

华北东部平原地下水垂向循环的水化学与同位素标示

师永霞¹, 王贵玲², 高业新²

(1. 中国地质大学 环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 在华北平原东部, 选择典型地区(地调局衡水水文地质科学试验场), 开展不同层位的抽水试验工作, 在充分分析研究区水文地质条件的基础上, 揭示在抽水试验过程中不同层位、不同时间的地下水的水化学和同位素组成, 探索地下水垂向循环特征。研究表明: 研究区地下水划分为三种地下水类型, 随地下水埋藏深度的增加, 水质逐渐变好, 地下水溶解性总固体减小, 硬度降低, 具有垂向分带性。第 I 含水组为现代水, 由大气降水补给, 第 II、III 含水组为现代水与古水的混合水, 水力联系密切, 有浅层地下水的越流补给; 第 IV、V 含水组为古水, 水力联系不如前者密切, 没有上部含水层发生越流补给; 第 III、IV 含水层没有水力联系。

关键词: 水化学; 同位素; 垂向循环

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)04-0018-06

自 20 世纪 60 年代以来, 随着华北平原需水量的增加和多年的连续干旱, 大规模开采地下水, 使局部地区及敏感含水层位因地下水的过量开采而产生地面沉降、地下水水质恶化、地面塌陷等不良后果, 区域地下水位大幅度降低, 造成含水层疏干、地下水开采成本增大等问题^[1-2]。

目前对深层地下水的补给来源尚有不同的认识。前人研究^[3-8]认为深层地下水的可采资源量, 主要包括越流补给和侧向补给两部分, 其中越流补给占主导地位。深层地下水处于封闭、半封闭状态, 排泄不畅, 径流更新非常缓慢。

而目前对于华北东部平原地区地下水之间的补、径、排以及不同含水层间的水力联系研究还不够深入^[4-5]。本文通过试验场地下水取样, 运用水化学和同位素方法, 揭示了地下水水化学特征及地下水补给和不同层位含水组地下水互动关系, 为深层地下水资源的正确评价, 区域水资源可持续开发利用和管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于衡水市北约 25 km, 隶属于河北省深州市, 黑龙港流域, 属河北中部平原的一部分。其为冲

洪积、洪积平原, 地势平坦, 为大陆性半干旱季风气候, 多年平均气温 13℃。年内降水量分配不均, 主要集中在夏季 6~8 月降水量占全年的 70~80%, 冬季降水量最少, 秋季降水量稍多于春季, 年际降水量变化较大。研究区周边没有河流通过, 但是有许多人工开挖的支渠、斗渠, 如南侧有三斗渠, 西侧有六支渠等。这些支渠、斗渠都与滹沱河、滏阳河、滏阳新河等相连, 构成了复杂的人工水系网。本区农灌基本以地下水为主。

研究区第四系为一套松散多结构的泥质、砂质沉积物。通过对已掌握资料的分析, 根据渗流场和化学场差异本研究区自上而下分为五个含水组: 第 I 含水组底界埋深 40~60m, 第 II 含水组底界埋深一般 120~170m, 第 III 含水组底界埋深 250~350m, 第 IV 含水组底界埋深 350~450m。研究范围包括第 V 含水组底界埋深 450~600m, 为新近系明化镇组上段地下热水。各含水组具有明显的差异性。第 I 含水组含水层多为条带状分布, 颗粒细, 层间无良好的隔水层, 透水性较好及直接接受降水入渗补给。第 II 含水组以有较稳定的隔水层, 水头有明显的承压性为标志划分。以出现区域性连续稳定的隔水层, 水头具明显的承压性等划分第 III 含水组, 并以颗粒粗, 含水层厚度大区别于第 IV 含水组。第 V 含水组以含水层出水率明显减小等标志区别于第 IV 含水组。第 I、II 含水组以冲积、洪积为主, 第 I 含水组水质普遍为咸水。第 III、IV、V 含水组以冲积、洪积和河湖相堆积作用为主, 隔水层分布广泛且厚度大。

考虑地下水的介质场、动力场、化学场以及开采条

收稿日期: 2009-08-17; 修订日期: 2009-12-03

基金项目: 水源热泵高效应用关键技术研究示范
(2006BAJ01A06)

作者简介: 师永霞(1985-), 女, 硕士, 主要从事水文地质与地下水资源

E-mail: x. happy34@163.com

件下地下水系统的输入输出与输出的变化,在垂向上自上而下将第 I 含水组划分为潜水含水层,第 II、III、IV、V 含水层为深水含水层。

区域上从西北向东南,水文地质条件有一定的差别。西北部含水层发育较好,富水性较好,水量较大。中部及东南部则含水层的厚度变小,富水性及水量亦相应变差、变小。

2 地下水水化学特征

2.1 地下水的离子组成

研究区内不同含水岩组地下水中阳离子均以 Na^+ 离子含量占绝对优势,平均含量在 70% 左右;相应的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 离子的最高含量在 18% 以下,特别是 K^+ 离子含量更少,均小于 1%。统计分析表明,第 I 含水组 Na^+ 含量占全部阳离子的一半, Ca^{2+} 最低,只有 10%, Mg^{2+} 含量占阳离子总量的 1/3。第 II、III 含水组 Na^+ 离子含量在 70% 左右, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量在 10% ~

20% 之间。第 IV、V 含水组 Na^+ 含量在 87% 以上, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量均小于 10%。

不同含水组地下水的阴离子以 Cl^- 离子含量为主,其次为 SO_4^{2-} 离子, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子含量都较低。第 I 含水组地下水中 Cl^- 含量最高,第 II、III 含水组 SO_4^{2-} 离子含量远大于 HCO_3^- 离子含量,第 IV、第 V 含水组地下水中二者含量较为接近,但其绝对含量在 25% 以下。因此,深层地下水中的阴离子组成比浅层均一(表 1)。

2.2 地下水水化学类型

研究区不同含水组的地下水水化学类型既有相似的地方,又有一定差异(表 1)。总体上来看,水化学类型的变化规律是:第 I 含水组为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{--Na}\cdot\text{Mg}$ 型,溶解性总固体达 8.993 g/L,为咸水;第 II、III 含水组为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{--Na}$ 型,溶解性总固体分别为 0.7 和 0.8 g/L,第 IV、V 含水组为 Cl--Na 型,溶解性总固体分别为 0.64 和 0.66 g/L(图 1)。

表 1 不同层位含水组地下水的化学组成
Table 1 Chemical compositions of groundwater in different aquifer groups

含水组	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻ (meq%)	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	溶解性总 固体(mg/L)	总硬度 (mg/L)	pH	水化学 类型
I	0.03	55.74	10.55	33.68	63.72	32.82	3.34	0.01	8993.8	2375.4	7.57	Cl·SO ₄ —Na·Mg
II	0.58	71.89	17.29	10.23	63.11	24.46	11.34	0.09	706.03	158.8	8.07	Cl·SO ₄ —Na
III	0.83	72.68	16.37	10.13	55.10	34.37	8.57	0.72	801.97	169.1	8.15	Cl·SO ₄ —Na
IV	0.77	87.47	7.83	3.92	57.93	24.52	14.91	0.89	644.51	60.5	8.42	Cl—Na
V	0.79	90.50	5.72	2.98	55.28	23.60	18.10	0.80	667.16	45.8	8.39	Cl—Na

注: N— Na^+ ; M— Mg^{2+} ; L— Cl^- ; S— SO_4^{2-}

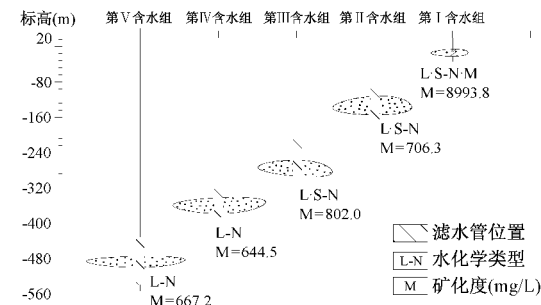


图 1 研究区水化学剖面图
Fig. 1 Hydrochemical profiles of the study area
(N— Na^+ ; M— Mg^{2+} ; L— Cl^- ; S— SO_4^{2-})

2.3 水化学垂向变化特征

不同层位含水组地下水垂向变化特征为:随着深度的增加,地下水中 Na^+ 含量逐渐增多, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量逐渐减少, K^+ 离子含量没有明显变化。 Cl^- 离子含量逐渐减少, HCO_3^- 离子含量增加, SO_4^{2-} 离子含

量变化不大。研究表明随着地下水埋藏深度的增加,水质逐渐变好。随深度的增加,地下水溶解性总固体减小,硬度降低;地下水在演化过程中具有垂向分带性,阳离子组成由浅到深向 Na 型水转变(图 2)。

随深度的增加,溶解性总固体逐渐降低。第 I 含水组溶解性总固体高达 8.993g/L,第 II、III 含水组溶解性总固体相近,平均值分别为 0.7g/L 和 0.8g/L;第 IV、V 含水组溶解性总固体最低,几乎相同,均为 0.6g/L(图 3)。

硬度的变化与溶解性总固体趋势相同,即随深度增加,硬度降低,且变化明显。第 I 含水组硬度达 2375mg/L,第 II、III 含水组硬度基本相同,平均值为 160mg/L,而第 IV、V 含水组硬度最低,平均值分别为 60.5mg/L 和 45.8mg/L。溶解性总固体和硬度反映了地下水中的物质组分不同含水组中的分布特征和变化趋势。说明五个含水组的物质组分既有相同点也有一

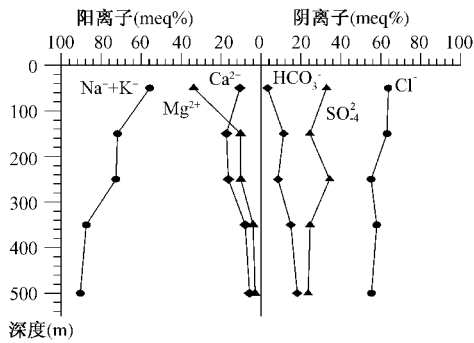


图2 地下水水化学组成随深度变化

Fig. 2 Changes in chemical compositions of groundwater with depth

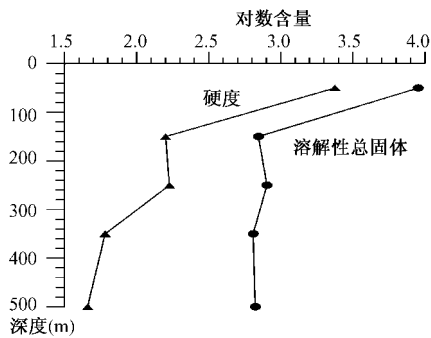


图3 溶解性总固体、硬度随深度变化图

Fig. 3 Changes in salinity and hardness with depth

定的区别。

2.4 水化学组成对不同层位含水组地下水互动关系的响应

浅层地下水的水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型, 深层地下水的水化学类型与埋藏深度有关。对深层地下水水化学做 Piper 三线图(图4)。试验区不同层位的水点均落在图的右侧, 但是分布在三个不同的区域。这些水点具有相同的 $\text{SO}_4 + \text{Cl}$ 含量, 但 $\text{Ca} + \text{Mg}$ 含量有差异, 含水组埋藏越深, 含量越低。第 I 含水组位于右侧上方, $\text{Ca} + \text{Mg}$ 含量最高, 与其它四个含水组有明显的区别。第 II、第 III 含水组水点落在右侧的中间位置, 并且水点聚在一起, 第 II 含水组处于左侧, 第 III 含水组处于右侧。第 IV、第 V 含水组的水点落在了右侧下方, 二者稍有区别, 第 IV 含水组水点全部处于第 V 含水组的上部。样品点的分布位置说明, 第 II 和第 III 含水组具有相同的演化过程, 且水力联系密切。第 IV 和第 V 含水组地下水在径流过程中, 水岩交互作用强度和程度不同, 以及地层性质上的差异, 使得二者在演化上具有一定的区别。

本试验采用开采条件下大型分层单井多观测孔非

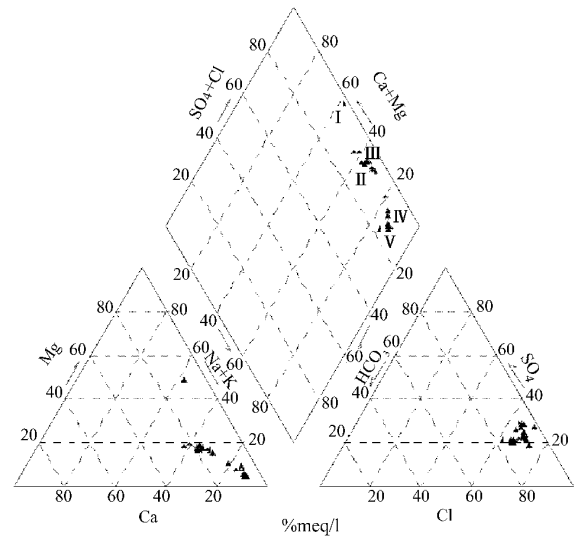
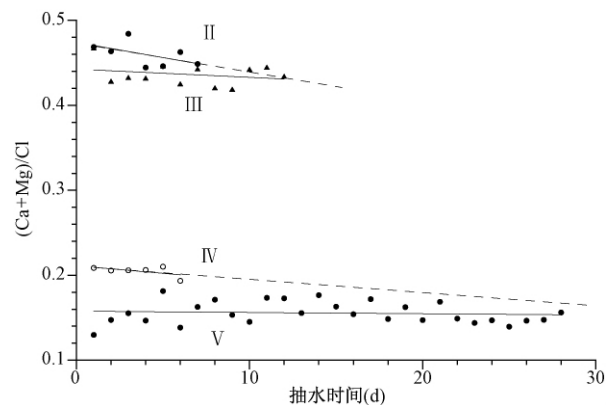


图4 不同层位含水组地下水三线图解

Fig. 4 Piper diagram of groundwater samples of different aquifer groups

图5 不同含水组 $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{Cl}$ 图解Fig. 5 $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{Cl}$ diagram of different aquifer groups

稳定流抽水方法。根据 $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{Cl}$ 曲线(图5), 可以看出 4 个含水组的 $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{Cl}$ 值明显分为两组, 一组为第 II、III 含水组, 其值较大, 位于图中上方; 一组为第 IV、V 含水组, 其值较小, 位于图中下方。随着抽水时间的延长, 第 II、III 含水组的 $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{Cl}$ 值呈交错排列, 并逐渐趋于混合, 推测两个含水组的地下水水质发生了或将发生混合作用, 三线图中二者的水样点落在一起, 也表明这两个含水组之间具有密切的关系; 第 IV、V 含水组的 $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{Cl}$ 值随着抽水时间的延长, 也逐渐趋于混合, 推测两个含水组将发生水质的混合现象, 三线图中二者的水样点聚在一起, 也表明二者水力联系密切, 但是在发生混合的时间上比第 II、III 含水组要长, 说明二者水力联系不如第 II、III 含水组密切。抽水过程中, 第 III、IV 含水组的水质没有发生混

合的趋势,表明这两个含水组没有明显的水力联系。

3 地下水同位素特征

3.1 氢氧稳定同位素

浅层地下水和深层地下水的同位素有明显不同的特征。浅层地下水氢氧同位素含量比深层地下水高。深部含水组不同层位地下水中氢氧稳定同位素基本没有变化。氡含量随着深度的增加而逐渐降低(表 2)。

表 2 不同层位含水组地下水中同位素含量特征

Table 2 Characteristics of isotope contents of groundwater in different aquifer groups

含水组	取样深度 (m)	氡 (TU)	δD (‰)	δ ¹⁸ O (‰)	溶解性总固体 (mg/L)	pH	水化学类型
I	30 ~ 50	6.6	-72.7	-10.18	8993.8	7.57	d·SO ₄ —Na·mg
II	66 ~ 168	4.9	-82.3	-11.27	706.03	8.07	d·SO ₄ —Na
III	192 ~ 298	4.5	-82.4	-11.15	801.97	8.15	d·SO ₄ —Na
IV	315 ~ 378	3.0	-83.1	-11.21	644.51	8.42	Cl—Na
V	436 ~ 524	2.6	-83.2	-11.23	667.16	8.39	Cl—Na

3.2 地下水同位素年龄

研究区浅层地下水氡含量为 6.6 TU,不存在核爆氡,为现代水补给的。深层地下水氡含量随深度的增加而降低(图 6)。第 II、III 含水组的氡含量为 4 ~ 5 TU,应为 1952 年以前补给的水与现代水的混合水;第 IV、第 V 含水组的地下水基本不含氡(< 3 TU),应为古水。

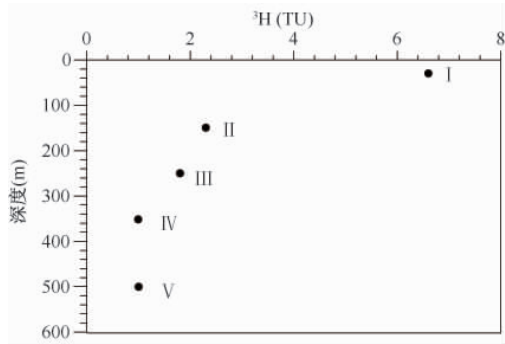


图 6 ³H 与深度的关系

Fig. 6 Relationship between ³H and depth.

通常假设为核试验前大气中 CO₂ 的 ¹⁴C 含量为 100% 或 100 pmc(或 100% 现代碳)。但是由于自然地球化学作用,地下水补给过程中 ¹⁴C 浓度可能被稀释。因此,地下水 ¹⁴C 测年中通常要对初始 ¹⁴C 输入 A₀ 值进行校正。根据前述校正模型对 ¹⁴C 样点校正,结果见表 3。

深层地下水不同层位含水组 ¹⁴C 年龄有如下特征:含水组埋藏越深, ¹⁴C 年龄越大,现代碳百分含量越低。第 II 含水组地下水年龄相对要小得多,仅有 2684 年,这可能与该含水组水循环交替积极,从侧向获得补给量有关,另外,也可能是接受第 I 含水组的越流,使地下水年龄变小。第 V 含水组地下水年龄在

12424 年,说明地下水径流缓慢,水循环较差。第 III 含水组和第 IV 含水组地下水年龄相近,分别为 6402 年和 7799 年,介于第 II 含水组和第 V 含水组之间,说明这两个含水组地下水早于第 V 含水组,晚于第 II 含水组。研究 ¹⁴C 年龄表明,浅层地下水的 ¹⁴C 年龄为“现代水”^[9],而深层地下水的年龄大于 2000 年,甚至大于 1 万年,为古水。

深层地下水的 ¹⁴C 年龄为 2684 ~ 12424 年。¹⁴C 年龄随含水组埋藏深度的增加而增大,现代碳含量减少。总的趋势是地下水埋深越大,地下水的 ¹⁴C 年龄就越老,现代碳百分含量越低,基本上符合 ¹⁴C 的衰变规律(表 3、图 7)。

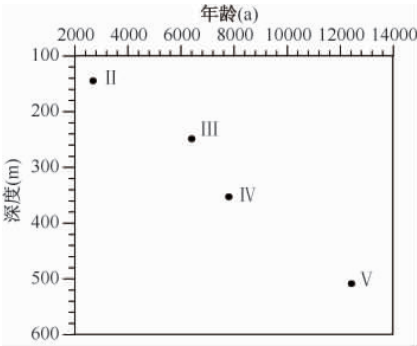


图 7 ¹⁴C 年龄与深度的关系

Fig. 7 Relationship between ¹⁴C and depth.

3.3 同位素对浅层与深层地下水关系的响应

从 δD 和 δ¹⁸O 关系图分析(图 8),浅层地下水的样点落在了大气降水线的右下方附近,深层地下水的样点全都落在了大气降水线的左下方,说明浅层地下水由当地大气降水补给,深层地下水的补给来源另当别论。深层地下水的 δD 和 δ¹⁸O 关系显示(图 8),样点全都混在了一起,其 ¹⁸O 值非常接近,说明深层地下

表 3 不同含水组地下水中¹⁴C 年龄计算结果
Table 3 Results of ¹⁴C dating of groundwater in different aquifer groups

含水组	¹⁴ C (pmc)	δ ¹³ C (‰)	计算年龄(a)									确定年龄(a)
			未校正 年龄	统计模型	Tamers 模型	¹³ C 混合 模型	PEARSON 模型	IAEA 模型	CMB-CHM 模型	FONTES 模型	Gonfiantini 模型	
I	27.552	-8.61	10 657	7 693	4 912	2 684	2 684	2 684	3 824	2 684	2 684	2 684
II	18.869	-8.31	13 787	10 824	8 042	6 402	6 402	6 402	6 981	6 402	6 402	6 402
IV	14.651	-7.93	15 878	12 901	10 120	7 799	7 799	7 799	9 364	7 799	7 799	7 799
V	9.079	-8.02	19 834	16 957	14 176	12 424	12 424	12 424	13 324	12 424	12 424	12 424

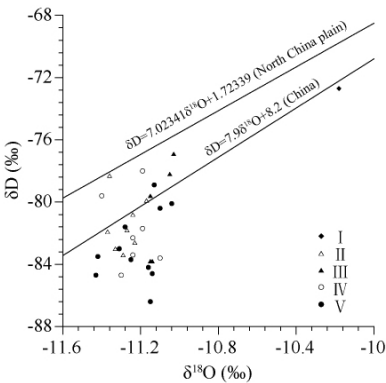


图 8 δD 和 δ¹⁸O 的关系
Fig. 8 Relationship between δD and δ¹⁸O

水为同一起源,不能通过氢氧同位素将它们进一步区分。

随着开采时间的延长,第Ⅱ含水组 δ¹⁸O 含量逐渐增加(图 9)。第Ⅲ含水组的 δ¹⁸O 值与第Ⅱ含水组基本相同,说明在开采过程中第Ⅱ含水组的 δ¹⁸O 增高只能来源于浅层地下水的越流。第Ⅲ含水组中 δ¹⁸O 含量虽然有增加的趋势,但其变化在 δ¹⁸O 的测试误差范围内(0.1‰),可认为 δ¹⁸O 含量基本无变化,说明与第Ⅳ含水组没有发生水力联系。第Ⅳ、第Ⅴ含水组中 δ¹⁸O 含量随开采时间的延长而逐渐减少,说明这两个含水组的水越抽越老,没有“年轻”的水补给,与上部含水组没有水量的交换,没有发生越流。

4 结论

- (1)研究区根据渗流场和化学的差异可划分为五个含水组,第Ⅰ含水组底界埋深 40~60m,第Ⅱ含水组底界埋深一般 120~170m,第Ⅲ含水组底界埋深 250~350m,第Ⅳ含水组底界埋深 350~450m,研究范围包括第Ⅴ含水组底界埋深 450~600m,为新近系明化镇组上段地下热水。各含水组具有明显的差异性。
- (2)第Ⅰ含水组为 Cl·SO₄—Na·Mg 型,溶解性总固体达 8.993 g/L,为咸水;第Ⅱ、Ⅲ含水组为 Cl·

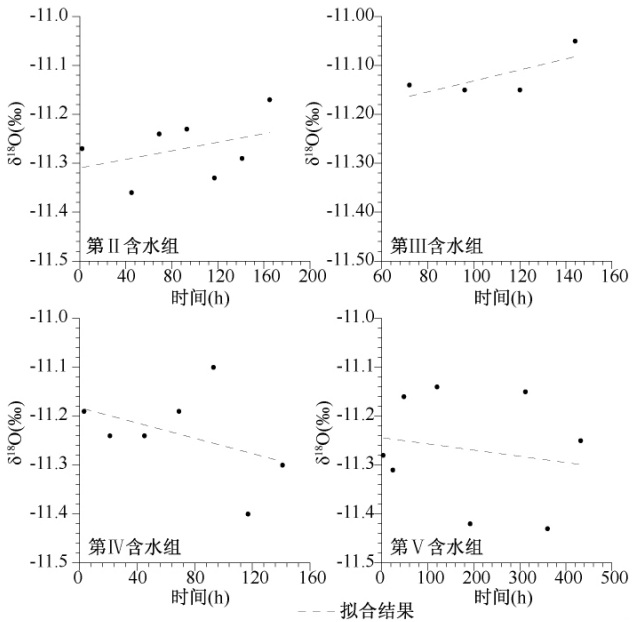


图 9 δ¹⁸O 与开采时间的关系
Fig. 9 Relationship between δ¹⁸O and the exploitation time

SO₄—Na 型,溶解性总固体分别为 0.7 和 0.8 g/L;第Ⅳ、Ⅴ含水组为 Cl—Na 型,溶解性总固体分别为 0.64 和 0.66 g/L。随地下水埋藏深度的增加,水质逐渐变好,地下水溶解性总固体减小,硬度降低。阳离子组成由浅到深向 Na 型水转变,说明地下水在演化过程中具有垂向分带性。

- (3)第Ⅰ含水组为现代水,第Ⅱ、Ⅲ含水组为现代水与古水的混合水;第Ⅳ、Ⅴ含水组为古水。深层地下水的¹⁴C 年龄差可达上万年,说明深层地下水不同含水组之间仍然存在着差异。地下水埋藏越深,其年龄越大。
- (4)综合分析水化学与同位素对不同层位含水组互动关系的影响:第Ⅱ、Ⅲ含水组具有相同的演化过程,水力联系密切,有浅层地下水的越流补给;第Ⅳ、Ⅴ含水组二者在演化过程中有一定的差异,水力联系不如前者密切,上部含水层没有发生越流补给;第Ⅲ、Ⅳ

含水层没有水力联系。

参考文献:

- [1] 张宗祜, 沈照理, 薛禹群, 等. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 62-68.
- [2] 施雅风. 华北地区水资源合理开发利用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 12-14.
- [3] 陈梦雄. 中国地下水研究论文选集—陈梦雄院士 90 华诞暨从事地质工作 65 周年纪念[N]. 北京: 中国大地出版社, 2007: 171-174.
- [4] 王贵玲, 蔺文静, 刘花台, 等. 华北地下水可持续发展开发利用前景成果报告[R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 2006: 33-41.
- [5] 王贵玲, 高业新, 吴庆华, 等. 华北平原大规模开采条件下浅层地下水与深层地下水互动机制研究[R]. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄: 2008: 21-25.
- [6] 陈宗宇, 张光辉, 聂振龙, 等. 中国北方第四系地下水同位素分层及其指示意义[J]. 地球科学, 2002, 27(1): 97-103.
- [7] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 77-78.
- [8] 吴庆华, 高业新, 蔺文静, 等. 华北东部平原深层抽水井水跃值计算方法及其规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 29-32.
- [9] Pawelle K F. Hydrochemistry and isotope geochemistry of the upper Danube River [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(21): 304-318.

Indication of hydrochemistry and isotope for vertical circulation of groundwater in the North China Plain

SHI Yong-xia¹, WANG Gui-ling², GAO Ye-xin²

(1. Environment Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: In the North China Plain, a typical area (China Geological Survey Hengshui Hydrogeology Test Facility) was chosen to perform the bailing experiment in different water-bearing strata. On the basis of a full analysis of the hydrogeological conditions of the study area, the hydrochemistry and isotopic compositions of groundwater in the different water-bearing strata and different times were revealed in the Bailing experiment process. The vertical cyclical characteristics of groundwater were explored. The results show that the groundwater can be divided into three types in the study area; with increasing depth the water quality becomes better, salinity reduces and hardness decreases. The groundwater is characterized by vertical zonation. The first aquifer group is of meteoric in origin and recharged from modern rainfall. The second and third aquifer groups are recharged through leakage from the shallow groundwater and are a mixture of modern water with ancient water. The fourth and fifth aquifer groups without leakage from the upper aquifer are of ancient water. Hydraulic connection does not exist between the third and fourth aquifer groups.

Key words: hydrochemistry; isotope; vertical circulation

责任编辑: 张若琳