

刘文悦, 高宗军, 徐源, 等. 济南市岩溶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.
DOI: 10.11932/karst20230204

济南市岩溶水化学特征及基于模糊评价法的水质评价

刘文悦¹, 高宗军¹, 徐源², 韩聪¹, 罗振江², 赵振华²
(1. 山东科技大学, 山东青岛 266590; 2. 山东省地质矿产勘查开发局
水文地质工程地质大队, 山东济南 251600)

摘要: 岩溶地下水是济南泉群的重要补给来源, 其水质直接影响着济南市保泉工作成效。本次研究于5月和9月在济南市长孝岩溶水系统、趵突泉岩溶水系统及白泉岩溶水系统采集水样并进行水质检测。通过运用数理统计、相关性分析、Piper 三线图、Gibbs 模型等方法, 对研究区内地下水水化学特征进行分析, 利用模糊评价方法, 对研究区地下水的质量进行综合评价。结果表明: 三个岩溶水系统中地下水均为弱碱性水, 硬度较小, TDS 值均 $< 1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。阴阳离子浓度表现为: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。模糊评价的结果显示, 三个岩溶水系统地下水总体水质良好, 可用作生活饮用水, 且长孝、趵突泉及白泉的岩溶水水化学类型大致相同, 离子来源相似, 故水力联系较强。

关键词: 岩溶地区; 地下水; 水质评价; 水化学分析; 模糊评价

中图分类号: P641.134; X824 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)02-0220-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

随着社会经济的发展, 城市化不断扩大, 给济南泉群地下水的补给带来了严重影响。岩溶地下水作为济南泉群的主要补给来源, 也是地表径流的主要渗漏带^[1-2], 岩溶含水层作为地下水的重要储水空间, 为保持泉水复流和持续喷涌作出了卓越贡献。济南泉水断流主要集中在趵突泉泉域, 长孝岩溶水系统和白泉岩溶水系统中的泉水也受到了影响^[3], 其中白泉与趵突泉水力联系较密切, 受影响比较大。探明济南岩溶地区地下水水质及其物质来源, 对岩溶水资源开发利用及保泉工作具有重要意义。

邢立亭等^[4-6]基于地下水系统理论, 对济南市单斜岩溶水系统边界进行划分并揭露了泉域间的典型水力联系; 高帅等^[7-8]对趵突泉岩溶水系统部分水样点的水质健康风险做了评价, 评价指标较少, 但针对性较强。2016年, 孙斌等^[9]对济南市岩溶水系统的划分以及水力联系进行研究, 为济南泉域保泉供水提供了地质依据; 李江柏、彭康宁、李贵恒等^[10-19]运用模糊数学评价方法对不同地区地下水水质进行了评价; 冯建国等^[20-21]基于对新泰等地区地下水水质分析运用的统计学及水化学分析方法, 如离子比值法等, 判别地下水环境受到外界的影响以及污染来源等; 管清花等^[22]对趵突泉泉域岩溶地下水与水环

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD109)

第一作者简介: 刘文悦(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向地质工程。E-mail: lwysdust@126.com。

通信作者: 高宗军(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文地质工程地质研究及教学工作。E-mail: zongjunga@163.com。

收稿日期: 2021-08-12

境特点进行了分析,总结了济南地区地下水环境现状与演化规律;李波等^[23-24]基于水文地质调查对莱芜盆地富水地段特征进行了分析;高旭波等^[25]基于我国北方岩溶水系统水质特征对岩溶水系统的污染现状、污染来源及污染途径进行了归纳分析。济南市岩溶水系统主要受地表水(河流、水库等)渗漏污染、城镇污水渗漏污染,自 2013 年以来,对岩溶水系统内地下水水质鲜有评价。

本文通过对三个岩溶水系统的水质进行分析比较,并以此建立三个岩溶水系统的水力联系,采用枯、丰水期两期水样点,综合运用了水化学统计学方法,如 Piper 三线图、吉布斯图、离子比值法以及相关软件(SPSS、Origin 等),系统地描述了研究区内地下水水化学类型及主要离子来源,并对水质进行整体评价,为岩溶地下水补给泉群及开采利用提供相关依据。

1 研究区概况

济南市位于鲁中山地向鲁北平原的过渡带,地形可分为三带:北部为临黄沉降带,中部为山前平原过渡带,南部为丘陵山区带。岩溶水系统主要分布于中部山前过渡带,向西以马山断层为界,向北受黄河水顶托,向东为千佛山断层隔档,南部为地势较高的低山丘陵区。区内有玉符河、小清河等河流,以及趵突泉、白泉、珍珠泉等泉群。地下水沿地形坡向自南向北流动。

济南市岩溶水系统获得补给的主要方式为大气降水直接入渗补给。济南南部广泛分布的碳酸盐岩裸露区接受降水入渗补给,在山前径流区岩溶水主要沿 400 m 以浅的奥陶纪碳酸盐岩岩溶裂隙由南东向北西径流^[17]。其中,卧虎山水库向下游河道放水的河床渗漏也成为岩溶水系统的补给水源。在丰水期,孔隙水含水层含水量较大时也可以补给岩溶水系统。泉域岩溶水系统输出排泄主要有 3 种方式:

- (1) 人工开采是目前最主要的排泄途径;
- (2) 泉水排泄是岩溶水系统的第二主要排泄方式;
- (3) 径流排泄为泉域岩溶水系统西北部的排泄方式。奥陶系灰岩向北延伸到黄河以北,岩溶水沿地层倾向向北西方向运动,向北补给地表水及地下水。

长孝岩溶水系统西以黄山岩脉为界,东以马山断裂为界,主要分布在长清区;趵突泉岩溶水系统西

以马山断裂为界,东以东坞断裂为界,主要分布在中区及历城区,其中有趵突泉、珍珠泉、黑虎泉等泉群,分布区域较广,岩溶地域面积在三个岩溶水系统中最大;白泉岩溶水系统与趵突泉岩溶水系统以东坞断裂为界,东与百脉泉泉域以文祖断裂为界,主要分布地区为高新区,靠近章丘区。长孝岩溶水系统和白泉岩溶水系统均补给趵突泉岩溶水系统。长孝岩溶水系统面积约 1 613.244 km²,趵突泉岩溶水系统较小,面积约 564.427 km²,白泉岩溶水系统面积约 1 026.881 km²。

研究区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温为 14.2 ℃。研究区多年平均降水量约为 646.55 mm。雨季 6 月—9 月降水集中且降水量大,为丰水期,其余月份为枯水期。本次枯水期数据在 5 月份采集。研究区降水空间分布不均,自东南向西北递减。采样点分布如图 1 所示。

2 样品采集以及水质评价方法

2.1 水样来源

本次调查分别于 5 月(枯水期)和 9 月(丰水期)在长孝岩溶水系统、趵突泉岩溶水系统及白泉岩溶水系统中分别选取水样点 13 个、30 个、21 个,丰枯两期共取得 128 个水样。水位埋深 20~50 m,地下水类型主要为岩溶水。水样采集方法为:取水样前先用蒸馏水清洗采样瓶 3 次,再用待采集水样润洗 3 次。阳离子采用 ICP-OES 分析,阴离子用阴离子色谱仪测试所得,COD 及 TH 采用滴定法所得。所有样品在山东省地质矿产工程勘查研究所实验室完成检测。无机水化学指标测定了常规水化学组分:K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺、Fe³⁺、Fe²⁺、Mn、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、F⁻、NO₃⁻、NO₂⁻、PO₄³⁻、I 以及总硬度、总碱度、溶解性总固体、pH。

2.2 水质评价方法

地下水环境的影响因素众多,将数学中模糊集理论和方法应用于水质评价中,以地下水质量标准作为评价依据,根据实测数据建立评价因子相对于各级标准的隶属度集,通过各评价因子的权重集与隶属度集相乘,对水质评价进行定量化处理,综合评价各个指标对地下水质量的影响,全面反映水资源质量状况^[1]。评价过程分述如下。

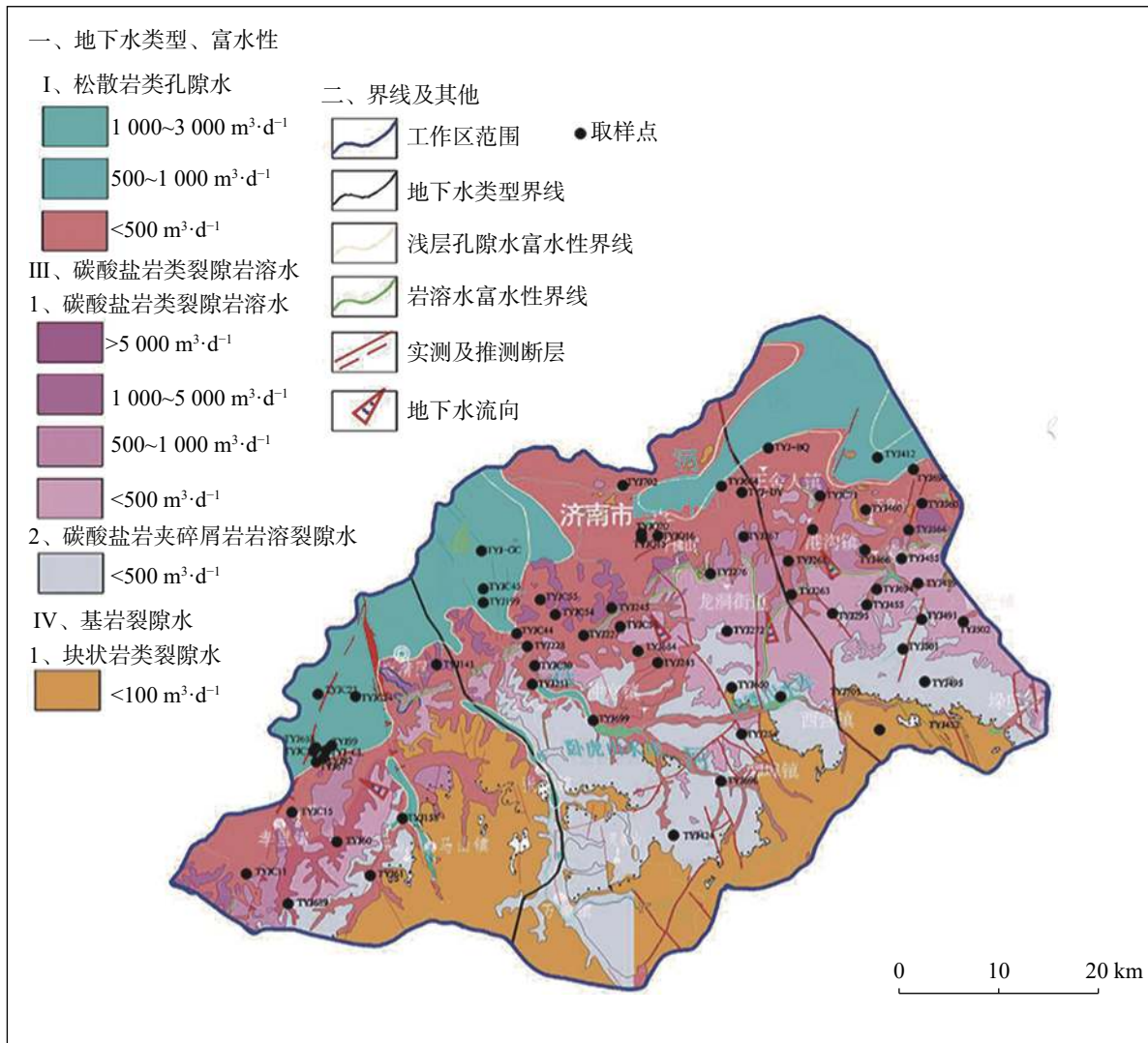


图1 研究区水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

2.2.1 建立评价集

依据《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)及研究区水化学特征,本文选用Na⁺、Cl⁻、TH、TDS、SO₄²⁻、NO₃⁻(以N计)作为评价因子,评价因子集U={Na⁺, Cl⁻, TH, TDS, SO₄²⁻, NO₃⁻},评价集V={I, II, III, IV, V}。

Na⁺: 地下水中Na⁺含量<100 g·L⁻¹时,符合I类水质量标准;地下水中Na⁺含量100 g·L⁻¹<ρNa⁺<150 g·L⁻¹时,符合II类水质量标准;地下水中Na⁺含量150 g·L⁻¹<ρNa⁺<200 g·L⁻¹时,符合III类水质量标准;地下水中Na⁺含量200 g·L⁻¹<ρNa⁺<400 g·L⁻¹时,符合IV类水质量标准;地下水中Na⁺含量ρNa⁺>400 g·L⁻¹时,符合V类水质量标准。

Cl⁻: 地下水中Cl⁻含量<50 g·L⁻¹时,符合I类水质量标准;地下水中Cl⁻含量50 g·L⁻¹<ρCl⁻<150 g·L⁻¹

时,符合II类水质量标准;地下水中Cl⁻含量150 g·L⁻¹<ρCl⁻<250 g·L⁻¹时,符合III类水质量标准;地下水中Cl⁻含量250 g·L⁻¹<ρCl⁻<350 g·L⁻¹时,符合IV类水质量标准;地下水中Cl⁻含量ρCl⁻>350 g·L⁻¹时,符合V类水质量标准。

TH: 地下水中TH含量<150 g·L⁻¹时,符合I类水质量标准;地下水中TH含量150 g·L⁻¹<ρTH<3 000 g·L⁻¹时,符合II类水质量标准;地下水中TH含量300 g·L⁻¹<ρTH<450 g·L⁻¹时,符合III类水质量标准;地下水中TH含量450 g·L⁻¹<ρTH<650 g·L⁻¹时,符合IV类水质量标准;地下水中TH含量ρTH>650 g·L⁻¹时,符合V类水质量标准。

TDS: 地下水中TDS含量<300 g·L⁻¹时,符合I类水质量标准;地下水中TDS含量300 g·L⁻¹<ρTDS<5 000 g·L⁻¹时,符合II类水质量标准;地下水中TH

含量 $500 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} < \rho\text{TDS} < 1\,000 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 III 类水质质量标准; 地下水中 TDS 含量 $1\,000 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} < \rho\text{TDS} < 2\,000 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 IV 类水质质量标准; 地下水中 TDS 含量 $\rho\text{TDS} > 2\,000 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 V 类水质质量标准。

SO_4^{2-} : 地下水中 SO_4^{2-} 含量 $< 50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 I 类水质质量标准; 地下水中 SO_4^{2-} 含量 $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} < \rho\text{SO}_4^{2-} < 150 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 II 类水质质量标准; 地下水中 SO_4^{2-} 含量 $150 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} < \rho\text{SO}_4^{2-} < 250 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 III 类水质质量标准; 地下水中 SO_4^{2-} 含量 $250 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} < \rho\text{SO}_4^{2-} < 350 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 IV 类水质质量标准; 地下水中 SO_4^{2-} 含量 $\rho\text{SO}_4^{2-} > 350 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 V 类水质质量标准。

NO_3^- (以 N 计): 地下水中 NO_3^- (以 N 计) 含量 $< 2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 I 类水质质量标准; 地下水中 NO_3^- (以 N 计) 含量 $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} < \rho\text{NO}_3^-$ (以 N 计) $< 5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 II 类水质质量标准; 地下水中 NO_3^- (以 N 计) 含量 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} < \rho\text{NO}_3^-$ (以 N 计) $< 20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 III 类水质质量标准; 地下水中 NO_3^- (以 N 计) 含量 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} < \rho\text{NO}_3^-$ (以 N 计) $< 30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 IV 类水质质量标准; 地下水中 NO_3^- (以 N 计) 含量 ρNO_3^- (以 N 计) $> 30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 符合 V 类水质质量标准。

2.2.2 计算隶属函数, 确定隶属度

隶属度即每一个评价因子隶属于不同评价等级的程度。隶属函数确定评价因子对于不同评价等级的隶属程度。

隶属函数由下式表示:

$$\mu_j(x_i) = \begin{cases} 1 - \frac{x_i - s_{i,j-1}}{s_{i,j} - s_{i,j-1}} & s_{i,j-1} < x_i < s_{i,j} \\ \frac{x_i - s_{i,j}}{s_{i,j+1} - s_{i,j}} & s_{i,j} < x_i < s_{i,j+1} \\ 0 & x_i > s_{i,j+1} \end{cases}$$

式中, x_i 为第 k 个水样中第 i 个评价因子的监测值; $s_{i,j}$ 为第 i 个评价因子所对应的第 j 级的评价标准值; $\mu_{i,j}$ 为第 i 个评价因子在第 j 级的隶属度。

根据上述公式, 代入丰、枯水期水样点的监测值, 即可得到每个水样中第 i 个评价因子对于第 j 个评价标准的隶属度矩阵 B。以取样点 TYJ684 的模糊关系矩阵 B1 为例:

$$B1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.59 & 0.41 & 0 & 0 \\ 0.175 & 0.825 & 0 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.58 & 0.42 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.3 确定评价因素的模糊权重集

每一个参评因子对水质影响的贡献率不同, 故需对每个评价因子赋予不同的权重, 组成评价因子的权重系数矩阵 A。

$$A = [\omega_1 \quad \cdots \quad \omega_n]$$

ω_i 为第 i 个评价因子的权重数, 对于数值越大污染越重的指标, $\omega_i = \frac{x_i}{s_i}$, 对于数值越小污染越重的指标,

$$\omega_i = \frac{s_i}{x_i}, \quad s_i \text{ 为第 } i \text{ 个评价级评价标准值的均值, } s_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_{ij}。$$

对 ω 归一化处理, 令 $a_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i}$, 组成评价因子权

重系数矩阵 $A = [a_1 \quad \cdots \quad a_n]$ 。

2.2.4 建立评价模型, 得到评价结果

研究区内所有水样的综合评价集 $R = B \times A = [r_1 \quad \cdots \quad r_m]$, 如 TYJ684 所得综合评价集 $R1 = [0.24 \quad 0.52 \quad 0.27 \quad 0 \quad 0]$

3 结果与分析

3.1 研究区地下水化学特征

3.1.1 水化学描述性特征

本研究将取得的 128 个水样点监测数据分别导入 SPSS 进行分析, 具体结果见表 1。枯水期 pH 最大值为 8.64, 最小值为 6.77, 均出现在趵突泉岩溶水系统中, 平均值: 趵突泉 (7.43) > 长孝 (7.39) > 白泉 (7.25); TDS 含量最大值为 $918.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在长孝岩溶水系统中, 最小值为 $312.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在趵突泉岩溶水系统中, 平均值: 长孝 ($647.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 白泉 ($526.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 趵突泉 ($488.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); TH 最大值为 $777 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在白泉岩溶水系统中, 最小值为 $234.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在趵突泉岩溶水系统中, 平均值: 长孝 ($480.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 白泉 ($425.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 趵突泉 ($343.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。丰水期的 pH, 趵突泉均值 (7.75) > 白泉均值 (7.72) > 长孝均值 (7.61), 最大值为 8.5, 最小值为 7.2, 均出现在趵突泉岩溶水系统中; TDS 含量平均值: 长孝 ($713.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 白泉 ($532.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 趵突泉 ($517.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 最大值

表 1 丰水期和枯水期水化学特征统计值

Table 1 Statistical values of water chemistry characteristics in the wet season and the dry season

	长孝				趵突泉				白泉				
	最小值/ mg·L ⁻¹	最大值/ mg·L ⁻¹	平均数/ mg·L ⁻¹	变异系数	最小值/ mg·L ⁻¹	最大值/ mg·L ⁻¹	平均数/ mg·L ⁻¹	变异系数	最小值/ mg·L ⁻¹	最大值/ mg·L ⁻¹	平均数/ mg·L ⁻¹	变异系数	
枯水期	pH	7.14	7.57	7.39	0.02	6.77	8.64	7.43	0.05	6.91	7.69	7.25	0.03
	TDS	334.00	918.00	647.21	0.25	312.00	710.00	488.27	0.21	362.00	792.00	526.05	0.25
	TH	269.00	681.00	480.50	0.28	234.00	512.00	343.90	0.22	247.00	777.00	425.29	0.31
	Na ⁺	9.05	58.20	28.07	0.36	7.00	115.00	28.61	1.12	6.50	107.00	17.74	2.12
	K ⁺	0.20	5.90	1.23	0.53	0.50	17.00	1.97	0.90	0.30	3.00	0.99	1.20
	Ca ²⁺	76.80	216.00	150.23	1.14	42.90	163.00	103.20	1.57	73.80	250.00	132.15	0.62
	Mg ²⁺	16.20	44.20	25.69	0.30	10.80	30.80	20.98	0.28	13.80	41.00	23.13	0.33
	Cl ⁻	22.90	103.00	56.95	0.28	14.20	164.10	46.24	0.22	13.60	101.00	32.79	0.34
	SO ₄ ²⁻	33.50	197.00	117.64	0.51	48.90	175.00	94.06	0.67	41.70	542.00	125.83	0.65
	HCO ₃ ⁻	232.00	408.00	305.36	0.42	144.00	381.00	252.90	0.37	182.00	434.00	304.05	0.92
NO ₃ ⁻	11.50	238.00	96.24	0.17	12.40	155.00	38.98	0.23	8.90	73.20	35.32	0.22	
丰水期	pH	7.40	7.90	7.61	0.02	7.20	8.50	7.75	0.04	7.30	8.00	7.72	0.02
	TDS	335.00	1218.00	713.64	0.37	330.00	868.00	517.33	0.28	375.00	1075.00	532.71	0.31
	TH	265.71	862.69	518.74	0.35	248.20	593.47	374.42	0.24	242.19	779.62	420.19	0.29
	Na ⁺	16.71	60.46	33.19	0.26	7.92	149.00	32.88	1.11	4.09	97.54	16.44	0.64
	K ⁺	0.15	6.40	1.14	0.41	0.45	5.51	1.42	0.82	0.05	1.86	0.68	1.18
	Ca ²⁺	76.75	300.00	167.49	1.38	69.14	204.41	116.17	0.81	74.75	252.30	134.14	0.79
	Mg ²⁺	15.56	43.26	24.41	0.39	8.87	39.62	20.48	0.29	9.60	36.34	20.70	0.32
	Cl ⁻	20.45	110.77	63.56	0.32	10.23	122.70	44.71	0.27	6.82	61.35	25.89	0.35
	SO ₄ ²⁻	48.44	212.23	146.08	0.52	66.90	328.16	127.33	0.66	59.07	616.95	144.48	0.66
	NO ₃ ⁻	9.60	383.20	110.66	0.41	2.22	158.75	39.26	0.42	6.18	89.00	37.04	0.91
HCO ₃ ⁻	250.70	407.77	308.84	0.93	137.13	389.64	251.30	0.77	211.43	377.56	288.16	0.52	

为 1 218.00 mg·L⁻¹, 出现在长孝岩溶水系统中, 最小值为 330 mg·L⁻¹, 出现在趵突泉岩溶水系统; 总硬度 TH: 长孝平均值 (518.74) mg·L⁻¹ > 白泉 (429.19) mg·L⁻¹ > 趵突泉 (374.42) mg·L⁻¹, 最大值 862.69 mg·L⁻¹, 出现在长孝岩溶水系统, 最小值 242.19 mg·L⁻¹, 出现在白泉岩溶水系统中; 两期水样点的离子浓度均呈现 Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺, HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ 的规律, 其中白泉岩溶水在丰水期出现 Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺ 的规律。根据地下水质量标准 (GB/T 2005), 研究区内 >90% 的水样点符合 III 类水标准。与 2013 年相比, 大部分评价指标平均含量均低于 2013 年, COD 含量较 2013 年略高, 说明岩溶地区有机质含量较 2013 年升高^[2]。

3.1.2 水化学类型

将枯、丰两期水样监测数据导入 AQQA 中, 以

获得反映水化学特征和类型的 piper 三线图 (图 2)。从图 2 可看出, 枯水期: 长孝、趵突泉和白泉的水样点均分布在菱形区域的 I 区和 IV 区, 为 SO₄-Cl-Ca-Mg 型和 HCO₃-Ca-Mg 型岩溶水, 其中, 趵突泉泉域主要分布在 I 区水样点较多, 为 SO₄-Cl-Ca-Mg 型岩溶水; 白泉水样点主要分布在 IV 区, 为 HCO₃-Ca-Mg 型岩溶水。水样点在三角区域主要分布在 A 区、B 区、E 区, 为钙型、混合型和重碳酸型。其中, 长孝水样点集中分布在 A 区、E 区, 为钙型和重碳酸型; 趵突泉水样点除 A 区、E 区外, 小部分水样点分布在 B 区, 为钙型-碳酸氢盐混合型水; 白泉水样中有两个水样点分布在 F 区, 为硫酸盐型, 该水样点位于高新区, 靠近百脉泉泉域。丰水期, 三个岩溶水系统水样点大致与枯水期分布一致, 其中菱形区域, 趵突泉岩溶水系统有两个水样点分布在 II 区, 为 SO₄-Cl-Na 型水岩溶水, 三角区域趵突泉存在两个钠

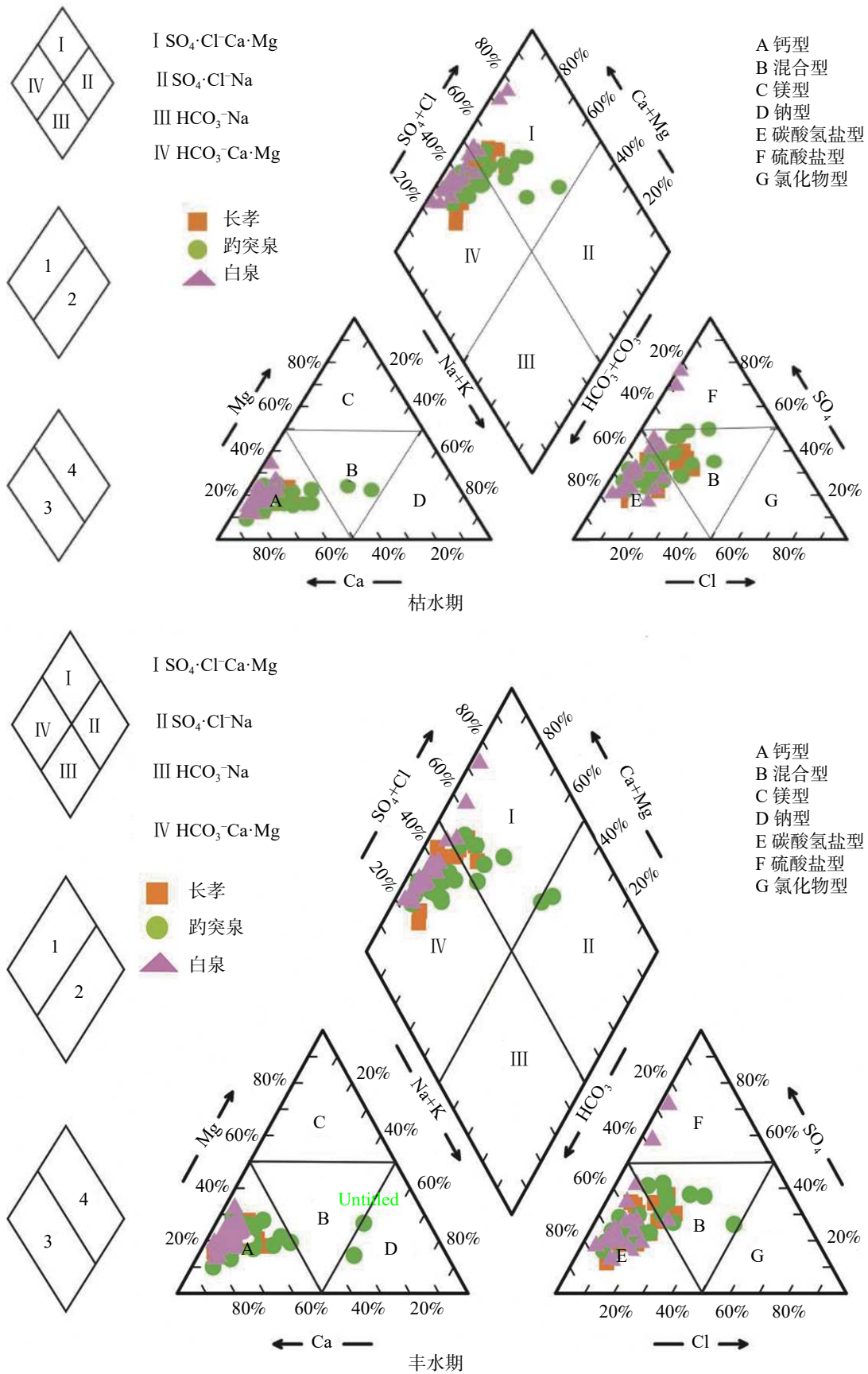


图 2 枯、丰水期水化学 piper 三线图

Fig. 2 Piper three-line diagram of water chemistry in the dry season and the wet season

型水样点,分布在D区。

SO₄·Cl型水主要分布在长孝、趵突泉和白泉岩溶水系统的边缘部分。从水文地质学角度分析来看,SO₄·Cl型水主要来源于石膏溶解。在济南市地层中,岩溶水主要赋存在灰岩及其裂隙中,岩性主要以张夏组灰岩为主,夹层有页岩泥灰岩等,奥陶系的白云质灰岩也分布较广,因此在灰岩夹层中不排除有石膏的存在,含量不确定。SO₄·Cl型水的形成分布在生活区较多,与人类生活产生的生活污水或工业污水的排放也有者密切的关系。

总之,长孝、趵突泉及白泉的水化学类型大致相同,主要为钙型水和重碳酸混合型水。长孝岩溶水系统和趵突泉岩溶水系统主要以SO₄·Cl·Ca·Mg型水为主、白泉岩溶水系统主要以HCO₃·Ca·Mg型水为主。

3.1.3 水化学成因机制分析

Gibbs图运用了半对数坐标图,可根据离子与TDS之间的关系分析地下水的离子成因。在Gibbs图中(图3),TDS值较低且Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)或Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)比值>0.5时,说明区域水化学组分主要受大气降雨作用控制;TDS值为中值且Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)或Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)值<0.5时,说明区域水化学组分主要受

岩石风化作用控制;TDS值较高且Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)或Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)比值约等于1时,说明该区域水化学组分主要受蒸发-结晶作用控制。将研究区内丰、枯两水期相关数据绘制的Gibbs图如下图所示。长孝、趵突泉和白泉岩溶水系统在枯、丰两水期均分布在岩石风化区域,主要受岩石风化作用控制。研究区主要岩溶含水层为奥陶系和寒武纪碳酸盐岩,主要由厚灰岩、白云质灰岩和白云岩组成,因此灰岩及白云质岩石的风化溶解进入含水层中,组成岩溶水系统中的主要离子来源。

济南市岩溶水系统主要含水层为张夏组灰岩及奥陶系白云质灰岩,赋存在灰岩裂隙中,由于富水性较大,含水层灰岩溶孔溶洞发育,岩石受侵蚀作用强烈,在地下可形成通道以供地下水流动。

3.1.4 地下水主要离子来源

研究区地下水中离子主要来源于岩石风化,离子当量比值可深究其来源。由图4a可知,枯、丰水期监测点分布在 $\gamma(\text{Na}^+)/(\text{Cl}^-)=1$ 两侧,说明Na⁺和Cl⁻主要来源于岩盐溶解^[20],其中,白泉的TYJ452水样点偏离1:1线,水样点位于高新区靠近章丘百脉泉,人口密度大,受人类活动影响较大。白云石的溶解过程为:CaCO₃+CO₂+H₂O→Ca²⁺+2HCO₃⁻, $\gamma(\text{Ca}^{2+})/$

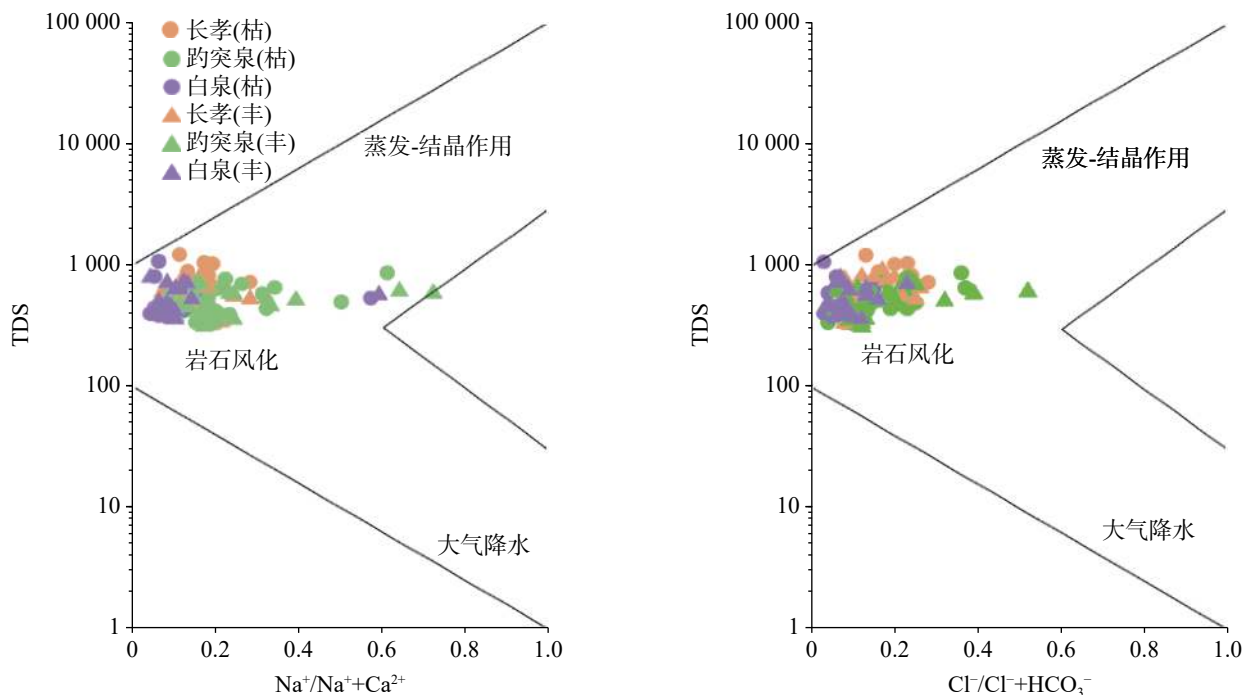


图3 Gibbs图

Fig. 3 Gibbs diagram

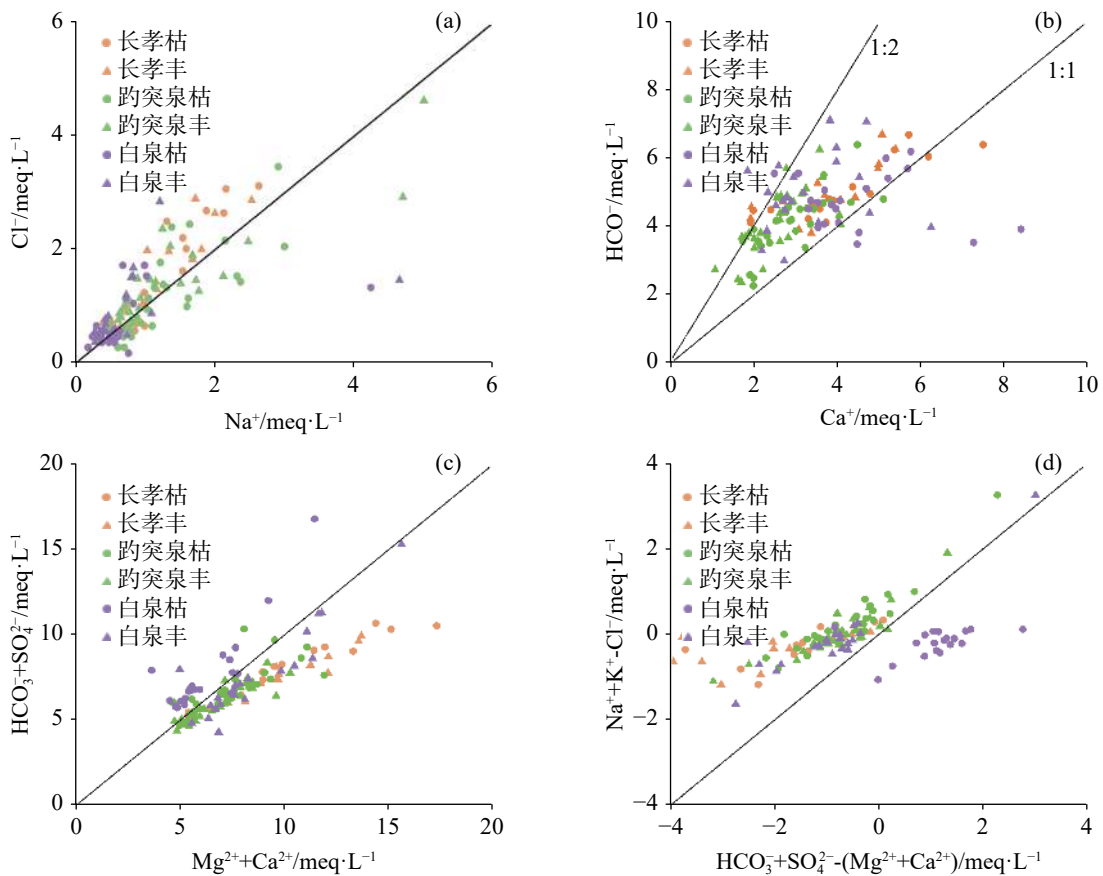


图 4 研究区离子比值图

Fig. 4 Ion ratio diagram in the study area

(HCO_3^-)=1 : 1; 方解石的溶解过程为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$, $\gamma(\text{Ca}^{2+})/(\text{HCO}_3^-)=1 : 2$ 。由图 4b 可知, 长孝、趵突泉及白泉岩溶水系统水样点均分布在 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/(\text{HCO}_3^-)=1 : 1$ 线和 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/(\text{HCO}_3^-)=1 : 2$ 线之间, 表明研究区内大部分地区均存在白云石和方解石的溶解, 故 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的含量较高。白泉岩溶水系统中 TYJ506 和 TYJ502 两个水样点略偏离 1 : 1 线, Ca^{2+} 含量明显高于 HCO_3^- 含量。图 4c 中, 1 : 1 线表示碳酸盐岩和硫酸盐岩是地下水中的主要水文地球化学过程, 水样点大部分位于其上方, 表明硅酸盐矿物和硫酸盐矿物溶解是影响研究区地下水水化学组分的主要反应。由图 4d 可知, 1 : 1 线表示 Na^+ 和 Ca^{2+} 发生了阳离子交换作用, 长孝、趵突泉的枯、丰水期水样点均位于 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+})=1$ 线上侧, 白泉的枯水期水样点均位于 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+})=1$ 线下侧^[16], 说明阳离子交换作用是研究区内重要的水文地球化学作用。

综上所述, 长孝、趵突泉及白泉岩溶水系统的主

要水化学作用是碳酸盐岩、蒸发岩盐的风化溶解以及阳离子交换作用, 其中, 长孝的阳离子交换作用较其他两个岩溶水系统弱。三个岩溶水系统中水化学类型相似, 离子来源也相近, 水力联系较密切。

3.2 研究区地下水水质综合评价

按照上述步骤, 得到研究区丰、枯水期水样监测点综合评价集(见表 3-表 5, 图 5):

由上表可知, 枯水期: 长孝岩溶水系统有 21% 的 III 类水, 50% 的 IV 类水及 29% 的 V 类水; 趵突泉岩溶水系统中 III 类水约占 70%, IV 类水占 27%, V 类水约 3%; 白泉中约有 47% 的 III 类水, 17% IV 类水及 7% 的 V 类水。丰水期: 长孝岩溶水系统中 III 类水占比较枯水期高, 约 38%, IV 类水、V 类水较枯水期略低, 分布为 46% 和 15%; 趵突泉岩溶水系统中出现了 7% 的 II 类水, III 类水较枯水期较高, 为 73%, IV 类水较枯水期略低, 为 17%, V 类水与枯水期相同, 均为 3%; 白泉岩溶水系统 III 类水较枯水期有较大幅度的提高, 为 76%, IV 类水大致与枯水期相似, 为 19%, V 类水略有降低, 为 5%。近年来, 由于城市扩张与人类工

表3 长孝岩溶水系统各水样水质评价结果

Table 3 Evaluation results of water quality of each water sample in Changxiao karst water system

	枯水期	I	II	III	IV	V	结果	丰水期	I	II	III	IV	V	结果
长孝	TYJC11	0.02	0.05	0.26	0.39	0.00	IV	TYJC11	0.02	0.12	0.24	0.55	0.00	IV
	TYJC18	0.01	0.03	0.04	0.11	0.79	V	TYJC18	0.01	0.06	0.07	0.14	0.44	V
	TYJ99	0.02	0.07	0.34	0.48	0.00	IV	TYJ99	0.02	0.08	0.36	0.50	0.00	IV
	TYJ67	0.01	0.04	0.08	0.16	0.70	V	TYJ67	0.01	0.04	0.15	0.07	0.72	V
	TYJ92	0.06	0.46	0.48	0.00	0.00	III	TYJ92	0.07	0.35	0.59	0.00	0.00	III
	TYJC22	0.02	0.05	0.14	0.46	0.18	IV	TYJC22	0.02	0.05	0.23	0.44	0.20	IV
	TYJ688	0.03	0.02	0.23	0.59	0.17	IV	TYJ688	0.02	0.03	0.21	0.58	0.19	IV
	TYJ689	0.07	0.44	0.50	0.00	0.00	III	TYJ689	0.07	0.19	0.60	0.15	0.00	III
	TYJC24	0.02	0.07	0.30	0.55	0.00	IV	TYJC24	0.03	0.12	0.45	0.40	0.00	III
	TYJ158	0.02	0.06	0.29	0.63	0.00	IV	TYJ158	0.02	0.07	0.29	0.61	0.00	IV
	TYJ61	0.03	0.08	0.35	0.54	0.00	IV	TYJ61	0.02	0.07	0.34	0.58	0.00	IV
	TYJ60	0.04	0.18	0.65	0.14	0.00	III	TYJ60	0.15	0.01	0.84	0.00	0.00	III
	TYJ-CL	0.01	0.04	0.07	0.18	0.70	V	TYJ-CL	0.03	0.14	0.55	0.29	0.00	III
	TYJC15	0.01	0.07	0.08	0.09	0.75	V	TYJC15	0.01	0.08	0.08	0.16	0.37	V

表4 白泉岩溶水系统各水样水质评价结果

Table 4 Evaluation results of water quality of each water sample in Baiquan karst water system

	枯水期	I	II	III	IV	V	结果	丰水期	I	II	III	IV	V	结果
白泉	TYJ466	0.03	0.11	0.57	0.29	0.00	III	TYJ466	0.04	0.30	0.63	0.03	0.00	III
	TYJ295	0.02	0.21	0.56	0.21	0.00	III	TYJ295	0.02	0.10	0.52	0.36	0.00	III
	TYJ485	0.01	0.11	0.11	0.58	0.25	IV	TYJ485	0.01	0.10	0.21	0.51	0.00	IV
	TYJ460	0.02	0.11	0.18	0.54	0.00	IV	TYJ460	0.00	0.45	0.53	0.02	0.00	III
	TYJ501	0.02	0.04	0.35	0.47	0.00	IV	TYJ501	0.03	0.04	0.52	0.42	0.00	III
	TYJ502	0.02	0.46	0.52	0.01	0.00	III	TYJ502	0.02	0.03	0.08	0.30	0.07	IV
	TYJ489	0.03	0.03	0.33	0.54	0.00	IV	TYJ489	0.03	0.16	0.57	0.24	0.00	III
	TYJ491	0.03	0.18	0.69	0.09	0.00	III	TYJ491	0.03	0.13	0.53	0.31	0.00	III
	TYJ495	0.03	0.03	0.65	0.30	0.00	III	TYJ495	0.03	0.18	0.64	0.16	0.00	III
	TYJ506	0.02	0.02	0.08	0.10	0.32	V	TYJ506	0.01	0.01	0.10	0.07	0.82	V
	TYJ267	0.03	0.19	0.67	0.11	0.00	III	TYJ267	0.03	0.14	0.49	0.34	0.00	III
	TYJ-BQ	0.03	0.11	0.53	0.33	0.00	III	TYJ-BQ	0.02	0.15	0.42	0.41	0.00	III
	TYJ268	0.03	0.14	0.73	0.10	0.00	III	TYJ268	0.03	0.11	0.66	0.20	0.00	III
	TYJC71	0.01	0.02	0.01	0.12	0.83	V	TYJC71	0.05	0.15	0.68	0.12	0.00	III
	TYJ412	0.02	0.13	0.56	0.28	0.00	III	TYJ412	0.02	0.05	0.35	0.29	0.00	III
	TYJ690	0.02	0.13	0.57	0.27	0.00	III	TYJ690	0.02	0.12	0.20	0.57	0.00	IV
	TYJ560	0.03	0.05	0.61	0.31	0.00	III	TYJ560	0.03	0.03	0.24	0.34	0.00	IV
	TYJ452	0.03	0.03	0.29	0.53	0.00	IV	TYJ452	0.04	0.22	0.60	0.15	0.00	III
	TYJ455	0.02	0.13	0.50	0.35	0.00	III	TYJ455	0.03	0.18	0.58	0.21	0.00	III
	TYJ694	0.04	0.16	0.60	0.21	0.00	III	TYJ694	0.04	0.17	0.50	0.30	0.00	III
TYJ564	0.03	0.17	0.64	0.16	0.00	III	TYJ564	0.02	0.05	0.33	0.33	0.00	III	

程活动影响,济南市岩溶水系统水质正悄悄发生变化,对岩溶水系统水质影响较大的主要有硝酸盐的含量及总硬度 TH。由分析结果可知,长孝岩溶水系

统水质最差,V类水含量最高,其硝酸盐的含量及 TH 也相对高,说明长孝水源地受人类活动影响大,汇水区农田分布面积大,施用化肥对岩溶水系统中

表 5 趵突泉岩溶水系统各水样水质评价结果

Table 5 Evaluation results of water quality of each water sample in Baotu Spring karst water system

	枯水期						结果	丰水期						结果
	I	II	III	IV	V	I		II	III	IV	V			
趵突泉	TYJ684	0.04	0.13	0.58	0.25	0.00	III	TYJ684	0.03	0.13	0.55	0.29	0.00	III
	TYJ231	0.02	0.11	0.43	0.44	0.00	IV	TYJ231	0.02	0.08	0.15	0.35	0.36	V
	TYJ243	0.02	0.09	0.32	0.53	0.00	IV	TYJ243	0.03	0.17	0.66	0.15	0.00	III
	TYJ263	0.02	0.08	0.17	0.67	0.00	IV	TYJ263	0.03	0.14	0.52	0.31	0.00	III
	TYJ272	0.02	0.08	0.51	0.40	0.00	III	TYJ272	0.03	0.14	0.41	0.42	0.00	IV
	TYJ424	0.01	0.06	0.15	0.18	0.33	V	TYJ424	0.04	0.15	0.44	0.37	0.00	III
	TYJ254	0.04	0.16	0.63	0.17	0.00	III	TYJ254	0.03	0.24	0.67	0.06	0.00	III
	TYJ650	0.03	0.13	0.55	0.29	0.00	III	TYJ650	0.03	0.16	0.59	0.22	0.00	III
	TYJC45	0.03	0.16	0.50	0.31	0.00	III	TYJC45	0.05	0.28	0.67	0.01	0.00	III
	TYJC54	0.04	0.15	0.61	0.20	0.00	III	TYJC54	0.03	0.16	0.58	0.23	0.00	III
	TYJ199	0.04	0.40	0.56	0.00	0.00	III	TYJ199	0.05	0.35	0.59	0.02	0.00	III
	TYJ141	0.03	0.14	0.66	0.17	0.00	III	TYJ141	0.05	0.22	0.73	0.01	0.00	III
	TYJ696	0.05	0.21	0.74	0.01	0.00	III	TYJ696	0.06	0.47	0.48	0.00	0.00	III
	TYJQ20	0.02	0.08	0.18	0.50	0.22	IV	TYJQ20	0.04	0.18	0.61	0.17	0.00	III
	TYJ276	0.03	0.04	0.43	0.50	0.00	IV	TYJ276	0.03	0.15	0.51	0.32	0.00	III
	TYJ228	0.02	0.11	0.28	0.58	0.00	IV	TYJ228	0.00	0.28	0.66	0.06	0.00	III
	TYJ699	0.05	0.36	0.58	0.00	0.00	III	TYJ699	0.03	0.26	0.68	0.02	0.00	III
	TYJC30	0.05	0.27	0.67	0.01	0.00	III	TYJC30	0.03	0.10	0.72	0.15	0.00	III
	TYJ703	0.07	0.24	0.70	0.00	0.00	III	TYJ703	0.05	0.52	0.43	0.00	0.00	II
	TYJC58	0.03	0.15	0.57	0.25	0.00	III	TYJC58	0.02	0.05	0.19	0.47	0.13	IV
	TYJ245	0.04	0.16	0.76	0.04	0.00	III	TYJ245	0.03	0.13	0.52	0.32	0.00	III
	TYJQ15	0.05	0.16	0.78	0.02	0.00	III	TYJQ15	0.02	0.15	0.51	0.31	0.00	III
	TYJQ16	0.03	0.09	0.57	0.31	0.00	III	TYJQ16	0.03	0.14	0.38	0.46	0.00	IV
	TYJ227	0.02	0.10	0.48	0.39	0.00	III	TYJ227	0.03	0.10	0.63	0.25	0.00	III
	TYJC44	0.03	0.29	0.68	0.00	0.00	III	TYJC44	0.03	0.14	0.81	0.02	0.00	III
	TYJC55	0.00	0.05	0.36	0.38	0.06	IV	TYJC55	0.03	0.11	0.21	0.64	0.00	IV
	TYJ-DY	0.05	0.44	0.51	0.00	0.00	III	TYJ-DY	0.02	0.13	0.37	0.48	0.00	IV
	TYJ664	0.02	0.05	0.16	0.54	0.19	IV	TYJ664	0.02	0.15	0.48	0.34	0.00	III
	TYJ-GC	0.04	0.14	0.61	0.21	0.00	III	TYJ-GC	0.06	0.49	0.45	0.00	0.00	II
	TYJ702	0.03	0.14	0.57	0.26	0.00	III	TYJ702	0.00	0.34	0.62	0.05	0.00	III

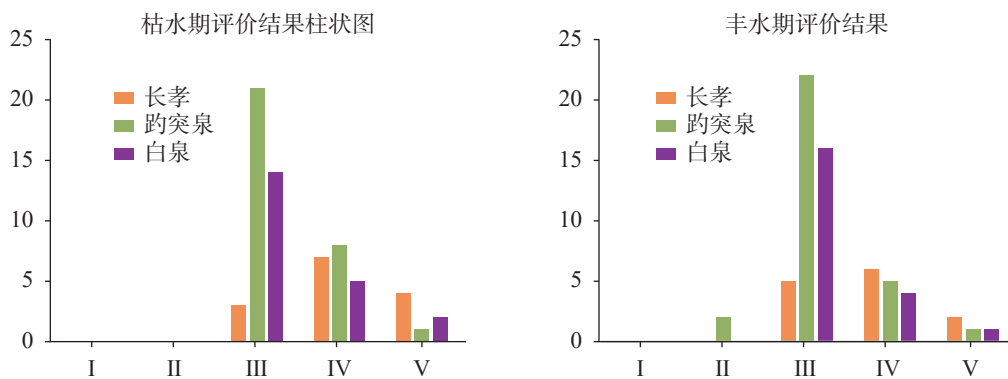


图 5 水质评价结果柱状图

Fig. 5 Histogram of evaluation results of water quality

地下水污染较严重。

总之,三个岩溶水系统枯水、丰水期水质大致以Ⅲ类水为主,受污染程度较低,枯水期有7个水样点为Ⅴ类水,其中长孝岩溶水系统有4个,趵突泉岩溶水系统有1个,白泉岩溶水系统有2个;丰水期仅有4个水样点为Ⅴ类水,其中,长孝岩溶水系统有两个,趵突泉及白泉岩溶水系统各有1个。枯水、丰水期水样点相比较,丰水期水质优于枯水期,趵突泉岩溶水系统水质最好,其次为白泉岩溶水系统,长孝岩溶水系统受污染最严重。

4 结论与建议

(1)长孝、趵突泉及白泉三个岩溶水系统中地下水均为弱碱性水,硬度较小,TDS值均 $<1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中,TDS值及TH值表现为长孝 $>$ 白泉 $>$ 趵突泉。离子浓度均表现为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$,三个岩溶水系统水质在枯水期均较丰水期水质差。

(2)长孝、趵突泉及白泉的水化学类型大致相同,主要为钙型水和重碳酸混合型水。长孝岩溶水系统和趵突泉岩溶水系统主要以 $\text{SO}_4\text{-Cl-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主、白泉岩溶水系统主要以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主。根据piper三线图和由吉布斯图可知,长孝、趵突泉及白泉三个岩溶水系统中地下水主要离子主要来源于岩石风化。由离子比值图可知,研究区内主要水化学作用是碳酸盐岩、蒸发岩盐的溶解以及阳离子交换作用。

(3)长孝、趵突泉及白泉三个岩溶水系统枯、丰两期水质以Ⅲ类水为主,占比均超过50%,说明研究区内岩溶地下水受污染程度较小。枯、丰两期水样点相比较,丰水期水质优于枯水期,趵突泉岩溶水系统水质最好,其次为白泉岩溶水系统,长孝岩溶水系统受污染最严重。

(4)岩溶水资源环境保护方面的建议:①政府要规范工业用水管理,实行定额制度,避免不合理地使用水资源。用水量大的行业要推广和应用节水措施,尽量提高用水效率。禁止建设与取水设施无关的建筑物禁止倾倒、堆放工业废渣及城市垃圾、粪便和其它有害废弃物;②禁止输送污水的渠道、管道及输油管道通过水源地保护区;③禁止建设油库。避免出现对地下水产生的各类污染,禁止城市垃圾、粪便

和易溶、有毒有害废弃物的堆放场站,因特殊需要设立转运站的,必须经有关部门批准,并采取防渗漏措施;④农业方面逐步完善灌溉制度,积极引进新技术、新工艺,节约用水;不得使用不符合《GB5084—2005农田灌溉水质标准》的污水进行灌溉,合理使用化肥;保护水源林,禁止毁林开荒,禁止非更新砍伐水源林。⑤提高市民的水资源保护意识,促进水资源管理。可对水资源进行标准化管理,鼓励节约用水。

参考文献

- [1] 武东强,邢立亭,兰晓荀,孟庆晗,侯玉松,赵振华,孙斌,袁学圣. 济南岩溶含水介质孔隙结构特征[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 680-688.
WU Dongqiang, XING Liting, LAN Xiaoxun, MENG Qinghan, HOU Yusong, ZHAO Zhenhua, SUN Bin, YUAN Xuesheng. Pore structure characteristics of karst water-bearing media in Jinan[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 680-688.
- [2] 赵一,邹胜章,申豪勇,周长松,樊连杰,朱丹尼,李军. 会仙湿地岩溶地下水系统水位动态特征与均衡分析[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 325-333.
ZHAO Yi, ZOU Shengzhang, SHEN Haoyong, ZHOU Changsong, FAN Lianjie, ZHU Danni, LI Jun. Dynamic characteristics and equilibrium of water level of the karst groundwater system beneath the Huixian Wetland[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 325-333.
- [3] 李传生,祁晓凡,王雨山,安永会,邢立亭. 我国北方典型岩溶地下水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.
LI Chuansheng, QI Xiaofan, WANG Yushan, AN Yonghui, XING Liting. Response characteristics of typical karst groundwater level of central Shandong Province to precipitation and climatic index[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 643-652.
- [4] 孙斌,邢立亭,李常锁. 趵突泉泉域岩溶水典型污染组分变化特征及污染途径[J]. 中国岩溶, 2018, 37(6): 810-818.
SUN Bin, XING Liting, LI Changsuo. Variation of typical pollution components and pollution way of karst water in Baotu Spring region[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(6): 810-818.
- [5] 迟光耀,邢立亭,侯新宇,黄林显,杨奕,张文静. 基于小波分析与Mann-Kendall法的岩溶大泉动态研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 515-526.
CHI Guangyao, XING Liting, HOU Xinyu, HUANG Linxian, YANG Yi, ZHANG Wenjing. Study of large karst springs using the wavelet analysis and Mann-Kendall methods[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 515-526.
- [6] 隋海波,康凤新,李常锁,韩建江,邢立亭. 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.
SUI Haibo, KANG Fengxin, LI Changsuo, HAN Jianjiang, XING Liting. Relationship between north Ji'bei geothermal water

- and Ji'nan spring water revealed by hydrochemical characteristics[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 49-58.
- [7] Gao S, Li C, Jia C, Zhang H, Guan Q, Wu X, Wang J, Lv M. Health risk assessment of groundwater nitrate contamination: A case study of a typical karst hydrogeological unit in East China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(9): 9274-9287.
- [8] 王珺瑜, 王家乐, 靳孟贵. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J]. *地球科学*, 2017, 42(5): 821-831.
WANG Junyu, WANG Jiale, JIN Menggui. Hydrochemical characteristics and formation causes of karst water in Jinan spring catchment[J]. *Earth Science*, 2017, 42(5): 821-831.
- [9] 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, 38.
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, 38.
- [10] 李江柏, 邢立亭, 侯玉松, 邢学睿, 邓忠, 张凤娟, 孟庆哈, 武东强. 基于模糊相似优先比法的济南四大泉群补给来源[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(3): 918-926.
LI Jiangbai, XING Liting, HOU Yusong, XING Xuerui, DENG Zhong, ZHANG Fengjuan, MENG Qinghan, WU Dongqiang. Replenishment sources of four great springs in Jinan based on fuzzy similarity priority ratio[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(3): 918-926.
- [11] 安强, 魏传江, 贺华翔, 崔英杰, 聂倩文. 基于模糊综合评价法的河南省中原城市群水资源承载力评价研究[J]. *节水灌溉*, 2019(12): 65-71.
AN Qiang, WEI Chuanjiang, HE Huaxiang, CUI Yingjie, NIE Qianwen. Evaluation of water resources carrying capacity of central plains urban agglomeration in Henan Province based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(12): 65-71.
- [12] 崔永正, 刘涛. 黄河流域农业用水效率测度及其节水潜力分析[J]. *节水灌溉*, 2021(1): 100-103.
CUI Yongzheng, LIU Tao. Measurement of agricultural water use efficiency and its water saving potential in the Yellow River Basin[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(1): 100-103.
- [13] 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.
DONG Yongmei, SU Guangxing, LI Zhanhua. Probing the western boundary of Jinan springs from the water pumping test in Jixi[J]. *Water Resources Protection*, 2004(3): 58-59.
- [14] 曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闯, 廖家豪. 贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1761-1771.
CAO Xingxing, WU Pan, YANG Shidi, LIU Shan, LIAO Jiahao. Hydrochemistry characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the caohai lake wetland catchment of Guizhou Province[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1761-1771.
- [15] 孙瑛, 陈广桐. 模糊数学方法在湖泊水质评价中的应用[J]. *山东工业大学学报*, 1994(2): 154-158.
SUN Ying, CHEN Guangtong. Application of fuzzy mathematics in assessment of lake water quality[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 1994(2): 154-158.
- [16] 付佳妮, 孙建明, 林青. 青岛市黄岛区潮河水源地地下水数值模拟[J]. *山东国土资源*, 2015, 31(7): 45-49.
FU Jiani, SUN Jianming, LIN Qing. Numerical simulation of groundwater of Chaohe river in Huangdao district in Qingdao City[J]. *Shandong Land and Resources*, 2015, 31(7): 45-49.
- [17] 彭康宁, 张卫, 朱恒华, 周建伟, 万豪杰, 赵骏. 山东招远市地下水水化学特征及水质评价[J]. *安全与环境工程*, 2018, 25(4): 106-111, 138.
PENG Kangning, ZHANG Wei, ZHU Henghua, ZHOU Jianwei, WAN Haojie, ZHAO Jun. Hydro-chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in Zhaoyuan City, Shandong[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(4): 106-111, 138.
- [18] 凌敏华, 左其亭. 水质评价的模糊数学方法及其应用研究[J]. *人民黄河*, 2006(1): 34-36.
LING Minhua, ZUO Qiting. Research on fuzzy mathematical method and application of water quality evaluation[J]. *Yellow River*, 2006(1): 34-36.
- [19] 李贵恒, 冯建国, 鲁统民, 高宗军, 赫明浩. 泰莱盆地地下水水化学特征及水质评价[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(4): 52-55, 121.
LI Guiheng, FENG Jianguo, LU Tongmin, GAO Zongjun, HE Minghao. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of groundwater in Tailai Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(4): 52-55, 121.
- [20] 冯建国, 鲁统民, 高宗军, 李贵恒, 刘久潭, 杨海博. 新泰市地下水水化学特征及成因探讨[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(1): 11-20.
FENG Jianguo, LU Tongmin, GAO Zongjun, LI Guiheng, LIU Jiutan, YANG Haibo. Hydrochemical characteristics and causes of groundwater in Xintai City[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 39(1): 11-20.
- [21] 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.
- [22] 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. Genesis relation of surface and underground rivers and reservoir characteristics in pale-

- okarst drainage systems: A case study of Ordovician karst in the Tahe oilfield[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 653-662.
- [23] 李波, 王金晓, 吴璇, 刘春伟, 徐聪聪, 罗斐, 滕跃. 山东莱芜盆地东部水文地质条件及富水块段特征[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(5): 637-649.
- LI Bo, WANG Jinxiao, WU Xuan, LIU Chunwei, XU Congcong, LUO Fei, TENG Yue. Hydrogeological conditions and characteristics of water-rich sections in the eastern Laiwu basin, Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 637-649.
- [24] 吴亚楠, 王延岭, 周绍智, 唐丽伟, 焦玉国. 基于综合指数法的泰莱盆地岩溶塌陷风险性评价[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 391-399.
- WU Yanan, WANG Yanling, ZHOU Shaozhi, TANG Liwei, JIAO Yuguo. Risk assessment of karst collapse in the Tailai basin based on the synthetic index method[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 391-399.
- [25] 高旭波, 王万洲, 侯保俊, 高列波, 张建友, 张松涛, 李成城, 姜春芳. 中国北方岩溶地下水污染分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 287-298.
- GAO Xubo, WANG Wanzhou, HOU Baojun, GAO Liebo, ZHANG Jianyou, ZHANG Songtao, LI Chengcheng, JIANG Chunfang. Analysis of karst groundwater pollution in Northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 287-298.

Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of karst water in Jinan City

LIU Wenyue¹, GAO Zongjun¹, XU Yuan², HAN Cong¹, LUO Zhenjiang², ZHAO Zhenhua²

(1. *Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China*; 2. *Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan, Shandong 251600, China*)

Abstract Karst groundwater is an important source recharge for springs in Jinan, and its water quality directly affects the effectiveness of spring protection work in this city. In this study, a total of 128 groundwater samples (64 each in the wet season and the dry season) were collected from the main karst hydrogeological units in Jinan—Changxiao karst water system, Baotu Spring karst water system and Baiquan karst water system in May (the dry season) and September (the wet season), and their water quality was tested. By means of mathematical statistics, correlation analysis, Piper three-line diagram, Gibbs model and ion ratio, the hydrochemical characteristics of groundwater in the study area were analyzed. Besides, the groundwater quality in this area was evaluated comprehensively by fuzzy evaluation method. The analysis may provide a basis for the hydraulic connection of the three karst water systems.

Results show that groundwater in the three karst water systems of Changxiao, Baotu Spring and Baiquan are all weakly alkaline water with low hardness, and TDS values are less than $1,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, among which TDS value and TH value show as Changxiao>Baiquan>Baotu Springs. The ion concentrations are as follows: $\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^{+}>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^{+}$, $\text{HCO}_3^{-}>\text{SO}_4^{2-}>\text{Cl}^{-}>\text{NO}_3^{-}$. The water quality of the three karst water systems is worse in the dry season than in the wet season. The chemical types of water in Changxiao, Baotu and Baiquan are roughly the same, mainly calcium type and bicarbonate-mixed water. The Changxiao karst water system and Baotu Spring karst water system are mainly of $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type, and the Baiquan karst water system is mainly of $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type. According to the piper three-line diagram and the Gibbs diagram, the main groundwater ions in the three karst water systems of Changxiao, Baotu Spring and Baiquan mainly come from rock weathering. It can be seen from the ion ratio diagram that the main hydrochemical effects in the study area are from the weathering and dissolution of carbonate rocks and evaporite salts and cation exchange. More than 50% of the water in the three karst water systems falls into Grade III in both the dry season and the wet season, indicating that the karst groundwater in the study area is less polluted. Compared with the water collected from sample points in two seasons, the water quality in the wet season is better than that in the dry season. The Baotu Spring karst water system has the best water quality, followed by the Baiquan karst water system.

In this study, suggestions on the environmental protection of karst water resources are put forward: (1) The government should standardize the management of industrial water use, implement a quota system, and avoid

(下转第 244 页)

mainly by raising the karst groundwater level in the western area so as to prevent the westward diversion of groundwater in the northern runoff process in the southern mountainous area of Baotu Spring. In this process, the groundwater is concentrated in the spring outcropping area, and hence the spring discharge may increase. On the condition of protecting the nature infiltration of leakage zone, we can fully explore the water replenishment function and increase the replenishment of major leakage zones of the Yufu river by water diversion, ecological restoration and pollution control. The research finding shows that delimiting major protection areas for leakage zones is important for us to ensure the continuous gushing of springs. This study also provides a basis for the accurate and scientific protection of springs as well as technical support for urban development planning and protection of the famous springs in Jinan.

Key words the region of Baotu Spring, major leakage zone, leakage recharge, protection of karst springs

(编辑 黄晨晖)

(上接第 232 页)

unreasonable use of water resources. (2) Transporting sewage channels, pipelines and oil pipelines through protection area of water source should be prohibited. (3) The construction of oil depots in protection areas should be prohibited. (4) The government and institution should gradually improve the irrigation system in agriculture, and actively introduce new technologies and techniques to save water. (5) The government and related institutions should heighten citizens' awareness of water conservation and water resources protection, and promote standardized water resources management.

Key words karst area, groundwater, water quality evaluation, hydrochemical analysis, fuzzy evaluation

(编辑 张玲)