

涞源北盆地地下水氢氧同位素特征及北海泉形成模式

王忠亮, 郭春艳, 张彦鹏

Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the groundwater and formation mode of the Beihai springs in the northern Laiyuan Basin

WANG Zhongliang, GUO Chunyan, and ZHANG Yanpeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202002004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究

Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes

杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 李志明, 刘文波, 康伟 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 154-162

岩溶矿区水文地球化学特征及其水源指示意义

Groundwater source identification in carbonate-hosted deposit using hydrogeochemistry, hydrogen and oxygen isotope method

黄荷, 陈植华, 王涛, 罗朝晖, 张亮, 王剑, 项彩娟, 孙帮涛, 王勇 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 19-19

玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征

Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau

王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 18-26

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62-71

贵州洪家渡盆地泉水水化学和碳同位素特征及成因

Characteristics and controls of the hydrochemistry and carbon isotope of the spring water in the Hongjiadu Basin of Guizhou

任坤, 潘晓东, 焦友军, 黄宇, 曾洁, 彭聪, 梁嘉鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 9-9

同位素技术解析安阳河与地下水相互作用

Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater

张敏, 平建华, 禹言, 黄先贵, 朱亚强, 程玉刚 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 31-39



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202002004

涞源北盆地地下水氢氧同位素特征及北海泉形成模式

王忠亮¹, 郭春艳², 张彦鹏³

(1. 河北省水文工程地质勘察院, 河北 石家庄 050021; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 拒马源泉群作为拒马河的源头, 受到了较多专家和学者的关注。但这些研究多集中在地下水的水化学、水位动态、泉流量等特征上, 对地下水氢氧同位素特征的分析几乎没有, 且对北海泉的成因解释多为粗略的定性概述。为了说明涞源北盆地地下水的氢氧同位素特征, 详细揭示北海泉的形成模式, 首次系统地采集了不同含水岩组的地下水样品, 测定了水样的氢氧同位素组分。结果表明: 样品点 δD 和 $\delta^{18}O$ 值均落在区域大气降水线上或附近, 大气降水是研究区地下水的主要补给来源; 白云岩、灰岩含水岩组高程效应较明显, 径流途径长, 松散含水层径流途径短, 受蒸发作用较强; 白云岩、灰岩含水岩组和松散含水层氘盈余 d 值分别为 6.0‰ ~ 11.6‰、4.2‰ ~ 11.2‰、3.8‰ ~ 8.0‰, 较大气降水大部分偏小, 表明岩溶水和松散孔隙水经历了不同的流动过程; 白云岩、灰岩含水岩组从补给区向排泄区各自流动过程中, 在小西庄、香炉屯村附近断裂带发生沟通混合, 然后在向盆地中心径流过程中受断层阻水上升, 上升过程中又接受了松散孔隙水的补给, 最后在松散岩层中出露成泉, 形成北海泉。在孔隙水混入前, 两者的平均补给比例大约为 48.4% ~ 57.6% 和 42.4% ~ 51.6%。

关键词: 氢氧同位素; 涞源北盆地; 北海泉形成模式; 岩溶水; 松散孔隙水

中图分类号: P641.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0027-09

Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the groundwater and formation mode of the Beihai springs in the northern Laiyuan Basin

WANG Zhongliang¹, GUO Chunyan², ZHANG Yanpeng³

(1. Hebei Prospecting Institute of Hydro-engineering Geology, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: As the source of the Jumahe River, the Juma springs has received the attention of many experts and scholars. Previous studies focused mainly on the chemical and dynamic characteristics of the groundwater and the spring discharge characteristics, the hydrogen and oxygen isotopes characteristics were seldom examined, and the explanation of the causes of the Beihai springs was only a rough qualitative overview. To illustrate the characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of the groundwater in the northern Laiyuan Basin and reveal the forming mode of the Beihai springs in detail, groundwater samples in different aquifers were systematically collected for the first time in the study area and the hydrogen and oxygen isotopic components were determined in this paper. The results show that the values of δD and $\delta^{18}O$ in the water samples fall on or near the regional meteoric water line, indicating that the meteoric water is the main recharge source of the groundwater. The altitude effect is obvious and the groundwater flow path is long for the groundwater in the dolomite aquifer and limestone aquifer, the groundwater flow path is short and the evaporation effect is strong for the groundwater

收稿日期: 2020-02-04; 修订日期: 2020-05-12

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114010801)

第一作者: 王忠亮(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事水工环地质研究。E-mail: 591002923@qq.com

in the unconsolidated sediment aquifer. The deuterium excess of the sample in the dolomite aquifer, limestone aquifer and unconsolidated sediment aquifer are 6.0‰–11.6‰, 4.2‰–11.2‰ and 3.8‰–8.0‰, respectively, much smaller than that in the meteoric water, showing that the karst water and the pore water undergo different processes. When the groundwater in the dolomite aquifer and limestone aquifer flows from the recharge areas to the discharge areas, hydraulic connection and mixing occur in the fault zone near Xiaoxizhuang and Xianglutun. Groundwater rises during the process of flow to the center of the basin because of the resistance effect of the fault, and groundwater in the dolomite aquifer and limestone aquifer is subsequently recharged by the pore water in the unconsolidated sediment aquifer, at last the groundwater emerges on the ground surface in the form of springs as the Beihai springs. Before the pore water joins in, the average recharge comes from the limestone aquifer and dolomite aquifer is about 48.4%–57.6% and 42.4%–51.6%, respectively.

Keywords: hydrogen and oxygen isotopes; Laiyuan northern basin; Beihai springs forming mode; karst water; pore water

涑源盆地位于太行山北段, 面积约为 1 149 km²。四周高中山环抱, 地形切割深, 地势总体上西北高, 东南低^[1]。

拒马河发源于涑源盆地内, 流经河北、北京、天津地区。近年来, 随着降水量减少、地下水开采量增加以及人类活动对泉群周边环境的改造, 构成拒马源泉群^[2]的“七大”泉中旗山泉、泉坊泉、石门泉、石门南泉、杜村泉消失或干涸, 仅有北海泉、南关泉地表可见, 泉群流量不断减少, 在干旱年份有断流的危险, 已经威胁到拒马河沿途地区的生态发展。

较多专家和学者关注拒马源泉群, 对涑源盆地地下水进行了研究。李玉龙等^[3]利用监测资料分析了涑源盆地地下水多年动态规律; 贾春义^[4]分析了泉域岩溶水的溶解性总固体、硬度、元素的迁移形式以及水化学规律; 李志先、王海宁等^[5-6]利用降雨量、地表水流量等资料, 采用多元回归方程、基流分割等方法推算、计算出了泉群流量; 这些研究只是对盆地地下水的特征进行了说明, 未对泉群的成因作出论述。

马剑飞等^[7]阐述了地质构造对地下水流场的控制作用, 通过盆地内地下水化学演化模拟, 说明了岩溶水对孔隙水的补给以及两者的混合作用, 研究认为孔隙水在山麓地带接受岩溶水侧向补给后向盆地中心汇集, 在低洼处以泉群形式出露, 但对岩溶水补给孔隙水的具体径流途径、不同类型断裂的控水作用未做说明。王新峰等^[8]通过对区内泉点的调查, 说明了北海泉为孔隙水径流过程中受阻水断层阻滞, 上涌成泉; 详细论述了断裂构造的发育程度及其控水作用, 但未证实扯拽沟、小西庄附近断裂发育带对泉群的影响。两者都认为北海泉的补给源为盆地内的孔隙

水, 但根据北海泉年流量统计, 盆地内孔隙水无法满足泉水排泄量。因此, 推测北海泉可能存在的多个补给来源。

此外, 研究区地下水化学特征研究多为水化学类型、溶解性总固体、离子浓度等内容, 前人未在该区域开展过地下水氢氧同位素研究工作, 关于氢氧同位素特征的分析几乎为空白。

本文在前人研究的基础上, 通过涑源北盆地内不同类型地下水及北海泉的氢氧同位素组成、空间分布特征及其指示意义分析, 揭示了北海泉的形成模式, 对拒马源泉群合理开发利用与保护提供了科学依据。

1 研究区概况

涑源盆地地下水系统以涑源盆地为中心, 构成天然的地表分水岭与地下分水岭基本一致的封闭汇水盆地^[1]。系统北部边界为骡切崖梁地表分水岭, 西部边界为与山西有交界的地表分水岭, 南部为上元古界片麻岩隔水层, 东部以王安镇侵入岩体为界, 出口在盆地东南部上饭铺一带。受区内牌坊—冯村北东东向压扭性断层控制, 涑源盆地被分割成南北两部分^[2]。

盆地内断裂构造发育, 主要有北东东向、北东向、北北西向、北西向和南北向 5 组断层^[9], 出露太古界、中元古界、古生界和新生界地层。受区域地层岩性和地质构造总体控制, 涑源盆地形成一个典型的汇水盆地。

大气降水是地下水的主要补给来源^[1-4, 7-8]。在北盆地外围岩溶山地区, 降水一部分以散流的形式汇入地形低洼的山间河谷、沟谷, 再以潜流形式向下游径流、排泄。另一部分在岩溶裂隙较发育地带, 则通过溶隙、溶孔等垂直入渗直接转化为地下水, 并向下

径流。在径流过程中,小部分在以泉的形式出露。大部分继续沿导水溶隙、溶孔等向深部运动。

河谷地带为地下水集中排泄区。孔隙水以潜流的形式向下游排泄。深部岩溶水受牌坊—冯村压扭性断层阻水控制,形成北海泉、南关泉等上升泉群。

2 涑源北盆地地下水氢氧同位素特征

2.1 样品采集及分析

2014年12月13—18日,在涑源北盆地内从岩溶山地区到盆地河谷地带采集地下水同位素样品,共51组。由于东团堡盆地地下水系统相对独立,与北盆地地下水系统相关性不大,本次未对该系统内的样品同位素特征进行分析。现场采用GPS测定采样点的坐标和高度,样品用550 mL塑料瓶采集,放置低温处保存。

采样点位置如图1所示。样品的同位素测试在自然资源部地下水科学与工程重点实验室完成。

测试仪器采用MAT253气体同位素质谱仪,美国thermo公司产品,配有Gasbench II和FlashEA1112HT(ConFlo IV接口)。采用高温热转换元素—同位素比值质谱(HTC—IRMS)法测定 δD ,测试精度1.0‰。采用Gasbench II同位素比值质谱(Gasbench II—IRMS)法测定 $\delta^{18}O$,测试精度0.2‰。测试结果见表1。

2.2 氢氧同位素分布

本次采用郑淑惠等^[10]建立的中国现代大气降水线方程 $\delta D=7.9\delta^{18}O+8.2$ 作为区域大气降水线。51组同位素样品的 δD - $\delta^{18}O$ 关系如图2所示。

从表1和图2(a)可以看出,白云岩含水岩组的 δD 值为-78.0‰~-66.0‰, $\delta^{18}O$ 值为-11.2‰~-9.0‰,平均值分别为-70.8‰、-9.9‰。从团圆向斜两侧到盆地外围河谷发育带,样品 δD 和 $\delta^{18}O$ 值总体上逐渐增大,其平均值从-74.4‰、-10.5‰变为-69.4‰、-9.7‰,表现出一定的高程效应。样品点较为均匀地落在区域大气降水线附近,与其近似平行,表明白云岩含水岩组来源于大气降水补给。

样品点大致分为三个区域,Ⅰ区显示了向斜西北侧山地的同位素特征;Ⅱ区反映出区内河谷发育带 δD 和 $\delta^{18}O$ 值范围集中在-73.0‰~-69.0‰和-10.4‰~-9.6‰;Ⅲ区则反映这些样品点可能受到了其他因素的影响。

T1-54和TZ10样品点位于向斜东侧山地区,但同位素值落在Ⅱ区,主要是两点位于河谷发育带附近,与该区域岩溶水关系密切。Ⅱ区中上庄乡河谷发育带与其他三个河谷发育带相比,同位素值更接近降水线,主要在于此河谷地带山地海拔高,河谷坡降大,地下水接受大气降水补给后径流途径短循环速度快。

从表1和图2(b)可以看出,灰岩含水岩组同位素值沿区域大气降水线分布,说明其来源于大气降水,且相对较为集中, δD 值为-76.0‰~-66.0‰, $\delta^{18}O$ 值为-10.9‰~-8.9‰,平均值分别为-69.6‰、-9.8‰。 δD 、 $\delta^{18}O$ 平均值从向斜两翼-70.6‰、-10.0‰,到核部-69.4‰、-9.9‰,再到山麓地带-67.8‰、-9.3‰,总体上逐渐增大,说明岩溶水显示出了一定的高程效应。

山麓地带的同位素值多位于区域大气降水线右侧,偏离了降水线的初始值,说明岩溶水径流途径相对较长,水-岩接触时间较长,以T2-51和T2-52点最为突出。T4-20点位于地下水系统分水岭边界附近,受

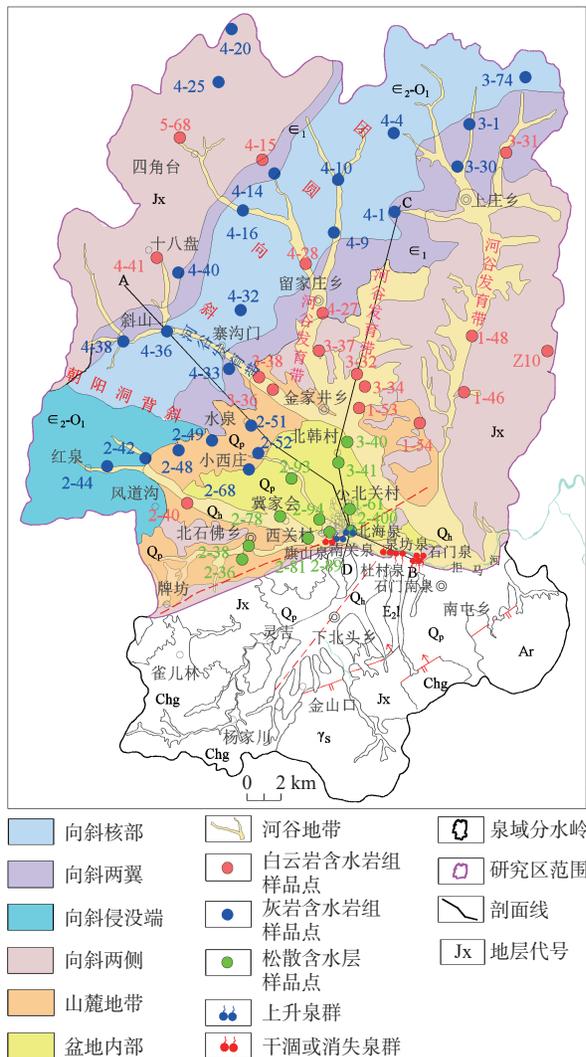


图1 涑源北盆地氢氧同位素采样点分布图

Fig. 1 Location of the sampling sites in the northern Laiyuan Basin

表 1 涞源北盆地样品氢氧同位素特征

Table 1 Analytical results of hydrogen and oxygen isotopes of the groundwater samples

样品编号	采样地点	含水岩组	构造或地貌部位	井深/m	水温/℃	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	氡盈余值 $d/\text{‰}$	d 平均值/ ‰				
									含水岩组	构造部位			
T5-68	四角台村	白云岩含水岩组	团圆向斜两侧	泉点	8	-78	-11.2	11.6	8.5	9.8			
T4-15	陈家庄村			12	9	-76	-10.8	10.4					
T4-41	十八盘村西			180	9	-76	-10.9	11.2					
T1-54	泉峪村			120	8	-73	-10.1	7.8					
TZ10	石棉三矿			160	8	-69	-9.6	7.8					
T2-40	白绸村北			向斜侵没端东侧	240	8	-69	-9.5			7.0	7.0	
T3-38	北坡底村			斜山峪河谷发育带	200	10	-66	-9.1			6.8	6.8	
T3-36	土巷口村北				184	8	-70	-9.6			6.8		
T1-48	中庄村			160	9	-71	-10.0	9.0			9.2		
T1-46	狮子峪			上庄乡河谷发育带	85	10	-73	-10.4				10.2	8.9
T3-31	上老芳村南			305	9	-71	-9.8	7.4					
T4-28	坡水村东			195	8	-66	-9.4	9.2					
T4-27	留家庄村			留家庄乡河谷发育带	216	10	-69	-9.8			9.4	9.2	
T3-37	张家铺村				220	9	-71	-10.0			9.0		
T3-32	岳家庄村	150	9	-71	-9.7	6.6	6.8						
T3-34	王家井村	金家井乡河谷发育带	150	10	-69	-9.6		7.8					
T1-53	梁家庄村		160	10	-66	-9.0		6.0					
T4-20	分水岭村	灰岩含水岩组	分水岭边界附近	泉点	6	-76	-10.9	11.2	8.8	9.8			
T4-25	嗅水盆村中			17.4	8	-73	-10.3	9.4					
T3-74	谷家庄北			泉点	6	-72	-10.1	8.8					
T4-40	东沟村西南			6.6	11	-66	-9.3	8.4					
T4-14	马圈沟村			30	10	-69	-9.9	10.2					
T3-1	沙岭村北			团圆向斜两翼	160	10	-72	-10.1			8.8	9.1	
T4-1	南庄村西				165	9	-68	-9.7			9.6		
T3-30	东泉头村			220	10	-69	-9.7	8.6					
T4-10	石片村东北			60	8	-71	-10.1	9.8			9.8		
T4-9	团圆村西南			85	7	-70	-10.1	10.8					
T4-32	任家沟村			团圆向斜核部	105	9	-68	-9.6				8.8	
T4-16	水石塘村西				195	8	-70	-9.9				9.2	8.8
T4-4	窑子沟村西			泉点	9	-68	-9.8	10.4					
T4-33	南坡底村西北			180	7	-70	-9.9	9.2			9.7		
T4-36	斜山村南	斜山峪河谷发育带	90	9	-71	-10.1	9.8						
T4-38	黄土岭村西		180	8	-73	-10.4	10.2						
T2-42	艾河村西北	向斜侵没端	140	8	-68	-9.6	8.8	8.5					
T2-44	红泉村东		180	7	-67	-9.4	8.2						
T2-49	龙虎寺村西北	155	8	-69	-9.6	7.8	6.4						
T2-68	北上屯村东北	190	9	-66	-9.1	6.8							
T2-52	香炉屯村南	山麓地带	200	11	-69	-9.3		5.4					
T2-51	水泉村东		220	9	-67	-8.9		4.2					
T2-48	赵家井村中		180	8	-68	-9.5		8.0					
T2-93	沿村		40	9	-73	-9.8		5.4					
T2-81	西关加油站	20	11	-72	-10.0	8.0	7.0						
T2-78	冀家会村	120	12	-72	-10.0	8.0							
T2-36	南石佛村	150	9	-73	-9.9	6.2	6.4						
T2-38	北石佛村	盆地内	134	10	-72	-9.9		7.2					
T3-41	顾家营村		108	12	-69	-9.4		6.2					
T3-40	北韩村		200	13	-70	-9.5		6.0					
T1-61	小北关村		100	11	-70	-9.5	6.0	5.9					
T2-94	西环沿村	32	10	-69	-9.1	3.8	6.4						
T2-89	西关村	10	9	-70	-9.7	7.6							
T2-400	拒马源公园	断裂带附近	泉点	12	-72	-9.8	6.4	6.4	6.4				

高程和气温因素控制,同位素值与其他样品点差异明显。团圆向斜两翼、核部同位素值相对分散,受取样位置、高程及深度影响较大。向斜两翼、核部及斜山峪河谷发育带同位素值较其他部位接近区域大气降水线,推测是由于该位置岩溶水循环径流速度较快、途径较短所致。斜山峪河谷发育带同位素值与向斜核部相似,说明两者之间具有密切的成因联系。核部岩溶水从东北向西南径流过程中,受朝阳洞背斜阻水,使得地下水在斜山峪河谷带汇集,表明两处区域存在补给关系。向斜侵没端 T2-42、T2-44 与山麓地带 T2-48、T2-49 同位素特征值相似,说明可能存在红泉-艾河-龙虎寺径流带。

从表 1 和图 2(c)可以看出,松散含水层同位素值落在区域大气降水线的右下方,这主要是由于蒸发作用所致^[11],表明地下水在形成之前经历了一定程度的蒸发。 δD 值为 $-73.0\text{‰} \sim -69.0\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 值为 $-10.0\text{‰} \sim -9.1\text{‰}$,平均值分别为 -71.0‰ 、 -9.7‰ 。样品点分为两个区域,IV区 δD 值范围介于 $-69.0\text{‰} \sim -70.0\text{‰}$,V区 δD 值范围介于 $-73.0\text{‰} \sim -72.0\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 介于 $-10.0\text{‰} \sim$

-9.8‰ ,平均值分别为 -72.4‰ 、 -9.9‰ 。由此可以大致识别出两条径流途径,即县城北部北韩—小北关和县城西部石佛—冀家会—西关径流带,与马剑飞等^[5]对涑源盆地松散岩类孔隙水的水质演化反向模拟结果基本一致,确定了相应的径流途径,证明了岩溶水对孔隙水的侧向补给。但文^[5]未对两条径流带的径流条件做出分析,本次工作将对此进行分析论述。

2.3 氢氧同位素的指示意义

通过分析地下水氢氧同位素的含量和分布特征可以获得地下水补给来源、地下水滞留时间、水力联系等方面的信息^[12]。

2.3.1 主要补给来源的确定

从图 2(d)中可以看出,白云岩含水岩组、灰岩含水岩组和松散含水层样品点均落在区域大气降水线上或附近,说明北盆地内大气降水是地下水的主要补给来源^[12-14]。

白云岩含水岩组、灰岩含水岩组样品点较松散含水层分布相对零散,同位素特征值跨度范围较大,说明其高程效应较为明显,总体上径流途径较长,埋藏

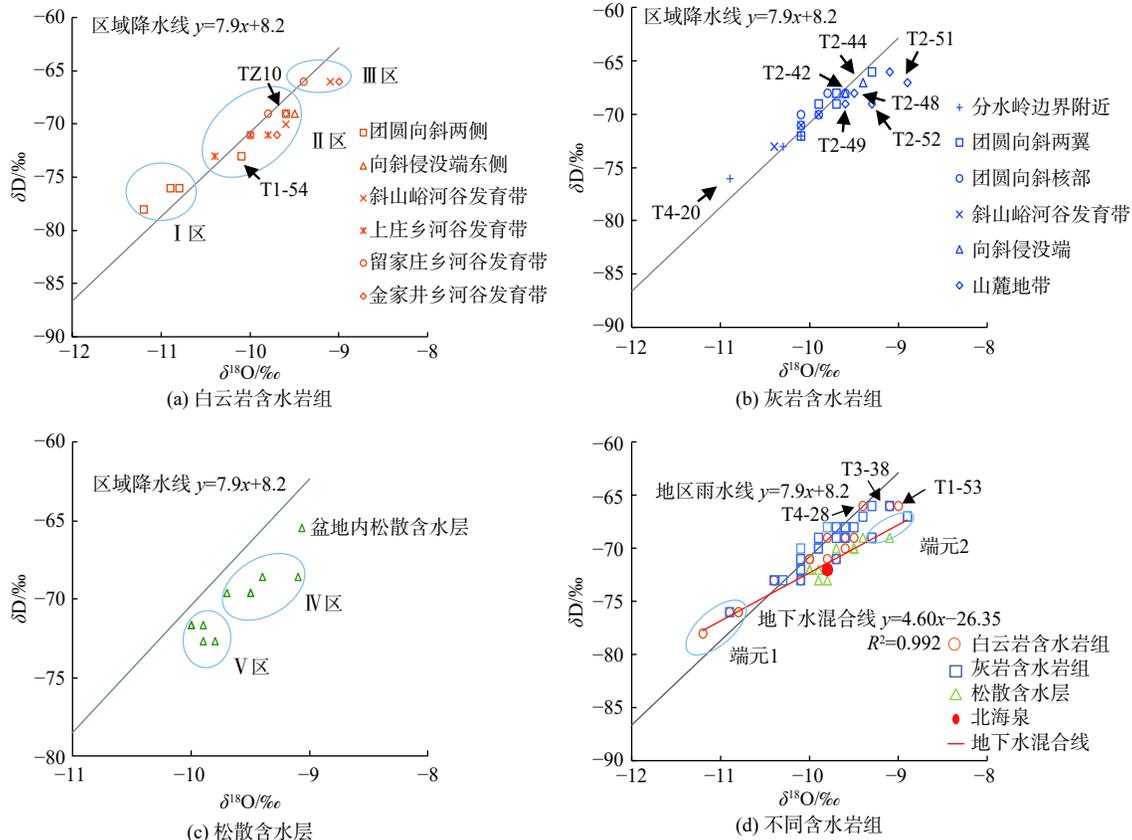


图 2 涑源北盆地地下水 δD - $\delta^{18}O$ 关系图

Fig. 2 Plot of δD vs $\delta^{18}O$ for the samples took from the dolomite aquifer, limestone aquifer and unconsolidated sediment aquifer in the northern Laiyuan Basin

较深,受蒸发影响程度较小^[15],与三者取样深度差异基本一致。而松散含水层径流途径较短,埋藏较浅,受蒸发影响较强,导致重同位素相对富集。

2.3.2 氡盈余值特征

氡盈余值(d)为同位素水文学研究中的重要参数,反映了大气降水在蒸发-冷凝过程中的同位素分馏程度,定义为: $d=\delta D-8\delta^{18}O$ ^[16]。当某地区的大气降水方程建立后,它的 d 值不受季节、高度等环境因素的影响而恒定在一个很小的区间范围内^[17]。在国内关于氡盈余值的理论意义和应用,张之淦^[18]、王东升等^[19]、刘存富等^[20]、尹观等^[21]和顾慰祖等^[22]曾作过许多研究。

含水层内 d 值的变化,受较多因素制约。其主要影响因素目前可以分为:含水层含氧化学组分的性质、数量;岩石矿物的晶体结构可溶性;地下水的物理化学性质(pH值、温度、氧化还原态等)以及含水层所处系统为开放或封闭状态、地下水在含水层内滞留时间的长短等^[21]。

本次白云岩、灰岩含水岩组和松散含水层样品点水温在6~13℃,水温较低,水与岩石同位素交换反应的速度缓慢,可以认为岩石的同位素成分对地下水的同位素组成没有影响^[21]。上述三个含水岩组 d 值的变化与温度关系不大,从图2(d)中也可以看出,地下水未出现明显的“氧漂移”现象。因此,同一含水层内影响 d 值变化的主要因素大致相同,在含水层不同部位, d 值的相对变化多与滞留时间的长短有关,即 d 值是地下水滞留时间的函数^[21,23]。

地下水获得大气降水补给后,获得了与之相对应的氡盈余初始值。大气降水进入地下后在含水层中从补给区向排泄区径流运动^[21,24]。对于同一含水层,地下水径流途径长,径流速度慢,则其滞留时间变长^[24]。北盆地内地下水 d 值计算结果如表1所示。

如图2(d)所示,白云岩、灰岩含水岩组和松散含水层样品点总体上分布在区域大气降水线附近,三者 d 值范围在6.0‰~11.6‰、4.2‰~11.2‰、3.8‰~8.0‰,平均值分别为8.8‰、8.5‰、6.4‰。样品点氡盈余 d 值较大气降水大部分都偏小,表明岩溶水和松散孔隙水经历了不同的地下水流动过程^[25]。

对于白云岩含水岩组,从团圆向斜两侧到盆地外围河谷发育带 d 值减小,显示了构造和地貌控水的成因特征。向斜两侧地形坡度大,地层倾角陡,有利于地下水快速径流。河谷发育带位于盆地外围,地形起伏相对较小,地层较为平缓,地下水径流途径长,流速

变慢,滞留时间长。河谷发育带中以留家庄乡和上庄乡 d 值较高,主要在于两者为强径流带,水循环交替速度快,且河谷多为干谷,岩溶水易于直接接受降水补给。而斜山峪、金家井乡河谷地带上部含松散孔隙水,在一定程度上阻碍了岩溶水与降水直接接触。

对于灰岩含水岩组,从分水岭边界到山麓地带 d 值呈减小趋势,总体上反映了岩溶水从补给带到径流、排泄带的水循环特征。补给带、径流带为岩溶山区,水力坡度大,地下水更新速度快。排泄带位于山麓地带,水力坡度减小,径流速度变缓,地质环境相对变封闭,滞留时间变长。受构造和岩溶发育程度控制, d 值在团圆向斜核部和斜山峪河谷发育带明显偏高。核部位置节理裂隙发育,地下水从两翼向核部汇集,沿裂隙发育带径流,循环速度快;核部岩溶水受朝阳洞背斜阻水后在斜山峪河谷带汇集,形成岩溶发育带,径流强烈。向斜两翼岩溶发育程度较差,且该部位样品点大多取自东南翼,地层相对平缓,径流速度较慢, d 值偏低。

对于松散含水层,盆地内地形坡度缓,使得地下水水力坡度变小,径流速度减慢,滞留时间变长。城北和城西两条径流带 d 值分别为5.9、7.0,差异较大,显示出两者径流条件不同。城西径流带样品点取自河谷地带,含水层岩性以卵砾石、砂卵石为主,颗粒粗,透水性、富水性好,流速快,水位埋深20~30m,局部10~20m。城北径流带样品点取自冲洪积台地,含水层厚度较薄,岩性主要为砂卵石、粉质黏土含砾石,颗粒相对较细,渗透性变弱,富水性中等,流速相对较慢,水位埋深30~40m,局部大于40m,径流深度较大。

2.3.3 混合作用的判别

从图2(d)中可以看出,白云岩含水岩组Ⅲ区域样品点T1-53、T3-38、T4-28落在灰岩含水岩组氢氧同位素特征值所形成的区域内,由此可以推断这三个样品受到了灰岩含水岩组岩溶水的混合^[21]。其中T3-38、T4-28成井资料证明了该机井揭露了寒武系张夏组灰岩和蓟县系雾迷山组白云岩,存在两个含水岩组的混合;T1-53机井揭露了张夏组灰岩,但其接受上游白云岩含水岩组岩溶水的侧向补给,地下水发生混合。

为识别北海泉的补给来源,将其同位素样品点投影到 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图2(d)中。从图中可以看出,北海泉样品点落在松散含水层V区域附近,说明两者之间关系密切,存在水力联系^[26]。由于两者 d 值不同且北海泉2014—2015年流量在105.5~186.0 L/s,显然城

西径流带水量无法满足泉水排泄量, 因此可以判断该区域地下水不是北海泉的唯一补给来源。进一步分析可以发现北海泉与部分白云岩、灰岩含水岩组地下水以及松散孔隙水在一条直线上(图 2(d)), 推测白云岩、灰岩含水岩组可能是影响北海泉的两个端元, 存在两个含水岩组的混合^[12], 混合后的岩溶水又与盆地内的松散孔隙水发生了混合。

忽略岩溶水混合后向地表径流过程中与松散含水层进行的同位素交换作用, 以 $\delta D: -74.8\%$ 、 $\delta^{18}O: -10.5\%$ 和 $\delta D: -68.0\%$ 、 $\delta^{18}O: -9.1\%$ 分别代表白云岩和灰岩含水岩组两个端元的同位素组成, 根据两端元同位素混合计算式^[13, 27]:

$$\lambda_A = (\delta_M - \delta_B) / (\delta_A - \delta_B) \quad (1)$$

$$\lambda_B = 1 - \lambda_A \quad (2)$$

式中: λ_A 、 λ_B ——混合水中两个端元所占的比例;

δ_M ——混合水中氢或氧同位素含量;

δ_A 、 δ_B ——两个端元水中氢或氧同位素含量。

求得北海泉水中白云岩含水岩组岩溶水的平均补给比例占 42.4% ~ 51.6%, 灰岩含水岩组岩溶水的平均补给比例占 48.4% ~ 57.6%。

3 北海泉形成模式分析

根据上述构造地质条件、地下水补径排条件、同位素分布特征、氡盈余值特征以及不同地下水混合作用分析, 可以基本判断拒马源现有泉群之一北海泉的形成模式。

北盆地外围岩溶山地区接受大气降水入渗补给, 降水沿溶隙、溶孔等垂直入渗后向下径流, 形成岩溶水。受泥岩、页岩等区域隔水岩系阻水作用, 岩溶水分成灰岩和白云岩含水岩组。

灰岩含水岩组受团圆向斜构造控制, 地下水从两翼向核部汇集, 并沿核部从东北向西南流动, 受西南部朝阳洞背斜阻水作用, 岩溶水在斜山峪河谷带汇集, 并沿寨沟门—水泉—小西庄岩溶发育带向北盆地径流; 白云岩含水岩组位于团圆向斜两侧, 受北东向构造控制以及盆地东部王安镇侵入岩体阻水, 岩溶水基本沿盆地外围沟谷发育带向盆地径流。

受断陷盆地边缘的隐伏断裂带控制, 岩溶水除部分侧向径流补给盆地内松散孔隙水外, 大部分会沿断裂带向深部径流。在小西庄、香炉屯村一带断层发育, 灰岩含水岩组和白云岩含水岩组发生混合, 并向

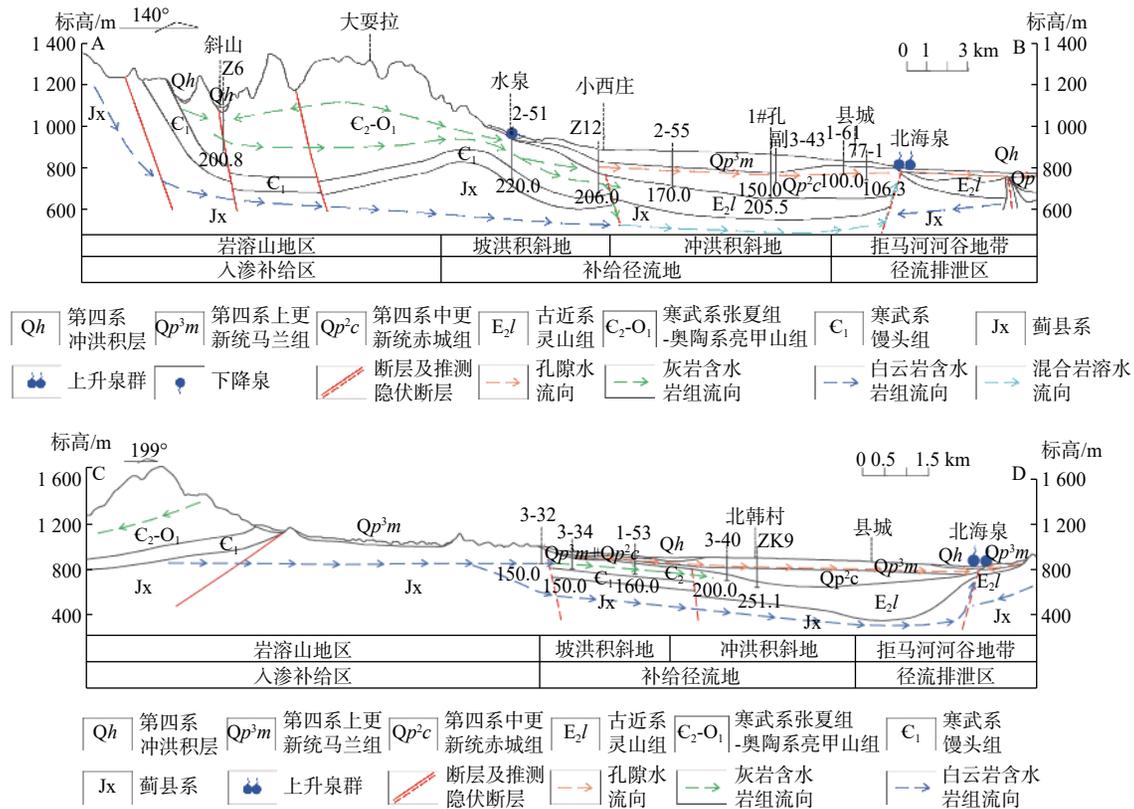


图 3 北海泉成因模式示意图

Fig. 3 Diagram showing the formation mode of the Beihai springs

盆地中心径流。

来自北盆地外围的深部混合岩溶水在向盆地中心径流过程中,受到南侧牌坊—冯村压扭性断层阻水控制,沿断裂带上升。上升过程中与松散孔隙水发生混合,并在透水性好的砂砾卵石“天窗”部位出露成泉,形成北海泉、南关泉等上升泉群。如图 3 所示。马剑飞等^[5]研究结果亦证明了团圆向斜、东沟—大宁断层和牌坊冯村断层等地质构造对地下水流场的控制影响。

4 结论

(1) 涑源北盆地内同位素样品点总体上在区域大气降水线附近分布,说明盆地内地下水系统的主要补给来源为大气降水。

(2) 地下水同位素值分布具有差异性,通过差异性特点可以判断不同构造或地貌部位地下水的径流条件及水力联系,识别出地下水径流带。

(3) 白云岩、灰岩含水岩组和松散层样品点 d 值范围不同,表明岩溶水和松散孔隙水经历了不同的流动过程,反映了构造及地貌因素对地下水循环条件的控制作用。

(4) 通过分析不同含水岩组氢氧同位素的含量和分布特征,识别出了北海泉的形成模式为:灰岩含水岩组在小西庄、香菇屯一带与白云岩含水岩组混合后受牌坊—冯村断层阻水控制,沿断裂带上升。上升过程中又接受了松散孔隙水的补给,并在透水性好的砂砾卵石“天窗”部位出露成泉,形成北海泉、南关泉等上升泉群。

参考文献 (References) :

- [1] 吴兴礼,齐宗汉,戴国梓,等. 中国北方岩溶地下水资源及大水矿区岩溶水的预测、利用与管理的研究[R]. 石家庄:河北省地质矿产局第一水文地质工程地质大队,1988. [WU Xingli, QI Zonghan, DAI Guozi, et al. Research on forecast, utilization and management of karst groundwater resources in north China and karst groundwater in the abundant water mining area[R]. Shijiazhuang: The First Institute of Hydrogeology and Engineering Geology of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, 1988. (in Chinese)]
- [2] 杨旭东,马学军,李伟. 涑源县拒马源泉群地质遗迹保护和开发利用评价报告[R]. 保定:中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,2007. [YANG Xudong, MA Xuejun, LI Wei. Protection, development and utilization of Juma spring groups geological relics in Laiyuan[R]. Baoding: Center for Hydrogeology and

Environmental Geology, 2007. (in Chinese)]

- [3] 李玉龙,朱小龙,谷明旭,等. 涑源盆地地下水动态特征分析[J]. 科技传播,2013,5(11):108-109. [LI Yulong, ZHU Xiaolong, GU Mingxu, et al. Analysis of groundwater dynamic feature in the Laiyuan Basin[J]. Public Communication of Science & Technology, 2013, 5(11): 108-109. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 贾春义. 涑源泉域岩溶水化学研究[J]. 勘察科学技术,1996(1):24-29. [JIA Chunyi. Karst water chemistry study in Laiyuan spring field[J]. Site Investigation Science and Technology, 1996(1): 24-29. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李志先. 利用降水量推算涑源泉流量方法的探讨[J]. 水文地质工程地质,1984(2):48-50. [LI Zhixian. Discussion on calculation methods of spring volume by using the precipitation data[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1984(2): 48-50. (in Chinese)]
- [6] 王海宁,乔光建. 涑源岩溶地下水系统泉水量变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(6):54-57. [WANG Hainig, QIAO Guangjian. Variations of spring volume of the karst groundwater system in the Laiyuan Region[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 54-57. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 马剑飞,李伟,刘蕴,等. 涑源盆地地下水化学演化特征初步分析[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(5):141-146. [MA Jianfei, LI Wei, LIU Yun, et al. Preliminary analysis of groundwater chemistry evolution in Laiyuan basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 141-146. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王新峰,刘蕴,李伟,等. 涑源盆地水文地质特征及缺水现状分析[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(6):74-78. [WANG Xinfeng, LIU Yun, LI Wei, et al. Analysis of hydrogeological conditions and water shortage status in the Laiyuan basin[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 74-78. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 朱平,李景豪,陈佰太. 河北省涑源盆地遥感图像断裂构造解译及水文地质意义分析[R]. 保定:地质部水文地质工程地质技术方法研究所,1981. [ZHU Ping, LI Jinghao, CHEN Baitai. Interpret linear structures of remote sensing image and analysis hydrogeological significance in the Laiyuan Basin[R]. Baoding: Institute of Hydrogeology and Engineering Geology Techniuyes, 1981. (in Chinese)]
- [10] 郑淑蕙,侯发高,倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报,1983,28(13):801-806. [ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Research on Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes of Atmospheric

- Precipitation in my country [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(13): 801–806. (in Chinese)]
- [11] GREMILLION P, WANIELISTA M. Effects of evaporative enrichment on the stable isotope hydrology of a central Florida (USA) river[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(8): 1465–1484.
- [12] 袁建飞. 广东沿海地热系统水文地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013: 61–65. [YUAN Jianfei. Hydrogeochemistry of the geothermal systems in coastal areas of Guangdong Province, South China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2013: 61–65. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 魏静文. 华北平原地下水与地表水的水文地球化学及氢氧同位素特征分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 28–29. [WEI Jingwen. Analysis of hydrogeochemistry and stable isotopes of surface water and groundwater in North China Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012: 28–29. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 侯光才, 苏小四, 林学钰, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地天然水体环境同位素组成及其水循环意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 255–260. [HOU Guangcai, SU Xiaosi, LIN Xueyu, et al. Environmental isotopic composition of natural water in Ordos Cretaceous Groundwater Basin and its significance for hydrological cycle[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2007, 37(2): 255–260. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 柳富田. 基于同位素技术的鄂尔多斯白垩系盆地北区地下水循环及水化学演化规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 46–47. [LIU Futian. Research on groundwater circulation and hydrochemical transport in the northern part of Ordos Cretaceous Basin based on isotope technology[D]. Changchun: Jilin University, 2008: 46–47. (in Chinese with English abstract)]
- [16] MARFIA A M, KRISHNAMURTHY R V, ATEKWANA E A, et al. Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(6): 937–946.
- [17] FRIEDMAN I, SMITH G I, GLEASON J D, et al. Stable isotope composition of waters in southeastern California: Modern precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 97(5): 5795–5812.
- [18] 张之淦. 同位素水文地质概论(油印本)[M]. 1984. [ZHANG Zhigan. Introduction to Isotope Hydrogeology (Mimeo)[M]. 1984. (in Chinese)]
- [19] 王东升, 徐乃安. 中国同位素水文地质学之进展[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993: 5–11. [WANG Dongsheng, XU Nai'an. The progress of isotope hydrogeology in China[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1993: 5–11. (in Chinese)]
- [20] 刘存富, 王恒纯. 环境同位素水文地质学基础(选修课教材)[M]. 1984. [LIU Cunfu, WANG Hengchun. Environmental isotopic general hydrogeology (textbook for optional course)[M]. 1984. (in Chinese)]
- [21] 尹观, 倪师军. 地下水氘过量参数的演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 409–411. [YIN Guan, NI Shijun. Deuterium excess parameter evolution in ground water[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 409–411. (in Chinese with English abstract)]
- [22] Mebus A G, 顾慰祖, 刘涌, 等. 阿拉善高原地下水的稳定同位素异常[J]. *水科学进展*, 1998, 9(4): 333–337. [Mebus A G, GU Weizu, LIU Yong, et al. Isotopically anomalous groundwater of Alxa plateau, Inner Mongolia[J]. *Advances water Sciences*, 1998, 9(4): 333–337. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 晁念英, 王佩仪, 刘存富, 等. 河北平原地下水氘过量参数特征[J]. *中国岩溶*, 2004, 23(4): 335–338. [CHAO Nianying, WANG Peiyi, LIU Cunfu, et al. Characteristic of deuterium excess parameter of groundwater in Hebei plain[J]. *Carsologica Sinica*, 2004, 23(4): 335–338. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 蒲俊兵. 重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征[J]. *地球学报*, 2013, 34(6): 713–722. [PU Junbing. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry of karst groundwater in Chongqing[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(6): 713–722. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, 37(1): 102–110. [SONG Xianfang, LIU Xiangchao, XIA Jun, et al. A study of interaction between surface water and ground-water using environmental isotope in Huaisha River basin[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(1): 102–110. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 宋献方, 李发东, 于静洁, 等. 基于氢氧同位素与水化学的潮白河流域地下水水循环特征[J]. *地理研究*, 2007, 26(1): 11–21. [SONG Xianfang, LI Fadong, YU Jingjie, et al. Characteristics of groundwater cycle using deuterium, oxygen-18 and hydrochemistry in Chaobai River Basin[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(1): 11–21. (in Chinese with English abstract)]
- [27] Mebus A G, GU W Z, LIU Y, et al. Isotopically anomalous groundwater of Alxa Plateau, Inner Mongolia[J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(4): 333–337.