

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0059

李双慧,黄选明,朱宏军,等.基于水化学和环境同位素的准格尔煤田地下水循环特征[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):561-571,589. LI S H, HUANG X M, ZHU H J, et al. Characterization of groundwater circulation in the Jungar coalfield based on water chemistry and environmental isotopes[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 561-571, 589. (in Chinese)

基于水化学和环境同位素的准格尔煤田 地下水循环特征

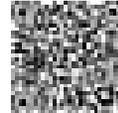
李双慧^{1,2},黄选明²,朱宏军²,朱开鹏^{2,3},张泽源^{1,2},杨建^{2,3}

(1. 煤炭科学研究总院,北京 100013;2. 中煤科工集团西安研究院有限公司,西安 710054;
3. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室,西安 710077)

摘要:为揭示准格尔煤田地区地下水循环特征,运用水化学技术、水汽轨迹模型和环境同位素等方法分析不同水体水化学特征、环境同位素特征、大气降水主要来源、地表水及地下水转化关系。结果表明:地表水矿化度低,呈弱碱-偏碱性,水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Ca}$ 型水为主;地下水整体矿化度低,偏弱碱性,主要以 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型、 Cl-Na 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ 型水为主;黄河水 $\delta(\text{D})$ 平均值为 -79.6% 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 平均值为 -10.47% ,第四系地下水 $\delta(\text{D})$ 平均值为 -66.25% 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 平均值为 -9.1% ,白垩系地下水 $\delta(\text{D})$ 值为 -70.6% 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 值为 -9.3% ,石炭-二叠系地下水 $\delta(\text{D})$ 平均值为 -77.07% 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 平均值为 -9.9% ,寒武-奥陶系地下水 $\delta(\text{D})$ 平均值为 -75.73% 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 平均值为 -10.06% ;大气降水受极地气团和季风影响,主要来源为西风带水汽、地表水和地下水水汽蒸发再循环;断层带、褶皱轴部裂隙带为不同含水层间主要导水通道,大气降水和黄河为地下水主要补给来源;高承压水头寒武-奥陶系岩溶裂隙水越流补给第四系松散孔隙水和砂岩裂隙水,第四系松散孔隙水通过地层间不整合接触面裂隙发育带向下补给石炭-二叠系砂岩裂隙水,黄河水对寒武-奥陶系地下水的补给比例受地质构造发育的影响较大。

关键词:地下水循环;水汽轨迹模型;稳定同位素;地下水年龄;补给比例;准格尔煤田地区

中图分类号:P641.3 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



准格尔煤田位于我国鄂尔多斯盆地东北部黄河西岸,是我国主要煤炭资源开采地之一^[1],开发了包括唐家会、酸刺沟、龙王沟、黄玉川等大小近20个煤矿,大规模、高强度的煤矿开采极大地促进了研究区经济的快速发展。然而,随着煤矿开采深度和范围的增大,矿井水文地质条件变得更加复杂,煤层底板水害成为制约该地区煤矿安全生产的重大隐患^[2]。同时,准格尔煤田地处黄土高原地带,受季风气候和地形地貌影响,气候干旱,降雨量稀少,水资源短缺,生态环境十分脆弱,煤矿开采所造成的含水层结构破坏、地下水流场变化和矿区地下水污染等问题愈

加严峻^[3-4]。

利用水化学和环境同位素分析大气降水、地表水和地下水的特征、运移过程及其相互关系,对阐明水循环机制进而合理开采地下水资源具有重要作用^[5-6]。环境同位素是水体中的重要组成部分,因其性质稳定而作为水汽来源及运动路径的自然示踪剂。20世纪50年代,国外已在水文地质研究中使用了氢氧环境同位素方法,通过分析同位素含量特征以揭示地下水循环规律,研究地下水的补给、径流和排泄特征。我国环境同位素的研究应用主要在20世纪70年代以后在青藏高原展开^[7]。针对西北

收稿日期:2020-12-26 修回日期:2021-02-26 网络出版时间:2021-03-05

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210305.1451.002.html

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0804108)

作者简介:李双慧(1995—),女,河南三门峡人,主要从事矿井水害防治研究。E-mail:Lsh103373@163.com

通信作者:黄选明(1962—),男,陕西西安人,研究员,硕士生导师,主要从事矿井水害防治研究。E-mail:1076835032@qq.com

干旱地区,结合其煤炭资源丰富,但水资源十分匮乏的特点,环境同位素法常用于地下水资源开发与利用^[8]、矿区水环境研究与保护^[9]、矿井水源判别与危害防治等方面^[10]。利用水化学和环境同位素法对准格尔煤田地下水循环特征进行研究也取得了不少成果,如:姚吉坤等^[11]确定了准格尔矿区深层岩溶地下水的强径流带,并计算深层岩溶水天然资源量,为该地区地下水资源的开发提供理论基础;李宏杰等^[12]通过分析岩溶水文地质特征提出了矿井水害防治技术。然而,以往的研究多以岩溶水为主,对整个区域的地下水循环特征研究较少,对区域内矿业活动所导致的地下水资源破坏问题认识不足。基于此,本研究以准格尔煤田为研究区,运用环境同位素和水化学分析方法,通过历史资料收集、野外调查取样和室内分析,分析研究区地下水水化学组成和环境同位素特征,揭示不同含水层地下水补给关系和循环特征,为准格尔煤田矿井水源判别及地下水资源合理开采利用提供理论依据。

1 研究区概况

准格尔煤田位于鄂尔多斯盆地东北缘,地处晋、陕、蒙交界处,地理位置东经 $109^{\circ}17'00''\sim 111^{\circ}26'44''$,北纬 $39^{\circ}14'19''\sim 40^{\circ}12'46''$,面积约 $1\,365\text{ km}^2$,包括唐家会、龙王沟、酸刺沟等多个井田。地势总体上北高南低,西高东低,海拔高程 $562\sim 1\,346\text{ m}$,属黄土高原地貌类型,水土流失严重,植被稀少。气候类型为中温带大陆性干旱气候,昼夜温差大,降雨多集中于 6—9 月,年总降水量为 $231.0\sim 459.5\text{ mm}$,年总蒸发量为 $1\,824.7\sim 2\,204.6\text{ mm}$,是降水量的 5~8 倍。研究区东侧黄河由北至南侧向径流,黄河两侧有寒武系、奥陶系、白垩系等基岩出露。

研究区含水层自上而下可分为:孔隙含水层、裂隙含水层和岩溶-裂隙含水层。孔隙含水层包括第四系风积、冲洪积层,地层以粉砂、中细砂及亚黏土为主,累积厚度 $10\sim 80\text{ m}$,富水性差异大,潜水水位变幅大。裂隙含水层包括白垩系下统志丹群、石炭-二叠系石盒子组、山西组、太原组地层,累积厚度 330 m 左右,地层以砂岩为主,裂隙发育,富水性差异大,夹杂发育的泥岩、砂质泥岩因透水性差而成为隔水层。岩溶-裂隙含水层包括奥陶系下统、寒武系中统张夏组地层,地层以白云岩、灰岩为主,累积厚度 $10\sim 80\text{ m}$,岩溶裂隙发育,富水性强。

2 样品采集与测试

2015 年 8 月至 2015 年 12 月对准格尔煤田进

行水样采集(图 1),结合历史资料收集,共收集到水样 66 组,其中,黄河水样 3 组,第四系水样 9 组,白垩系水样 1 组,石炭-二叠系水样 26 组,寒武-奥陶系水样 27 组。水样由陕西省煤矿水害防治技术重点实验室化验完成,测试项目包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 pH 值,环境同位素测定 $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(\text{T})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 。测试指标中,阳离子采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测试,阴离子采用离子色谱仪(IC)测试,所有元素测试精度为 $\pm 0.001\text{ mg/L}$;TDS 根据所有测试的阴阳离子质量浓度总和减去 HCO_3^- 质量浓度的一半获得;pH 和硬度分别采用玻璃电极和硬度计现场测试; $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 由液态水同位素分析仪(DLT-100)测试,测试精度为 $\pm 0.1\text{‰}$,测试结果以相对 V-SMOW 标准给出;氦采用超本底液体闪烁仪(Quantulus1220)测试,检出限为 1 TU,测试精度为 0.5 TU。

利用 AqQA 软件绘制 Durov 图,使用 Origin 软件绘制 $\delta(\text{D})-\delta(^{18}\text{O})$ 关系图,采用混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(HYSPLIT)分析大气降水的水汽来源。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

采用阴阳离子平衡方法检测水化学测试数据可靠性,剔除不合格数据,得到研究区地下水及地表水水化学组分特征表(表 1)、水化学参数沿程变化图(图 2)和水化学组分 Durov 图(图 3)。

3.1.1 水化学组分特征

在表 1 中,黄河水 pH 变化范围小,平均值为 8.11,为低矿化度(平均值为 601.02 mg/L)弱碱-偏碱性水, Na^+ 离子和 HCO_3^- 离子质量浓度较高。第四系水 pH 值变化范围小,平均值为 8.85,为低矿化度(平均值为 304.5 mg/L)弱碱性水, Ca^{2+} 离子和 HCO_3^- 离子质量浓度较高。白垩系水 pH 较大为 9.1,矿化度较高为 906.63 mg/L ,为中低矿化度碱性水, Na^+ 离子和 Cl^- 离子质量浓度较高。石炭-二叠系水 pH 值变化范围较大,为 $5.77\sim 8.33$,包括弱酸性、中性和碱性水,为中低矿化度(平均值为 431.34 mg/L)水, Ca^{2+} 离子和 HCO_3^- 离子质量浓度较高。寒武-奥陶系水 pH 值变化范围不大,平均值为 7.95,矿化度较高且变化范围大,为中高矿化度(平均值为 707.96 mg/L)弱碱-偏碱性水, Na^+ 离子和 HCO_3^- 离子质量浓度较高。

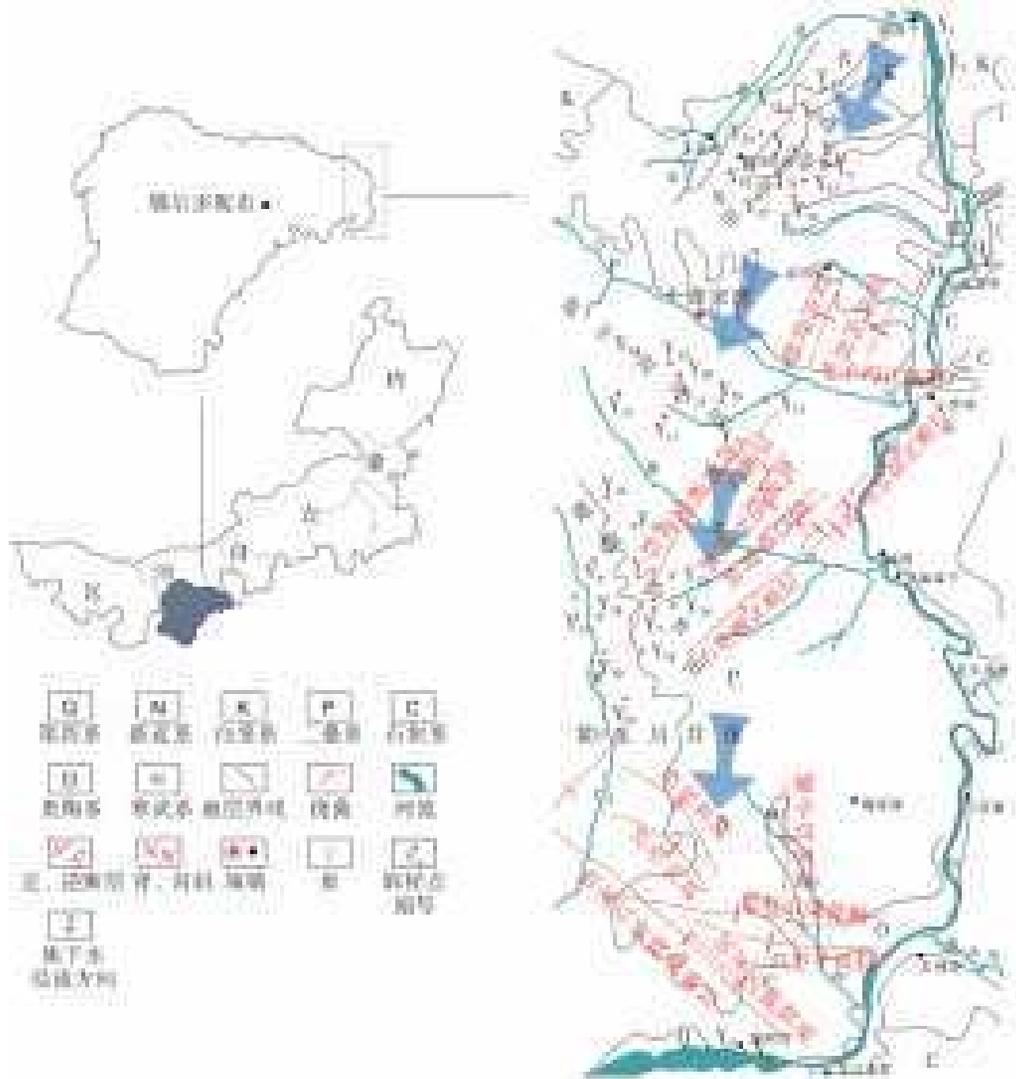


图1 研究区采样点

Fig.1 Location of the water sampling sites in the study area

表1 地下水水化学参数统计特征值

Tab.1 Statistics of hydrochemical parameters of groundwater

水化学指标(样本数)	质量浓度/(mg·L ⁻¹)							pH	
	K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS		
黄河水(3)	最大值	106.36	56.64	56.47	122.18	173.13	213.23	619.560	8.12
	最小值	106.09	56.28	28.28	120.90	172.40	211.12	590.655	8.10
	平均值	106.24	56.46	37.77	121.55	172.79	212.38	601.020	8.11
第四系地下水(5)	最大值	91.01	75.25	55.95	48.93	54.55	392.11	414.320	8.91
	最小值	8.50	31.34	10.98	3.26	13.74	192.33	178.760	8.78
	平均值	38.67	49.30	26.93	16.77	29.87	285.94	304.500	8.85
白垩系地下水(1)	检测值	324.32	31.08	11.73	407.61	59.30	145.17	906.630	9.10
石炭-二叠系地下水(14)	最大值	108.52	192.36	61.09	150.33	75.42	674.43	858.280	8.33
	最小值	39.96	20.84	24.07	12.75	14.75	261.52	309.770	5.77
	平均值	54.83	76.43	29.00	30.38	22.63	436.20	431.340	7.78
寒武-奥陶系地下水(25)	最大值	470.60	92.38	43.10	606.85	277.42	441.38	1 547.240	8.35
	最小值	55.78	6.81	2.07	40.75	39.47	80.53	368.900	7.25
	平均值	184.21	56.14	23.75	196.04	94.67	306.33	707.960	7.95

因研究区区域较小,黄河水水化学组分在短距离范围内没有出现明显变化,见图 2(a)。第四系地下水靠近地表,主要接受垂向大气降水、地表径流等补给,其水化学组分也未表现出明显规律特征,见图 2(b)。石炭-二叠系地下水受赋存环境的影响,地层岩性以砂岩为主,夹杂泥岩,裂隙发育,水化学

组分沿地下水径流方向呈增大趋势,见图 2(c)。寒武-奥陶系地下水赋存地层岩性以白云岩、灰岩为主,岩溶裂隙发育,因岩溶裂隙发育不均匀,水化学组分出现分区增大的特征,如在不连沟井田范围内和在龙王沟、酸刺沟井田范围内,水化学组分分别沿地下水径流方向增大,见图 2(d)。

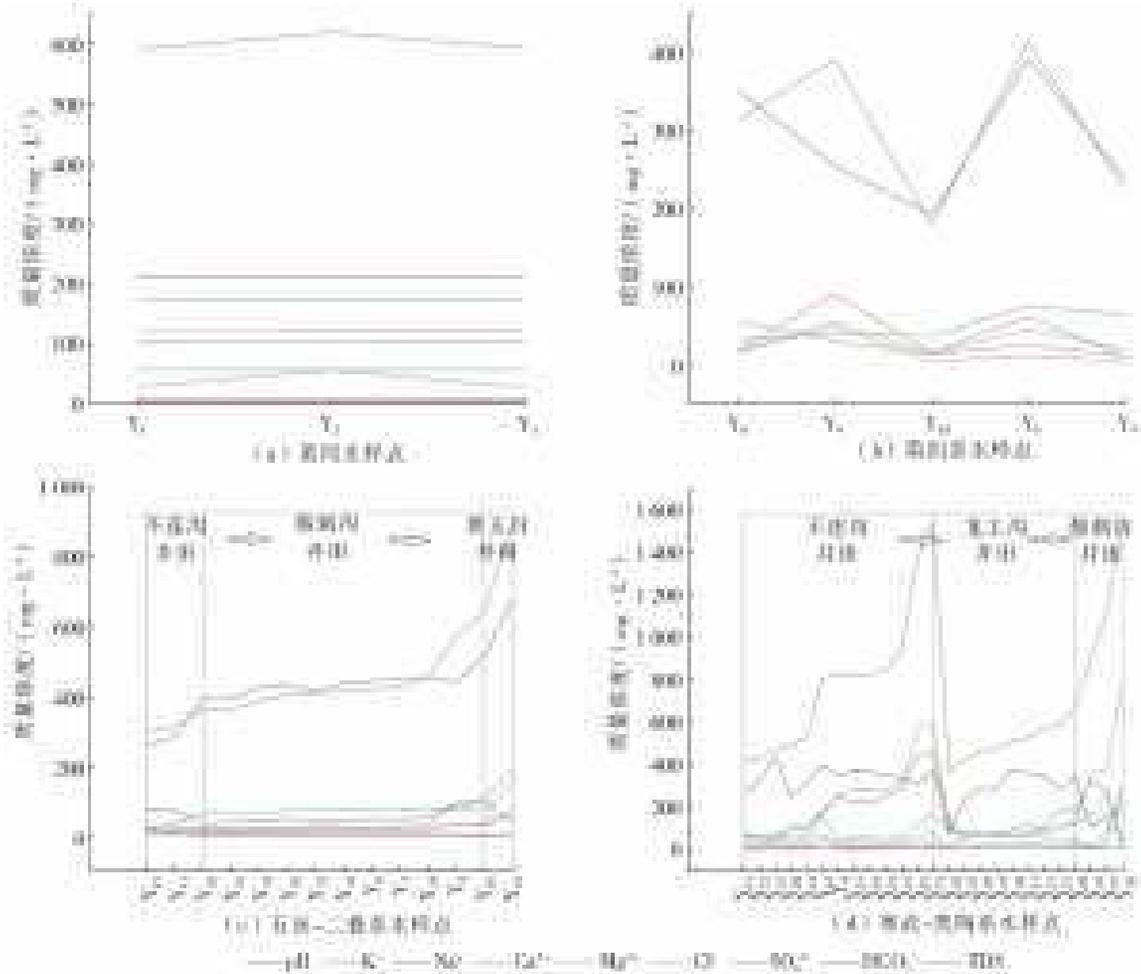


图 2 不同水体水化学参数沿程变化

Fig. 2 Changes in water chemistry parameters along the course of different water bodies

3.1.2 水化学类型

Durov 图可以同时显示地下水的水化学类型和主要组分之间的关系^[13]。图 3 中,黄河水水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca}$ 型为主,第四系水水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型为主,白垩系水水化学类型以 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型为主,石炭-二叠系水水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型为主,寒武-奥陶系水水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型为主。

3.1.3 各含水层间水力联系

研究区东北部地势较高区,寒武-奥陶系地下水接受黄河水侧向渗漏补给,在研究区南部榆树湾地区地势降低,寒武-奥陶系出露,高承压岩溶水以泉的形式排泄,地下水补给黄河水。图 3 中,黄河水与

寒武-奥陶系地下水之间有重合部分,证明二者之间存在水力联系。

研究区内发育龙王沟正断层、焦稍沟正断层、西黄家梁背斜等地质构造,断层带及褶皱轴部裂隙带成为局部地区第四系、寒武-奥陶系和石炭-二叠系间导水通道,呈高承压水头的寒武-奥陶系岩溶裂隙水通过导水通道越流上补第四系孔隙水。受构造运动的影响,鄂尔多斯盆地具有间歇性上升和不均衡沉降、裂隙相伴的构造运动特点,老地层不断抬升,局部地层风化剥蚀,出现了后沉积的第四系与石炭-二叠系不整合接触,通过接触面裂隙带,第四系孔隙水下补石炭-二叠系砂岩裂隙水。图 3 中第四系地下水、石炭-二叠系地下水与寒武-奥陶系地下水有重合部分,说明各含水层间有一

定的水力联系。

在研究区黄河东岸,同样在构造运动影响下,抬升后的寒武-奥陶系上覆地层被风化剥蚀,后沉积的白垩系与寒武-奥陶系出现不整合接触,接触面发育

的断层带及褶皱轴部裂隙带成为白垩系和寒武-奥陶系间导水通道。图3中白垩系地下水样点仅与寒武-奥陶系地下水样点重合,说明二者间存在水力联系。

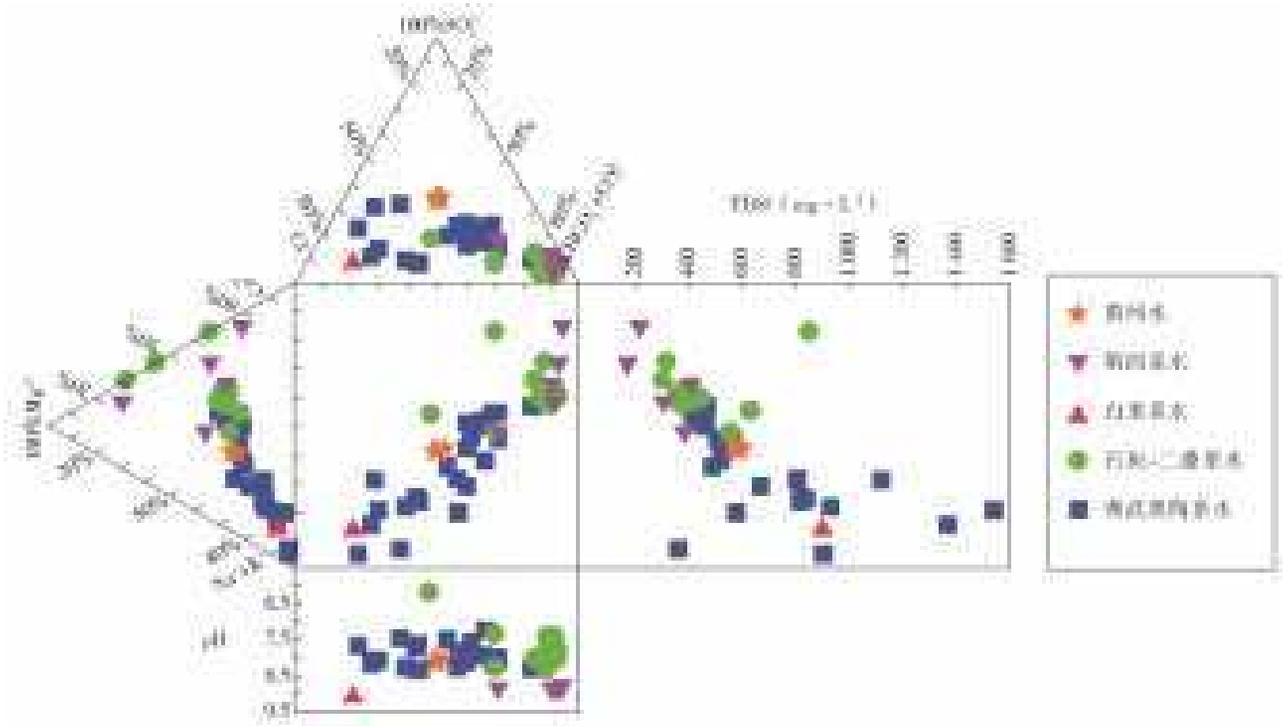


图3 水化学组分 Durov 图

Fig. 3 Durov diagram of ionic concentration in groundwater

3.2 水汽轨迹模型

水汽轨迹是指大气气团在一定时间内的运动路径,可以用来分析降水气团的来源和传输路径^[14]。大气降水作为地球浅表水文循环的重要组成部分,是地表水和地下水的主要补给来源,同时,地表水和地下水通过蒸发转换为气态水并在一定条件下形成降水。通过计算大气降水的来源和传输路径,可以分析研究区降水的影响因素,对改善干旱区气候、保护地下水资源具有重要意义。混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(HYSPLIT)(<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)是由美国国家海洋与大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合开发的用于计算和分析空气轨迹、大气降水水汽来源的模型^[15-16]。该模型通过模拟气团在一定时间内的运动轨迹,包括气团水平和垂直2个方向的运移路径,确定气流的源地。模型采用地形 σ 坐标,在水平坐标上保持气象数据原有格式,在垂直方向内插到地形,坐标系可表示为

$$\sigma = (Z_{\text{top}} - Z_{\text{mst}}) / (Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}) \quad (1)$$

式中: Z_{top} 是轨迹模型坐标系顶部; Z_{gl} 是地形高

程,m; Z_{mst} 是坐标下边界高程,m。模型中的气象资料来自美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)(<http://www.esrl.noaa.gov/>)的全球再分析数据^[17]。

利用 HYSPLIT 模型对研究区水汽运输进行分析,准格尔煤田降雨主要集中在6月至9月,降雪集中在12月至3月,因此选取7月15日和8月15日作为降雨日代表,1月15日和2月15日为降雪日代表,模拟地点为准格尔旗政府(40.20°N,110.99°E),模拟气团高度为该点上空垂直方向500、1000、1500 m,后推时间为72 h,结果见图4。

7月和8月气流轨迹图显示,降水主要来自中纬度西风带水汽源,包括准噶尔盆地和贝加尔湖水汽气流。7月图中500 m和1000 m轨迹图显示,由于夏季大陆出现热低气压中心,受东南季风影响,内陆蒸发水汽成为夏季降水的主要来源^[17]。1月和2月气流轨迹图显示,降水主要来自西风带水汽源,包括天山以及蒙古水汽气流,受副极地气压带影响,内陆蒸发水汽为冬季降水主要来源。各高度轨迹图显示水汽在运移过程中高度均发生较大变化,说明水汽在运移过程中受局部水汽的影响较大。

总体而言,研究区降水来源主要为西风带水汽源,冬夏季受极地气团和东南季风影响而稍有不同,

内陆蒸发水汽如地下水在地层出露区产生的水汽再循环对降水有一定影响^[18]。

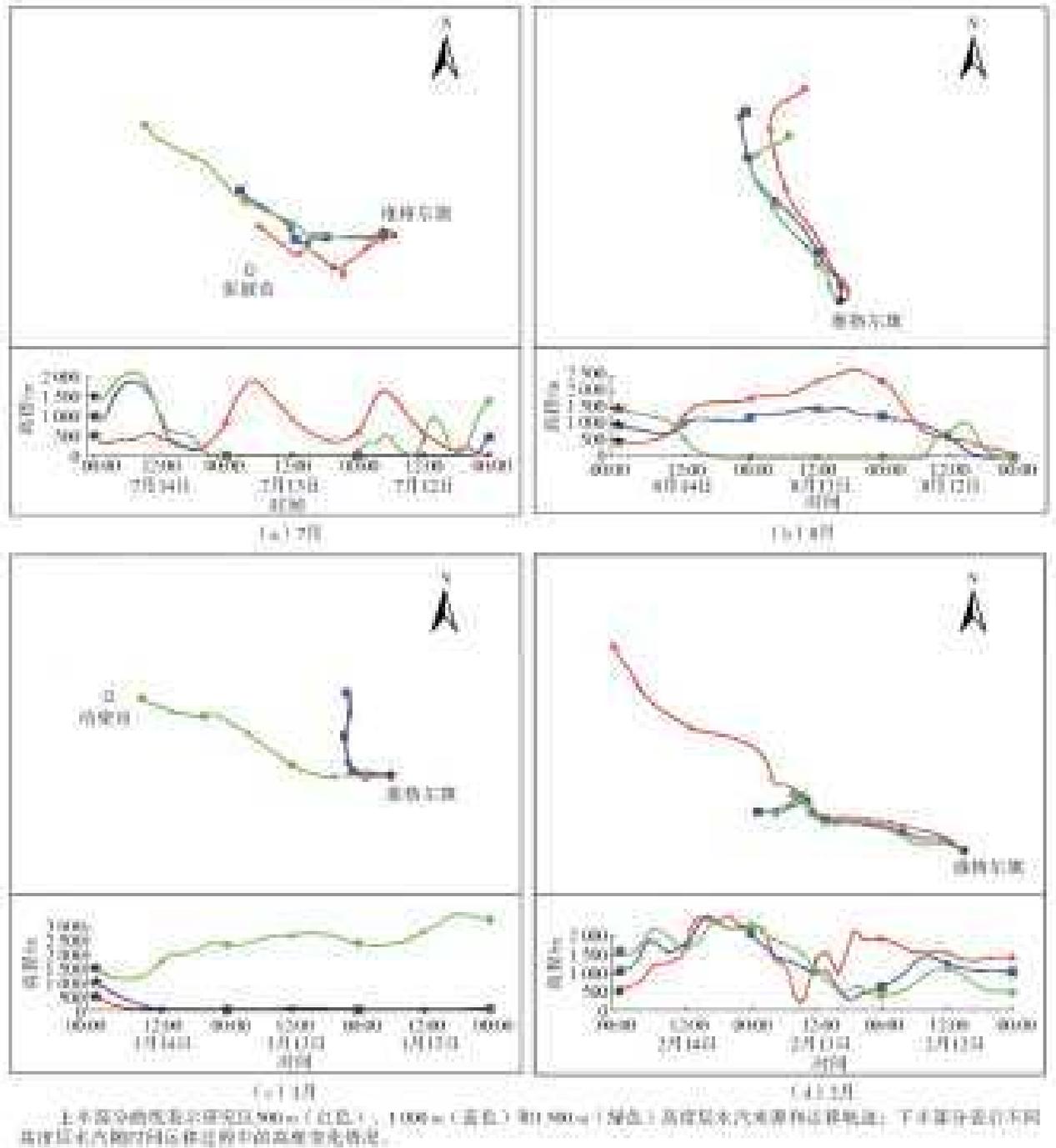


图 4 研究区降水水汽来源后向轨迹

Fig. 4 Back trajectories for precipitation events in the study area

3.3 不同水体同位素组成特征

3.3.1 氢氧稳定同位素特征

地下水同位素研究已成为水文地球化学研究的重要手段之一,如稳定同位素特征可以用来推断地下水的来源、现代入渗水和古沉积地下水以及蒸发水体的混合程度。Craig^[19]通过对全球各地收集到的 400 份同位素资料进行分析,发现大气降水的 D 和¹⁸O 质量浓度之间存在线性关系,经统计得到全

球大气降水线

$$\delta(D) = 8\delta(^{18}O) + 10 \quad (2)$$

金可等^[20]根据鄂尔多斯地区大气降水同位素资料计算得到的当地大气降水线

$$\delta(D) = 7\delta(^{18}O) - 3.02 \quad (3)$$

表 2 为本次 38 组采样检测的 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 分析数据:黄河水的 $\delta(D)$ 值变化范围在 -78.3% ~ -79.6% ,平均值为 -78.93% ; $\delta(D)$ 值变化范围

在 $-10.4‰ \sim -10.5‰$,平均值为 $-10.47‰$ 。第四系地下水的 $\delta(D)$ 值变化范围在 $-64.8‰ \sim -67.7‰$,平均值为 $-66.25‰$; $\delta(^{18}O)$ 值变化范围在 $-9.4‰$,平均值为 $-9.1‰$ 。白垩系地下水的 $\delta(D)$ 值为 $-70.6‰$, $\delta(^{18}O)$ 值为 $-9.3‰$ 。石炭-二叠系地下水的 $\delta(D)$ 值变化范围在

$-68.8‰ \sim -87.7‰$,平均值为 $-77.07‰$; $\delta(^{18}O)$ 值变化范围在 $-6.8‰ \sim -13.4‰$,平均值为 $-9.9‰$ 。寒武-奥陶系地下水的 $\delta(D)$ 值变化范围在 $-68.1‰ \sim -82.7‰$,平均值为 $-75.73‰$; $\delta(^{18}O)$ 值变化范围在 $-7.7‰ \sim -12‰$,平均值为 $-10.06‰$ 。

表2 测试水样 $\delta(D)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 的分析数据
Tab.2 Analytical data of $\delta(D)$, $\delta(^{18}O)$ in tested samples

采样层位	编号	$\delta(D_{V-SMOW})‰$	$\delta(^{18}O_{V-SMOW})‰$	采样层位	编号	$\delta(D_{V-SMOW})‰$	$\delta(^{18}O_{V-SMOW})‰$
黄河	1	-79.6	-10.5	寒武-奥陶系	20	-81.7	-10.9
	2	-78.9	-10.4		21	-68.3	-8.7
	3	-78.3	-10.5		22	-81.0	-10.6
第四系	4	-67.7	-8.8		23	-81.3	-10.6
	5	-64.8	-9.4		24	-82.7	-12.0
白垩系	6	-70.6	-9.3		25	-81.0	-11.9
	7	-86.7	-13.4		26	-77.9	-9.4
石炭-二叠系	8	-87.7	-12.5		27	-73.2	-10.9
	9	-68.8	-9.5		28	-68.1	-10.1
	10	-69.9	-10.1		29	-72.1	-10.4
	11	-80.1	-6.8		30	-76.3	-11.2
	12	-69.2	-7.1		31	-75.5	-8.8
	13	-73.6	-9.9		32	-74.3	-9.7
寒武-奥陶系	14	-71.8	-9.6		33	-78.9	-8.9
	15	-69.7	-9.1		34	-70.5	-7.7
	16	-82.2	-11.2		35	-73.8	-8.9
	17	-81.7	-10.5		36	-77.1	-11.6
	18	-82.1	-10.5		37	-69.9	-9.3
	19	-73.4	-9.7		38	-70.9	-9.6

图5为本次同位素采集分析样品的 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 散点关系图,各含水层水体取样点均分布在全球大气降水线和区域大气降水线两侧,除少部分石炭-二叠系和寒武-奥陶系水样点外,大部分水样点位于大气降水线右下方,说明地下水的补给来源除大气降水外还包括地表水。

(1)图5中黄河水样点位于大气降水线右下方,说明黄河水样氢氧稳定同位素组成受蒸发作用影响。第四系地下水氢氧稳定同位素组成符合大气降水特征,主要接受大气降水补给,同时由于埋藏较浅,受蒸发作用影响。白垩系地下水样点的 $\delta(D)$ 值和 $\delta(^{18}O)$ 值较大,与第四系地下水样点数值最为接近,说明二者地下水补给来源可能相同,且含水层间存在一定的水力联系。

(2)图5中石炭-二叠系地下水样点分布范围较大, $\delta(^{18}O)$ 值在横向上变化显著,说明发生 ^{18}O 漂移,当地层岩石的初始 $\delta(^{18}O)$ 值高于地下水,或低

温条件下 CO_2 与 H_2O 发生反应,则发生 ^{18}O 漂移。 $\delta(D)$ 值在垂向上变化显著,说明发生D漂移,由于石炭-二叠系为主要含煤地层,煤系地层处于还原环境,氢同位素交换反应更为明显^[21-22]。同时,石炭-二叠系碎屑裂隙发育极不均匀,地下水径流受限,在径流非常缓慢的地区,氢氧同位素含量会随地下水流向而增加。

(3)寒武-奥陶系埋深较大,地层岩溶裂隙发育,地下水径流速度较快,因此地下水在径流过程中的同位素分馏可以忽略。图5中区域大气降水线右侧,取样点水样 $\delta(^{18}O)$ 值在横向上变化显著,当地下水与碳酸盐岩长时间接触,水与含 ^{18}O 高的低温海成碳酸盐岩作用时发生氧同位素交换反应(式(4)),地下水因此出现一定程度的 ^{18}O 漂移。同时寒武-奥陶系水样点大部分位于降水线右下方,且与黄河水样点重合,说明寒武-奥陶系地下水与黄河水存在水力联系^[23]。



性解释,见表 3。

表 3 地下水氚含量及年代定性对应表

Tab. 3 Qualitative corresponding table between tritium content and source age in groundwater

氚含量/TU	年代定性
氚含量 < 0.8	1952 年前补给的地下水
0.8 ≤ 氚含量 ≤ 4.0	1952 年前补给的地下水与最近补给地下水的混合水
5 ≤ 氚含量 ≤ 15	现代水 (< 5~10 年)
5 ≤ 氚含量 ≤ 30	存在核爆氚
氚含量 > 30	20 世纪 60—70 年代补给的地下水

表 4 为本次 38 组采样检测的氚含量分析数据,黄河水氚含量范围在 0.8~4.0 TU,为 1952 年前补给的地下水与最近补给的地下水的混合水。

第四系地下水氚含量较高,接近 30 TU,说明存在核爆氚,地下水径流条件好,这可能与第四系埋深较浅有关。

白垩系地下水氚含量在 0.8~4.0 TU,为 1952 年前补给的地下水与最近补给的地下水的混合水,并且氚含量较低,说明地下水径流条件较差。

表 4 测试水样 T 的分析数据

Tab. 4 Analytical data of T in tested samples

采样层位	编号	氚含量/TU	采样层位	编号	氚含量/TU	
黄河	1	2.39±0.26	20		1.73	
	2	2.26±0.3	21		3.84±0.20	
	3	2.3±0.4	22		0.30±0.75	
第四系	4	27.09	23		0.45±0.57	
	5	27.52	24		13.45	
白垩系	6	2.74±0.23	25		10.03	
	7	13.08	26		0.77	
石炭-二叠系	8	9.54	27		8.1±0.5	
	9	13.94	28		9.4±0.5	
	10	10.76	寒武-奥陶系	29		6.7±0.4
	11	0.04		30		7.2±0.5
	12	0.11		31		0.83
寒武-奥陶系	13	1.32	32		0.62	
	14	10.56±0.15	33		0.83	
	15	5.33±0.18	34		1.08	
	16	2.1	35		5.7±0.4	
	17	2.93±0.24	36		6.1±0.4	
	18	2.39±0.26	37		7.85	
	19	4.33±0.19	38		6.02	

石炭-二叠系地下水氚含量变化范围较大,11 和 12 号样品氚含量很低为 1952 年前补给的地下水,其

余水样氚含量 5~10 TU 为现代水 (< 5~10 年),由于石炭-二叠系以碎屑裂隙发育为主,因此:氚含

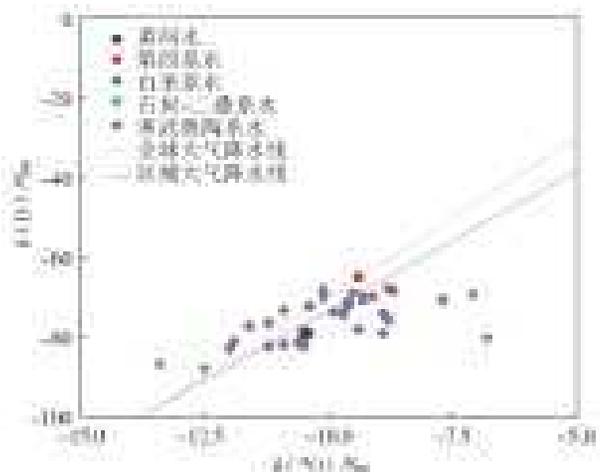


图 5 不同水体 δ(D)-δ(18O)关系

Fig. 5 δ(D)-δ(18O) relationship of different water bodies

3.3.2 氚(T)同位素特征

氚(T)是氢的天然放射性同位素,可以利用氚含量来计算地下水的年龄、示踪地下水的循环径流条件,当地下水中的氚含量越高时,地下水的径流条件越好^[24]。Clark 等^[25]根据不同时期地下水中的氚含量给出了一种地下水混合后对地下水年龄的定

量较高的地区说明地层碎屑裂隙发育成一定规模的导水网络,地下水径流较好;氡含量低的地区说明裂隙不发育,地下水径流条件差。

寒武-奥陶系地下水氡含量变化范围较大,取样点中1952年前补给的地下水约占15%,1952年前补给与最近补给的地下水的混合水约占39%,现代水(<5~10年)约占46%,说明寒武-奥陶系岩溶裂隙发育不均匀,局部地区岩溶发育强烈,地下水径流条件好,水循环迅速,地下水通过裂隙带与现代水相联系,因此在开发利用时应注意水资源保护。

3.4 黄河渗漏对地下水补给影响

研究区地下水主要补给来源为大气降水和地表水下渗补给,由于气候干旱、降雨量稀少,研究区内难以形成除黄河以外的地表水体。而黄河从研究区东部由北至南侧向径流,其两侧出露寒武系、奥陶系和白垩系,结合前文分析,黄河水与寒武-奥陶系地下水联系密切,因此以黄河水作为地表水,利用不同水体的稳定同位素作为示踪剂,根据质量守恒方程,结合大气降水、地表水和地下水同位素数据,计算不同补给水源对地下水的贡献比例(式(5)^[26]),分析黄河渗漏对地下水补给影响。

$$C=A(1-X)+BX \quad (5)$$

其中: A 为大气降水 $\delta(^{18}\text{O})$ 值, ‰ ; B 为地表水 $\delta(^{18}\text{O})$ 值, ‰ ; C 为地下水 $\delta(^{18}\text{O})$ 值, ‰ ; X 为地表水所占比例, $\%$ 。

计算结果见图6:大气降水对寒武-奥陶系地下水的补给比例范围在0.98%~91.7%,平均补给比例为61.2%;地表水(以下称黄河水)对寒武-奥陶系地下水的补给比例范围在0.83%~90.2%,平均补给比例为38.8%。

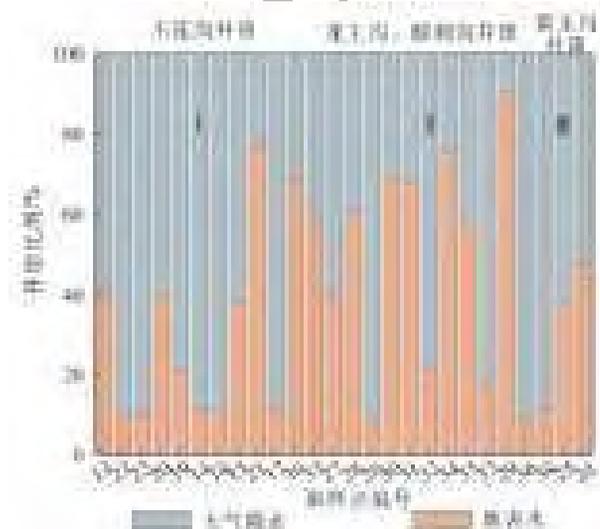


图6 大气降水、地表水与地下水补给比例

Fig. 6 Atmospheric precipitation, surface water, and groundwater recharge ratio

沿地下水径流方向,按补给比例将寒武-奥陶系地下水分为3个区:大气降水补给比例Ⅲ区>Ⅱ区>Ⅰ区,黄河水补给比例Ⅲ区>Ⅱ区>Ⅰ区。Ⅰ区主要分布于研究区北部不连沟井田一带,黄河沿岸出露寒武-奥陶系直接接受大气降水和黄河水补给,黄河水补给比例较小,占31%;Ⅱ区主要分布于龙王沟、酸刺沟井田一带,地质构造较为发育,包括窑沟背向斜、西黄家梁背斜、焦稍沟向斜、贾巴壕背斜和龙王沟正断层、哈马尔崩正断层及石圪咀正断层,褶皱轴部裂隙带及断层破碎带成为黄河水与寒武-奥陶系地下水的导水通道,黄河沿地下水径流方向侧向补给地下水,补给比例较大,占45%;Ⅲ区主要分布于黄玉川井田一带,寒武-奥陶系埋藏深,地质构造不发育,距黄河距离较远,黄河水对地下水的补给十分有限,占42.8%。

4 结论

(1)研究区黄河水为低矿化度弱碱-偏碱性水,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Ca}$ 型水;第四系地下水为低矿化度弱碱性水,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型水;白垩系地下水为中低矿化度碱性水,水化学类型主要为 Cl-Na 型水;石炭-二叠系地下水为中低矿化度弱酸性、中性和碱性水,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水;寒武-奥陶系地下水为高矿化度弱碱-偏碱性水,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型水。

(2)运用HYSPLIT模型模拟发现,研究区降水水汽来源主要为西风带水汽、地表水及地下水水汽蒸发再循环。

(3)寒武-奥陶系岩溶裂隙水通过裂隙带越流补给白垩系砂岩裂隙水和第四系松散孔隙水;第四系松散孔隙水向下补给石炭-二叠系砂岩裂隙水;寒武-奥陶系岩溶裂隙水在研究区北部接受黄河侧向渗漏补给,补给比例受地质构造发育影响,在龙王沟、酸刺沟井田一带补给比例最大。

参考文献(References):

- [1] 李文平, 乔伟, 李小琴, 等. 深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2437-2448. (LI W P, QIAO W, LI X Q, et. al. Characteristics of water disaster evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2437-2448. (in Chinese)) DOI:10.13225/j.cnki.jccs.KJ19.0563.
- [2] 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. (in Chinese)) DOI: 10. 13225/j. cnki. jccs. 2016. 5045.
- [3] 李建中, 周爱国, 周建伟, 等. 华北煤田矿山开采导致含水层破坏风险评估: 以淄博洪山煤矿为例[J]. 地球科学, 2020, 45(3): 1027-1040. (LI J Z, ZHOU A G, ZHOU J W, et. al. Risk assessment of aquifer destruction in underground mining coal of north China: A case study of Hongshan mine in Zibo City[J]. Earth Science, 2020, 45(3): 1027-1040. (in Chinese)) DOI: 10. 3799/dqkx. 2019. 088.
- [4] 魏远, 顾红波, 薛亮, 等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 107-114. (WEI Y, GU H B, XUE L, et. al. Review of studies on reclamation and ecological restoration of abandoned land of mine[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(2): 107-114. (in Chinese)) DOI: 10. 16843/j. sswc. 2012. 02. 019.
- [5] PARRA V, ARUMÍ J L, MUÑOZ E, et al. Characterization of the groundwater storage systems of south-central Chile: An approach based on recession flow analysis[J]. Water, 2019, 11(11): 1-14. DOI: 10. 3390/w11112324.
- [6] NDIKUBWIMANA I, MAO X M, ZHU D B, et. al. Geothermal evolution of deep parent fluid in western Guangdong, China: Evidence from water chemistry, stable isotopes and geothermometry[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(8): 2947-2691. DOI: 10. 1007/s10040-020-02222-x.
- [7] TIAN L D, MASSON-DELMOTTE V, STIEVENARD M, et al. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2001, 106(D22): 28081-28088. DOI: 10. 1029/2001JD900186.
- [8] 邵杰, 李瑛, 侯光才, 等. 新疆伊犁河谷地下水循环演化特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 20-25. (SHAO J, LI Y, HOU G C, et. al. Evolution of groundwater circulation in the Yili River Valley in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 20-25. (in Chinese)) DOI: 10. 13866/j. azr. 2017. 01. 03.
- [9] 葛梦玉, 渠俊峰, 王坤, 等. 邹城市东滩矿区不同水体氢氧稳定同位素特征分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 277-283. (GE M Y, QU J F, WANG K, et. al. Soil water stable isotope characteristics of different reclamation aged soil in Dongtan Coal Mining subsidence area in Zoucheng City[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 277-283. (in Chinese)) DOI: 10. 13225/j. cnki. jccs. 2017. 0204.
- [10] 陈陆望, 桂和荣, 胡友彪, 等. 皖北矿区煤层底板岩溶水环境同位素判别模式[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(2): 44-47, 50. (CHEN L W, GUI H R, HU Y B, et. al. Environment isotope determination mode for karst water under seam floor of Wanbei Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(2): 44-47, 50. (in Chinese)) DOI: 10. 13199/j. cst. 2003. 02. 45. chenlw. 015.
- [11] 姚吉坤, 孙太生, 卢文柏, 等. 准格尔矿区深层岩溶地下水合理开发与利用[J]. 煤炭科学技术, 1994, 22(6): 43-46, 34, 63. (YAO J K, SUN T S, LU W B, et. al. Rational development and utilization of deep karst groundwater in Jungar Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 1994, 22(6): 43-46, 34, 63. (in Chinese)) DOI: 10. 13199/j. cst. 1994. 06. 43. yaojk. 016.
- [12] 李宏杰, 马君, 姜鹏, 等. 准格尔煤田岩溶水文地质特征及水害防治技术[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9): 246-251. (LI H J, MA J, JIANG P, et. al. Karst hydrogeological characteristics and prevention and control technology for water damage in Jungar Coalfield[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9): 246-251. (in Chinese)) DOI: 10. 13347/j. cnki. mkaq. 2018. 09. 060.
- [13] 崔小顺, 郑昭贤, 程中双, 等. 塔城盆地北区承压地下水化学特征及其形成机制[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 148-155. (CUI X S, ZHENG Z X, CHENG Z S, et. al. Hydrochemical characteristics and evolution mechanism of confined groundwater in the north Tacheng basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 148-155. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0121.
- [14] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 711-719. (LI X F, ZHANG M J, LI Y J, et. al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture transports over the arid region in northwest China[J]. Environmental Science, 2012, 33(3): 711-719. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 2012. 03. 010.
- [15] 于潇萌, 曹乐. 3 种常见拉格朗日大气污染扩散模型的理论与应用研究[J]. 环境工程, 2020, 38(9): 145-153. (YU X M, CAO L. A review of the Lagrangian diffusion model for atmospheric pollution[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(9): 145-153. (in Chinese)) DOI: 10. 13205/j. hjgc. 202009024.
- [16] BAGHERI R, BAGHERI F, KARAMI G H, et. al. Chemo-isotopes (^{18}O & ^2H) signatures and HYS-

- PLIT model application: Clues to the atmospheric moisture and air mass origins[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 215. DOI: 10. 1016/j. atmosenv. 2019. 116892.
- [17] 曹乐, 申建梅, 聂振龙, 等. 巴丹吉林沙漠降水稳定同位素特征与水汽再循环[J/OL]. *地球科学*: 1-14 [2020-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200930.1546.004.html>. (CAO L, SHEN J M, NI J L, et. al. Stable isotopic characteristics of precipitation and moisture recycling in the Badain Jaran desert [J/OL]. *Earth Science*, 1-14 [2020-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200930.1546.004.html>. (in Chinese)) DOI: 10. 3799/dqkx. 2020. 273.
- [18] HAO S, LI F D, LI Y H, et al. Stable isotope evidence for identifying the recharge mechanisms of precipitation, surface water, and groundwater in the Ebinur Lake basin[A]. *Science of The Total Environment* 2019, 657(C): 1041-1050. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2018. 12. 102.
- [19] CRAIG H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters[J]. *Science*, 1961, 133(3467): 1833-1834. DOI: 10. 1126/science. 133. 3467. 1833.
- [20] 金可, 饶文波, 孙江, 等. 鄂尔多斯沙区大气降水同位素特征及其来源[J]. *人民黄河*, 2015, 37(3): 31-35. (JIN K, RAO W B, SUN J, et. al. Isotope characteristics and source of precipitation in the Ordos desert area [J]. *Yellow River*, 2015, 37(3): 31-35. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2015. 03. 009.
- [21] 桂和荣, 陈陆望, 宋晓梅. 皖北矿区地下水中氢氧稳定同位素的漂移特征[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(1): 111-114. (GUI H R, CHEN L W, SONG X M. Drift features of oxygen and hydrogen stable isotopes in deep groundwater in mining area of northern Anhui [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(1): 111-114. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0367-6234. 2005. 01. 029.
- [22] 黄平华, 陈建生, 宁超. 焦作矿区地下水中氢氧同位素分析[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(5): 770-775. (HUANG P H, CHEN J S, NING C. The analysis of hydrogen and oxygen isotopes in the groundwater of Jiaozuo mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(5): 770-775. (in Chinese)) DOI: 10. 13225/j. cnki. jccs. 2012. 05. 003.
- [23] 李学礼, 孙占学, 刘金辉. 水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 2010. (LI X L, SUN Z X, LIU J H. *Hydrogeochemistry* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010. (in Chinese))
- [24] 靖淑慧, 刘加珍, 陈永金, 等. 氢氧稳定同位素对东平湖枯水期水环境的指示作用[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1): 120-129, 149. (JING S H, LIU J Z, CHEN Y J, et. al. Indication function of hydrogen and oxygen stable isotopes on the water environment of Dongping Lake during dry period[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(1): 120-129, 149. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0017.
- [25] CLARK I D, FRITZ P. *Environmental isotopes in hydrogeology*[M]. New York: CRC Lewis Publishers, 1997.
- [26] HSIN F Y, HUNG I L, CHENG H L, et al. Identifying seasonal groundwater recharge using environmental stable isotopes[J]. *Water*, 2014, 6(10): 2849-2861. DOI: 10. 3390/w6102849.

Characterization of groundwater circulation in the Jungar coalfield based on water chemistry and environmental isotopes

LI Shuanghui^{1,2}, HUANG Xuanming², ZHU Hongjun², ZHU Kaipeng^{2,3}, ZHANG Zeyuan^{1,2}, YANG Jian^{2,3}

(1. *China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;*

2. *China Coal Technology and Engineering Group Xi'an Research Institute, Xi'an 710054, China;*

3. *Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China)*

Abstract: The Jungar coalfield is one of the major coal resource mining sites in northwest China. Water damage at the bottom of the coal seam has become an important factor that is limiting the development of the local economy and society. Therefore, it is important to identify the recharge relationship and circulation characteristics between atmospheric precipitation, surface water, and groundwater in the Jungar coalfield to provide a theoretical basis for the scientific development of coal resources and the effective restoration of groundwater resources in the area.

Environmental isotope method, water chemistry analysis methods, and HYSPLIT applied to the groundwater of the Jungar coalfield. Through historical data collection, field survey sampling, and indoor analysis, the water chemistry composition and environmental isotope characteristics of atmospheric precipitation, surface water and groundwater, the main sources of atmospheric precipitation, surface water and groundwater transformation relationships were analyzed.

(下转第 589 页)

machine-silt particle size gradation. The characteristic law of particle size distribution was studied using multifractal analysis.

The results show that the particle size of the machined sediment has good multifractal characteristics. Combined with the multifractal theory, the overall average inhomogeneity of the particle size distribution is $D_1(B_2) > D_1(C_1) > D_1(C_2) > D_1(A_2) > D_1(B_1) > D_1(A_1) > D_1(D_2) > D_1(D_1)$. There is a certain threshold, so that when, the uneven size of the largest subset particle size distribution is $D_{\geq 5}(B_2) > D_{\geq 5}(B_1) > D_{\geq 5}(D_2) > D_{\geq 5}(C_2) > D_{\geq 5}(A_2) > D_{\geq 5}(C_1) > D_{\geq 5}(A_1) > D_{\geq 5}(D_1)$, at that time, the uneven size of the smallest subset particle size distribution is $D_{\leq -7}, D_{\leq -7}(C_1) > D_{\leq -7}(B_2) > D_{\leq -7}(A_1) > D_{\leq -7}(D_1) > D_{\leq -7}(C_2) > D_{\leq -7}(A_2) > D_{\leq -7}(D_2) > D_{\leq -7}(B_1)$ (A_1, B_1, C_1, D_1 are the sediment sample numbers of the left bank unit, and A_2, B_2, C_2, D_2 is the sediment sample number of the right bank unit). Combined with the generalized dimensional spectrum, the non-uniform distribution of the largest subset and the smallest subset of the sediment size of the Xiangjiaba Hydropower Station can not be effectively compared. Combined with the multifractal singularity, the spectrum width is $\Delta\alpha_1$ and $\Delta\alpha_2$, and the uneven size of the largest subset particle size distribution is $\Delta\alpha_1(B_2) > \Delta\alpha_1(B_1) > \Delta\alpha_1(D_2) > \Delta\alpha_1(C_2) > \Delta\alpha_1(A_2) > \Delta\alpha_1(C_1) > \Delta\alpha_1(A_1) > \Delta\alpha_1(D_1)$. The smallest subset particle size distribution is $\Delta\alpha_2(C_1) > \Delta\alpha_2(B_2) > \Delta\alpha_2(A_1) > \Delta\alpha_2(D_1) > \Delta\alpha_2(C_2) > \Delta\alpha_2(A_2) > \Delta\alpha_2(D_2) > \Delta\alpha_2(B_1)$.

Combining the generalized dimensional spectrum and the multifractal singular spectrum, the two conclusions are the same regarding the local unevenness of the particle size distribution. Combined with the correlation analysis, the sediment refinement and the maximum subset distribution unevenness show good results. The negative correlation of the silt refinement has nothing to do with the uneven size of the smallest subset distribution.

Key words: hydropower station; overburden sediment; multifractal theory; particle size distribution

(上接第 571 页)

The results show that: (1) Surface water has low mineralization and is weakly alkaline, and the water chemistry type is mainly $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Ca}$ type water. The overall mineralization of groundwater is low and weakly alkaline, and the water chemistry type is mainly $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ type, Cl-Na type, $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ type, and $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ type water. (2) The average value of $\delta(D)$ of Yellow River water is -79.6% , and the $\delta(^{18}\text{O})$ is -10.7% , respectively. The average value of $\delta(D)$ of Quaternary water is -66.25% , and the $\delta(^{18}\text{O})$ is -9.1% , respectively. The average value of $\delta(D)$ of Cretaceous water is -70.6% , and the $\delta(^{18}\text{O})$ is -9.3% , respectively. The average value of $\delta(D)$ of Carboniferous-Permian water is -77.07% , and the $\delta(^{18}\text{O})$ is -9.9% , respectively. The average value of Cambrian-Ordovician water $\delta(D)$ average value is -75.73% , $\delta(^{18}\text{O})$ is -10.06% . Atmospheric precipitation is influenced by polar air masses and southeastern monsoons, and the principal sources are westerly water vapor, surface water, and groundwater vapor evaporation recirculation. (3) The fourth system water has high tritium content, the presence of nuclear explosive tritium, and excellent groundwater runoff conditions. The Cretaceous water has low tritium content and is a mixture of groundwater recharged before 1952 and recently recharged water. The Carboniferous-Permian water contains a wide range of tritium content, including groundwater recharged before 1952 and modern water. The Cambrian-Ordovician water contains a wide range of tritium content, including groundwater recharged before 1952, modern water, and mixed water. (4) The recharge ratio of atmospheric precipitation to Cambrian-Australian water ranges from 0.98% to 91.7% , with an average recharge rate of 61.2% . The recharge ratio of surface water (referred to as Yellow River water) to Cambrian-Ordovician water ranges from 0.83% to 90.2% , with an average recharge rate of 38.8% . Among them, the recharge ratio of Yellow River water to Cambrian-Ordovician water is larger in Longwanggou, Suancigou, and Huangyuchuan well field, which is influenced by the development of geological structures.

The fault zone and the fracture zone of the fold axis are the main water-conducting channels between different aquifers. Atmospheric precipitation and the Yellow River are the principal sources of groundwater recharge. The precipitation vapor sources are mainly westerly water vapor, surface water, and groundwater vapor evaporation recirculation. Highly pressurized head Cambrian-Ordovician karst fracture water cross-flow recharges the Fourth Series and sandstone fracture water. The pore water of the Fourth Series recharges the fracture water of the Carboniferous-Permian sandstone downward through the fracture development zone of the unconformity contact surface between the strata. The recharge ratio of the Yellow River to Cambrian-Australian water is influenced by the development of geological structures. In Longwanggou, Suancigou, and Huangyuchuan well field, the proportion of recharge of the Yellow River water to Cambrian-Ordovician water is larger.

Key words: groundwater circulation; HYSPPLIT model; stable isotope; groundwater age; replenishment ratio; Jungar coalfield area