

南太行山山前平原地下水和地表水氢氧同位素组成及环境意义

贾新生¹, 张东^{2,3,*}, 赵志琦³

(1. 延长油田股份有限公司川口采油厂, 陕西 延安 716000; 2. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000;
3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要: 借助氢氧同位素和水化学方法对南太行山山前平原地下水补给运移规律进行研究, 阐明人类活动对地下水的的影响过程。研究表明: (1) 区内不同水体 δD 、 $\delta^{18}O$ 、氘盈余值 (d -excess) 和氦同位素 (T) 值差异明显, 深层地下水均值分别为 $-74.0‰$ 、 $-9.4‰$ 、 $1.5‰$ 和 8.73 TU, 浅层地下水均值分别为 $-72.1‰$ 、 $-8.8‰$ 、 $-1.9‰$ 和 17.46 TU, 河水均值分别为 $-71.3‰$ 、 $-8.9‰$ 、 $-0.4‰$ 和 18.60 TU, 工业废水均值分别为 $-68.3‰$ 、 $-7.2‰$ 、 $-10.7‰$ 和 21.11 TU; (2) 补给区深层地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 d -excess 年均值分别为 $-68.08‰$ 、 $-9.24‰$ 和 $5.84‰$, 径流区深层地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 d -excess 年均值分别为 $-62.30‰$ 、 $-8.50‰$ 和 $5.66‰$, 排泄区深层地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 d -excess 年均值分别为 $-75.14‰$ 、 $-10.26‰$ 和 $6.94‰$; (3) 深层地下水补给源包括大气降水和河水, 受污染河水通过断层导水裂隙带补给深层地下水。浅层地下水补给源包括大气降水和河水, 受污染河水通过河流侧渗方式补给浅层地下水; (4) 受河水影响的深层地下水氘盈余值变低, T 含量升高, 因此结合氘盈余值与 T 含量可以很好地识别区内深层地下水污染过程。

关键词: 山前平原地下水; 氢氧同位素; 氘含量; 人为活动; 污染

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2016)03-0281-09 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.03.001

地下水是我国北方地区重要的生活用水和工业用水来源, 合理利用和有效保护地下水资源是人类面对的重要课题^[1-2]。焦作矿区水文地质条件复杂, 矿井涌水量大, 是我国著名的大水矿区^[3-4], 矿区范围内大量抽采地下水已经导致区内浅层地下水处于疏干和半疏干状态^[5]。南部平原地带浅层地下水埋藏浅, 蒸发强烈, 再加上人为活动的影响, 区内 50% 的孔隙地下水受到污染^[6]。区内不同类型地下水污染过程的研究开展已久, 主要集中在粉煤灰、碱渣和煤矸石等固体废物通过断层裂隙带污染周边地下水^[7-11]、工业废水侧渗污染地下水^[12-13]、污水灌溉垂直入渗污染地下水^[14], 借助实验室模拟以及水体氢氧同位素组成, 辨析地下水污染来源和污染机理。这些研究仅局限在局部地区, 整个焦作市区范围地下水补给和运移规律尚缺乏

全面认识。因此本论文依据前期研究数据, 结合 2012 年和 2013 年定点地下水监测结果, 力求分析整个焦作市区范围内地下水、河水以及工业废水等氢氧同位素组成, 探讨区内地下水循环机制, 阐明人类活动对地下水水质的影响范围和影响程度, 为区域地下水资源管理提供依据。南水北调中线工程已经贯通, 本论文研究结果可以为后续研究南水北调工程对焦作市区地下水运移规律的影响提供基础参考数据。

1 研究区概况

研究区集中在焦作市区范围, 属暖温带亚湿润季风气候, 多年平均温度为 14.5 °C (1951~2010 年), 多年平均降水量为 573.4 mm^[15], 70%~80% 的降水集中在 7~9 月。区内地貌类型由西北至东南

收稿日期: 2015-08-04; 改回日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41103053 和 41173030); 河南省高校科技创新团队支持计划(15IRTSTHN027) 和河南理工大学博士基金项目(B2012-092)。

第一作者简介: 贾新生(1979-), 男, 工程师, 主要从事油田环境保护方面的研究。E-mail: 51918317@qq.com.

* 通讯作者: 张东(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为环境地球化学。E-mail: zhangdong@hpu.edu.cn.

以此为山地构造侵蚀中心、山前倾斜平原,山前交接洼地和黄沁冲积平原^[16-17],地面标高范围为80~1790 m^[4]。含水层类型包括石炭-奥陶系灰岩裂隙岩溶水、二叠系砂岩裂隙水以及第四系松散岩类孔隙水^[4-5],从山前倾斜平原经山前交接洼地到黄沁冲积平原,含水层厚度逐渐降低,富水性逐渐变差^[5],含水层岩性从卵砾石、粗砂等过度到中砂、细砂、粉砂以及粉质黏土等^[5]。定点地下水样品分别位于区域地下水补给区、径流区和排泄区,其中补给区地貌类型为山前倾斜平原,岩性主要为卵砾石、含黏土卵砾石和粗砂卵砾石等组成^[5],含水层埋深一般在50 m以下,径流区和排泄区则位于山前倾斜平原与黄沁冲积平原交接地带,岩性包括中砂、细砂、粉砂以及粉土等^[5],深层地下水埋深在50 m左右。

2 研究方法

2003年8月分别采集25个深层地下水(埋深大于80 m)、7个浅层地下水(埋深小于30 m)、6个工业废水、5个河水样品以及1个大气降水样品(图1)。2012年和2013年选择C1、C2和C3三个深层地下水,地下水埋深分别为100 m、80 m和120 m,每月取样一次。2003年的样品取回后,在实验室内测定水样pH值,阴离子测试内容包括氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})和硝酸根离子(以 NO_3^- -N计),其中 Cl^- 采用硝酸银滴定法测定, SO_4^{2-} 采用

重量法测定, NO_3^- -N采用紫外可见分光光度法测定,总溶解性固体(TDS)采用重量法测定。水样氢氧同位素外送中国地质科学院水文地质环境地质研究所,其中氢同位素测试采用Zn还原+质谱仪(MAT251)法,氧同位素测试采用 CO_2 - H_2O 平衡+质谱仪(MAT251)法,分析精度分别优于1‰和0.2‰,氦含量采用液体闪烁计数法(1220 Quantulus)^[12]。2012年和2013年样品,现场测定水样温度、pH值和EC值(SX731,上海三信仪表厂),分辨率分别达到0.1℃、0.01和1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。氢氧同位素样品过滤后,置于10 mL玻璃瓶内密封保存,不留空隙,采用IWA-35d-EP水同位素分析仪(美国LGR公司),氢和氧同位素精度分别为0.6‰和0.1‰,测试工作在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。

数据统计分析在SPSS16.0软件中完成,研究区氢氧同位素和TDS等值线图借助Surfer10.0软件绘制,采用的计算方法为克里格(Kriging)法。

3 研究结果

3.1 化学组成

2003年区内深层地下水和浅层地下水pH值范围分别为6.96~7.73和6.80~7.51,均值分别为7.26和7.24(表1),河水pH值范围为7.42~7.93,均值为7.74(表1)。

2012年和2013年区内补给区、径流区和排泄

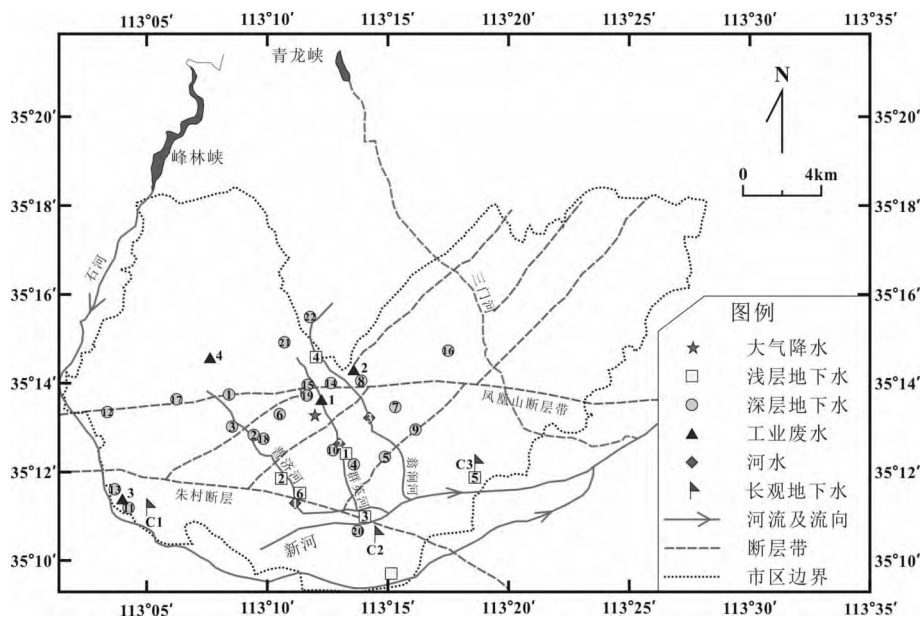


图1 研究区采样布点图

Fig.1 Sampling map of the study area

表 1 2003 年研究区不同类型水体化学及氢氧同位素组成统计表

Table 1 Statistical result for chemical and isotopic compositions of different water bodies of the study area in 2003

水体类型	pH	NO ₃ ⁻ -N /(mg/L)	SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	Cl ⁻ /(mg/L)	TDS /(mg/L)	δD /‰	δ ¹⁸ O /‰	d-excess /‰	T /TU
深层地下水(n=22)									
最小值	6.96	0.89	35	12	264	-77.4	-10.2	-5.9	0.50
最大值	7.73	9.31	185	2840	3380	-69.4	-8.4	8.3	18.60
平均值	7.26	3.48	79	252	743	-74.0	-9.4	1.5	8.73
中间值	7.19	2.67	77	84	566	-74.1	-9.4	0.9	9.00
浅层地下水(n=7)									
最小值	6.80	2.21	10	13	268	-77.6	-9.8	-6.5	5.24
最大值	7.51	13.6	236	328	1470	-65.7	-7.9	1.0	56.65
平均值	7.24	8.33	90	144	791	-72.1	-8.8	-1.9	17.46
中间值	7.20	8.36	73	102	738	-72.6	-8.6	-2.3	8.24
工业废水(n=4)									
最小值	/	1.48	150	119	800	-75.6	-8.6	-19.7	16.98
最大值	/	7.11	586	2370	37900	-59.1	-6.0	-5.1	25.33
平均值	/	4.41	343	819	10130	-68.3	-7.2	-10.7	21.11
中间值	/	4.53	317	394	909	-69.2	-7.1	-9.0	21.06
河水(n=3)									
最小值	7.42	/	/	/	458	-73.0	-9.5	-3.6	14.24
最大值	7.93	/	/	/	4162	-68.4	-8.1	3.5	21.45
平均值	7.74	/	/	/	1767	-71.3	-8.9	-0.4	18.60
中间值	7.88	/	/	/	680	-72.5	-9.0	-1.0	20.11
大气降水(n=1)									
测定值	/	0.89	9	6	158	-96.5	-13.3	9.9	13.68

注 “/”代表未检测。

表 2 2012~2013 年研究区深层地下水样品水化学和氢氧同位素组成统计表

Table 2 Statistical result for chemical and isotopic compositions of deep groundwater of the study area between 2012 and 2013

水体类型	pH	EC /(μS/cm)	δD /‰	δ ¹⁸ O /‰	d-excess /‰
补给区 C1(n=13)					
最小值	7.16	972	-69.06	-9.46	3.26
最大值	7.65	1253	-67.05	-9.04	6.89
平均值	7.36	1139	-68.08	-9.24	5.84
中间值	7.36	1158	-67.98	-9.25	5.87
径流区 C2(n=12)					
最小值	7.10	1762	-67.28	-9.34	2.35
最大值	7.65	2290	-57.68	-7.64	7.47
平均值	7.48	1910	-62.30	-8.50	5.66
中间值	7.49	1904	-60.58	-8.14	6.08
排泄区 C3(n=13)					
最小值	7.02	472	-76.40	-10.44	5.96
最大值	8.80	792	-72.69	-9.91	7.98
平均值	7.59	707	-75.14	-10.26	6.94
中间值	7.50	732	-75.64	-10.32	6.89

区深层地下水 pH 值均值分别为 7.36、7.48 和 7.59 (表 2), EC 值均值分别为 1139 μS/cm、1910 μS/cm 和 707 μS/cm (表 2)。

2003 年深层地下水 NO₃⁻-N、SO₄²⁻、Cl⁻ 和 TDS 含量均值分别为 3.48 mg/L、79 mg/L、252 mg/L 和 743 mg/L, 中间值分别为 2.67 mg/L、77 mg/L、84 mg/L 和 566 mg/L, 中间值普遍低于平均值, 与个别深层地下水离子含量高有关。浅层地下水 NO₃⁻-N、SO₄²⁻、Cl⁻ 和 TDS 含量均值分别为 8.33 mg/L、90 mg/L、144 mg/L 和 791 mg/L, 中间值分别为 8.36 mg/L、73 mg/L、102 mg/L 和 738 mg/L, 中间值与平均值差别不大。工业废水 NO₃⁻-N、SO₄²⁻、Cl⁻ 和 TDS 含量均值分别为 4.41 mg/L、343 mg/L、819 mg/L 和 10 130 mg/L, 中间值分别为 4.53 mg/L、317 mg/L、394 mg/L、909 mg/L, 个别工业废水(1 号点) Cl⁻ 含量和 TDS 含量分别达到 2 370 mg/L 和 37 900 mg/L。河水 TDS 含量均值为 1 767 mg/L, 中间值为 680 mg/L (表 1)。工业废水 SO₄²⁻、Cl⁻ 和 TDS 含量较高, 浅层地下水 NO₃⁻-N 含量较高(表 1)。

3.2 同位素组成

2003年区内深层地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 T 的均值分别为 $-74.0‰$ 、 $-9.4‰$ 和 8.73 TU,中间值分别为 $-74.1‰$ 、 $-9.4‰$ 和 9.00 TU (表 1),二者差别不大。浅层地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 T 的均值分别为 $-72.1‰$ 、 $-8.8‰$ 和 17.46 TU,中间值分别为 $-72.6‰$ 、 $-8.6‰$ 和 8.24 TU (表 1)。浅层地下水 T 含量中间值小于平均值,同时小于深层地下水 T 含量均值。工业废水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 T 的均值分别为 $-68.3‰$ 、 $-7.2‰$ 和 21.11 TU,中间值分别为 $-69.2‰$ 、 $-7.1‰$ 和 21.06 TU (表 1),二者差别不大。河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 T 的均值分别为 $-71.3‰$ 、 $-8.9‰$ 和 18.60 TU,中间值分别为 $-72.5‰$ 、 $-9.0‰$ 和 20.11 TU (表 1),二者差别不大。

与大气降水比较(表 1),区内深层地下水、浅层地下水、工业废水和河水等均富集氢氧同位素,其中工业废水由于长期处于蒸发状态,水体中最富集氢氧同位素。河水和工业废水中 T 含量较高,浅层地下水和深层地下水 T 含量较低。工业废水来源和成分差异明显,工业废水 1 号水体 TDS 含量最高(表 1)。

2012年和2013年区内定点采集三个地下水样品,其中位于补给区的 C1 深层地下水样品 δD 和 $\delta^{18}O$ 均值分别为 $-68.08‰$ 和 $-9.24‰$ 。径流区 C2 深层地下水样品 δD 和 $\delta^{18}O$ 均值分别为 $-62.30‰$ 和 $-8.50‰$ 。排泄区 C3 深层地下水样品 δD 和 $\delta^{18}O$ 均值分别为 $-75.14‰$ 和 $-10.26‰$ (表 2)。

4 讨论

4.1 研究区地下水与地表水之间的水力联系

焦作地区大气降水直线方程为 $\delta D = 8.032 \times \delta^{18}O + 12.68$ ^[18],与全球大气降水直线方程($\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$)相比^[19],斜率项与全球大气降水线方程接近,截距项大于全球大气降水线方程。凝结核在未饱和大气中降落时,受到非平衡质量分馏的影响^[20],截距项较大可能是雨水在降落的过程中,未发生明显的二次蒸发作用,空气比较湿润有关。

研究区不同类型水体氢氧同位素组成均位于当地大气降水直线下方,说明大气降水是研究区不同类型水体的主要来源(图 2)。① 深层地下水氢氧同位素组成的变化范围分别为 $-77.4‰ \sim -69.4‰$ 和 $-10.2‰ \sim -8.4‰$,在裴建国等^[18]对该地区裂隙水和岩溶水氢氧同位素范围内;② 浅层地

下水氢氧同位素组成的变化范围分别为 $-77.6‰ \sim -65.7‰$ 和 $-9.8‰ \sim -7.9‰$,与裴建国等^[18]研究得出的当地孔隙水氢氧同位素相比较,本次研究得出的浅层地下水氢氧同位素组成范围更宽,主要与采样点不同有关。2003年浅层地下水采样主要集中在南部交接洼地单元,除浅层地下水 5 号点外,其余地下水均富集氢氧同位素,显示蒸发作用的影响;③ 工业废水由于长期暴露在大气环境中,蒸发作用强烈,氢氧同位素组成位于当地大气降水直线右下方;④ 市区范围内三条河水(编号 1-3)主要接纳当地生活污水和工业废水,上游没有新鲜河水混入。区内生活用水和工业用水均取自当地深层地下水,所以市区范围内三条河水氢氧同位素与当地深层地下水氢氧同位素组成接近(图 2 中河水 2 号和 3 号点)。结合工业废水以及市区三条河流河水氢氧同位素组成,绘制当地地表水蒸发线(图 2,方程为: $\delta D = 3 \times \delta^{18}O - 45.79$, $r^2 = 0.53$),位于当地大气降水线下方,与当地大气降水直线交点($\delta D = -80.7‰$, $\delta^{18}O = -11.6‰$)为当地地下水补给源的年平均降水的氢氧同位素组成^[21]。

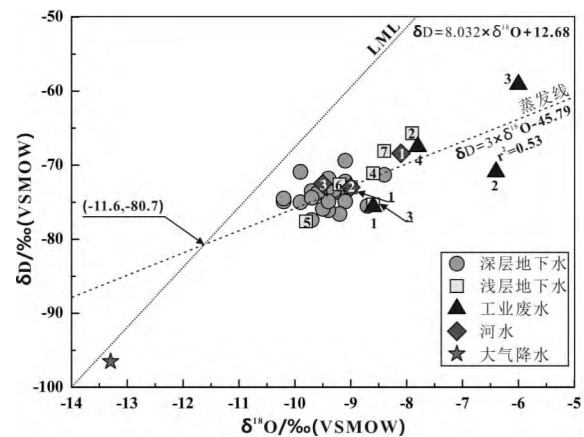


图 2 研究区不同水体氢氧同位素组成关系图

Fig.2 Relations between hydrogen and oxygen isotopes of different water bodies of the study area

氕盈余(d -excess)值主要受空气相对湿度控制^[21],蒸发作用越强,氕盈余值越偏负。研究区深层地下水氕盈余值范围为 $-5.9‰ \sim 8.3‰$,浅层地下水氕盈余值范围为 $-6.5‰ \sim 1‰$,工业废水氕盈余值范围为 $-19.7‰ \sim -5.1‰$,河水氕盈余值范围为 $-3.6‰ \sim 3.5‰$ (表 1 和图 3a)。由此可见,工业废水受强烈蒸发作用影响,氕盈余值最偏负,浅层地下水以及市区三条河水受蒸发影响次之,深层地下水受蒸发影响最小。

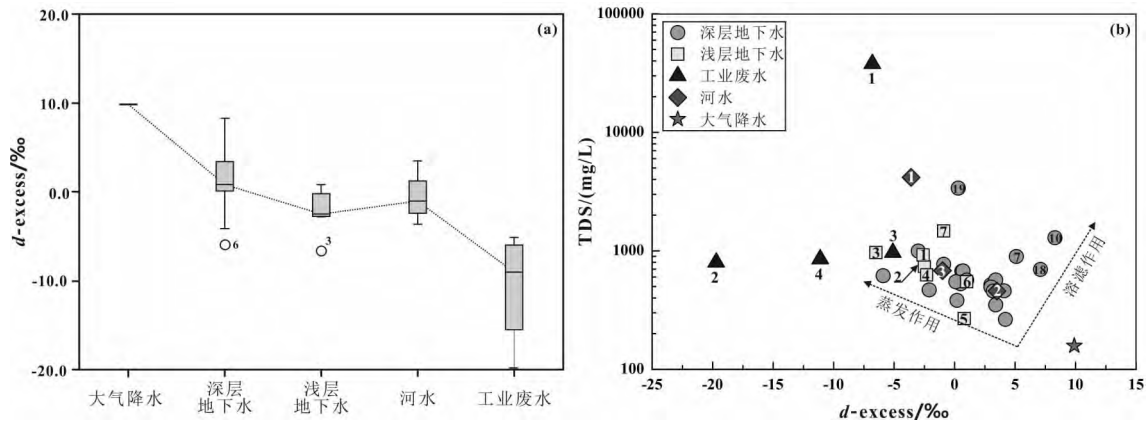


图3 研究区不同水体氘盈余分布(a)及氘盈余与TDS含量关系图(b)

Fig.3 Variations of d -excess (a) and relations between d -excess and TDS contents (b) in different water bodies of the study area

大气降水在下渗补给地下水的过程中,氘盈余值变化很小,同时补给过程发生溶滤作用,可溶离子进入地下水,导致地下水TDS含量升高。这一作用过程可以用来解释区内不同类型水体TDS含量变化与氘盈余值关系。由图3b可知,区内工业废水TDS含量升高与蒸发作用以及废水本身成分关系密切;区内河水1号点TDS升高可能与混入工业废水(1号)有关,河水2号和3号与深层地下水接近,与生活用水和工业废水来自深层地下水有关;区内浅层地下水主要受蒸发作用影响;区内深层地下水显示受蒸发作用和淋滤作用影响,如深层地下水7号、10号和18号点,TDS含量升高与溶滤作用有关,即大气降水溶滤地层中可溶盐导致这些地下水中TDS含量升高。其余深层地下水TDS升高与蒸发作用有关,但是由于河水也位于这些深层地下水附近,不能排除河水补给深层地下水导致TDS升高的可能性,还需要借助T含量来识别这一过程。

4.2 结合氘盈余值和T含量识别地下水污染过程

区内受生活污水等影响的三条河水氘盈余值与深层地下水氘盈余值接近(图3b),利用氘盈余值和TDS关系难以准确反映受生活污水对深层地下水的影响过程,还需要借助不同离子摩尔浓度比值和放射性同位素T等手段来识别这一污染过程^[12]。

在同一地下含水层内,影响地下水氘盈余值变化的主要因素基本相同;在含水层不同部位,水的氘盈余值的相对变化仅与滞留时间的长短有关^[22],因此一般情况下位于地下水流动方向下游的地下水氘盈余值和T值较低。区内地下水流动方向大致为西北-东南向,深层地下水氢氧同位素的空间分布上出现三个高值区(图4a和4b),集中分布在研

究区中部和西部,同时深层地下水T值空间分布表明,沿流动方向上,地下水T含量逐渐降低(图4c),区内中部T含量低值区内地下水T值低于检出限(0.5 TU),可能与该地下水埋深大,地下水循环缓慢有关。深层地下水TDS含量空间分布表明,区内中部存在一个TDS高值区(图4d),可能与河水入渗补给有关。

由图5可以看出,区内不同类型水体氘盈余值和T含量变化主要受到三种作用影响:蒸发作用、溶滤作用以及污水混入作用。接受大气降水补给的深层地下水T含量较高,同时氘盈余值也较高,溶滤作用占主导,如深层地下水10号和18号点。区内河水和工业废水具有高的T含量以及偏负的氘盈余值,当它们混入并污染地下水时,往往导致受污染地下水T含量升高,且氘盈余值降低。深层地下水6号、7号、11号、12号和19号点可能混入上述污染的地表水。值得指出的是,污水的混入虽然导致氘盈余值降低,但是与蒸发作用明显不同,因为污水的混入还会引起T含量升高,而蒸发作用不会导致地下水T含量升高(图3b),因此结合地下水T含量和氘盈余值可以很好地辨识区域深层地下水污染过程。

区内浅层地下水4号、6号和7号点T含量高,氘盈余值较低,除蒸发作用外,还受到含高T含量废水混入的影响,其余浅层地下水主要受到蒸发作用影响。

4.3 研究区深层地下水氢氧同位素组成的时间和空间变化特征

2012年和2013年研究区深层地下水氢氧同位素组成均位于当地大气降水线(LML)下方(图6a),

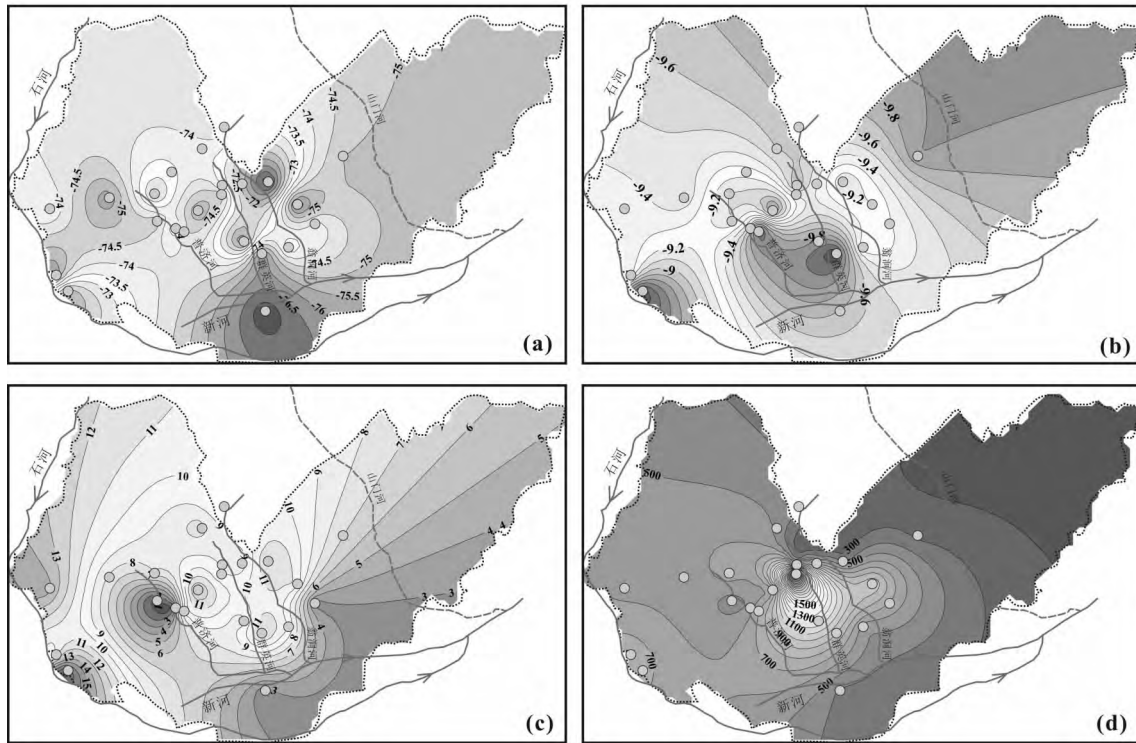


图4 研究区深层地下水氢氧同位素及TDS空间分布图(a: δD ; b: $\delta^{18}O$; c: T; d: TDS)

Fig.4 Spatial variations of isotopes and TDS contents in deep groundwater of the study area(a: δD ; b: $\delta^{18}O$; c: T; d: TDS)

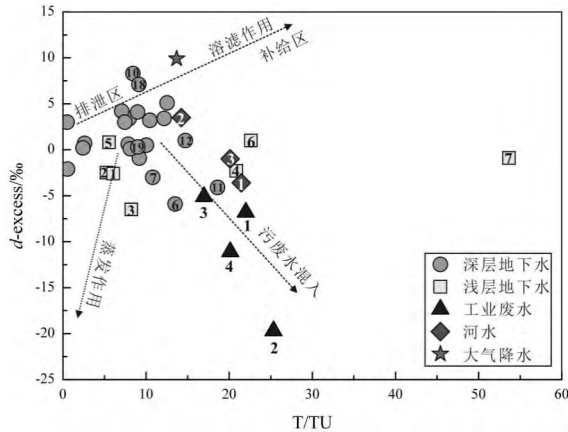


图5 研究区不同地下水T含量与氘盈余值关系图

Fig.5 Relations between T values and d -excess values of different water bodies of the study area

说明研究区深层地下水来源于当地大气降水。排泄区C3深层地下水位于大气降水线左下方(图6a),显示大气降水在补给该含水层地下水时未经历明显蒸发过程;补给区C1深层地下水较排泄区C3深层地下水富集氢氧同位素(图6a),显示大气降水在补给过程中可能经历蒸发过程,这与补给区含水层岩性和地质构造有关系,大颗粒的卵砾石等含水层介质孔隙较大,有利于地下水蒸发;径流区

C2深层地下水部分月份与C1深层地下水氢氧同位素组成接近(图6a),其余月份则明显富集氢氧同位素,说明C2地下水取样过程中抽取到不同含水层的地下水,一部分为浅层地下水,剩余则为深层地下水。EC值和 d -excess值关系表明:C1、C3和部分C2深层地下水主要以溶滤作用为主,C2部分浅层地下水发生蒸发作用(图6b)。C2部分深层地下水与C1和C3深层地下水 d -excess值接近,但是EC值差异较大,可能与以下几方面原因有关:①C2部分深层地下水受到上覆浅层地下水的越流补给,导致深层地下水富集氢氧同位素,EC值升高;②人类活动过量抽取深层地下水,地下水水位下降,同时排放的污染物渗入深层地下水,导致深层地下水氢氧同位素组成升高,EC值升高;③大气降水在补给深层地下水过程中,遇到易溶膏盐层,大量盐类溶解进入深层地下水,导致EC值升高。

C1和C3深层地下水氢氧同位素组成月际变化不大(图7a和7c),5月份和6月份可能受到农业灌溉抽取地下水影响,地下水水位下降,造成地下水氢氧同位素发生轻微富集,同时引起 d -excess值降低(图7d),后续时段地下水水位恢复过程中,又溶解部分盐类,导致EC值升高(图7b)。C2部分深

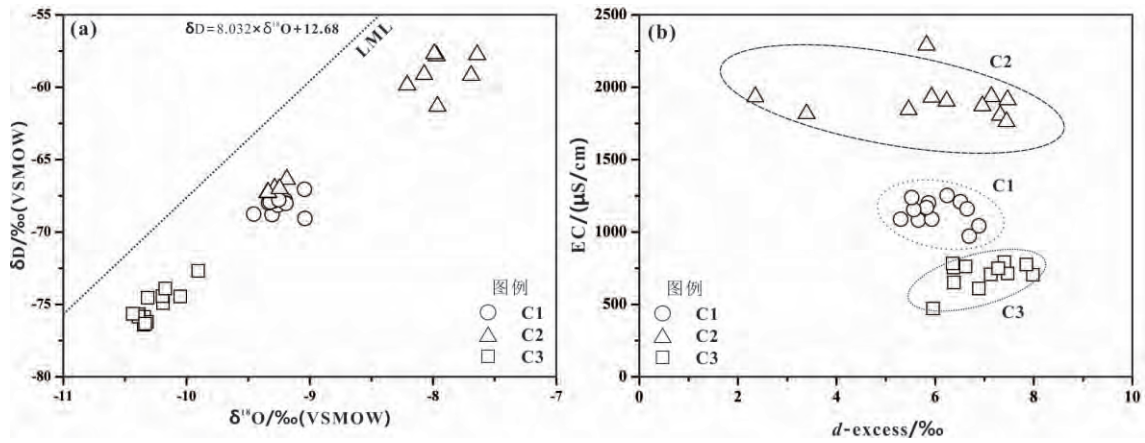


图 6 研究区深层地下水氢氧同位素组成 (a) 以及 EC 值和 *d*-excess 值关系图 (b)

Fig.6 Hydrogen and oxygen isotope compositions of deep groundwater bodies (a) and EC vs. *d*-excess (b) of the study area

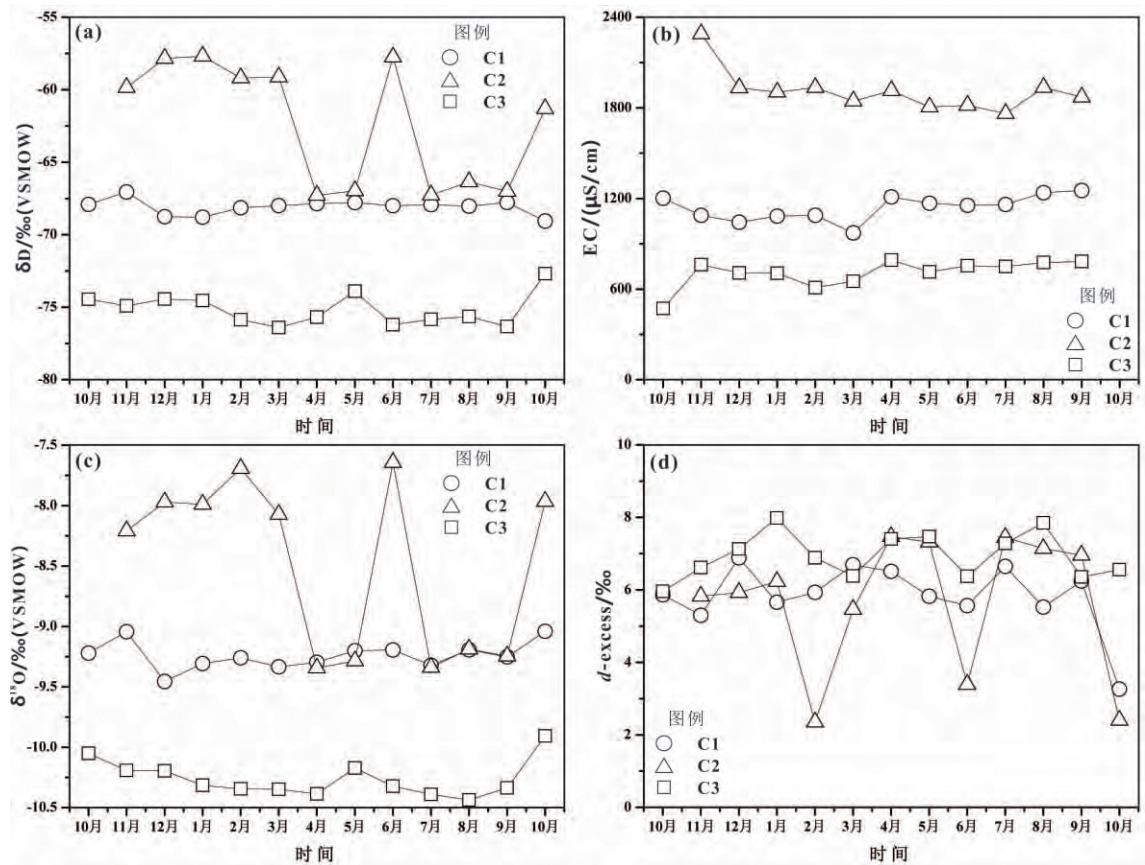


图 7 研究区深层地下水氢氧同位素组成以及 EC 值和 *d*-excess 值时间变化图

Fig.7 Temporal variations of hydrogen (a) and oxygen (c) isotopic compositions and EC (b) and *d*-excess (d) values of deep groundwater of the study area

层地下水和部分浅层地下水氢氧同位素差异明显, 浅层地下水 *d*-excess 值偏低, 蒸发作用明显, 10 月份浅层地下水接受大气降水补给, 氢氧同位素组成偏负(图 7a 和 7c)。

5 结 论

1) 区内不同类型水体均接受当地大气降水补给, 且水体同位素组成差异明显。工业废水和河水等地表水体受蒸发作用影响 δD 和 $\delta^{18}O$ 值偏正; 补

给区和径流区深层地下水以及区内浅层地下水等水体也经历蒸发过程,排泄区深层地下水受蒸发作用影响微弱, δD 和 $\delta^{18}O$ 值偏负。区内工业废水和河水等地表水体氡同位素值较高,深层地下水和浅层地下水氡含量值偏低,显示深层地下水和浅层地下水经历长时间的运移过程。

2) 区内深层地下水呈现点状污染特征,污染源为工业废水。区内部分深层地下水和浅层地下水TDS含量升高与蒸发作用有关。溶滤作用是控制排

泄区深层地下水EC值变化的重要因素,径流区深层地下水EC值升高可能与人类活动、浅层地下水越流补给以及含水层内膏盐溶解有关。

3) 区内工业废水和生活污水具有较低的氡盈余值和较高的T含量,渗入地下后导致受污染的深层地下水氡盈余值降低,T含量升高,TDS含量也升高。这一过程有别于单一蒸发作用,因此结合氡盈余值和T含量变化,也可以很好地识别该地区地下水受污染过程。

参 考 文 献

- [1] 刘锋,李延河,林建. 北京永定河流域地下水氢氧同位素研究及环境意义[J]. 地球学报, 2008, 29(2): 161-166.
- [2] 张新钰,辛宝东,王晓红,等. 我国地下水污染研究进展[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 415-422.
- [3] 李宝林,阎琇璋,孟凡顺,等. 焦作矿区地下水形成条件及补给通道的探讨[J]. 水文地质工程地质, 1984, 11(1): 47-50.
- [4] 黄平华,陈建生,宁超,等. 焦作矿区地下水水化学特征及其地球化学模拟[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 369-376.
- [5] 侯玉松,马振民,雒芸芸,等. 焦作地区水文地质条件对浅层地下水污染的控制作用研究[J]. 中国农村水利水电, 2013, (4): 40-44.
- [6] 尹国勋,杨娜,贺玉晓,等. 焦作市市区地下水水质现状评价[J]. 环境工程, 2004, 22(4): 66-69, 5.
- [7] 张东和贾保军. 稳定同位素示踪技术在电厂灰场对浅层地下水影响研究中的应用[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(1): 119-122.
- [8] 潘国营和贾军辉. 焦作矿区岩溶水 Cl^- 污染原因初探[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(5): 50-51, 64.
- [9] 张东,朱利霞,尹国勋. 焦作地区岩溶地下水铬(VI)污染过程研究[J]. 地球与环境, 2009, 37(3): 237-242.
- [10] 王心义,杨建,郭慧霞. 煤矸石山周围地下水污染状况[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 326-330.
- [11] 尹国勋,余功耀,王亮. 粉煤灰堆放场灰水与基底灰岩的水-岩作用[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(6): 32-34.
- [12] 张东,刘丛强,尹国勋. 基于稳定同位素和水化学的内陆地下水咸化过程研究: 以焦作市为例[J]. 地球与环境, 2010, 38(2): 177-183.
- [13] 张东,李成杰,李伟. 联合稳定同位素与水化学方法确定地下水污染源[J]. 地下水, 2007, 29(3): 80-81, 106.
- [14] 宋晓焱,尹国勋,谭利敏,等. 污水灌溉对地下水污染的机理研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 136-138.
- [15] 杜琼和张勇. 焦作市1951-2010年气候变化特征分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(1): 61-64.
- [16] 张慧申. 南水北调中线焦作典型区地下水系统污染物迁移规律研究[D]. 济南: 济南大学, 2012.
- [17] Zhang D, Li X D, Zhao Z Q, et al. Using dual isotopic data to track the sources and behaviors of dissolved sulfate in the western North China Plain[J]. Applied Geochemistry, 2015, 52(1): 43-56.
- [18] 裴建国,陶友良,童长水. 焦作地区天然水环境同位素组成及其在岩溶水文地质中的应用[J]. 中国岩溶, 1993, 12(1): 48-56.
- [19] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [20] 陈粉丽,张明军,马潜,等. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}O$ 特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 3755-3763.
- [21] 葛涛,储婷婷,刘桂建,等. 淮南煤田潘谢矿区深层地下水氢氧同位素特征分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(2): 112-118, 170.
- [22] 尹观,倪师军. 地下水氡过量参数的演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 409-411.

Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Groundwater and Surface Water in South Piedmont Plain of Taihang Mountain and Its Environmental Significance

JIA Xinsheng¹, ZHANG Dong^{2,3}, ZHAO Zhiqi³

(1. Chuankou Oil Factory, Yanchang Oil Field Co., LTD, Yanan 716000 China; 2. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China)

Abstract: On the basis of hydrogen and oxygen isotopes, recharge and flow mechanisms of groundwater in south piedmont plain of Taihang Mountain were studied, and influences of human activities on groundwater were elucidated. Results indicate that (1) Isotopic compositions of different water bodies are variable. The average values of δD , $\delta^{18}O$, d -excess and T are -74.1‰ , -9.5‰ , 1.5‰ and 9.34 TU for deep groundwater, respectively, -72.1‰ , -8.8‰ , -1.9‰ and 17.46 TU for shallow groundwater, -69.3‰ , -9.1‰ , -0.4‰ and 18.57 TU for surface water, and -68.6‰ , -7.3‰ , -10.7‰ and 20.18 TU for industrial waste water, respectively; (2) Annual values of δD , $\delta^{18}O$ and d -excess of deep groundwater located in recharge area are -68.08‰ , -9.24‰ and 5.84‰ , respectively, -62.30‰ , -8.50‰ and 5.66‰ for groundwater in runoff area, and -75.14‰ , -10.26‰ and 6.94‰ for deep groundwater in discharge area, respectively. (3) Deep groundwater is recharged by local atmospheric precipitation and surface water, meanwhile polluted by surface water derived from sewage and industrial waste water through the fissure zone in the faults. Shallow groundwater is recharged by rainwater and river water, and polluted by filtration of sewage and industrial waste water; and (4) Deep groundwater with negative d -excess values and high T contents has been effected by sewage and waste water which not only have more negative d -excess values but have high T content. So d -excess values and T contents could be combined as good indicators for groundwater pollution processes research.

Key words: groundwater; piedmont plain; hydrogen; oxygen; isotope; T content; human activity; pollution