



引文格式: 王新娟, 韩丽茹, 卢忠阳, 等. 北京永定河陈家庄泉成因分析[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 262–271. DOI: 10.12401/j.nwg.2023163

Citation: WANG Xinjuan, HAN Liru, LU Zhongyang, et al. Genetic Analysis of Chenjiazhuang Spring in Yongding River, Beijing[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 262–271. DOI: 10.12401/j.nwg.2023163

北京永定河陈家庄泉成因分析

王新娟¹, 韩丽茹², 卢忠阳¹, 韩旭¹, 刘殷¹, 许苗娟¹

(1. 北京市地质环境监测所, 北京 100195; 2. 沧州市孟村回族自治县水务局, 河北 沧州 061400)

摘要: 陈家庄泉位于永定河畔, 在永定河生态环境治理工程开展以来至 2019 年, 泉水复涌。为更好的管理和保护陈家庄泉, 实现永定河生态环境治理及区域水资源战略储备, 开展泉水成因分析及泉域划分研究。通过泉域范围雨水、河水、地下水同位素和水化学样测试分析, 获取泉水的补给来源、补给高程及补给温度; 在以上分析的基础上, 结合区域地质、水文地质条件, 划定泉水汇水面积(泉域范围)。分析结果表明陈家庄泉赋存于奥陶系灰岩含水层中, 区域岩溶地下水补给来源为大气降水和永定河河水, 泉水为一裸露型侵蚀溢流泉, 泉水补给高程为 736 m, 补给温度为 13.12 °C, 泉域汇水面积为 30.6 km²。

关键词: 地下水; 泉; 水化学; 同位素; 成因; 北京

中图分类号: P641.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0262-10

Genetic Analysis of Chenjiazhuang Spring in Yongding River, Beijing

WANG Xinjuan¹, HAN Liru², LU Zhongyang¹, HAN Xu¹, LIU Yin¹, XU Miaojuan¹

(1. Beijing Geological Environment Monitoring Institute, Beijing 100195, China; 2. Mengcun Hui Autonomous County Water Bureau, Cangzhou 061400, Hebei, China)

Abstract: Chenjiazhuang Spring is located on the Yongding River. Since the ecological environment improvement project of Yongding River was carried out, the spring flowed out in 2019. In order to protect and manage Chenjiazhuang Spring, realize the ecological environment management of Yongding River and regional water resources strategic reserve, spring origin analysis and spring domain division were carried out. The recharge source, recharge elevation and recharge temperature of the spring were obtained by testing and analyzing the isotope and hydrochemistry samples of rainwater, river water and groundwater in the spring area; On the basis of the above analysis, combined with the regional geological and hydrogeological conditions, delimit the spring catchment area. The results show that the Chenjiazhuang spring exists in the Ordovician limestone aquifer, the regional karst groundwater recharge source is atmospheric precipitation and Yongding River water, the spring is an exposed erosion overflow spring, the spring recharge elevation is 736 m, the recharge temperature is 13.12 °C, the catchment area of the spring is 30.6 km².

Keywords: groundwater; spring; isotope; hydrochemical; formation mechanism; Beijing

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-07-31; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 北京市科技计划课题“永定河流域(北京段)地下水涵养储备与保护修复研究及示范”(Z191100006919001)。

作者简介: 王新娟(1973–), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事地下水资源和环境评价工作。E-mail: xinjuanwang@126.com。

2018年,北京市将永定河治理作为首都水生态环境建设一号工程。2019年3月永定河生态补水,7月,位于永定河畔的陈家庄泉水复涌。陈家庄泉位于陈家庄北400 m永定河畔,20世纪60年代测流为6 L/s。据当地村民介绍,该泉于20世纪80年代初断流。随着2019~2021年永定河放水,断流30多年的泉得到恢复,得益于国家近年来重视生态环境、尤其是流域生态环境治理。为更好的实现地表、地下和生态环境良性循环,笔者对该泉的赋存介质、补给来源、径流路径,出露条件等进行分析,研究区域地表、地下及大气降水循环机制,为指导永定河合理补水、达到恢复和提高流域生态环境的目的提供科学依据。

泉水中流量相对较大、具备一定供水意义的泉多为岩溶水泉,对于泉水的研究,国内外研究较多集中于岩溶水泉,主要开展岩溶水系统的划分和研究。梁永平等(2010)在前人研究基础上,把岩溶水系统定义为在水文地质制约下以岩溶水流系统为主体,同时又包括与岩溶地下水有密切补排关系的大气降水、地表水以及其他各种类型地下水流系统所构成的具有相对独立循环过程的联合水文地质单元体。刘启仁等(1992)、韩行瑞(2015)根据岩溶水系统形成条件,从系统分类、埋藏条件、蓄水构造及泉水出露条件等国内外泉的模式和类型进行了分析。赵春红等(2017)从岩溶含水层结构、地下水循环、地质构造等方面,对西山泉域岩溶水系统特征进行了总结。唐春雷等(2015)通过地质结构、地下水流场、岩溶发育机理等分析了玉泉山泉九龙山—香峪向斜的水文地质意义。赵春红等(2014年)采用地质学、岩溶动力学、流体动力学、水文地球化学、地球物理勘探等方法对北京西山黑龙关泉与边界条件进行了分析。唐春雷等(2020)通过同位素和水化学分析方法研究了龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因。从文献来看,关于岩溶水系统的研究方法主要有地质、水文地质分析、地下水动力学、地下水化学(同位素和水化学)等方法(刘存富等,1997;宋献方等,2007;马传明等,2010;钱会等,2012),笔者拟在对区域地层分布、地质构造、水文地质条件等分析的基础上,结合同位素、水化学分析研究陈家庄泉的赋存特征、补给来源、出露条件等形成机理,划分泉域范围,为永定河地表、地下水资源转化关系研究及地表水合理回补提供技术支撑。

1 研究区概况

陈家庄泉位于京西妙峰山镇陈家庄村,南距门头

沟区政府驻地7.6 km,西南距镇政府所在地3 km,东、南临永定河。泉点位于永定河妙峰山和军庄地区曲流河之间的永定河左岸。

据北京市门头沟气象站(1961~2021年)观测资料,多年平均降水量597.5 mm,最大年平均降水量1086.7 mm(2021年),最小年平均降水量264.3 mm(2014年)。降雨量在时空上分布不均,东部山前平原雨量偏大,达600~800 mm。清水、斋堂、蒲洼属雨量偏少区,总趋势自东南向西北逐渐减少。全年降雨主要集中在6~8月,可占年降雨量的75%,且暴雨多,雨强大。区内主要河流有永定河、大石河、拒马河。都属海河水系。河流支流发育,大部分为间歇河,冬季干枯无水,夏季雨季潜流强烈,常引发洪水灾害。

研究区位于九龙山—香峪向斜西段九龙山向斜的北部,九龙山—香峪向斜被北西向的永定河断裂切断,断裂西段为九龙山向斜,东段为香峪向斜,向斜轴部由侏罗系中上统砂砾岩、含煤页岩及夹凝灰质的玄武岩构成的山岭,高程最高达860 m,两翼地层依次为石炭、二叠系砂页岩夹薄煤层和奥陶系马家沟组灰岩(北京市地质矿产局,1991)。由于构造西北翘起,在清水涧—军庄沟谷地带出露较大面积的奥陶系灰岩,陈家庄泉出露于奥陶系中统马家沟组(O_{2x+sh})灰岩含水层中(图1)。研究区岩溶水赋存于蓟县系雾迷山组、青白口系、寒武系、奥陶系碳酸盐岩含水层中。岩溶水系统主要接受大气降水入渗、地表水体入渗补给以及岩溶水侧向径流补给,排泄途径包括天然排泄和地下水人工开采,其中天然排泄包括泉水溢流、岩溶水侧向流出、局部地区对第四系松散孔隙水的顶托补给等。地下水开采主要以奥陶系灰岩岩溶水为主,20世纪80年代前,岩溶地下水的开采以自备井开采为主,随后西山能源基地、航天部三院、618厂、首钢建材化工厂等中小型水源地开始开采利用岩溶地下水,西郊水源三场改扩建,2000年石景山杨庄水厂改扩建,开始大规模取用基岩岩溶水。2011年西山岩溶水系统地下水开采量18039.49万 m^3 。随着地下水的大规模开采、区域地下水位持续下降,导致泉水断流。2015年南水进京后,地下水开采得到缓解,年开采量为11591.07万 m^3 。2016年永定河开始补水,随着地下水减采和河道生态补水,区域地下水位逐渐得到恢复,陈家庄泉2019年复涌。

2 样品采集与测试

2021年5月在陈家庄泉及其上游采集河水、地下

水、泉和雨水样共9组(表1), 采样内容包括: D、¹⁸O、³H 及水化学。其中, 河水样2组、奥陶系灰岩地下水5组、雨水1组、泉水1组, 取样位置见图1, 取样情况见表1。D、¹⁸O水样必须装满水样瓶, 盖上内盖和外

盖, 使采样瓶内不留气泡, 常温保存, 避免高温或低温情况(防止结冰)。氡的采集及前处理: 氡的采样规范相对宽松, 只需保证在采样过程中尽量少接触空气、在采样瓶中不留空气即可。水化学采样前需用原水

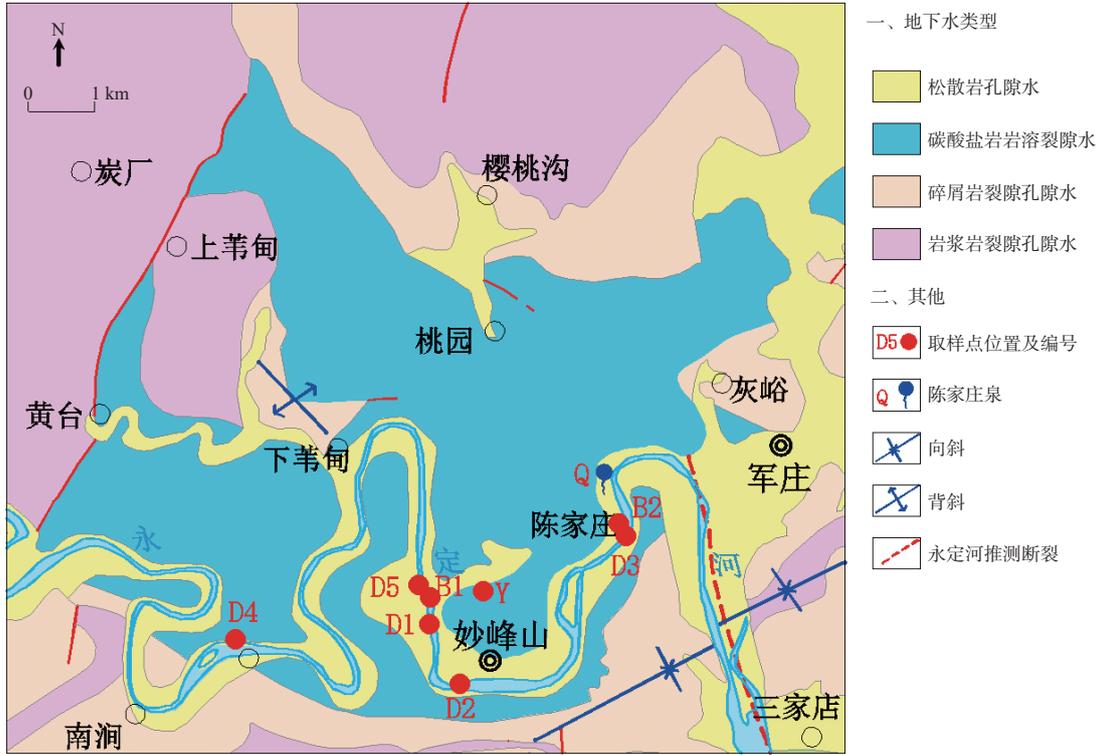


图1 研究区水文地质及取样点分布图

Fig. 1 The map of bedrock geology and sampling points in the study area

表1 陈家庄泉区域水样点及测试结果表

Tab. 1 Water sample point test result in Chenjiazhuang Spring area

样品编号	位置	取样日期	取样类型	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	T (TU)	K^+ (Mg/L)	Na^+ (Mg/L)	Ca^+ (Mg/L)	Mg^{2+} (Mg/L)	HCO_3^- (Mg/L)	Cl^- (Mg/L)	SO_4^{2-} (Mg/L)	TDS (Mg/L)	pH	水化学类型
B1	丁家滩新井边河水	2021/5/14	河水	-46.9	-5.55	7.6±0.4	12	156	54.7	51.4	298	165	207	811	8.31	$\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4\text{-Na-Mg}$
B2	陈家庄泉边河水	2021/5/14	河水	-46.6	-5.48	8.8±0.5	11.7	154	54.2	50.8	290	164	207	806	8.34	$\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4\text{-Na-Mg}$
D1	丁家滩新打井	2021/5/14	奥陶系	-50.3	-5.75	6.3±0.4	3.68	87	57	41.5	226	102	172	505	9.12	$\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4\text{-Na-Ca.Mg}$
D2	丁家滩南井	2021/5/14	奥陶系	-52.1	-6.4	4.7±0.4	11.5	99.3	58.4	32.6	251	122	159	613	7.96	$\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4\text{-Na-Ca.Mg}$
D3	陈家庄村井	2021/5/14	奥陶系	-51.6	-6.01	6.3±0.5	3.42	92.9	87	33.8	303	116	152	682	7.17	$\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4\text{-Ca.Na.Mg}$
D4	西石古岩井	2021/5/14	奥陶系	-57.6	-7.57		3.29	95.7	115	39.8	331	104	205	933	7.7	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca.Na.Mg}$
D5	丁家滩北井	2021/5/14	奥陶系	-56.2	-7.53		4.62	130	71.6	41.2	304	144	183	557	8.05	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl-Na-Mg-Ca}$
Q	陈家庄泉边河水	2021/5/14	泉水	-52.6	-5.72	5.7±0.5	5.19	118	76.2	39.9	304	132	171	703	7.51	$\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4\text{-Na-Ca.Mg}$
Y	雨水	2021/8/20	雨水	-70.1 6	-9.83		2.85	1.49	19.5	0.49	36.8	2.65	17.6	89	6.24	$\text{HCO}_3\text{-Ca.Mg}$

冲洗取样瓶 3 遍。

样品的测试: D、¹⁸O 在中国科学院地理科学与资源研究所, 采用液态水同位素分析仪(DLT-100)测试, 测试精度: δ²D<±1‰, δ¹⁸O<±0.1‰; ³H 含量是在核工业北京地质研究院进行, 采用低本底液闪仪(Quantulus 1220-003)测试, 检出限为 1.3 TU(TU 为非法定量单位, 1 TU=118 Bq/m³, 下同), 精密度 σ≤0.6 TU; 水化学分析由北京市水文地质工程地质大队(北京市地质环境监测总站)化验室测定, 其中, K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等阳离子含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪分析, HCO₃⁻、Cl⁻采用 ZDJ-4A 型自动电位滴定, SO₄²⁻采用离子色谱法。为保证测试精度, 在样品测试过程中进行正标样测试, 以保证测试精度。

3 成果分析

3.1 地下水水化学特征及水化学类型

(1) 地下水水化学特征

水化学特征是地下水中水化学组分的形成、分布、迁移和富集规律的反映, 通过分析不同水体的水化学

组成可以研究其补排关系, 通过分析地下水的水化学组成, 可以研究其径流和形成环境。

本次所取水样均为无色无味, 水样 pH 值为 6.24~9.12, 其中: 雨水样 pH 值为 6.24, 偏酸性; 河水样 pH 值均为 8.3 左右, 偏碱性; 地下水样 pH 值为 7.17~9.12, 为中性至碱性; 泉水样 pH 值为 7.51, 中性; 河水样 TDS 为 811 mg/L 和 806 mg/L; 地下水样 TDS 为 505~933 mg/L, 泉水样 TDS 为 703 mg/L。地下水水化学测试结果见表 1。

从表 1 可以看出, 河水、地下水和泉水中 Na⁺、Cl⁻和 SO₄²⁻含量均较高, 河水两点 Na⁺含量为 156 mg/L 和 154 mg/L、Cl⁻含量为 165 mg/L 和 164 mg/L、SO₄²⁻含量两点均为 207 mg/L。地下水 Na⁺含量为 87~130 mg/L、Cl⁻含量为 102~144 mg/L、SO₄²⁻含量为 152~205 mg/L。

(2) 主要组分及水化学类型

主要组分是指地下水中含量较高的化学元素或者化合物, 通常是指水中水化学特征七种离子, 占据地下水中无机物含量 90% 以上。采用舒卡列夫分类方法对水化学进行分类, 首先依据表 1 水化学测试结果编制阴阳离子百分比柱状图(图 2), 利用 AquaChem 软件编制水化学 Piper 图(图 3, 周训等, 2009)。

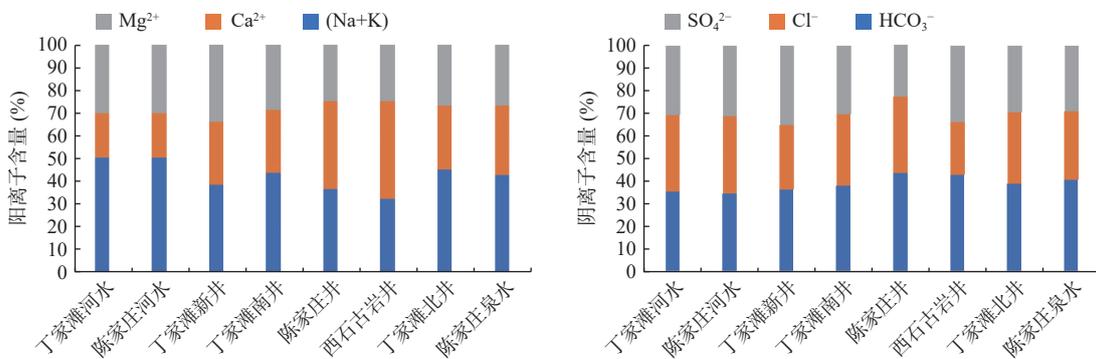


图 2 陈家庄区域水样阴阳离子百分含量柱状图

Fig. 2 Column chart of percentage content of yin-yang ions in water samples from Chenjiazhuang area of Yongding River

从图 2 中可以看出, 河水样中阳离子以 Na⁺+K⁺和 Mg²⁺为主, 阴离子 HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻含量接近, 水化学类型均为 HCO₃⁻·Cl⁻·SO₄²⁻·Na·Mg。地下水样中丁家滩新打井(D1)、丁家滩南井(D2)、丁家滩北井(D5)和泉水样(Q)中阳离子 Na⁺+K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量相当, 均可参与命名; 阴离子 HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻含量也较接近, 全可参与命名。丁家滩新打井(D1)、丁家滩南井(D2)及陈家庄泉水水化学类型为 HCO₃⁻·Cl⁻·SO₄²⁻·Na·Ca·Mg; 上游西石古岩村井(D4)水样阳离子含量以 Na⁺+K⁺和 Ca²⁺为主, 阴离子以 HCO₃⁻和 SO₄²⁻为主, 水化学类型

为 HCO₃⁻·SO₄²⁻·Ca·Na·Mg; 丁家滩北井(D5)水化学类型为 HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻·Na·Mg·Ca; 从水化学类型来看, 丁家滩新打井、丁家滩南井水样和泉水水化学类型一致。从图 3 同样可以看出, 河水处于稍偏于碱金属含量高一点的位置, 而其阴离子含量则处于强酸和弱酸中间; 地下水和泉水比较靠近, 其中, D1、D2、D5 等 3 个地下水样和泉水样碱金属明显高于碱土金属, 阴离子含量基本处于中间位置, 稍偏向 SO₄²⁻+Cl⁻方向, 分析其原因: ①河水污染。据调查, 在丁家滩污水处理站附近有一排污口。②西山历史煤矿开采也成为研究区

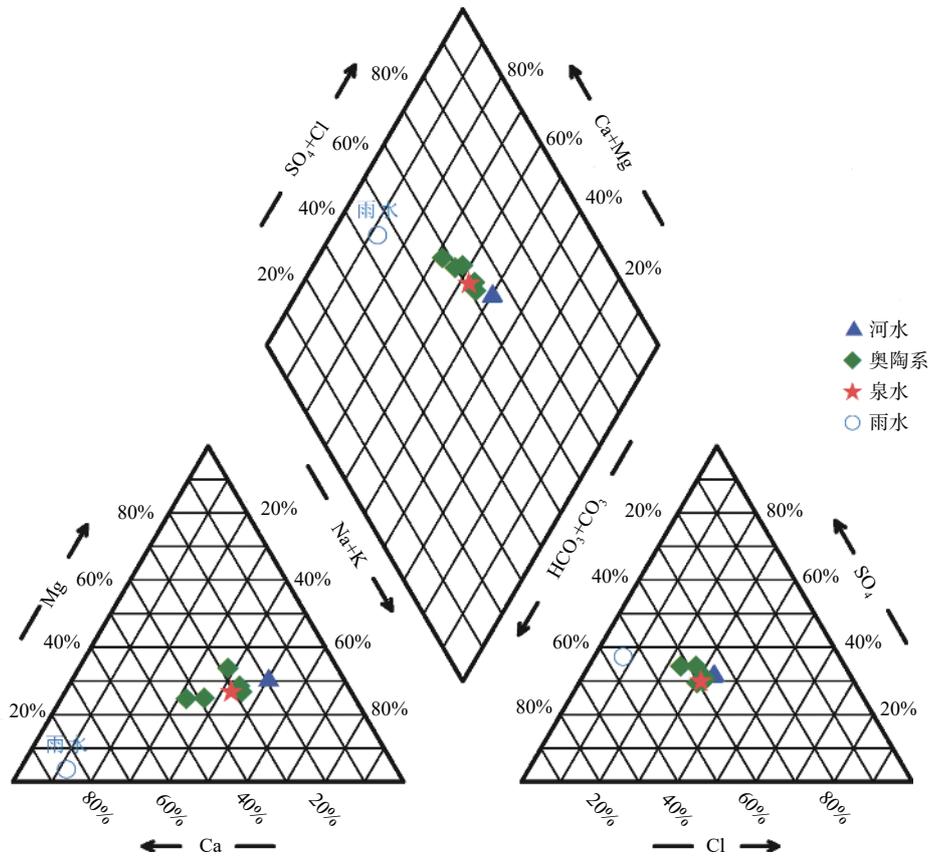


图3 永定河陈家莊区域水样水化学三线图

Fig. 3 Triplot of water chemistry in Chenjiazhuang area of Yongding River

岩溶地下水的重要污染影响因素之一, 大安山煤矿排水进入下游碳酸盐岩区后全部漏失, 煤矿下游断面实测平均流量为 $7706 \text{ m}^3/\text{d}$, SO_4^{2-} 含量 133.2 mg/L ; 王平煤矿排水直接进入永定河碳酸盐岩渗漏段, 实测流量为 $2462 \text{ m}^3/\text{d}$, SO_4^{2-} 含量 231.5 mg/L (冯炳兴等, 1982)。为了进一步分析大气降水、河水和地下水的关系, 利用表测试结果编制水化学 Schoeller 图 (图 4)。可以看出, 作为主要补给源的河水中, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量均很高, 此外, 河水中 Na^+ 离子的含量也很高, 而雨水中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 Na^+ 含量很低, 加之前面计算区域地下水的主要补给源为河水。所以, 地下水的高 SO_4^{2-} 、 Cl^- 及 Na^+ 含量与河水有很大的关系。

3.2 环境同位素特征

利用稳定环境同位素技术可研究不同水体的起源、补给高度和补给比例, 分析水岩反应程度, 揭示地表、地下及地下水系统的水力联系等; 放射性同位素可以分析地下水的年龄, 判断地下水的更新率, 因此, 通过水样同位素测试结果的分析可以为研究区地下水资源的准确评价和可持续开发利用研究奠定理论基础。与传统水文地质方法相比, 环境同位素方法具

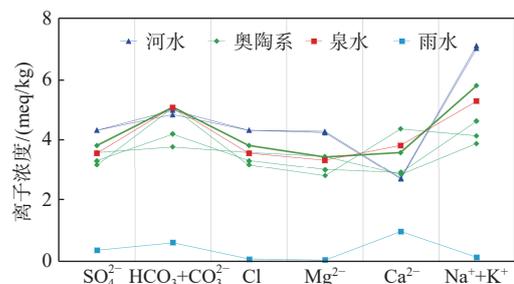


图4 永定河陈家莊区域水样 SCHOELLER 图

Fig. 4 Schoeller diagram of water sample in Chenjiazhuang area of Yongding River

有更为独特和不可替代的优势, 是目前研究此类问题的关键。

(1) 泉水的补给来源

从表 1 测试结果可以看出, 泉水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -52.6‰ 和 -5.72‰ ; 奥陶系灰岩地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别在 -68.4‰ ~ -52.1‰ 和 -8.23‰ ~ -6.4‰ 之间, 均值为 -53.9‰ 和 -6.65‰ ; 两个河水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值比较接近, 分别为 -46.9‰ 、 -5.55‰ 和 -46.6‰ 、 -5.48‰ ; 雨水 ^2D ‰ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ‰ 含量值为 -70.16‰ ,

-9.83‰。总之,本次取样的地下水和泉水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值普遍偏高,说明地下水和泉水年龄比较偏小,所取地下水样为相对较为年轻的水。

利用 δD 和 $\delta^{18}O$ 值编制 δD 和 $\delta^{18}O$ 值关系曲线(图 5)(宋献方等, 2017)可以看出,泉水、奥陶系灰岩水和河水点均落在大气降水线附近,说明泉水、奥陶系灰岩水和河水均受大气降水影响,接受大气降水补给,泉水、地表水和部分地下水水样点落在大气降水线右下方,说明其经历了蒸发作用。另外,从泉水点处于上游奥陶系含水层地下水和河水之间,说明陈家庄泉水的补给来源有两项:一是大气降水,二是河水。另外,由于泉水同位素值比较靠近河水点,进一步说明在其补给来源中,河水占主导地位。三是泉水同位素组成和丁家滩新打井、丁家滩南井及陈家庄村奥陶系灰岩井同位素组成比较接近,而与丁家滩北井、西石古岩村井同位素组成有一定的差值,并且含量比之较低,可能是由于丁家滩北井和西石古岩井水接受的河水补给较少。

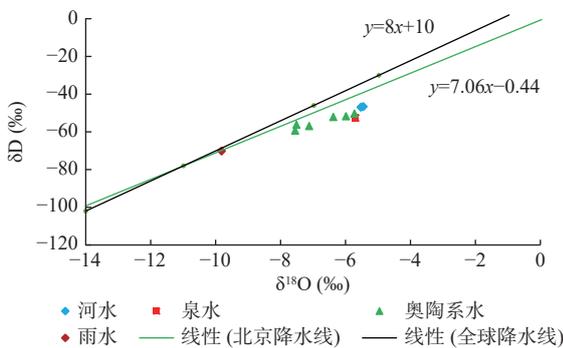


图 5 永定河陈家庄泉区域水样 δD 和 $\delta^{18}O$ 值关系曲线
Fig. 5 Relationship curves of δD and $\delta^{18}O$ values of water samples in Chenjiashuang Spring area of Yongding River

(2) 泉水补给比例估算

由于 δD 和 $\delta^{18}O$ 稳定同位素的保守性,决定了其除了能确定补给来源、估算补给高程和补给温度外,还可确定两种不同水的混合比例。利用所测河水、大气降水、地下水和泉水的 δD 值计算奥陶系岩溶地下水大气降水和河水的补给比例、泉水中各项补给来源的混合比例。

不同水样混合比计算公式为:

$$Y = (\delta_A - \delta_{\text{样}}) / (\delta_{\text{样}} - \delta_B) \quad (1)$$

式中: Y 为混合比例; δ_A 为水样 A 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值; $\delta_{\text{样}}$ 为混合水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值; δ_B 为水样 B 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(周训等, 2009)。

利用上述混合计算公式计算灰岩井水中降水和河水的混合比例,计算结果见表 2。

表 2 泉水和奥陶系灰岩地下水接受降水及河水补给比例情况表

Tab. 2 The proportion of precipitation and water recharge in spring water and Ordovician limestone groundwater

补给来源	D1	D2	D3	D4	D5	Q
降水	14.62	22.36	21.22	46.00	39.98	24.51
河水	85.38	77.64	78.78	54.00	60.02	75.49

从表 2 可以看出,所有奥陶系灰岩井和陈家庄泉水的补给来源中河水所占比例都较大,其中,丁家滩新打井、丁家滩南井、陈家庄基岩井陈家庄泉水的补给来源中河水所占比例均大于 70%,为 75.49%~85.38%,降水所占比例为 14.62%~24.51%,而丁家滩北井、西石古岩井补给来源中降水所占比例相对较大一些。而从这些样点的分布来看丁家滩新打井(D1)、丁家滩南井(D2)、陈家庄基岩井(D3)和陈家庄泉水(Q)均位于永定河边,且从地下水的流向来看处于河水的下游,靠近河流,此段奥陶系灰岩又是西山岩溶地层强渗漏补给区,所以河流补给站比较大;而丁家滩北井(D5)则位于就近河流的上游,西石古岩井(D4)则位于河流北侧的山脚下,接受的河流补给稍差一些。

本次计算未用 $\delta^{18}O$ 值开展补给比例计算,主要是考虑到 ^{18}O 可能会和围岩发生反应,造成其计算结果不准确。

(3) 泉水的补给高程

大气降水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值会随着地形高度的升高而降低,不同地区高程效应差别很大,一般来说,高程每增高 100 m, δD 减少 $-1\text{‰} \sim -4\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 减少 $-0.15\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$ (周训等, 2017 年)。因此,可利用同位素的高程效应估算地下水的补给高程。利用下式计算补给高程:

$$H = \frac{(\delta G - \delta p)}{K} + h \quad (2)$$

式中: H 为同位素渗入高程; δG 为样品中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(‰); δp 为大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值(‰), h 为取样点高程(m), K 为同位素高度梯度,本次计算以 δD , k 值取 3‰(龙汭等, 2014)。

经计算,河水和地下水补给高程见表 3,从表中可以看出,河水补给高程稍高一些,为 774 m 和 785 m;地下水补给高程为 452~757 m,泉水的补给高程为 736 m,这一高程和北面三尖洞灰岩裸露处高程比较一致。泉水补给高程和丁家滩新打井(D1)、丁家滩

南井(D2)、丁家滩北井(D5)比较接近,陈家庄泉附近河对面基岩井(D3)补给高程偏低一些。

表3 陈家庄泉区域地下水和泉水补给高程和补给温度计算结果

Tab. 3 Calculation results of recharge elevation and temperature of groundwater and spring in Chenjiashuang Spring area

编号	D1	D2	D3	D4	D5	Q
补给高程(m)	664	731	452	757	557	736
补给温度(°C)	12.64	13.3	13.43	10.9	11.93	13.12

(5) 补给温度计算

大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值具有温度效应,其值与温度呈正相关关系。Dansgaard于1964年建立了全球平均年降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的关系;Yurtsever(1975)总结了北半球大气降水 $\delta^{18}O$ 值和平均温度的关系式: $\delta^{18}O=0.521T-14.96$;中国大气降水的 δD 值温度效应(王恒纯等,1991)关系式如下:

$$\delta D = 3T - 92 \quad (3)$$

式中, T 为月平均温度。

利用中国大气降水 δD 值温度效应公式计算补给温度(表3),经计算,泉水补给温度为13.12°C,地下水补给温度为10.9°C~13.43°C,泉水补给温度同样与丁家滩新打井(D1)、丁家滩南井(D2)、陈家庄井(D3)比较接近。

(4) 地下水补给年龄估算

氡测试结果见表1。从表1可以看出,地表水氡含量分别为7.6 TU和8.8 TU,较地下水氡含量相对较高,地下水氡含量为4.7~6.3 TU,泉水氡含量为5.7 TU。由于陈家庄泉域灰岩裸露,地下水属于潜水,因此假设水流系统中的氡同位素数学物理模型为全混合模型,大气降水氡利用石家庄1952~2020年恢复结果,利用全混合模型输出曲线,结合水文地质条件,判断陈家庄泉(Q)水年龄为11年,丁家滩新打井(D1)和陈家庄河边基岩井(D3)水年龄为9年,丁家滩南井年龄为15年。

4 讨论与分析

在上述区域同位素水化学特征分析的基础上,借助区域水文地质条件及泉水断流前后区域地下水位变化情况进行陈家庄泉的成因分析及泉域范围划定。

4.1 陈家庄泉的成因分析

(1) 泉水的赋存

陈家庄泉水赋存于奥陶系灰岩含水层中,处于军

庄灰岩裸露区的浅埋型岩溶潜水含水层,在军庄地区,奥陶系灰岩出露面积约为47 km²,地处九龙山-香峪向斜西北侧。此区由于永定河张性断裂的存在,使得向斜西北翼灰岩地下水有了较好的导水通道,岩溶裂隙发育,接受大气降水的汇水面积较大。另外永定河在军庄-雁翅间奥陶系灰岩出露区以河曲形式流过,河水渗漏大量补给地下水。陈家庄泉恰好位于奥陶系中统马家沟组(O_{2x+sh})灰岩含水层中,地处永定河曲拐弯处河流左岸,泉水的主要补给来源是上游含水层侧向径流补给和泉水所在处裸露岩层接受大气降水入渗补给。泉水汇水范围有限,泉水含水层蓄水能力相对较弱,泉水流量1960年5月泉流量为6 L/s,20世纪80年代,西山能源基地的建设及煤矿开采,导致区域地下水位下降,泉水断流,2019年3月永定河生态补水后补给量增大,泉水复涌,流量为8.5 L/s。

(2) 泉水同位素和水化学类型讨论

从泉水和岩溶地下水同位素组成来看,区域河水、地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系点均位于大气降水线附近,说明河水、地下水均来源于大气降水;从地下水和泉水补给比例来看,此区为永定河河水补给地下水强补给带,地下水补给来源中河水占了很大比例;另外,泉水和地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值均偏重,说明研究区地下水年龄较轻,泉水年龄为11年。

泉域岩溶水赋存地层为奥陶系下统冶里—亮甲山组(O_{1y+l})和中统马家沟组(O_{2m}),其中:冶里—亮甲山组为浅灰色、深灰色、灰黄色灰岩、白云质灰岩,下部夹泥质条带灰岩及竹叶状灰岩,中部灰质白云岩含燧石结核或条带;马家沟组岩性以深灰色、灰黑色、灰黄色灰岩、白云质灰岩及角砾状灰岩;地下水水化学类型以HCO₃·Cl·SO₄·Na·Ca·Mg、HCO₃·SO₄·Cl·Ca·Na为主,其中泉水水化学类型为HCO₃·Cl·SO₄·Na·Ca·Mg型,与丁家滩新打井D1、丁家滩南井D2一致。河水补给是导致泉水和地下水中Na⁺、Cl⁻和SO₄²⁻含量均较高的主要原因,河水在泉水和地下水补给中所占的比例均较大。

(3) 泉水的成因类型

从区域地质、水文地质条件分析可知,陈家庄泉属于侵蚀泉。侵蚀泉是由于地形切割地下水面而出露,包括切割潜水含水层及揭露承压水隔水顶板,这类泉是北京山区最常见的泉,分布范围广,泉水出露点地面标高126 m。其汇水范围有限,大气降水多以地表径流的形式流走,泉水含水层蓄水能力相对较弱,多在沟谷底部、山坡或坡脚处,流量通常不大且不稳定,随季节

变化明显。陈家庄泉就是由于河流拐弯处侧蚀奥陶系灰岩含水层,使地下水出露成泉,由于该段灰岩含水层

出露地表,因此,陈家庄泉属于下降泉,为一裸露型侵蚀溢流泉(图6)(刘启仁等,1992;韩行瑞,2015)。

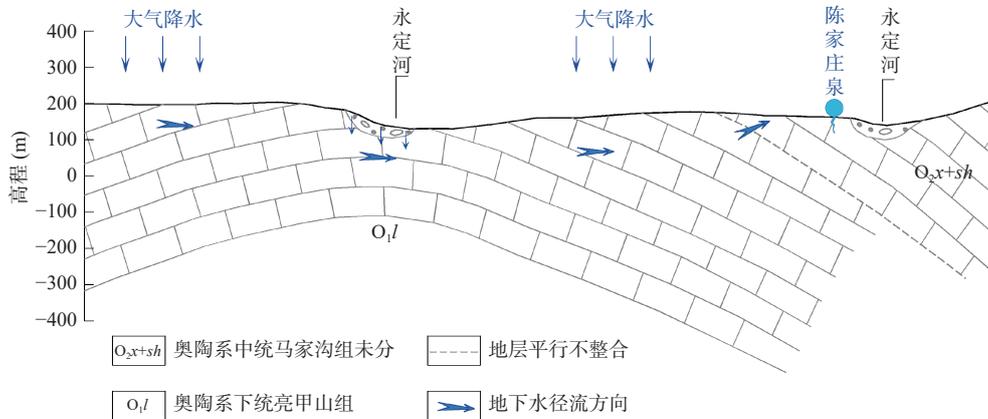


图6 永定河陈家庄泉成因类型示意图

Fig. 6 Genetic type diagram of Chenjiashuang Spring in Yongding River

4.2 泉域范围的初步确定

(1) 地下水的补径排

陈家庄泉位于北京西山岩溶水系统的子系统玉泉山—潭柘寺岩溶水子系统,该子系统岩溶含水层为山区裸露型、山前埋藏型和平原区覆盖型,面积478 km²。玉泉山—潭柘寺岩溶水子系统北部以侏罗系火山岩系为界,东南部以黄庄断裂为界,北东部以南口断裂为界。奥陶系是本系统主要含水层,岩性为灰岩和白云质灰岩。寒武系(Є)下统馒头组页岩及青白口系下马岭组页岩为含水层底部隔水层。西山岩溶含水层出露面积小,仅在军庄和潭柘寺一带出露。该系统岩溶含水岩层主要接受大气降水、河水入渗补给,排泄途径主要包括人工开采和自然排泄,其中自然排泄包括泉、侧向径流、局部地区对第四系地下水的顶托补给等。西山地区岩溶裂隙水主要有两个补给区,一是军庄地区的大气降水补给和永定河的渗漏补给。另一个是鲁家滩地区大气降水补给和大石河的渗漏补给。玉泉山—潭柘寺岩溶水子系统地下水的主要径流路径有3条,由军庄向东北、由军庄沿永定河断裂向东南径流至古城再转向东北香峪泉山方向径流、由潭柘寺补给区沿八宝山断裂向东北流向玉泉山方向(图7)。

陈家庄泉所在区域就属于军庄碳酸盐岩裸露区,在泉水上游碳酸盐岩裸露面积为30.6 km²,其中,奥陶系碳酸盐岩裸露面积为25.4 km²,寒武系和青白口系碳酸盐岩裸露面积5.2 km²。泉水主要来源于大气降水和上游灰岩水侧向补给,泉点西部、西北部及北部灰岩地下水在其上游接受大气降水和河流渗漏补给,分别向东、

东南和南部径流,在陈家庄永定河拐弯处,灰岩地层被河流侧蚀切割,岩溶水溢出,形成天然露头(泉)(图7)。

(2) 泉域范围

西部边界:从前面同位素和水化学分析可以看出,陈家庄泉的同位素特征与丁家滩基岩岩溶水井及陈家庄基岩岩溶水井水样接近, δD 和 $\delta^{18}O$ 值略偏重,可能与西石古岩水井相比处于下游,接受河水补给更多有关。而与其较远的西石古岩水井位于上游永定河畔靠山脚下,相对下游接受河水补给较少;从水化学类型来看,区域灰岩地下水除了位于丁家滩排污口上游的西石古岩水井水样外,地下水和泉水水化学类型相近,陈家庄泉和丁家滩岩溶水水化学类型中 Na^+ 和 SO_4^{2-} 偏高是由于丁家滩村河段有排污口。而结合基岩地质图中奥陶系灰岩分布情况,将陈家庄泉西部边界确定在奥陶系灰岩和侏罗系基岩分界处(图8);西北部:下苇甸穹窿位于九龙山—香峪大梁向斜的西北侧,穹窿轴向西北向,轴面近直立,核部为青白口系下马岭组,并为燕山晚期花岗岩体所侵入,东翼和南部由青白口系的景儿峪组及寒武系、奥陶系组成,从1:5万地质图石景山幅地层剖面及北京西山能源基地供水水文地质勘察报告可以看出,寒武系上统凤山组(Є₃)灰岩和奥陶系冶里组(O_{1y})灰岩有水力联系,因此,初步将西北部边界定于玉泉山—潭柘寺岩溶水系统的西北边界;另外,从同位素补给高程估算结果,其北边范围到樱桃沟附近;南部边界以九龙山向斜核部为界;泉域东北为妙峰山地表分水岭,东部边界以永定河为界。综上所述,陈家庄泉的泉域范围(即汇水面积)为30.6 km²。

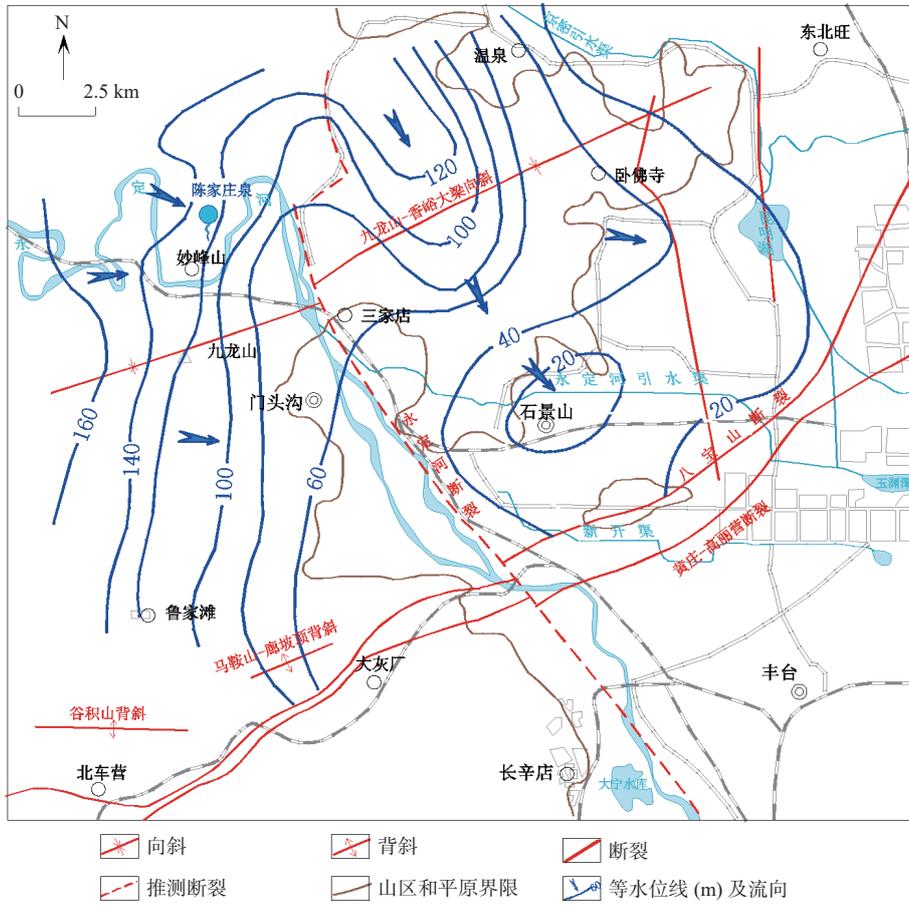


图7 2021年9月区域地下水流场图

Fig. 7 Regional groundwater flow field map in September 2021

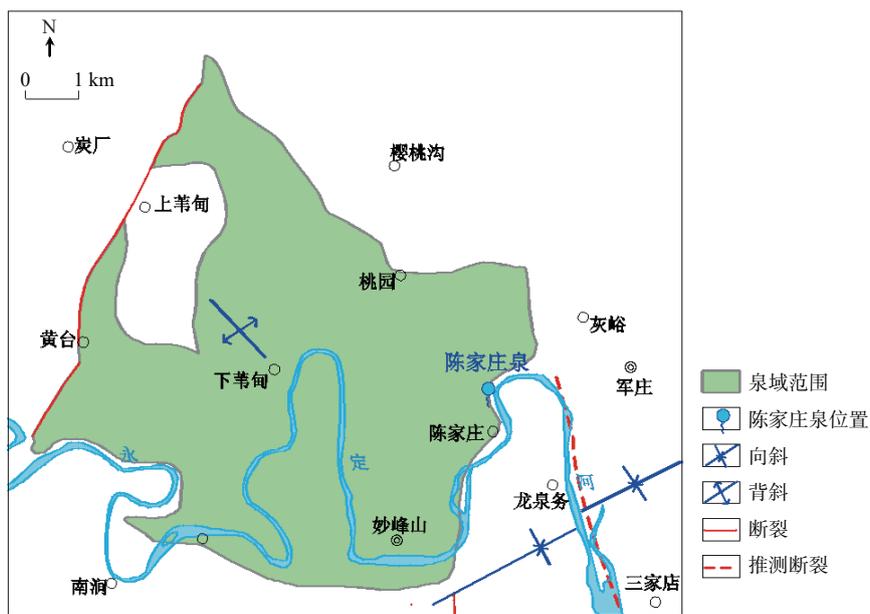


图8 永定河陈家庄泉泉域范围图

Fig. 8 Scope map of Chenjiashuang Spring In Yongding River

5 结论

(1)通过分析,认为陈家庄泉为一裸露型侵蚀溢流泉,泉水赋存于奥陶系灰岩含水层中,在上游奥陶系灰岩裸露区,灰岩接受大气降水和地表河水入渗补给,向下游径流,在下游河道拐弯处,河流侧蚀,切割含水岩层,泉水出露。

(2)陈家庄泉水的补给温度为 13.12 °C,补给高程为 736 m,此高程与北部山区灰岩裸露区高程吻合。泉水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Cl-SO}_4\text{-Na-Ca-Mg}$ 型,泉水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均偏重,说明泉水所处灰岩含水层水交替条件较好。

(3)通过同位素水化学、地质水文地质条件及地下水动力学分析,确定陈家庄泉泉域西部边界在奥陶系灰岩和侏罗系基岩分界处;西北部边界在玉泉山—潭柘寺岩溶水系统的西北边界,正北边到樱桃沟附近,南部边界为九龙山向斜核部;东北边界为妙峰山地表分水岭,东部边界以永定河为界。泉域范围 30.6 km²。

参考文献(References):

- 北京市地质矿产局.北京市区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.
- 冯炳兴,周启顺,田树润,等.北京西山能源基地供水水文地质勘察报告[R].北京:北京市地质工程勘察院,1982.
- 韩行瑞.岩溶水文地质学[M].北京:科学出版社,2015,83-89.
- 梁永平,王维泰.中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J].地球学报,2010,31(6):860-868.
- LIANG Yongping, WANG Weitai. The Division and Characteristics of Karst Water Systems in Northern China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(6): 860-868.
- 龙汨,周训,李婷,等.北京延庆县松山温泉的特征与成因[J].现代地质,2014,28(5):1053-1060.
- LONG Mi, ZHOU Xun, LI ting, et al. Characteristics and Formation of the Songshan Hot Spring in Yanqing County of Beijing[J]. Geoscience, 2014, 28(5): 1053-1060.
- 刘启仁,张凤奇,秦毅苏,等.中国北方岩溶水资源的形成、分布与开发利用[J].水文地质工程地质,1992,(4):41-44.
- LIU Qiren, ZHANG Fengqi, QIN Yisu, et al. The formation, distribution, and development and utilization of karst water resources in northern China[J]. Hydrogeology engineering Geology, 1992, (4): 41-44.
- 刘存富,王佩仪,周炼,等.河北平原地下水氢、氧、碳、氯同位素组成的环境意义[J].地学前缘,1997,4(1-2):267-274.
- LIU Chunfu, Wang Peiyi, ZHOU Lian, et al. The environment significance of H O C and Cl isotopic composition in groundwater of hebei plane[J]. Earth Sciences Frontiers, 1997, 4(1-2): 267-274.
- 马传明,刘存富,周爱国.同位素水文学新技术新方法[M].武汉:中国地质大学出版社,2010.
- 钱会,马致远,李培月,等.水文地球化学[M].北京:地质出版社,2012.
- 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循环特征[J].地理研究,2007,26(1):12-21.
- SONG Xianfang, LI Fadong, YU Jingjie, et al. Characteristics of groundwater cycle using deuterium, oxygen-18 and hydrochemistry in Chaobai River Basin[J]. Geography research, 2007, 26(1): 12-21.
- 宋献方,唐瑜,张应华,等.北京连续降水水汽输送差异的同位素示踪[J].水科学进展,2017,28(4):488-495.
- SONG Xianfang, TANG Yu, ZHANG Yinghua, et al. Using stable isotopes to study vapor transport of continuous precipitation in Beijing[J]. Advances in Water Sciences, 2017, 28(4): 488-495.
- 唐春雷,梁永平,韩凯等.玉泉山泉九龙山—香峪向斜的水文地质意义[J].中国岩溶,2015,43(43):432-437.
- TANG Chunlei, LIANG Yongping, Han Kai, et al. Hydrogeological significance of the Jiulongshan-Xiangyu syncline at Yuquanshan spring[J]. Carsologica sinica, 2015, 43(43): 432-437.
- 唐春雷,梁永平,王维泰等.龙子祠泉域岩溶水水化学-同位素特征[J].桂林理工大学学报,2020,37(1):53-58.
- TANG Chunlei, LIANG Yongping, WANG Weitai, et al. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of the karst groundwater systems in Longzici spring basin[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2020, 37(1): 53-58.
- 王恒纯.同位素水文地质概论[M].北京:地质出版社,1991.
- 周训,胡伏生,何江涛,等.地下水科学概论[M].北京:地质出版社,2009,71-73.
- 周训,李晓露,王蒙蒙,等.浅循环泉简析[J].水文地质工程地质,2017,5(44):1-5.
- ZHOU Xun, LI Xiaolu, WANG Mengmeng, et al. A preliminary analysis of the springs of shallow groundwater circulation[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2017, 5(44): 1-5.
- 赵春红,李强,梁永平,等.北京西山黑龙关泉域岩溶水系统边界与水文地质意义[J].地球科学进展,2014,29(3):412-419.
- ZHAO Chunhong, LI Qiang, LIANG Yongping, et al. Karst Water System Boundaries and Hydrogeological Properties of Heilongguan Springshed in Xishan Region, Beijing[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(3): 412-419.
- 赵春红,梁永平,王维泰,等.北京西山泉域岩溶水系统特征探讨[J].中国岩溶,2017,36(5):641-647.
- ZHAO Chunhong, LIANG Yongping, WANG Weitai, et al. Discussion on the characteristic of water systems in the Xishan area of Beijing[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 641-647.
- Yurtsever Y. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation [R]. Vienna: Isotope Hydrology International Atomic Energy Agency, 1975.