

于令芹, 林广奇, 刘媛媛, 等. 济南市区泉水与东、西郊岩溶水水力联系研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 917-930, 955.
DOI: 10.11932/karst20230505

济南市区泉水与东、西郊岩溶水水力联系研究

于令芹^{1,2}, 林广奇^{1,2}, 刘媛媛³, 齐欢^{1,2}, 孟庆斋^{1,2}, 马河宽^{1,2}, 江露露^{1,2}, 刘春伟^{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 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. 山东理工职业学院, 山东 济宁 272067)

摘 要: 为查明济南市区泉水与西郊、东郊岩溶水的水力联系, 从地层结构、水动力场角度, 结合抽水试验、示踪试验和水化学分析等方法研究泉水与岩溶水之间的关系。结果表明, 济南市区和西郊之间的刘长山—郎茂山—万灵山一带存在地下水径流通道。刘长山北侧槐苑广场—九中—十四中一带, 在埋深 350 m 处揭露连续的岩溶含水地层, 并存在垂向径流通道, 市区泉水和西郊岩溶水通过刘长山北侧侵入岩体接触带以下的三山子组含水层连通。市区与东郊之间的燕翅山—七里河一带受舌状侵入岩体的影响, 两侧地下水流场存在差异, 但山东大学洪楼校区以北埋深 485 m 处揭露连续的岩溶含水地层, 市区泉水和东郊岩溶水可通过侵入岩体接触带以下的三山子组含水层连通。水化学分析结果表明市区泉水与西郊、东郊岩溶水水化学类型一致, 具有相同的演化环境。

关键词: 济南市区泉水; 岩溶水; 岩体接触带; 径流通道; 水力联系; 地下水流场; 演化环境

中图分类号: P641.5; **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 05-0917-14

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引 言

济南是著名的“泉城”, 历史上市民长期以地下水为饮用水源, 但从 20 世纪 70 年代初开始, 随着经济和社会发展, 城市扩张加速, 地下水被过度开采, 地表水入渗量减少, 造成泉域区域地下水位下降, 市区泉水由高水头持续喷涌转变成低水头衰减枯竭^[1-3]。自 2003 年以来, 济南市采取了封井节流、采外补内、人工补源^[4-6]等调控措施, 泉水复涌并持续喷涌, 但保泉问题尚未得到根本解决。

前人针对济南泉水的形成机理及影响因素^[7-9]、水化学特征^[10-13]、泉域的边界^[14-16]进行了大量研究, 但市区泉水与西郊、东郊^[17]岩溶水的水力联系一直存在争议。一些学者认为市区与西郊水力联系密切,

董咏梅等^[18]2003 年 6 月对济西进行抽水试验分析, 证明济南市区与济西地下水之间存在密切的水力联系; 侯新文等^[19]采用回归分析法研究泉水位与水源地开采量的关系, 证明济南市区与西郊水力联系密切; 张郑贤^[20]等利用灰色关联的数学方法, 从水位波动关联度角度研究市区泉水与济西地下水的联系, 论证两者地下水位关联性极强; 齐欢等^[21]通过经验正交函数分析法分析了趵突泉泉域地下水位动态的变化特征, 证明泉域岩溶含水层整体连通性较好, 泉域内没有明显的地下阻水边界。还有学者认为市区与西郊水力联系相关性不大, 邹连文等^[22-23]通过市区泉群涌水量与区域降水的回归分析, 得出市区泉水与东南部岩溶漏水山区的降水关联密切, 认为济西地区为独立于泉域之外的地下水系统。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772257)

第一作者简介: 于令芹(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质及泉水保护方面的研究工作。E-mail: 154175416@qq.com。

通信作者: 林广奇(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质及泉水保护方面的研究工作。E-mail: 271743007@qq.com。

收稿日期: 2023-04-20

由于济南地区岩溶发育的复杂性,目前仍有许多问题未得到解决,市区泉水与西郊、东郊岩溶水之间的运动规律、优势径流通道仍在探究之中,对泉水保护和地下水资源合理开发利用造成较大的影响。本文从当前济南保泉供水迫切需要出发,采用水文地质技术方法,从地层结构、水动力场、抽水试验、示踪试验、水化学分析等角度进一步分析论证市区泉水与西郊、东郊岩溶水之间的水力联系,为优化济南市地下水利用布局,实现科学保泉供水提供依据。

1 研究区概况

研究区范围为趵突泉泉域,东边界为东坞断裂,西边界为马山断裂,北边界为奥陶灰岩顶板 400 m 埋深线,南边界为地表分水岭^[14],总面积 1 658.9 km²

(图 1)。市区泉水是指趵突泉群、黑虎泉群、五龙潭群、珍珠泉群等四大泉群,西郊是指段店以西至马山断裂之间的地区,主要包括西郊三处水源地(腊山、峨眉山、大杨庄)、济西三处水源地(古城、冷庄、桥子李)以及长清水源地,东郊是指在二环东路以东至东坞断裂的地区,以往将东坞断裂两侧的水源地统称为东郊水源地^[17]。

2 研究方法

本文综合利用地层结构、水动力场、抽水试验、示踪试验和水化学等方法对济南市区泉水与西郊、东郊岩溶水的水力联系进行分析。其中,根据地层结构确定市区与西郊、东郊之间地层的岩溶发育情况和含水岩组的连续性;通过等水位线和水位动态

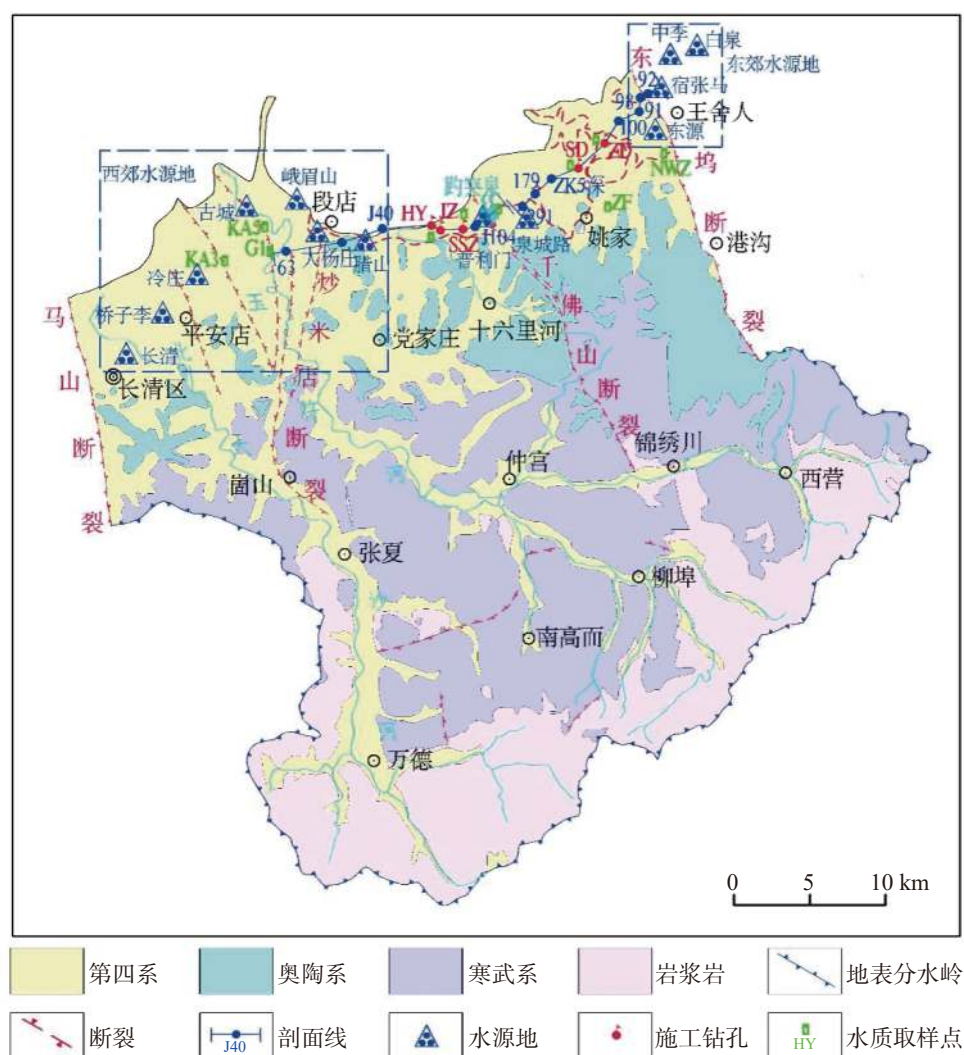


图 1 研究区地质构造图

Fig. 1 Geological structure of the study area

曲线分析济南西郊、东郊和市区泉水在水动力场上的关联性;根据抽水试验和示踪试验结果论证西郊、东郊与市区泉水之间的水力联系;通过 Piper 三线图结合相关性分析,分析市区泉水和西郊、东郊岩溶水水化学类型、演化环境及相关性。

3 西郊地下水与市区泉水水力联系

3.1 地层结构

从含水层的接触关系与地层时代,可以分析岩溶含水层的连续性。济南市区、西郊与其之间的刘长山一带,东西向上受岩体侵入,在岩体接触带前缘岩溶水径流受阻^[19]。为进一步查明刘长山一带地层结构及富水性,在岩体接触带北侧布设 3 眼钻孔,其中九中(JZ)、十四中(SSZ)钻孔位于刘长山—郎茂山—万灵山一带东侧,槐苑广场(HY)钻孔位于西侧。各孔揭露地层及含水层时代如表 1:

剖面图(图 2)显示济南市区与西郊之间仅存在一条区域性断裂—千佛山断裂,该断裂对趵突泉

域水文地质条件和市区泉水形成有重要作用。据岩溶地下水水流场和示踪试验资料,千佛山断裂在天井峪以北至市区段为透水断层^[7],断裂两侧的地层存在一定错动,但岩溶含水层组连续存在,断裂导水性明显。

炒米店断裂介于千佛山断裂与马山断裂之间,该断裂两侧地层岩性皆为寒武—奥陶纪灰岩,具备良好的透水性和导水性。可见,千佛山断裂以西炒米店组至马家沟群地层连续分布,说明济南市区至西郊为一个大型统一的岩溶含水岩组。

刘长山北侧岩体接触带附近槐苑广场—九中—十四中一带不存在明显阻水构造,在埋深约 350 m 岩体以下发育连续的岩溶含水层组,西侧的炒米店断裂具有良好的导水性,因此市区泉水和西郊岩溶水可通过岩体接触带以下的三山子组含水层发生水力联系。

3.2 抽水试验

通过抽水试验可以查明含水层的富水性和水力

表 1 西部钻孔揭露地层资料统计表

Table 1 Statistics of stratigraphic information of western boreholes

钻孔	第四系/m	辉长岩/m	东黄山组/m	三山子组/m	孔深/m	含水层时代
JZ	0~27.0	27.0~218.0	—	—	218.0	K ₁ vJyc
SSZ	0~36.0	36.0~357.0	357.0~360.0	—	360.0	O ₂ d
HY	0~29.4	29.4~350.0	350.0~397.5	397.5~456.0	456.0	C ₄ O ₁ s
K05	0~24.0	24.0~251.0	—	—	251.0	K ₁ vJyc

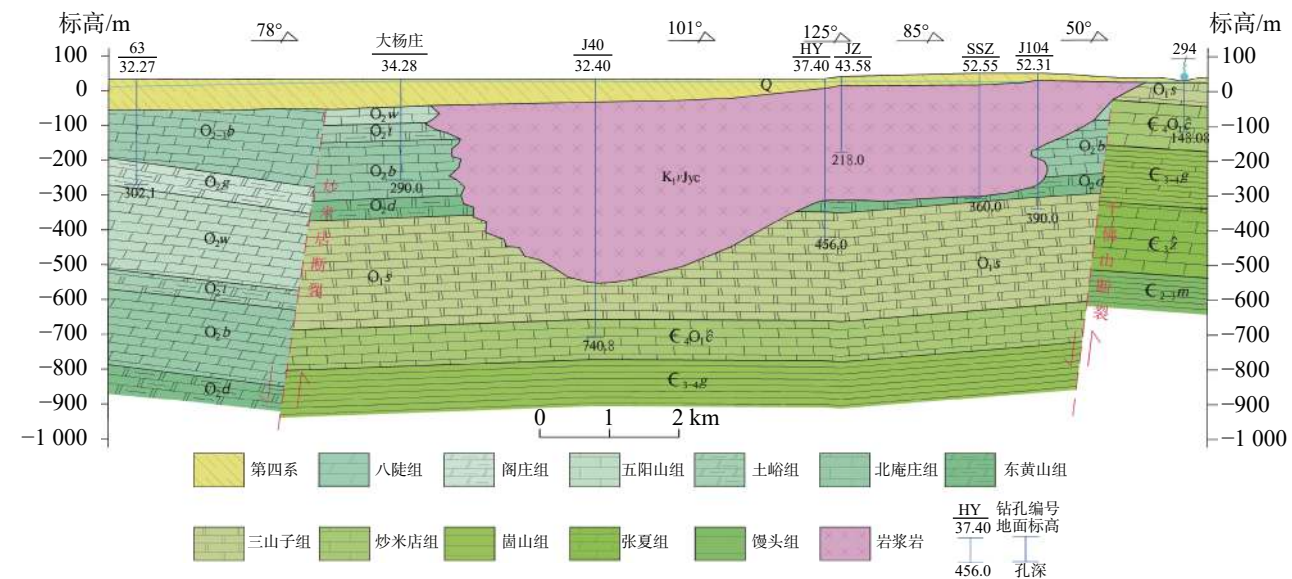


图 2 西郊—市区地质剖面图

Fig. 2 Geological profile from western to urban areas

联系, 据 JZ、SSZ、HY 三眼钻孔不同降深的非稳定流抽水试验资料显示 (见表 2), JZ 钻孔抽水量分别为 $102 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 降深分别为 25.5 m、6.3 m; SSZ 钻孔抽水量分别为 $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $84 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 降深分别为 28.2 m、25.0 m、21.9 m; HY 钻孔抽水量为 $260 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 降深仅 4.0 m。可见刘长山北侧岩体接触带附近地下水富水性较强, 可推断 3 眼钻孔圈定地段为地下水径流通道。

表 2 西部钻孔抽水量及降深结果一览表

Table 2 Results of water pumping and depth reduction of boreholes in western areas

钻孔	抽水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	水位降深/m
JZ	102	25.5
	60	6.3
	90	28.2
SSZ	84	25.0
	70	21.9
HY	260	4.0

3 眼钻孔 JZ、SSZ、HY 由南向北展布, 据揭露地层资料, 该地段侵入岩体厚度约 350 m。JZ 钻孔深 218 m, 未揭穿侵入岩体, 191~206 m、215~218 m 处裂隙发育, 含水层岩性为辉长岩, 单井出水量达 $2\,448 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 富水性较强, 推断该地段侵入岩体垂向裂隙较为发育, 连续性好, 存在垂向上径流通道。另外, 此处岩体厚度约 350 m, 可见垂向裂隙发育段达上百米。

SSZ 钻孔在岩体中钻进时出水量小, 357 m 揭穿岩体时, 涌水量突然增大, 360 m 终孔, 仅揭露东黄山组地层 3 m, 单井出水量达 $2\,160 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙岩溶水。推断岩体与可岩溶岩

接触段为含水层顶板, 岩溶较发育, 可为地下水径流提供运移通道。

HY 钻孔深 456 m, 350 m 揭穿侵入岩体, 397.5 m 揭露三山子组, 钻进至 418 m 时出现初见水位, 岩心显示 418.0~428.8 m、435.5~456.0 m 处岩溶发育, 线岩溶率 10% 以上, 岩溶形态以溶隙、溶孔为主, 局部蜂窝状溶孔发育, 含水层组为三山子组, 单井出水量 $6\,240 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 富水性极强, 推断该地段为岩溶地下水优势径流通道。

另外, JZ 钻孔抽水试验时, 利用其西南侧 500 m 处, 位于刘长山—郎茂山—万灵山一带西侧的 K05 钻孔作为水位观测井, 该钻孔深 251 m, 含水层岩性为辉长岩, 单井出水量达 $515 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。抽水试验 S-t 曲线 (图 3) 表明抽水孔水位下降迅速, 稳定时间短, 呈现“快升快降”的特点。观测井在 1.5 h 后水位开始下降, 抽水停止 2 h 后水位恢复, 观测井恢复水位反应迅速, 说明 JZ、K05 钻孔一带岩体中层状裂隙发育均匀, 水平径流通畅。

结合 3 眼钻孔钻进出水、漏水情况以及抽水试验资料, 说明槐苑广场—九中—十四中一带由南向北含水层顶板埋深逐渐加深; 岩体中水平裂隙、垂向裂隙均发育, 裂隙水可接受下伏岩溶水岩组顶托补给, 整体富水性较好, 地下水径流通畅。

3.3 水动力场

从地貌条件分析, 刘长山、郎茂山、万灵山三个低丘呈相对孤立南北向分布, 形成局部地表分水岭, 但两侧灰岩地区地下水通过岩溶裂隙保持联通。等水位线图 (图 4) 表明刘长山—郎茂山—万灵山一带两侧地下水水位没有出现突变, 等水位线连续平缓、水位大致相同, 地下水流场不存在异常。市区泉水

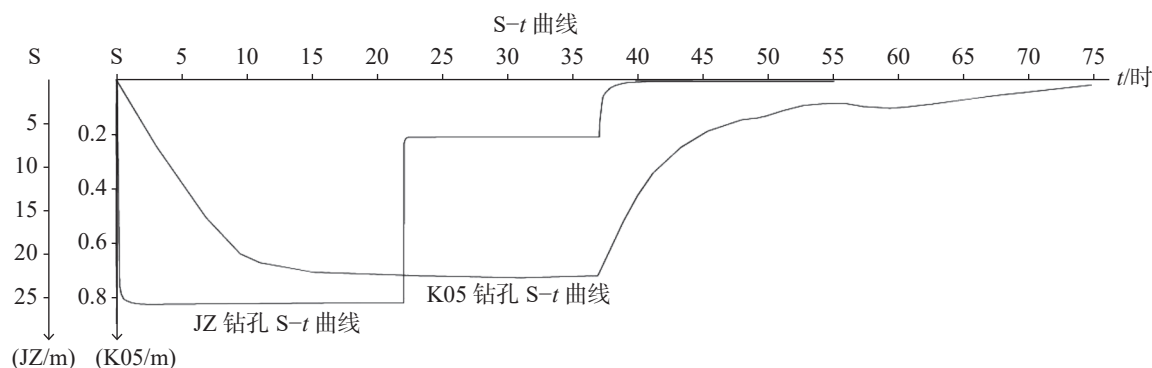


图 3 JZ 和 K05 钻孔抽水试验 S-t 曲线

Fig. 3 S-t curve of pumping test in JZ and K05 boreholes

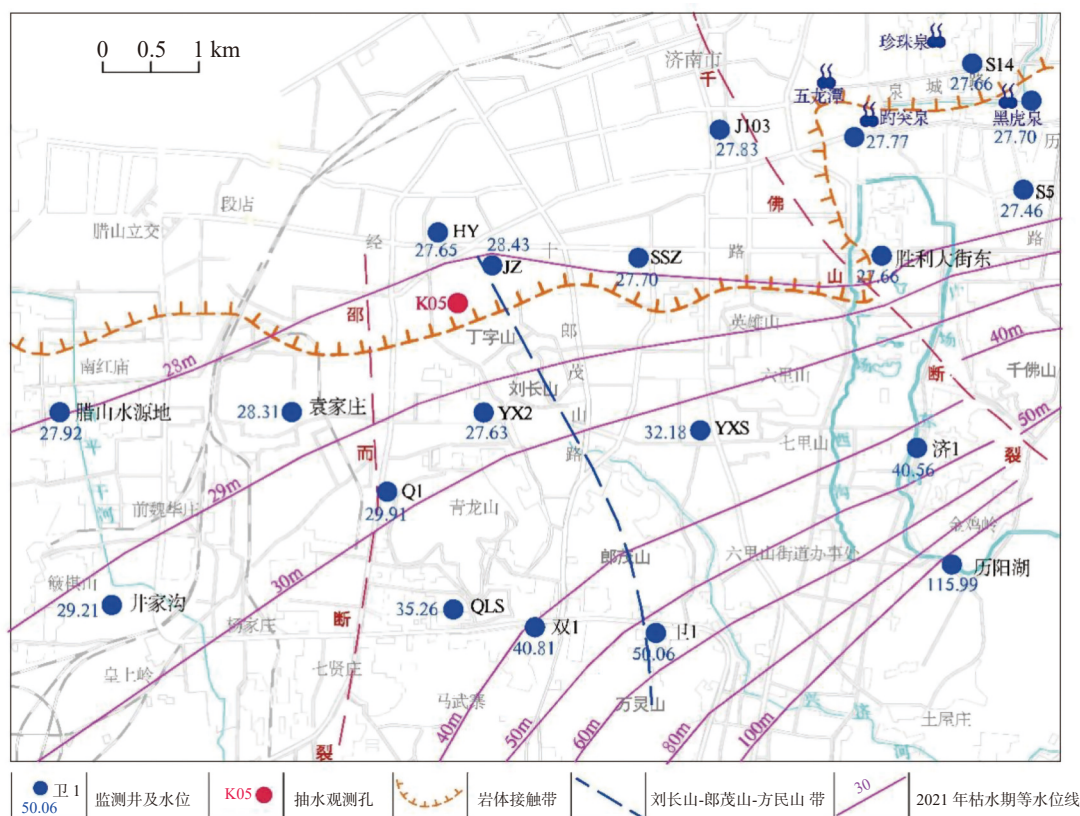


图 4 西郊—市区岩溶等水位线

Fig. 4 Contours of kast water from western to urban areas

和西郊岩溶水在水动力场上具有联系。

JZ、SSZ、HY 钻孔和趵突泉水位动态曲线(图5)表明,市区与西郊岩溶水水位变化规律基本一致,呈

现出“同升同降”的趋势,市区至西郊一带岩溶水连通性较好,总体趋势西郊岩溶水水位高于市区泉水水位。

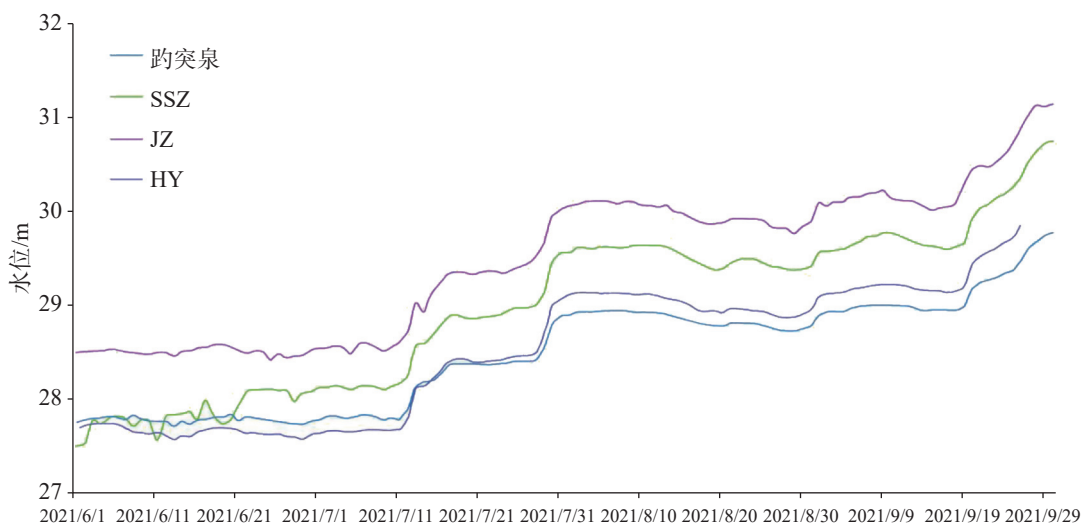


图 5 西郊—市区一带水位动态曲线

Fig. 5 Dynamic curve of water level from western to urban areas

3.4 示踪试验

为查明济南岩体与灰岩接触带地下水连通情况,

于 2021 年 2 月 21 日开展示踪试验。其中 JZ 钻孔作为投源井, 投放示踪剂钼酸铵 50 kg, SSZ 钻孔作为

观测井。

实验前对投源井和观测井水位进行观测,并化验示踪剂背景值。JZ 钻孔水位 28.76 m, SSZ 钻孔水位 27.51 m, SSZ 钻孔 Mo 离子背景值为 $0.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。3 月 10 日测到 SSZ 钻孔 Mo 离子浓度呈上升趋势,

3 月 15 日 Mo 离子浓度达到监测峰值 $0.50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 约为背景值 2.5 倍, 然后呈下降趋势, 并逐渐趋于稳定。该示踪试验证明九中—十四中之间存在水平径流通道, 地下水通过辉长岩裂隙发生水力联系(见图 6)。

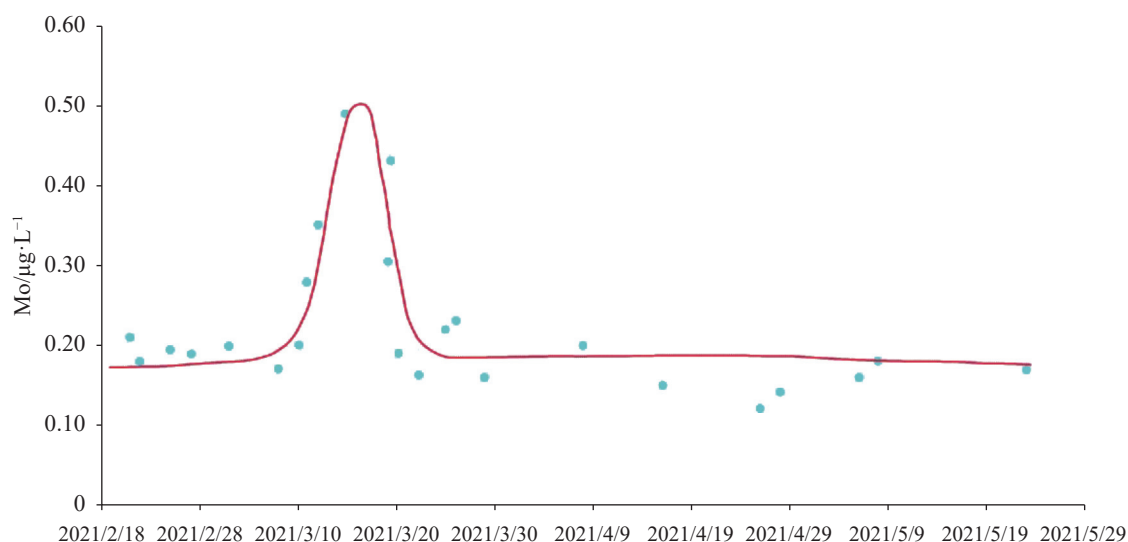


图 6 十四中 Mo 离子浓度监测值

Fig. 6 Monitoring value of Mo ion concentration in No. 14 Middle School

3.5 水化学分析

利用 Piper 三线图, 结合水文地质条件, 可分析地下水化学成分的演变规律。图 7、图 8 为济南市区、西郊岩溶水枯水期和丰水期的水化学 Piper 三线图, 市区趵突泉、黑虎泉等泉水与西郊岩溶水均落在

相同区域, 落点区域碱土金属离子大于碱金属离子, 弱酸根大于强酸根, 碳酸盐硬度大于 50%, 表明地下水化学特征为碱土金属离子和弱酸根为主。

HY 钻孔含水层为三山子组, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 与市区泉水含水层和水化学类型相同。

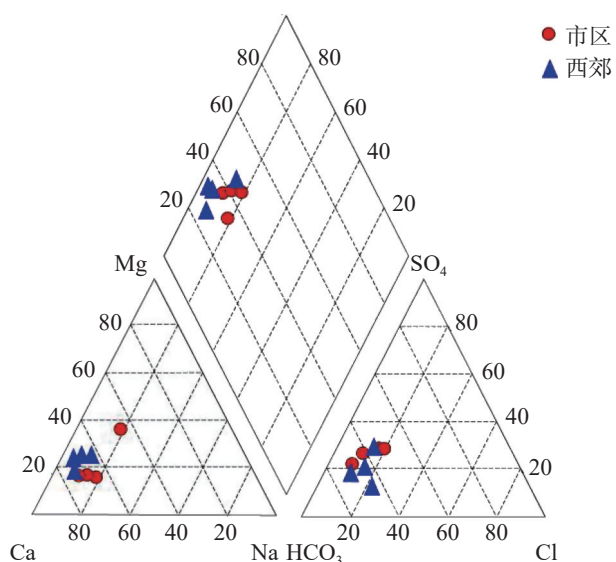


图 7 市区和西郊水化学类型三线图(2022 年枯水期)

Fig. 7 Piper diagram of hydrochemistry in urban and western areas in the dry period in 2022

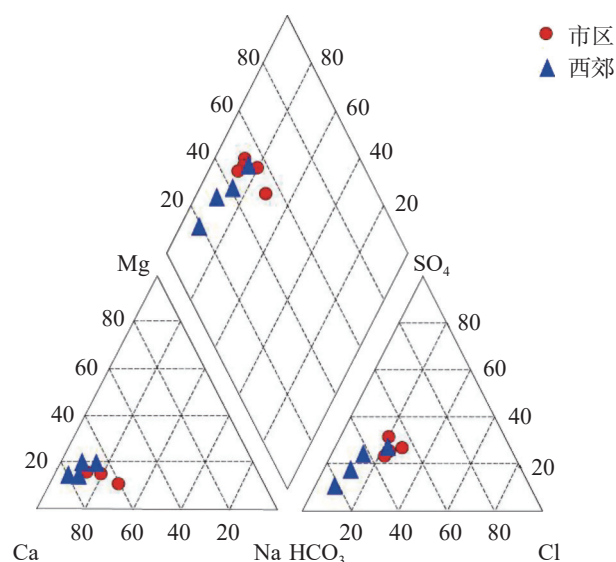


图 8 市区和西郊水化学类型三线图(2022 年丰水期)

Fig. 8 Piper diagram of hydrochemistry in urban and western areas in the wet period in 2022

JZ 钻孔和 SSZ 钻孔地下水主要来自辉长岩裂隙导通的岩溶水,地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。西郊其它钻孔(KA3、KA5、G1, 图 1)岩溶水含水层为马家沟群,与三山子组含水层上下连通,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。市区泉水和西郊岩溶水在水化学类型上具有一致性,表明市区和西郊岩溶水具有相同的演化环境。

相关性分析可以揭示地下水水化学组分相似相异性,分析不同离子是否具有同一来源。本次对 JZ、SSZ、HY 钻孔和西郊(长清、桥子李、KA3、G1、KA5)及趵突泉的主要化学指标进行相关性分析,各取样点水样分析结果见表 3,采样点分布见图 1。

利用 SPSS 软件中加权线性回归模型进行相关

性分析(表 4),JZ、SSZ 钻孔与市区及西郊钻孔水样的主要化学指标相关性均大于 0.84,表现出明显的正相关关系,说明 JZ、SSZ 钻孔中的裂隙水与岩溶水相关性密切,槐苑广场一九中一十四中一带存在垂向径流通道,上方侵入岩体内的裂隙水接受下方含水岩组内岩溶水的承压补给。

4 东郊地下水与市区泉水水力联系

4.1 地层结构

据以往的水文地质工作,济南东郊岩体减弱了市区泉水与东郊地下水之间的水力联系^[18],为进一步查明市区与东郊之间燕翅山—七里河一带侵入岩

表 3 水样分析结果统计表/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 3 Analysis statistics of water samples/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

位置	编号	pH	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-
市区	趵突泉	7.60	28.70	131.00	21.20	1.22	59.80	109.00	292.00	46.10
市区— 西郊	JZ	8.14	20.90	157.00	22.90	0.65	53.10	185.00	277.00	77.10
	HY	7.54	0.22	16.40	0.99	2.24	7.49	7.78	36.50	0.73
	SSZ	7.84	78.30	160.00	20.70	0.58	132.00	196.00	310.00	58.80
	长清	7.85	20.90	104.00	16.50	1.35	36.50	84.60	259.00	27.50
西郊	桥子李	8.08	11.70	71.90	11.80	0.89	23.80	44.40	206.00	18.70
	KA3	7.78	13.40	97.30	18.40	0.72	53.70	34.80	268.00	42.50
	G1	8.10	9.93	63.70	12.50	0.78	22.60	31.20	195.00	13.20
	KA5	7.58	15.20	114.00	17.40	1.08	34.30	54.70	243.00	102.00
东郊	NWZ	7.56	26.40	139.00	24.70	0.98	61.80	112.00	295.00	51.60
	ZD	7.60	32.20	132.00	23.20	0.56	64.70	108.00	277.60	45.30
	SD	7.60	30.10	109.00	20.60	1.16	60.60	107.00	265.31	36.00

表 4 市区与东郊、西郊岩溶水相关系数矩阵
Table 4 Correlation matrices of groundwater between the urban area and eastern and western areas

	趵突泉	JZ	HY	SSZ	长清	桥子李	KA3	G1	KA5	NWZ	ZD	SD
趵突泉	1.000 0											
JZ	0.954 9	1.000 0										
HY	0.945 6	0.848 0	1.000 0									
SSZ	0.949 1	0.950 6	0.845 1	1.000 0								
长清	0.996 4	0.938 6	0.957 7	0.927 6	1.000 0							
桥子李	0.983 4	0.895 8	0.968 4	0.886 4	0.993 1	1.000 0						
KA3	0.966 5	0.856 9	0.956 9	0.861 2	0.971 5	0.987 8	1.000 0					
G1	0.971 6	0.866 7	0.970 0	0.863 7	0.984 3	0.998 0	0.990 7	1.000 0				
KA5	0.940 6	0.888 7	0.878 8	0.832 3	0.934 9	0.940 4	0.955 2	0.931 8	1.000 0			
NWZ	0.999 5	0.958 8	0.942 8	0.947 7	0.994 5	0.980 5	0.965 0	0.968 0	0.944 9	1.000 0		
ZD	0.999 3	0.956 5	0.941 3	0.956 5	0.993 5	0.978 1	0.962 3	0.965 7	0.935 9	0.999 2	1.000 0	
SD	0.997 7	0.953 4	0.939 9	0.959 9	0.994 3	0.979 2	0.958 5	0.967 1	0.921 8	0.995 9	0.997 2	1.000 0

接触带的地层情况,在济南东部布设 2 眼钻孔,山大 (SD) 钻孔位于燕翅山—七里河一带的西侧,祝甸 (ZD) 钻孔位于东侧。各孔揭露岩性如表 5:

表 5 东部钻孔揭露地层资料统计表
Table 5 Statistics of stratigraphic information of eastern boreholes

钻孔	第四系/m	辉长岩/m	东黄山组/m	三山子组/m	孔深/m	含水层时代
SD	0~14.0	—	14.0~484.5	484.5~511.0	511.0	$\text{C}_4\text{O}_3\text{s}$
ZD	0~19.1	19.1~200.3	200.3~536.1	—	536.1	O_2b

剖面图(图 9)显示市区与东郊之间存在文化桥断裂,该断裂西盘奥陶纪三山子组和寒武纪炒米店组地层抬升,东盘下落,断层切割岩浆岩体。断裂以东燕翅山—七里河—全福庄一带有南北向岩浆岩舌状侵入岩,岩体厚度自西南向东北方向呈现增加趋势,一定程度上减弱了市区泉水和东郊岩溶水的水力联系。虽然东郊一带岩体厚度大,灰岩顶板埋深

增加,但文化桥断裂并未形成阻水构造,两侧的含水层错动较小,同属炒米店组—马家沟群大型含水岩组,为透水断裂。文化桥断裂以东、姚家以南岩溶含水层分布连续稳定,山大洪楼校区以北在埋深 485 m 处揭露连续的岩溶含水层,说明市区与东郊具有统一的含水系统,市区泉水和东郊岩溶水可通过侵入岩体接触带以下的三山子组含水层发生水力联系。

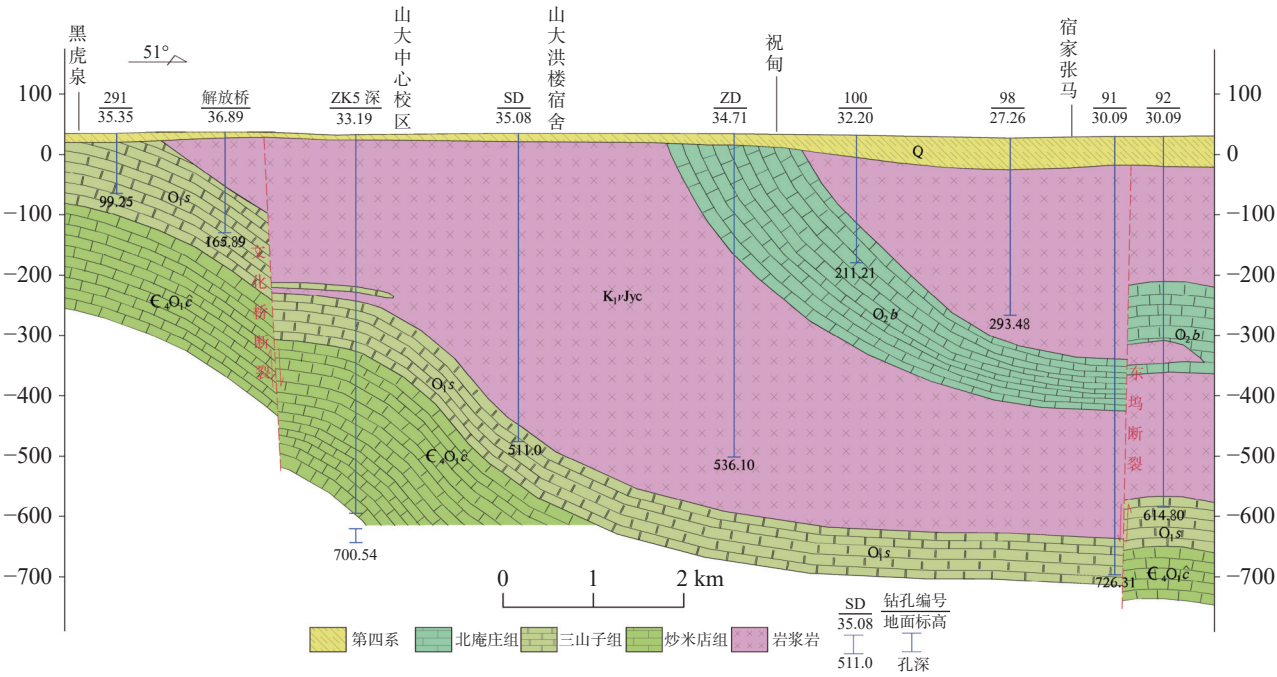


图 9 市区—东郊地质剖面图
Fig. 9 Geological profile from urban to eastern areas

4.2 抽水试验

对 SD、ZD 两眼钻孔进行不同降深的非稳定流抽水试验(表 6)。SD 钻孔抽水量分别为 90 m³·h⁻¹、72 m³·h⁻¹ 时,水位降深分别为 23.9 m、16.3 m; ZD 钻孔抽水量分别为 190 m³·h⁻¹、124 m³·h⁻¹、64 m³·h⁻¹ 时,水位降深分别为 8.5 m、5.0 m、2.5 m。

SD 钻孔在岩体中钻进时出水量小,484.5 m 揭

穿侵入岩至三山子组后涌水量增大,孔深 511.0 m。在 497.8~498.4 m、499.6~499.8 m、507.7~508.3 m 处裂隙岩溶发育,局部呈现蜂窝状溶蚀,含水层为三山子组,单井出水量为 2 160 m³·d⁻¹,地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙岩溶水。推断岩体与可岩溶岩接触段为含水层顶板,岩溶较发育,可为地下水径流提供运移通道。

表 6 东部钻孔抽水量及降深结果一览表
Table 6 Results of water pumping and depth reduction of boreholes in eastern areas

钻孔	抽水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	水位降深/m
SD	90	23.9
	72	16.3
	190	8.5
ZD	124	5.0
	64	2.5

ZD 钻孔孔深 536.1 m, 19.1~200.3 m 为北庵庄组, 200.3 m 以下终孔至侵入岩体。钻进至 52.4 m 出现初见水位, 岩心显示 52.4~78.5 m、80.1~83.1 m、87.6~91.8 m 处岩溶发育, 线岩溶率 11% 以上, 岩溶形态以蜂窝状溶蚀、垂直裂隙为主, 含水层为北庵庄组, 单井出水量可达 $4\,560\,\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙岩溶水, 富水性极强。

综合 2 眼钻孔地层分布、漏水情况及抽水试验资料, 说明燕翅山—七里河一带由南向北岩体逐渐

增厚, 含水层顶板埋深增加, 岩体中裂隙发育, 济南东部地层整体富水性较好, 地下水径流通畅。

4.3 水动力场

受济南单斜地层的影响, 自然条件下济南岩溶水位整体上呈现南高北低的特点。市区与东郊之间的燕翅山—七里河一带岩浆岩体发育, 使市区和东郊两侧的水力联系变弱, 来自南部的岩溶水受到岩浆岩体的阻挡, 地下水向两侧流动, 一部分流向西北方向在济南市区以泉水出流的形式排泄, 一部分流向东北方向在济南东郊以水源地、铁矿排水等常态化开采形式排泄(图 10)。结合 2016 年 9 月大辛河上游示踪试验, 证明燕翅山—七里河一带岩浆岩体发育, 在岩浆岩发育区形成局部地下分水岭, 来自南部的岩溶水受其阻挡一部分向北补给东郊牛旺庄水厂漏斗区, 一部分向西北补给四大泉群^[23]。

但济南市区和东郊属于同源补给, 如果东郊过量开采岩溶水, 可能会袭夺南部山区流向市区的部

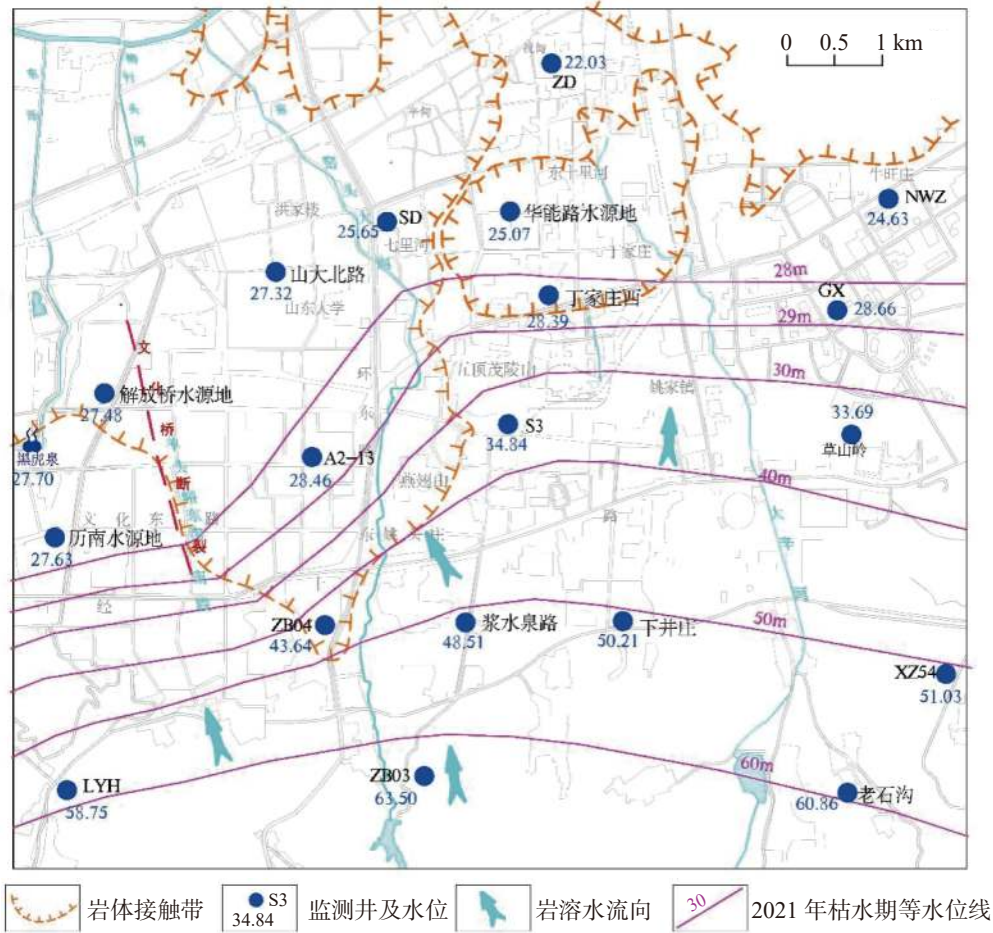


图 10 市区—东郊岩溶等水位线
Fig. 10 Contours of kast water from urban to eastern areas

分岩溶水,对市区泉水产生一定影响。

4.4 水化学分析

济南市区、东郊岩溶水枯水期和丰水期的水化学 Piper 三线图(图 11, 图 12)显示,市区趵突泉、黑虎泉等泉水与东郊岩溶水均落在相同区域,落点区域碱土金属离子大于碱金属离子,弱酸根略高于强酸根,碳酸盐硬度大于 50%,表明地下水化学特征为碱土金属离子和弱酸根为主。

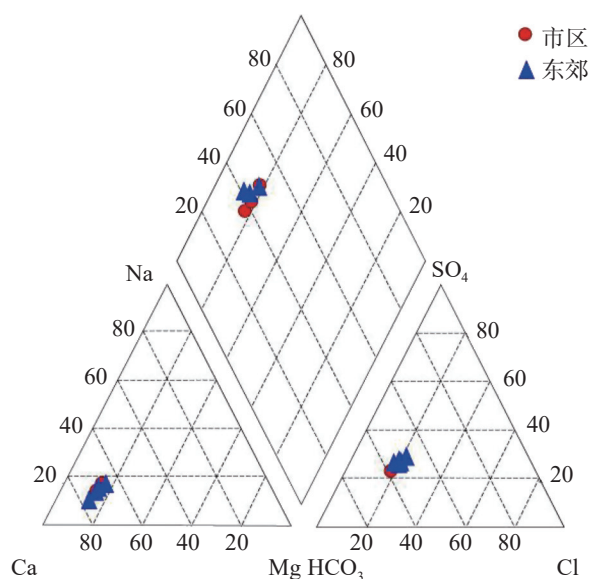


图 11 市区和东郊水化学类型三线图(2022 年枯水期)

Fig. 11 Piper diagram of hydrochemistry in urban and eastern areas in the dry period in 2022

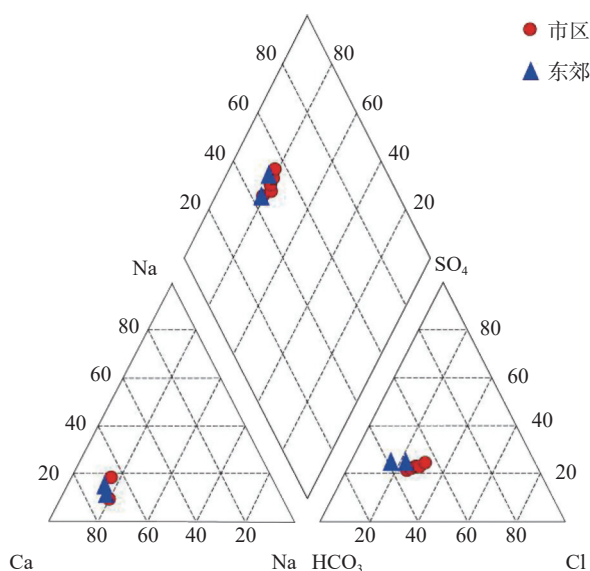


图 12 市区和东郊水化学类型三线图(2022 年丰水期)

Fig. 12 Piper diagram of hydrochemistry in urban and eastern areas in the wet period in 2022

SD 钻孔含水层为三山子组地层,地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,与市区泉水含水层和水化学类型相同。东郊其他钻孔(NWZ、ZF、ZD, 图 1)岩溶含水层为马家沟群,与三山子组含水层上下连通,化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,市区泉水和东郊岩溶水在水化学类型上具有一致性,表明市区和东郊岩溶水具有相同的演化环境。

对东郊及市区岩溶水的主要化学指标进行相关性分析(表 4)。NWZ、SD、ZD 钻孔与市区趵突泉岩溶水的主要化学指标相关性大于 0.95,表现出明显的正相关关系,说明东郊与市区岩溶水具有同源性。

地下水化学组分特征是在特定地下水环境中水-岩相互作用的结果,地下水的水动力特征、氧化还原环境及含水介质组分等是影响水岩相互作用的重要因素。研究岩溶水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等常量离子组分的含量分布特征,在一定程度上可以了解岩溶水的水化特征和水文地球化学环境。图 13a 为市区与西郊、东郊岩溶水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 关系比值图, $[\gamma(\text{Ca}^{2+})+\gamma(\text{Mg}^{2+})]/[\gamma(\text{SO}_4^{2-})+\gamma(\text{HCO}_3^-)]$ 比值大于 1; 图 13b 为 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 关系比值图, $[\gamma(\text{Ca}^{2+})-\gamma(\text{SO}_4^{2-})]/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 比值大于 0.5 小于 1; 图 13c 为 Na^+ 、 K^+ 与 Cl^- 关系比值图, $[\gamma(\text{Na}^+)+\gamma(\text{K}^+)]/\gamma(\text{Cl}^-)$ 比值低于 1, 说明市区和西郊、东郊岩溶水水化学组分形成主要作用为碳酸盐岩的溶解,三者岩溶水具有相似的地下水环境,存在一定水力联系。

5 讨论

市区泉水与东郊、西郊的水力联系一直在探究之中,尤其对于长期存在的“一碗水,两碗水”问题,即刘长山—郎茂山—万灵山一带是否为市区和西郊地下边界的争论一直众说纷纭^[18-23]。据含水系统理论,趵突泉泉域为一个大型岩溶含水系统,虽市区与西郊之间发育千佛山断裂、炒米店断裂,市区与东郊之间存在文化桥断裂,但三处近南北向区域性断裂局部具良好的导水性,未形成阻水地质构造。市区与西郊、东郊之间浅部均发育弱透水辉长岩体,但据岩体接触带附近钻孔揭露的地层可知,市区与西郊、东郊的岩溶含水层组在岩体接触带以下连续存在,市区泉水和西郊岩溶水、东郊岩溶水据此发生水力联系,这与董咏梅等^[18-21]的观点一致。

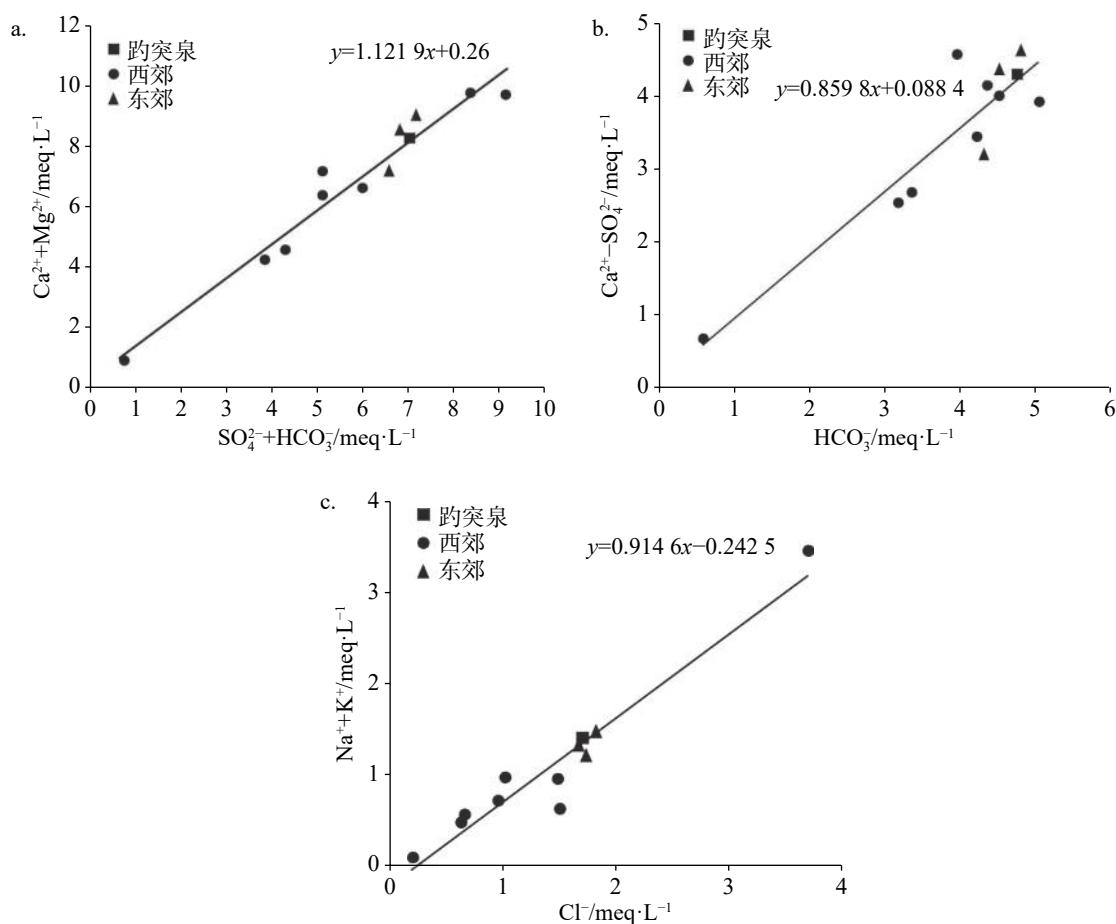


图 13 济南市区与东郊、西郊岩溶地下水离子比值相关图

Fig. 13 Relationships of the selected ions in karst groundwater between urban and eastern and western areas

抽水试验和示踪试验^[24]查明地下水之间的联系为传统方法,董咏梅等^[18]对 2003 年 6 月济西抽水试验进行分析,认为市区泉水与西部地下水存在密切的水力联系。此类大规模抽水试验和示踪试验具有成本高、周期长的缺点,且随着济南市封井节流、人工补源等措施的施行,用传统方法分析地下水联系也越来越难实现。本次仅采用市区与西郊、东郊之间 5 眼钻孔的抽水试验资料进行分析,研究结果具有一定局限性,但也发现岩体接触带中裂隙较发育的情况,特别是碳酸盐岩与辉长岩体接触带九中—十四中附近,裂隙发育段垂向长度可达上百米,巨厚的岩体使下伏岩溶水具高承压性,是岩体接触带附近裂隙、溶隙、溶孔发育的动力条件,可推断岩体接触带附近存在岩溶强发育段,为岩溶水径流通道。高承压岩溶水在盖层较薄地带涌出地表,市区泉水“腾空”喷出,可见九中—十四中接触带附近的岩体在市区泉水与西郊岩溶水之间联系发挥正效应作用。槐苑广场一带 418 m 左右才揭露岩溶含水层顶板,但

富水性极强,可见侵入岩体下岩溶水径流通畅,连续岩溶含水层组分布,可作为判断二者具有水力联系依据之一。

从水动力场角度分析市区泉水位与东郊、西郊岩溶水位关联性的方法有很多,张郑贤等^[20]从水位波动关联度角度分析市区与西部地下水位的规律,认为市区与西部地下水系统在统计学上存在极强的联系;齐欢等^[21]采用了经验正交函数法,得出结论趵突泉泉域地下水位动态具有高度一致性。文中仅从等水位线平面形态,并结合水位动态曲线变化趋势分析,认为西郊岩溶水与市区泉水水位动态特征基本一致,二者具统一水动力场;东郊与市区之间受燕翅山北部一带舌状岩浆岩体的影响,两侧流场特征存在差异,但属同源补给,若东郊岩溶水过量开采,则会部分袭夺本应流向市区的岩溶水,对市区泉水喷涌产生一定的负效应。

利用水化学方法研究不同地下水的来源、特征及演化环境是水文地质领域的研究重点。本文利用

Piper 三线图结合 SPSS 软件进行相关性分析,并研究了岩溶水中常量离子组分的含量分布特征,可以分析不同来源地下水的水化学类型、相关性及演化环境。经分析,市区泉水与东郊、西郊岩溶水的水化学类型一致,水样化学指标相关性密切,这与高帅^[1]等人的研究结论吻合。

市区泉流量和东郊、西郊水源地开采量相互关系动态分析也是研究市区泉水与东郊、西郊岩溶水水力联系较好的方法。自 2000 年以后,市区、西郊、东郊的水源地逐步关闭,并实施了生态补源、地表水置换地下水源等措施,此研究方法受限。此外,泉水位还与大气降水有密切的关系,泉水动态演变受自然和人为因素多重影响,随着城市建设不断扩张,济南保泉工作日益严峻,量化济南南部、西郊、东郊地下水与市区泉水之间水通量研究,查清不同来源方向岩溶水对市区泉水的补给比例,是保持泉水持续喷涌工作需攻关的难题之一,可更科学指导地下水开发利用和优化生态补源,服务生态文明建设。

6 结 论

(1)从地层角度分析,市区与西郊之间千佛山断裂和炒米店断裂均透水,刘长山北侧碳酸盐岩与辉长岩体接触带槐苑广场一九中—十四中附近一带不存在明显阻水构造,埋深约 350 m 岩体以下发育连续岩溶含水层组,市区泉水和西郊岩溶水可通过此含水层发生水力联系;市区与东郊之间燕翅山—七里河一带舌状侵入岩体对市区泉水和东郊岩溶水起一定阻挡作用,但文化桥断裂为透水断裂,断裂以东、姚家以南岩溶含水层分布连续稳定,市区泉水和东郊之间岩溶水以此产生水力联系。

(2)西部钻孔抽水试验说明九中—十四中一带辉长岩体中存在垂向径流通道,上方岩体内的裂隙水接受下伏岩溶水顶托补给,示踪试验证明九中—十四中之间存在水平径流通道,岩体中水平裂隙、垂向裂隙均发育,西部地区整体富水性较好,地下水径流通畅;东部钻孔抽水试验说明燕翅山—七里河一带侵入岩体中裂隙较发育,东部地层整体富水性较好。

(3)市区与西郊之间刘长山—郎茂山—万灵山一带两侧岩溶水等水位线连续平缓,地下水流场不

存在异常,西郊岩溶水与市区泉水水位动态变化规律基本一致;东郊与市区之间受燕翅山—七里河一带岩浆岩体的影响,两侧水动力场特征存在差异,市区与东郊岩溶水属同源补给,若东郊过量开采岩溶水,则会袭夺南部山区径流补给市区的部分岩溶水,对泉水持续喷涌造成一定影响。

(4)市区泉水与东郊、西郊岩溶水的水化学类型一致,水化学指标相关性密切,水化学组分形成主要作用同为碳酸盐岩的溶解,市区与东郊、西郊岩溶水具有相同的演化环境。

参考文献

- [1] 孙斌,徐军祥,彭玉明,林广奇. 济南城市建设与泉水生态环境保护协调性评价[J]. 人民黄河, 2017, 39(6): 77-81.
SUN Bin, XU Junxiang, PENG Yuming, LIN Guangqi. Coordination assessment of urban construction and ecological environment protection of spring in Jinan[J]. Yellow River, 2017, 39(6): 77-81.
- [2] 马良,王晓军,吴恩江,邢金龙,姜广辉. 典型济南泉域强渗漏带的保护开发与评价[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(3): 103-111.
MA Liang, WANG Xiaojun, WU Enjiang, XING Jinlong, JIANG Guanghui. Protective exploitation and evaluation of a typical strong seepage zone in Jinan, the city of springs[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(3): 103-111.
- [3] 孙斌,高文峰,魏月,雷炳霄,毕栋威. 城市扩展对趵突泉泉域直接补给区保泉能力影响[J]. 山东国土资源, 2020, 36(4): 55-60.
SUN Bin, GAO Wenfeng, WEI Yue, LEI Bingxiao, BI Dongwei. Influence of urban expansion on spring conservation capacity of Baotu Spring direct recharge area[J]. Shandong Land and Resources, 2020, 36(4): 55-60.
- [4] 齐欢,秦品瑞,丁冠涛. 基于GMS的济南市人工补源影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 98-105.
QI Huan, QIN Pinrui, DING Guantao. Impact of artificial recharge in Jinan City based on GMS[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 98-105.
- [5] 李凤丽,王维平,黄强,李锦超,曲士松,杜鹏. 济南市玉符河岩溶含水层多水源回灌补源水量优化方案[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 17-26.
LI Fengli, WANG Weiping, HUANG Qiang, LI Jinchao, QU Shisong, DU Juan. Water quantity optimal schemes of the karst aquifer recharge with multi-source water at the Yufuhe river, Jinan[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 17-26.
- [6] 李凤丽,王维平,徐巧艺,吴深,张郑贤. 济南市玉符河多水源回灌岩溶水水质风险评价[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 751-758.
LI Fengli, WANG Weiping, XU Qiaoyi, WU Shen, ZHANG Zhengxian. Assessment of water quality risk from karst aquifer

- recharge with multi-source water in the Yufuhe river, Jinan[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(5): 751-758.
- [7] 孙斌, 邢立亭, 彭玉明, 李常锁. 济南十大泉群特征、形成模式及水循环差异性浅析[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 409-419.
- SUN Bin, XING Liting, PENG Yuming, LI Changsuo. Characteristics, formation models and water cycle differences of ten major spring groups in Jinan City[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 409-419.
- [8] 迟光耀, 邢立亭, 主恒祥, 侯新宇, 相华, 邢学睿. 大气降水与济南泉水动态变化的定量关系研究[J]. *地下水*, 2017, 39(1): 8-11.
- CHI Guangyao, XING Liting, ZHU Hengxiang, HOU Xinyu, XIANG Hua, XING Xuerui. The study of quantitative relationship between the spring water and the dynamic change of the atmospheric precipitation in Jinan[J]. *Ground Water*, 2017, 39(1): 8-11.
- [9] 周娟, 邢立亭, 滕朝霞, 王立艳. 制约济南岩溶大泉持续喷涌的主因素阈值研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2015(3): 146-156.
- ZHOU Juan, XING Liting, TENG Zhaoxia, WANG Liyan. Study on the threshold of main factors restricting Jinan large karst spring spewing[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2015(3): 146-156.
- [10] 毛玉洁, 邢立亭, 陈良免, 李常锁, 王立艳, 赵振华, 李传磊, 宿庆伟. 济南四大泉群水化学特征及其成因分析[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(5): 1042-1056.
- MAO Yujie, XING Liting, CHEN Huanliang, LI Changsuo, WANG Liyan, ZHAO Zhenhua, LI Chuanlei, SU Qingwei. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of the four spring groups in Jinan[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(5): 1042-1056.
- [11] 高帅, 李常锁, 贾超, 孙斌, 张海林, 逢伟. 济南趵突泉泉域岩溶水化学特征时空差异性研究[J]. *地质学报*, 2019, 93(Suppl.1): 61-70.
- GAO Shuai, LI Changsuo, JIA Chao, SUN Bin, ZHANG Hailin, PANG Wei. Spatiotemporal difference study of karst hydrochemical characteristics in the Baotu Spring area of Jinan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(Suppl.1): 61-70.
- [12] 孙斌, 邢立亭. 济南市附近地下水化学特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 2010(11): 33-37, 40.
- SUN Bin, XING Liting. Research on groundwater chemical characteristics in urban areas in Jinan[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(11): 33-37, 40.
- [13] 成世才, 卢兆群, 张强, 侯海巖, 徐建. 济南西部地区地下水水化学特征及演变机理浅析[J]. *山东国土资源*, 2017, 33(1): 55-58.
- CHENG Shicai, LU Zhaoqun, ZHANG Qiang, HOU Haidian, XU Jian. Research on hydrochemical characteristics and evolution of groundwater sources in west of Jinan City[J]. *Shandong Land and Resources*, 2017, 33(1): 55-58.
- [14] 孙斌, 彭玉明. 济南泉域边界条件、水循环特征及水环境为题[J]. *中国岩溶*, 2014, 33(3): 272-279.
- SUN Bin, PENG Yuming. Boundary condition, water cycle and water environment changes in the Jinan spring region[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(3): 272-279.
- [15] 孙斌, 彭玉明, 李常锁, 林广奇. 济南岩溶水系统划分及典型泉域水力联系[J]. *山东国土资源*, 2016, 32(10): 31-34.
- SUN Bin, PENG Yuming, LI Changsuo, LIN Guangqi. Division of karst water system and hydraulic connection of typical spring fields in Jinan City[J]. *Shandong Land and Resources*, 2016, 32(10): 31-34.
- [16] 王鑫, 武朝军, 谢松彬, 李岩, 郑灿政, 周雨阳. 济南千佛山断裂与文化桥断裂导水透水性研究[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(4): 50-55.
- WANG Xin, WU Chaojun, XIE Songbin, LI Yan, ZHENG Canzheng, ZHOU Yuyang. Study on water conductivity and permeability of Qianfoshan fault and Wenhuaqiao fault in Jinan City[J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(4): 50-55.
- [17] 奚德荫, 孙斌, 秦品瑞. 济南泉水研究[M]. 济南: 济南出版社, 2017: 148.
- [18] 董咏梅, 苏光星, 李占华. 从济西抽水试验探济南泉域西边界[J]. *水资源保护*, 2004(3): 58-59.
- [19] 侯新文, 邢立亭, 孙蓓蓓, 李常锁. 济南市岩溶水系统分级及市区与东西郊的水力联系[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(4): 300-305.
- HOU Xinwen, XING Liting, SUN Beibei, LI Changsuo. Karst water system classification in Jinan and the hydraulic connection between downtown and east and west suburbs[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2014, 28(4): 300-305.
- [20] 张郑贤, 王维平, 相华, 盖燕如, 李凤丽. 基于水位波动关联度的济南西部与济南泉群地下水关系研究[J]. *水文*, 2018, 38(6): 31-36, 96.
- ZHANG Zhengxian, WANG Weiping, XIANG Hua, GAI Yanru, LI Fengli. Relationship between groundwater in western Jinan and Jinan spring area based on correlation degree of water table fluctuation[J]. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(6): 31-36, 96.
- [21] 齐欢. 基于经验正交函数法的趵突泉泉域地下水位动态分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(19): 52-57.
- QI Huan. Dynamic analysis of groundwater level in Baotu Spring region based on EOF method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(19): 52-57.
- [22] 邹连文, 商广宇, 张明泉, 宋秀英, 李森. 济南泉水来源区域探讨[J]. *中国水利*, 2008(7): 77-79.
- ZOU Lianwen, SHANG Guangyu, ZHANG Mingquan, SONG Xiuying, LI Sen. Probe into water-source areas of Jinan springs[J]. *China Water Resources*, 2008(7): 77-79.
- [23] 杨增元, 商昭诚, 商广宇, 张子森. 济南泉水与附近水文地质关系研究[J]. *水资源研究*, 2016, 5(6): 613-619.
- YANG Zengyuan, SHANG Zhaocheng, SHANG Guangyu, ZHANG Zisen. Protection of Jinan spring water and relation

- with hydrogeology at adjacent watershed[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2016, 5(6): 613-619.
- [24] 丁冠涛, 刘玉仙, 曹光明, 齐欢. 济南东郊大辛河渗漏段地下水示踪试验与分析[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(2): 41-48.

DING Guantao, LIU Yuxian, CAO Guangming, QI Huan. Groundwater trace test and analysis on leakage area in Daxinhe river in eastern Jinan City[J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(2): 41-48.

Study on the hydraulic connection between downtown and eastern and western suburbs in Jinan

YU Lingqin^{1,2}, LIN Guangqi^{1,2}, LIU Yuanyuan³, QI Huan^{1,2}, MENG Qingzhai^{1,2},
MA Hekuan^{1,2}, JIANG Lulu^{1,2}, LIU Chunwei^{1,2}

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan, Shandong 250014, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China; 3. Shandong Polytechnic College, Jining, Shandong 272067, China)

Abstract In order to identify the hydraulic connection between the spring water in Jinan city and the karst water in the western and eastern suburbs, we conducted a study to analyze the hydraulic connection between the three from the perspective of stratigraphic structure and hydrodynamic field, combining with the results of pumping tests and tracer tests. Meanwhile, we also performed hydrochemical and correlation analyses.

The results show that from the perspective of stratigraphic structure, there is no obvious water-blocking structure in the area of Huaiyuan Square-NO.9 Middle School-NO.14 Middle School near the rock contact zone on the north side of Liuchang mountain between downtown and western suburbs, and a continuous karst aquifer group is developed below the rock body at a burial depth of about 350 m. The Chaomidian fracture on the west side has good water conductivity and the urban spring water and karst water in western suburbs can be hydraulically connected through the aquifer of Sanshanzi Formation below the rock contact zone. The tongue-shaped intrusive rock body exists in the area of Yanchi mountain-the Qili river between downtown and the eastern suburbs, which plays a certain role in blocking the karst water of downtown springs and eastern suburbs, but the Wenhuaqiao fracture does not form a water blocking structure, and the aquifers on both sides are less missshapen, and the distribution of karst aquifers to the east of the Wenhuaqiao fracture and south of Yaojia is continuous and stable. The karst aquifers are exposed at a depth of 485 m north of the Honglou Campus of Shanda University. The urban spring water and karst water in eastern suburbs have a unified water system, which can be hydraulically connected through the aquifer of Sanshanzi Formation below the contact zone of rock mass.

The western borehole pumping test shows that the top plate of the aquifer in the areas of Huaiyuan Square-NO.9 Middle School-NO.14 Middle School is gradually deepened from south to north. Both the horizontal and vertical fissures in the intrusive rock above are evenly developed. The fissured water can be recharged by the top-supply of the underlying karst water group. Due to the overall water-richness and smooth groundwater runoffs, the urban spring and the karst water in the western suburbs have hydraulic connection. The eastern borehole pumping test shows that the rock body in the area of Yanchi mountain-the Qili river is gradually thickening from south to north with the depth increase of the top plate of the aquifer. The fissures in the rock body are developed with overall water-richness of the eastern Jinan strata and smooth groundwater runoffs.

The water level map shows that there is no sudden change of water level on both sides of Liuchang mountain-Langmao mountain-Wanling mountain between urban area and western suburbs, and the water levels of the two areas are roughly the same with continuous and steady water level, indicating a connection between the two in the hydrodynamic field. Groundwater on the west side of the area of Yanchi mountain-the Qili river flows in the northwest direction, while groundwater on the east side of the same area flows in the northeast direction. However, both the urban

(下转第 955 页)

incidence of karst collapse in this area, with the collapse area expanding northward from Jiuxian county to the Yuanzhuang-Yanglou area. After 1995, the intensity of karst collapse in the area decreased, but there still occurred collapse from time to time. By 2001 the development period of karst collapse in the area, the water level showed an overall downward trend and fluctuated above and below the bedrock surface, with an elevation of 95–110 m. In the first half of 2003, high-intensity mining continued, with water levels ranging from 86 m to 98 m. In 2013, the high-intensity mining in the rainy season and continuous low water levels caused geological disasters of high-intensity karst collapse at a large-scale. Since 2005, water levels have shown an overall upward trend, fluctuating between 106 m and 116 m above the bedrock surface. During this period, one time of collapse occurred in 2006, and no new collapse was observed. Based on the relationship between water level dynamics and karst collapse, the critical water level of the water source area to prevent karst collapse is 108 m, located 2 m above the roof of the karst aquifer. (4) According to the groundwater management model, the mining output of karst water in the simulation area at the critical water level is determined to be 82,000–85,000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, of which the exploitable volume of centralized exploitation in the water source area of Jiuxian county is 32,000–35,000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. This study is of great significance for the sustainable development and utilization of karst groundwater resources and the tackling of environmental geological problems.

Key words groundwater level, impact of human activities, manual mining, karst collapse, groundwater optimization model

(编辑 杨杨张玲)

(上接第 930 页)

area and the eastern suburbs are recharged by the same source. Therefore, if karst water in the eastern suburbs is exploited excessively, part of karst water flowing to the urban area from the southern mountainous area will be taken away, which will affect, to a certain extent, spring water in the urban area.

The water chemistry analysis based on Piper's trilinear diagram and hydrogeological conditions shows that the chemical types of urban spring water are the same as those of karst water in the eastern and western suburbs, and the three areas have the same evolutionary environment. According to the correlation analysis between the urban spring water and the karst water in the western suburbs, the main chemical indexes of the fissure hole JZ and SSZ boreholes are correlated with those of the urban and western suburban boreholes, with all coefficients larger than 0.84, which indicates that the fissure water in JZ and SSZ boreholes is closely correlated with karst water. There is a vertical runoff channel in the area of Huaiyuan Square-NO.9 Middle School-NO.14 Middle School, and the intrusion above fracture water in the rock body can be recharged by the top-supply of the lower karst water rock group. The urban spring water and the karst water in the western suburbs are of the same source. According to the correlation analysis of urban spring water and karst water in eastern suburb, the correlation of the main chemical indexes between karst water collected from eastern suburban boreholes and urban spring water is larger than 0.95, an significant positive correlation, indicating the same source of karst water in both eastern suburban and urban area. According to the content distribution of the constant ion components in karst water in the study area, water chemical components of the urban spring and the karst water of the western and eastern suburbs are formed mainly by the dissolution of carbonate rocks. Karst water of the three areas is in a similar groundwater environment, and there is a certain hydraulic connection.

Key words springs in Jinan, karst water, the contact zone of rock mass, channel of runoff, hydraulic connection, groundwater flow field, Evolutionary environment

(编辑 杨杨黄晨晖)