

潍坊市主要水源地地下水水化学特征及成因分析

魏 玮¹, 杨 慧¹, 韩梦鑫², 王立艳¹, 蒋安祺³, 王政岩⁴

(1. 山东正元环境科技有限公司, 山东 济南 250014; 2. 济南护理职业学院, 山东 济南 250014;
3. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 4. 招远市金都水利勘测设计有限公司, 山东 烟台 265400)

[摘 要] 潍坊市是全国重点缺水城市之一,水资源是限制其经济发展的因素之一。为了探明当地地下水水源地分布状况和水环境质量,本文选取了6个供水水源地为研究对象,采集代表性水样55个并分析了主量离子浓度及TDS,在此基础上,运用Piper三线图图示法和离子比例系数法系统研究了地下水水化学特征和演化规律。结果表明:①潍坊东侧水源地地下水阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主,无明显优势阴离子,从南向北水化学类型由 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca}$ 型向 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型转变;②水岩作用、蒸发浓缩作用是控制这6个水源地地下水化学组成的主控因素,硅酸盐岩和碳酸盐岩溶滤作用是水岩作用的主要类型;③青州赤涧和大郗水源地地下水中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 主要来源于方解石溶解,并且两地的地下水中溶解来源具有一致性,可能来自同一灰岩。

[关键词] 水源地;水化学特征;Piper三线图;离子比例系数法;成因分析

[中图分类号] X52 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)01-0088-10

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.01.015

0 引言

保障饮用水环境安全关系民生福祉,关系环境安全和社会稳定,是环境保护工作的重中之重^[1]。地下水资源由于经过土壤自然净化,水质好、分布广、供水保证程度较高,被人们广泛开发利用,尤其是在我国北方干旱或半干旱的许多地区和城市,地下水是极为重要的饮用水水源^[2-3]。

潍坊市位于山东半岛东部,是全国42个重点缺水城市之一,水资源是限制当地经济发展的重要因素^[4]。为了探明潍坊市集中式饮用地下水水源地

分布状况和水环境质量,众多学者对潍坊市不同地区水源地开展了卓有成效的研究。吴衍华^[5]根据潍坊市地质背景、区域水文地质条件与地下水资源等基础资料,对潍坊市主要水源地地下水位动态特征进行了详细分析,并对地下水位动态演化规律及趋势进行了预测。卫政润等^[6]分析了昌邑地下水水源地开发现状及其引发的环境地质效应,提出了合理调整用水布局、人工回灌补源、建立完善预警预报体系等措施。李瑜等^[7]利用地下水模拟软件GMS对寿光城北水厂水源地地下水流进行了数值模拟,提出了保障地下水合理有序开采的优化方案。毕钦祥^[8]应用阿廖金分类法、舒卡列夫分类法对潍坊市地表水、地下水化学类型进行了分类评价,并应用单参数评价法、综合评价法对地表水、地下水进行了现状评价。以上研究多集中在水源地水质状况和水位动态变化方面,对地下水水化学特征及组分来源讨论较少。

因此,本文选取昌邑三水厂水源地、昌邑二水厂水源地、黄旗堡-眉村-朱里水源地、寿光城北水厂水源地、青州赤涧水源地、大郗水源地共6个集中式供水水源地为研究对象,对潍坊市主要水源地地下水地球化学分析测试结果进行研究,详细分析研究区地下水的补给、径流、排泄规律和水化学特征,揭示不同水源地地下水的形成条件,为区内地下水的开发利用和安全供水规划提供科学依据。

[收稿日期] 2024-08-19

[作者简介] 魏玮(1991—),女,山东潍坊人,中级工程师,研究方向为环境工程。

[基金项目] “山东省科技型中小企业创新能力提升工程计划”,项目名:基于非络合态锰氧化的灌溉用再生水处理技术(编号2024TSGC0092)。

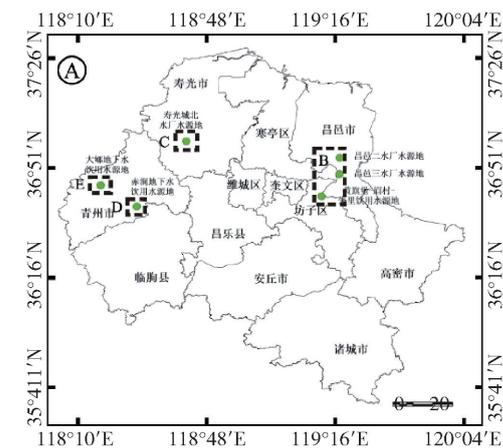
[引用格式] 魏玮,杨慧,韩梦鑫,等.潍坊市主要水源地地下水水化学特征及成因分析[J].绿色矿冶,2025,41(1):88-97.

WEI Wei, YANG Hui, HAN Mengxin. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of groundwater in main water source areas of Weifang [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(1): 88-97.

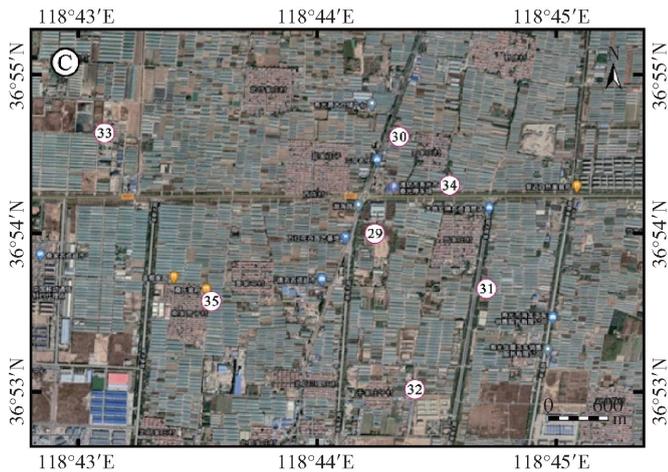
1 研究区概况

研究区位于山东省潍坊市(图1),地理坐标为东经118°10′~120°01′,北纬35°41′~37°26′。该区属暖温带半湿润季风气候,四季气候分明。年均降

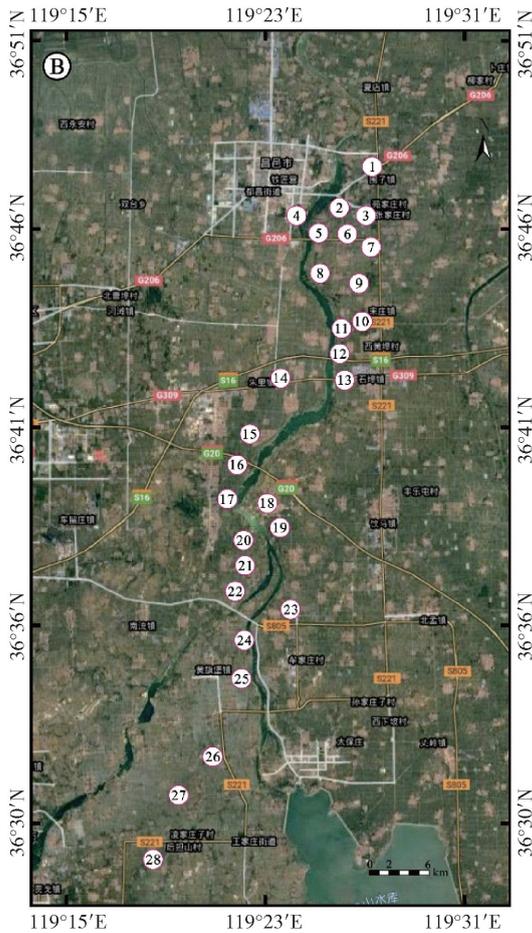
水量为593.8 mm,且降雨集中于6至8月,占全年降水量的58%。年均气温为12.7℃,最低气温为-23.2℃,最高气温达39.8℃。地形南高北低,西南部为泰山山脉的鲁山和沂山北麓,是潍坊主要河流的发源地;中部为洪积、冲积平原区,主要由弥河、



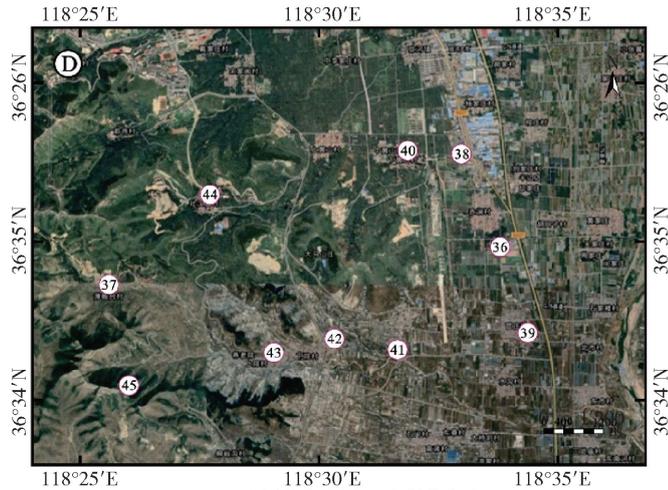
(a) 潍坊市7个集中式供水水源地分布



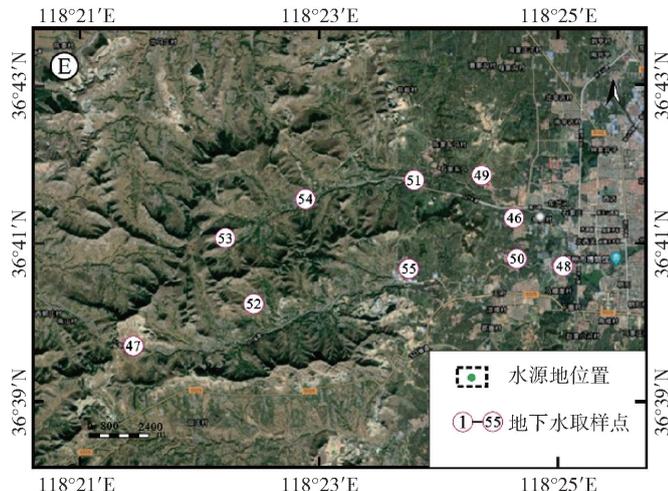
(c) 寿光城北水源地采样点分布



(b) 昌邑二水厂、三水厂、黄旗堡水源地采样点分布



(d) 青川赤涧水源地采样点分布



(e) 大柳水源地采样点分布

图1 潍坊市主要水源地位置及地下水采样点分布

丹河、白浪河和潍河长期冲积而形成,地势由南向北倾斜;北部为滨海区,北邻莱州湾,地势低平,海拔小于5 m。

昌邑三水厂水源地、昌邑二水厂水源地、黄旗堡-眉村-朱里水源地(图1(b))均以松散岩类孔隙水为主,含水层岩性为第四系黄河组和沂河组含砾砂质黏土、中细砂,地下水埋深为5.3~9.5 m,水量受季节性控制,丰水期水位回升迅速,水量增大,枯水期水位下降快,水量变小,地下水类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- - \text{Ca}$ 型水,矿化度小于1.0 g/L;寿光城北水厂水源地(图1(c))位于弥河中下游,上部为弥河冲积形成的第四系粉砂、中细砂层,层厚2~5 m,水位埋深50~70 m,单井涌水量小于 $500 \text{ m}^3/\text{d}$,下部为碳酸盐岩类岩溶裂隙水,含水岩层为朱砂洞组灰岩及泥质白云岩,水位埋深170~250 m,富水性较强,单井涌水量大于 $1500 \text{ m}^3/\text{d}$;青州赤涧水源地(图1(d))和大郛水源地(图1(e))于五井断裂与益都断裂交汇部位,受构造阻水影响,地下水类型以构造裂隙岩溶承压水为主,地层结构上部为黏土层,下部为灰岩,埋藏深度200~250 m,厚度大,构造裂隙岩溶发育,是主要的含水层。毕钦祥^[8]在潍坊市境内选择了66个地下水监测井,基于1987—2000年的统计资料和2003年的实测数据对地下水质量进行了调查统计,发现潍坊市地下水pH值为6.5~8.5,超过80%的地区地下水矿化度在1 g/L以下,总硬度含量为300~550 g/L。Liu等^[9]在2016年对潍坊市内的地下水进行了高密度采样分析,发现潍坊市地下水主要为 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,地下水化学主要受硅酸盐和碳酸盐岩风化、阳离子交换和人类轻微活动的影响。

2 研究方法

2.1 样品采集和测试

根据国家标准《地表水环境质量标准》(GB/T 14848—2017)^[10],以水源地为代表,共采集地下水样品55件,采样位置如图1所示,其中昌邑三水厂水源地7个(样品编号:1~7),昌邑二水厂水源地6个(样品编号:8~13),黄旗堡-眉村-朱里水源地15个(样品编号:14~28),寿光城北水厂水源地7个(样品编号:29~35),青州赤涧水源地10个(样品编号:36~45),青州大郛水源地10个(样品编号:46~55)。主要分析测试项目包括 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、矿化度共8项指标。样品

均为现场测定电导率值稳定后的新鲜水样,可以代表各水源地主要含水层的水化学特征。

水质分析的主要检测设备为ICE3500原子吸收分光光度计、CP124S电子天平、ICS-900阳离子色谱仪、ICS-600阴离子色谱仪,其中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 通过阳离子色谱仪进行测试, SO_4^{2-} 、 Cl^- 通过阴离子色谱仪进行测试, HCO_3^- 通过酸碱滴定法测试,矿化度通过CP124S电子天平称量法测定,检测方法依据参考GB/T 5750—2023、DZ/T 0064—2021系列标准。

2.2 分析方法

综合运用Piper三线图图示和离子比例系数法,系统研究潍坊市不同水源地地下水水化学的空间分布特征和演变规律。Piper三线图采用AquaChem V4.0水化学分析软件绘制,可以清晰地展现主要离子的空间分布特征^[11-12]。离子比例系数法是通过对比分析水化学成分中各种组分含量之间的比例关系,研究地下水化学形成及演化趋势^[13-14]。

3 结果与讨论

3.1 离子含量特征

潍坊市主要水源地地下水常规水化学浓度统计结果见表1。

从表1可知,昌邑三水厂水源地常规离子含量平均值从大到小为: HCO_3^- (293 mg/L) > Ca^{2+} (129 mg/L) > Cl^- (116 mg/L) > SO_4^{2-} (103 mg/L) > Na^+ (68.7 mg/L) > Mg^{2+} (25.9 mg/L) > K^+ (3.28 mg/L)。TDS含量变化范围为336~1040 mg/L,均值为688 mg/L。pH值范围为6.68~7.58,均值为7.16,为中性水。与昌邑三水厂水源地相比,昌邑二水厂水源地与黄旗堡-眉村-朱里水源地具有更高的常规离子浓度和TDS含量。

寿光城北水厂水源地常规离子含量平均值从大到小为: HCO_3^- (350 mg/L) > Ca^{2+} (97.3 mg/L) > Cl^- (89.3 mg/L) > Na^+ (58.1 mg/L) > Mg^{2+} (54.0 mg/L) > SO_4^{2-} (44.9 mg/L) > K^+ (1.94 mg/L)。TDS含量变化范围为362~1022 mg/L,均值为666 mg/L。pH值范围为6.81~7.47,均值为7.18。与寿光城北水厂水源地相比,青州赤涧水源地和大郛水源地阳离子中 Ca^{2+} 含量较高, Mg^{2+} 、 Na^+ 含量较低,阴离子中 SO_4^{2-} 含量较高, Cl^- 含量较低,说明寿光水厂水源地地下水比青州赤涧和大郛水源地地下水经历了更远的径流途径或更缓慢的循环速度。

表1 水样主要离子和理化参数统计表

水源地名称	项目	mg/L								
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS	pH
昌邑三水厂水源地	最大值	212	35.7	9.86	109	399	155.0	168	1040	7.58
	最小值	56.8	14.8	0.71	30.8	233	49.7	22.4	336	6.68
	平均值	129	25.9	3.28	68.7	293	116.0	103	688	7.16
昌邑二水厂水源地	最大值	339	50.0	6.73	104.0	379	281.0	279	1484	7.14
	最小值	168	19.7	1.41	70.8	245	125.0	154	872	7.03
	平均值	225	36.3	3.81	90.5	319	205.0	206	1108	7.09
黄旗堡-眉村-朱里水源地	最大值	352	83.7	28.4	180.0	426	291.0	376	1718	7.73
	最小值	54.1	19.2	0.40	24.7	231	95.8	134	708	6.52
	平均值	224	44.7	5.98	87.9	316	186.0	222	1164	6.95
寿光城北水厂水源地	最大值	142	74.0	2.74	123	435	158.0	91.5	1022	7.47
	最小值	43.1	35.1	1.16	28.3	300	35.6	11.8	362	6.81
	平均值	97.3	54.0	1.94	58.1	350	89.3	44.9	666	7.18
青州赤涧水源地	最大值	222	27.2	1.46	32.6	411	95.2	141	872	7.92
	最小值	72.8	13.0	0.31	6.99	252	21.2	11.2	284	7.00
	平均值	146	19.5	0.72	16.1	328	46.0	87.6	550	7.33
青州大埠水源地	最大值	165	39.3	2.92	38.90	368	60.87	106.0	664	7.32
	最小值	47.3	17.2	0.32	4.55	245	17.6	55.1	408	6.72
	平均值	112	25.6	1.32	15.2	307	34.8	77.4	485	7.09

3.2 水化学类型及空间分布

研究区地下水水化学类型与含水层岩性和地下水径流条件密切相关,因此地下水水化学特征能在一定程度上反映地下含水层的岩性和补给、径流、排泄条件^[15-16]。我国常用的水化学分类法是舒卡列夫分类法,将各取样点的各指标检测结果进行统计分析^[17],结果见表2、表3和表4。

从表2、表3和表4可知,以松散岩类孔隙水为代表的昌邑三水厂水源地、昌邑二水厂水源地和黄旗堡-眉村-朱里水源地的地下水化学类型以 HCO₃·SO₄·Cl-Ca 型、HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na 型为主,偶见 HCO₃·Cl-Ca·Na 型、HCO₃-Ca·Mg 型水,其中 HCO₃·SO₄·Cl-Ca 型水主要分布于水源地南部,朱里-石埠至黄旗堡一带区域;HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na 型水主要分布于围子村-前埠村一带;寿光城北水厂水源地以 HCO₃·Cl-Ca·Mg 型水为主,局部偶见 HCO₃-Ca·Na·Mg 型、HCO₃-Ca·Mg 型水,这主要与取水层位有关,31、33、34号井均为孔隙水,29、35号井均为岩溶水;以岩溶水为代表的青州赤涧水源地、大埠水源地地下水化学类型较为单一,基本为 HCO₃-Ca 型水,仅在官庄村、尹家庄村一带见 HCO₃-Ca·Mg 型或 HCO₃·SO₄-Ca 型水,TDS含量一般在500 mg/L左右。

从整体情况来看,潍坊市主要水源地地下水水质一般,岩溶水水质稍好于孔隙水。按照TDS划分,所取水样除黄旗堡-眉村-朱里水源地14、21和

22号井矿化度大于1.5 g/L,属于B类外,其他54个点均小于1.5 g/L,属于A类水。该分类方法主要涉及地下水常规指标,适用于研究区水质的初步分析,可以为后续进一步的分析评价打下基础。

舒卡列夫分类方法简单,优势明显,但以25%毫克当量为划分依据在一定程度上具有人为主观性,对于大于25%毫克当量的离子也未能反映其相对大小,因此反映水质变化不够灵敏。为了弥补该不足,除采用舒卡列夫分类方法以外,还进行了Piper三线图水化学分类^[18-19]。

根据研究区地下水相关指标参数测定结果,利用水化学软件AquaChem绘制了Piper三线图(图2),

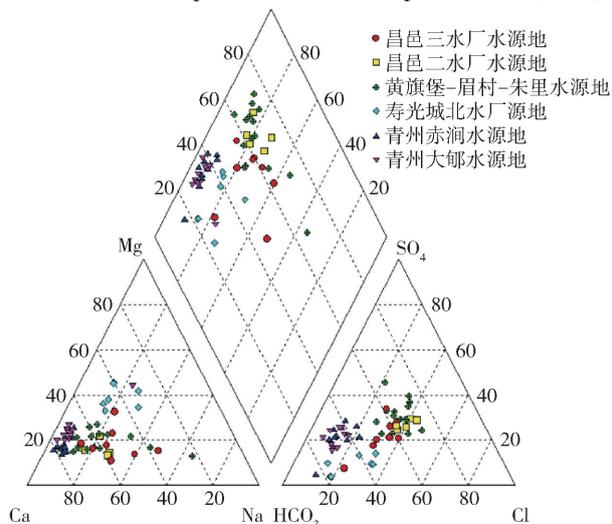


图2 潍坊主要水源地地下水Piper三线图

表 2 昌邑三水厂水源地、昌邑二水厂水源地和黄旗堡-眉村-朱里水源地地下水常规离子统计分析

样品 编号	各离子毫克当量百分数/%							类别代号	舒卡列夫分类	TDS/ mg·L ⁻¹
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻			
19	21.7	12.8	2.89	62.6	33.3	21.3	45.4	14-A	HCO ₃ ·SO ₄ -Na 型水	816
10	68.3	16.8	0.42	14.5	30.2	40.3	29.6	15-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	1484
12	66.8	15.7	0.76	16.7	37.9	35.8	26.3	15-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	1480
15	62.7	16.9	0.06	20.4	34.6	36.1	29.2	15-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	976
23	57.0	23.0	0.64	19.3	36.8	32.5	30.8	15-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	1088
24	72.5	15.0	0.19	12.4	28.6	36.3	35.1	15-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	1460
26	60.0	16.2	0.99	22.8	45.4	26.4	28.2	15-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	908
27	75.2	17.5	0.42	6.87	38.6	28.3	33.1	15-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	976
14	61.4	21.8	0.14	16.7	26.8	36.2	37.0	15-B	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	1692
21	67.7	21.3	0.20	10.8	25.8	34.7	39.5	15-B	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	1668
22	54.7	26.5	2.76	16.1	32.2	38.7	29.1	15-B	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca 型水	1718
28	60.0	26.0	0.23	13.8	32.6	38.3	29.1	16-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca·Mg 型水	1304
1	46.9	14.0	0.15	39.0	36.7	34.9	28.4	18-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca·Na 型水	708
4	50.5	22.8	2.50	24.2	40.6	33.0	26.4	18-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca·Na 型水	596
8	58.6	13.4	0.22	27.8	34.0	40.3	25.8	18-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca·Na 型水	968
9	58.3	11.1	0.26	30.3	38.4	27.7	33.9	18-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca·Na 型水	896
13	57.2	14.4	0.31	28.0	27.8	43.3	29.0	18-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca·Na 型水	872
20	44.2	21.7	0.35	33.8	35.6	31.9	32.5	18-A	HCO ₃ ·SO ₄ ·Cl-Ca·Na 型水	842
16	53.9	22.7	0.36	23.0	46.1	31.1	22.8	1-A	HCO ₃ -Ca 型水	708
5	67.1	18.8	0.31	13.7	43.4	35.2	21.4	22-A	HCO ₃ ·Cl-Ca 型水	980
7	63.4	16.5	0.28	19.8	49.4	30.2	20.4	22-A	HCO ₃ ·Cl-Ca 型水	1040
11	57.3	21.9	0.75	20.0	38.5	36.9	24.6	22-A	HCO ₃ ·Cl-Ca 型水	946
17	65.7	16.2	0.35	17.8	41.4	35.7	22.9	22-A	HCO ₃ ·Cl-Ca 型水	1160
18	69.7	16.8	0.10	13.4	34.6	42.4	23.0	22-A	HCO ₃ ·Cl-Ca 型水	1220
2	35.7	15.5	0.79	48.0	52.3	30.0	17.7	25-A	HCO ₃ ·Cl-Ca·Na 型水	448
3	56.7	18.1	0.24	25.0	39.8	39.2	21.0	25-A	HCO ₃ ·Cl-Ca·Na 型水	708
25	37.3	16.3	3.24	43.1	28.1	47.6	24.3	25-A	HCO ₃ ·Cl-Ca·Na 型水	1080
6	45.6	32.8	0.42	21.2	69.9	22.6	7.53	2-A	HCO ₃ -Ca·Mg 型水	336

表 3 寿光城北水厂水源地地下水常规离子统计分析

样品 编号	各离子毫克当量百分数/%							类别代号	舒卡列夫分类	TDS/ mg·L ⁻¹
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻			
31	45.6	38.0	0.53	15.9	57.1	33.3	9.61	23-A	HCO ₃ ·Cl-Ca·Mg 型水	760
33	49.6	33.0	0.38	17.0	60.5	26.1	13.40	23-A	HCO ₃ ·Cl-Ca·Mg 型水	828
34	48.8	36.3	0.28	14.6	56.5	34.2	9.27	23-A	HCO ₃ ·Cl-Ca·Mg 型水	722
32	34.7	34.8	0.27	30.2	52.9	33.0	14.1	26-A	HCO ₃ ·Cl-Ca·Na·Mg 型水	1022
29	39.4	45.6	0.73	14.3	77.6	18.6	3.79	2-A	HCO ₃ -Ca·Mg 型水	458
35	39.8	45.3	0.35	14.5	77.2	18.9	3.86	2-A	HCO ₃ -Ca·Mg 型水	458
30	30.8	41.8	0.65	26.7	75.7	14.5	9.80	5-A	HCO ₃ -Ca·Na·Mg 型水	362

表4 青州赤涧水源地、大郛水源地地下水常规离子统计分析

样品 编号	各离子毫克当量百分数/%							类别代号	舒卡列夫分类	TDS/ mg·L ⁻¹
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻			
37	76.9	16.1	0.42	6.63	66.1	12.2	21.7	1-A	HCO ₃ -Ca型水	490
38	75.5	14.7	0.14	9.64	56.2	22.4	21.4	1-A	HCO ₃ -Ca型水	872
39	70.0	20.8	0.20	9.02	83.3	12.0	4.7	1-A	HCO ₃ -Ca型水	284
43	80.7	15.5	0.19	3.58	65.7	9.73	24.6	1-A	HCO ₃ -Ca型水	484
44	78.1	13.8	0.13	8.01	69.8	10.1	20.1	1-A	HCO ₃ -Ca型水	496
45	75.3	16.7	0.11	7.82	62.3	17.7	20.0	1-A	HCO ₃ -Ca型水	568
48	67.7	24.9	0.38	6.99	68.3	15.1	16.7	1-A	HCO ₃ -Ca型水	470
49	71.2	21.0	0.33	7.5	62.0	15.2	22.8	1-A	HCO ₃ -Ca型水	476
50	70.0	23.9	0.45	5.58	69.9	11.9	18.2	1-A	HCO ₃ -Ca型水	410
53	72.9	22.5	0.11	4.49	72.0	6.83	21.2	1-A	HCO ₃ -Ca型水	428
54	69.6	22.6	0.38	7.45	60.6	17.2	22.2	1-A	HCO ₃ -Ca型水	664
42	66.8	25.7	0.33	7.23	67.1	11.8	21.1	2-A	HCO ₃ -Ca·Mg型水	488
46	69.6	25.2	0.53	4.61	69.9	13.1	17.0	2-A	HCO ₃ -Ca·Mg型水	408
52	68.1	27.1	0.29	4.51	67.3	8.29	24.4	2-A	HCO ₃ -Ca·Mg型水	522
55	31.9	44.2	1.01	22.8	70.9	13.6	15.5	2-A	HCO ₃ -Ca·Mg型水	412
40	76.9	14.4	0.16	8.48	55.2	18.8	26.1	8-A	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca型水	564
41	78.2	17.0	0.17	4.57	62.2	12.6	25.2	8-A	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca型水	508
47	76.9	20.2	0.12	2.79	61.7	12.3	25.9	8-A	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca型水	452
51	73.3	20.3	0.35	6.12	62.6	11.5	25.8	8-A	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca型水	502
36	78.9	16.7	0.07	4.34	58.7	12.7	28.6	8-A	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca型水	696

系统分析了研究区地下水的水化学特征,揭示了不同水源地地下水水化学类型的时空演变规律。

由图2可知,昌邑三水厂水源地、昌邑二水厂水源地和黄旗堡-眉村-朱里水源地水样点的阳离子主要投影在三线图左侧三角形区的左下角,阴离子投影在右侧三角形中间区域,优势阳离子是Ca²⁺,其毫克当量百分数为40%~80%;阴离子分布无明显优势离子存在。主要原因在于这三个水源地含水层岩性复杂,碎屑岩、碳酸盐岩均有分布,在溶蚀作用和侵蚀作用下,水中的Ca²⁺含量较高,但HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻含量相差不大。同时,与取样点沿潍河两侧分布,受地表水影响较大也有一定关系。

寿光城北水厂水源地地下水中阳离子组成均以Ca²⁺为主,并且地下水样品大多分布在Mg²⁺-Ca²⁺线上;阴离子以HCO₃⁻为主,且多沿HCO₃⁻-Cl⁻线分布,表现出受碳酸盐岩风化产物控制的特征。

青州赤涧水源地和大郛水源地地下水中优势阳离子均为Ca²⁺,其毫克当量百分数为60%~90%,且赤涧水源地中Ca²⁺含量占比大于大郛水源地,

Mg²⁺含量较低,多小于25%;Na⁺和K⁺所占比例也较低,几乎可以忽略不计;优势阴离子为HCO₃⁻,毫克当量百分数为60%~80%,表现出明显的碳酸盐岩缓慢溶蚀特征。从整体上看,潍坊市主要水源地的大部分区域水质碳酸盐硬度大于50%,小部分区域碳酸盐硬度小于50%。

3.3 水化学特征的影响因素

3.3.1 离子主控因素

Gibbs模型早期主要用于分析地表水的化学组分控制因素^[20],目前该模型已广泛应用到地下水化学成因控制研究中^[21-22]。Gibbs模型纵坐标为地下水中TDS的对数,表示地下水中的TDS含量,横坐标为比值坐标,分别表示地下水中Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)和Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)的数值^[23]。

如图3所示,昌邑三水厂水源地地下水样点分布比较分散,2、4、6号井水样点位于Gibbs图中间区域,其他井水样点位于Gibbs图上部区域,说明昌邑三水厂地下水的化学组成、迁移转化和离子来源比较复杂,地下水化学组成同时受到水-岩作用和蒸发-

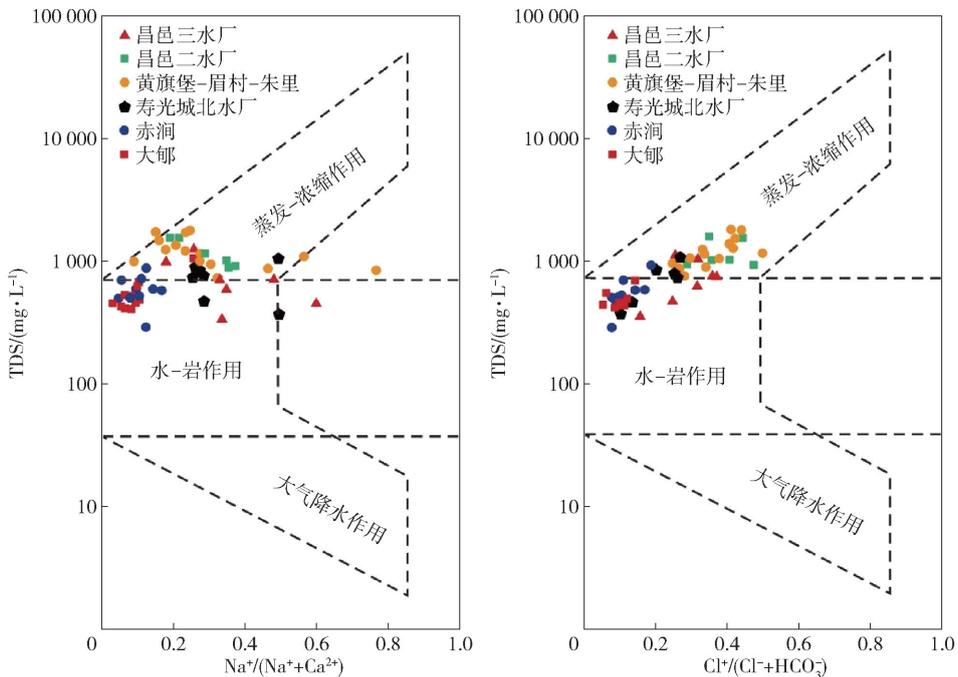


图3 潍坊市主要水源地地下水中 Gibbs 图

浓缩作用的控制,主要原因是昌邑三水厂水源地含水层以中细砂为主,碎屑来源复杂,并且距离潍河较近,受河流补给影响较大。昌邑二水厂水源地和黄旗堡-眉村-朱里水源地除 19 号井水样点未落到 Gibbs 图三大作用范围内,其他井水样点均落在 Gibbs 图上部区域,即蒸发-浓缩作用范围内,说明昌邑二水厂水源地和黄旗堡-眉村-朱里水源地地下水的化学组成和离子来源具有高度的一致性,蒸发-浓缩作用是地下水化学组成的主控因素。

寿光城北水厂水源地 29、35 号井水样点落在 Gibbs 图中间区域,其他井采样点落在 Gibbs 图上部区域,说明 29、35 号井地下水化学组成主要受水-岩作用控制,与其含水层为碳酸盐岩有关;其他井地下水均为松散岩类孔隙水,且寿光城北一带地势平坦,蒸发-浓缩作用是地下水化学组成的主要控制因素。

青州赤涧水源地和大牟水源地除 36、38 号井水样点落在 Gibbs 图上部区域外,其他井水样点均落在 Gibbs 图中间区域,说明这两个水源地地下水化学组成受水-岩作用控制明显,主要原因是这两个水源地地下水均为水位埋深大于 200 m 的岩溶水,受外部补给影响较小,碳酸盐岩长期溶滤作用是地下水化学组成的决定因素。

3.3.2 水-岩作用

由 Gibbs 模型可知,在潍坊市主要水源地共 55

个水样点中,地下水化学组成受水-岩作用控制的水样点共 23 个,分别为昌邑二水厂水源地 2、4、6 号井水样点、寿光城北水厂水源地 29、35 号井水样点以及青州赤涧水源地和大牟水源地 37、39~55 号井水样点。水-岩作用按含水岩层不同,分为碳酸盐岩、硅酸盐岩与蒸发盐岩三种作用类型,利用端元图法可以进一步分析地下水受何种水-岩作用控制^[24]。利用端元图法得到的结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,昌邑二水厂水源地 2 号井水样点分布于硅酸盐岩区域,4、6 号井水样点分布于硅酸盐岩和碳酸盐岩交界区,说明昌邑二水厂水源地受水-岩作用控制的三个井所在区域受硅酸盐岩和碳酸盐岩溶滤作用共同影响,且以硅酸盐岩溶滤为主;寿光城北水厂水源地 29、35 号井水样点落点位置基本一致,均位于比值分布图的中上部区域,反映了其地下水主要受到硅酸盐岩和碳酸盐岩溶滤的影响,蒸发盐岩作用不明显;青州赤涧水源地和大牟水源地除 55 号井水样点 $[C(\text{Ca}^{2+})/C(\text{Na}^+)]$ 和 $[C(\text{Mg}^{2+})/C(\text{Na}^+)]$ 比值均介于 1~10,落点在靠近硅酸盐岩影响区域外,其他水样点 $[C(\text{Ca}^{2+})/C(\text{Na}^+)]$ 比值均大于 10,落在碳酸盐岩影响范围内,说明青州赤涧水源地和大牟水源地地下水水化学组成均主要受碳酸盐岩溶滤作用控制,受硅酸盐岩和蒸发盐岩作用较小,可以忽略不计。

除岩性端元图以外,元素浓度变化趋势的相关

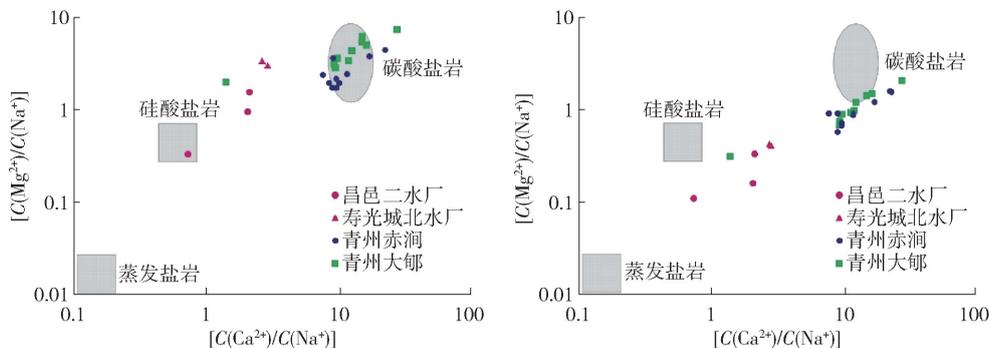
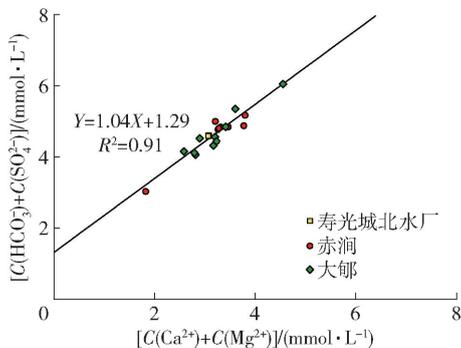


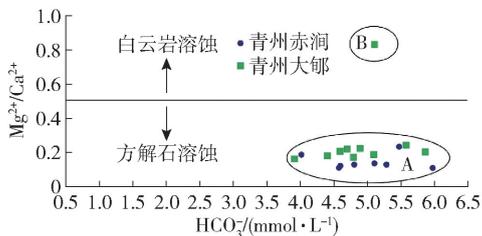
图4 水岩作用控制的地下水元素比值分布

关系也能反映地下水溶解质的来源^[27]。如图5所示,寿光城北水厂、青州赤涧和大郛水源地地下水的($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$)与($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)呈现出明显的线性相关,进一步证明了这三处水源地的水化学主要受碳酸盐岩溶滤贡献,并且碳酸盐岩的溶解可能与人类活动加入的 H_2SO_4 有关。

图5 研究区水源地地下水中($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$)与($\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$)关系

青州赤涧水源地和大郛水源地地下水化学组成受碳酸盐岩溶滤或溶蚀作用控制,碳酸盐岩包括灰岩和白云岩两类,分别由方解石(CaCO_3)和白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 组成。当纯方解石溶解达到平衡时,地下水中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 比值为0;当纯白云石溶解达到平衡时,地下水中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 比值为1^[25]。当地下水同时溶解方解石和白云石,溶解达到平衡时地下水中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 比值为0.5^[26]。

青州赤涧水源地和大郛水源地地下水 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 HCO_3^- 关系如图6所示。从图6可知,除55号井水样点(B区) $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值为0.83,大于0.5外,其他水样点(A区) $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值为0.15~0.25,均小于0.5,说明这两个水源地地下水组分以方解石的溶蚀产物为主,且赤涧水源地和大郛水源地地下水中溶解来源具有一致性,可能来自同一灰岩。

图6 青州赤涧水源地和大郛水源地地下水中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 HCO_3^- 关系

4 结论

1) 潍坊东侧昌邑三水厂水源地、昌邑二水厂水源地和黄旗堡-眉村-朱里水源地地下水中阳离子均以 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主,阴离子 HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量相当,沿地下水流向从南向北具有 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Ca}$ 型水向 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水转变的特点。中部寿光城北水厂水源地以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水为主;西侧青州赤涧水源地和大郛水源地地下水化学类型较为单一,基本为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ 型水,TDS含量一般在500 mg/L左右。潍坊市主要水源地地下水水质一般,西侧岩溶水水质稍好于东侧孔隙水。

2) 昌邑三水厂水源地地下水的化学组成、迁移转化和离子来源复杂,受水岩作用和蒸发-浓缩作用共同控制,昌邑二水厂水源地和黄旗堡-眉村-朱里水源地地下水的化学组成和离子来源具有高度的一致性,蒸发-浓缩作用是地下水化学组成的主控因素;寿光城北水厂水源地29、35号井地下水化学组成主要受水-岩作用控制,其他区域受蒸发-浓缩作用控制。青州赤涧水源地和大郛水源地地下水化学组成受水-岩作用控制明显,碳酸盐岩长期溶滤作用是地下水化学组成的决定因素。

3) 潍坊中东部昌邑二水厂水源地和寿光城北水厂水源地地下水受硅酸盐岩和碳酸盐岩溶滤作用共同影响,且以硅酸盐岩溶滤为主;青州赤涧水源地

和大郛水源地地下水水化学组成均主要受碳酸盐岩溶滤作用控制,受硅酸盐岩和蒸发盐岩作用较小,可以忽略不计。

4) 青州赤涧水源地和大郛水源地地下水中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 主要来源于方解石溶解,且赤涧水源地和大郛水源地地下水中溶解来源具有一致性,可能来自同一灰岩。

[参考文献]

- [1] 周囿,罗海江,孙聪,等. 中国农村饮用水水源地水质状况研究[J]. 中国环境监测,2020,36(6):89-94.
- [2] 袁杰,董立新,彭慧,等. 天津地区典型岩溶水源地地下水埋深变化特征及影响因素研究[J]. 水科学与工程技术,2020,6(6):45-48.
- [3] 梁永平,赵春红. 中国北方岩溶水功能[J]. 中国矿业,2018,27(S2):297-299,305.
- [4] 李文攀,周密,白雪,等. 集中式饮用水水源地水质预警指标体系构建[J]. 中国环境监测,2016,32(1):128-132.
- [5] 吴衍华. 潍坊市主要水源地地下水位特征与演化规律研究[J]. 工程技术研究,2017(5):14-16,22.
- [6] 卫政润,张涛,韩晔,等. 昌邑市地下水开发及其环境地质效应研究[J]. 山东国土资源,2007,23(5):11-14.
- [7] 李瑜,刘炳忠,商广宇,等. GMS 在寿西水源地开采优化方案中的应用[J]. 地下水,2014,36(5):91-95.
- [8] 毕钦祥. 潍坊市水环境质量评价与研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [9] LIU Jiutan, GAO Zongjun, ZHANG Yuqi, et al. Hydrochemical evaluation of groundwater quality and human health risk assessment of nitrate in the largest peninsula of China based on high-density sampling: A case study of Weifang[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 322: 129164.
- [10] 水质采样方案设计技术规范:GB 3838—2002[S]. 2019,19(17):199-203.
- [11] 陆徐荣,周爱国,王茂亭,等. Piper 图解淮河流域江苏地区浅层地下水水质演化特征[J]. 工程勘察,2010,38(2):42-47.
- [12] 杨炳超,李小等,张戈,等. 诺木洪河流域地下水水化学特征及演化规律研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(10):214-220.
- [13] 唐然,温忠辉,束龙仓,等. 绥化市地下水水化学特征及水质现状评价[J]. 水资源保护,2013,29(4):19-25,81.
- [14] 李军,邹胜章,赵一,等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. 环境科学,2021,42(4):1750-1760.
- [15] 巴特尔,曾武林. 贵州毕节市岩溶发育影响因素及发育特征浅析[J]. 地下水,2014,36(4):235-237.
- [16] 郝启勇,徐晓天,张心斌,等. 鲁西北阳谷地区浅层高氟地下水化学特征及成因[J]. 地球科学与环境学报,2020,42(5):668-677.
- [17] 寇文杰. 基于 EXCEL 的地下水水化学舒卡列夫分类方法[J]. 工程勘察,2013,41(5):48-50,96.
- [18] PIPER, A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1994, 25(1): 27-39
- [19] 郝艳茹,王鹏,张明珠,等. 广花盆地地下水化学特征及其演化分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 337-344.
- [20] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [21] QIU H, GUI H, CUI L, et al. Hydrogeochemical characteristics and water quality assessment of shallow groundwater: a case study from Linhuan coal-mining district in northern Anhui Province, China[J]. Water Science & Technology Water Supply, 2019, 19(5-6): 1572-1578.
- [22] AHMED A, GHOSH P K, HASAN M, et al. Surface and groundwater quality assessment and identification of hydrochemical characteristics of a south-western coastal area of Bangladesh[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192:258
- [23] 唐春雷,郑秀清,梁永平. 龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J]. 环境科学,2020,41(5):2087-2095.
- [24] GAILLARDET J, DUPRÉ B, LOUVAT P, et al. Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, 159(1): 3-30.
- [25] 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,等. 崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2143-2151.
- [26] 赵焕,王仕琴,孔晓乐,等. 华北低山丘陵区潞龙河流域地下水水质特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 17-24.

Hydrochemical Characteristics and Genetic Analysis of Groundwater in Main Water Source Areas of Weifang

WEI Wei¹, YANG Hui¹, HAN Mengxin², WANG Liyan¹, JIANG Anqi³, WANG Zhengyan⁴

(1. Shandong Zhengyuan Geological Resources Exploration Co., Ltd, Jinan 250014, China;

2. Jinan Vocational College of Nursing, Jinan 250014, China;

3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Zhaoyuan Jindu Water Conservancy Survey and Design Co., Ltd., Yantan 265400, China)

Abstract: Weifang is one of the key water-deficient cities in China, water resource is one of the factors limiting the economic development. In order to explore the distribution of local groundwater and water quality, 6 water supply sources were selected as research objects, 55 representative water samples were collected and analyzed the main ion concentration as well as TDS. Piper three-line diagram method and ion ratio coefficient method were used to systematically study the hydro-chemical characteristics and evolution of groundwater. The results show that: ①The cations of groundwater on the east side of Weifang are mainly Ca^{2+} and Na^+ , without obvious dominant anions, and the hydrochemistry type was transformed from $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Ca}$ type to $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ type from south to north. ②Water-rock interaction and evaporation are the main factors controlling the chemical composition of groundwater, and silicate rock and carbonate karst filtration are the main types of water-rock interaction. ③ Ca^{2+} and HCO_3^- in the groundwater of Chijian and Dahuan in Qingzhou mainly come from calcite dissolution, and the dissolution sources of groundwater in this two places are consistent, which may come from the same limestone.

Key words: water source area; hydrochemical characteristics; piper three-line diagram; ion ration coefficient method; genetic analysis