

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.02.021

“灰岩天窗”对济南泉水水化学组分的影响

武羽晓^{1,2}, 邢立亭^{3,*}, 袁春鸿^{1,2}, 吕晶^{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. 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250002)

摘 要: 泉水水化学组分逐年上升, 影响水质的因素较多。济南泉群出露区及附近分布有 3 处“灰岩天窗”, 面积约 0.6 km², 是孔隙水与岩溶水水力联系点, 易造成泉水污染。笔者以“灰岩天窗”周边地下水样品测试数据及天窗岩溶水与区域岩溶水样品测试数据为基础, 采用多元数理统计法, 运用水动力场与水化学场理论, 进行了水化学组分研究。结果表明, “灰岩天窗”孔隙水易遭受污染, 枯水期孔隙水水位高于岩溶水水位, 污染孔隙水补给岩溶水, “灰岩天窗”是影响泉水水化学组分的因素之一。

关键词: 济南; 泉水; 水化学组分; “灰岩天窗”

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)02-0237-12

Influence of “Limestone Skylight” on Hydrochemical Composition of Jinan Spring

WU Yuxiao^{1,2}, XING Liting^{3,*}, YUAN Chunhong^{1,2}, LÜ Jing^{1,2}

- (1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute), Jinan 250014, Shandong, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan 250014, Shandong, China; 3. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: The chemical composition of spring water is increasing year by year, and there are many factors affecting water quality. There are three “limestone skylight” distributed in and near the exposed area of Jinan spring group, with an area of about 0.6 km². They are the hydraulic connection point between pore water and karst water, which is easy to cause spring water pollution. Based on the test data of groundwater samples around the “limestone skylight” and the test data of skylight karst water and regional karst water samples, the hydrochemical components are studied by using the theory of hydrodynamic field and hydrochemical field. The results show that the pore water of “limestone skylight” is easy to be polluted. The pore water level in dry season is higher than that of karst water and the polluted pore water supplies karst water. Therefore, the

收稿日期: 2021-07-01; **修回日期:** 2021-11-30; **网络发表日期:** 2022-05-10; **责任编辑:** 姜寒冰

基金项目: 国家自然科学基金“北方岩溶水系统优势径流通道特征研究(41772257)”；山东省高校院所创新团队项目“济南岩溶大泉水循环过程及污染防控(2018GXRC012)”联合资助。

作者简介: 武羽晓(1970 -), 男, 高级工程师, 水文地质与环境地质研究。E-mail: sddkwyx@msn.cn.

*** 通讯作者:** 邢立亭(1966 -), 男, 教授, 从事水文地质教学研究。E-mail: 1054225685@qq.com.

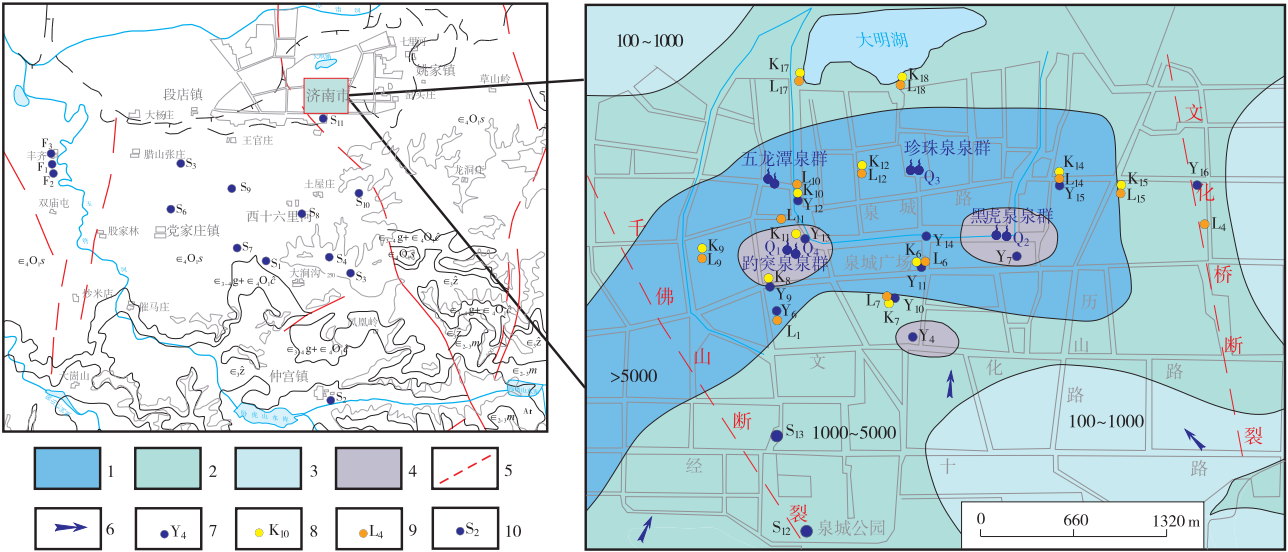
“limestone skylight” is one of the factors affecting the Hydrochemical Composition of spring water.

Keywords: Jinan; spring water; hydrochemical composition; “limestone skylight”

1 地质背景

因为济南城市中心具有岩溶大泉而闻名。为保护好泉水这一地质遗产,学者对泉水特征的研究从未止步(邢立亭等,2006;邢立亭,2007;徐军祥等,2008)。泉群地层基底为太古界泰山群,上覆古生界寒武系凤山组,奥陶系冶里-亮甲山组、马家沟组,受燕山晚期岩浆活动影响,普遍分布有侵入岩,隐伏于第四系之下。研究区岩溶含水岩组为寒武-奥陶系灰岩,文化路以北,历山路以西,明湖路以南为隐伏寒武-奥陶系灰岩主力含水区域,单井涌水量>5 000(m³/d)。研究表明,趵突泉泉群区、黑虎泉泉群区和泺文路南口3处岩浆岩被剥蚀缺失(房佩贤等,1984),面积约0.6 km²,形成了“灰岩天窗”。其中,趵突泉附近0~8.85 m 砾岩,8.85~36.80 m 大

理岩(连通形溶洞发育),36.80~77.92 m 白云质灰岩(54.00~54.90 m、58.50~59.80 m 为溶洞,60.50~77.50 m 岩溶极发育),77.92~148.08 m 石灰岩;黑虎泉附近0~15.52 m 砾岩,15.52~99.25 m 白云质灰岩(16.40~17.40 m 为溶洞,25.50~30.00 m 岩溶极发育,63.20~64.80 m、66.45~69.39 m 为溶洞);泺文路南口0~19.00 m 砾岩,19.00~30.90 m 泥质灰岩,裂隙极发育,30.90~66.00 m 白云质灰岩(30.90~33.50 m、37.10~37.60 m、45.00~46.00 m、62.50~66.00 m 为溶洞)。“灰岩天窗”是孔隙水与岩溶水水力联系点,枯水期孔隙水补给岩溶水易造成泉水污染(房佩贤等,1984)。笔者以南起马鞍山路,北至明湖路,西起大纬二路,东到山大路范围作为研究范围的核心区,重点研究了核心区地下水水化学组分特征,研究区水样点分布及核心区岩溶水水文地质现状见图1。



1. 核心区岩溶水涌水量>5 000(m³/d)区;2. 核心区岩溶水涌水量1 000~5 000(m³/d)区;3. 核心区岩溶水涌水量100~1 000(m³/d)区;4. 灰岩天窗;5. 断裂;6. 岩溶水流向;7. 岩溶水水样点及编号;8. 孔隙水水样点及编号;9. 裂隙水水样点及编号;10. 区域岩溶水水样点及编号

图1 研究区水样点分布及核心区岩溶水水文地质图

Fig. 1 Distribution of water samples in the study area and hydrogeological map of karst water at the core

水质测试表明,泉水水化学组分呈现逐年上升的趋势。21 世纪以来,趵突泉泉水 Cl⁻ 由 32.71→60.50 mg/L,SO₄²⁻ 由 62.56→109.00 mg/L,NO₃⁻ 由 28.75→46.80 mg/L,总硬度增大了 0.51 倍,矿

化度增大了 0.38 倍。2009 年以来,黑虎泉泉水 Cl⁻ 由 57.01→73.74 mg/L,SO₄²⁻ 由 102.43→119.88 mg/L,NO₃⁻ 由 47.29→54.84 mg/L,总硬度增大了 0.21 倍,矿化度增大了 0.21 倍。前人曾

以泉域为研究范围,对泉水水质方面进行过研究,从宏观上阐明岩溶水环境质量及其溶化(李大秋等,2002;徐军祥等,2004;李常锁等,2004)。对于济南岩溶水水质变化的主因,有学者进行了论证,认为泉水水质变化是人为干扰所致(杨丽芝等,2016)。虽然 20 世纪 90 年代后期济南陆续关停了东部矿山企业,整治了南部垃圾填埋场,但是泉水水化学组分仍然发生着变异,说明另有原因。笔者通过地下水水化学组分动态研究、区域岩溶水与天窗岩溶水水化学组分差异性对比、主径流带岩溶水与天窗岩溶水水化学组分对比及岩溶水与孔隙水水力关联研究等,旨在寻找泉水水化学组分变化的其他影响因素。

2 研究方法

2.1 数据来源

本次研究采用了济南市轨道交通建设对泉水影

响的研究资料(韩连山等,2010),采用了“济南趵突泉泉域地下水长期动态观测资料”,采用了济南四大泉群泉水补给来源混合比研究资料(邢立亭等,2018)。

2.2 水化学组分研究

笔者重点研究了岩溶水,采用多元数理统计法对岩溶水水质主成分进行了分析(秦兵等,2012);运用该方法对大同盆地高 F 地下水水化学特征及其成因进行分析统计;运用水化学场与水动力场理论对泉水补给区、径流区和排泄区岩溶水水化学组分特征进行了分析。

3 研究结果、讨论

3.1 水化学组分

研究区地下水水样区位特点及水化学组分特征(表 1)。

表 1 地下水水化学组分表(mg/L)
Tab. 1 The data of hydrochemical component of groundwater samples(mg/L)

样品所在 区域	点位	编号	水 化 学 组 分									资料 来源
			Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	矿化度	总硬度	
排泄区	审计厅	K ₉	68.57	83.24	15.04	100.40	154.78	179.37	11.80	660.03	269.77	韩连 山等, 2010
		L ₉	65.71	100.95	16.11	98.70	145.67	186.19	11.60	651.85	318.42	
	上新街小学	L ₁	68.00	175.34	19.87	131.03	161.61	367.83	58.95	1009.22	519.65	
		Y ₆	18.75	118.67	17.19	49.35	75.11	279.28	44.80	620.55	367.07	
	泉城路西口	K ₁₀	72.00	154.97	25.24	111.46	177.54	345.12	49.20	956.62	490.90	
		L ₁₀	46.67	38.08	12.89	62.96	75.11	95.36	4.13	345.57	148.15	
		Y ₁₂	14.29	94.76	19.33	32.33	70.56	247.49	30.50	522.86	316.21	
	省府前街	K ₁₂	84.00	143.46	22.56	110.61	184.27	379.18	49.50	1039.53	451.10	
		L ₁₂	86.00	121.32	10.74	116.57	136.57	213.43	44.75	799.20	347.17	
	大明湖 西南门	K ₁₇	68.57	123.98	29.00	82.53	127.46	413.24	18.07	894.97	428.99	
		L ₁₇	71.43	91.21	27.93	87.64	154.78	288.36	9.44	766.80	342.75	
	香格里 拉酒店	K ₇	87.50	162.94	23.63	148.05	172.99	435.95	34.62	1131.76	504.17	
		L ₇	55.00	109.81	19.87	91.04	95.60	299.71	40.00	739.77	356.01	
		Y ₁₀	25.71	109.81	20.41	51.05	68.28	277.01	41.96	610.22	358.23	
	省科技馆	K ₆	87.69	60.22	26.85	129.33	182.09	281.55	3.27	878.98	260.93	
		L ₆	88.00	147.00	28.46	131.03	163.88	535.85	3.03	1190.32	484.27	
		Y ₁₁	18.75	102.73	17.19	40.84	63.73	274.74	39.83	574.54	327.27	
	大明湖南门	K ₁₈	72.00	130.18	32.22	91.89	77.39	517.69	21.81	982.39	457.73	
		L ₁₈	31.11	136.38	33.30	88.49	77.39	367.83	58.75	819.40	477.63	
	珍珠泉	Q ₃	12.50	88.56	21.48	27.23	50.08	256.57	24.71	497.33	309.58	

240	西 北 地 质			NORTHWESTERN GEOLOGY							2022 年	
续表 1												
样品所在 区域	点 位	编 号	水 化 学 组 分									资料 来源
			Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	矿化度	总硬度	
排泄区	县西巷	L ₁₁	48.00	46.94	20.41	63.82	70.56	186.19	0.10	445.86	201.23	韩连 山等, 2010
	趵突泉北门	Y ₁₄	16.67	92.10	17.19	34.03	63.73	245.22	25.27	510.59	300.73	
	中心医院	Y ₁₆	32.00	80.16	15.04	53.18	71.71	171.44	46.55	496.72	262.09	
	历山东路	L ₄	37.78	170.03	27.93	105.51	120.64	354.21	59.53	899.46	539.55	
		K ₁₄	70.00	139.03	27.39	119.97	113.81	381.45	50.38	969.96	459.94	
	青龙桥	L ₁₄	50.00	113.35	17.19	62.11	86.49	308.80	40.96	705.10	353.80	
		Y ₁₅	16.67	101.84	17.19	33.18	68.28	258.84	26.55	537.20	325.06	
	解放桥	K ₁₅	36.36	180.66	22.56	102.10	122.91	408.70	40.00	942.19	543.97	
		L ₁₅	38.18	164.72	23.63	100.00	100.15	388.26	42.56	894.86	508.59	
灰岩 天窗	趵突泉	Q ₁	20.16	110.33	22.62	47.11	76.87	256.05	40.40	587.50	358.68	韩连 山等, 2010
	漱玉泉	Q ₄	17.14	108.92	22.56	40.84	104.70	263.38	36.47	608.06	364.86	
	黑虎泉	Q ₂	24.00	118.67	20.94	57.01	102.43	258.84	47.29	643.89	382.55	
	趵突泉北门	K ₁₁	140.0	183.31	38.13	177.83	168.43	599.43	99.48	1476.98	614.73	
		Y ₁₃	31.11	91.21	26.32	51.05	106.98	261.11	31.06	615.44	336.11	
	圣凯财富	Y ₇	25.71	123.09	23.63	56.16	106.98	304.25	42.73	698.84	404.66	
	泺文路	Y ₄	33.33	113.35	20.94	62.96	43.25	338.31	30.89	657.51	369.28	
	饮虎池	K ₈	22.86	108.04	18.80	40.84	86.49	277.01	40.58	613.08	347.17	
		Y ₉	17.50	113.35	15.04	41.69	66.01	267.93	38.55	576.24	344.96	
排泄区	齐鲁医院	K ₀₀₃	70.00	172.27	22.71	83.61	211.15	408.97	48.10	1020.0	523.68	长测 2006
	珍珠泉	Q ₂₁₉	21.70	106.81	19.57	46.80	82.28	254.74	37.13	584.10	347.28	2019
		Q ₂₂₀	21.10	105.0	20.60	47.60	89.40	246.43	39.10	587.36	347.05	2020
	回民中学	K ₀₀₁	52.00	187.87	22.79	114.19	157.65	366.96	77.02	984.47	562.93	2003
	万达广场	K ₀₀₄	90.00	191.23	26.23	160.18	191.2	405.81	69.71	1151.3	589.9	2009
灰岩 天窗	趵突泉	Q _{b19}	29.26	128.46	23.21	57.79	102.50	280.79	45.07	681.67	416.33	2019
		Q _{b20}	30.80	121.00	22.40	60.50	109.00	276.48	46.80	684.80	394.42	2020
	圣凯财富	K ₀₀₂	100.0	184.9	22.19	95.45	279.26	224.97	207.5	1121.2	553.05	2005
	黑虎泉	Q _{h19}	39.40	127.0	22.10	73.30	126.00	282.49	52.00	738.56	408.17	2019
		Q _{h20}	41.37	144.49	24.67	73.74	119.88	306.85	54.84	781.81	462.37	2020
补给区	兴隆山庄	S ₁₀	13.64	108.66	26.63	45.80	97.80	249.65	21.20	607.25	381.48	邢立 亭等, 2018
	南郊宾馆	S ₁₁	24.00	128.08	26.07	67.86	93.45	306.63		716.55	427.17	
	后龙庄	S ₉	15.00	130.82	20.53	54.29	82.59	293.06		667.07	411.18	
	石青崖	S ₄	7.78	117.10	22.19	40.71	73.89	284.92		605.69	383.77	
	小岭子	S ₁	5.56	104.29	16.64	30.54	39.12	271.36	40.07	519.56	328.94	
	大庙屯	S ₅	11.67	118.01	22.19	44.11	91.28	279.50		635.47	386.05	
	FJ18 部队	S ₈	20.00	121.67	23.86	59.37	80.41	298.49	34.42	654.96	402.04	
	小白庄	S ₇	8.89	128.08	16.64	37.32	73.89	290.35	20.48	621.88	388.34	
	凤凰村	S ₃	5.56	100.63	14.98	18.66	91.28	244.22		515.56	312.95	

续表 1

样品所在 区域	点位	编号	水 化 学 组 分								资料 来源	
			Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	矿化度		总硬度
补给区	东泉庐	S ₂	6. 67	112. 52	17. 20	37. 32	86. 93	233. 37		553. 68	351. 79	邢立 亭等, 2018
	力明学院	S ₆	15. 45	123. 50	17. 20	42. 41	78. 24	287. 64		632. 62	379. 20	
径流区	省广电	S ₁₃	15. 00	131. 73	19. 42	54. 29	99. 97	276. 78		664. 95	408. 89	
	植物园	S ₁₂	11. 10	102. 18	14. 58	25. 36	70. 70	237. 88	45. 56	528. 73	315. 20	
西郊 天窗		F ₁	14. 88	78. 56	15. 07	33. 33	55. 71	196. 16	34. 01	441. 78	258. 21	长测 2018
	丰齐村	F ₂	13. 70	57. 72	12. 76	23. 04	47. 55	171. 64	7. 96	346. 93	196. 66	
		F ₃	14. 96	80. 56	16. 29	36. 87	45. 63	232. 94	10. 41	450. 73	268. 21	

注:编号中 K 代表孔隙水,L 代表裂隙水,Y、S、F 代表岩溶水,Q 代表泉水。测试单位:山东省地矿局八〇一水文地质工程地质大队;测试人员:董淑娟、胡兰英、孙怀文、沈淑宁、高帅、范晓静、赵志明、张田田;测试方法:采用了 Optima7 000 dv 电感耦合等离子体发射光谱仪与 Thermo 赛默飞离子色谱仪 ICS-600 测试手段,部分离子采用了滴定法;测试条件室温 25°左右,湿度 50 度左右;误差:±10%。

3. 1. 1 孔隙水水化学组分

运用济南轨道交通建设对泉水影响的研究资料,依次对孔隙水、裂隙水和岩溶水水化学特征进行分析。

(1)孔隙水水化学组分特征(图 2)。孔隙水阴离子主要为 HCO₃⁻,其次是 SO₄²⁻、Cl⁻;阳离子以 Ca²⁺ 为主,Na⁺ 次之,矿化度一般大于 900 mg/L,趵突泉北门最高为 1 477. 98 mg/L(图 2)。

(2)孔隙水水化学组分多年变化趋势。以回民中学(2003)-圣凯财富广场(2005)-齐鲁医院(2006)-万达广场(2009)-趵突泉门对门(2010)一带的孔隙水为例(图 3)。

从图 3 看出,2003~2010 年孔隙水水化学组分总体呈现出随时间缓慢增大的趋势,圣凯财富广场表现为一个高值区。

3. 1. 2 裂隙水水化学组分

裂隙水水化学组分特征(图 4)。裂隙水阴离子以 HCO₃⁻ 为主,SO₄²⁻、Cl⁻ 次之;阳离子以 Ca²⁺ 为主,矿化度约为 750 mg/L;上新街小学、省科技馆附近大于 1 000 mg/L,主要组分为 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺,而且出现 Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 等,说明主要来自孔隙水补给,与孔隙水水力联系密切(图 4)。

3. 1. 3 岩溶水水化学组分

(1)岩溶水水化学组分特征(表 2)。表 2 显示,岩溶水阴离子主要为 HCO₃⁻,其次 SO₄²⁻;阳离子主要为 Ca²⁺,其次 Mg²⁺。一般情况下,基岩山区地下径流条件好,地下水循环交替快,岩层表面被降雨不断冲洗,不利于矿化,形成低矿化水(白福等,2007)。岩溶水径流中不断地发生水-岩反应,因为围岩为碳酸盐岩,所以形成为 HCO₃-Ca 型水(周鑫等,2012)。

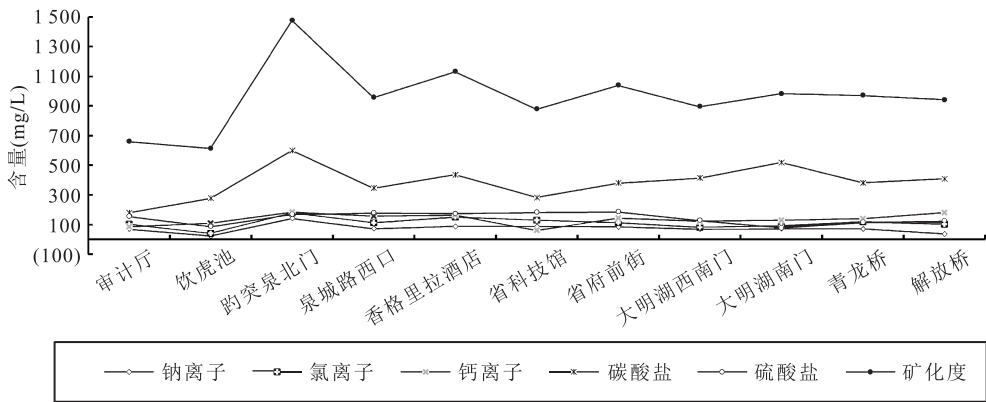


图 2 孔隙水水化学组分特征图

Fig. 2 Characteristic diagram of chemical composition of pore water

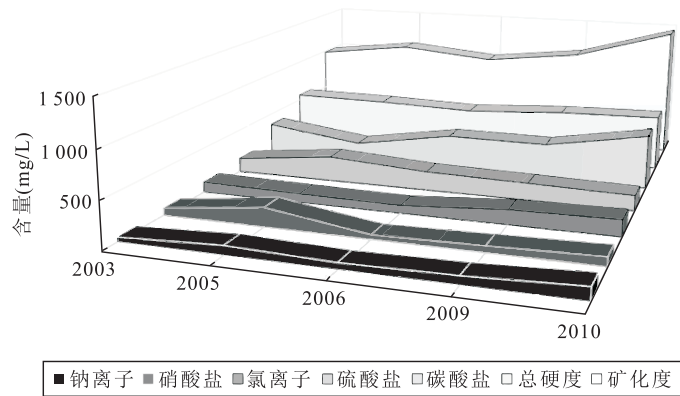


图 3 2003~2010 年孔隙水水化学组分变化趋势图

Fig. 3 Variation trend of hydrochemical components of pore water from 2003 to 2010 year

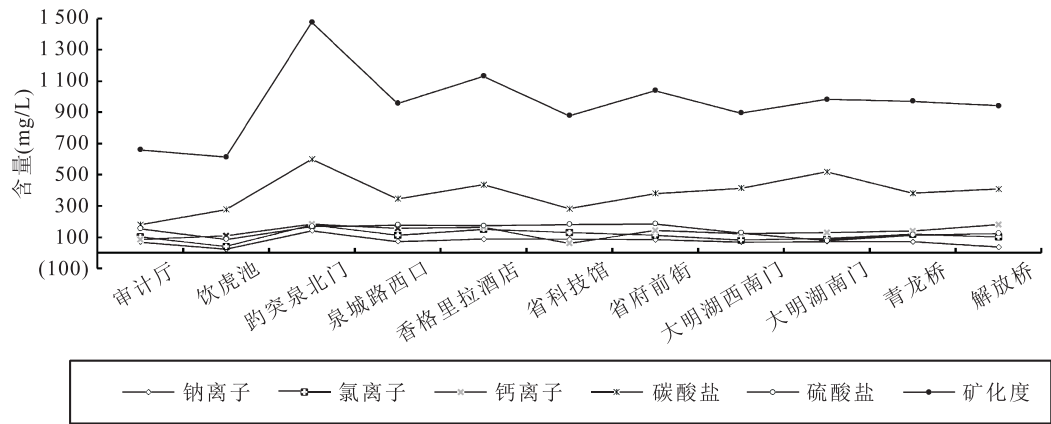


图 4 裂隙水水化学组分特征图

Fig. 4 Chemical composition characteristics of fracture water

表 2 岩溶水化学组分区间值表(mg/L)

Tab. 2 Interval value table of chemical composition of karst water(mg/L)

项目	各离子	含量区间值
阴离子	HCO ₃ ⁻	171.44~338.31
	SO ₄ ²⁻	43.25~106.98
	Cl ⁻	32.33~62.96
	NO ₃ ⁻	25.27~46.55
阳离子	Ca ²⁺	80.16~123.09
	Mg ²⁺	15.04~26.32
总硬度		262.09~404.66
矿化度		496.72~698.84
pH		7.0~8.0

(2)岩溶水水化学组分多年变化趋势。以趵突泉泉水为例,泉水多年水化学组分变化趋势(图 5)。图 5 显示,从 1958~2020 年,趵突泉泉水 NO₃⁻、

Cl⁻、SO₄²⁻ 不断在增大,其中 Cl⁻ 增大到原来的 6.71 倍,SO₄²⁻ 增大到原来的 12.98 倍,总硬度增大到原来的 2.44 倍,矿化度增大到原来的 3.30 倍。1996~2020 年 NO₃⁻ 增大到原来的 1.84 倍(杨丽芝等,2016)。

3.2 泉水水化学组分形成作用

泉域范围地下水径流、储蓄持续发生于岩溶空间,逐渐转化为岩溶水。文化路以北地下岩溶特别发育,溶洞直径介于 0.01~3 m,而且溶洞之间连通性极好,成为巨型网络状蓄水空间,受北部岩浆岩阻挡,在南部水头压力作用下喷涌成泉,形成为岩溶大泉。

3.2.1 岩溶水水质主成分分析

(1)岩溶水水化学组分成因。笔者运用多元数理统计法,选取 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、NO₃⁻、矿化度、pH 为变量,通过变量间相关程度及因子特征值和方差百分比来认识岩溶水主成分成因,变量之间相关性分级情况见表 3。

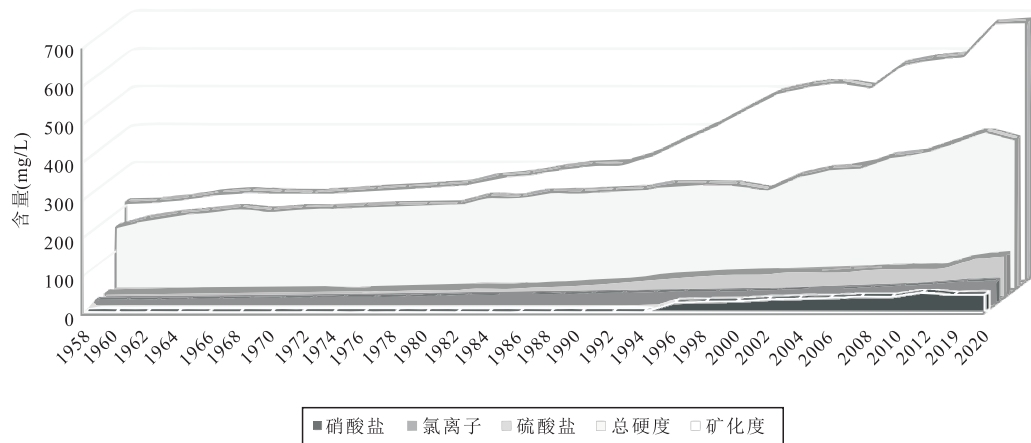


图 5 泉水多年水化学组分变化趋势图

Fig. 5 Variation trend of hydrochemical components of spring water for many years

表 3 变量相关性分级表

Tab. 3 Variable correlation classification table				
极强相关	强相关	中等相关	弱相关	无相关
0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2

通过 SPSS 软件对以上 10 个变量的统计分析, 自动生成了变量指标相关性矩阵表(表 4)、因子特征值与方差百分比表(表 5)和方差旋转后因子得分矩阵表(表 6)。

表 4 变量指标相关性矩阵表

Tab. 4 Variable index correlation matrix table										
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	矿化度	pH
K ⁺	1.000	0.774	0.390	0.514	0.824	0.769	0.037	-0.189	0.848	-0.097
Na ⁺	0.774	1.000	-0.122	0.639	0.982	0.875	-0.402	-0.451	0.622	-0.428
Ca ²⁺	0.390	-0.122	1.000	-0.011	0.043	0.029	0.807	0.525	0.669	0.231
Mg ²⁺	0.514	0.639	-0.011	1.000	0.627	0.670	0.012	-0.427	0.591	-0.197
Cl ⁻	0.824	0.982	0.043	0.627	1.000	0.880	-0.286	-0.352	0.727	-0.444
SO ₄ ²⁻	0.769	0.875	0.029	0.670	0.880	1.000	-0.367	-0.333	0.680	-0.384
HCO ₃ ⁻	0.037	-0.402	0.807	0.012	-0.286	-0.367	1.000	0.414	0.385	0.501
NO ₃ ⁻	-0.189	-0.451	0.525	-0.427	-0.352	-0.333	0.414	1.000	0.083	0.151
矿化度	0.848	0.622	0.669	0.591	0.727	0.680	0.385	0.083	1.000	-0.067
pH	-0.097	-0.428	0.231	-0.197	-0.444	-0.384	0.501	0.151	-0.067	1.000

决定因子=2.212E-10

从表 5、表 6 可以看出,SPSS 自动提取出 2 个决定因子,方差累积百分比为 77.873%。其中,第 1 因子占比 50.062%,由 Cl⁻、K⁺、SO₄²⁻、Na⁺、Mg²⁺ 和矿化度组成。通过表 3 与表 4 对照看出,Cl⁻ 与 Na⁺、K⁺ 呈极强相关,说明来源一致,Cl⁻ 来源孔隙水,所以 Cl⁻、K⁺、Na⁺ 主要来源孔隙水;SO₄²⁻ 与燃煤量增长、汽车尾气量增大相关,大气中硫氧化物随雨水进入孔隙水生成 SO₄²⁻;Mg²⁺ 和 HCO₃⁻ 不相关,说明来源不一致。以上变量之间相关性说明岩溶水与孔隙水存

在水力联系点。第 2 个因子占比 27.811%,由 HCO₃⁻、Ca²⁺、NO₃⁻ 和矿化度组成,Ca²⁺ 与 HCO₃⁻ 极强相关,说明 Ca²⁺ 与 HCO₃⁻ 来源是一致的,两者均是经碳酸盐岩溶滤形成;NO₃⁻ 含量相对高,说明受到了人类活动的污染,如城市生活污染、农业污染等。

(2)岩溶水总硬度及矿化度特征。岩溶水总硬度与矿化度均较低,总硬度一般为 300~400 mg/L,矿化度一般为 500~600 mg/L,具体各研究点岩溶水总硬度与矿化度特征分析见图 6。

表 5 因子特征值与方差百分比表

特征值	方差百分比(%)	累积(%)
1	5.006	50.062
2	2.781	77.873
3	0.993	87.804
4	0.583	93.630
5	0.363	97.259
6	0.176	99.017
7	0.086	99.875
8	0.010	99.979
9	0.002	99.997
10	0.000	100.000

表 6 方差旋转后因子得分矩阵表

	决定因子 1	决定因子 2
K ⁺	0.911	0.147
Na ⁺	0.895	−0.382
Ca ²⁺	0.281	0.914
Mg ²⁺	0.735	−0.133
Cl [−]	0.940	−0.246
SO ₄ ^{2−}	0.900	−0.266
HCO ₃ [−]	−0.042	0.921
NO ₃ [−]	−0.270	0.646
矿化度	0.886	0.456
pH	−0.304	0.517

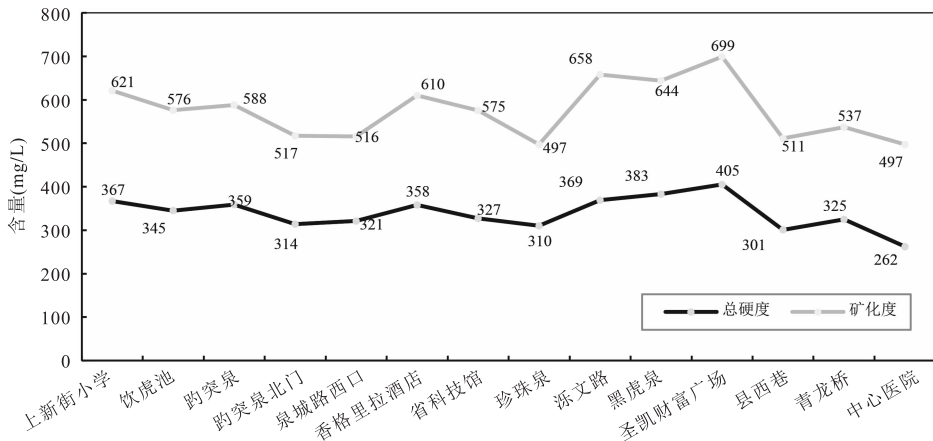


图 6 岩溶水总硬度与矿化度特征分析图

Fig. 6 Analysis chart of total hardness and mineralization degree of karst water

图 6 显示泺文路、黑虎泉、圣凯财富广场总硬度和矿化度明显偏高,此 3 水样点正好位于泺文路南口及黑虎泉泉群 2 处“灰岩天窗”,孔隙水与岩溶水发生水力联系,持续改变岩溶水水化学组分。

(3)“灰岩天窗”孔隙水与岩溶水水化学组分关系。“灰岩天窗”孔隙水与岩溶水水化学组分对比图(图 7)。从图 7 饮虎池组孔隙水、岩溶水和趵突泉组孔隙水、岩溶水水化学组分对比看出,不同区位孔隙水与岩溶水水化学组分存在差异。同一区位孔隙水水化学组分含量高的离子,岩溶水对应离子也相应高,如 SO_4^{2-} ,说明岩溶水水化学组分与孔隙水补给存在较强相关性。

3.2.2 相邻含水层水质对岩溶水的影响

岩溶水与孔隙水、裂隙水水化学组分对比。香

格里拉酒店(K_7 、 Y_{10}) K_7 与 Y_{10} 对比, Cl^- 是 2.90 倍, SO_4^{2-} 是 2.53 倍,矿化度是 1.85 倍。青龙桥(K_{14} 、 Y_{15}) K_{14} 与 Y_{15} 对比, Cl^- 是 3.62 倍, SO_4^{2-} 是 1.67 倍, NO_3^- 是 1.90 倍,总硬度是 1.42 倍,矿化度是 1.81 倍,明显高于岩溶水。上新街小学(L_1 、 Y_6) L_1 与 Y_6 对比, Cl^- 是 2.66 倍, SO_4^{2-} 是 2.15 倍, NO_3^- 是 1.32 倍,总硬度是 1.42 倍,矿化度是 1.63 倍。省科技馆(L_6 、 Y_{11}) L_6 与 Y_{11} 对比, Cl^- 是 3.21 倍, SO_4^{2-} 是 2.57 倍,矿化度是 2.07 倍,均高于岩溶水。以上孔隙水、裂隙水与岩溶水水化学组分对比说明了香格里拉酒店、青龙桥、上新街小学和省科技馆等位置岩溶水水质受孔隙水、裂隙水水质影响少。

3.2.3 水动力场对岩溶水质的影响

为验证其他位置岩溶水、孔隙水和裂隙水水力

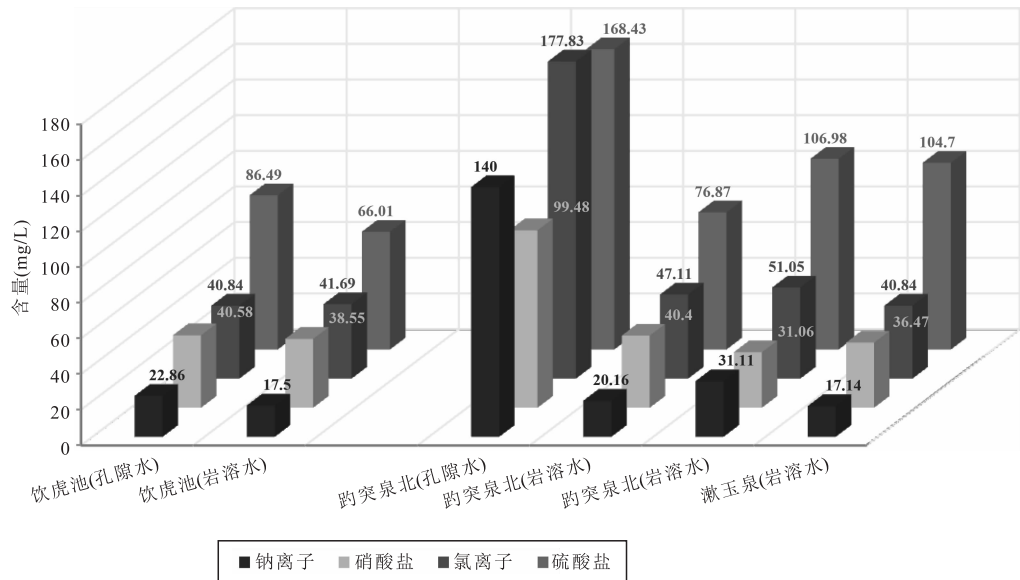


图 7 灰岩天窗内孔隙水与岩溶水水化学组分对比图

Fig. 7 Comparison of hydrochemical components of pore water and karst water in limestone skylight

关联性,在审计厅、省府前街、县西巷、大明湖西南门、大明湖南门、青龙桥和解放桥进行了对照性抽水试验。现场试验显示,对孔隙水或裂隙抽水时,周围岩溶水的水位变化甚微,证明了以上区位岩溶水与孔隙水、裂隙水水力联系不明显。以下分析了孔隙水与岩溶水水化学组分受流场的影响。

(1)孔隙水水化学组分受流场的影响。沿径流方向各点位孔隙水有关离子含量变化情况(表 7)。

表 7 孔隙水部分离子含量变化表(mg/L)
Tab. 7 Change table of partial ion content in pore water(mg/L)

南北向 ↓	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
香格里拉酒店(K ₇)	87.50	148.05	172.99	34.62
省科技馆(K ₆)	87.69	129.33	182.09	3.27
省府前街(K ₁₂)	84.00	110.61	184.27	49.50
大明湖南门(K ₁₈)	72.00	91.89	77.39	21.82
南北向 ↓	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
饮虎池(K ₈)	22.86	40.84	86.49	40.58
趵突泉北门(K ₁₁)	140.00	177.83	168.43	99.48
泉城路西口(K ₁₀)	72.00	111.46	177.54	49.20
大明湖西南门(K ₁₇)	68.57	82.53	127.46	18.07

从表 7 看出,孔隙水流经“灰岩天窗”时,除省科技馆 NO₃⁻ 外,其他点位水化学组分中 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 一般呈增大趋势。水质资料显示,香格

里酒店→省科技馆→省府前街→大明湖南门,水化学类型由 HCO₃ · Cl - Ca · Na 型→HCO₃ · SO₄ · Cl - Na · Ca 型→HCO₃ · SO₄ - Na · Ca 型→HCO₃ - Ca 型;饮虎池→趵突泉北门→泉城路西口→大明湖西南门,水化学类型由 HCO₃ - Ca 型→HCO₃ - Ca · Na 型→HCO₃ · SO₄ - Ca 型→HCO₃ - Ca · Na 型,“灰岩天窗”附近污染离子含量表现为偏高。

(2)岩溶水水化学组分受流场的影响。对岩溶水流场特征进行研究,总体特征表现为岩溶径流条件非常好(邢立亭等,2017)。沿径流方向各点位岩溶水有关离子含量变化情况(表 8)。

从表 8 看出,泺文路→香格里拉酒店→省科技馆→县西巷一线,趋近“灰岩天窗”Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 含量在升高(因 Y₄ 正位于灰岩天窗,故其 Na⁺、Cl⁻ 含量偏高);上新街小学→饮虎池→趵突泉北门→泉城路西口一线,在“灰岩天窗”附近 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 含量明显较高;中心医院→青龙桥→圣凯财富广场一线,越趋近“灰岩天窗”Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻ 更高。以上水化学组分受流场因素的分析说明了“灰岩天窗”对岩溶水水化学组分影响的客观性。

3.3 区域岩溶水水化学组分特点

3.3.1 补给区、径流区岩溶水与天窗岩溶水水化学组分对比

从补给区→径流区→排泄区,岩溶水水化学组分差异性对比情况见图 8。

表 8 岩溶水部分离子含量变化表(mg/L)
Tab. 8 Change table of partial ion content
in karst water(mg/L)

南北向 I ↓	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
涿文路(Y ₄)	33.33	62.96	43.25	30.89
香格里拉酒店(Y ₁₀)	25.71	51.05	68.28	41.96
省科技馆(Y ₁₁)	18.75	40.84	63.73	39.83
县西巷(Y ₁₄)	16.67	34.03	63.73	25.27
南北向 II ↓	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
上新街小学(Y ₆)	18.75	49.35	75.11	44.80
饮虎池(Y ₉)	17.50	41.69	66.01	38.55
趵突泉北门(Y ₁₃)	31.11	51.05	106.98	31.06
泉城路西口(Y ₁₂)	14.29	32.33	70.56	30.50
东西向 ↓	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
中心医院(Y ₁₆)	32.00	53.18	71.71	46.55
青龙桥(Y ₁₅)	16.67	33.18	68.28	26.55
圣凯财富广场(Y ₇)	25.71	56.16	106.98	42.73

图 8 显示,从东泉泸至黑虎泉补给区、径流区 SO₄²⁻ 一般在 85.00 mg/L 左右浮动,浮动值<10 mg/L;天窗区除涿文路南口外,都大于 106.00 mg/L;补给区、径流区 Cl⁻ 一般在 40.00~50.00 mg/L,天窗区 Cl⁻ 都大于 56.00 mg/L;补给区、径流区 NO₃⁻ 含量一般在 20.00~40.00 mg/L 之间浮动,

均值为 32.35 mg/L,天窗区 NO₃⁻ 含量一般大于 43.00 mg/L。天窗区明显高于补给区和径流区。

对 Na⁺ 含量分析,补给区、径流区平均值为 15.47 mg/L;天窗区一般都大于 30.00 mg/L。Na⁺ 与 Ca²⁺ 曲线走势十分相似,Na⁺ 高值区 Ca²⁺ 也高。Na⁺ 高值区往往人类活动激烈区,Na⁺ 经雨水进入孔隙水,补给岩溶水,与碳酸盐矿物发生离子交换,使岩溶水中 Ca²⁺ 增加,导致矿化度升高。

3.3.2 主径流带岩溶水与天窗岩溶水水化学组分对比

泉域地下水长期动态监测显示,植物园点位 S₁₂ 位于趵突泉主径流带东侧,饮虎池点位 Y₉ 位于主径流带末端,为“灰岩天窗”边缘。主径流带岩溶水与天窗岩溶水水化学组分对比(图 9)。

从图 9 看出,天窗区与主径流带岩溶水主要离子 Ca²⁺、HCO₃⁻ 差异性较少,天窗区其他离子呈现升高趋势,特别是 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、矿化度明显高出主径流带。天窗区污染离子含量突然升高,证明了“灰岩天窗”是影响泉水水化学组分的因素之一。

地质资料显示,西郊丰齐村一带第四系砾岩直接与灰岩接触,形成了“西郊天窗”。丰齐村一带“西郊天窗”与泉水出露区“灰岩天窗”岩溶水水质对比见表 9。

从表 9 可以看出,“西郊天窗”岩溶水矿化度低,不同于“灰岩天窗”岩溶水水质,因为“西郊天窗”地下有 100 m 左右第四系覆盖,上下有多层黏性土夹

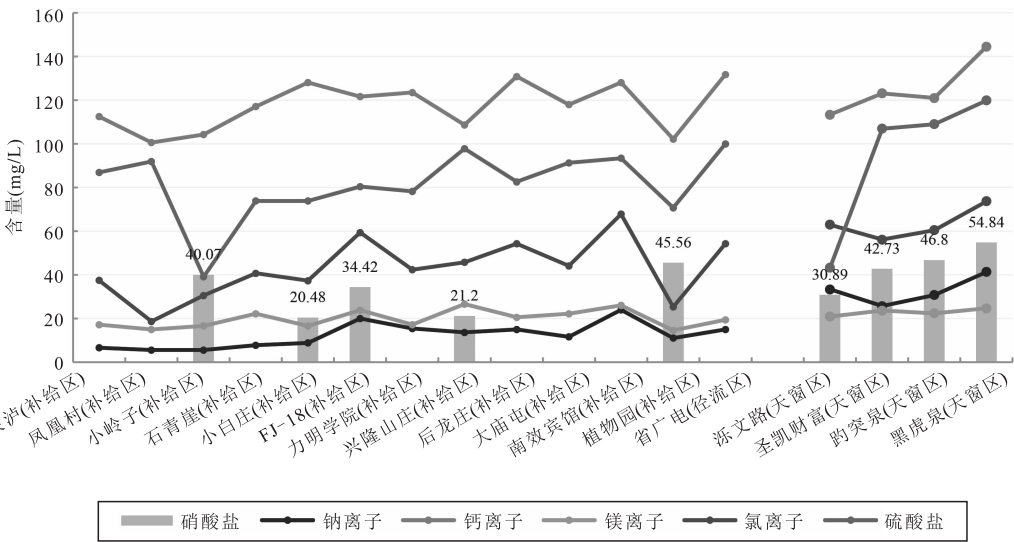


图 8 区域岩溶水与天窗岩溶水水化学组分对比图

Fig. 8 Comparison of hydrochemical components of regional karst water and skylight karst water

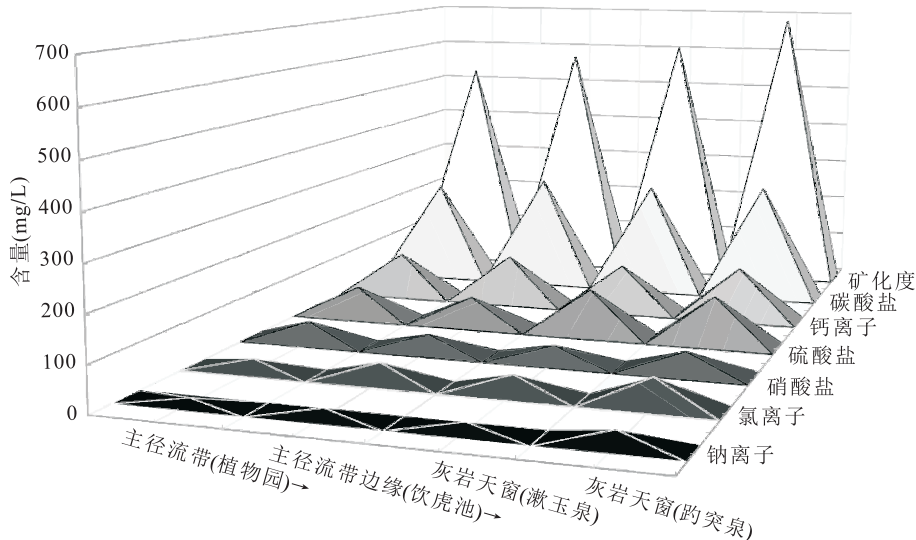


图 9 主径流带岩溶水与天窗岩溶水水化学组分对比图

Fig. 9 Comparison of hydrochemical components of karst water in Main Runoff zone and skylight karst water

表 9 西郊天窗与灰岩天窗水质对比表

Tab. 9 Comparison of water quality between skylight and limestone skylight in western suburb(mg/L)

所在区	水 化 学 组 分 区 间 值								总硬度
	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	矿化度	
西郊天窗	13. 70~	57. 72~	12. 76~	23. 04~	45. 63~	171. 64~	7. 96~	346. 93~	196. 66~
	14. 96	80. 56	16. 29	36. 87	55. 71	232. 94	34. 01	450. 73	268. 21
灰岩天窗	25. 71~	113. 25~	20. 94~	56. 16~	43. 25~	276. 48~	30. 89~	657. 51~	369. 28~
	41. 37	144. 49	24. 67	73. 74	119. 88	338. 31	54. 84	781. 81	462. 37

于中间,孔隙水在补给过程中受到层中黏性土的阻挡,各组分含量普遍较低,所以深部岩溶水水质较好,而“灰岩天窗”第四系一般 10 m 左右,孔隙水入渗快,无阻挡,因此两者不同。

4 结论

- (1)泉群出露区及附近分布有 3 处“灰岩天窗”,面积约 0. 6 km²,是孔隙水与岩溶水水力联系点,顶板岩性为第四系砾岩,大气降水携带溶解物极易入渗进入孔隙水。
- (2)“灰岩天窗”地下具独特的水文地质结构,地上是旅游活动中心—泉城广场一带,人类活动异常激烈,天窗及其附近的孔隙水易遭受污染。
- (3)第四系砾岩下覆灰岩岩溶非常发育,连通性好,枯水期污染的孔隙水入渗补给岩溶水,补给快,易入渗,“灰岩天窗”是影响泉水水化学组分因素之一。

(4)“灰岩天窗”对泉水水化学组分影响存在差异性,研究期间趵突泉泉群天窗区表现为 SO₄²⁻、Na⁺ 的增大;黑虎泉泉群天窗区表现为 SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻ 增大;泺文路南口天窗区表现为 Cl⁻、Na⁺ 增大。

参考文献(References):

徐军祥,邢立亭. 济南泉域岩溶水数值预报与供水保泉对策[J]. 地质调查与研究,2008,31(3):209-213.

XU Junxiang, XING Liting. Numerical prediction for the karst groundwater and spring protection in jinan karst spring region[J]. Geological Survey and Research,2008, 31(3):209-213.

邢立亭,陆敏,胡兰英. 济南泉域岩溶水环境现状与保护对策[J]. 济南大学学报(自然科学版)2006,20(4):345-349.

XING Liting, LU Min, HU Lanying. Present situation and

- Protection Countermeasures of karst water environment in Jinan spring region [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2006, 20(4): 345-349.
- 邢立亭. 济南泉域岩溶地下水开发布局研究[J]. 人民黄河, 2007, 29(2): 46-47.
- XING Liting. Research on karst water exploitation layout Jinan spring region[J]. Yellow River, 2007, 29(2): 46-47.
- 房佩贤, 曹以临, 贾贵廷. 济南地区综合性地质-水文地质测绘报告[R]. 济南: 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, 1984.
- 李大秋, 高焰, 王志国, 等. 济南泉域岩溶地下水水质变化分析[J]. 中国岩溶, 2002, 21(3): 202-205.
- LI Daqiu, GAO Yan, WANG Zhiguo, et al. Analysis on the Variations of Groundwater Quality in Jinan Spring Basin [J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(3): 202-205.
- 徐军祥, 邢立亭, 佟光玉, 等. 济南泉域地下水环境演化与保护[J]. 水文地质工程地质, 2004(6): 69-73.
- XU Junxiang, XING Liting, TONG Guangyu, et al. Evolution and protection of groundwater environment in Jinan spring region [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004(6): 69-73.
- 李常锁, 胡爱民, 游其军, 等. 济南泉域岩溶水水质演变趋势研究[J]. 山东国土资源, 2004, 20(1): 35-38.
- LI Changsuo, HU Aimin, YOU Qijun, et al. The Research into the Evolvment Trend of Karsts Water Quality for Fountain Areas in Jinan [J]. Land and Resources in Shandong Province, 2004, 20(1): 35-38.
- 杨丽芝, 刘春华, 祁晓凡. 济南泉水水化学特征变异研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 59-64.
- YANG Lizhi, LIU Chunhua, QI Xiaofan. Study on characteristic variation of hydro-chemistry of Jinan spring[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1): 59-64.
- 韩连山, 陈奂良, 刘建胜, 等. 济南市轨道交通建设对泉水影响研究[R]. 济南: 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, 2010.
- 邢立亭, 周娟, 宋广增, 等. 济南四大泉群泉水补给来源混合比探讨[J]. 地质学前沿, 2018, 25(3): 260-272.
- XING Liting, ZHOU Juan, SONG Guangzeng, et al. Mixing ratios of recharging water sources for the four largest spring groups in Jinan [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(3): 260-272.
- 秦兵, 李俊霞. 大同盆地高氟地下水水化学特征及其成因[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2): 106-111.
- QIN Bing, LI Junxia. Hydrochemistry and Occurrence of High Fluoride Groundwater in Datong Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(2): 106-111.
- 白福, 杨小荟. 河西走廊黑河流域地下水化学特征研究[J]. 西北地质, 2007, 40(3): 105-110.
- BAI Fu, YANG Xiaohui. Hydrochem ica Characteristics of Groundwater of the Heihe Basin in the Hexi Corridor, Gan su Province [J]. Northwestern Geology, 2007, 40(3): 105-110.
- 周鑫, 马致远, 李婷, 等. 咸阳城区地下热水地球化学演变模拟[J]. 西北地质, 2012, 45(2): 139-145.
- ZHOU Xin, MA Zhiyuan, LI Ting, et al. Simulation of Geochemical Evolution of Geothermal Beneath the Xianyang City, Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(2): 139-145.
- 邢立亭, 李常锁, 周娟, 等. 济南泉域岩溶径流通道特征[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(17): 57-65.
- XING Liting, LI Changsuo, ZHOU Juan, et al. The characteristics of karst channel in the spring of Jinan spring region [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(17): 57-65.