

彭凯,刘文,魏善明,等.基于水化学、同位素特征的济南岩溶地下水补给来源研究[J].中国岩溶,2020,39(5):650-657.
DOI:10.11932/karst20200501

基于水化学、同位素特征的济南岩溶地下水补给来源研究

彭凯,刘文,魏善明,刘传娥,陈燕,董浩,苏动,袁炜,韩琳
(山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心/山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队,济南250014)

摘要:文章利用水化学、 ^2H 、 ^{18}O 同位素、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值、 ^{13}C 和 ^{14}C 同位素对济南岩溶地下水补给来源、地热水补给来源进行研究。结果表明,岩溶冷水水化学类型以 HCO_3-Ca 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型为主,地热水以 SO_4-Ca 型为主。在旱季,间接补给区对泉群地下水补给比率在66.00%~73.58%之间,直接补给区仅占到26.42%~34.00%,旱季泉水的主要来源为间接补给区岩溶地下水。地热水受到了更新世以来的降水补给,是不同时期降水补给所形成的混合地下水,接受补给区域应为高程较高的张夏或者炒米店—三山子组地层,补给高程在350~550 m之间。

关键词:岩溶;水文地球化学;同位素;补给来源

中图分类号:P641 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)05-0650-08 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

地下水补径排条件的研究是进行地下水开发、利用及保护的前提。目前,对地下水补给来源的研究主要有地下水水动力学的方法、构建模型模拟、温度示踪以及借助于水化学、同位素示踪等方法^[1-3]。在岩溶地下水地区,由于岩溶发育的非均质性,造成了科研人员对岩溶含水层介质认识和研究还不充分,从而导致利用水动力学或者模型的方法对岩溶地下水补径排研究的误差较大^[4-5]。而水化学、同位素示踪法被广泛地应用于岩溶地下水补径排的研究中。一些稳定水化学指标及稳定同位素指标在地下水径流过程中会保持相对稳定^[6-7]。因此,补给源不同,水化学指标及同位素指标也明显的不同,使其成为研究地下水补给来源的有效“指纹”^[7-8]。袁建飞等^[9]利用水化学、 ^2H 、 ^{18}O 和 ^3H 等讨论了西昌仙人洞岩溶地下水的径流条件;Jebreen等^[10]利用 ^2H 、 ^{18}O 同位

素研究了巴勒斯坦岩溶含水层补给来源。

济南市是中国典型的北方岩溶发育区,区内发育了趵突泉、黑虎泉、珍珠泉、五龙潭四大泉群。由于社会经济的迅速发展,地下水开采量增加,加之气候变化,当地干旱少雨,地下水补给严重不足,造成泉群流量减少,甚至断流,因此,对泉水的保护刻不容缓^[11-12]。虽然已有很多学者对济南岩溶地下水的岩溶发育条件、地下水水动力特征、水化学特征等进行了探讨^[13-17],但目前仍缺乏量化认识。

本文在系统研究区域地热地质条件的基础上,利用水化学、 ^2H 、 ^{18}O 同位素、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C 等指标,量化济南四大泉群地下水补给来源,明确济南北部地热水的补水来源及补给高程,为济南地下水、泉水、地热水开发保护提供理论支撑。

1 研究区概况

济南地区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年

第一作者简介:彭凯(1978—),男,汉族,本科,高级工程师,研究方向:水工环地质。E-mail:5605529@qq.com。

通信作者:魏善明(1981—),男,汉族,研究生,高级工程师,研究方向:水工环地质。E-mail:wsm0810@163.com。

收稿日期:2020-01-11

均气温 14.2 ℃,多年平均降水量为 698 mm,多年平均蒸发量 1 476 mm。流经研究区的河流主要有黄河、玉符河、小清河、北沙河等。

济南市南依泰山,北临黄河,地形南高北低。长城岭构成南北地表分水岭,由此向北地形逐渐降低为低山、丘陵,标高由 700 m 渐降至 300 m。济南地区地层构成总体为向北缓倾斜的大型单斜构造,自南至北,地层分布时代由老到新,依次出露有太古界泰山岩群;古生界寒武系、奥陶系、石炭系及二叠系;新生界第三系及第四系。研究区主要有中生代侵入

岩,主要岩性为辉长岩、闪长岩。岩体中心部位厚度大,边缘相对较薄。中生代侵入岩体以南区域基岩裸露,以北区域基岩则隐伏于新近系、第四系之下,地貌类型也转变为山前平原。

区内主要含水岩组包括第四系、新近系松散岩类孔隙水含水岩组,岩性以松散沉积为主;碳酸盐岩裂隙—岩溶含水岩组,主要由寒武系九龙群中统张夏组含水层、上统炒米店—三山子组含水层和奥陶系马家沟组含水层组成,岩性主要为灰岩、白云岩等(图 1)。研究区地下水总体流向由南向北。

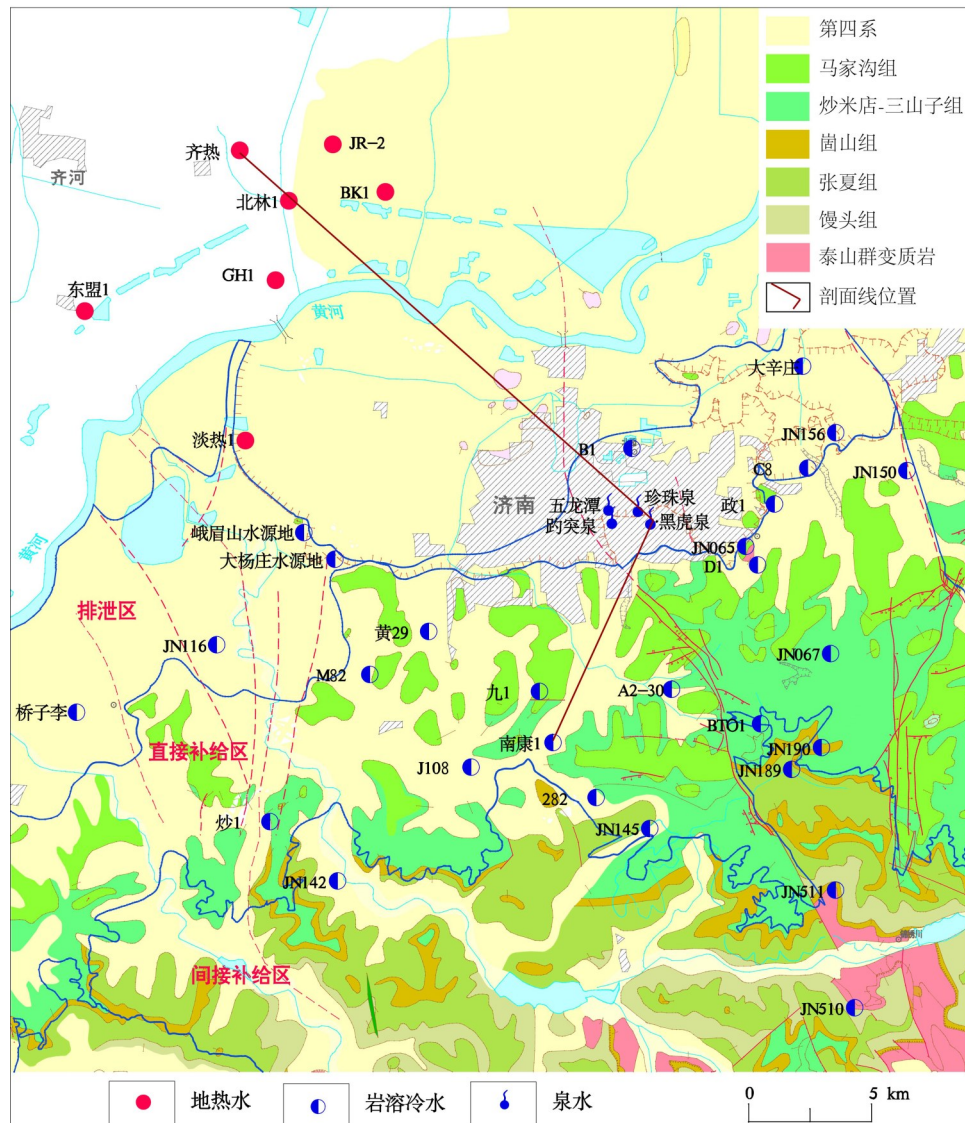


图 1 研究区位置及所在区域水文地质图、水样点分布图

Fig. 1 Map showing location, hydrogeology, and sites of water sampling in the study area

地下水由南向北流动过程中,因地层埋深增加和济南岩体的阻挡,迫使一部分地下水向地下深处循环,受到大地热流的加热作用,在济南北部形成地

热水(图 2,剖面位置如图 1 所示)。北部新生界第四系和新近系、古生界二叠系和石炭系地层作为盖层,起到了良好的保护作用。

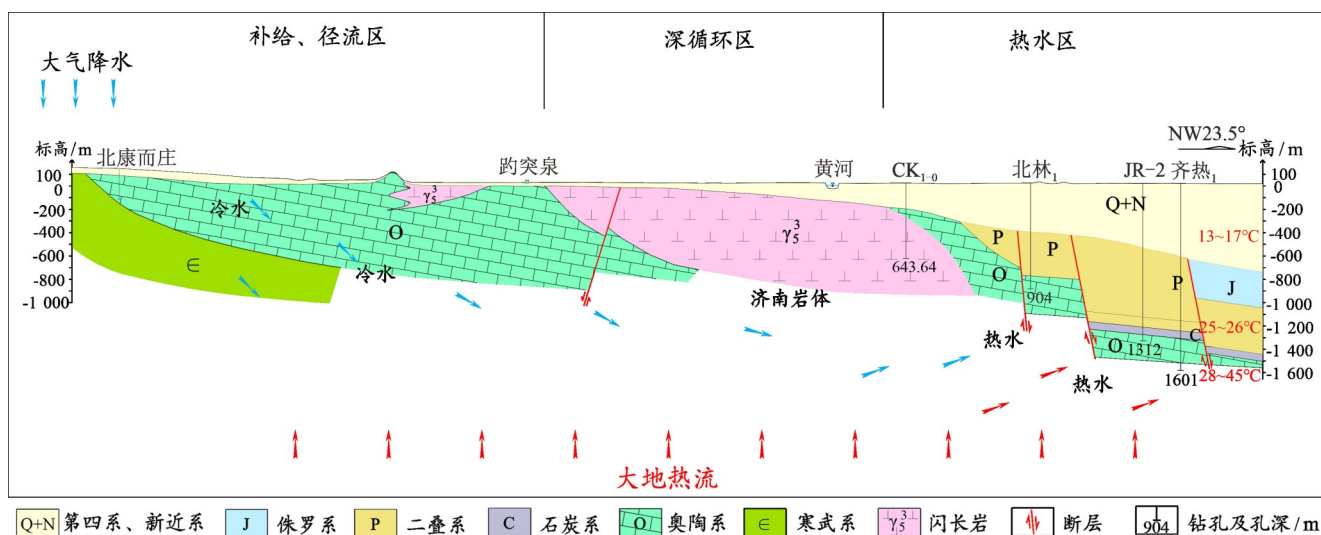


图2 济南地区地质剖面示意图^[10]

Fig. 2 Schematic geologic profile of Jinan area^[10]

2 样品采集与测试

本研究样品采自2017年5-6月,共采集36组岩溶地下水水样(图1),其中岩溶冷水水样32组,测试项目包括温度、DS、pH、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻等以及氡氧同位素;地热水水样4组(齐热、东盟1、GH1、淡热1),测试项目主要为氡氧同位素、¹³C、¹⁴C。此外另收集4组地热水水化学测试结果,分别为齐热、JR-2、北林1、BK1。

样品委托国土资源部济南矿产资源监督检测中心及山东省地质环境监测总站实验室测试。岩溶冷水氡氧同位素测试委托钼科瑞(北京)检测技术有限公司采用Picarro L2140-i高精度水样同位素检测仪完成。地热水同位素样品(氡氧同位素、¹³C、¹⁴C)委托美国Beta实验室完成。

根据水样点的空间分布及地下水水动力特点,将本次水样划分为六类,即间接补给区、直接补给区、东部排泄区、西部排泄区、泉群及地热水。

3 测试结果分析

3.1 水化学特征

将采集、收集到的地下水水化学、同位素数据投影到Piper三线图中,如图3所示。

岩溶地下水水化学类型均以HCO₃-Ca、HCO₃·SO₄-Ca型为主,其中:Na⁺、SO₄²⁻含量有升高趋势,水化学类型由HCO₃-Ca型向HCO₃·SO₄-Ca型演化,总

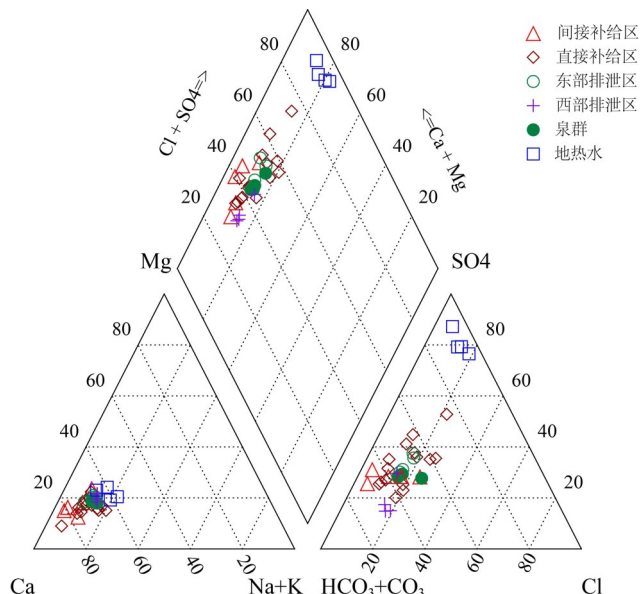


图3 不同区域地下水水化学Piper图

Fig. 3 Piper diagrams of groundwater hydrogeochemistry in different regions

体符合岩溶地下水所具有的一般水化学特征和演化规律^[18-19]。

直接补给区地下水中SO₄²⁻含量要高于间接补给区地下水,水化学类型多属于HCO₃·SO₄-Ca型水;直接补给区TDS含量在410~960 mg·L⁻¹之间,高于绝大部分间接补给区地下水TDS含量(327~785 mg·L⁻¹)(图4),表明直接补给区地下水经历了更长的水流路径,并接受了间接补给区地下水的补给。东部排泄区、泉群地下水水化学类型均为HCO₃·SO₄-Ca型,在Piper图上位于直接补给区和间接补给区水样点的中

间, TDS 含量在 467~679 mg·L⁻¹ 之间, 介于直接补给区和间接补给区的地下水 TDS 含量之间, 表明市区、东郊的地下水同时受到间接补给区和直接补给区的补给。西部排泄区岩溶地下水水化学类型主要为 HCO₃-Ca 型, TDS 含量在 311~401 mg·L⁻¹ 之间, 与其他排泄区地下水水化学特征明显不同, 表明受到了其他水源的补给。

地热水以 SO₄-Ca 型水为主, TDS 含量明显高于岩溶冷水, 表明地热水水流路径更长, 水岩作用更加充分。

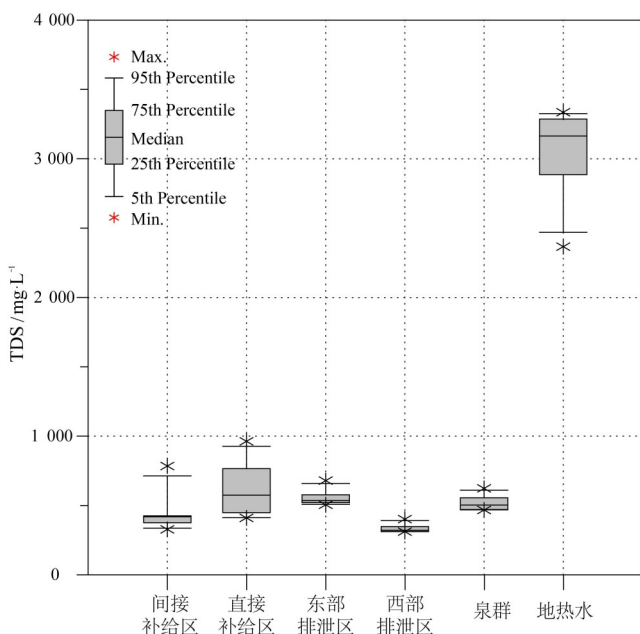


图 4 不同区域地下水 TDS 含量箱图

Fig. 4 Box diagrams showing TDS contents of groundwater in different regions

3.2 稳定同位素特征

3.2.1 ²H 和 ¹⁸O

氢氧稳定同位素常用来分析地下水的补给来源、不同含水层中的地下水水力联系等。本研究根据采集样品的 δ²H、δ¹⁸O 数据绘制 δ²H 与 δ¹⁸O 关系图 (图 5)。其中, GMWL 代表全球降水线 (δ²H=8 δ¹⁸O+10), LMWL 代表济南当地大气降水线 (δ²H=7.46 δ¹⁸O+0.90)^[20]。

由图 5 可以看出, 除地热水外, 间接补给区 ²H、¹⁸O 同位素最为亏损, 主要原因是间接补给区所处地理位置海拔最高, 高程效应造成降水中重同位素亏损。直接补给区地下水中 ²H、¹⁸O 值差别较大, 原因之

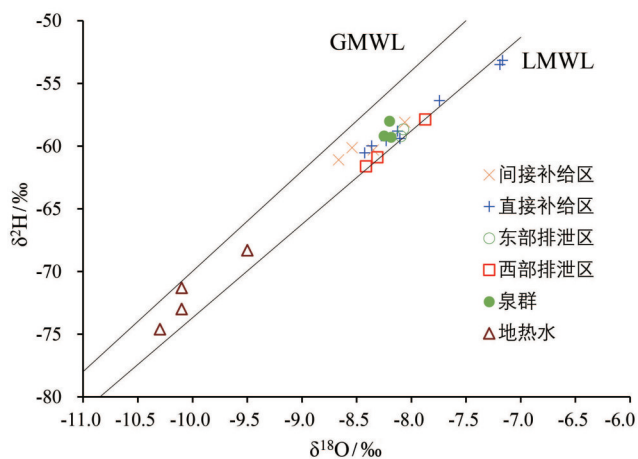


图 5 不同区域地下水 δ²H 与 δ¹⁸O 关系图

Fig. 5 Relationships between δ²H and δ¹⁸O of groundwater in different regions

一是直接补给区范围大, 补给区海拔变化大; 另一原因是所采集部分地下水样距离地表水较近, 可能受到地表水的渗漏补给。泉群、东部排泄区岩溶地下水水样点集中地落于间接补给区与直接补给区水样点之间, 体现出混合水的特点, 说明泉群、东部排泄区同时接收受到地下水的间接补给与直接补给。地热水的 ²H、¹⁸O 同位素亏损严重, 说明其补给区海拔较高。

3.2.2 Sr 同位素

一般情况下, 含水层中不同易溶矿物溶解会造成地下水中 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的变化, 不同水源的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值不同, 流经不同岩层的地下水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值也不同, 所以可以把 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值作为地下水来源的判别“指纹”^[21]。泉群、间接补给区、直接补给区岩溶地下水 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值变化较为稳定, 集中在 0.710 9~0.711 27 之间, 体现出明显的相似性。西部排泄区 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值明显偏高, 东部排泄区则明显偏低, 体现出二者为其他水源的补给。

通过对水化学特征、²H 和 ¹⁸O、Sr 同位素的研究发现, 泉群同时受到了间接补给区、直接补给区的混合补给, 而西部排泄区、东部排泄区则受到了其他水源的补给。

3.3 ¹⁴C 测年

本研究共采集 4 个地热水 ¹⁴C 样品对地热水年龄进行计算。计算时需要对 ¹⁴C 年龄进行校正, 本次采用 Pearson 模型进行校正^[22], 该模型假设 δ¹³C 和 ¹⁴C 来

自于土壤CO₂气体和方解石溶解的混合,并且碳酸盐溶解发生在封闭系统,根据每种化学组分的δ¹³C质量平衡可以计算初始¹⁴C含量A₀,因此可以利用地下水中¹³C计算A₀:

$$A_0 = \frac{\delta_{\text{DIC}} - \delta_{\text{carb}}}{\delta_{\text{CO}_2} - \delta_{\text{carb}}} (A_{\text{CO}_2} - A_{\text{carb}}) + A_{\text{carb}} \quad (1)$$

式中:A_{CO₂}为土壤气体CO₂的¹⁴C含量,在土壤CO₂溶解海相碳酸盐地层时,取100 pMC;A_{carb}为碳酸盐矿物的¹⁴C含量,通常认为是0 pMC;δ_{DIC}为水样中总溶解无机碳的δ¹³C;δ_{carb}为碳酸盐矿物的δ¹³C(通常为0);δ_{CO₂}为土壤气体CO₂的δ¹³C(通常为-25‰)。

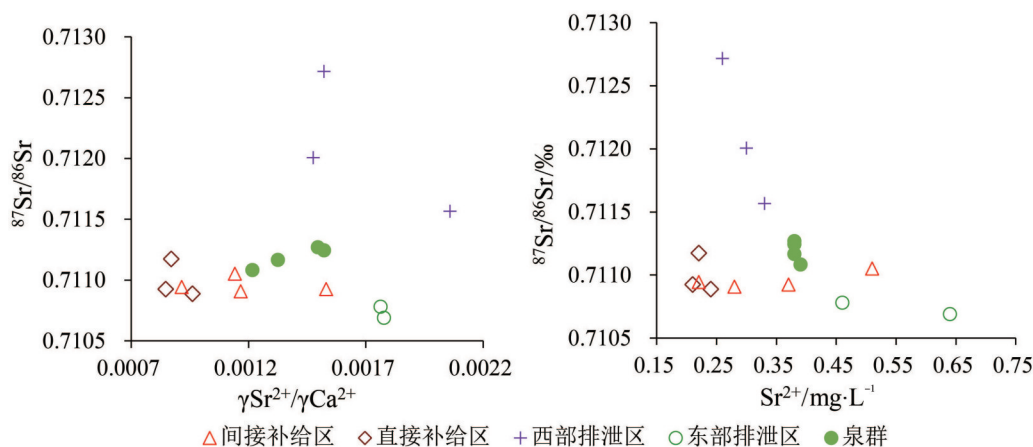


图6 不同区域地下水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr与 γ Sr²⁺/ γ Ca²⁺及Sr²⁺的关系

Fig. 6 Relationships between ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and γ Sr²⁺/ γ Ca²⁺, Sr²⁺ of groundwater in different regions

将校正后的¹⁴C含量带入到年龄计算公式中:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A_t} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (3)$$

式中:t为地下水的¹⁴C年龄;A₀为校正后¹⁴C含量;A_t为地下水中检测的¹⁴C含量;T_{1/2}为¹⁴C的半衰期,为5 730年。统计结果见表1。

表1 地热水样品¹⁴C测试结果统计表

Table 1 Statistics of ¹⁴C test results of geothermal water samples

样品编号	井深/m	¹⁴ C/pMC	δ ¹³ C/‰	A ₀ /pMC	校正后 ¹⁴ C年龄/ka
GH1	653	14.00±0.10	-7.0	28.00	5.7
齐热	160 1	0.40±0.00	-5.4	21.60	33.0
淡热1	707	9.90±0.10	-8.3	33.20	10.0
东盟1	110 0	4.20±0.10	-6.5	26.00	15.01

表1可知,本研究地下水年龄在5.7~33.0 ka之间,差别较大,说明不同地层、不同区域的地热水之间水力联系较差,地热水径流滞缓。地热水¹⁴C年龄大于10 ka,表明地热水受到了更新世以来的降水补给,是不同时期降水补给所形成的混合地下水。

4 讨论

4.1 泉水补给来源组成

综上所述,泉群岩溶地下水主要来源于间接补

给区及直接补给区的混合补给。假设:

(1)间接补给区及直接补给区在进入排泄区之前混合不明显,主要在排泄区进行混合;

(2)计算所采用离子在间接补给区、直接补给区、排泄区地下水中存在明显差异;

(3)所采用离子受外部环境影响较小,性质较稳定,可以代表不同区域地下水的特征。

在符合上述假设条件下,可以用两水源的混合模型计算间接补给区、直接补给区水源对泉水的补给贡献率,两水源混合模型的计算公式如下:

$$\alpha C_1 + (1 - \alpha) C_2 = C_0 \quad (4)$$

式中: C_1 为水源 1 中计算离子的浓度; C_2 为水源 2 中计算离子的浓度; C_0 为混合水中计算离子的浓度; α 为水源 1 对混合水补给贡献率。

为保证计算的精度,选取 TDS 含量、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 对

间接补给区及直接补给区地下水对泉水补给贡献率进行计算,计算时间接补给区、直接补给区所选取的样品点均为 TDS 含量、 ^2H 值、 ^{18}O 值的极值点,混合水样品选取排泄区市区、东郊所有检测结果的均值。计算结果如表 2、图 7。

表 2 间接补给区、直接补给区地下水对泉水补给贡献率

Table 2 Contribution rate of indirect and direct recharge areas to spring water

计算指标	间接补给区	直接补给区	泉水	补给贡献率	
				间接补给区/%	直接补给区/%
TDS/mg. L ⁻¹	327.4	962.8	524.3	69.01	30.99
$\delta^2\text{H}$	-8.67	-7.17	-8.16	66.00	34.00
$\delta^{18}\text{O}$	-61.10	-53.15	-59.00	73.58	26.42

注: TDS 数据采用 JN510 和黄 29, $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 数据采用 BT01 和 J108, 泉水数据统一采用四大泉群均值。

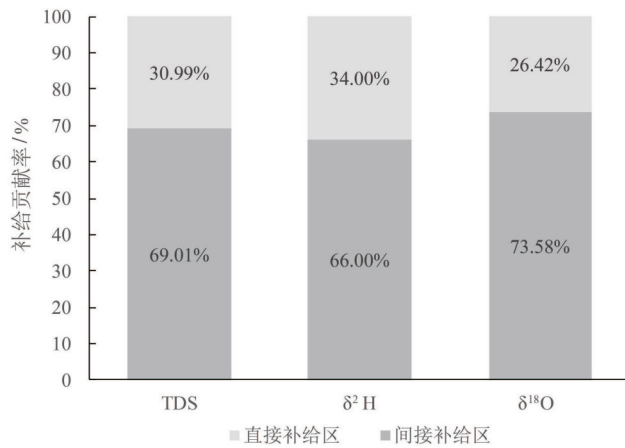


图 7 间接补给区、直接补给区地下水对泉水补给贡献率柱状图

Fig. 7 Histograms showing contribution rates of indirect and direct recharge areas to spring water

经过计算发现,在旱季间接补给区对泉群地下水补给比率为 66.00%~73.58%,而直接补给区仅为 26.42%~34.00%,旱季间接补给区水源主要为岩溶地下水。间接补给区主要含水层为张夏组含水岩组,直接补给区含水层主要为炒米店—三山子含水岩组,也就是说旱季岩溶泉水的补给主要来自于张夏组地下水,而不是炒米店—三山子组地下水。

由于不同含水层之间地下水水力联系密切,水质会互相影响,因此,TDS 含量可能会受到地下水中水岩作用的影响,计算结果可能存在一定的问题。

4.2 地热水补给来源

地热水中 $\delta^2\text{H}$ 值均小于 -70, $\delta^{18}\text{O}$ 值均小于 -10,

说明其补给高程较高。根据氢氧同位素高程效应, Wang 等^[23]利用南部山区溪水、泉水、济南地区雨水的 ^2H 值和对应的补给高程,计算得到济南大气降水同位素高程效应的方程为:

$$\text{Altitude (m)} = -80.6 \times \delta^2\text{H} (\text{‰}) - 4\ 647.4 \quad (5)$$

应用此方程进行地下水补给高程的计算时,应满足:

(1) $\delta^2\text{H}$ 值与高程之间有明显的、较为密切的相关性;

(2) $\delta^2\text{H}$ 值的变化主要受到同位素高程效应的影响,受其他因素的影响较小;

(3) 地热水接受降水补给的时代, ^2H 同位素的高程效应方程也满足以上方程。

假设满足上述条件,将地热水的 $\delta^2\text{H}$ 值带入公式 (5),得出济南北部各地热井中地热水的补给高程为 857~1 365 m (表 3),此高程范围大致相当于泰山北麓地区。

泰山北麓地层岩性均为火成岩、变质岩,地下裂

表 3 地热水样品氢氧同位素组成及补给高程计算统计表

Table 3 Statistics of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ composition and recharge elevations of geothermal water

样品编号	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	补给高程/m
GH1	-9.5	-68.3	857
齐热	-10.3	-74.6	1365
淡热 1	-10.1	-73.0	1236
东盟 1	-10.1	-71.3	1099

隙不发达,透水性、贮水性都比较差,很难形成稳定的补给水源。同时,地热水年龄大部分大于10 ka,说明地热水曾接受更新世古降水补给,而晚更新世属于第四纪冰期的末次冰期,气候寒冷,温度较低,根据同位素温度效应,此时大气降水的重同位素应比现代大气降水亏损,由此推测地热水补给高程应低于计算结果,结合地下水含水层,推断地热水的补给应该来自于较高的张夏组或炒米店—三山子组含水岩组,即推测地热水的主要补给高程在350~550 m。

5 结论

济南岩溶冷水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 型为主,TDS含量均小于 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。结合氡氧同位素、 ^{13}C 及Sr同位素对不同含水岩组、不同区域地下水的联系及循环特征分析,得到以下结论:

(1)直接补给区地下水水化学类型偏重于 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 型水,TDS含量为 $410\sim 960\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于间接补给区,表明直接补给区受到了间接补给区地下水的补给。泉群、东部排泄区地下水水化学类型、TDS含量均表现出混合水的特点,表明两者地下水同时受到间接补给区和直接补给区的补给。西郊岩溶地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,TDS含量在 $311\sim 401\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与其他排泄区地下水水化学特征明显不同,表明接受到了其他水源的补给;

(2)利用TDS、氡氧同位素作示踪元素,计算出旱季间接补给区对泉群地下水补给比率占66.00%~73.58%,直接补给区仅占26.42%~34.00%,旱季泉水主要来源为间接补给区岩溶地下水;

(3)地热水年龄在5.7~33.0 ka之间,受到了更新世以来的降水补给,是不同时期降水补给所形成的混合地下水,补给水应来源于张夏组或炒米店—三山子组地层,补给高程在350~550 m之间。

参考文献

- [1] 冯瑞,郑百录,岳建国,等.飞凤山处置场地下水水化学、氡氧稳定同位素特征及其指示意义[J].科学技术与工程,2019,19(18):100-108.
- [2] Wu X, Dong W, Lin X, et al. Evolution of wetland in Honghe National Nature Reserve from the view of hydrogeology[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1370-1380.
- [3] 崔庚.基于冲淤过程中河床沉积物渗透性变异条件下的傍河源地地下水资源量评价[D].长春:吉林大学,2019.
- [4] 覃夏南,姜光辉,夏源.考虑非饱和带作用及管道流的岩溶泉流量模拟[J].桂林理工大学学报,2019,39(3):622-627.
- [5] 杨杨,赵良杰,苏春田,等.基于CFP的岩溶管道流溶质运移数值模拟研究[J].水文地质工程地质,2019,46(4):51-57.
- [6] 冯亚伟,陈洪年,卜华,等.羊庄岩溶水系统水化学成因及同位素特征[J].中国岩溶,2019,38(3):394-403.
- [7] 朱晓燕,张美良,吴夏,等.桂林地区大气降水(大雨、暴雨)的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征与水汽来源的关系[J].中国岩溶,2017,36(2):139-161.
- [8] 隋海波,康凤新,李常锁,等.水化学特征揭示的济北地热水与济南泉水关系[J].中国岩溶,2017,36(1):49-58.
- [9] 袁建飞,徐芬,刘慧中,等.基于水化学和同位素的典型岩溶水系统溶质演化过程:以西昌市仙人洞为例[J].科学技术与工程,2019,19(17):76-83.
- [10] Jebreen H, Wohnlich S, Banning A, et al. Recharge geochemical processes and water quality in karst aquifers: Central West Bank, Palestine[J]. Environmental earth sciences, 2018, 77(6):261.
- [11] 张保祥,孙学东,刘青勇.济南泉群断流的成因与对策探析[J].地下水,2003,25(1):6-8.
- [12] 孙斌,彭玉明.济南泉域边界条件、水循环特征及水环境问题[J].中国岩溶,2014,33(3):272-279.
- [13] 李传生,祁晓凡,王雨山,等.我国北方典型岩溶地下水位对降水及气象指数的响应特征:以鲁中地区为例[J].中国岩溶,2019,38(5):643-652.
- [14] Qian J, Zhan H, Wu Y, et al. Fractured—karst spring—flow protections: a case study in Jinan, China[J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(7):1192.
- [15] 李常锁,武显仓,孙斌,等.济南北部地热水水化学特征及其形成机理[J].地球科学,2018,43(增刊1):313-325.
- [16] Wu X, Li C, Sun B, et al. Groundwater hydrogeochemical formation and evolution in a karst aquifer system affected by anthropogenic impacts[J]. Environmental geochemistry and health, 2019:1-18.
- [17] Wang J, Jin M, Lu G, et al. Investigation of discharge-area groundwaters for recharge source characterization on different scales the case of Jinan in northern China[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24(7):1723-1737.
- [18] 管清花,李福林,王爱芹,等.济南市岩溶泉域地下水水化学特征与水环境演化[J].中国岩溶,2019,38(5):653-662.
- [19] 胡宽裕,曹玉清.碳酸盐岩地区水质和化学动力学模型研究[J].水文地质工程地质,1993(4):8-14.
- [20] Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Eastern Monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(2):200-211.
- [21] Négrel P, Pauwels H, Chabaux F. Characterizing multiple water-rock interactions in the critical zone through Sr—isotope

- tracing of surface and groundwater[J]. Applied Geochemistry, 2018, 93: 102-112.
- [22] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [23] Wang J, Jin M, Jia B, et al. Hydrochemical characteristics and geothermometry applications of thermal groundwater in northern Jinan, Shandong, China[J]. Geothermics, 2015, 57: 185-195.

Study on the recharge source of karst groundwater in Jinan city based on hydrogeochemical and isotopic characteristics

PENG Kai, LIU Wen, WEI Shanming, LIU Chuane, CHEN Yan, DONG Hao, SU Dong, YUAN Wei, HAN Lin

(Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater /801 Institute of Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract Hydrochemistry and isotopes can be used to study the recharge and discharge characteristics of groundwater and make up for the shortcomings of other methods. As a typical karst area in north China, there are many springs in Jinan city. The research on the source of groundwater in this area can provide a reliable basis for the spring protection. In this paper, hydrochemical parameters and isotopes ^2H , ^{18}O , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ^{13}C and ^{14}C are used to examine sources of four springs and geothermal water in Jinan. The results show that the cold karst water are dominated by $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ types, while the geothermal water is mainly $\text{SO}_4\text{-Ca}$ in chemistry. In dry seasons, the recharge ratio of indirect recharge area to springs is about 66.00%~73.58%, and the direct recharge area only accounts for 26.42%~34.00% of the total. The main source of spring water in dry seasons is karst groundwater in the indirect recharge area. Geothermal water is supplied by Pleistocene precipitation since Pleistocene time, which is mixed groundwater formed by precipitation during different periods. The supply area should be Zhangxia or Chaomidian-Sanshanzi formation at high elevations about 350-550 m.

Key words karst, hydrogeochemistry, isotope, recharge sources

(编辑 张玲)