济南西郊水源地和市区泉群的水质变化

万利勤^{1,2}, 徐慧珍², 殷秀兰², 李文鹏², 王庆兵³, 段秀铭³, 高赞东^{1,3} (1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 山东省地质环境监测总站, 济南 250013)

摘要:文章以济南西郊水源地(峨眉山水厂和大杨庄水厂)和济南中心城区的四大泉群作为研究对象,通过比较和分析 20世纪80年代和2005年、2006年的水化学和稳定同位素数据,认为20多年以来,济南泉域补给区和排泄区的环境都发 生了很大变化,导致非矿物溶解的SO4²⁻输入增加,与Mg²⁺不成比例。目前西郊水源地开采的地下水为灰岩水顶托补给 和当地大气降水的混合,而市区四大泉群相当于灰岩水顶托补给和当地浅层地下水之间的混合。

关键词:水源地;泉群;水化学;稳定同位素

中图分类号: P641. 8; P641. 69 文献标识码: A

文章编号: 1000 3665(2008) 04 0017 05

1 前言

根据"济南保泉供水系统研究"报告^[1], 天然条件 下的济南泉域, 泉水排泄是岩溶水系统的主要排泄方 式。20世纪50年代末或60年代初,市区四大泉群总 流量平均在30×10⁴~35×10⁴m³/d, 西郊腊山、峨眉山 泉等流量达0.9×10⁴~1.7×10⁴m³/d。但至20世纪八 九十年代, 工、农业及生活用水生产井排泄已成为岩溶 水系统最主要也是最大量的排泄, 岩溶水日开采量达 到65×10⁴m³/d。大量开采造成西郊腊山、峨眉山泉相 继干枯,市区趵突泉等四大泉群季节性出流, 平均流量 仅为5.27×10⁴m³/d。岩溶地下水的长期开采导致岩 溶水水头不断下降, 使开采区内地下水的补给条件发 生了明显变化, 甚至出现泉水断流。

为了进一步研究岩溶水水质和补给条件的变化, 中荷合作项目"中国地下水信息中心能力建设"先后于 2005年10月和2006年6月两次在济南西郊大杨庄水 厂、峨眉山水厂以及市区四大泉群等地下水开采区采 集水化学和稳定同位素样品,并与此地段20世纪80 年代的水质资料^[2]进行对比,对20多年来济南泉域主 要水源地和泉群的水质变化进行分析,为合理开发利 用岩溶地下水提供科学依据。

作者简介: 万利勤(1973-), 女, 博士研究生, 主要从事地下水 资源环境调查研究工作。

2 西郊开采区

2.1 水化学和稳定同位素数据

作为本节研究基础的数据来自三个方面:

(1)"济南泉域西郊岩溶水系统水力联系研究报告"^[2](以下简称"水力联系研究报告")收集的 1984 年9月化学分析数据(表 1);

(2)"水力联系研究报告"^[2]中 1989 年采取样品的 稳定同位素数据(表 2);

(3) 2005 年 10 月、2006 年 6 月, 中荷合作项目研究采取样品的化学分析和稳定同位素数据(表 2)。

表 1 峨眉山水厂和大杨庄水厂水化学数据(单位:mmo/L)

Table 1 Hydrochemical compositions of Emeishan

and Dayangzhuang well fields(mmol/L)

取样地点	取样时间	样品号	温度 (℃)	pH 值	Ca ²⁺	Mg ²⁺	${\rm SO_4}^{2-}$	HCO3-
	1984.09		17		1.43	0 41	0. 15	3.45
峨眉山	2005.10	203		7.6	1.88	0 56	0.38	3.89
水厂	2006.06	02	18	7.9	1.74	0 51	0. 29	3.74
	1984.09		18		1.45	0 43	0. 20	3.50
大杨庄	2005.10	206		7.7	2 02	0 68	0.57	3.80
水厂	2006.06	41	19.4	80	1.83	0 62	0.39	3.89
	2006.06	42	18.6	80	1.63	0 62	0. 31	3.69

以上所有数据来自同一水厂的开采区,但并不一 定取自同一个生产井,厂区位置见图1。

2.2 水化学和稳定同位素分析

根据文献[3], 天然状态下, 济南岩溶水形成过程 中, Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 的比例应该符合平衡方程式的结果: Mg^{2+} : $SO_4^{2-} = 0.60$: 0.32。把表 1 中的数据标在图 2 上, 把表 2 中的标在图 3 上。

© 1994 Email Gwan2000 @attem for Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期: 2008 02-05; 修订日期: 2008-02-19

基金项目: 中荷合作项目《中国地下水信息中心能力建设》

表 2 峨眉山水厂和大杨庄水厂稳定同位素数据(单位: V SMOW ‰)

Table 2 Stable isotopic compositions of Emeishan and Dayangzhuang well fields(V SMOW ‰)

取样地点	取样时间	样品号	δD	$\delta^{18}O$	取样地点	取样时间	样品号	δD	δ ¹⁸ O
峨眉山水厂	1989.01		- 62.30	- 8 67		1989 01		- 60 90	- 8.56
	1989.03		- 55.50	- 7.67	大杨庄水厂	1989 03		- 59 60	- 8. 74
	1989.04		- 60.00	- 8 72		1989 04		- 58 10	- 8. 62
	1989.05		- 62.10	- 8 84		1989 05		- 57.70	- 8. 70
	1989.06		- 59.60	- 8 70		1989 06		- 60 00	- 8. 54
	1989.07		- 58.40	- 8 70		1989 07		- 57.60	- 8. 12
	1989.08		- 59.50	- 8 76		1989 08		- 59 60	- 8. 82
	1989.10		- 61.00	- 8 69		1989 10		- 60 60	- 8. 28
	1989.12		- 59.10	- 8 75		1989 12		- 60 10	- 8.87
	2005.10	203	- 62.00	- 9.50		2005 10	206	- 59 00	- 8. 20
	2006.06	02	- 61.00	- 8 60		2006 06	41	- 62 00	- 8.60
						2006 06	42	- 60 00	- 8. 60



图 1 济南泉域浅层地下水和岩溶水取样位置图 Fig. 1 Sampling locations of groundwater in Jinan spring area





在图 2 上, 2005 年的样品明显偏离 Mg²⁺ /SO4²⁻ 对 比线, Mg²⁺、SO4²⁻ 含量不符合岩溶水径流过程中水-岩相互作用的比例, 表明 2005 年的地下水样品受到一 定的污染或混合。



图 3 峨嵋山水厂和大杨庄水厂稳定同位素数据对比图 Fig. 3 Relationship between δD and δ¹⁸O of Emeishan and Dayangzhuang well fields

1984 年和 2006 年的数据靠近 Mg²⁺/SO4²⁻ 对比线 分布,表明 1984 年和 2006 年的样品都基本符合岩溶 水化学成分的形成过程,没有明显受到其它水体的混 合或污染。但二者数据之间存在一定间距。相对于 1984 年的样品,2006 年样品的 Mg²⁺ 和 SO4²⁻ 含量都有 轻微增长,提示存在两种可能:一种可能是,此间距单 纯由脱白云石化的矿物溶解(水-岩相互作用)引起, 提示开采区内补给水量的变化可能来自离开采区更远 或更深的部位,因为只有径流途径延长,才能导致矿物 溶解量的增加;另外一种可能为受酸雨影响所致。

2005年丰水期和 2006年枯水期数据之间也存在 一定间距。2005年地下水样品的 SO4²⁻含量有较大增 加,这种大幅度的增加不可能是来自补给区的大气降 水,只能是排泄区的污染物混入所致。混合程度和混 合过程与两个因素有关,一个是开采区岩溶水上覆第 四系地层地下水或地表水体的入渗;另一个是开采区 地面的人为污染,如酸雨、污水排放、垃圾堆放等。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

在图 3 上,除 2005 年峨眉山和大杨庄两个水厂的 样品偏离全球大气雨水线外,还存在三个偏离全球大 气雨水线的点,分别为1989年7月和10月(大杨庄水 厂)、1989年3月(峨眉山水厂)的数据。这种情况说 明丰水期的样品数据不够稳定,可能与当时排泄区地 面水体的流动变化有关,容易遭受污染。

2006年6月枯水期的稳定同位素数据相对稳定. 与1989年数据分布相似,基本上靠近大气水线分布, 表明岩溶水补给以当地降水直接入渗为主^[4].没有明 显的蒸发和汇水过程,而且稳定同位素值分布范围相 当于 C 域(图 5) 消除蒸发效应向大气水线靠拢的位 置,实际上排除了水岩相互作用变化的可能性,认为排 泄区地面污染物或污染水体的混合符合实际情况。

- 市区四大泉群 3
- 3.1 水化学和稳定同位素数据

本节的研究数据来自两个方面:

(1)"水力联系研究报告"^[2] 收集的 1984 年 1 月至 1985 年 3 月化学分析数据(表 3):

(2) 2005 年 10 月、2006 年 6 月, 中荷合作项目研究 工作采取样品的化学分析和稳定同位素数据(表 4)。 取样位置见图 1(图上四大泉群位置以 2006 年 6 月的 样号点表示)。

	表 3	济南中心城区四大泉群水化学数据(单位:mmol/L)
Table 3	Hydroc	hemical compositions of four springs in Jinan downtown(mmol L)

		v				, .				
取样地点	取样时间	样品号	温度(℃)	pH 值	$K^+ + Na^+$	Ca ²⁺	Mg^{2+}	Cl-	$\mathrm{SO_4}^{2-}$	HCO3 ⁻
	1984.01~03 均值		15 5	7.69	0 47	1.79	0 51	0.61	0. 24	3.85
	1984.07~08均值		15 5	7.45	0 54	1.82	0 58	0.61	0. 27	3.85
趵突泉	1984.09~10均值		15 5	7. <i>7</i> 9	0 45	1.77	0 50	0.62	0. 20	3.73
	1985.01~03均值		15 5	7.89	0 41	1.74	0 51	0.64	0. 22	3.67
	2005.10	200		7.40	0 62	2.60	0 78	1.10	0.87	4.55
	2006.06	55	18	7.90	0 73	2.53	0 80	1.17	0. 75	4.45
	1984.01~03 均值		18	7.87	0 43	1.54	0 50	0.43	0. 19	3.49
	1984.07~08均值		18	7.62	0 50	1.55	0 48	0.45	0. 21	3.65
珍珠泉	1984.09~10均值		18	7.68	0 40	1.52	0 49	0.43	0. 19	3.56
	1985.01~03均值		18	7.89	0 41	1.55	0 44	0.44	0. 22	3.56
	2005.10	202			0 57	2.15	0 59	0.84	0.65	3.84
	2006.06	48	19.5	7.90	0 52	2.03	0 66	0.80	0.54	3.89
	1984.01~03 均值		15 5	7.97	0 41	1.56	0 48	0.46	0. 18	3.50
	1984.07~08均值		15 5	7.60	0 45	1.66	0 37	0.50	0. 22	3.55
五龙潭	1984.09~10均值		15 5	7.80	0 41	1.49	0 47	0.46	0. 21	3.44
	1985.01~03均值		15 5	7.86	0 39	1.64	0 42	0.49	0. 18	3.52
	2005.10	199		7.40	0 65	2.21	0 67	0.86	0. 69	4.16
	2006.06	50	18 2	7.80	0 58	2.18	0 68	0.89	0. 63	4.09
	1984.01~03 均值		17	7. <i>7</i> 9	0 49	2.03	0 58	0.84	0. 27	4.03
黑虎泉	1984.07~08均值		17	7.57	0 53	2.03	0 54	0.86	0. 29	4.03
	1984.09~10均值		17	7.50	0 44	2.05	0 59	0.86	0. 31	4.00
	1985.01~03均值		17	7.73	0 49	2.12	0 54	0.89	0. 27	4.06
	2005.10	201		7.30	1.07	3.10	0.94	1.63	0.89	5.03
	2006.06	51	18	7.70	1.06	3.03	0 82	1.51	0. 92	5.05

因为 1984 年 1 月~ 1985 年 3 月逐月数据比较接 近,图上样点容易重叠,本节采用了4个均值表示。

表4中,C域和D域数据来自文献[5],C域代表 济南东郊和市区开采区当地降水入渗补给值,D 域代 表来自南部的岩溶水垂直向上流到第四系地下水的顶 托补给。C域和D域数据的差异反映了济南泉域南部 岩溶水补给区和北部平原区的降水高程效应^[6~7]。

由图 4 可知, 四大泉水 1984 年 1 月~ 1985 年 3 月 数据基本靠近 Mg^{2+} : $SO_4^{2-} = 0.60$: 0.32 对比线分布, 证明泉水在自流溢出期间,尚未受到当地浅层水或地 面污染物的影响,基本上符合不同矿物溶解的比例。 而2005年和2006年的数据明显偏离对比线、反映出 SO_4^{2-} 明显增长(和 M_g^{2+} 不成比例), 说明排泄区的环 境已经发生很大变化。

3.2 水化学和稳定同位素分析

比较 22 年前后的环境变化, 明显存在两种可能: © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4 济南浅层地下水和市区四大泉群的稳定同位素数据 (单位: ¥ SMOW ‰)

Table 4 Stable isotopic compositions of shallow groundwater and four springs in Jinan (V SMOW ‰)

分布区域	取样时间	样品号	取样位置	δD	$\delta^{18}O$
	2006.06	26	王舍人镇赵仙村南	- 56	- 7.9
	2006.06	28	冷水沟水厂西灰膏厂	- 60	- 7.9
C 域	2006.06	31	冷水沟村西	- 59	- 84
	2005.10	N 04	泉城路县西巷民井	- 60	- 8 3
	2005.10	25Í	王舍人镇冷水沟村	- 56	- 8 1
D域	2006.06	03	西郊峨眉山水厂	- 64	- 8 8
	2006.06	04	西郊市中区古城西	- 65	- 88
	2006.06	05	长清桥子里水源地	- 68	- 90
	2006.06	06	长清区归德镇新段庄	- 66	- 90
	2006.06	11	长清区老王府	- 66	- 9.0
	2006.06	12	长清区北张庄	- 66	- 9.0
	2005.10	CX7	长清归德镇月庄槠东	- 62	- 89
	2006.06	48	珍珠泉堰口	- 61	- 8 3
	2006.06	49	五龙潭月牙池堰口	- 61	- 84
四大泉群	2006.06	50	五龙潭内孔	- 63	- 86
	2006.06	51	黑虎泉	- 62	- 84
	2006.06	55	趵突泉闸口处	- 62	- 85



图 4 济南中心城区四大泉群 Mg2+ 和 SO42 关系图

```
Fig. 4 Diagram of Mg<sup>2+</sup> vs SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> of
```

four springs in Jinan downtown

(1)随着经济发展,酸雨趋向严重,不管在补给区 或是排泄区,降水中的 SO4²⁻ 值不断增长,直接影响了 降水的输入值:

(2)随着城市化发展和中心城区岩溶水开采量增加,水位下降,引起周边受污染的浅层水和地表污染物的补给, SO4²⁻增长源自污染物或污染水体的混合。

2005年和2006年的数据变动,证明排泄区地面环 境的变化,包括降水、地表河水以及生活污染排泄等, 都在影响着泉水的化学成分,并使之发生变化。

如图 5 所示,将 C 域和 D 域数据作为样板与泉群 数据进行比对,可能存在三种情况;unal Electronic Pub





(1)如果四大泉水全部为当地降水直接入渗补给, 溶解了地面污染物,或者当地降水形成径流,成为污染 水体后入渗,则样点应该落入C域,同时化学成分可 以各异,随不同位置的点污染而定;

(2) 如果四大泉水全部由南部山区的岩溶水露头 入渗补给,尽管补给区地面环境有所变化,但因为在径 流过程中水质均匀化的缘故,四大泉水样品的稳定同 位素值应该落入 D 域,同时化学成分应该趋同;

(3) 如果四大泉水在排泄区由上述两种补给水体 混合形成^[4,6],则稳定同位素值应界于 C 域和 D 域之 间,同时化学成分各异。

图 4~ 5上所示的四大泉水 2006年的样点分布状况,已明显表明属于第三种情况。图 4 中,水化学数据 明显偏离对比线,而且 2005年和 2006年两次数据存 在一定的范围变动,其中又以趵突泉和珍珠泉变动大 一点。图 5 中,稳定同位素数据基本上位于 C 域和 D 域之间的混合带上。

4 结论

在济南泉域数据分析中,尤其是近几年的数据明 显反映出枯水期样品比较稳定,便于历史对比,而丰水 期样品不太稳定,随当年气象、水文条件变化而变化。

以 Mg^{2+}/SO_4^{2-} 对比线做比较,发现 20 世纪 80 年 代样品虽靠近对比线,但均在线的上方分布,表明用 2006 年 6 月西郊开采区样品计算的化学平衡式中的 Mg^{2+}/SO_4^{2-} 对比线存在微小的误差。这个误差代表了 20 世纪 80 年代和 2006 年样品在补给区的输入值不 同,显然是受到了酸雨影响,因为计算对比线时没有考 虑酸雨的影响。

数据进行比对,可能存在三种情况: 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.clikt.net 围(C域)经消除蒸发效应以后,将会向大气水线延伸, 沿大气水线的δ[®]O值估计在-8.5‰~9.0‰之间。大 杨庄和峨眉山水厂1989年稳定同位素数据和2006年 数据基本重合,表示在此时段补给条件相似。西郊这 两个水厂开采的地下水相当于灰岩水顶托补给(D域) 和当地大气降水之间的混合。而四大泉群2006年的 稳定同位素数据显示,市区四大泉水相当于灰岩水顶 托补给(D域)和当地浅层地下水(C域)之间的混合。

以上过程说明,当岩溶水处于自然状态时,在排泄 区的水流是垂直向上补给浅层地下水并溢出地面;当 岩溶水水头不断下降以后,必定引发浅层地下水和当 地降水的垂直向下入渗,导致二者水体的混合。这种 混合不但使岩溶水的氢氧稳定同位素值发生改变,而 且因携带了地面污染物导致水质遭受一定的污染。 究[R].济南:山东省地矿工程勘察院, 1998.

- [2] 贺庆昌,蔡玉田,贺殿彬,等.济南泉域西郊岩溶水 系统水力联系研究报告[R].济南:山东省地矿局 八〇一队,地矿部岩溶地质研究所,1992.
- [3] 万利勤, 徐慧珍, 殷秀兰, 等. 济南岩溶地下水化学 成分的形成[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 61-64.
- [4] Emanuel Mazor. Chemical and isotopic groundwater hydrology [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 2005.
- [5] 徐慧珍,李文鹏,殷秀兰,等.济南泉域浅层地下水水化学同位素研究[J].水文地质工程地质,2008, 35(3):65-69.
- [6] Ian D. Clark and Peter Fritz. Environmental isotopes in Hydrogeology [M]. America: Lewis Publishers, 1999.
- [7] Payne B R, Yurtsever Y. Environmental isotopes as a hydrogeological tool in Nicaragua [J]. Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, 1974(1): 193–202.

参考文献:

[1] 李铁锡, 邢立亭, 康凤新, 等. 济南保泉供水系统研

Changes study of groundwater quality of Xijiao well fields and downtown springs in Jinan

WAN Lirqin^{1,2}, XU Huirzhen², YIN Xiurlan², LI Werrpeng², WANG Qing bing³, DUAN Xiurming³, GAO Zarr dong^{1,3} (1. China University of Geoscience, Bejing 100083, China;

2. China Institute for Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China;

3. Shandong Geo- Environment Monitoring Station, Jinan 250013, China)

Abstract: This paper studied changes of groundwater quality in Xijiao well fields and four springs in the downtown of Jinan city by comparing and analyzing the hydrochemical and isotopic data in 1984, 1989, 2005 and 2006, respectively. The results showed that great environmental changes had been happened in the recharge area and discharge area in Jinan since 1980's. This changes resulted in nor mineral solution SO_4^{2-} input increased, which was disproportionate with Mg^{2+} . Presently, the exploited water from well fields is a mixture of underside Karst groundwater and local precipitation, while the exploited water from the urban springs is a mixture of underside Karst groundwater and local shallow groundwater.

Key words: well field; spring; hydrochemistry; stable isotope

责任编辑: 王宏

•封面说明•

汶川地震灾区地灾评估结果形成

"5.12" 汶川地震发生后,国土资源部紧急组织开展了四川、甘肃、陕西受灾地区的地质灾害综合评估。通过遥感调查和实地排查,共确定汶川地震灾区 84 个受灾县(市)的主要地质灾害点16644个,其中四川灾区存在重大安全隐患点 218 处。这些地质灾害点 威胁大量居民地和水库、损毁公路和耕地林地、危害河道和桥梁等。评估成果将为国务院及有关部门和地方政府组织领导抗震救 灾、编制灾后恢复重建规划、组织实施地质灾害防治等提供重要的决策依据。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net/图