# 济南泉域浅层地下水水化学同位素研究

徐慧珍<sup>1</sup>,李文鹏<sup>1</sup>,殷秀兰<sup>1</sup>,段秀铭<sup>2</sup>,高赞东<sup>2</sup>,王庆兵<sup>2</sup>

(1. 中国地质环境监测院,北京 100081; 2. 山东省地质环境监测总站,济南 250013)

摘要:文章系统地分析了济南泉域浅层地下水(第四系孔隙水)和地表水的水化学成分和氢氧稳定同位素,并结合当地 地形和水文条件,研究了不同地段浅层地下水和地表水的不同补给来源,揭示了浅层地下水与岩溶水的水力联系,得出 浅层地下水在市区和东郊以降水入渗补给为主;在西郊和平安店则以岩溶水顶托补给和地表水(河水和水库水)入渗补 给为主、当地降水入渗为辅的结论。为保护泉水、优化泉域内地下水开采方案提供了重要依据。

关键词:浅层地下水;地表水;水化学特征;稳定同位素

中图分类号: P641.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3665 (2008) 03-0065-05

## 1 研究区概况

济南泉域位于泰山背斜北翼的济南单斜构造区, 岩层倾向总体为 NNW,其地层岩性分布自南向北依次 出露太古界泰山群、寒武系、奥陶系、石炭 - 二叠系、新 近系及第四系。区内第四系分布广泛,主要分布在山 前倾斜平原、北部黄河冲积平原、玉符河、北沙河河谷 地带,在山间盆地和山麓斜坡上也有小面积堆积。第 四系厚度变化较大,由南东至北西厚度逐渐增大,局部 低洼处大于 150m<sup>[1]</sup>。

浅层地下水主要分布在山区河谷和山前河流形成 的冲洪积平原以及沿黄河地带。玉符河及北沙河上游 山间河谷内含水层呈带状分布,厚5~15m,局部达 30m。玉符河、北沙河中下游冲洪积平原的第四系厚 50~140m,主要含水层埋深在70m以上,其上部含水 层为中砂及中粗砂夹砾石,分选性一般较好,下部为砂 砾石夹粘土,分选性差;70m以下为粘土夹砾石,含水 层东西(横向)分布不均匀,多呈透镜状;70m以上赋水 性较好,单井出水量1000~2000m<sup>3</sup>/d,在河流沿岸与 下伏岩溶水有密切联系部位,单井出水量可大于 2000m<sup>3</sup>/d。近山前水位埋深为10~30m,远离山前为3 ~8m。沿黄河地带分布有黄河冲积层,厚8~19m,含 水层岩性为粉砂及粉细砂<sup>[1]</sup>。区内浅层孔隙水、地表

收稿日期: 2007-04-18; 修订日期: 2007-10-20

基金项目:中国荷兰合作项目"中国地下水信息中心能力建 设"

作者简介:徐慧贞(1966),女,博士,教授级高级工程师,主要 从事地下水资源环境调查研究工作。 Email:xuhz @mail.cigem.gov.cn 水与岩溶水之间有较密切的水力联系[1~2]。

本次研究工作主要以 2005 年 10 月和 2006 年 6 月 所取水样作为基础,在前期研究<sup>[3-5]</sup>的基础上,深入分 析浅层地下水和地表水水化学和同位素测试资料,研 究其地球化学特征及浅层地下水与降水、地表水和岩 溶地下水之间的补排关系。

### 2 浅层地下水和地表水取样位置及测试项目

济南泉域排泄区浅层地下水 2005 年丰水期(10 月)和 2006 年枯水期(6月)共取水样 17 件,2005 年丰 水期取地表水样 9 件,取样点位置见图 1。测试项目 包括全分析项目和氢氧稳定同位素,全分析测试由山 东省地质环境监测总站实验室完成,同位素测试由国 土资源部地科院资源所同位素实验室完成,同位素单 位采用千分偏差值,主要分析数据见表 1。



 
 Fig. 1 Map showing the Jinan spring catchment and the sampling locations

 1 —浅层水取样点; 2 —地表水取样点; 3 —第四系分布区

· 66

Table 1         Chemical and isotopic compositions of shallow groundwater and surface water in the Jinan spring catchment												
样品号	取样位置	$K^+ + Na^+$	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	CI -	$SO_4^2$	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	TDS	D	<sup>18</sup> O	取样时间
31	冷水沟村西	59.75	156.07	62.16	148.69	180.31	443.74	1.02	1 070.24	- 59	- 8.4	2006.6
11	长清区老王府	15.75	90.85	16.25	38.26	25.43	301.99	2.74	508.6	- 66	- 9	2006.6
05	长清桥子里水源地	63.00	36.11	0.35	36.28	129.45	9.25	5.89	317.96	- 68	- 9	2006.6
12	长清区北张庄	19.20	76.87	13.42	17.84	23.12	301.99	5.93	476.66	- 66	- 9	2006.6
N04	泉城路县西巷民井	246.25	155.81	36.86	129.59	229.47	680.42	9.52	1 538.22	- 60	- 8.3	2005.10
KD1	长清区齐家饭铺	14.00	68.51	11.39	21.21	28.99	220.05	15.05	398.13	- 64	- 10.1	2005.10
54	珍池街1号(浅井)	140.00	129.28	28.97	82.28	113.27	536.18	18.50	1 089.99	- 53	- 7.5	2006.6
CX7	长清归德镇月庄槠东	15.40	78.50	12.10	21.20	48.30	217.20	26.40	419.10	- 62	- 8.9	2005.10
06	长清区归德镇新段庄	25.65	109.48	16.95	39.65	50.86	323.56	36.90	622.26	- 66	- 9	2006.6
28	冷水沟水厂西灰膏厂	83.95	326.12	73.46	174.46	576.07	493.04	43.05	1 790.40	- 60	- 7.9	2006.6
251 '	王舍人镇冷水沟村	67.65	320.89	77.06	189.67	560.38	460.37	43.25	1 739.85	- 56	- 8.1	2005.10
J8	平安镇小于庄村内	15.90	119.34	25.46	40.06	49.27	324.28	72.90	666.55	- 62	- 9.7	2005.10
04	西郊市中区古城西	18.00	105.99	19.07	20.22	64.73	283.50	83.20	611.90	- 65	- 8.8	2006.6
430	南郊矿村	22.00	156.90	10.70	58.90	111.10	278.00	84.80	722.40	- 62	- 9.6	2005.10
26	王舍人镇赵仙村南	91.05	194.51	48.03	137.79	288.50	351.29	107.10	1 226.52	- 56	- 7.9	2006.6
03	西郊峨眉山水厂	20.55	144.43	24.72	42.62	76.29	295.82	171.88	793.54	- 64	- 8.8	2006.6
CX39	长清西关西门里木器厂	387.50	195.60	57.00	272.10	217.40	584.90	313.80	2 028.30	- 59	- 9.2	2005.10
466	卧虎山水库	13.75	77.35	13.40	18.85	74.88	194.68	29.13	432.89	- 60	- 9	2005.10
467	锦绣川水库	10.50	72.93	12.06	14.13	70.05	188.78	20.40	398.23	- 61	- 8.6	2005.10
R1	黄河洛口浮桥河水	55.35	58.57	25.46	55.37	110.14	185.31	17.20	517.00	- 64	- 9	2005.10
R2	大明湖北岸湖水	21.65	90.61	18.36	41.23	64.25	237.42	28.70	513.92	- 60	- 8.8	2005.10
R3	老楼子西北浮桥黄河	48.40	53.48	22.79	47.12	115.94	176.62	16.10	491.06	- 62	- 9.6	2005.10
R4	周王庄桥下玉符河	14.90	75.14	12.73	22.38	65.22	205.57	22.35	425.62	- 61	- 9.2	2005.10
R5	机床二厂出口处兴济河	29.80	103.21	17.42	34.16	102.90	286.64	18.10	638.93	- 62	- 9.4	2005.10
R6	崮山东辛庄西北沙河	18.20	64.10	15.40	21.20	82.10	159.20	28.10	388.30	- 58	- 8.4	2005.10
R7	党家庄西渴马桥玉符河	13.95	85.09	15.41	20.03	90.82	204.42	29.88	465.97	- 59	- 8.1	2005.10

表1 济南泉域浅层地下水和地表水分析数据

注:水化学分析单位为 mg/L,同位素分析单位为 %J/SMOW。

# 3 浅层地下水地球化学特征

#### 3.1 浅层地下水分组

7

为了判断浅层地下水的补给条件以及对岩溶水水 质的影响,根据浅层地下水的 D - TDS 关系图(图 2) 以及三线图(图 3),分析如下:

分布在东郊与市区周边的 7 个水样,除 430 号 TDS 1000mg/L、D - 60 % 划为 B 组外,其余 6 个 TDS > 1 000mg/L、D > - 60 % 划为 A 组;而分布在西郊 和平安店周边的 10 个水样,除 CX39 号 TDS > 1 000mg/L、D > - 60 % 划为 A 组以外,其余样品 TDS 1 000mg/L、D - 60 % 划为 B 组。

已知 4 个开采区的岩溶地下水水样在三线图上的 位置分布, SO<sub>4</sub> + Cl 为 20 % ~ 40 %, Ca + Mg 为 80 % ~ 100 %,除了黑虎泉和趵突泉, TDS 均在 500mg/L 以 内<sup>[5]</sup>。以此为标准, A 组水样在三线图上分散分布, TDS 均超过 1 000mg/L,明显反映出这组水样受到了地 面污染物的影响。B 组水样在三线图上亦可分为两 组:处于岩溶水所在菱形范围的 7 个水样(03、04、06、



# 图 2 济南泉域浅层地下水的 D-TDS 关系图 Fig. 2 Relationship between D and TDS in the shallow groundwater 1—平安店和西郊点;2—市区和东郊点

11、CX7、KD1和J8)为B(1)组,其余3个水样(05、430、 12)为B(2)组。

#### 3.2 A 组水样分析

A 组水样共有 7 个,其特征为 TDS > 1 000mg/L;水





化学类型分散,不具有同一性,在三线图上呈散点分 布; D>-60‰,这三项特征明显反映了A组水样是 降水在地面的垂向入渗,因为地面污染因地而异,同时 近地面均处在氧化带,在入渗过程中部分污染物溶解 进入地下水;同时 D值趋于接近,在 D-<sup>18</sup>O图(图 4)上,这7个水样除CX39位于大气降水线的左边,被 怀疑有地表水补给以外,其它6个水样均位于大气降 水线的右边,其中54号样同位素值有些偏高,查其原 因为井深仅5m,水体混合程度差(因潜水多呈层状分 布,可能是受季节性影响)。所以判断其余5个水样 (26、28、31,N04和251)比较明确地代表了东郊和市



7

区开采区的降水入渗补给的同位素平均值(图4,C 域)。

3.3 B 组水样分析

B组水样共有 10 个,均位于西郊和平安店开采区 周围,B(1)组 7 个水样在三线图上和岩溶水分布是相 似的。明显受到地面污染影响的水样有 03、04、J8 和 430,其中J8、KD1、430 位于大气降水线的左边,可能受 到降水或地表水影响,也即受到山区洪水或河水的入 渗影响;余下 5 个水样(05、06、11、12、CX7)从水化学类 型和 D- <sup>18</sup>O关系来看,和岩溶水相似,说明这些部位 存在岩溶水的顶托补给。

从以上分析来看,B组水样由三部分补给水组成: 岩溶水顶托补给,地面降水入渗补给,山区洪水(或河水)入渗补给。从稳定同位素上讲,05、06、11、12、CX7 水样和 03、04 水样存在相似性,反映出当地浅层地下 水的稳定同位素特征(图4,D域)。从化学成分上讲, 地面降水入渗时,前5个水样基本上没有明显的地面 污染物带入,后2个样明显受到污染。总之,这7个样 品在 D- <sup>18</sup>O关系图上归纳为一组(D域),以岩溶水 顶托补给为主,降水补给为辅(影响较小)。

东郊和市区浅层水(与当地降水相似)的同位素特 征值相对较高,西郊和平安店浅层地下水同位素值相 对要低,而后者又和当地岩溶地下水的值相当,证明后 者和岩溶水同源补给。分析表明,17个浅层地下水样 品中5个位于C域(代表以当地降水补给为主),7个 位于D域(代表以岩溶水顶托补给为主),余下5个样 品,除去54号因受季节性影响外,其余4个位于全球 大气降水线左方,怀疑和地表水(河水和水库水)补给 有关。

#### 4 浅层地下水和岩溶水之间的关系

根据在 1984~1985 年间记录的珍珠泉 16 次逐月 的水质分析数据<sup>[6]</sup>、在全国地下水动态监测数据库中 收集到的 1996 年和 1999 年 2 次分析数据和本次研究 所得结果(表 2),对比研究如下:

在 1984 年枯水期 (3 ~ 5 ~ f),  $Na^+ + K^+ \ Ca^- \pi$ SO<sub>4</sub><sup>2</sup> 有一次增大过程, 而 Ca<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub> 却是下降的; 在 1985 年枯水期 (1 ~ 3 ~ f), SO<sub>4</sub><sup>2</sup> 有一次增大过程, 而 Ca<sup>2+</sup> 却显示平稳 (图 5)。如果水质变动起因于含水层 中的矿物溶解,则 Ca<sup>2+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的同步增长显示难溶 的微晶石膏在溶解, 而 Na<sup>+</sup> 和 C<sup>-</sup> 的同步增长表示易 溶的微晶石盐在溶解。一般而言, 珍珠泉处于岩溶水 积极循环带, 石盐应该所存无几。但这些实际数据表 明 Ca<sup>2+</sup>和 SO<sup>2+</sup> 增长不同步,Na<sup>+</sup>和 CI 又突然同步增 长,和上述设定是违背的。所以珍珠泉的水质动态主 要不是在地层中发生矿物溶解,而是排泄位置存在其 它的水源混合,而岩溶水水位动态变化导致周围浅层 地下水(或降水、地表水)的混合程度不同。

表 2 济南泉域珍珠泉水化学分析数据(单位:mg/L)

compositions of the Deard Spring (mg/I)

	Chemicai	composi	ulous or t	ne ream	sping (	mg/L)
化学成分	$K^+ + Na^+$	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	a -	$SO_4^2$	HCO <sub>3</sub> -
1984 和 1985 均值	11.45	60.87	11.51	15.71	19.58	213.02
1996年	14.02	72.16	16.41	24.79	45.63	219.67
1999 年	14.75	84.63	15.26	31.18	41.27	242.89
2005 年	13.10	81.33	15.81	28.27	52.17	237.42
2006 年	14.25	86, 19	14.13	29.74	62,64	234.19





把 1984 和 1985 年水质均值作为对比值,再用 1996、1999、2005 和 2006 年数据分别减去对比值,得到 它们之间的差值,分别用 D1、D2、D3 和 D4 表示,并在 K+Na --C1 关系、Ca --SO4 关系图(图 6)上表示(坐标 用双对数坐标)。图上显示,除去1次数据以外,其余 7次数据均明显偏离11直线,说明缺乏单纯石盐和 石膏溶解的证据,而是还有其它水体的混入。对照珍 珠泉附近观测孔的水头动态曲线(图 7),1984 和 1985 年间岩溶水头年变化幅度约为2m,年间变化相对平 稳,进入1995 年以后,水头年变化幅度超过4m,而且 年间变化相应变大(1996~2000 年连续下降,2000~ 2005 年连续上升),由于浅层地下水(降水或地表水) 的混入变化趋大,推测水质年变化的幅度趋大。



图 6 珍珠泉 K + Na — Cl 和 Ca — SO<sub>4</sub> 分析图

Fig. 6 Diagram showing K+ Na -Cl and Ca -SO<sub>4</sub>





## 5 讨论

5.1 关于来自地表水(水库和河水)补给的特征

2005 年共取 9 个地表水稳定同位素样品 (R1 ~ R7、466、467), R1 落入 D 域,其余 8 个近似呈直线排列,与大气线斜交,同时 R6 和 R7 落入 C 域(图 8)。

(1) R1 和 R3 样品取自黄河,从其数据分布来看, 二者很不一致,至少应该有一个为非黄河河水补给,视 其地理位置 R1 样品可能性大,因为它靠近泺口镇,可 能受来自南部岩溶水排泄的影响。R3 样点和 11、12 号样点靠近,但二者数据不一致,排除了 R3 样点来自 岩溶水的排泄,它只能反映降水季节性补给的变化。

(2) R6 和 R7 样品落入 C 域。C 域样品代表多年 平均的当地降水补给,而 R6 和 R7 河水样品显然具有 明显的季节性补给特征,且其取样点位置高程明显较 高,所以它们和 C 域样品没有可比性。

(3)除了 R1 样品外,其余地表水样点实际上近似呈

T-11- 3



图 8 地表水和部分浅层地下水的 D-<sup>18</sup>O 关系图 Fig. 8 Relationship between D and <sup>18</sup>O in surface water and some of the shallow groundwater 1-浅层地下水点:2-地表水点

直线分布,其原因可能和当地降水补给的季节性有关, 但因只有一次取样,数据不足,目前尚不能进一步探讨。 而浅层地下水四个样点(CX39、KD1、J8和430)位于该直 线或其延长线上,说明其补给主要来自地表水(河水或 水库水),结合地形和水文条件来看,CX39和 KD1 样点 位置靠近平原河道,430 样点位于山间河谷之中,从水力 学角度很好理解。至于J8 样点位于平原,详情不明。

(4) 地表水主要来自当地或流域内的降水补给,其 同位素值明显缺乏多年平均的含义,而反映的却是季 节性变化特征。若是多年平均的话,样品一般会落在 大气降水线附近,或者大气降水线的下方,和蒸发有 关。关于这部分讨论,因缺乏长期观测资料,目前的认 识还很有限。

5.2 关于岩溶水顶托补给的分布位置

(1)泉水排泄:由于岩溶水向北运动至边界,于地 形低洼处溢出成泉(或泉群)。市区有趵突泉、黑虎泉、 五龙潭泉、珍珠泉,东郊有白泉、杨泉庄泉、葫芦头泉, 西郊有腊山泉、峨眉山泉。

(2) 潜流排泄:在玉符河、北沙河的山前冲洪积平 原,主要位于周王庄—朱庄—刘庄一线,岩溶水直接向 第四系补给(顶托补给)。

(3) 表流排泄:在玉符河丰齐以南一带,河道是在 排泄地下水;龙王庙一带曾为小清河的源头。

本次取样中代表顶托补给的样点均位于西郊和平 安店范围内,样点 03、04 和 05 位于上述(2)、(3) 排泄 区,另外 4 个样点全部超出上述研究报告中确定的边 界。其中 11 和 12 号样点偏西靠近黄河,06 和 CX7 号 样点已到马山断裂西侧。所以,这次研究证实了顶托 补给范围向西扩展。

# 6 结论

本次研究主要利用水化学分析中的主要成分、稳 定同位素,结合具体地点的地质、水文和环境进行分 析。从浅层地下水17个样品和地表水9个样品中直 接获取信息,以补充地质证据。

(1)研究区浅层地下水补给特征为市区和东郊以 降水入渗为主;西郊和平安店则以岩溶水顶托补给和 地表水(河水和水库水)入渗补给为主、当地降水入渗 为辅。

(2) 受地质条件限制,东郊和市区在历史上泉水露 头多、流量大,说明岩溶水以地面排泄为主,汇入河道 排出区外。由于近年来大量开采,岩溶水水头下降和 波动,已引起露头区周边浅层地下水的不同程度混入, 直接导致岩溶泉水水质的波动和变化。

(3) 地表水取样点仅有 2005 的监测数据,缺乏长期的监测资料,因此对地表水问题的分析研究存在局限性,有待在以后的研究中不断补充提高。

(4) 岩溶水顶托补给范围经调查比过去勘探资料 显示的明显向西扩展。

今后,该地区只要通过浅层地下水取样,进行水化 学全分析和稳定同位素测试,对比本文提供的数据分 布区间,即可鉴别浅层地下水的主要补给来源。

#### 参考文献:

- [1] 奚德荫,李祥芝,邵卓,等.山东省济南市保泉供水水文地质勘探报告[R].济南:山东省地质矿产局八 0一水文地质工程地质大队,1988.
- [2] 刑立亭,李常锁,胡爰民,等.济南地区水资源调蓄 与生态环境地质调查[R].济南:山东省地质矿产 局八0一水文地质工程地质大队,2003.
- [3] 王庆兵,段秀铭,高赞东,等.济南岩溶泉域地下水 位监测[J].水文地质工程地质,2007,34(2):1-7.
- [4] 徐慧珍,段秀铭,高赞东,等.济南城近郊区地下水
   头动态特征及原因分析[J].水文地质工程地质, 2007,34(2):87-89.
- [5] 徐慧珍,段秀铭,高赞东,等.济南泉域排泄区岩溶
   地下水水化学特征 [J].水文地质工程地质,2007, 34(3):15-19.
- [6] 贺庆昌,王绍文,蔡五田,等.济南泉域西部岩溶水 系统水力联系研究报告[R].济南:山东省地质矿产 局八0一水文地质工程地质大队,1992.

(下转第98页)

# A study of pore structure, pore fractal feature and permeability of unconsolidated sand

 $YANGJian^1$ , CHEN Jia-jun<sup>1</sup>, YANG Zhou-xi<sup>2</sup>, ZHENG Hai-liang<sup>1</sup>

(1. State key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Xianyang Institute for Survey and Mapping, Xianyang 712000, China)

Abstract: Pore structure of unconsolidated medium is an important influence on fluid migration. Unconsolidated quartz sand samples are consolidated with epoxy resin and are used to produce thin sections. The parameters of pore structure are obtained from these sections with image processing method. The fractal models of pore structure are used to analyze the fractal feature of unconsolidated porous medium, and the permeability of porous medium is measured and calculated. The results indicate that there is linear dependence among porosity, pore size and grain diameter. The correlation coefficient between porosity and grain diameter is - 0.9765, while the correlation coefficient between pore size and grain diameter is 0.9966. In the double logarithmic coordinate system of ln - $\ln N()$ , the data points of side length of square (i.e., ) and total square numbers (i.e., N()) of having pores are approximately in a line, and the fractal dimensions of pore distribution are very close for different samples. Moreover, in the double logarithmic coordinate system of  $\ln r - \ln N(r)$ , the data points of pore sizes (i.e., r) and total pore numbers (i.e., N(r)) of pore size that are greater than r are analyzed with the subsection regression method. The results of subsection regression method can reflect the practical situation of pore structure. There are high corresponding relationships between the fractal dimension of pore structure and the fractal dimension of grain diameters. The permeability measured by experiment is 5.19  $\times 10^{-5}$  mm<sup>2</sup>, which is 5.75  $\times 10^{-5}$  mm<sup>2</sup> when calculated with the fractal dimension of bigger grain diameters. The two values are very close. Fractal dimension of grain diameters can be used to calculated the permeability of porous medium.

Key words: thin section; image processing; pore structure; fractal dimension; permeability

责任编辑:汪美华

(上接第 69 页)

# Hydrochemistry and isotopes of shallow groundwater in the Jinan spring catchment

XU Hui-zhen<sup>1</sup>, LI Wen-peng<sup>1</sup>, YIN Xiu-lan<sup>1</sup>, DUAN Xiu-ming<sup>2</sup>, GAO Zan-dong<sup>2</sup>, WANG Qing-bing<sup>2</sup>

(1. China Institute of Georenvironmental Monitoring, Beijing 100081, China;

2. Shandong Geo-Environmental Monitoring Station, Jinan 250013, China)

Abstract : Hydrochemistry and stable isotopes of shallow groundwater and surface water were systematically analyzed in this paper. Combined with topographical and hydrological conditions, this paper analyzed thoroughly different recharge sources of shallow groundwater and surface water in different areas, and revealed the hydraulic connection between the karst groundwater and the shallow groundwater. The investigation and research results show that the shallow groundwater mainly receives recharge from precipitation in urban area and the eastern suburb; and mainly comes from underlying karst groundwater and surface water in western suburb and Pingandian district. The results may provide important base in protecting the Springs and optimizing groundwater exploitation in the catchment.

Key words: shallow groundwater; surface water; hydrochemistry characteristics; stable isotope

责任编辑:汪美华