

蒙陕接壤区煤炭开采过程中矿井水来源

杨 建^{1,2,3}, 李 慧^{1,2,3}

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要:蒙陕接壤区作为我国能源安全的核心保障区域, 同样也是黄河流域生态保护和高质量发展的关键地带。该区域煤炭资源的高强度开采可能对生态环境造成重大影响, 尤其是对地表以下浅层第四系含水层的破坏。由于难以精确评估顶板各含水层的渗漏情况, 这增加了制定科学、有效的保水采煤策略的难度。本研究基于对蒙陕接壤区地下水中环境同位素 (D 和 ^{18}O) 的检测与分析, 应用同位素质量守恒原理, 计算了矿井水水源的相对贡献量。研究发现, 各含水层水中的环境同位素受地形地貌、地层结构和地下水赋存等因素的影响。研究区的第四系地下水主要来源于大气降水和地表水, 具有快速的循环更替速度, 表现为富含氘的现代水补给特征, 其 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值与大气降水和地表水相近。深埋区的白垩系与第四系水力联系紧密, 循环更替过程较长, 导致环境同位素值有所降低。白垩系和侏罗系地下水受垂向补给控制, 循环更替速度减缓, δD 值和 $\delta^{18}O$ 值逐渐降低, 其中白垩系地下水的 δD 值为 $-80.2\% \sim -75.6\%$, $\delta^{18}O$ 值为 $-10.6\% \sim -8.7\%$ 。浅埋区和中深埋区地层由于沉积时间长, 成岩作用较好, 加之后期构造运动的影响, 与第四系或新近系直接接触, 接受第四系地下水补给, 导致 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值相对较高。而深埋区的侏罗系地层由于本身厚度较大, 上覆有厚层的第四系和白垩系地层, 地下水补给条件较差, 地下水径流过程漫长且较为封闭滞流, 因此 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值相对较低。本研究利用地下水中的 δD 值, 通过二元混合模型计算得出, 在浅埋区的矿井水中, 第四系水的比例有所不同: SGT 和 HLG 煤矿的占比小于 20%, 而 BLT 和 LSJ 等煤矿的占比介于 28.0%~57.0%, YBJ 煤矿的占比则接近 80%。在中深埋区, 矿井水中第四系水的比例通常小于 20%, 但在开发较早、顶板存在保德组红土层"天窗"的 HLW 和 SS 煤矿中, 第四系水的比例分别达到了 37.05% 和 26.24%。在深埋区, 矿井水中白垩系水的占比约为 30%。IsoSource 模型的计算结果显示, 第四系水的贡献率在 7.6%~9.3% 间, 白垩系水的贡献率在 12.0%~17.1% 间, 而侏罗系上段水的贡献率在 74.9%~80.4% 间, 且不同矿区的矿井水中各水源的贡献率相近。本研究准确识别了矿井水中各含水层水的来源比例, 对于蒙陕接壤区的保水采煤和生态环境保护具有重要的实际意义。

关键词: 环境同位素; 矿井水; 煤炭开采; 水源判别模型; 顶板地层结构

中图分类号: TD74 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-1255-13

Source of mine water during coal mining in the contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi

YANG Jian^{1,2,3}, LI Hui^{1,2,3}

收稿日期: 2024-05-24 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0577

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目 (2022SF-046); 国家自然科学基金资助项目 (41302214)

作者简介: 杨 建 (1979—), 男, 江苏盐城人, 研究员, 博士生导师。E-mail: yangjian@mail.bnu.edu.cn

引用格式: 杨建, 李慧. 蒙陕接壤区煤炭开采过程中矿井水来源[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1255-1267.

YANG Jian, LI Hui. Source of mine water during coal mining in the contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1255-1267.



移动阅读

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The region where Inner Mongolia and Shaanxi converge is pivotal for the underpinning of national energy security and is also central to the ecological conservation and sustainable development of the Yellow River Basin. Intensive coal extraction in this zone potentially poses a substantial threat to ecological conservation, notably by undermining the integrity of the shallow Quaternary groundwater environment. Accurate assessment of the leakage from various aquifers within the overburden is a complex task, thereby complicating the development of scientifically sound and targeted strategies for water conservation during coal mining. Our research leverages the principle of isotopic mass balance, following the analysis of environmental isotopes (Deuterium and Oxygen-18) present in the groundwater of the aforementioned border region, to quantify the relative contributions of different mine water sources. Findings indicate that the isotopic signatures in the aquifer waters are influenced by a multitude of factors including topography, stratigraphic configuration, and the nature of groundwater storage. The direct sources of groundwater in the Quaternary aquifer of the study area are atmospheric precipitation and surface water, characterized by rapid circulation and renewal, replenished by modern water with tritium-rich features. The deuterium (D) and oxygen-18 (^{18}O) values in the groundwater are close to those of atmospheric precipitation and surface water. In the deep-buried Cretaceous aquifer, the hydraulic connection with the Quaternary is tight, and the cycle and renewal process is prolonged, resulting in a decrease in environmental isotope values. The deuterium values in the Cretaceous groundwater range from -80.2‰ to -75.6‰ , and the oxygen-18 values range from -10.6‰ to -8.7‰ . The groundwater in the Jurassic aquifer, which is controlled by vertical recharge, exhibits a slower cycle and renewal rate, with gradually decreasing δD and $\delta^{18}\text{O}$ values. The shallow and moderately deep-buried strata have a long depositional history and better cementation, affected by later tectonic movements, and are in direct contact with the Quaternary or Neogene, receiving replenishment from Quaternary groundwater, thus having relatively higher δD and $\delta^{18}\text{O}$ values. In contrast, the Jurassic strata in the deep-buried area, with its substantial thickness and overlying thick layers of Quaternary and Cretaceous strata, have poor groundwater replenishment, a long groundwater flow path, and are relatively closed and stagnant, resulting in relatively lower δD and $\delta^{18}\text{O}$ values. The application of the D-value, in conjunction with the binary mixing model, facilitates the quantitative assessment of the contribution of Quaternary waters in shallow-buried coal mine waters. In the case of the SGT and HLG coal mines, the proportion of Quaternary waters is typically less than 20%. In contrast, the Quaternary water content in the BLT and LSJ coal mines varies between 28.0% and 57.0%. Notably, the Quaternary water proportion in the YBJ coal mine approaches 80%, indicating a significantly higher contribution. For the middle and deep-buried coal mine waters, the Quaternary water content is generally less than 20%. However, it is noteworthy that in the HLW and SS coal mines, which have been developed earlier and feature 'skylights' of the Puding Formation red soil layer in the roof, the Quaternary water content has reached 37.05% and 26.24%, respectively. This suggests that under specific geological conditions, the proportion of Quaternary waters may be substantially elevated. In the deep-buried mine waters, the contribution of Cretaceous water is approximately around 30%. IsoSource modeling has calculated that the contribution rate of Quaternary water ranges from 7.6% to 9.3%, the contribution rate of Cretaceous water is between 12.0% and 17.1%, and the contribution rate of the Upper Jurassic water is from 74.9% to 80.4%. Moreover, the contributions of various sources to the mine waters are similar across different mining areas. By using the D content value in groundwater and a binary mixed model, it was calculated that the proportion of Quaternary water in shallow buried mine water was less than 20% for SGT and HLG coal mines, 28.0% to 57.0% for BLT and LSJ coal mines, and nearly 80% for YBJ coal mines; The proportion of Quaternary water in the mine water in the middle and deep buried areas was generally less than 20%. The proportion of Quaternary water in HLW and SS coal mines, which were developed earlier and had a "skylight" in the red soil layer of the Baode Formation on the roof, reached 37.05% and 26.24% respectively. The proportion of Cretaceous water in deep buried mine water was about 30%. The IsoSource model calculates that the contribution rates of Quaternary water were between 7.6% and 9.3%, Cretaceous water was between 12.0% and 17.1%, and the contribution rates of upper Jurassic water were between 74.9% and 80.4%. The contribution rates of various

sources of mine water in different mining areas were similar. This study accurately identified the proportion of water sources in various aquifers of mine water, which was of great significance for ecological environment protection and green and sustainable development of coal resources in the contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi. Accurately identifying the source proportions of water from various aquifers in mine water is of significant importance for the conservation of water resources and ecological protection in the coal mining areas bordering Inner Mongolia and Shaanxi. This study aims to provide a precise delineation of these proportions, thereby contributing to sustainable mining practices and the preservation of the ecological environment in the region.

Key words: Environmental isotopes; Mine water; Coal mining; Water source discrimination model; Roof strata structure

0 引言

我国能源禀赋特征决定了煤炭是未来长期稳定的主体能源^[1-2],对我国能源安全具有兜底保障作用。2022年我国煤炭产量高达45.6亿t,是全球最大的煤炭生产和消费国,且仍处于基本稳定甚至缓慢增加态势。随着东部煤炭资源的枯竭,近二三十年来,正在西部鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地等赋煤区高强度开采,其中鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田又是重中之重(特别是蒙陕接壤区域)^[3-5],该地区具有煤层厚度大、煤质优良、地质条件简单等特点^[6-11],但是蒙陕接壤区属于近20a来新开发区域,煤层赋存条件、覆岩地层结构、含水层空间展布等变化较大,对研究区水文地质条件和开采扰动下水文地质结构变异特征仍不清楚,难以掌握煤炭开采过程中对顶板水文地质结构变异特征和各含水层地下水的漏失情况^[12-16]。煤炭开采过程中,对围岩结构破坏和含水层扰动的过程较为复杂,难以准确判断顶板各含水层漏失情况(包括直接漏失、侧向补给和越流下渗等)和矿井水的来源。化探技术是快速判断井下涌突水/矿井水水源的重要手段,用于水源判别的方法和手段种类繁多,其中基于常规水化学组分的水源判别方法是煤矿最重要和最常用的方法,通过分析矿井水的水化学类型、离子比例系数、三线图、舒卡列夫式等特征进行水源判别^[17-18];鉴于微量元素可以显示化学的微观信息^[19-20],在多个矿区实现了对于水质相近矿井水的判别。同位素技术从20世纪50年代应用于水文地质领域^[21],逐渐发展成为水文地质学重要的现代研究方法之一,特别是在地下水混合的定量化研究方面,解决了常规水文地质学方法已经无法解决的问题,煤炭行业中含水层水化学特征区分、突水水源等判别等方面得到了广泛应用^[22-23]。随着西部煤炭资源高强度开采引起顶板水资源漏失愈发严重,如何准确判别矿井水中各含水层水的来源比例,为矿区水资源保护(即保水采煤)提供科学支撑,对蒙陕接壤区煤炭资源安全绿色可持续开发具有重

要意义。

1 研究区概况

蒙陕接壤区位于鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田北部(图1),属于黄土高原与毛乌素沙漠过渡地带,研究区范围内以沙漠、黄土和基岩台地地貌为主^[24-25],其中风沙地貌区覆盖研究区大部分区域,地势平坦,降雨入渗系数大,第四系风积沙和萨拉乌苏组共同构成了富水性较强的含水层系统^[26-27];浅埋风沙地貌区第四系地层与侏罗系地层直接接触,导致侏罗系顶部风化基岩富水性也较强;深埋风沙地貌区第四系与白垩系洛河组之间区域性稳定隔水层缺失,总体上构成了一个统一的地下水系统,洛河组含水层富水性普遍中等—强。黄土地貌区位于神府、榆神东部、榆横南等区域,以黄土梁为主,坡面发育有细沟和浅沟,降水多以地表径流形式汇入地表河流,降雨入渗系数小(0.1左右)^[28],第四系含水层富水性较弱。基岩台地地貌区位于新街、神东北部等区域,白垩系紫红色中、粗砂岩直接裸露,地表坡度较大,厚层状,降水入渗系数小(0.087)^[29],白垩系含水层富水性较弱。

2 样品采集和检测分析

基于蒙陕接壤区地形地貌、煤层埋藏、覆岩结构等条件(图2),选择SGT、HLG、CJT、SS、HQB、BLS等24个煤矿的含水层水、矿井水为研究对象,结合各井田水文地质和水文地球化学特征,开展蒙陕接壤矿区煤炭开采过程中矿井水来源研究(表1)。24个煤矿中,SGT、HLG等9个煤矿位于浅埋煤田区(煤层埋深一般<150m),煤层上覆第四系黄土层/松散层和侏罗系基岩层,煤炭开采过程中导水裂缝带可沟通第四系或直接发育至地表,导致第四系含水层水和侏罗系含水层水进入井下;CJT、SS等8个煤矿位于中深埋煤田区(煤层埋深一般在150~350m),大部分煤矿煤层上覆第四系松散层+黄土层+新近系红土层和侏罗系基岩层,个别煤矿煤层上覆第四系松散层+白垩系

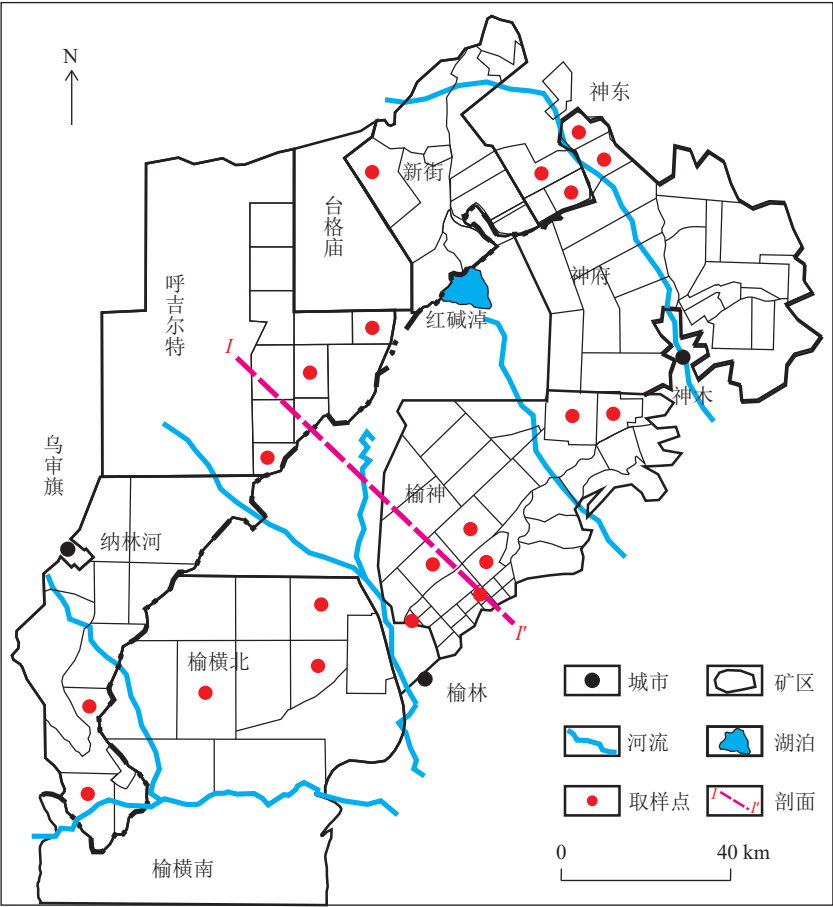


图 1 研究区位置示意

Fig.1 Schematic map of research area location

基岩+侏罗系基岩, 导水裂缝带可发育至风化基岩段或正常基岩段(都属于侏罗系岩层), 局部能够进入保德红土层下部, 导致风化基岩含水层水和侏罗系完整基岩含水层水进入井下; HQH、BLS 等 7 个煤矿位于深埋煤田区, 覆岩由第四系、白垩系、侏罗系等地层组

成, 包括富水性中等、厚度较大的白垩系洛河组含水层, 煤层埋深相对较大 (> 300 m), 少部分矿井煤炭开采发育的导水裂隙带可沟通白垩系洛河组含水层; 大部分煤矿的导水裂隙带只发育至直罗组含水层(直罗组底部的七里镇砂岩是最主要充水含水层)。

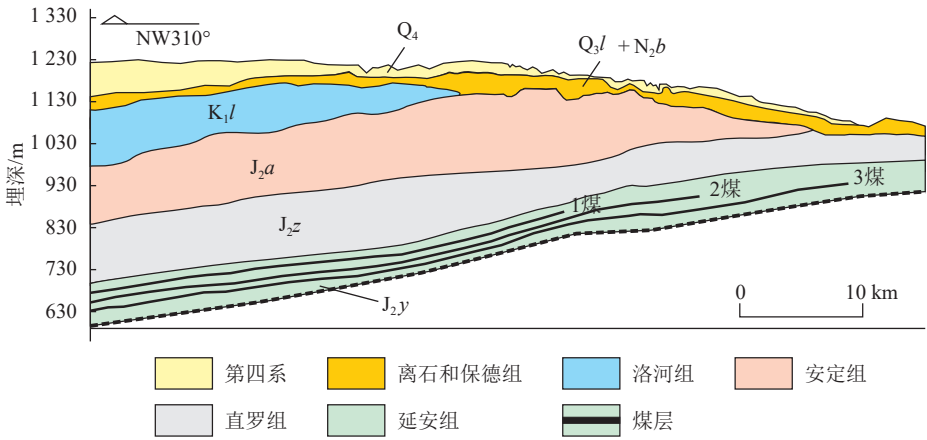


图 2 煤层覆岩地层剖面图 (I—I')^[13]

Fig.2 Stratigraphic profile of coal roof (I—I')^[13]

研究区范围内 SGT、HLG、CJT、SS、HQH 等矿井在地质勘探和矿井建设期间, 各含水层地下水处于天然状态, 水样的水化学特征值(包括环境同位素)代

表了该含水层地下水的原始特征, 本研究在水文补勘工程或矿井建设期间井下揭露过程中的水样采集和检测, 建立研究区范围内不同埋深条件下各含水层环

表 1 蒙陕接壤区取样点基本情况

Table 1 Basic situation of each mine in the contiguous area of Inner Mongolia and Shaanxi

编号	煤矿	埋深类型	覆岩结构	导水裂隙带沟通地层	备注	
No.1	SGT	浅埋	第四系黄土+侏罗系基岩	第四系、侏罗系	背景样品	判别样品
No.2	HLG	浅埋	第四系黄土+侏罗系基岩	第四系、侏罗系	背景样品	判别样品
No.3	BLT	浅埋	第四系黄土+侏罗系基岩	第四系、侏罗系	背景样品	
No.4	SW	浅埋	第四系黄土+侏罗系基岩	第四系、侏罗系	背景样品	
No.5	XMT	浅埋	第四系松散层+侏罗系基岩	第四系、侏罗系		判别样品
No.6	LD	浅埋	第四系松散层+侏罗系基岩	第四系、侏罗系		判别样品
No.7	JJ	浅埋	第四系松散层+侏罗系基岩	第四系、侏罗系		判别样品
No.8	LSJ	浅埋	第四系松散层+侏罗系基岩	第四系、侏罗系		判别样品
No.9	YBJ	浅埋	第四系松散层+侏罗系基岩	第四系、侏罗系		判别样品
No.10	YSW	中深埋	松散层+黄土+红土+侏罗系基岩	侏罗系		判别样品
No.11	CJT	中深埋	松散层+黄土+红土+侏罗系基岩	侏罗系	背景样品	判别样品
No.12	JJT	中深埋	松散层+黄土+红土+侏罗系基岩	侏罗系		判别样品
No.13	SS	中深埋	第四系+黄土+红土+侏罗系基岩	侏罗系	背景样品	判别样品
No.14	MHL	中深埋	松散层+黄土+红土+侏罗系基岩	侏罗系		判别样品
No.15	HLW	中深埋	松散层+黄土+红土+侏罗系基岩	侏罗系		判别样品
No.16	XBD	中深埋	第四系+黄土+红土+侏罗系基岩	侏罗系		判别样品
No.17	YDT	中深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	侏罗系	背景样品	
No.18	XJH	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	侏罗系		判别样品
No.19	HQH	深埋	白垩系+侏罗系基岩	侏罗系	背景样品	判别样品
No.20	SLWS	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	侏罗系		判别样品
No.21	BYGL	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	侏罗系	背景样品	判别样品
No.22	BLS	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	侏罗系	背景样品	
No.23	THT	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	侏罗系	背景样品	
No.24	NLH	深埋	第四系+白垩系+侏罗系基岩	侏罗系	背景样品	

注：背景样品为样品采集自水文补勘过程中，属于各含水层的同位素背景值；判别样品为样品采集自煤矿已经进入大规模高强度开采阶段的井下矿井水，矿井水往往来自上覆多个含水层的混合。

境同位素背景值。在此基础上,为了开展矿井水来源研究,又采集了各矿井中央水仓或采空区出水样品。同位素指标(氘(D)、氧(¹⁸O)、氚(T))由中煤科工西安研究院(集团)有限公司(即陕西省煤矿水害防治技术重点实验室)或中国地质科学院岩溶地质研究所检测分析。

3 结果与讨论

3.1 地下水更新情况

研究区降水中 T 浓度为 27.9Tu(采集自 CJT 煤矿),地表河流中 T 浓度为 2.96~17.2Tu,第四系地下水中 T 浓度为 8.6~29.8Tu,均为富氚特征的现代水补给;BYGL 等煤矿的基岩(白垩系、侏罗系地层)地下水中 T 浓度普遍 < 2Tu(氚的测试精度),为地质历史时期补给;而 NLH、YDT、SGT 等区域的基岩地下水

中 T 浓度在 2.0~16.6Tu 间(表 2)。研究区 NLH、YDT 等煤矿侏罗系地下水中氚(T)同位素出现了明显的富氚现象,表明风积沙地貌条件下,大气降水和地表水垂向入渗能力较强,地下水垂向水力联系较好,近几十年内(1952 年以后),浅层地下水一直补给深层基岩地下水,使部分地区的深层地下水得到了持续更新。

3.2 同位素背景特征

本研究采集的雨水样品中 δD 值和 δ¹⁸O 值分别为-52.0‰和 -7.9‰,结合前人在该区域的研究成果发现,当地降水线斜率小于 6.6,截距小于 10,反映了蒙陕接壤区为内陆干旱气候条件、降水蒸发量大。在特牛川、乌兰木伦河、纳林河、无定河等黄河—2 级支流采集水样,其中绝大部分 δD 值为-61.0‰~-49.0‰,δ¹⁸O 值为-8.0‰~-6.1‰;个别水样(位于乌兰木伦河流域)中 δD 值小于-75.0‰,δ¹⁸O 值小于 -9.0‰,主要

表 2 研究区氚 (T) 同位素分析结果

Table 2 Isotope analysis results of tritium (T) in the research area

煤矿	编号	层位	氚(T)浓度/Tu	矿井/矿区	编号	层位	氚(T)浓度/Tu
CJT	1-1	雨水	27.9	BYGL	S8-1	侏罗系	< 2.0
	NLH-1	地表水	15.9		S1-2	侏罗系	< 2.0
NLH	NLH-2	地表水	4.56		S12-1	侏罗系	< 2.0
	NLH-3	地表水	2.96		S5-1	侏罗系	2.1
	SGT-1	地表水	9.6		S1-2	侏罗系	< 2.0
SGT	SGT-2	地表水	17.2		S8-2	侏罗系	< 2.0
	SGT-3	地表水	12.0		S5-2	侏罗系	2.1
BYGL	S12-1	第四系	29.8		S1-1	侏罗系	< 2.0
	SGT-4	第四系	11.5		S8-3	侏罗系	2.3
SGT	SGT-5	第四系	10.1		S8-1	侏罗系	< 2.0
	SGT-6	第四系	15.8		S13-1	侏罗系	2.2
CJT	18T-55-363	第四系	8.6	NLH	S5-1	侏罗系	3.4
	S1-1	白垩系	< 2.0		NLH-4	侏罗系	< 2.00
	S8-2	白垩系	< 2.0		NLH-5	侏罗系	3.82
BYGL	18T-55-364	侏罗系	< 2.0		NLH-6	侏罗系	4.32
	18T-55-365	侏罗系	< 2.0		NLH-7	侏罗系	12.2
	ZLC-1	侏罗系	12.43		NLH-8	侏罗系	< 2.00
CJT	18T-55-364	侏罗系	< 2.0		NLH-9	侏罗系	< 2.00
	18T-55-365	侏罗系	< 2.0		SGT-7	侏罗系	16.2
	ZLC-6	侏罗系	15.55				
YDT	ZLC-3	侏罗系	7.53				

是由于侏罗系基岩水补给地表河流导致的。大气降水和地表水是研究区地下水的主要补给来源,在下渗过程中,不同区域的不同含水层中环境同位素特征差异显著。

1) 浅埋区

蒙陕接壤区的浅埋煤田区主要位于神东、神府、榆神等矿区,根据浅埋区环境同位素分布特征,可以分为第四系、侏罗系上段和侏罗系煤层间等地下含水层(组)水流系统。第四系松散孔隙含水层包括风积沙层、萨拉乌苏组粉细砂层或离石组黄土层构成,地下水中 δD 值在 $-73.0\text{‰} \sim -58.0\text{‰}$ 间, $\delta^{18}O$ 含量在 $-9.0\text{‰} \sim -7.3\text{‰}$ 间(图 3),与地表水较为接近,反映了第四系水直接接受大气降水和地表水补给,地下水循环更替速度快。侏罗系上段含水层组,研究区内侏罗系最上主采煤层(大部分为 2 号煤层)为隔水底板,地下水循环深度在 150 m 以浅,侏罗系上段与第四系直接接触,直接接受第四系补给, δD 值和 $\delta^{18}O$ 值与第四系接近(δD 值在 $-78.0\text{‰} \sim -59.0\text{‰}$ 间, $\delta^{18}O$ 值在 $-9.5\text{‰} \sim -7.6\text{‰}$ 间),但是由于该层段成岩较早,含水层中孔隙、裂隙发育条件较差,具有不均一性,地下水补给径流历程变长,总体上 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值均有略有减小。侏罗系煤层间含水层位于最上主采煤层下部(本次主要

采集自 2 号煤层~5 号煤层间含水层),地下水中 δD 值在 $-86.0\text{‰} \sim -67.46\text{‰}$ 间, $\delta^{18}O$ 值在 $-11.95\text{‰} \sim -9.51\text{‰}$ 间, δD 值和 $\delta^{18}O$ 值比侏罗系上段有较明显减小,该层段孔隙裂隙发育条件更差,地下水补给历程漫长、更新缓慢。

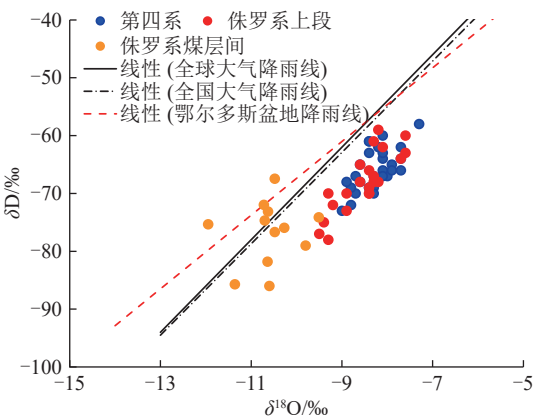


图 3 浅埋区地下水 δD - $\delta^{18}O$ 值分布

Fig.3 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in groundwater in shallow buried area

2) 中深埋区

蒙陕接壤区的中深埋煤田区主要位于榆神一期和二期,目前绝大部分煤矿只开采最上主采煤层,地

下水系统可分为第四系含水层(主要为风积沙层和萨拉乌苏组)和侏罗系含水层(主要为煤层顶板延安组和直罗组),2个含水层之间发育有离石组黄土弱富水含水层和保德组红土相对隔水层。第四系含水层水中 δD 值在 $-74.73\text{‰} \sim -56.3\text{‰}$ 间, $\delta^{18}O$ 值在 $-10.22\text{‰} \sim -7.44\text{‰}$ 间(图4),反映出与浅埋区类似的地下水补给和循环交替成因。由于受到离石组黄土弱富水含水层和保德组红土相对隔水层的作用,侏罗系上段含水层中环境同位素含量比第四系有明显减小, δD 值在 $-84.82\text{‰} \sim -73.36\text{‰}$ 间, $\delta^{18}O$ 值在 $-11.94\text{‰} \sim -9.85\text{‰}$ 间,孔隙裂隙发育条件较差,地下水补给历程漫长,更新缓慢,地下水主要在延安组出露区、红土层“天窗”区接受补给。

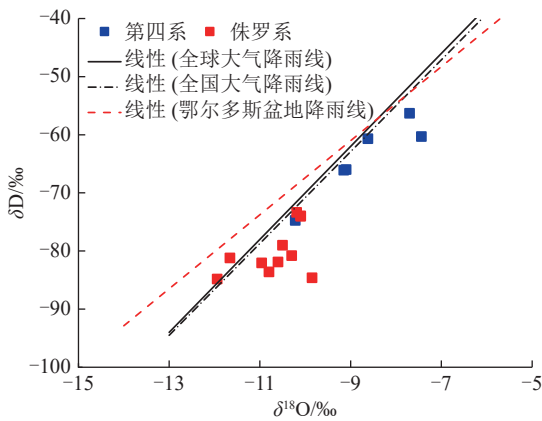


图4 中深埋区地下水 δD - $\delta^{18}O$ 值分布

Fig.4 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in groundwater in medium depth buried area

3) 深埋区

蒙陕接壤区的深埋煤田区位于研究区中西部,包括新街、呼吉尔特、纳林河、榆神和榆横部分区域,目前大部分煤矿的首采煤层埋深超过500 m,煤层顶板地层结构与浅埋区、中深埋区有明显差异,发育有厚度较大的白垩系洛河组地层。地下水系统可分为第

四系含水层(主要为风积沙层和萨拉乌苏组)、白垩系洛河组含水层和侏罗系含水层(主要为煤层顶板延安组和直罗组)。第四系地下水中 δD 值在 $-64.0\text{‰} \sim -59.7\text{‰}$ 间, $\delta^{18}O$ 值在 $-8.5\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$ 间(图5),结合浅埋区和中深埋区第四系地下水中环境同位素特征,可以看出:蒙陕接壤区第四系含水层主要接受大气降水和地表水补给,且循环更替快, δD 值和 $\delta^{18}O$ 值均较高。白垩系洛河组地下水直接接受第四系补给,但是洛河组含水层厚度较大(100~400 m),地下水补给径流历程较长,水中 δD 值在 $-80.2\text{‰} \sim -70.6\text{‰}$ 间, $\delta^{18}O$ 值在 $-10.9\text{‰} \sim -8.7\text{‰}$ 间。埋深更大的侏罗系上段地层,由于河流相沉积作用,呈砂泥岩互层结构,导致该层段地下水补给较差,地下水径流历程漫长,更新极慢,水中 δD 值在 $-91.8\text{‰} \sim -78.0\text{‰}$ 间, $\delta^{18}O$ 值在 $-12.2\text{‰} \sim -9.9\text{‰}$ 间。

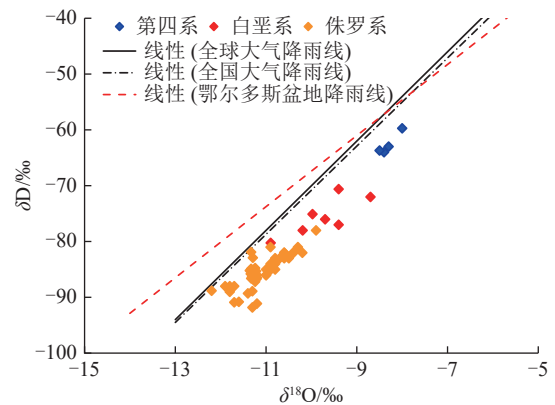


图5 深埋区地下水 δD - $\delta^{18}O$ 值分布

Fig.5 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in groundwater in deep buried area

4) 同位素空间分布特征分析

通过对蒙陕接壤区不同地形地貌和煤炭赋存条件区域地下水中环境同位素的分析,结合数据的正态分布特征,可以得到以下规律(表3):

表3 环境同位素统计学特征
Table 3 Static characters of environmental isotopes

地层	指标	浅埋区			中深埋区			深埋区		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
第四系	δD	-73.0	-58.0	-65.0	-74.7	-56.3	-64.0	-64.0	-59.7	-62.6
	$\delta^{18}O$	-9.0	-7.3	-8.1	-10.2	-7.4	-8.7	-8.5	-8.0	-8.3
白垩系	δD	—	—	—	—	—	—	-80.2	-70.6	-75.6
	$\delta^{18}O$	—	—	—	—	—	—	-10.9	-8.7	-9.8
侏罗系上段	δD	-78.0	-59.0	-68.0	-84.8	-73.4	-79.9	-89.0	-78.0	-85.4
	$\delta^{18}O$	-9.5	-7.6	-8.5	-11.9	-9.9	-10.6	-12.2	-9.9	-11.1
侏罗系下段	δD	-86.0	-67.5	-76.8	—	—	—	—	—	—
	$\delta^{18}O$	-12.0	-9.5	-10.6	—	—	—	—	—	—

(1) 研究区范围内第四系含水层普遍发育, 浅埋区、中深埋区和深埋区的 δD 值分别为 $-73.0\text{‰} \sim -58.0\text{‰}$ 、 $-74.7\text{‰} \sim -56.3\text{‰}$ 、 $-64.0\text{‰} \sim -59.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-9.0\text{‰} \sim -7.3\text{‰}$ 、 $-10.2\text{‰} \sim -7.4\text{‰}$ 、 $-8.5\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$, 与大气降水、地表水中环境同位素 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近, 反映出第四系地下水主要来自大气降水和地表水体补给, 且循环更替速度较快。

(2) 白垩系地层主要在深埋区发育, 白垩系地下水中 δD 值为 $-80.2\text{‰} \sim -70.6\text{‰}$ (平均值 -75.6‰), $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-10.9\text{‰} \sim -8.7\text{‰}$ (平均值 -9.8‰), 白垩系地层在研究区范围内较少出露, 绝大部分区域被第四系松散层覆盖, 补给水源主要为第四系松散层的垂向入渗, 由于深埋区白垩系地层普遍厚度大, 地下水循环更替历程较长, 导致循环更替速度变缓。

(3) 研究区侏罗系为含煤地层, 中深埋区和深埋区开发历史较短, 目前以最上可采煤层的开采为主; 浅埋区 (主要为神东矿区、神南矿区) 已经经历了二三十年的开发, 目前普遍进入下组煤开采阶段。因此将侏罗系地层分为侏罗系上段 (包括安定组、直罗组和延安组上段的含水层) 和下段 (主要为煤系地层间的含水层)。检测结果发现, 侏罗系上段含水层在浅埋区、中深埋区和深埋区的 δD 值分别为 $-78.0\text{‰} \sim -59.0\text{‰}$ 、 $-84.8\text{‰} \sim -73.4\text{‰}$ 、 $-89.0\text{‰} \sim -78.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-9.5\text{‰} \sim -7.6\text{‰}$ 、 $-11.9\text{‰} \sim -9.9\text{‰}$ 、 $-12.2\text{‰} \sim -9.9\text{‰}$, δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映出浅埋区和中深埋区尽管该地层沉积时间长, 成岩更好, 但由于后期构造运动, 导致其与第四系或新近系直接接触, 接受第四系地下水补给, δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较大。深埋区侏罗系地层本身厚度较大, 上覆厚层的第四系和白垩系地层, 地下水补给较差, 地下水径流历程漫长, 较为封闭滞流。

(4) 浅埋区侏罗系下段, 地下水中 δD 值为 $-86.0\text{‰} \sim -67.5\text{‰}$ (平均值 -76.8‰), $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-12.0\text{‰} \sim -9.5\text{‰}$ (平均值 -10.6‰) 煤炭未开采条件下, 顶底板均为隔水煤层, 孔隙裂隙不发育, 地下水补给较差, 更新缓慢。

总体而言, 浅部地下水直接接受大气降水或地表水的补给, 地下水循环更新快, 呈现现代水补给; 中深埋区和深埋区的基岩地下水埋深相对较大, 虽然垂向水力联系较好, 但仍含有相当古气候条件下补给的地下水。

3.3 矿井水来源判别

在不同含水层水 (称为端元) 中稳定同位素组成存在显著差异的前提下, 利用稳定同位素组成判定含水层背景值后, 可进一步通过同位素质量守恒原理实现矿井水水源的相对贡献量计算。

3.3.1 模型构建

1) 二元混合模型

假设井下涌水 (即矿井水) 由第四系 (Q)、侏罗系 (J) 中的地下水构成, 2 种水源在进入井下的过程中只发生简单混合作用 (图 6), 根据同位素质量守恒定理, 可采用最简单的二元线性稳定同位素质量平衡模型计算每个来源对矿井水 (M) 的贡献。

$$\delta_M = \delta_Q f_Q + \delta_J f_J \quad (1)$$

$$f_Q + f_J = 1 \quad (2)$$

式中, δ_Q 和 δ_J 分别为第四系和侏罗系水源端元的同位素 (δD 或 $\delta^{18}\text{O}$) 值; f_Q 和 f_J 分别为第四系和侏罗系水源端元的贡献率; δ_M 为矿井水中同位素值。

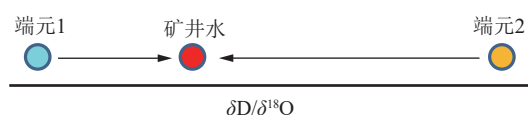


图 6 二元混合模型原理示意

Fig. 6 Schematic diagram of the principle of binary hybrid model

2) 多元混合模型

当水源端元数量为 3 个及以上, 而可列出的公式个数比未知数少时, 线性混合模型不再适用于这种数学不确定系统。美国环保署推荐的开放获取源解析软件 IsoSource 模型可用于计算数学不确定系统中每一个水源的贡献。IsoSource 利用同位素质量守恒原理, 以二元模型和三元模型为基础, 经过反复的运算, 产生多种来源比例的组合 (图 7), IsoSource 模型可解决少同位素体系多水源的情况, 其基本方程为

$$\delta_M = f_A \times \delta_A + f_B \times \delta_B + \dots + f_N \times \delta_N \quad (3)$$

$$1 = f_A + f_B + \dots + f_N \quad (4)$$

式中, δ_M 为矿井水中同位素 (δD 或 $\delta^{18}\text{O}$) 值; $\delta_A, \delta_B, \dots, \delta_N$ 为参与混合的各水源端元的同位素值; $f_A, f_B, \dots, f_N$ 为参与混合的各水源端元的贡献率。

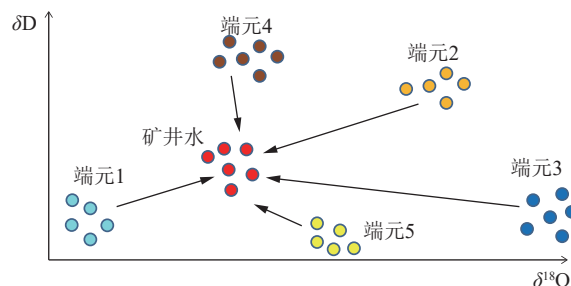


图 7 多元混合模型原理示意

Fig. 7 Schematic diagram of the principle of a multivariate mixed model

3.3.2 水源判别

一般来说,多采用二元混合模型进行定量计算;当端元数量较多时,可采用 IsoSource 模型对多水源端元的贡献进行定量研究。本研究中,矿井水水源主要来自 2 个或 3 个含水层组,因此采用二元混合模型对所有煤矿矿井水开展水源判别(假设矿井水来自 2 个含水层),采用 IsoSource 模型对深埋区矿井水开展水源判别(假设矿井水来自 3 个含水层)。

1) 同位素端元值

鉴于不同埋深区第四系地下水主要来自大气降水和地表水补给,具有相同的成因,因此将所有第四系地下水样品综合起来,分别绘制了 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值的正态分布特征(图 8),由图 8 可以看出,由于 δD 值范围约为 $\delta^{18}O$ 值范围的 6 倍多,更符合正态分布规律,也能更好地进行水源判别,本研究选择 δD 值作为水源判别的同位素。第四系地下水中 δD 值大部分在 $-70.0\text{‰} \sim -60.0\text{‰}$, 占比为 83.9%, 正态分布曲线的均值为 -65.0‰ , 选择该值作为第四系地下水中 δD 值的端元值。

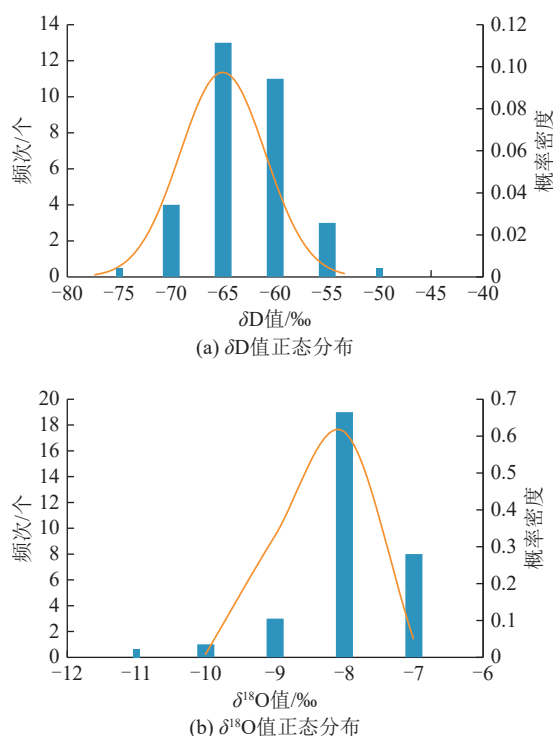


图 8 第四系地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值正态分布

Fig.8 Normal distribution map of δD and $\delta^{18}O$ in Quaternary groundwater

白垩系地下水中 δD 值样本主要集中在 $-80.0\text{‰} \sim -70.0\text{‰}$ (图 9a), 占比为 87.5%, 正态分布曲线的均值为 -76.0‰ , 选择该值作为白垩系地下水中 δD 值的端元值。

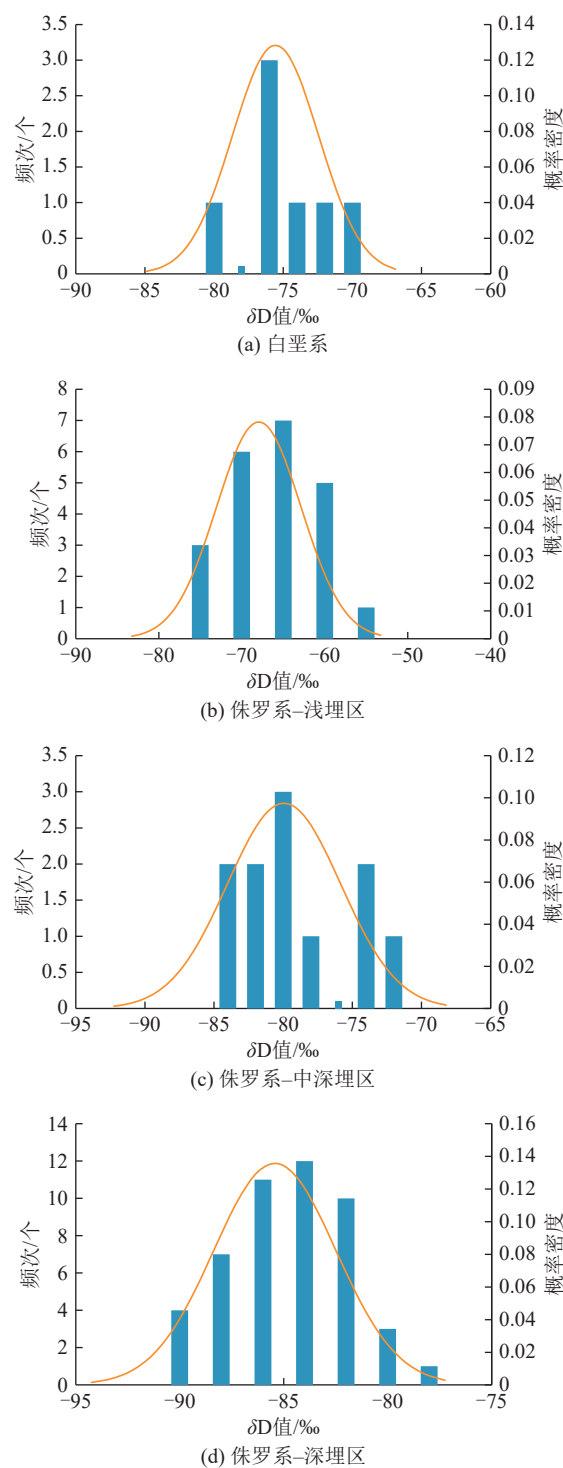


图 9 白垩系和侏罗系地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值正态分布

Fig.9 Normal distribution map of δD and $\delta^{18}O$ in groundwater in the Cretaceous and Jurassic periods

由于地层结构和地下水循环的差异,不同埋深区的侏罗系地下水中环境同位素也存在着较明显的区别,分析浅埋区、中深埋区和深埋区 δD 值的正态分布特征(图 9b~图 9d),得到正态分布曲线的均值分别为 -68.0‰ 、 -80.0‰ 、 -85.0‰ ,但是采用这些值作为端元值,普遍出现计算错误(矿井水样品中 δD 值小于端元

值)。侏罗系含水层是目前研究区开采扰动的最深部,越是未受扰动的该层地下水,δD 值就越小,因此结合正态分布分别选择了浅埋区、中深埋区和深埋区侏罗系地下水样品中的最小 δD 值作为端元值,即-78.0‰(浅埋区)、-84.8‰(中深埋区)、-89.0‰(深埋区)。

2) 二元混合模型判别

浅埋区和中深埋区矿井水主要来自第四系含水层和侏罗系上段含水层,深埋区矿井水主要来自白垩系含水层和侏罗系上段含水层,可以采用二元混合模型开展水源组成比例计算,结果表明 (表 4 和图 10):
① 浅埋区矿井水来源差异较大,SGT、HLG 煤矿矿井水中第四系水占比 < 20%,BLT、LSJ 等煤矿矿井水在 28.0%~57.0% 间;YBJ 煤矿井田范围内保德组红土层缺失,经过 30 a 的生产,煤炭资源基本开采殆尽,煤层顶板含隔水层已经充分扰动破坏,导致矿井水中第四系水占比接近 80%。
② 中深埋区属于新开发区域(大部分矿井煤炭开采在近 10 a 内),矿井水中第四系水占比一般小于 20%;HLW、SS 煤矿由于开发较早、顶板保德组红土层“天窗”发育,第四系水占比分别达到了 38.93% 和 27.56%。
③ 深埋区也属于新开发区域,矿井水中白垩系水占比在 30% 左右。

3) IsoSource 模型判别

深埋区煤层顶板主要发育了 3 层含水层组(第四系、白垩系、侏罗系上段),其中第四系含水层是生态环境领域重点关注的地下水层位,为了进一步探究深埋区煤炭开采对第四系地下水的影 响,利用 Iso-Source 模型开展了水源判别,设置 increment 参数为 1%,tolerance 参数为 0.03,计算得到第四系水贡献率在 7.6%~9.3%,白垩系水贡献率在 12.0%~17.1%,侏罗系上段水贡献率在 74.9%~80.4%(图 11);反映出两

表 4 二元混合模型计算结果

Table 4 Calculation results of binary mixed model

区域	煤矿	比例/%		
		δD值/‰	第四系/白垩系	侏罗系上段
浅埋区	SGT	-77	7.69	92.31
	HLG	-76	15.38	84.62
	BLT	-70.0	61.54	38.46
	SW	-72.0	46.15	53.85
	XMT	-70.5	57.62	42.38
	LD	-74.0	30.51	69.49
	JJ	-72.6	41.72	58.28
	LSJ	-71.9	47.07	52.93
	YBJ	-66.9	85.30	14.70
中深埋区	CJT	-81.9	14.73	85.27
	YSW	-81.1	18.50	81.50
	MHL	-80.3	22.77	77.23
	SS	-79.3	27.56	72.44
	XBD	-81.2	18.10	81.90
	JJT	-81.5	16.47	83.53
	HLW	-77.1	38.93	61.07
	XJH	-84.7	33.00	67.00
	SLWS	-85.2	29.22	70.78
深埋区	BYGL	-84.8	32.64	67.36
	HQH	-85.5	26.92	73.08

注:浅埋区和中深埋区矿井水水源为第四系和侏罗系含水层,深埋区矿井水水源为白垩系和侏罗系含水层

方面特征:① 尽管深埋区的 4 个煤矿分布于不同矿区,在煤炭赋存、顶板覆岩结构和开采历时相似条件下,矿井水中各水源的贡献率接近;② IsoSource 模型计算得到第四系水和白垩系水得贡献率合计 21.0%~

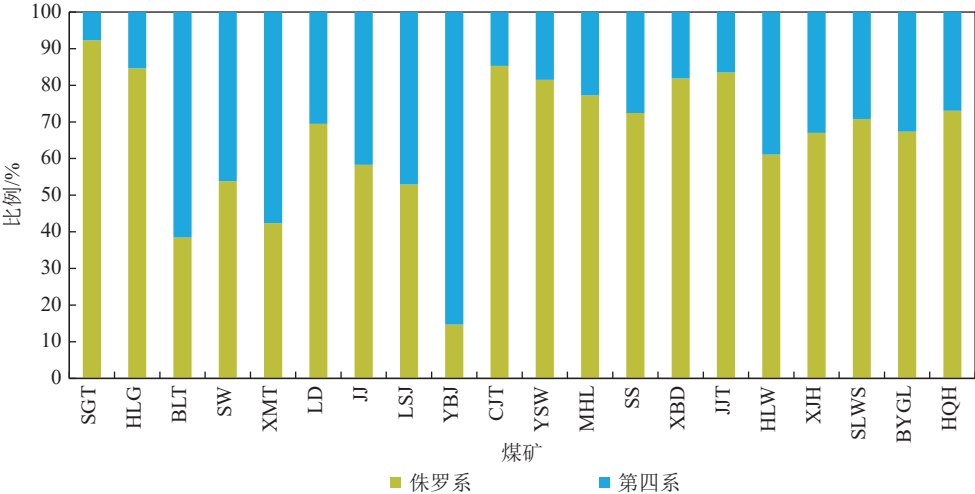


图 10 矿井水中各含水层水贡献率

Fig.10 Contribution rate of each aquifer in mine water with binary mixed model

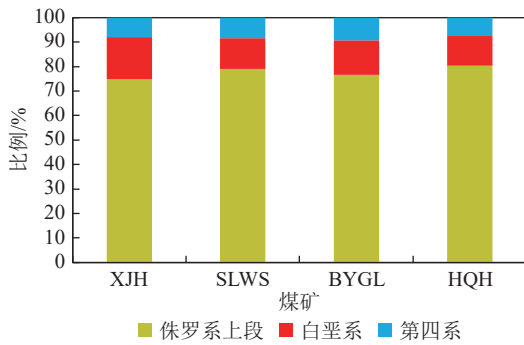


图 11 深埋区矿井水中各含水层水贡献率

Fig.11 Contribution rate of each aquifer in deep buried mine water

25.1%，比二元混合模型计算结果略小；③深埋区最上主采煤层开采过程中，导水裂隙带只发育在侏罗系基岩段范围内，该范围内发育多层含水层（包括直罗组

上段高桥砂岩、直罗组下段七里镇砂岩和延安组上段真武洞砂岩，榆横矿区还发育有煤层含水层），其中七里镇砂岩富水性相对较好，是矿井水的主要来源。

3.4 判别效果验证

由于地下水循环更新的复杂性和煤炭开采对含水层扰动影响的滞后性，水源判别计算结果可靠性的验证，存在较大困难。研究区范围内 SLWS、YPH、JJT 等多个煤矿煤炭开采形成的导水裂隙带之上的含水层水位出现了明显下降，例如 SLWS 煤矿开采 2 号煤层，导水裂隙带高度 140.96~246.08 m，2 号煤层距离白垩系底界面 336.5 m，工作面开采过程中，由于越流作用，白垩系地下水位累计下降了约 130 m(图 12)，从侧面证明导水裂隙带未波及的含水层地下水已经成为矿井水的水源。

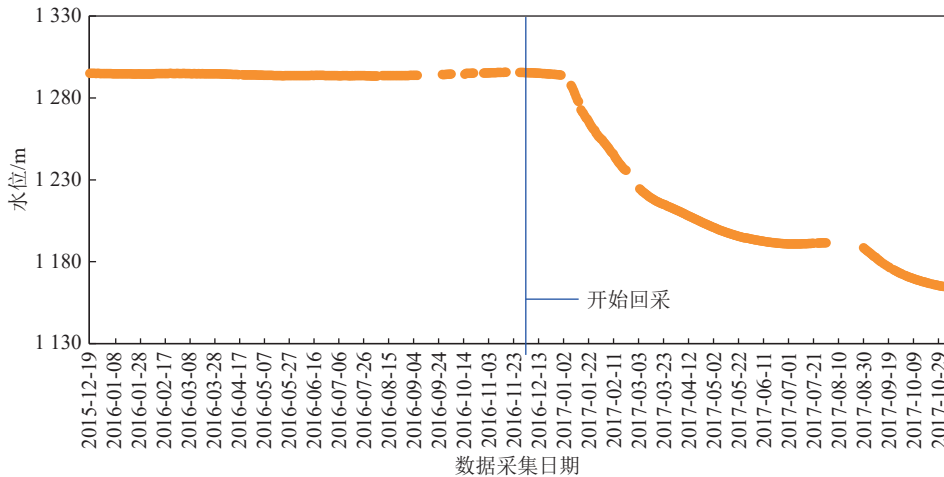


图 12 SLWS 煤矿白垩系水位变化曲线

Fig.12 Cretaceous water level variation curve in SLWS coal mine

4 结 论

(1) 蒙陕接壤区第四系地下水中放射性同位素 T 浓度达到 8.6~29.8 Tu，为富氡特征的现代水补给；基岩（白垩系、侏罗系地层）T 浓度普遍 < 2 Tu，为地质历史时期补给；在地表沙漠区垂向入渗能力较强，基岩地下水中 T 浓度达到 2.0~16.6 Tu，也呈现代水补给特征。

(2) 研究区范围内第四系含水层普遍发育， δD 值和 $\delta^{18}O$ 值与大气降水、地表水接近，主要为大气降水和地表水体补给，且循环更替速度较快。白垩系和侏罗系地下水受到垂向补给控制，地下水循环更替更替速度变缓， δD 值和 $\delta^{18}O$ 值逐渐减小，该规律也适用于浅埋区、中深埋区和深埋区的侏罗系地下水。

(3) 基于研究区地质水文地质条件，结合地下水中 δD 值的正态分布特征，综合确定各含水层的判别

模型端元值，并采用二元混合模型计算出不同埋深区矿井水的水源比例，采用 IsoSource 模型计算出深埋区各含水层地下水贡献率；二元混合模型与 IsoSource 模型计算结果接近，证明本研究判别结果的有效性。

(4) 研究区范围内 SLWS、YPH、JJT 等煤矿导水裂隙带上覆含水层受到越流作用，地下水位出现了明显下降，其中 SLWS 煤矿白垩系地下水位累计下降了约 130 m，也证明导水裂隙带未波及的含水层地下水成为矿井水的水源。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599-2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7):

- 2599–2612.
- [2] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197–2211.
- XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [3] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079–3089.
- GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079–3089.
- [4] 杨建, 王皓, 梁向阳, 等. 鄂尔多斯盆地北部深埋煤层工作面涌水量预测方法[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 185–191.
- YANG Jian, WANG Hao, LIANG Xiangyang, et al. Water inflow forecasting method of deep buried coal working face in northern Ordos Basin, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 185–191.
- [5] 谢克昌. “十四五”期间现代煤化工发展的几点思考[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(5): 1.
- XIE Kechang. Reflections on the development of modern coal chemical industry during the 14th Five-Year Plan[J]. Coal Economic Research, 2020, 40(5): 1.
- [6] 王双明. 鄂尔多斯盆地构造演化和构造控煤作用[J]. 地质通报, 2011, 30(4): 544–552.
- WANG Shuangming. Ordos basin tectonic evolution and structural control of coal[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(4): 544–552.
- [7] 黄文辉, 敖卫华, 翁成敏, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤的煤岩特征及成因分析[J]. 现代地质, 2010, 24(6): 1186–1197.
- HUANG Wenhui, AO Weihua, WENG Chengmin, et al. Characteristics of coal petrology and genesis of Jurassic coal in Ordos basin[J]. Geoscience, 2010, 24(6): 1186–1197.
- [8] 马良. 煤中硫分布特征及其沉积成因研究: 以鄂尔多斯盆地榆横矿区南区为例[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 200–209.
- MA Liang. Study on distribution characteristics and sedimentary genesis of sulfur in coal: Taking southern Yuheng Mining Area of Ordos Basin as a case[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 200–209.
- [9] 张子良. 巴彦高勒煤矿 3-1 煤层的煤岩煤质特性及利用途径分析[J]. 煤质技术, 2018, 33(1): 7–11, 34.
- ZHANG Ziliang. Coal petrography coal quality characteristics and utilization pathway analysis on Bayangaole coal mine 3-1 coal seam[J]. Coal Quality Technology, 2018, 33(1): 7–11, 34.
- [10] 李振宏, 董树文, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地中—晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. 地球学报, 2015, 36(1): 22–30.
- LI Zhenhong, DONG Shuwen, FENG Shengbin, et al. Sedimentary response to middle–Late Jurassic tectonic events in the Ordos basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2015, 36(1): 22–30.
- [11] 李向平, 陈刚, 章辉若, 等. 鄂尔多斯盆地中生代构造事件及其沉积响应特点[J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2006, 21(3): 1–4, 113.
- LI Xiangping, CHEN Gang, ZHANG Huiruo, et al. Mesozoic tectonic events in Ordos Basin and their sedimentary responses[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006, 21(3): 1–4, 113.
- [12] 薛建坤, 王皓, 赵春虎, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤田导水裂隙带高度预测及顶板充水模式[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1222–1230.
- XUE Jiankun, WANG Hao, ZHAO Chunhu, et al. Prediction of the height of water-conducting fracture zone and water-filling model of roof aquifer in Jurassic coalfield in Ordos Basin[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1222–1230.
- [13] 杨建, 王皓, 王强民, 等. 蒙陕接壤区矿井水中典型污染组分特征及来源[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1687–1696.
- YANG Jian, WANG Hao, WANG Qiangmin, et al. Characteristics and sources of typical pollution components in mine water in the border area of Inner Mongolia and Shaanxi[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1687–1696.
- [14] 华照来, 范立民, 李增林, 等. 古河道砂岩含水层水资源保护与危害防治方法[J]. 绿色矿山, 2024(1): 64–74.
- HUA Zhaolai, FAN Limin, LI Zenglin, et al. Methods for water resource protection and water hazard prevention in sandstone aquifers of ancient river channels[J]. Journal of Green Mine, 2024(1): 64–74.
- [15] 赵春虎, 靳德武, 李智学, 等. 陕北榆神矿区煤层开采顶板涌水规律分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 523–533.
- ZHAO Chunhu, JIN Dewu, LI Zhixue, et al. Analysis of overlying aquifer water inrush above mining seam in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 523–533.
- [16] 王双明, 魏江波, 宋世杰, 等. 黄河流域陕北煤炭开采区厚砂岩对覆岩采动裂隙发育的影响及采煤保水建议[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 1–11.
- WANG Shuangming, WEI Jiangbo, SONG Shijie, et al. Influence of thick sandstone on development of overburden mining fissures in northern Shaanxi coal mining area of Yellow River Basin and suggestions on water-preserved coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 1–11.
- [17] 桂和荣. 皖北矿区地下水水文地球化学特征及判别模式研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- GUI Herong. Study on hydrogeochemical characteristics and discrimination model of groundwater in northern Anhui mining area[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005.
- [18] 王甜甜, 靳德武, 刘基, 等. 动态权—集对分析模型在矿井突水水源识别中的应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2840–2850.
- WANG Tiantian, JIN Dewu, LIU Ji, et al. Application of dynamic weight-set pair analysis model in mine water inrush discrimination[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2840–2850.
- [19] 陈陆望, 桂和荣, 殷晓曦, 等. 临涣矿区突水水源标型微量元素及其判别模型[J]. 水文地质工程地质, 17–22.
- CHEN Luwang, GUI Herong, YIN Xiaoxi, et al. The standard type trace elements and the discriminant model of water bursting source in the Linhuan coal district [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 17–22.
- [20] 郭元. 辛置井田多含水层水岩作用机理及突水水源判别技术研究

- [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京).
- GUO Yuan. Study on mechanism of water-rock interaction and water inrush water source identification technology for multiple aquifers in Xinzhi field [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2019.
- [21] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5): 738–747.
- ZHANG Yinghua, WU Yanqing, WEN Xiaohu, et al. Application of environmental isotopes in water cycle[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(5): 738–747.
- [22] GAMMONS C H, DUAIME T E, PARKER S R, et al. Geochemistry and stable isotope investigation of acid mine drainage associated with abandoned coal mines in central Montana, USA[J]. *Chemical Geology*, 2010, 269(1-2): 100–112.
- [23] 郭洋楠, 杨俊哲, 张政, 等. 神东矿区矿井水的氢氧同位素特征及高氟矿井水形成的水-岩作用机制[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S2): 948–959.
- GUO Yangnan, YANG Junzhe, ZHANG Zheng, et al. Hydrogen and oxygen isotope characteristics of mine water in Shendong mining area and water-rock interaction mechanism of high fluorine mine water[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 948–959.
- [24] 杨建, 刘基, 黄浩, 等. 鄂尔多斯盆地北部深埋区“地貌—沉积”控水关键要素研究[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(5): 523–530.
- YANG Jian, LIU Ji, HUANG Hao, et al. Key groundwater control factors of deep buried coalfield by landform and sedimentation in the northern Ordos basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5): 523–530.
- [25] 张恒利. 鄂尔多斯盆地煤炭资源聚积规律及勘查开发利用分析[J]. *地质论评*, 2013, 59(S): 803–808.
- Zhang Hengli. Analysis of coal resources accumulation law and exploration, development and utilization in Ordos Basin[J]. *Geological Review*, 2013, 59(S): 803–808.
- [26] 王文科, 宫程程, 张在勇, 等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 702–718.
- WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 702–718.
- [27] 王德潜, 刘祖植, 尹立河. 鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(1): 6–14.
- WANG Deqian, LIU Zuzhi, YIN Lihe. Hydro-geological characteristics and groundwater systems of the Erdos basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(1): 6–14.
- [28] 张二勇. 鄂尔多斯盆地内蒙古能源基地地下水开发与植被演化风险评估研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2010.
- ZHANG Eryong. Risk assessment of groundwater development and vegetation evolution in Inner Mongolia energy base of Ordos basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [29] 王玮. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水资源可持续性研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- WANG Wei. Study on the sustainability of groundwater resources in Cretaceous groundwater basin of Ordos[D]. Xi'an: Changan University, 2004.