

引用格式:高楹,田原. 山东济南东南部狼猫山水库上游山区地下水化学特征[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 359–368. [Gao Y, Tian Y. Groundwater chemical characteristics in the upper reaches of the Langmaoshan Reservoir, Shandong[J]. *Resources Science*, 2018, 40(2): 359–368.] DOI: 10.18402/resci.2018.02.12

山东济南东南部狼猫山水库上游山区地下水化学特征

高 楹¹, 田 原^{2,3}

(1. 首都师范大学燕都学院, 北京 100048;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室西藏拉萨农田生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:山东省是资源性缺水省份, 济南东南部山区作为济南市的重要地下水补给区、生态功能区和流域水环境保护区, 其水质环境非常重要。为加强济南东南部狼猫山水库上游山区地下水化学特征的研究, 于2012年对该地区水样进行了采集和分析。结果表明, 济南东南部山区地下水主要受碳酸盐岩控制, 为中等硬度的 HCO_3^- · SO_4^{2-} ·Ca型清洁与尚清洁淡水, pH在7.1~7.3之间, 呈弱碱性, 总溶解性固体(TDS)在(190~470) mg/L之间, 无色、无味、无臭, 透明, 口感良好。各种元素含量较为适量, 特别是 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量, 都远小于中国和世界卫生标准, 所采水样硬度为中等硬水-淡水, 主要阳离子 Ca^{2+} 为优势离子, 其次为 Mg^{2+} ; 主要阴离子为 HCO_3^- , 其次为 SO_4^{2-} 。根据中国天然矿泉水评价标准, 在界限指标中, 部分水样锶(Sr)元素含量接近或者超过矿泉水标准; 在限量指标中, 除部分地区铁(Fe)元素有少量超标外, 其它元素指标都在标准安全范围内, 适宜饮用。

关键词: 济南东南部山区; 地下水化学性质; 水质评价; 环境健康效应; 水资源开发

DOI: 10.18402/resci.2018.02.12

1 引言

山东省是资源性缺水省份, 济南的南部山区是城市重要的地下水补给区, 是济南市的天然生态屏障^[1]。狼猫山水库是济南市东部城区城市供水的唯一水源地, 该水库不仅是济南市东部城区诸多企事业单位和大专院校的主要生活用水水源地, 还为济南市东南部高地势地区多个重点建设项目提供建设用水^[2]。因此, 该区域在保持区域生态环境平衡、减轻洪涝等自然灾害、确保全市生态环境安全等方面具有重要作用, 同时其水化学性质也与济南东城的发展密切相关^[3]。

在山东水资源和水化学特征方面, 众多学者开

展了研究工作。段金叶研究发现, 在过去100多年来, 由于人口承载压力巨大而造成过度开发, 致使济南东南部地区植被覆盖率降低, 水土流失严重, 饮水质量处于较不安全状况^[4]。李勇等通过对济南东南部地区1995—1998年水质基本情况的监测发现存在氨氮超标的情况, 但对于水的水化学性质并未研究^[5]。谷振峰对山东各地矿泉水的水化学类型进行了分析, 得出主要类型为 HCO_3^- -Ca、 HCO_3^- -Ca·Mg和 HCO_3^- -Ca·Na型^[6]。高崇军等采用微量元素水文地球化学方法, 对济南岩溶水的化学特征及其变化进行了研究, 结果表明由南部山区向北至泉群地带各元素浓度由低到高^[7]。刘海杰等通过对山东省长寿之

收稿日期: 2017-08-22; 修订日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41574036); 资源与环境信息系统国家重点实验室基金项目(O88RAA0BYA); 西藏重大科技专项(ZDZX2017000122)。

作者简介: 高楹, 男, 山东济南市人, 研究方向为环境健康及地理信息系统相关研究。E-mail: gaoyingcnu@gmail.com

通讯作者: 田原, E-mail: tiany.13s@igsnrr.ac.cn

乡百岁老人饮水质量及营养素摄入量的研究发现山东长寿之乡饮用水中富含偏硅酸盐和微量元素硒、锶,低钠,且pH呈弱碱性^[8]。王卫中等在济宁市南部用原子吸收光谱法检测了第四系深层地下水中21种微量元素的本底值,为早期发现水污染和微量元素与人体健康研究提供了相关数据^[9,10]。此外,围绕着济南东南部地区水源补给与资源保育^[1,11]、饮水质量与安全评价^[4,7-10,12]、矿泉水资源^[6,13]等,国内学者做了大量的研究工作,这些工作的开展为济南东南部地区的水资源发展奠定了良好的基础。同时相关研究显示,济南周边存在着高钠^[14]、高硒^[8]、高氟^[15,16]、高锶^[7]水源。

有关济南东南部地区的研究主要是针对个别元素或一般性的水资源调查和保护,缺乏对该区域内天然水的水化学性质,常量、微量元素含量及水化学分类、成因的系统研究。基于此,本文以济南东南部山区狼猫山水库上游分布的地下水进行了化学成分分析,以期通过这些研究,对该地地下水常量、微量元素的含量进行分析,进而评价济南南部山区地下水的水质状况,探讨其水化学分类及成因。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

济南南部山区西起马山断裂、东到东坞断裂,

南部以长城岭地表分水岭为界,北以石炭二叠系岩浆岩为边界。不同地质背景中元素的背景值不仅控制水中常量元素的水化学特性,也控制微量元素的水化学特性^[17,18]。该地地层是以广泛出露的寒武系和奥陶系为主体的北倾单斜构造,又由于济南南部山区在地形上是南高北低,岩溶水受大气降水补给后的运动方向也大体为由南向北^[19]。狼猫山水库上游山区作为济南南部山区北部的汇水区且采样点覆盖该地广泛出露的寒武系和奥陶系中各统地层(图1,表1),故所采水样能够较好地代表该区的水化学性质。狼猫山水库紧邻彩石镇两岔河村南侧,由于此处为巨野河上游两条支流的交岔(汇流)处,当地人俗称两岔河水库,当地村庄根据支流流向分别沿河道分布,东侧支流分布的村庄,简称为东峪,西侧支流分布的村庄,简称为西峪。

2.2 水样的采集

2012年10月,本文作者在狼猫山水库上游东峪、西峪两个流域(流域面积约80 km²)各采集4个水样(采样点见图1),取样方法严格按照《水和废水监测分析方法》^[20]进行。水样采集前,应先用待采集水样洗涤采样容器、盛样瓶及瓶塞等2~3次。每个水样的采样量为550 mL,采样同时使用GPS定位仪

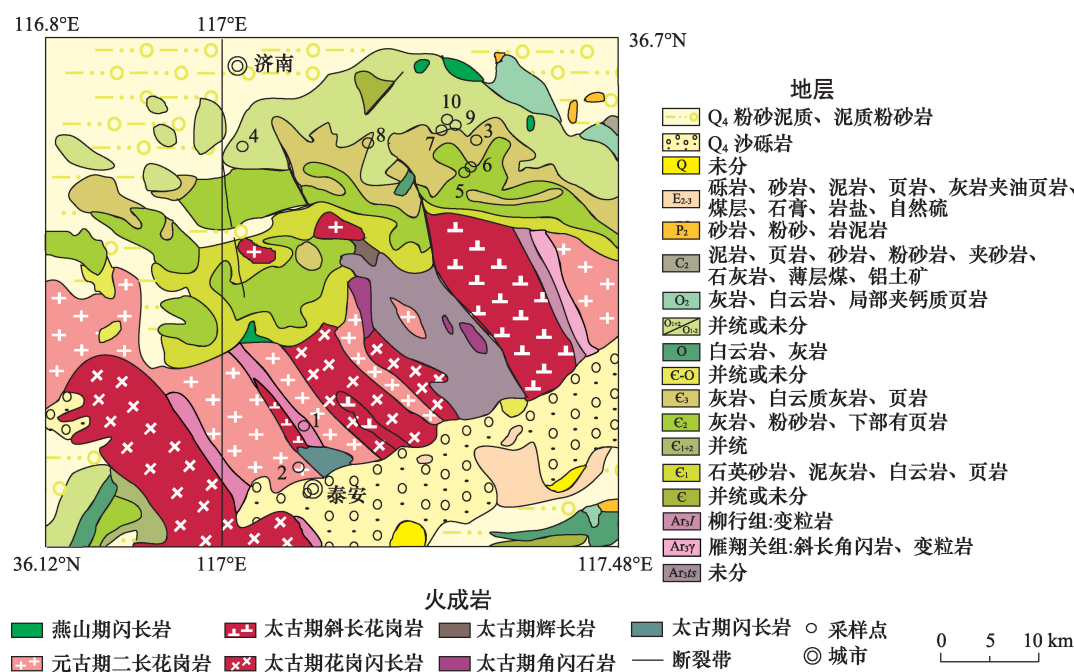


图1 采样点的地理位置、地层及分布

Figure 1 Geographical location, stratigraphic division and distribution of sampling points

2018年2月

表1 采样点描述及分布

Table 1 The distribution of water sample sampling points

编号	地点	日期(2012年)	地层层位	样品类型(深度)	纬度	经度	海拔/m
1	泰山仙泉	10月5日9:24	Ar ₃ γ	泉水	36.255 5°N	117.102 4°E	1 445
2	泰山天外村北侧500m	10月5日11:24	γ _η ₂	河流水	36.207 9°N	117.098 2°E	229
3	历城区彩石镇柳泉村	10月6日9:25	C ₃	井水(4m)	36.583 5°N	117.304 3°E	250
4	彩石镇中泉村	10月6日10:00	O ₁₊₂	泉水	36.575 3°N	117.031 3°E	267
5	彩石镇玉河泉响呼噜泉	10月6日10:55	C ₂	泉水	36.549 5°N	117.291 5°E	374
6	彩石镇玉河泉龙泉	10月6日11:12	C ₂	泉水	36.550 8°N	117.292 2°E	368
7	彩石镇南泉村	10月6日14:07	O ₁₊₂	井水(5m)	36.594 8°N	117.264 1°E	235
8	彩石镇西捎近村	10月6日14:41	C ₃	井水(3m)	36.571 0°N	117.181 0°E	380
9	彩石镇东泉村	10月6日15:02	O ₁₊₂	井水(5m)	36.601 7°N	117.277 7°E	260
10	彩石镇东泉村西侧	10月6日15:25	O ₁₊₂	井水(7m)	36.6038°N	117.272 3°E	234

对采样地点进行定位。在泉水、井水采集时,将停滞在抽水管中的水汲取出后再进行采样,以保证水样能代表地下水水源;为进一步分析该区不同地质环境下水样的水化学性质,作者还从距离济南60 km的泰山两种岩浆岩出露区采集水样2个。表1是所采集水样的信息。

2.3 分析方法

采集水样的pH、电导率(EC)、电阻率(RES)、盐度(SAL)、总溶解固体(TDS)、温度(T),采用梅特勒托利多公司生产的pH计(SevenGo SG2, Mettler Toledo, Zurich, Switzerland)和电导率测定仪(SevenGo SG3, Mettler Toledo, Zurich, Switzerland)原位测定,氧化还原电位(Eh)值采用上海三信公司生产的氧化还原电位测定仪(SX712, 上海三信, 上海, 中国)原位测定。所采集样品中的其他指标在中国科学院地理科学与资源研究所的微量元素与人类健康实验室进行处理,在中国科学院地理科学与资源研究所理化分析中心分析测定。重碳酸根(HCO_3^-)采用酸碱指示剂滴定法^[21]测定;氯离子(Cl^-)采用氯离子选择电极法^[22,23]测定(PXSJ-216离子计,上海雷磁,中国;217型参比电极,上海雷磁,中国;PCI-1型氯离子电极,上海雷磁;中国;LOD:0.000 01 mol/L);氟离子(F^-)采用氟离子选择电极法^[21]测定(PXSJ-216离子计;JB-1A搅拌器;232-01型参比电极;PF-1型氟离子电极,LOD:0.000 001 mol/L. 上海雷磁,中国);硒(Se)、砷(As)使用氢化物发生原子荧光光度法(HG-AFS, AFS-9780, 北京海光, 中国. LOD:

0.01 μg/L)^[21]测定;常量元素 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、P、Sr、B、 SiO_2 、 H_2SiO_3 使用珀金埃尔默公司生产的电感耦合等离子体发射光谱仪ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, Optima 5300 DV, PerkinElmer, Waltham, MA, USA. LOD:0.001 mg/L)测定,微量元素Li、Zn、U、Rb、Ba、Bi、Co、Cs、Ga、In、Ti、V、Ag、Al、Be、Cd、Cr、Cu、Fe、Hg、Mn、Mo、Ni、Pb和Tl使用珀金埃尔默公司生产的电感耦合等离子体质谱仪ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, DRC-e, PerkinElmer, Waltham, MA, USA. LOD:0.001 μg/L)。所有的分析方法在测试水样过程中,每测定5个水样,进行一次平行样的测定,以保证水样数据和仪器的稳定性。水样测试后计算阴阳离子相对误差,保证阴阳离子相对误差均小于5%,以保证此水样数据的可靠性和准确性^[24,25]。

3 检测结果及分析

根据上述方法,分别测出所采集的10个水样的主要常量元素指标检测结果(表2),微量元素指标检测结果(表3),限量元素指标检测结果(表4,见363页),并与《中国生活饮用水卫生标准》^[26]、世界卫生组织(WHO)饮用水推荐标准^[27]及《饮用天然矿泉水》^[28]标准进行对比。

3.1 物理性质及感官性状

10个水样中,1号采自于泰山山顶的仙泉,是一个非流动的渗水井,水面略有一些漂浮物,2号采自于泰山山脚下的流动河流,其它8个水样均采自于

历城区彩石镇的南部山区。pH在7.1~7.3之间,呈弱碱性,总溶解性固体(TDS)在(190~470)mg/L之间,特别是济南南部山区的8个样品,TDS在(310~470)mg/L之间;无色、无味、无臭,透明,口感良好。

3.2 常量元素检测结果

各种元素含量较为适量,特别是 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量,都远小于中国和世界卫生标准,所采水样硬度为中等硬水-淡水,主要阳离子 Ca^{2+} 为优势离子,

其次为 Mg^{2+} ;主要阴离子为 HCO_3^- ,其次为 SO_4^{2-} ,如表2所示。

3.3 微量元素检测结果

据表3可以看出,所测水样中的微量元素锶(Sr)在1号、3号、4号、7号、8号和9号水样中其含量满足国家矿泉水标准,所有水样中氟(F)和钡(Ba)的含量也均未超过矿泉水标准中的上限。除了超过国家矿泉水标准外,锶元素的含量在2号、5号、6

表2 2012年山东济南东南部水样中常量元素指标检测结果

Table 2 The test result of major elements in Jinan southeast water samples in 2012 (mg/L)

样品 编号	pH	Eh /mv	Ec /($\mu\text{s}/\text{cm}$)	TDS	TH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	SiO_2	H_2SiO_3	水化学类型
1	7.1	317	363	309.9	224.1	75.4	8.53	34.83	9.32	152.3	67.75	37.84	10.77	14.00	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ Ca·Na
2	7.3	269	1 412	191.5	152.6	47.1	8.33	11.63	2.61	92.6	66.48	9.03	10.08	14.04	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ Ca·Mg
3	7.2	255	1 415	389.9	332.8	119.6	8.11	6.89	2.78	250.9	101.30	25.80	11.96	15.47	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca
4	7.2	229	1 295	343.8	306.9	108.9	8.31	5.99	0.81	241.9	78.10	20.76	10.48	13.62	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca
5	7.3	231	1 222	329.9	288.7	102.6	7.74	5.62	0.78	238.9	69.31	24.32	9.54	12.40	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca
6	7.3	246	1 227	317.6	287.1	101.7	7.89	5.41	0.75	241.9	69.79	11.09	9.67	12.57	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca
7	7.2	247	1 525	409.8	352.9	125.0	9.69	11.77	1.35	277.8	93.90	29.22	13.36	17.37	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca
8	7.2	230	1 301	353.0	312.4	112.0	7.78	4.96	0.59	230.0	91.17	21.46	11.84	15.40	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca
9	7.3	233	1 300	356.0	313.8	103.4	13.28	6.38	0.77	268.8	65.34	32.40	12.47	16.21	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca
10	7.3	248	1 746	464.7	414.9	134.5	18.88	8.04	0.69	319.6	112.00	30.79	12.72	16.54	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca
饮用水标准	6.5~ 8.5	-	-	1 000	450	-	-	200	-	-	250	250	-	-	-
WHO	6.5~ 9.5	-	-	1 000	500	-	-	200	-	-	500	250	-	-	-
矿泉水标准	-	-	-	$\geq 1\ 000$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≥ 25	-

表3 2012年山东济南东南部水样中微量元素指标检测结果

Table 3 The test results of trace elements in water samples in Jinan southeast in 2012 ($\mu\text{g}/\text{L}$)

样品编号	Li	Sr	B	Zn	Se	F	Ba	U	Rb	Bi	Co	Cs	Ga	In	V	P
1	0.13	229.6	62.2	3.57	0.77	185.9	43.08	0.62	1.91	0	0.34	0.01	0.82	0	1.06	133.9
2	0.56	181.5	29.3	0.65	0.35	373.1	34.16	0.12	2.38	0	0.13	0.01	0.65	0	0.65	5.4
3	2.22	201.7	16.4	9.42	0.60	185.1	25.39	0.41	0.20	0	0.20	0.00	0.46	0	0.26	14.0
4	1.97	215.5	12.3	6.62	0.62	134.6	21.53	0.40	0.32	0	0.17	0.00	0.40	0	0.26	10.1
5	1.44	174.4	10.7	10.88	0.60	122.5	16.51	0.32	0.27	0	0.19	0.00	0.31	0	0.15	4.6
6	1.63	174.6	10.4	1.72	0.66	116.3	18.17	0.34	0.27	0	0.17	0.00	0.36	0	0.09	0.0
7	1.99	221.7	13.5	12.30	0.77	200.3	28.29	0.60	0.31	0	0.21	0.00	0.51	0	0.06	19.9
8	1.93	205.6	10.6	0.88	0.61	122.0	20.17	0.33	0.28	0	0.14	0.00	0.36	0	0.00	4.0
9	2.96	257.2	15.0	1.86	0.71	168.4	19.47	0.49	0.40	0	0.16	0.01	0.37	0	0.17	6.7
10	1.91	195.3	13.1	6.01	0.82	183.0	27.30	0.63	0.19	0	0.19	0.00	0.52	0	0.60	7.3
饮用水标准	-	-	500	1 000	10	1 000	700	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WHO	-	-	500	3 000	10	1 500	700	-	-	-	-	-	-	-	-	-
矿泉水标准	≥ 200	≥ 200	$< 5\ 000$	≥ 200	≥ 10	$< 1\ 500$	< 700	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2018年2月

表4 2012年山东济南东南部水样中限量元素指标检测结果

样品编号	Ag	Al	As	Be	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Tl
1	0	3.62	1.00	0	0.01	2.90	0	228.2	0.00	3.19	1.60	3.14	0.30	0.77	0.00
2	0	8.39	0.45	0	0.01	1.37	0	140.4	0.01	0.15	0.81	0.97	0.01	0.35	0.01
3	0	0.82	0.49	0	0.00	3.51	0	345.8	0.00	0.18	0.25	2.22	0.00	0.60	0.00
4	0	1.16	0.22	0	0.00	3.76	0	315.2	0.04	0.00	0.13	2.00	0.00	0.62	0.00
5	0	2.44	0.44	0	0.00	3.70	0	295.1	0.01	0.08	0.12	1.90	0.01	0.60	0.00
6	0	2.45	0.36	0	0.00	3.68	0	293.0	0.00	0.03	0.12	1.90	0.02	0.66	0.00
7	0	1.57	0.40	0	0.00	7.25	0	363.7	0.00	0.28	0.15	2.22	0.00	0.77	0.00
8	0	1.83	0.15	0	0.00	3.89	0	313.6	0.00	1.25	0.09	1.96	0.00	0.61	0.00
9	0	0.71	0.63	0	0.00	7.95	0	298.1	0.00	0.20	0.19	1.91	0.04	0.71	0.00
10	0	8.40	0.55	0	0.00	6.78	0	384.1	0.00	0.00	0.20	2.51	0.06	0.82	0.01
饮用水标准	50	200	10	2	5	50	1 000	300	1	100	70	20	10	10	0.10
WHO	100	200	10	-	3	50	2 000	300	1	400	70	20	10	10	-
矿泉水标准	<50	-	<10	-	<3	<50	<1 000	-	<1	<400	-	<20	<10	<50	-

号和10号水样中均不低于标准的13%,水样中锑元素含量普遍较高。

3.4 限量元素检测结果

根据表4可以看出,所测水样中的如镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)、锰(Mn)、镍(Ni)、铊(Tl)、铝(AL)、汞(Hg)、钼(Mo)、铅(Pb)和铜(Cu)等微量元素都满足国家生活用水标准和WHO饮用水标准,唯一例外的是铁(Fe)元素,国家和WHO的限量标准是300μg/L,而所测10个水样有5个超过这一标准,最高为384.1μg/L,由于超标小于30%,一般不会对人体造成危害。

3.5 水样对比

作为比较对象,泰山地区的两个水样与彩石镇水样有不同的水化学特征(表2)。除了不同的化学类型外,在氧化还原电位(Eh)、导电性(Ec)、总溶解性固体(TDS)以及元素含量方面,都有不同的特征。

4 水质评价及影响因素分析

4.1 水质评价

表5与表6对比了水样中各指标与矿泉水标准中界限指标与限量指标的含量,可以看出,所采水样有6瓶Sr元素达到矿泉水标准。但是否能够作为矿泉水开发还需要对其水量等做进一步研究。

水质卫生指数是综合几个水质参数的检验结果与人体饮用后的健康状况联系起来,对水质的一个综合评价指标,是反映水质的一个无量纲数值。可

表5 2012年山东济南东南部水样中元素与矿泉水标准中界限指标对比

样品序号	Li	Sr	Zn	Se	H ₂ SiO ₃	TDS
1	0.13	229.6	3.57	0.77	14.00	309.9
2	0.56	181.5	0.65	0.35	14.04	191.5
3	2.22	201.7	9.42	0.60	15.47	389.9
4	1.97	215.5	6.62	0.62	13.62	343.8
5	1.44	174.4	10.88	0.60	12.40	329.9
6	1.63	174.6	1.72	0.66	12.57	317.6
7	1.99	221.7	12.30	0.77	17.37	409.8
8	1.93	205.6	0.88	0.61	15.40	353.0
9	2.96	257.2	1.86	0.71	16.21	356.0
10	1.91	195.3	6.01	0.82	16.54	464.7
矿泉水标准	≥200	≥200	≥200	≥10	≥25	≥1 000
属性	不达标	部分达标	不达标	不达标	不达标	不达标

以使人们直观地了解各类水源地水质状况^[29,30]。本文采用水质卫生指数综合评价水质,以《生活饮用水卫生标准》^[26]和《农村实施生活饮用水卫生标准准则》^[31]为评价标准(表7),选取的指标有:一般化学指标(pH、TDS、TH、SO₄²⁻、Cl⁻、Fe、Mn),毒理指标(F⁻、As、Cr、Cd、Pb、Hg),结果见表8。

从表8可以看出,在采集的水样中,大部分天然水KI(水质卫生综合指数)≤1(n=7),水质为一级清洁水;水质为二级尚清洁水(1<KI≤2)的有3瓶;所采水样水质状况良好,适宜饮用。

表6 2012年山东济南东南部水样中元素与矿泉水标准中限量指标对比

Table 6 The major and trace element in Jinan southeast water sample compare with the limit indicators of mineral water standard in 2012 (μg/L)

样品序号	Se	Se	As	Ba	Cd	Cr	Pb	Hg	Mn	Ni	Ag	B	F
1	0.77	0.77	1.00	43.08	0.01	2.90	0.30	0.00	3.19	3.14	0	62.2	185.9
2	0.35	0.35	0.45	34.16	0.01	1.37	0.01	0.01	0.15	0.97	0	29.3	373.1
3	0.60	0.60	0.49	25.39	0.00	3.51	0.00	0.00	0.18	2.22	0	16.4	185.1
4	0.62	0.62	0.22	21.53	0.00	3.76	0.00	0.04	0.00	2.00	0	12.3	134.6
5	0.60	0.60	0.44	16.51	0.00	3.70	0.01	0.01	0.08	1.90	0	10.7	122.5
6	0.66	0.66	0.36	18.17	0.00	3.68	0.02	0.00	0.03	1.90	0	10.4	116.3
7	0.77	0.77	0.40	28.29	0.00	7.25	0.00	0.00	0.28	2.22	0	13.5	200.3
8	0.61	0.61	0.15	20.17	0.00	3.89	0.00	0.00	1.25	1.96	0	10.6	122.0
9	0.71	0.71	0.63	19.47	0.00	7.95	0.04	0.00	0.20	1.91	0	15.0	168.4
10	0.82	0.82	0.55	27.30	0.00	6.78	0.06	0.00	0.00	2.51	0	13.1	183.0
矿泉水标准	< 50	< 50	< 10	< 700	< 3	< 50	< 10	< 1	< 400	< 20	< 50	< 5 000	< 1 500
属性	安全	安全	安全	安全	安全	安全	安全	安全	安全	安全	安全	安全	安全

表7 水质卫生综合指数参数

Table 7 Parameters Table of water quality sanitary comprehensive index (mg/L)

指标	Ki												
	pH	TDS	TH	Cl ⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	As	Cd	Cr	Hg	Mn	Pb	Fe
Li	6.5~8.5	1 000	450	250	1.0	250	0.01	0.005	0.05	0.001	0.1	0.01	0.3
La	6.0~9.0	1 500	550	300	1.2	300	0.05	0.010	0.05	0.001	0.3	0.05	0.5
Lb	6.0~9.0	2 000	700	450	1.5	400	0.05	0.010	0.05	0.001	0.5	0.05	1.0

注:标准限值(Li),2级允许值(La),3级允许值(Lb)。

表8 2012年山东济南东南部水样水质卫生综合指数

Table 8 Water quality sanitary comprehensive indexes of Jinan southeast water sample in 2012

编号	Ki													Ki _{max}	X	S	KI	水质
	pH	TDS	TH	Cl ⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	As	Cd	Cr	Hg	Mn	Pb	Fe					
1	0.4	0.31	0.50	0.15	0.19	0.27	0.10	0.00	0.06	0.00	0.03	0.03	0.76	0.76	0.22	0.22	0.70	清洁水
2	0.2	0.19	0.34	0.04	0.37	0.27	0.05	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.47	0.47	0.15	0.16	0.44	清洁水
3	0.3	0.39	0.74	0.10	0.19	0.41	0.05	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	1.30	1.30	0.27	0.36	1.16	尚清洁水
4	0.3	0.34	0.68	0.08	0.13	0.31	0.02	0.00	0.08	0.04	0.00	0.00	1.08	1.08	0.24	0.31	0.98	清洁水
5	0.2	0.33	0.64	0.10	0.12	0.28	0.04	0.00	0.07	0.01	0.00	0.00	0.98	0.98	0.21	0.28	0.89	清洁水
6	0.2	0.32	0.64	0.04	0.12	0.28	0.04	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.98	0.98	0.21	0.28	0.88	清洁水
7	0.3	0.41	0.78	0.12	0.20	0.38	0.04	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	1.47	1.47	0.30	0.40	1.31	尚清洁水
8	0.3	0.35	0.69	0.09	0.12	0.36	0.02	0.00	0.08	0.00	0.01	0.00	1.07	1.07	0.24	0.31	0.97	清洁水
9	0.2	0.36	0.70	0.13	0.17	0.26	0.06	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.99	0.99	0.23	0.29	0.90	清洁水
10	0.2	0.46	0.92	0.12	0.18	0.45	0.06	0.00	0.14	0.00	0.00	0.01	1.73	1.73	0.33	0.48	1.54	尚清洁水

注:①实测含量(Ci);分指数(Ki);最大值(Ki_{max});均值(X);标准差(S)。②KI≤1 清洁水;1 < KI≤2 尚清洁水;2 < KI≤3 轻污染水;3 < KI≤4 污染水;4 < KI≤5 严重污染水;KI > 5 恶劣水。③计算公式按照: Ci≤Li: Ki=Ci/Li; Li≤Ci≤La: Ki=1+(Ci-Li)/(La-Li); Ci>La: Ki=2+(Ci-La)/(Lb-La); Ki=a×Ki_{max}+b×(X+S)。④其中pH的Ki计算公式为: Ki(6.5≤Ci≤8.5)=|7.5-Ci|; Ki(6.5>Ci)=1+(6.5-Ci)×3; Ki(Ci>8.5)=1+(Ci-8.5)×3。^[26]

2018年2月

4.2 水化学分类

Piper 三线图是依据舒卡列夫分类法所得,它能很好地反映水中各主要离子所占的比例^[32],而水中主要离子所占的比例往往决定了水的水化学类型^[33]。由图2可以看出,泰山1号水的化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型,2号水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,彩石镇水样的水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型($n=8$),由此可判定,济南南部山区彩石镇泉水具有相似的化学性质。

4.3 成因分析

Gibbs^[34]通过 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 与TDS的关系来阐明解释水中元素的一种可能的成因机制。他将水中元素的成因类型主要归为三类:蒸发型、岩石风化型、降水型等。我们可以得到狼猫山地区水样中元素的成因分类为岩石风化型,水中元素的成因主要受岩石风化控制(图3)。

一般认为,地下水的赋存与分布均受地质构造、地层岩性、地貌及气象水文等自然因素综合控制^[35]。从构造背景及地层分区看,研究区属于华北地台鲁西分区的北部,华北地层区鲁西分区,整个地区太古界至第四系地层出露比较完整,根据采样点位置图(图1)可知,采样点主要位于寒武系-奥陶系碳酸盐岩地层分布处,其出露的岩石主要特征为钙质泥灰岩或白云岩。这与其水化学类型成因相似,表明济南东南部地区水中元素受基岩控制,其

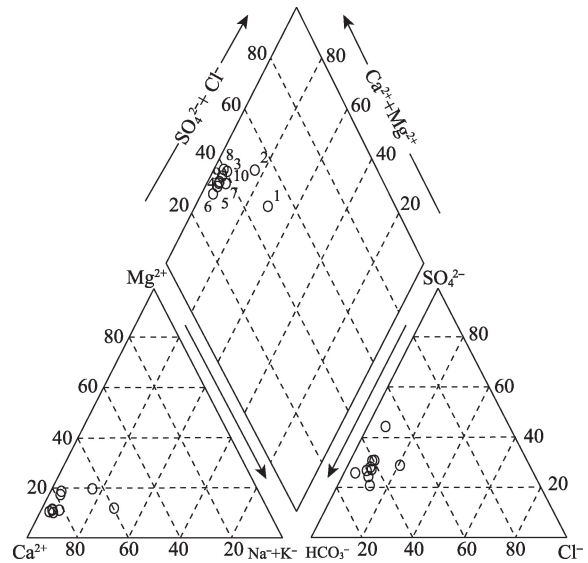


图2 2012年山东济南东南部水样Piper三线图

Figure 2 Piper diagram showing major ion composition of Jinan southeast water samples in 2012

注:图中序号代表样点编号。

中元素主要来源于对基岩的淋滤溶解。

5 结论及建议

5.1 结论

济南东南部狼猫山水库上游山区地下水主要受寒武奥陶系的碳酸盐岩控制,为中等硬度的 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型清洁与尚清洁淡水,pH在7.1~7.3之间,呈弱碱性,总溶解性固体(TDS)在(190~470)

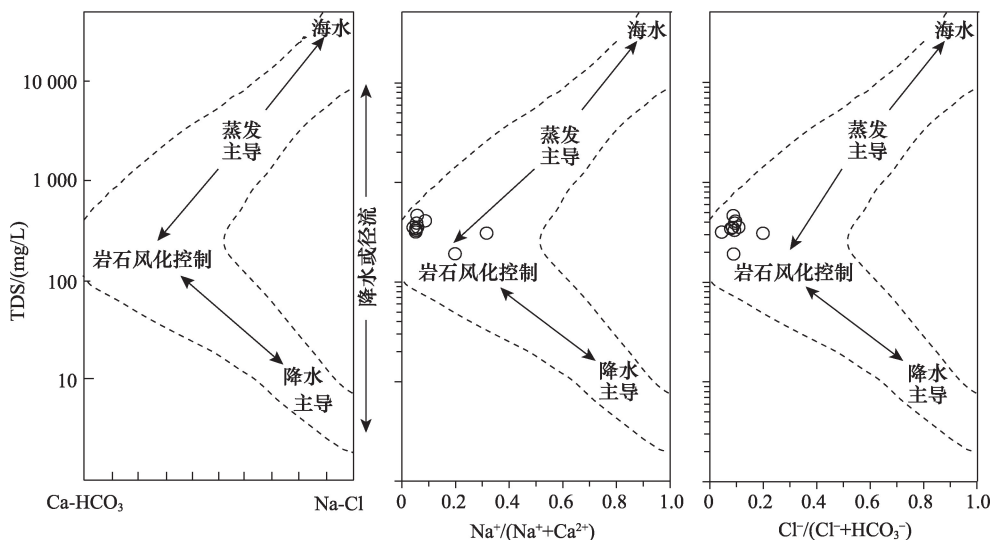


图3 2012年山东济南东南部水样Gibbs图

Figure 3 Plots of the major ions within the Gibbs boomerang envelope of Jinan southeast water samples in 2012

mg/L之间,无色、无味、无臭,透明,口感良好。主要阳离子 Ca^{2+} 为优势离子,其次为 Mg^{2+} ;主要阴离子为 HCO_3^- ,其次为 SO_4^{2-} 。根据中国天然矿泉水评价标准,在界限指标中,部分水样Sr元素含量接近或超过矿泉水标准;在限量指标中,除部分地区Fe有少量超标外,其它元素指标均在标准安全范围内,适宜饮用。

5.2 建议

济南东南部山区作为济南重要的地下水补给区,生态环境的可持续发展意义重大,故有以下建议:

(1)开展济南东南部山区乃至鲁中地区的优质水资源调查。从作者采集的水样分析,济南东南部狼猫山水库上游山区有较好的自然条件,存在着优质的水源,应广泛开展优质水源的普查工作,为产业升级做好基础支撑,为山区水资源的合理开发做好基础工作。

(2)加强济南东南部狼猫山水库上游山区乃至整个济南南部山区的水资源承载力研究。济南东南部地区作为自然条件脆弱的地区,水利资源是严重制约当地经济发展的重要因素,而作为济南市的重要生态功能保护区,又对济南东南部地区的发展提出了更高的要求,因此有必要对济南东南部地区的水资源承载力进行研究,即在一定时期、一定环境质量要求、一定状态或条件下,济南东南部地区水环境在自我维持、自我调节的能力和和水环境功能可持续正常发挥的前提下,所支撑的人口、经济及社会可持续发展的最大规模。

(3)尽快建立济南东南部狼猫山水库上游山区乃至整个济南南部山区生态补偿机制。济南南部山区作为济南市的重要生态功能区,特别是流域水环境保护区,其重要作用越来越显著,建立合理的生态补偿机制以调整利益很有必要。目前生态补偿原理性探讨较多,而具体地区、流域的实践探索较少,建议国家或者当地政府能以济南东南部地区为试点,通过具体实践,开展试点工作,探索在流域尺度建立生态补偿标准体系,建立有效的、可持续的生态补偿机制。

参考文献 (References):

[1] 刘炳兰,康梅林. 山东水环境状况及对策[J]. 山东农业大学学报

(自然科学版), 2008, 39(3): 483-485. [Liu B L, Kang M L. State of water environment and countermeasure in Shandong province [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2008, 39(3): 483-485.]

[2] 吴元超,王恩明. 狼猫山水库水质保护措施浅析[J]. 科技创新导报, 2011, (26): 138-138. [Wu Y C, Wang E M. Analysis on water quality protection measures of Langmaoshan reservoir[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2011, (26): 138-138.]

[3] 刘沙. 济南市南部山区生态安全评价研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2014. [Liu S. Ecological Security Assessment on the Southern Mountain of Jinan[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2014.]

[4] 段金叶. 山东省饮水安全评价研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2007. [Duan J Y. Assessment on Drinking Water Security of Shandong[D]. Beijing: Capital Normal University, 2007.]

[5] 李勇,方永睿. 济南市狼猫山水库水质现状评价[J]. 山东环境, 1999, (6): 50-51. [Li Y, Fang Y R. Evaluation on water quality of Langmaoshan reservoir in Jinan city[J]. *Shandong Environment*, 1999, (6): 50-51.]

[6] 谷振峰. 山东饮用天然矿泉水及其勘查与保护[J]. 山东国土资源, 2002, 18(3-4): 84-87. [Gu Z F. Natural mineralic water in Shandong province and its exploitation and protection[J]. *Shandong Land and Resources*, 2002, 18(3-4): 84-87.]

[7] 高宗军,徐军祥,王世臣,等. 济南岩溶水微量元素分布特征及其水文地质意义[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 135-146. [Gao Z J, Xu J X, Wang S C, et al. The distribution characteristics and hydrogeological significance of trace elements in karst water, Jinan, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4): 135-146.]

[8] 刘海杰,季晓康,刘淑芳,等. 山东省长寿之乡百岁老人营养素摄入量及饮水质量[J]. 中国老年学杂志, 2013, 33(8): 1862-1864. [Liu H J, Ji X K, Liu S F, et al. The nutrient intake and drinking water quality of centenarians in the county of longevity of Shandong[J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2013, 33(8): 1862-1864.]

[9] 王卫中,邹红海,夏雁,等. 地下水微量元素的本底值及相关性分析[J]. 济宁医学院学报, 2003, 26(3):20-21. [Wang W Z, Zou H H, Xia Y, et al. Analysis of the background value and correlation of trace elements in groundwater[J]. *Journal of Jining Medical College*, 2003, 26(3): 20-21.]

[10] 王卫中,曾晓立,夏雁,等. 济宁市深层地下水中微量元素含量研究[J]. 环境与职业医学, 2003, 20(2): 132-133. [Wang W Z, Zeng X L, Xia Y, et al. Study on contents of 21 trace elements in deep well ground water[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2003, 20(2): 132-133.]

[11] 王敏. 济南市南部山区水环境现状评价及保护性开发影响研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2002. [Wang M. Assessment on the Present Situation of Water Environment and Study the Effect from the Protective Development of the Southern Mountain Area in Ji-

2018年2月

- nan[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2002.]
- [12] 戚爱萍, 侯继梅. 济南地区岩溶地下水有机物污染状况调查[J]. 预防医学论坛, 2001, 7(6): 637-637. [Qi A P, Hou J M. Investigation on organic pollution condition of karst groundwater in Jinan mountain area[J]. *Preventive Medicine Tribune*, 2001, 7(6): 637-637.]
- [13] 赵明华. 水资源约束下的山东半岛经济与环境协调状态定量评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(3): 119-123. [Zhao M H. Evaluation on the coordination of economy and environment with scarce water resources in Shandong peninsula[J]. *China Population Resources and Environment*, 2006, 16(3): 119-123.]
- [14] 杨丽芝, 曲万龙, 张勇, 等. 基于水化学组分和环境同位素信息探讨山东德州深层承压地下水起源[J]. 地球学报, 2013, 34(4): 463-469. [Yang L Z, Qu W L, Zhang Y, et al. A discussion on deep groundwater origin of Dezhou in Shandong province based on water chemical composition and environmental isotopic information[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(4): 463-469.]
- [15] 韩晔, 郑玉萍, 张涛, 等. 山东省高密市高氟区地球化学及水文地球化学特征[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 1107-1113. [Han Y, Zheng Y P, Zhang T, et al. Geochemical and hydrogeochemical characteristics of high fluorine area in Gaomi, Shandong[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2013, 37(6): 1107-1113.]
- [16] 郭成浩, 边建朝, 王侑, 等. 山东省菏泽地区隔膜型布-加综合征外环境饮用水多元素测定[J]. 中华地方病学杂志, 2005, 24(2): 207-209. [Guo C H, Bian J C, Wang Y, et al. Effect of multiple elements in drinking water on inferior vena cava membranous obstruction type of the Budd-Chiari syndrome in Heze area of Shandong province[J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 2005, 24(2): 207-209.]
- [17] Webster J G, Brown K L, Vincent W F. Geochemical processes affecting meltwater chemistry and the formation of saline ponds in the Victoria Valley and Bull Pass Region, Antarctica[J]. *Hydrobiologia*, 1994, 281(3): 171-186.
- [18] Warren H V. Geology, trace elements and health[J]. *Social Science & Medicine*, 1989, 29(8): 923-926.
- [19] 高明志, 罗斐. 济南环境地质[J]. 上海地质, 2010, 31(S1): 16-19. [Gao M Z, Luo F. The environmental geology in Jinan[J]. *Shanghai Geology*, 2010, 31(S1): 16-19.]
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [National Environmental Protection Agency. The Monitoring Analysis Method of Water and Wastewater (the Fourth Edition)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.]
- [21] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水标准检验方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007. [Ministry of Health of the People's Republic of China. Standard Examination Methods for Drinking Water[M]. Beijing: Standards Press of China, 2007.]
- [22] Hara H, Waizaka Y, Okazaki S. Silver chloride pre-treatment for the direct potentiometric determination of chloride in stream waters using a solid-state chloride ion-selective electrode [J]. *Analyst*, 1985, 110(9): 1087-1090.
- [23] 于长珍, 付二红. 离子选择电极法测定水中氯含量[J]. 化学分析计量, 2010, 19(1): 40-42. [Yu C Z, Fu R H. Determination of chloride in water by ion-selective electrode method[J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2010, 19(1): 40-42.]
- [24] 纪其光, 王碧泉. 地下水化学成分的数据处理及应用[J]. 南方国土资源, 2007, (1): 31-33. [Ji Q G, Wang B Q. Data processing and application of groundwater chemical composition[J]. *Land and Resources of Southern China*, 2007, (1): 31-33.]
- [25] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986. [Shen Z L. Basis on Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Press, 1986.]
- [26] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007. [Ministry of Health of the People's Republic of China. Standard for Drinking Water Health[M]. Beijing: Standards Press of China, 2007.]
- [27] World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality [M]. Geneva: World Health Organization, 2008.
- [28] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 饮用天然矿泉水[M]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Potable Natural Mineral Water[M]. Beijing: Standards Press of China, 2009.]
- [29] 甘日华, 魏杨红. 水质卫生指数的计算及评价初探[J]. 华南预防医学, 1992, (3): 179-181. [Gan R H, Wei Y H. Calculation and evaluation of water quality index[J]. *South China Journal of Preventive Medicine*, 1992, (3): 179-181.]
- [30] 缪永东. 水质卫生指数综合评价方法在农村改水中的应用研究[J]. 中国初级卫生保健, 2006, 20(11): 15-17. [Miu Y D. Applied research on comprehensive evaluation method of water quality health index in rural water improvement[J]. *Chinese Primary Health Care*, 2006, 20(11): 15-17.]
- [31] 中华人民共和国卫生部全国爱卫会. 农村实施《生活饮用水卫生标准》准则[M]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 1991. [Ministry of Health of the People's Republic of China, Patriotic Health Campaign Committee. Implementation of the Guidelines on Health Standards for Drinking Water in Rural Areas[M]. Beijing: Ministry of Health of the People's Republic of China, 1991.]
- [32] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1944, 25(6): 914-928.
- [33] Zhu B, Yang X, Rioual P, et al. Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarer and Yili) in northern Xinjiang, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(8): 1535-1548.
- [34] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [35] Keller W D. Drinking water: a geochemical factor in human health [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1978, 89(3): 334-336.

Groundwater chemical characteristics in the upper reaches of the Langmaoshan Reservoir, Shandong

GAO Ying¹, TIAN Yuan^{2,3}

(1. Honours College of Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Lhasa National Ecological Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Shandong lacks water resources and the Jinan southeastern mountain area is an important groundwater recharge area, ecological function area and basin water environment protected area. This area's water quality environment is important. In order to strengthen research on the chemical characteristics of groundwater in the upper reaches of the Langmaoshan Reservoir, we collected and analyzed water samples from the Jinan southeastern mountain area across different geological backgrounds in 2012. We found that the groundwater in the Jinan southeastern mountain is clean or almost clean freshwater; the hardness of water samples belong to medium hardness. The dominant hydrochemistry type for these water samples are Ca-HCO₃-SO₄ type; the elements in this water samples are mainly controlled by carbonate rock. Water samples were weakly alkaline; the pH values were between 7.1~7.3. Total dissolved solids were between (190-470)mg/L. The water was colorless, tasteless, odorless, transparent and has a good drinking taste. The concentration of each element is appropriate, especially the Na⁺, SO₄²⁻ and Cl⁻ concentrations which are far less than the Chinese and world drinking-water quality guidelines. The water hardness is moderate hard water-fresh water. Ca²⁺ and Mg²⁺ are two dominant cations, and HCO₃⁻ and SO₄²⁻ are two dominant anions. The strontium concentration of some water samples is close to or exceeds the Chinese Natural mineral water evaluation standard. The iron of some water samples exceeds the limited amount index; other elemental concentrations are within the Chinese and world standard security range and suitable for drinking.

Key words: Jinan southeastern mountain area; groundwater chemical characteristics; water quality assessment; environmental health effect; water resources development