

丁冠涛, 李常锁, 魏善明, 等. 玉符河外源回灌对岩溶地下水影响研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 907-916.
DOI: 10.11932/karst20230504

玉符河外源回灌对岩溶地下水影响研究

丁冠涛^{1,2,3}, 李常锁^{1,2}, 魏善明^{1,2}, 王少娟^{1,2}, 李 岩^{1,2}, 卢茜茜^{1,2}, 孙 斌^{1,2}, 柳浩然^{1,2}

(1. 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 (山东省地矿工程勘察院), 山东 济南 250014;
2. 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014;
3. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 为缓解济南市的泉水保护与城市供水矛盾, 玉符河先后实施了多期地表水回灌补源地下水工程, 对维持泉水持续喷涌下城市正常取用地下水起到了重要作用。外源水水质与当地岩溶水差异明显, 长期回灌将对岩溶水产生一定影响。针对这一问题, 以 2021—2022 年玉符河的回灌补源为例, 利用同位素试验和水化学综合分析等多种手段相结合的方式, 研究玉符河流域岩溶水受外源水补给的影响, 分析影响区内地下水水化学特征及其组分的变化趋势。结果表明: 玉符河回灌对岩溶水有一定的补给作用, 根据其补给的程度将研究区分成三个区带, 在河岸东侧 I 区范围内河流入渗补给占 50% 以上, 是主要的影响区; 城区泉群位于 III 区内, 水质受玉符河补源影响有限, 但水位会有一些的抬升。自玉符河至 III 区, 水化学类型由 $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}\cdot\text{Mg}$ 型逐渐向 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型过渡, 由于兴济河的调水补源, 泉群地下水类型又转变为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。影响区内岩溶水各离子含量变化主要是河水与岩溶水的物理混合引起, 同时伴随着水岩平衡的改变。补源经过一个水文年后, 各离子逐步接近原来含量水平。研究成果为科学实施玉符河回灌补源提供了依据, 对促进保泉与供水的有机统一具有一定意义。

关键词: 玉符河; 岩溶水; 同位素; 水化学; 外源水回灌; 地下水

中图分类号: P641.134 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 05-0907-10

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引 言

济南市以丰富的泉水资源而闻名, 但随着城市化进程的推进, 地面不断硬化, 使得岩溶水有效补给区面积大幅减小, 补给量随之骤减, 严重威胁了济南泉水的持续喷涌。同时城市人口不断增加, 供水需求逐步增大, 泉水保护与城市供水的矛盾日趋严重。为了缓解这一矛盾, 济南市先后在玉符河实施了多期地表水回灌补源地下水工程, 对维持泉水持续喷涌下城市正常取用地下水起到了重要作用。

近年来, 众多学者对济南市岩溶地下水水化学特征进行了分析, 王开然等^[1]通过对泉域地下水及地表水中主要离子化学特征及时空变化进行分析, 结合相关分析、Piper 三线图、Gibbs 模型及离子比例关系、 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3)$ 及 $^{18}\text{O}(\text{NO}_3)$ 双同位素等水化学方法确定了水体中主要离子的来源; 刘文悦等^[2]在济南市对长孝岩溶水系统、趵突泉岩溶水系统及白泉岩溶水系统水样并进行水质检测, 运用数理统计、相关性分析、Piper 三线图、Gibbs 模型等方法, 分析了研究区内地下水水化学特征, 采用模糊评价方法, 对研

基金项目: 山东省地矿工程勘察院科研基金项目(801KY202005)

第一作者简介: 丁冠涛(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质研究工作。E-mail: 531396099@qq.com。

通信作者: 王少娟(1976—), 女, 研究员, 主要从事水文地质、环境地质研究工作。E-mail: 119559390@qq.com。

收稿日期: 2023-04-20

究区内地下水水质进行了综合评价;管清花等^[3]对山东省济南市趵突泉泉域岩溶地下水水化学特征及水环境进行了分析,揭示了各项化学指标区域分布特征、时间变化特征和相互转化关系,概述了济南地区地下水环境的现状及演化规律;李宝学等^[4]以玉符河入渗补给试验为例,运用水化学和同位素方法,分析了河水入渗对岩溶水矿物组分溶解及离子成分的影响、河水入渗后的渗流路径、影响范围等问题。上述研究针对济南岩溶地下水现状及玉符河入渗补给对岩溶地下水水质影响开展,玉符河回灌水源主要为卧虎山水库放水,水质较好。对于外源水特别是南水北调水作为回灌源水的研究较少,其水质与卧虎山水库水和当地岩溶水水质有明显差别,长期回灌将对区域岩溶水水质甚至济西岩溶地下水源地产生一定影响,开展外源水回灌下玉符河流域地下水水化学组分变化特征研究具有重要的意义。

本文采用资料收集、同位素示踪分析及水化学分析等多种手段,研究玉符河流域地下水受外源水回灌补给的影响范围和程度,分析影响区内地下水水化学组分变化特征,为安全科学的实施玉符河人工补源工程提供依据。

1 玉符河流域概况

1.1 基本情况

玉符河发源于济南南部山区的锦阳、锦绣、锦云三川,属于黄河的一级支流。上游三川于仲宫镇汇入卧虎山水库,出库后始称玉符河,流域面积 751.3 km²,主要流经寨而头、西渴马、崔马、周王庄,最后于北店子注入黄河,全长 70.2 km。卧虎山水库大坝以下河道渗漏严重,渗漏的河水是岩溶水重要补给来源之一。

1.2 玉符河回灌补源工程

研究区现有一个卧虎山水库放水大坝和八个河道两侧放水口,其中卧虎山水库大坝可将卧虎山水库的水直接放入玉符河中进行补源,其水源多是水库水;八个河道放水口分别属于地表水转化地下水工程和南水北调东线济南市工程,前者将玉清湖水库的黄河水提至玉符河河道进行渗漏补源,后者利用济平干渠将南水北调水引至玉符河河道进行放水补源。本次回灌是利用南水北调东线济南市工程的寨而头放水

口进行放水补源,水源是南水北调的长江水。

1.3 水文地质条件

济南南部发育低山丘陵,北部为黄河冲积平原,整体地势南高北低。玉符河流域含水层以第四系孔隙含水层和寒武系-奥陶系裂隙岩溶含水层为主,局部有少量燕山期闪长岩基岩裂隙含水层(图 1)。第四系孔隙含水层沿玉符河两侧分布,岩性多为卵石、中粗砂,含水层厚度较大,富水性较强,以大气降水和河水渗漏为主要补给源,排泄方式主要为侧向径流。寒武-奥陶系裂隙岩溶含水层在出露区富水性一般较差,在山前隐伏区裂隙岩溶发育的地段形成富水区,主要接受大气降水和玉符河等河水渗漏补给,排泄以泉水排泄和人工开采为主。催马至潘村段,奥陶系灰岩直接出露,玉符河河水可直接渗漏补给奥陶系岩溶水,是主要的渗漏段。在催马以南,下伏的寒武系张夏组灰岩接受河水和大气降水的补给后,可通过断裂带间接补给北部的奥陶系含水层,构成了济南泉水的重要补给来源。

2 回灌补源监测

2.1 回灌水源及监测时间

利用济南水利部门每年枯水期向玉符河放水补源开展本次回灌监测。2021 年回灌水源为外源水即南水北调水,补源量约为 20 m³·d⁻¹,回灌时间自 2021 年 4 月—2021 年 7 月,监测时间 1 个水文年。

2.2 水样采集与测试

本研究于外源水回灌补源后 2 个月(2021 年 5 月)和 11 个月(2022 年 3 月)各采样一次。现场使用地表水取样器对玉符河表层河水进行采集,地下水井中安装自来水管,直接取地下水。基于玉符河渗漏段及周边区域情况的认识,选取渗漏量相对较大的寨而头—催马段作为监测点进行重点布设,往下游沿地下水运移的主要方向成扇形分布,并在泉水、西郊水源地等敏感地段设置了监测孔,共设 23 个岩溶水监测点、3 个孔隙水监测孔、2 个玉符河河水监测点,进行稳定同位素试验(图 1)。

为了分析各离子具体变化情况,同步采取了简分析样品,检测项目为钙、镁、钾、钠、氯离子、硫酸根、重碳酸根等七大离子,采样时间为补源后 2 个月和补源后 11 个月。根据检测结果,依次开展水化学

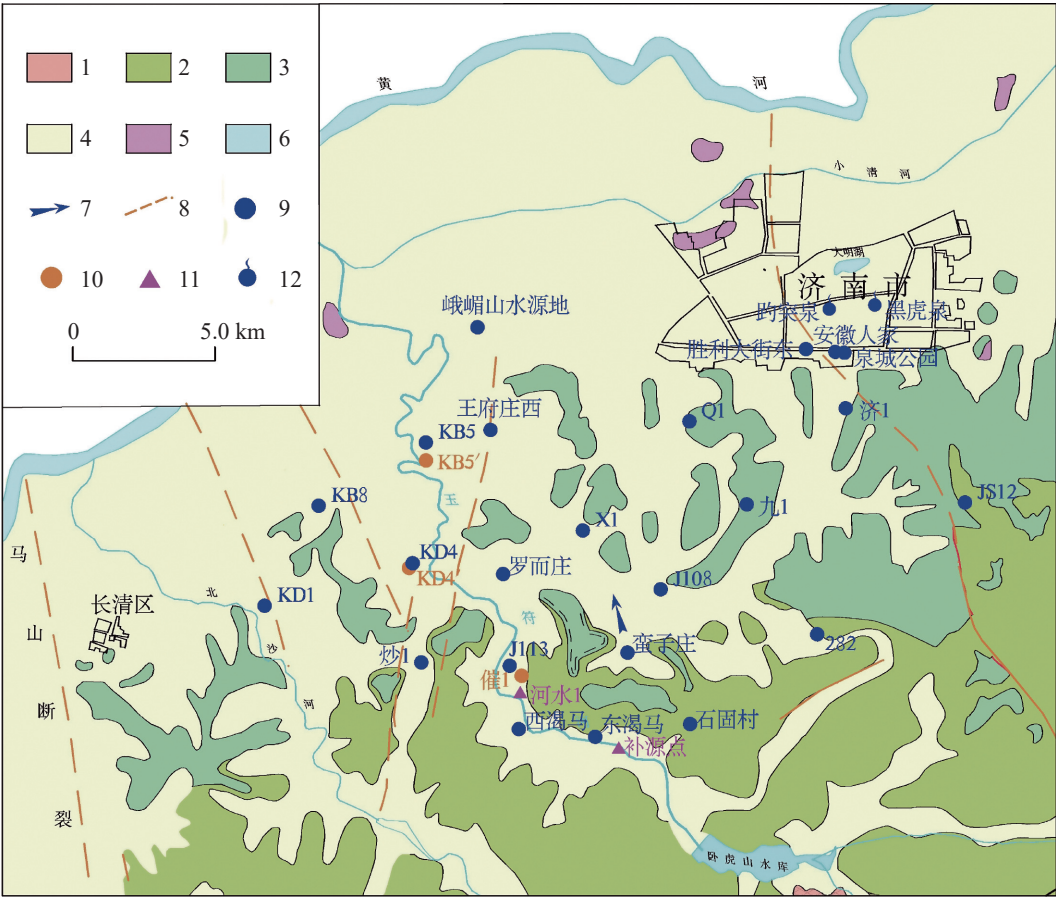


图 1 地质及监测点布置图

1-泰山群变质岩 2-寒武系灰岩 3-奥陶系灰岩 4-第四系 5-闪长岩 6-河流、水库 7-岩溶水流向 8-断裂
9-岩溶水取样点 10-孔隙水取样点 11-补源点 12-泉群

Fig. 1 Layout of monitoring points and geology map

1-Metamorphic rocks of Taishan Group 2-Cambrian limestone 3-Ordovician limestone 4- Quaternary 5-Diorite 6. Rivers and reservoirs 7-Karst flow direction
8-Fracture 9-Sampling site of karst water 10- Sampling site of pore water 11-Replenishment point 12-Spring groups

类型变化、水化学特征及组分变化研究。

3 结果与讨论

3.1 稳定同位素特征

3.1.1 岩溶水¹⁸O和D的组成

氢、氧是自然界中的 2 种主要因素,而水是由氢氧元素组成的一种化合物,因此可以通过研究 δD、δ¹⁸O 稳定同位素判断地下水补给来源。研究区内分两个时间段取样,其中,2021 年取样 28 个,2022 年取样 10 个,委托钡科瑞(北京)检测技术有限公司进行样品检测,检测方法采用标准高精度方式进行。

氢氧同位素采用千分偏差值 (δ) 表示,δD 和 δ¹⁸O 的分析误差为±0.001‰,根据测试结果:岩溶水 δ¹⁸O 值为-9.752‰~-6.263‰,平均值为-7.719‰;

δD 值为-66.314‰~-49.614‰,平均值为-56.667‰;大部分孔隙水、岩溶水和泉水样品都落在全球大气降水线附近 (图 2),说明来源主要是大气降水。河水

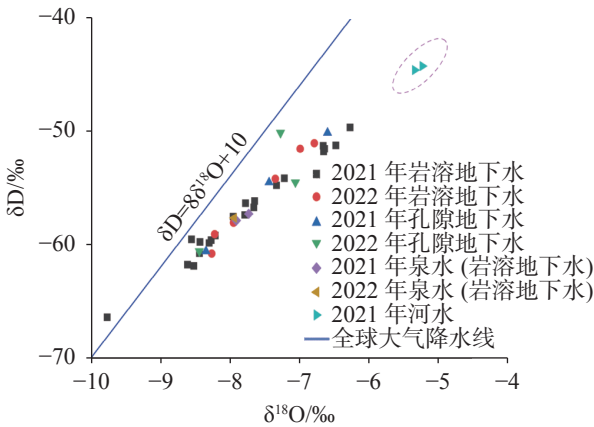


图 2 玉符河地下水 δD-δ¹⁸O 关系图

Fig. 2 δD- δ¹⁸O relationship of groundwater of the Yufu river

样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 数值最高, ^{18}O 最富集, 并且偏离全球大气降水线, 说明蒸发作用对河水的影响较明显。远离玉符河的岩溶水 ^{18}O 数值较低, 受蒸发作用影响较小。靠近玉符河的岩溶水 ^{18}O 逐渐升高, 并且呈现逐渐偏离大气降水线的趋势, 表明有河水混入。

与 2021 年地下水样品相比, 2022 年地下水样品的 D、 ^{18}O 稳定同位素含量差别不大, 说明随着时间的变化, 岩溶水和孔隙水的补给源相似, 未发生较大的变化。河水和未受河水影响的岩溶水之间稳定同位素组分具有显著的差异, 分别构成了两个不同的端元, 而受河水入渗影响的岩溶水稳定同位素组分含量处于这两个端元之间。

3.1.2 入渗河水范围以及对泉群的影响

高温条件下水与围岩的水岩相互作用强烈, 可致使水中 ^{18}O 和 ^2H 同位素产生分馏^[5], 而在常温条件下, 水中 ^{18}O 和 ^2H 同位素比较稳定, 遵守惰性守恒^[6]。基于二元或三元混合模型的假设, 氢氧同位素在地表水-地下水混合计算、河流水文过程线分割等应用广泛^[7-8]。混合比的计算需满足以下假设^[9-10]: a. 在计算期内, 各端元的同位素组成保持恒定不变; b. 各个端元的同位素组成含量之间有显著的差异; c. 各端元的混合处于稳定状态, 不再受其他端元或水源的影响。

玉符河至城区之间, 岩溶水径流通畅、速度较快, 地下水温度常年在 18 度左右, 不存在高温环境, 因此水中 ^{18}O 和 ^2H 稳定同位素分馏较小。岩溶水主要来源于大气降水的入渗和玉符河河水的渗漏, 河水和大气降水中 ^{18}O 含量差别较大, 因此可以假定二元混合模型, 利用 $\delta^{18}\text{O}$ 估算岩溶水中河水所占比例。以河水作为一个端元, 以远离河道、不受河水影响的岩溶水为另一端元, 按照二元混合原理, 岩溶水中河水比例按下式计算:

$$\sigma = \frac{c_g - c'_g}{c_g - c_r} \times 10\% \quad (1)$$

式中: σ 为岩溶水中河水所占比例; c_g 为未受河水影响的岩溶水中的 $\delta^{18}\text{O}$; c'_g 为受到河水影响的岩溶水中的 $\delta^{18}\text{O}$; c_r 为玉符河河水中的 $\delta^{18}\text{O}$; c_g 为未受河水影响的岩溶地下水样品-8.54‰(JS12 一带地下水的千分偏差值), c_r 为河水样品 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值-5.28‰。 σ 值高的样品分布在罗而庄(70%)、东渴马(64%)和 J113(58%)。

由于未考虑其他端元或水源的影响, 以及两个

端元取值采用了有一定离散统计特征的多个样品 ^{18}O 的平均值, 因此, 混合比例计算结果会存在一定的误差, 但仍然可以反映河水入渗的影响程度^[4]。

依据补源开始后 2 个月同位素分析结果, 按岩溶水中玉符河河水所占比例把岩溶水系统分为 3 个区(图 3)。其中, I 区分布在玉符河东岸, 岩溶水中河水混合比例最高, 在 50%~70% 之间, 受河水补给影响最大; II 区在 I 区外围一定范围内, 河水占比 10%~50%, 入渗河水对岩溶水同位素和水化学影响程度下降; III 区则远离玉符河, 河水占比小于 10%, 受河水影响较小。泉群位于 III 区, 但其河水占比达到 25% 左右, 根据调查玉符河补源期间兴济河也进行了放水补源, 水源与玉符河一致, 因此泉群主要受到了兴济河补源的影响。从分区可以看出, 玉符河补源后 2 个月, 河水对岩溶水的影响范围基本在 I 区范围内(即东北方向约 2.5 km, 西北方向约 7 km), 主运移方向为沿玉符河河道向北西运移。

依据补源后 11 个月同位素分析结果, I 区内的岩溶水监测点河水比例均有所下降, 但占比仍然在 50% 左右, 表明仍是河水补给的主要影响区; II 区内监测点河水比例显著增加, J108 监测点达到 37%, 说明河水的影响范围已经向 II 区进行了扩展; III 区内监测点河水比例有所增加, 但不明显, 河水占比水平仍然在 10% 附近, 说明受河水的影响有限。

通过稳定同位素试验可看出, 玉符河在枯水期回灌补源 4 个月($10 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), 河水主要向玉符河东岸和玉符河下游即北西方向运移。补源 2 个月后其影响范围大致为东北方向约 2.5 km、西北方向约 7 km, 补源 11 个月后影响范围向外扩展有限, 未影响到趵突泉泉群。虽然河水未运移到达泉群, 对泉群水质未产生影响, 但由于河水的入渗增加了地下水补给量, 抬高了西郊和南部补给区的岩溶水水位, 促进了地下水向泉群的径流补给, 对泉群水位会有一定的抬升作用。

3.2 水化学特征及变化

本次工作同步采取了地下水筒分析水样, 2021 年共采取 21 个岩溶水样品、2 个泉水样品、2 个补源河水样品, 2022 年选取部分点位采取 6 个岩溶水样品、1 个泉水样品。

开展地下水中化学成分数理统计工作, 可以分析总结其变化规律^[11]。利用 SPSS 对 2021 年玉符

进一步说明地下水化学组分形成的复杂程度,当 $C_v \geq 1$, 表示其变异性较强;当 $0.1 < C_v < 1$, 表示其变异性中等;当 $C_v \leq 0.1$, 其变异性较弱^[13]。由表 1 可看出,玉符河流域岩溶水(含泉水)各离子变异系数在 0.03~1.53 之间,跨度较大。除 K^+ 和 NO_3^- 离子外均在 0.1~1 之间,属于中等变异性,表明本地区岩溶水离子的空间变异性相对较小,含量较稳定,也表明外源水补源对岩溶水水质的没有造成很大的影响。 K^+ 和 NO_3^- 的变异性较高,说明个别点位存在污染情况。

根据简分析结果,对比河水与岩溶水、泉水的水化学特征,阴阳离子之间存在明显的差异。河水阳离子以 Na^+ 为主,含量 $120.71 \sim 128.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 含量不高,在 $50.10 \sim 53.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,阴离子以 SO_4^{2-} 为主,含量 $194.00 \sim 199.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Cl^- 与 HCO_3^- 含量相当,分别为 $116.00 \sim 121.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $134.59 \sim 146.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。泉水阳离子以 Ca^{2+} 为主,含量 $101.00 \sim 136.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,阴离子以 HCO_3^- 为主,含量 $232.48 \sim 299.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均明显大于河水。岩溶水与泉水基本一致,阳离子以 Ca^{2+} 为主,含量 $4.98 \sim 226.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,阴离子以 HCO_3^- 为主,含量 $55.06 \sim 385.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化。不同类型水之间的差异表明经历的水文过程和水岩相互作用不同。

Piper 图由一个等边平行四边形及两个等边三角

形组成,浓度单位为当量百分数,Piper 三线图通常用来进行水化学成分分类、水化学成分演化等研究^[14-19]。本文将 2021 年 5 月(补源后 2 个月)的水样分为河水、泉水和岩溶水三种类型,岩溶水根据同位素试验结果进一步分为 I 区、II 区和 III 区三个区域,投在 Piper 图上(图 4a)。可以看出,玉符河河水水化学类型为 $SO_4 \cdot Cl \cdot Na \cdot Mg$ 型,I 区岩溶水水化学类型主要为 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Ca \cdot Na$ 型,II 区岩溶水水化学类型以 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Ca$ 型为主,少量 $HCO_3 \cdot Ca$ 、 $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4 \cdot Ca$ 型,III 区岩溶水水化学类型以 $HCO_3 \cdot Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3 \cdot Ca$ 型为主,靠近兴济河补源处水化学类型变为 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3 \cdot Cl \cdot Na \cdot Ca$ 型。从玉符河向西郊水源地方向地下水类型由 $SO_4 \cdot Cl \cdot Na \cdot Mg$ 型逐渐向 $HCO_3 \cdot Ca \cdot Mg$ 型过渡。向泉群方向由于兴济河的调水补源,地下水类型先由 $SO_4 \cdot Cl \cdot Na \cdot Mg$ 型变为 $HCO_3 \cdot Ca$ 型,然后又向 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Ca \cdot Mg$ 过渡。水化学类型的变化也表明了外源水补源对岩溶水水质产生了一定的影响。

将 2022 年 3 月、2021 年 6 月均采取水样的监测点结果投在 Piper 图上(图 4b)。可看出,各监测点阴阳离子含量变化较小,水化学类型未发生明显变化,表明补源 2 个月后随着时间的变化,离子含量变化不大,水质恢复较慢。

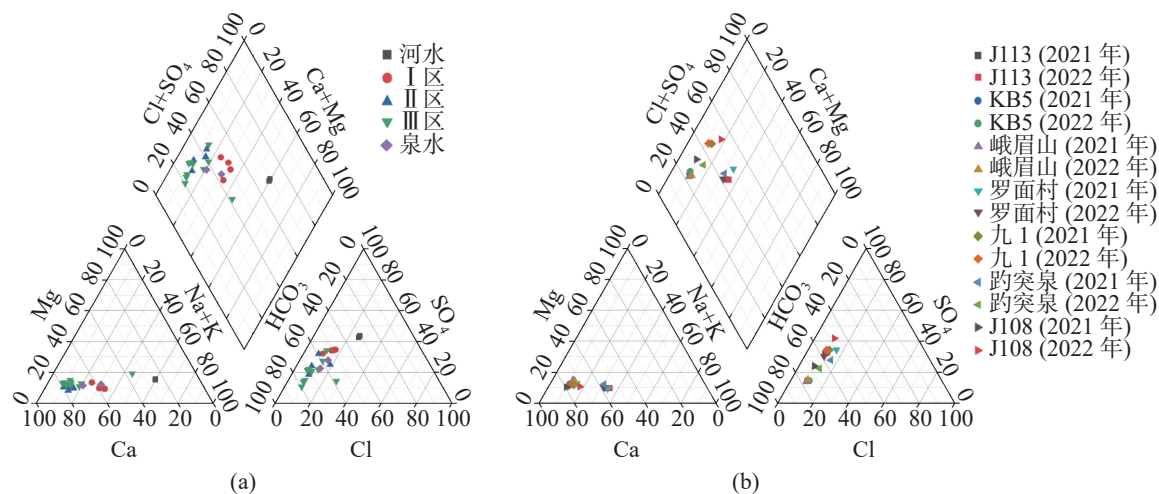


图 4 玉符河水样 Piper 三线图

Fig. 4 Piper three-line diagram of water sample of Yufu river

3.3 主要离子组分变化特征

依据稳定同位素试验结果,在河水入渗主要影响区内选择罗而村监测点具体分析岩溶水中主要离子含量变化情况。由图 5(a)可看出,补源后镁、钾离

子的含量变化不明显;钙离子含量随着河水的入渗逐渐升高,在 2021 年 6 月达到最高值,之后又逐渐降低;钙离子则相反,随着补源其含量先降低又回升。由图 5(b)可看出,阴离子中重碳酸根离子含量与钙

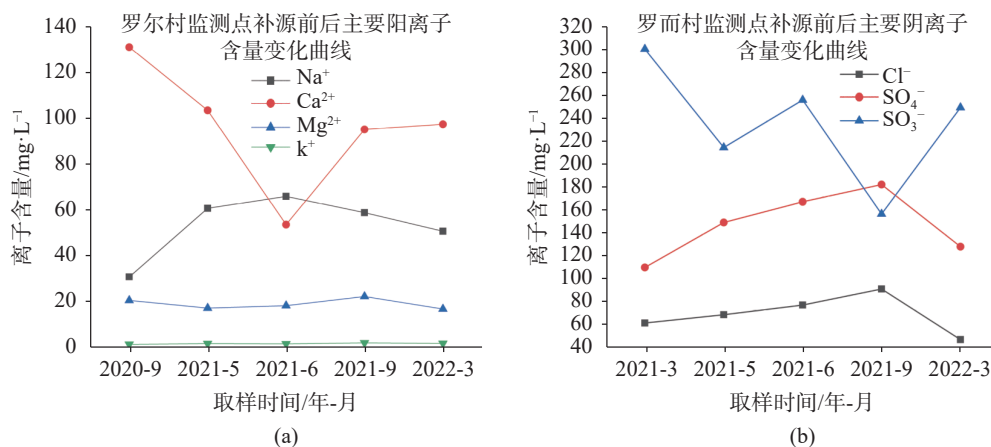


图5 罗而村监测点补源前后主要离子含量变化曲线

Fig. 5 Change of main ion content at monitoring points in Luoer village before and after source supplement

离子变化趋势一致,先下降后上升;硫酸根、氯离子则是先上升后下降。前已述及外源水与岩溶水水质差异明显,外源水钠离子、硫酸根离子和氯离子含量较高,岩溶水则重碳酸根离子和钙离子含量较高。

由罗而村监测点监测结果可看出,各离子含量变化主要是河水与岩溶水的物理混合引起,通过对比发现阳离子含量变化拐点出现在2021年6月,阴离子则出现在2021年9月,分析是物理混合后打破了原来的离子平衡,各离子间发生了化学反应,逐渐形成新的离子平衡。总体来看,玉符河外源水枯水期补源4个月后,前期岩溶水中钙、钠、重碳酸根、硫酸根及氯离子会有变化,但经过一个水文年后,各离子会逐步接近原来含量水平。

4 结 论

(1)稳定同位素结果表明,枯水期玉符河现状回灌补源下,对岩溶水补给作用明显,河水主要向玉符河东岸和玉符河下游即北西方向运移。补源2个月后,根据影响程度可划分为三个区带(I、II和III区),河水比例依次下降。主要影响I区范围大致为东北方向约2.5 km、西北方向约7 km。补源11个月后影响范围向外扩展有限,未到达趵突泉泉群,对泉群水质影响不大;

(2)外源河水与岩溶水、泉水水化学特征存在明显的差异。河水水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型,岩溶水以 $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}$ 型为主,泉水受兴济河补源影响为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。补源2个月从玉符河向西郊水源地方向地下水类型由 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot$

$\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型逐渐向 $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型过渡;向泉群方向由于兴济河的调水补源,地下水类型先由 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型变为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}$ 型,然后又向 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 过渡。外源水的回灌对周边岩溶水水质产生了一定的影响;

(3)影响区内岩溶水各离子含量变化主要是河水与岩溶水的物理混合引起,同时伴随着水岩平衡的改变。根据本次监测,玉符河外源水枯水期补源4个月,经过一个水文年后,各离子逐步接近原来含量水平;

(4)本研究没有考虑季节性大气降水对地下水水化学和同位素的影响,同位素分析采用的大气降水线非当地大气降水线,这些问题对取得的结果可能产生一定影响,是值得深入研究的课题。

参考文献

- [1] 王开然, 吴振, 傅世东, 仇钰婷, 陈华伟. 济南泉域岩溶水系统水化学演化及成因分析[J]. 地球化学, 2023, 52(5): 547-558.
WANG Kairan, WU Zhen, FU Shidong, QIU Yuting, CHEN Huawei. Hydrochemical evolution and genesis analysis of karst water system in the Jinan spring basin[J]. Geochimica, 2023, 52(5): 547-558.
- [2] 刘文悦, 高宗军, 徐源, 韩聪, 罗振江, 赵振华. 济南市岩溶地下水水化学特征及基于模糊评价法的水质评价[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 220-232, 244.
LIU Wenyue, GAO Zongjun, XU Yuan, HAN Cong, LUO Zhen-jiang, ZHAO Zhenhua. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of karst groundwater in Jinan City[J]. Carso-logica Sinica, 2023, 42(2): 220-232, 244.
- [3] 管清花, 李福林, 王爱芹, 冯平, 田婵娟, 陈学群, 刘丹. 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.

- GUAN Qinghua, LI Fulin, WANG Aiqin, FENG Ping, TIAN Chanjuan, CHEN Xuequn, LIU Dan. Hydrochemistry characteristics and evolution of karst spring groundwater system in Jinan[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 653-662.
- [4] 李宝学, 秦大军, 郭艺, 刘文才, Mohammed Haji, 林琳, 管清花. 玉符河对济南岩溶水化学过程的影响研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 190-198.
- LI Baoxue, QIN Dajun, GUO Yi, LIU Wencai, Mohammed Haji, LIN Lin, GUAN Qinghua. Effect of Yufu river on chemical process of karst groundwater in Jinan, Shandong Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 190-198.
- [5] Clark I D, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology (1st edition)[M]. Florida: CRC Press, 1997.
- [6] Kendall C. Isotope tracers of water and solute sources in catchments[J]. *Solute Modeling in Catchment Systems*, 1995: 261-303.
- [7] Fritz P, Cherry J, Sklash M, Weyer K. Storm runoff analysis using environmental isotopes and major ions[J]. IAEA, 1976. DOI:10.1080/15732479.2010.497540.
- [8] Rodhe A. Groundwater contribution to stream flow in Swedish forested till soil as estimated by oxygen-18[J]. *Isotope Hydrology*, 1983, 270: 55-66.
- [9] Sklash M G, Farvolden R N. The role of groundwater in storm runoff[J]. *Journal of Hydrology*, 1979, 43(1-4): 45-65.
- [10] Turner J V, Bradd J M, Waite T D. Conjunctive use of isotopic techniques to elucidate solute concentration and flow processes in dryland salinized catchments[C]//International Atomic Energy Agency. Proceedings of an International Symposium on Isotope Techniques in Water Resources Development, 1991.
- [11] 林云, 曹飞龙, 武亚遵, 任华鑫, 贾方建. 北方典型岩溶泉域地下水水文地球化学特征分析: 以鹤壁许家沟泉域为例[J]. *地球与环境*, 2020, 48(3): 294-306.
- LIN Yun, CAO Feilong, WU Yazun, REN Huaxin, JIA Fangjian. Hydrogeochemical characteristics of groundwater in typical karst spring areas of North China: A case study in the Xujiagou spring area, Hebi[J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(3): 294-306.
- [12] 朱亮, 刘景涛, 杨明楠, 刘春燕, 周冰, 解飞, 李备. 青海省北川河流域地下水水化学特征与水质评价[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 235-241, 249.
- ZHU Liang, LIU Jingtao, YANG Mingnan, LIU Chunyan, ZHOU Bing, XIE Fei, LI Bei. Chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in Beichuan river basin in Qinghai Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 235-241, 249.
- [13] 杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 李志明, 刘文波, 康伟. 基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 154-162.
- YANG Nan, SU Chunli, ZENG Hanbin, LI Zhiming, LIU Wenbo, KANG Wei. Evolutional processes of groundwater in Xinglong county based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 154-162.
- [14] Dong Fangying, Yin Huiyong, Cheng Wenju, Li Yongjie, Qiu Mei, Zhang Chengwei, Tang Ruqian, Xu Guoliang, Zhang Lifeng. Study on water inrush pattern of Ordovician limestone in North China Coalfield based on hydrochemical characteristics and evolution processes: A case study in Binhu and Wangchao coal mine of Shandong Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380(2): 134954.
- [15] 齐玉涵, 张春艳, 程艳红, 张帅领. 郑州市区地下水水化学演变及成因分析[J]. *工程勘察*, 2021, 49(9): 39-45.
- QI Yuhan, ZHANG Chunyan, CHENG Yanhong, ZHANG Shuailing. Hydrochemical evolution and cause analysis of groundwater in Zhengzhou downtown[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2021, 49(9): 39-45.
- [16] 王宝亮, 李颖智, 陈洪凯. 青藏高原羌塘盆地及周边地区水化学特征与控制因素研究[J]. *河北地质大学学报*, 2022, 45(5): 63-70.
- WANG Baoliang, LI Yingzhi, CHEN Hongkai. Study on hydrochemical characteristics and controlling factors of Qiangtang basin and its surrounding areas in Qinghai Tibet Plateau[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2022, 45(5): 63-70.
- [17] 贺亮亮, 吕广罗, 胡安焱, 杨磊, 郭云, 李贵娟. 基于水化学特征分析的矿井突水水源判别[J]. *中国煤炭地质*, 2022, 34(6): 34-39.
- HE Liangliang, LYU Guangluo, HU Anyan, YANG Lei, GUO Yun, LI Guijuan. Mine water bursting water source discrimination based on hydrochemical features analysis[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(6): 34-39.
- [18] 陈浩, 王家鼎, 王琳琳, 杨传伟, 姜福红. 山东省邹城市东部地下水水化学特征及形成机制[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 139-148.
- CHEN Hao, WANG Jiading, WANG Linlin, YANG Chuanwei, JIANG Fuhong. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in east Zoucheng City, Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 139-148.
- [19] 刁海忠, 于桑, 李洪亮, 尹秀贞, 周建伟, 刘红, 王元新. 淄博洪山-寨里煤矿地下水串层污染治理区水化学和硫同位素特征[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 171-181.
- DIAO Haizhong, YU Sang, LI Hongliang, YIN Xiuzhen, ZHOU Jianwei, LIU Hong, WANG Yuanxin. Analysis on the hydrochemical and sulfur isotope characteristics of the groundwater in cross-strata pollution control area of Hongshan and Zhaili coal mines in Zibo[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 171-181.

Study on the influence of external recharge of Yufu river on karst groundwater

DING Guantao^{1,2,3}, LI Changsuo^{1,2}, WEI Shanming^{1,2}, WANG Shaojuan^{1,2}, LI Yan^{1,2},
LU Qianqian^{1,2}, SUN Bin^{1,2}, Liu Haoran^{1,2}

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Geomaterial Engineering Exploration Institute), Jinan, Shandong 250014, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract Jinan is famous for its abundant spring water resources, but with the advancement of urbanization, the ground continues to harden, resulting in a significant reduction of the area effectively supplying karst water, and hence a sudden decrease in water supply. The decrease has seriously threatened the continuous gushing of spring water in Jinan. At the same time, the urban population is constantly rising, so is the demand for water supply. The contradiction between spring water protection and urban water supply is becoming increasingly serious. In order to alleviate the contradiction in Yufu river, the projects in which groundwater was recharged by surface water were completed in different phases. In these projects such as the water discharge project of the Wohushan reservoir, the project of converting surface water into groundwater, and the Jinan City project of the East Line of the South-to-North Water Diversion Project, the surface water from the Wohushan reservoir, the Yuqing lake reservoir, and the Yangtze River has been respectively used for the recharging. They play an important role in maintaining the continuous gushing of spring water for the normal use of groundwater in cities.

In the South-to-North Water Diversion Project, water from the Yangtze River is significantly different from local karst water in quality. Therefore, long term recharging will have a certain impact on karst water. In response to this issue, taking the recharging source of the Yufu river from 2021 to 2022 as an example, we studied the impact of external water supply on karst water in the Yufu river basin, and analyzed the hydrochemical characteristics and the change of hydrochemical composition of groundwater in the affected area. In order to fulfill the research purpose, we used isotope testing and comprehensive hydrochemical analysis. The results show that the recharging of the Yufu river has a certain replenishment effect on karst water. According to its degree of replenishment, the research area is divided into three zones. After two months of replenishment, Zone I is distributed on the east bank of the Yufu river, with the highest mixing ratio of river water in karst water, ranging from 50% to 70%, and is most affected by river water replenishment. Within a certain range of the periphery of Zone I, the proportion of river water in Zone II is 10% to 50%, and the degree of influence of infiltration river water on karst water isotopes and hydrochemistry decreases. Zone III is far away from the Yufu river, with river water accounting for less than 10% and less affected by the river water. After 11 months of replenishment, the proportion of river water in the karst water monitoring points in Zone I has decreased, but the proportion is still around 50%, indicating that Zone I is still the main affected area for river water replenishment. The proportion of river water in monitoring points in Zone II has significantly increased, with J108 reaching 37%, indicating that the impact range of river water has expanded to Zone II. The proportion of river water in monitoring points in Zone III has also increased, but it is not significant with the percentage of around 10%, indicating the limited impact from river water. The hydrochemical characteristics of river water from the external source are significantly different from those of karst water and spring water. The hydrochemical type of river water is $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ type, while the karst water is mainly $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type and $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}$ type. Spring water is influenced by the replenishment of Xingji river with $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type. Two months later, the hydrochemical type of groundwater has gradually transitioned from $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ type to $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type in the water source area of the western suburb along Yufu river. Due to the water diversion and replenishment of the Xingji river in the direction of the spring group, the groundwater type first changed from $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ type to $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}$ type, and then transitioned to

$\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$. The recharging of water from the external source has a certain impact on the quality of the local karst water. The changes in the ion content of karst water in the affected area are mainly caused by the physical mixing of river water and karst water, accompanied by changes in water-rock balance. After a hydrological year, each ion gradually approaches its original content level after supplementing the source. The research results provide a basis for the scientific implementation of recharging and replenishment of the Yufu river, and have certain significance in promoting the organic unity of spring protection and water supply. This article does not consider the impact of seasonal atmospheric precipitation on groundwater hydrochemistry and isotopes. The atmospheric waterline used for isotope analysis is not the local atmospheric waterline, and these issues may have a certain impact on the results obtained, which is a topic that we need to further study.

Key words Yufu river, karst water, isotope, hydrochemistry, external water recharge, groundwater

(编辑 杨杨张玲)

(上接第 906 页)

control factors at stage 3 are extraction, precipitation, water engineering, and urban construction, with an average impact degree of -518.2 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 514.2 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, -69.2 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ and -24.0 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; the main control factors at stage 4 are precipitation, extraction, ecological replenishment sources, urban construction, and water engineering, with an average impact degree of 553.8 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, -254.4 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 103.6 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, -89.9 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ and -65.6 thousand $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$. In general, precipitation and extraction control the spring flow, but other driving factors gradually increased with the development at the four stages. Before the springs gushed again, the impact of precipitation gradually weakened, but the influence of extraction, urban construction and water conservancy projects gradually increased by degrees. After the springs gushed again, the impact of the government's regulation and control played a dominant role.

To keep a continuous gush of spring, first of all, we should ensure that Baotu Spring area 3-type water conversion can be effectively carried out. Besides, we should strengthen dynamic monitoring and regulation, rationally coordinate major factors such as groundwater mining, ecological replenishment and water conservancy projects, etc., and formulate an optimal groundwater development program in a scientific and elaborate way, relying on the sharing mechanism among different departments. Finally, in order to reduce the impact of urbanization on springs, we should strengthen the protection and restoration of ecological environmental in the recharge area of southern springs so as to improve the capacity of water resources conservation. The research results can provide basis for spring runoff protection.

Key words Jinan, four major spring groups, spring dynamic characteristics, driving factors

(编辑 杨杨黄晨晖)