物氟化物含量超标达 1.37~21.77 mg/L, 而非影响区的长安区官堰村农作物氟化物含量未超出国家食品要求. Pb、As、Cd 明显高于非影响区, 超过了国

表 1 关中典型地区地热水排放尾水主要水质指标

Table 1 Main water quality indexes of discharged geothermal tailwater in Guanzhong area

地区	取样地点	pH	TDS	F ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	COD
眉县西汤峪	汤峪河上游	7.25	81.3	0.28	0.05	1.28	<0.01	6.57
	汤峪河上游	7.44	71.7	0.15	0.01	2.06	0.16	57.47
	神农山庄	8.98	395	15.8	<0.003	<0.02	<0.01	14.71
	神农山庄	9	387	17.9	-	<0.02	0.03	12.68
	汤峪河下游	8.01	96.4	0.58	-	1.87	<0.01	6.57
	汤峪河下游	7.2	76.3	0.29	0.03	2.15	0.18	28.96
	汤峪河下游混合样 1	7.68	71.8	0.19	0.01	2.09	0.2	47.29
	汤峪河下游混合样 2	7.71	75.4	0.16	0.04	2.16	0.14	39.14
长安东大	特种渔场 XR095	8.73	358.00	12.50	<0.003	<0.02	0.34	71.72
	鸿禧山庄 XR144	8.76	343.00	11.14	0.52	<0.02	0.10	35.07
	北大渔场 XR154	8.74	252.50	7.89	<0.003	<0.02	0.48	4.53
	北大渔场 XR155	8.65	261.00	7.64	<0.003	<0.02	0.42	4.53
	国泰山庄 XR161	8.11	371.00	13.02	<0.003	<0.02	<0.01	43.21
	高冠峪河上游	7.63	71.30	0.13	<0.003	1.66	0.05	106.32
	高冠峪河下游	7.13	101.90	0.28	<0.003	2.56	0.04	24.89
	沔峪河上游	7.52	70.90	0.13	<0.003	1.48	0.01	59.50
	沔峪河下游	6.84	70.50	0.18	<0.003	1.27	0.06	0.50
	高冠峪、沔峪交汇处	7.71	94.20	0.20	<0.003	1.64	0.07	37.11
	沔河下游	6.97	101.40	0.31	0.01	1.70	0.04	24.89
	特种渔场	6.99	252.00	1.24	0.77	3.07	0.10	14.71
北大渔场	7.20	221.00	3.33	0.03	0.32	0.11	18.78	
蓝田东汤峪	蓝田汤峪疗养院	8.85	455.50	11.74	<0.003	<0.02	<0.01	12.68
	汤峪镇卫生院	8.27	214.00	0.33	0.01	8.24	<0.01	8.61
	汤峪镇卫生院	6.89	256.00	0.28	<0.003	9.43	<0.01	23.87
	蓝田汤峪堂子街	7.36	289.00	0.76	0.03	8.06	<0.01	21.84
	汤峪河上游	7.28	104.20	0.14	0.01	2.93	0.21	22.86
	汤峪河下游	7.24	115.40	0.40	<0.003	2.46	0.26	20.82

数据来源:陕西省地质环境监测总站及陕西省地质调查院(2009). 水质成分含量单位:mg/L.

表 2 西安市长安区东大地热水主要水质指标

Table 2 Main water quality indexes of geothermal water in Dongda area, Chang'an District, Xi'an City

取样地点	性质	pH	TDS	F ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	COD
长安东大特种渔场	地热水	8.73	358	12.50	<0.003	<0.02	0.34	71.72
长安东大鸿禧山庄	地热水	8.76	343	11.14	0.52	<0.02	0.10	35.07

数据来源:陕西省地质环境监测总站及陕西省地质调查院(2009). 水质成分含量单位:mg/L.

家粮食卫生标准,说明地热水对农作物中的氟化物等含量的升高产生明显影响.由于不同农作物或同种作物不同部位对污染物吸收的差异性,重金属元素在作物中的分布不一致.长安东大北大村的玉米植株中,F和Pb在玉米叶中含量最高,As在玉米秆中含量高,Cr和Cd在玉米根中含量较高.总体上玉米根易吸收微量元素,其次是玉米叶和玉米秆.水稻植株中As、Pb、Cr和F含量在水稻根部最高,Cd在叶部含量较高.

1.3.2 养殖业影响

地热水养殖是关中地区较为普遍的地热直接利用方式之一,宝鸡温水沟、长安东大、蓝田东汤浴、合阳洽川是直接利用地热水养鱼的典型地段,养殖鱼种包括罗非鱼、鲳鱼、鲤鱼、草鱼等.据有关研究,当渔业用水中F、As、Cr、Cd、Cu、Pb含量超过了渔业水质标准^[14]时,鱼类体内重金属元素将富集.由于地热水中一些元素含量超出了渔业用水标准^[14](表3),如果不经处理直接用于养殖,会造成鱼类产品重金属含量超标的风险.关中地热水造成的污染呈现差异性,氟化物含量最高的是宝鸡温水沟,Pb含量最高的是长安东大特种渔场.鱼肉中的氟化物含量超标最为严重,其次为Pb,部分地区Cd含量略超标,其他元素含量有所增加但未超标.

1.4 热环境影响

长安区东大钻成井投入使用36眼地热水井,井口水温40~98℃,地热尾水均排入附近泔河中,是研究地热资源开发对热环境影响的典型地段.据陕西省地质

环境监测总站及陕西省地质调查院的亮温统计,该地区约有45%的地热井处的亮温高于区内平均地面亮温,高出平均值0.31~6.75℃,说明地热开发已经对区域地温产生明显影响.地热水排放对泔河水温的影响具体表现在北石里头村北1.0 km处至泔河与高冠河交汇点,因地热尾水的排放,河水温度升高4.78~10.92℃,平均7.54℃,较参照点水温高出3.47℃,此段受地热开发影响最大,影响长度1.2 km.从泔河与高冠河交汇点至五星乡西南650 m处,河流水温4.11~8.06℃,平均为6.56℃,较参照点水温高2.03~2.29℃,平均2.49℃,为中等影响程度,影响长度1.0 km.从五星乡西南650 m处至与太平河汇合处及流出区外,河流水温4.45~8.38℃,平均为6.36℃,较参照点水温高2.29℃,为中等影响程度,影响长度3.5 km.

1.5 大气环境影响

地热水在钻探、测试和开采过程中会产生有害气体和悬浮物排放,这些气体中除了大量的水蒸汽外,就是硫化氢(H₂S)、氮气(N₂)和二氧化碳(CO₂),还有少量放射性气体如氡气(Rn),惰性气体如氦气(He)和氩气(Ar),可燃气体如甲烷、氢气等.渭河盆地地热水中H₂S含量较低,除了个别深井外,地热水硫化氢含量一般为0~0.61 mg/L;二氧化碳为不凝气体中的主要成分,区内一般含量在0~20 mg/L,最高88 mg/L.氮气和二氧化碳都是大气中基本的天然成分,通常不认为是污染.氡气在区内含量一般不高,除了个别接近深大断裂带附近的井泉外,浓度一般为0.167~37.27 Bq/L,

表3 地热水养殖鱼肉样品中重金属元素含量

Table 3 Contents of heavy metal elements in fish samples cultured in geothermal water

取样地点	鱼种	F	Cr	Cu	As	Cd	Pb	备注
合阳洽川处女泉	罗非鱼	10.81	0.48	2.41	0.08	0.01	0.05	对照点
宝鸡温水沟	罗非鱼	18.18	1.53	2.63	0.01	0.02	0.42	污染点
长安东大北大渔场	罗非鱼	10.54	0.21	2.35	0.01	0.13	0.71	污染点
长安东大特种渔场	罗非鱼	13.59	0.57	2.47	0.08	0.05	1.99	污染点
长安东大北大渔场	鲳鱼	10.31	0.16	2.34	0.00	0.08	0.34	污染点
合阳洽川处女泉	草鱼	8.33	1.16	2.66	0.01	0.02	0.64	对照点
合阳洽川处女泉	鲤鱼	4.32	0.30	2.92	0.00	0.02	0.13	对照点
鱼肉中元素限量标准	鱼类	≤2.0	≤2.0	≤50	≤0.5	≤0.1	≤0.5	国标

数据来源:陕西省地质环境监测总站及陕西省地质调查院(2009). 国标据文献[15]. 含量单位:10⁻⁶.

辐射源强度低于 10^{-6} mCi. 目前尚未有地热开发对大气环境造成污染的直接证据.

2 中深层地热水清洁开发利用途径

2.1 中深层地热资源综合监管

对地热水的综合监管,包括水温、水位、水质的定期检测,限量开采,定向排放等.除了考虑水质、水文地质资料和取水点附近地区的卫生状况外,还要考虑地方病因素和易于防护的区域和条件,考虑取水区影响半径范围内不得有污水灌溉、渗漏,管控有持久性和剧毒农药使用、渗水厕所、渗水坑等修建以及破坏深部土层的活动,严防取水层与地表水连通.在有矿井、矿山分布的地区应禁止将煤系地层、矿层污水排入岩溶地层,厂矿污水不经净化处理不得排入地表水体.建立综合监测网,如发现有污染源或污染隐患时,立即采取必要措施,启动应急预案,保护水源地水质.

2.2 地热尾水的排放管控与净化处理

尚未完善市政管网的地区应尽可能改进生产工艺,开展地热“三废”的综合治理,严禁使用不符合水质标准的尾水直接回灌,不得排入渗坑和渗井及地表.在排入处理设备前对明渠使用进行管控,以减少有毒有害气体释放.对地热水种植、养殖后的尾水排放开展生物净化与生态缓释区设置,在达到Ⅳ类水标准后排入地表水体.在缺少地下污水管网地区应加强对地热尾水的无害化处理,特别是新建在城市郊区的地热项目往往不具备完善的下水道管网,因此解决尾水水质问题十分必要.目前,对氟化物超标废水处理已经有比较成熟的工艺可供选择,如沉淀法、吸附法、反渗

透膜法以及冷冻法等^[16].地热尾水的综合处理方法主要包括磁分离法、电解法、反渗透膜法、气浮法、沉淀法、吸附法等物理方法,混凝法、离子交换法等化学方法,以及生物方法等.

2.3 深层地热水同层回灌技术

传统的地热供暖将地热水直接送入供暖系统,尽管该方式成本低,但环境隐患多、维修成本高,且尾水难以处理再用.直接利用地热水进行供暖,携带热能的中深层地热流体枯竭的速度远高于热能消耗速度,不利于地热资源的可持续开发.因此,地热尾水回灌是开发保护地热资源的有效措施^[17].目前,比较环保可行的中深层水热型地热资源供暖钻井工艺有:水平对接井组,也称为(直斜)采灌井组;同心(地理)管换热井;闭环地热换热系统(U型换热井组);以及针对中深层无水岩类的地岩热定向井组等.上述技术使高温地热水通过热交换器将热转换给一级换热系统进行供暖,换热后的尾水再通过热泵系统二级换热进行供暖,而热泵系统换热后的尾水经过“过滤”再回灌到回灌井中.这一方面避免了传统地热供暖中高矿化度地热水的腐蚀和结垢,另一方面通过完全回灌避免了高矿化度地热水对地表水体、土壤环境的污染,恢复了地热水流场.由于整个循环过程中地热水只经过物理的除砂、过滤和曝气,循环距离也仅从井口到换热器再到井口,未参与任何化学反应,成分不变,实现了原水同层回灌(图2).

为探索西安地区地热水回灌可行性及回灌效果,促进地热资源可持续开发利用,陕西省相关部门进行了多年的探索和试验,积累了丰富的基础资料.近年

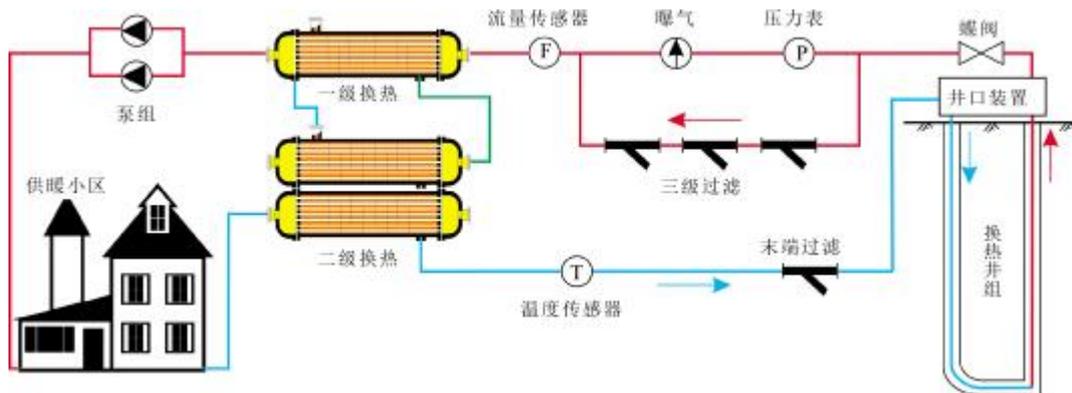


图2 中深层地热供暖系统简图

Fig. 2 Sketch of middle-deep geothermal heating system

来,为适应地热采暖需要,同时符合地热水开采超限规定,西安市水资源管理部门采取了采灌井组平衡灌采、以灌定采的工艺.这一方案已在西安市区、市属郊区县、西咸新区、咸阳市区及关中很多市县区得到普遍接受,在满足地热供暖需求的同时,又稳定了地热水水位,获得了良好的应用效果(表4).

3 对策建议

在总结中深层地热水开发环境影响的基础上,结合陕西关中地区和其他地区案例,进一步提出以下清洁开发利用的对策建议.

1)建议在全国及区域范围出台地热环境保护和清

洁开发政策,综合考虑区域政策导向、发展规划、市场需求等因素^[19],开展地热开发的环境承载力评价^[20],对地热资源开发产生的环境问题治理进行制度化设计.在这一方面,世界发达国家的成熟案例可供我国借鉴,例如新西兰^[21]、冰岛^[22]、日本^[23]、意大利^[24]、英国^[25]、美国^[26]等.上述国家率先开展了对地热开发利用环境影响的监测评估,提出了较为有效的预防保护措施,制定有关的法规以规范地热开发活动,对新的地热工程项目要求提交影响评价报告,建立健全监测计划以管控地热开发过程中潜在的环境影响.我国一些地区也制定了相应的政策.以陕西省为例,西安市各区县先后出台了一系列鼓励和引导地热资源清洁开发

表4 陕西关中地区深层热储部分回灌井回灌效果

Table 4 Effects of recharge wells for deep geothermal reservoir in Guanzhong area, Shaanxi Province

回灌点	实施时间	累计回灌量/(m ³ /h)	平均回灌量/(m ³ /h)	水位上升/m	回灌前水位/m	回灌后水位/m
西工院井组	2007—2013	18720	32.03	1.90	-136.1	-134.2
省宾馆废弃井	2012—2013	14590	24.94	1.70	-500.8	-498.3
西安春晓苑井	2010—2012	72000	25.56	4.00	-102.0	-98.0
西安雅荷井组	2010—2013	2005	3.00	不明显	-1.00	-1.00
三桥回灌井组	2013-02-04	14355	18.11	不明显	-62.97	-62.97
西安和兴园回灌井组	2018—2020	452160	78.5	灌采平衡		
临潼渭水曲项井组	2018—2020	290880	50.5	灌采平衡	-21.00	-21.00
西安碧水湾井组	2019—2020	244800	42.5	灌采平衡	0.10	0.10
咸阳文热1井组	2012—2018	631424	102.00	灌采平衡		
咸阳文热2井组	2014—2018	1379538	128.01	灌采平衡	-23.76	-23.76
咸阳日月星城井组	2015—2020	1170126	99.30	灌采平衡	-20.50	-20.50
咸阳文热七井组	2014—2020	1524690	115.60	灌采平衡		
咸阳宝石佳苑井组	2016—2018	65596	71.09	灌采平衡		
咸阳怡心岛井组	2016—2018	77772	51.45	灌采平衡		
咸阳廉租房井组	2015—2018	98512	75	灌采平衡		
咸阳职业学院井组	2018-02-03	42570	86.30	灌采平衡		
武功县1号井组	2016—2018	39320	45.60	灌采平衡	-10.00	-10.00
周至林业局小区井组	2018—2020	376128	65.3	灌采平衡		
眉县城区	2019—2020	193582	70-240	灌采平衡	+38.0	+38.0

利用的政策、措施,为区域地热资源清洁开发提供了发展规划与技术支持。

2)严控在建及新建中深层地热资源开发项目中的地热水污染问题,从源头防治潜在污染。例如,制定政策以积极引导地热采暖工程中的采灌井组实施“以灌定采”、换热供暖等技术方案,促进同层原水完全回灌,并在项目全过程实施进出水量监督和远程监控。对以往单向供暖的地热井补充施工回灌井,完善“闭环系统”换热供暖技术。陕西咸阳职业学院回灌井、咸阳三普1井回灌井、三普浅井回灌井等,均属对以往单向供暖系统的补充完善,不仅使地热尾水得到无害处理,也缓解了原始流场持续降低的趋势^[27]。陕西省兴平市地热主管部门对该项工作进行督导检查,要求各地热企业在回灌井补建到位之前开采井封井停用,并启动回灌井补建工作。

3)对于不能完全回灌的区域,建议逐步建立并完善地热尾水净化处理系统,实现地热尾水达标处理和无害化排放。西安市各区县,尤其是在长安区东大、东西汤峪等地热水集中开发区域,逐步建立了地热污水处理系统,从而为地热尾水的规范排放和达标处理提供了基础条件。此外,北京市^[16]、山东临沂^[28]、黑龙江松嫩盆地^[29]等地区开展的地热尾水中污染物处理实践,也为地热尾水的无害化排放技术方案的不断完善提供了有益借鉴。

4 结论

地下水尤其是深层地热水的开采过程中,往往造成高矿化度或含有害成分超标的地热尾水不合理排放,对浅表水环境、土壤环境、农作物和养殖业等造成污染风险。随着高矿化度的中深层地热水开采规模不断增加,其环境污染、资源衰减等问题日益严峻。因此,不仅要预防地热资源过度开发,更要有效治理中深层高矿化地热水对地表水、浅层地下水、土壤等环境污染。随着地热资源开发过程中的环境问题日益突出,政府主管部门应与时俱进,出台相应的环境保护和清洁开发政策,制定中深层地热资源清洁开发措施以规范地热开发活动,建立健全监测计划以监测地热开发过程中潜在的环境效应,限制和减少中深层高矿化地热水的直接开采与排放,鼓励在地热采暖回灌条件较好的区域实施中深层地热水回灌等清洁开发利用工程

项目,逐步建立和完善地热尾水污染物处理系统,促进地热资源开发利用的有序进行和可持续发展。

参考文献(References):

- [1]中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020) [EB/OL]. (2006-02-09) [2025-01-13]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm. State Council of the People's Republic of China. Outline of national medium and long-term science and technology development plan (2006—2020) [EB/OL]. (2006-02-09) [2025-01-13]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm. (in Chinese)
- [2]Mott A, Baba A, Hadi Mosleh M, et al. Boron in geothermal energy: sources, environmental impacts, and management in geothermal fluid [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112825.
- [3]Morales-Simfors N, Bundschuh J. Arsenic-rich geothermal fluids as environmentally hazardous materials: A global assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 817: 152669.
- [4]张薇, 王贵玲, 刘峰, 等. 中国沉积盆地型地热资源特征 [J]. *中国地质*, 2019, 46(2): 255-268. Zhang W, Wang G L, Liu F, et al. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins [J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 255-268.
- [5]Wang Y F, Cheng H F. Environmental fate and ecological impact of the potentially toxic elements from the geothermal springs [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(8): 6287-6303.
- [6]薛宇泽, 陶鹏飞, 韩元红. 渭河盆地中深层地热资源开发存在问题及改进措施 [J]. *资源环境与工程*, 2020, 34(3): 428-431. Xue Y Z, Tao P F, Han Y H. The problem and improvement measures of middle and deep geothermal resources development in Weihe Basin [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2020, 34(3): 428-431.
- [7]徐忠立. 地热开发利用中的环境影响及其防治措施 [J]. *环境与发展*, 2020, 32(7): 51, 53. Xu Z L. Environmental impact and prevention measures in geothermal development and utilization [J]. *Environment and Development*, 2020, 32(7): 51, 53.
- [8]吕灿. 研究地热开发利用过程中的环境效应及环境保护 [J]. *环境与发展*, 2020, 32(8): 241-242. Lü C. Environmental effects and environmental protection in the process of geothermal development and utilization are studied [J]. *Environment and Development*, 2020, 32(8): 241-242.
- [9]王龙平, 魏永霞, 程宏超, 等. 安徽长江经济带地热资源赋存特征及潜力评价 [J]. *中国地质*, 2022, 49(6): 1765-1777. Wang L P, Wei Y X, Cheng H C, et al. Characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone [J]. *Geology in China*, 2022, 49(6): 1765-1777.
- [10]丁亮, 赵彦涛. 浅析地热资源勘探开发与环境保护措施 [J]. *低碳*

- 世界, 2023, 13(8): 55-57.
- Ding L, Zhao Y T. Analysis of geothermal resources exploration and development and environmental protection measures[J]. *Low Carbon World*, 2023, 13(8): 55-57. (in Chinese)
- [11] Wang X T, Dan Z, Cui X Q, et al. Contamination, ecological and health risks of trace elements in soil of landfill and geothermal sites in Tibet[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136639.
- [12] Hu Y A, Cheng H F, Tao S. Environmental and human health impacts of geothermal exploitation in China and mitigation strategies [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2023, 53(11): 1173-1196.
- [13] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB5084—2021 农田灌溉水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021-04-30.
- Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. GB5084—2021 Standard for irrigation water quality [S]. Beijing: China Standards Press, 2021-04-30.
- [14] 农业农村部. GB11607—1989 渔业水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989-08-25.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs. GB11607—1989 Water quality standard for fisheries [S]. Beijing: China Standards Press, 1989-08-25.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. GB18406.4—2001 农产品安全质量无公害水产品安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001-08-06.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB18406.4—2001 Safety qualification for agricultural product; Safety requirements for non-environmental pollution aquatic products[S]. Beijing: China Standards Press, 2001-08-06.
- [16] 郑桂森, 李良景, 吕金波. 北京地热开采中的尾水氟处理方法[J]. *地质通报*, 2019, 38(2/3): 397-403.
- Zheng G S, Li L J, Lü J B. Research on method of processing tail water in geothermal exploration in Beijing[J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(2/3): 397-403.
- [17] 王贵玲, 陆川. 碳中和目标驱动下干热岩和增强型地热系统增产技术发展[J]. *地质与资源*, 2023, 32(1): 85-95, 126. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.01.011.
- Wang G L, Lu C. Stimulation technology development of hot dry rock and enhanced geothermal system driven by carbon neutrality target [J]. *Geology and Resources*, 2023, 32(1): 85-95, 126. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.01.011.
- [18] 王兴, 王少彬, 王鹏涛. 地热资源与清洁开发利用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2022: 301.
- Wang X, Wang S B, Wang P T. Geothermal resources: Clean development and utilization [M]. Shaanxi Science and Technology Press, 2022: 301. (in Chinese)
- [19] 张萌, 杨豪, 黄雯, 等. 杭嘉湖平原水热型地热资源综合评价与开发利用建议[J]. *地质与资源*, 2023, 32(4): 445-452.
- Zhang M, Yang H, Huang W, et al. Comprehensive evaluation and suggestions for development and utilization of hydrothermal resources in Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain [J]. *Geology and Resources*, 2023, 32(4): 445-452.
- [20] 王卓卓. 中深层水热型地热资源环境承载力评价系统及建立方法[J]. *城市地质*, 2021, 16(2): 147-155.
- Wang Z Z. Evaluation system and establishment method of geothermal resources and environmental carrying capacity in medium-deep layers [J]. *Urban Geology*, 2021, 16(2): 147-155.
- [21] Van Campen B, Petursdottir H. Geothermal sustainability regulation in Iceland and New Zealand [C]//Proceedings of the European Geothermal Congress 2016. Strasbourg, 2016.
- [22] Kristmannsdóttir H, úrmansson H. Environmental aspects of geothermal energy utilization[J]. *Geothermics*, 2003, 32(4/6): 451-461.
- [23] Tonka S K, Ekmekci I. A model proposal for occupational health and safety performance measurement in geothermal drilling areas[J]. *Sustainability*, 2022, 14(23): 15669.
- [24] Manzella A, Bonciani R, Allansdottir A, et al. Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy[J]. *Geothermics*, 2018, 72: 232-248.
- [25] Nicholson K. Environmental protection and the development of geothermal energy resources [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 1994, 16(2): 86-87.
- [26] Finster M, Clark C, Schroeder J, et al. Geothermal produced fluids: Characteristics, treatment technologies, and management options[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 952-966.
- [27] 王鹏涛. 地中海2井动水位不稳定原因分析[J]. *中国科技期刊数据库: 工业 A*, 2016, 21(8): 98.
- Wang P T. Analysis on the cause of instability of dynamic water level in Dizhonghai-2 well [J]. *Chinese Science and Technology Journal Database: Industry A*, 2016, 21(8): 98. (in Chinese)
- [28] 刘连, 冷旭勇, 李庆义, 等. 临沂市地热尾水环境负效应及处理方案研究[J]. *地下水*, 2023, 45(3): 26-28.
- Liu L, Leng X Y, Li Q Y, et al. Study on the negative environmental effects of geothermal tailwater and treatment options in Linyi City[J]. *Ground Water*, 2023, 45(3): 26-28.
- [29] 李永利, 于长生, 姜智超, 等. 松嫩盆地北部林甸地热田供暖尾水处理试验[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 188-194.
- Li Y L, Yu C S, Jiang Z C, et al. An experimental study of heating tail water treatment of the Lindian geothermal fields in the northern Songnen Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 188-194.