

吴春勇, 王旭宏, 付斌, 等. 某滨海厂址三水转换规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 700-707. WU C Y, WANG X H, FU B, et al. Three types of water transformation rule of a coastal site[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 700-707. (in Chinese)

某滨海厂址三水转换规律

吴春勇¹, 王旭宏¹, 付斌¹, 侯树强¹, 王小元¹, 翟远征²

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 为确定某工程地下水环境影响评价的目标和范围, 以其滨海厂址为研究对象, 基于水文地质调查工作成果, 采用水位动态监测、水化学分析和氢氧稳定同位素示踪技术, 开展大气降水、地表水和地下水之间的相互转化规律研究。结果表明: 研究区地下水水位动态随着降水量变化存在显著的季节变动, 不同水体水化学特征和氢氧稳定同位素组成存在差异, 大气降水补给浅层地下水和地表水, 浅层地下水与不同的地表水之间存在相互转化的水力联系且受到明显的蒸发影响, 深层地下水主要接受更新世冰期古水的补给, 与浅层地下水联系微弱。

关键词: 滨海厂址; 三水转换; 地下水; 氢氧稳定同位素

中图分类号: TV211 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdk.2023.0069

在全球水文循环过程中, 大气降水、地表水、地下水等不同水体之间相互补给、转化或混合, 同时伴随着与外部环境之间的物质、能量和信息交换。受气候变化、时空效应、水化学反应、水-岩相互作用及同位素分馏作用等因素的影响, 自然界中不同水体的水化学组分、氢氧稳定同位素特征存在着差异, 且时空分布呈现一定的变化规律^[1]。循环过程中大气降水、地表水、地下水三者之间不断发生水量交换, 导致地表水、不同含水层地下水的水位时刻发生动态变化。因此水位动态观测、水化学分析、同位素示踪常被用于研究三水相互转化关系及规律^[2-23]。

滨海平原地区大气降水量年内季节分配不均, 地表水体分布密集, 水文地质条件复杂, 因此三水之间相互转换的机制十分复杂。一旦发生污染事故, 污染物极易通过三水转换发生迁移, 威胁周边公众的健康和安全。因此, 在该地区进行工程项目厂址选择和评价工作, 需要研究和揭示大气降水、地表水、地下水三者之间转换规律, 判断事故工况下污染物在三水中迁移的影响范围, 以确定环境影响评价的目标和范围, 为厂址环境影响报告书编制和审评提供技术依据。

本文在某工程滨海厂址附近范围水文地质调查工作的基础上, 搜集华北平原滨海地区水文资料数据, 分析地表水、不同含水层地下水水位动态变化特征, 研究不同水体水化学特征及其水质变化, 对比不同水体氢氧同位素组成与差异, 判断大气降水、地表水和地下水之间的相互转化关系, 确定不同含水层之间地下水的水力联系, 综合研究厂址周围三水转换规律, 为某工程滨海厂址环境影响评价工作提供依据。

1 研究区概况

某滨海厂址位于华北平原东部黄骅-沧州地区的滨海平原, 地形较平坦, 高程为-3.0~10.5 m。地处中纬度欧亚大陆东岸, 属温带湿润半湿润大陆性季风气候, 多年平均降水量 567.4 mm, 年际变化大, 年内分配不均, 多年平均蒸发量 1 308.6 mm, 蒸发强烈。地表为第四系海陆交互相、海相或陆相沉积物覆盖, 地表水类型较多, 河流较为密集, 河水受海水潮位影响明显, 沟渠交错, 水塘和虾塘众多。宣惠河、漳卫新河自西南向东北分别从厂址西侧、东侧流经, 杨埕干沟及支沟从研究区中部穿过, 最后流入漳卫新河, 杨埕水库及湿地位于杨埕支沟和宣惠河之间, 详见图 1。

收稿日期: 2022-12-04 修回日期: 2023-07-25 网络出版时间: 2023-08-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230807.1628.006>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2167211); 中核集团某集中研发项目

作者简介: 吴春勇(1986—), 男, 江西鹰潭人, 高级工程师, 主要从事地下水评价研究。E-mail: wucy@cnpe.cc



图1 研究区

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

厂址周围地层上部为第四系全新统(Q₄)海陆交互沉积层、第四系上更新统(Q₃)海陆交互沉积层,主要为粉质黏土,局部为粉砂和粉土,中部为第四系中更新统玄武岩和沉火山角砾岩,其下依次为第四系中更新统(Q₂)海陆交互沉积层和第四系下更新统(Q₁)海陆交互沉积层,主要为粉质黏土,局部夹粉砂,再往下揭露新近系(N)黏土岩。地下水主要赋存于第四系多层交叠的粉砂、细砂孔隙中。依据含水层与隔水层的分布状况、地层年代、沉积相分布,将第四系含水层划分为第I、II、III、IV含水岩组,分别对应于全新统、上更新统、中更新统、下更新统。第I含水岩组属浅层地下水,地下水埋深较浅,一般0.02~4.72 m;第II、III、IV含水岩组属深层地下水,具有承压性。不同含水岩组之间一般以厚度大于20 m的粉质黏土相隔。

2 调查与采样

在厂址附近范围水文地质调查工作中,布置11个水文地质长观孔,获取2015年9月至2016年7月的地下水水位数据,监测频次为每月观测1次,布置24个短期水位观测孔;采集地表水水化学样品8件,地下水水化学样品21件,地下水氢氧同位素样品7件。地表水样品主要在河流、水库湿地、塘

内采集;浅层地下水样品在钻孔和民用水井中采集,深层地下水样品主要在民用机井中采集。氢氧同位素样品采样前均在井孔中先抽水3~10 min,用事先经过酸化处理和清洗的高密度聚乙烯瓶采集,采集前用样品地下水冲洗3次,取样量为400 mL。样品的采集、保存、分析与质量控制均按《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164—2004)执行。样品采集统计见表1。

表1 地表水和地下水样品采集统计

Tab. 1 Sampling statistical of the groundwater and surface water

样品名称	类型	水体	数量/件
水化学样品	地表水	地表水	8
	浅层地下水	第I含水岩组	14
	深层地下水	第II含水岩组	3
		第III含水岩组	2
氢氧同位素样品	浅层地下水	第I含水岩组	3
	深层地下水	第II含水岩组	3
		第III含水岩组	1

水化学样品的测试分析由核工业南京工程勘察院实验室按照相关水质分析规范完成。K⁺、Na⁺测定采用差减法,铵根离子测试方法为分光光度计法, Ca²⁺、Mg²⁺测定方法为EDTA(乙二胺四乙酸)络合滴定法,游离CO₂、OH⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻的测定方法为中和法,SO₄²⁻采用EDTA二钠容量法或质量法,Cl⁻测定采用硝酸银容量法;同位素质样品的测试分析工作由河海大学南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室完成。稳定同位素¹⁸O/¹⁶O比值利用CO₂平衡方法制备,D/H比值利用锌还原方法制备后,通过MAT253同位素质谱仪测定,D和¹⁸O组成以δ值表示,δ(D)和δ(¹⁸O)的精度分别为±1.0‰和±0.1‰。氢氧稳定同位素样品测试结果见表2。

表2 地下水δ(D)和δ(¹⁸O)测试结果统计

Tab. 2 Test results of the groundwater δ(D) and δ(¹⁸O) test results

试样编号	取样深度/m	δ(D)/‰	δ(¹⁸ O)/‰	含水组
K1-1	7	-43.3	-4.87	第I含水组
K1-2	8	-44.4	-5.25	第I含水组
K3	10	-59.1	-8.02	第I含水组
K2-1	44	-66.5	-9.20	第II含水组
K2-2	47	-65.5	-8.91	第II含水组
K4	43	-66.4	-8.86	第II含水组
MJ	400	-69.6	-9.24	第III含水组

3 结果与讨论

3.1 水位动态分析

3.1.1 水位监测结果

厂址附近范围地下水水位观测数据显示,浅层地下水水位介于 0.46~3.10 m, 主要集中于 1.15~2.49 m, 浅层地下水水位动态变化曲线见图 2, 可见浅层地下水水位随季节变迁而有一定的变动, 一般在 1 至 3 月出现低点, 总体表现为枯水期(2015 年 9 月至 2016 年 3 月)水位逐渐降低, 丰水期(2016 年 4 月至 2016 年 7 月)水位逐渐升高, 说明大气降水是浅层地下水的主要补给来源。

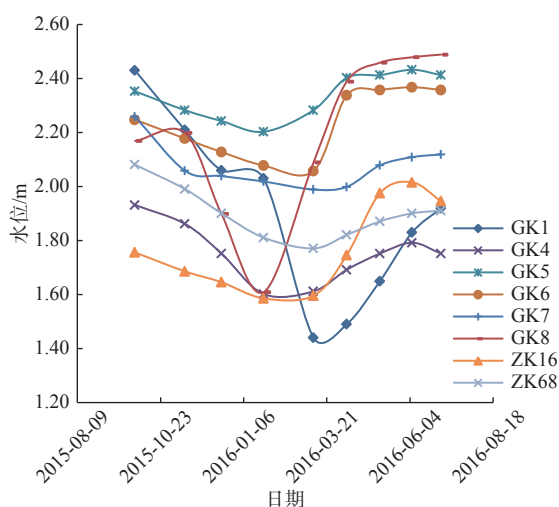


图 2 浅层地下水水位动态变化曲线

Fig. 2 Dynamic change curve of the shallow groundwater level

第 II 含水岩组深层地下水水位介于 0.34~1.45 m, 由水位动态变化曲线(图 3)可知, 第 II 含水岩组深层地下水水位随季节变迁存在波动变化, 枯水期水位先升高后降低, 丰水期水位变化幅度较小, 但总体表现为升高, 反映深层地下水从获得补给到水位上升存在时间上的滞后性。资料显示, 黄骅、沧州地区受地下水降落漏斗的影响, 深层地下水流场由天然的自西向东改为自东向西流动。图 3 显示, GK3 孔第 II 含水岩组深层地下水水位(0.97~1.45 m)高于 GK2 孔(0.34~0.63 m), 说明第 II 含水岩组深层地下水径流方向可能为自东向西。

3.1.2 地表水与浅层地下水之间水力联系分析

研究区海拔低, 地形平坦, 大气水降落后, 直接补充地表水水量, 导致地表水水位上升, 同时地形坡度小, 地面径流缓慢, 可充分渗透补给第四系松

散层, 即浅层地下水接受大气降水的入渗补给时间较长, 水位将逐渐上升。漳卫新河、宣惠河在研究区内上游段整体水面标高低于浅层地下水水位, 因此, 总体趋势为浅层地下水补给河水; 下游段河道附近地下水水位变化较大, 说明受海水潮汐影响, 在涨落潮时与河水存在频繁相互转化。

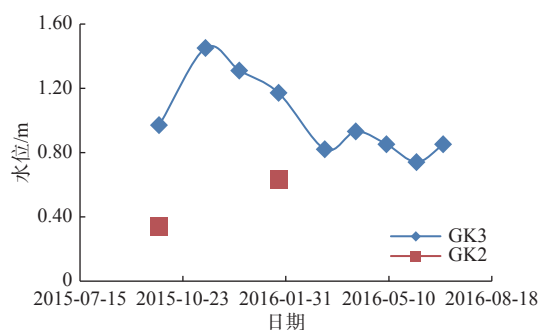


图 3 第 II 含水岩组深层地下水水位动态变化曲线

Fig. 3 Dynamic change curve of II water-bearing rock group deep groundwater level

杨埕干沟在研究区内南段和中段水面标高高于附近浅层地下水水位(1.03~2.08 m), 表明杨埕干沟地表水补给浅层地下水。杨埕支沟中间段水位低于两侧浅层地下水水位, 即接受浅层地下水的补给。

靠近杨埕水库的钻孔(GK9)浅层地下水水位高于周边钻孔水位, 地下水流向为背离水库方向, 由此可以推断杨埕水库底部虽然进行了防渗处理, 但由于水库水位高于地下水水位, 在水力梯度的驱动下, 仍有少部分水库水向浅层地下水进行渗流补给, 库区地下水为区内高水位区。

杨埕湿地和虾塘地表水水面标高均高于周边浅层地下水水位, 因此, 二者通过渗漏的方式补给浅层地下水。

通过统计分析地表水、地下水水位观测数据, 绘制浅层地下水等水位线和流场分布图, 见图 4。杨埕干沟、杨埕水库、杨埕湿地地势较高, 且地表水水位较高, 因此三者为浅层地下水的补给源, 导致浅层地下水沿三者边界线、沿线向外扩散径流, 可作为浅层地下水的主要分水岭。漳卫新河、宣惠河、杨埕支沟总体地势较低, 且地表水水位较低, 接受浅层地下水的径流汇集, 对研究区浅层地下水径流特征起到控制作用。

浅层地下水在研究区西南部边界接受区外浅层地下水的补给, 进而开始向东北方向流动; 中部持续受到杨埕干沟、杨埕湿地地表水下渗补给, 北端

受到杨埕水库、虾塘地表水体的渗漏补给,地下水局部的流向发生变化,向东西两侧偏移,径流排泄至漳卫新河、宣惠河和杨埕支沟,但总体是自西南向东北径流,最终在研究区东北部流出区外而进入大海。

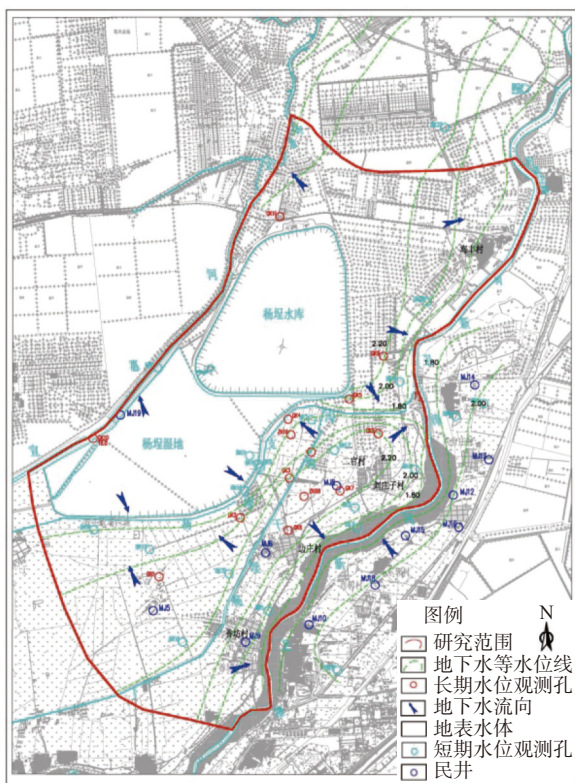


图4 浅层地下水流场

Fig. 4 Diagram of the shallow groundwater flow field

3.1.3 不同地下水之间水力联系分析

调查期间,在 GK2 和 GK3 两孔附近均布置了深、浅钻孔,相距 3~5 m,分层观测地下水水位。第 I 含水岩组浅层地下水水位为 1.71~1.83 m,第 II 含水岩组深层地下水水位为 0.34~0.97 m,即浅层地下水水位高于深层地下水水位,说明浅层地下水存在向深层地下水越流补给的可能。

在对第 II 含水岩组深层地下水进行抽水试验过程中观测浅孔水位变化,发现浅层地下水水位在整个试验过程中未发生变化,说明浅层地下水与深层地下水之间水力联系微弱。

3.2 水化学分析

3.2.1 水化学特征

地表水总矿化度为 1.47~27.78 g/L,主要为咸水,pH 值为 7.11~8.13,主要为弱碱性水,硬度为 0.35~4.40 g/L,水化学类型无明显分带性,水中阴离子以

Cl^- 为主,阳离子以 K^+Na^+ 为主,水化学类型为 Cl-Na 型。根据 2012 年 1 月至 2013 年 9 月的杨埕水库水质检测报告,杨埕水库水质良好,总矿化度为 0.71~1.56 g/L,属淡水-微咸水。

浅层地下水总矿化度为 1.73~44.12 g/L,主要为咸水,pH 值为 6.6~8.25,主要为弱碱性水,硬度为 0.53~4.95 g/L,水化学特征无明显分带性,水中阴离子以 Cl^- 为主,阳离子以 K^+Na^+ 为主,水化学类型主要为 Cl-Na 型、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3^-$ -Na(K) 型和 $\text{Cl-Na(K)}\cdot\text{Mg}$ 型。取样期间正值雨季,局部地区大气降水入渗量较大,使得部分浅层地下水中 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 含量增多,总矿化度低于 3 g/L。

第 II 含水岩组深层地下水总矿化度为 1.05~18.12 g/L,属微咸水~盐水,pH 值为 6.94~7.68,主要为弱碱性水,硬度 0.42~3.80 g/L,水中阴离子以 Cl^- 为主,阳离子以 K^+Na^+ 为主,水化学类型主要为 Cl-Na(K) 型,局部为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na(K)}$ 型。

第 III 含水岩组深层地下水总矿化度为 1.57~2.39 g/L,属微咸水,pH 值为 7.35~8.5,硬度 0.27~0.28 g/L,第 IV 含水岩组深层地下水总矿化度为 1.44~3.15 g/L,属微咸水~咸水,pH 值为 7.65~7.72,为弱碱性水,硬度 0.23~0.34 g/L,二者水化学特征接近,阴离子均以 Cl^- 、 HCO_3^- 为主,阳离子均以 K^+Na^+ 为主,水化学类型均为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na(K)}$ 型。

3.2.2 水化学证据

从地表水和浅层地下水水化学数据可知:杨埕干沟上游地表水矿化度为 1.69 g/L,小于位于干沟分支水渠附近的 GK1 孔浅层地下水矿化度(1.73 g/L),而杨埕干沟下游地表水矿化度为 6.85 g/L,仍小于其周边浅层地下水矿化度(8.46~13.39 g/L),说明杨埕干沟地表水渗漏补给周边浅层地下水;杨埕水库总矿化度远小于水库库堤外围 BH03 孔浅层地下水矿化度(5.88 g/L),说明水库可能渗漏补给浅层地下水,但渗漏量较小;杨埕湿地东北侧地表水矿化度较高(11.12 g/L),但仍小于其附近 GK5 孔浅层地下水矿化度(44.12 g/L),说明杨埕湿地可能渗漏补给周边地下水,渗漏补给量也较小;漳卫新河地表水矿化度较高,为 27.78~35.01 g/L,高于附近的 GK7(12.72g/L)、GK9(27.44 g/L),说明河水受到海水和浅层地下水的混合补给。可见,浅层地下水与不同地表水水质存在差异,以上分析与水位动态分析结论相一致。

浅层地下水与第 II 含水岩组深层地下水中阴离子均以 Cl^- 为主, 阳离子均以 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 为主, 水化学类型均主要为 Cl-Na(K) 型, 总矿化度均大于 1 g/L , 水质条件接近。根据同一钻孔(GK2)所取浅层地下水与第 II 含水岩组深层地下水的水质分析结果, 浅层地下水总矿化度为 17.23 g/L , 总硬度为 4.0 g/L , 深层地下水总矿化度为 16.25 g/L , 总硬度为 3.45 g/L , 可见, 浅层地下水与第 II 含水岩组深层地下水水化学特征相近。但浅层地下水受到高矿化地表水入渗补给和强烈蒸发作用的影响, 使得地下水以高矿化的 Cl-Na(K) 型水为主, 同时, 第 II 含水岩组深层地下水流向为自东向西, 可能受到海水入侵的影响, 混合产生了高矿化的 Cl-Na(K) 型水, 因此, 水化学特征相近无法证明二者之间是否存在水力联系。

第 III、IV 含水岩组地下水化学特征与第 II 含水岩组之间差异明显, 水质条件相差也明显, 考虑到三者之间存在连续稳定的隔水层, 相互连通性较差, 判断深层地下水之间不存在水力联系。

3.3 同位素示踪

3.3.1 同位素组成特征

浅层地下水 $\delta(\text{D})$ 为 $-59.1\text{‰} \sim -43.3\text{‰}$, 平均值为 -48.93‰ , $\delta(^{18}\text{O})$ 为 $-8.02\text{‰} \sim -4.87\text{‰}$, 平均值为 -6.05‰ ; 深层地下水中, 第 II 含水组 $\delta(\text{D})$ 为 $-66.5\text{‰} \sim -65.5\text{‰}$, 平均值为 -66.13‰ , $\delta(^{18}\text{O})$ 为 $-9.20\text{‰} \sim -8.86\text{‰}$, 平均值为 -8.99‰ , 第 III 含水组 $\delta(\text{D})$ 为 -69.6‰ , $\delta(^{18}\text{O})$ 为 -9.24‰ 。可见, 浅层地下水的氢氧稳定同位素值最为富集, 深层地下水中第 II 含水组次之, 第 III 含水组最为贫乏, 说明不同地下水的氢氧稳定同位素值存在差异。

3.3.2 同位素示踪分析

研究区浅层地下水 $\delta(\text{D})$ 与 $\delta(^{18}\text{O})$ 存在良好的线性关系, 均分布于华北平原大气降水线 [$\delta(\text{D}) = 7.02\delta(^{18}\text{O}) + 1.72$] [24-25] 的下方(图 5), 斜率小于大气降水线, 说明浅层地下水主要源于入渗补给的大气降水。选取 IAEA 大气降水同位素监测站网石家庄站大气降水 $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 的加权平均值 (-53.3‰ 、 -7.77‰) 作为当地现代大气降水 $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 的典型代表, 沧州市大浪淀水库地表水 $\delta(\text{D})$ ($-47.0\text{‰} \sim -45.0\text{‰}$)、 $\delta(^{18}\text{O})$ ($-5.4\text{‰} \sim -5.2\text{‰}$) 作为当地地表水 $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 的典型代表。对比可知, 浅层地下水氢氧同位素均值明显介于二者氢氧同位素值之间, 考虑到厂址周边分布较多沟渠池塘, 认为浅层地下水接受

大气降水和地表水混合补给。

浅层地下水水样点偏离大气降水线较多, 且靠近蒸发线 [$\delta(\text{D}) = 5.89\delta(^{18}\text{O}) - 14.96$], 说明浅层地下水受到强烈的蒸发作用, 导致重同位素相对富集, 这与浅层地下水埋深较浅有关。同时, 与现代大气降水和地表水氢氧同位素值相比, 深度 $7 \sim 8 \text{ m}$ 的 K1 孔浅层地下水氢氧同位素值较高, 而深度 10 m 的 K3 孔浅层地下水则较低, 进一步说明埋藏较浅的浅层地下水受到蒸发作用影响十分明显, 即浅层地下水将通过蒸发作用转化为大气降水, 但蒸发作用影响深度有限。

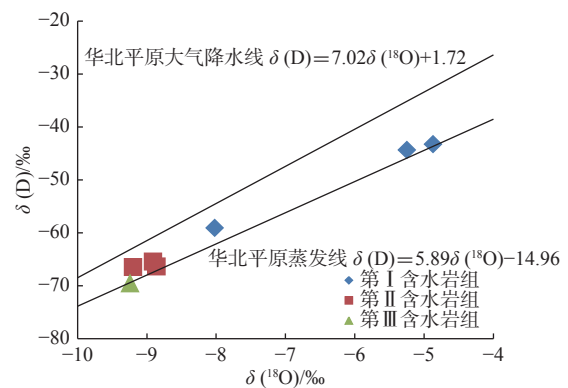
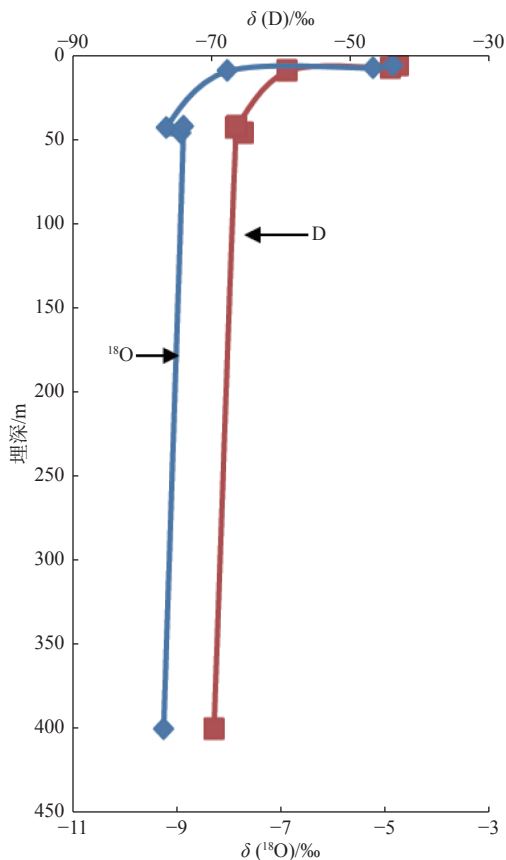


图 5 不同含水组地下水 $\delta(\text{D})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 关系
Fig. 5 Relationship diagram of $\delta(\text{D})$ and $\delta(^{18}\text{O})$ in different groups groundwater

深层地下水水样点分布于大气降水线的下方, 且靠近左下方, 随着埋深的增加, 地下水氢氧同位素逐渐贫化, 即深层地下水氢氧同位素低于现代大气降水的值。考虑到第四纪从更新世至全新世, 气候总体逐渐变暖, 温度效应使得大气降水氢氧同位素逐渐富集, 说明深层地下水非来源于现代大气降水。第 II 含水组地下水 $\delta(^{18}\text{O})$ 平均值和第 III 含水组地下水 $\delta(^{18}\text{O})$ 均低于当地现代大气降水 $\delta(^{18}\text{O})$ 加权平均值, 这与温度效应导致的中纬度地区更新世冰期古水 $\delta(^{18}\text{O})$ 普遍低于现代大气降水 $\delta(^{18}\text{O})$ 一致 [26], 说明研究区深层地下水主要接受更新世冰期古水的补给, 即上游深层地下水的侧向补给。

从 $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 垂向分布曲线(图 6)可以看出, 浅层地下水 $\delta(\text{D})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 与深层地下水(第 II、III 含水组)的值差异较大, 深层地下水贫化十分明显, 说明浅层地下水不会对深层地下水产生垂向补给。考虑到第 I 含水岩组与第 II 含水岩组之间存在连续稳定的隔水层, 二者之间连通性较差, 综合判断浅层地下水与深层地下水之间水力联系微弱。

图6 $\delta(D)$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 垂向分布曲线Fig. 6 Vertical distribution curve of $\delta(D)$ and $\delta(^{18}\text{O})$

4 结论

地下水水位动态特征总体表现为枯水期水位逐渐减小,丰水期水位逐渐升高。大气降水补给研究区内各类地表水和浅层地下水,浅层地下水虽然受局部地形和地表水体的影响,与不同的地表水发生相互转化,局部的流向发生变化,但总体是自西南向东北径流,最终侧向流出区外而进入大海。

水位观测与水化学分析显示,浅层地下水与地表水之间的水力联系总体表现为浅层地下水接受杨埕干沟、杨埕湿地、杨埕水库以及塘水等地表水体的渗漏补给,径流排泄至漳卫新河、宣惠河和杨埕支沟。

浅层地下水与不同地表水之间水质存在差异,与第Ⅱ含水岩组深层地下水水质接近;第Ⅲ、Ⅳ含水岩组地下水水质条件接近,但与第Ⅱ含水岩组之间水质条件相差明显。

不同含水组地下水氢氧稳定同位素组成存在明显差异,存在明显的空间变化,浅层地下水最为富集,在垂向上自上而下呈现由大到小的变化趋势,反映更新世至全新世以来气温总体上逐渐变暖的

气候变化特征,指示浅层地下水主要来源于大气降水的垂向入渗补给,其次为地表水的侧向入渗补给,但受到强烈的蒸发作用;深层地下水主要接受地下水流动系统上游更新世冰期古水的侧向补给。

研究区三水转换规律总体表现为:浅层地下水与大气降水、周边地表水之间存在相互转化关系,且浅层地下水与深层地下水之间水力联系微弱。

参考文献:

- [1] BOUCHAOU L, MICHELOT J L, VENGOSH A, et al. Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3-4): 267-287. DOI: 10.1016/j.jhydrology.2008.01.022.
- [2] PANG Z H, HUANG T M, CHEN Y N. Diminished groundwater recharge and circulation relative to degrading riparian vegetation in the middle Tarim River, Xinjiang Uygur, western China[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24: 147-159. DOI: 10.1002/hyp.7438.
- [3] 宋献方,刘鑫,夏军,等.基于氢氧同位素的岔巴沟流域地表水-地下水转化关系研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(1): 8-19. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2009.01.002.
- [4] 翟远征,王金生,周俊.北京市潮白河冲洪积扇地下水流动和更新模式的水化学和同位素标记[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(1): 32-44. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2013.01.004.
- [5] CHRISTOPH R, ANDREAS K, CHEN Z, et al. Characterizing the recharge regime of the strongly exploited aquifers of the North China Plain by environmental tracers[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: 1-14. DOI: 10.1029/2008wr007660.
- [6] 宋献方,李发东,于静洁,等.基于氢氧同位素与水化学的潮白河流域地下水水循环特征[J]. *地理研究*, 2007, 26(1): 11-21. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2007.01.002.
- [7] 翟远征,王金生,滕彦国,等.北京市不同水体中D和 ^{18}O 组成的变化及其区域水循环指示意义[J]. *资源科学*, 2011, 33(1): 92-97. DOI: CNKI:SUN:ZRZY.0.2011-01-014.
- [8] 朱谱成,耿新新,马琳娜,等.基于同位素-水化学的东胜矿区地下水循环研究[J]. *人民黄河*, 2018, 40(9): 47-52. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.09.

- 012.
- [9] 苏晨, 张学庆, 田夏, 等. 东阿县沿黄区孔隙地下水化学特征及成因分析[J]. 水电能源科技, 2022, 40(2): 62-65.
- [10] 苏小四, 林学钰. 银川平原地下水循环及其可更新能力评价的同位素证据[J]. 资源科学, 2004, 26(2): 29-35. DOI: 10.3321/issn:1007-7588.2004.02.005.
- [11] 郭巧玲, 熊新芝, 姜景瑞. 窟野河流域不同水体同位素及水化学特征分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 237-242. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2016.02.041.
- [12] 柳富田. 基于同位素技术的鄂尔多斯白垩系盆地北区地下水循环及水化学演化规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 71-83.
- [13] 马金珠, 黄天明, 丁贞玉, 等. 同位素指示的巴丹吉林沙漠南缘地下水补给来源[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 922-930. DOI: 10.3321/jissn:1001-8166.2007.09.006.
- [14] 王莺迎, 张艺武, 苏小四, 等. 伊犁河谷西部平原多级次地下水循环模式[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(4): 167-177. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0084.
- [15] 张靖坤, 刘飞, 邹嘉文, 等. 华北平原典型压采区地下水循环的氢氧同位素示踪[J]. 南水北调与水利科技, 2022, 20(2): 385-392. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0039.
- [16] 陈宗宇, 万力, 聂振龙, 等. 利用稳定同位素识别黑河流域地下水的补给来源[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 9-14. DOI: 10.3969/jissn.1000-3665.2006.06.003.
- [17] 王莹, 张琳, 张亚哲, 等. 河北平原地下水水化学分布特征及演化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(6): 84-85. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2008.06.014.
- [18] 柳富田, 苏小四, 董维红, 等. 同位素技术在地下水循环深度确定中的应用[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 52-54. DOI: 10.3969/jissn.1000-1379.2008.04.025.
- [19] 杨闪. 干旱地区水循环过程中的地下水化学特征研究: 以蒙古国前巴音铝矿水源地为例[J]. 地下水, 2018, 40(6): 40-42. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2018.06.012.
- [20] 靳书贺, 姜纪沂, 迟宝明, 等. 基于环境同位素与水化学的霍城县平原区地下水循环模式[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 43-51. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.04.08.
- [21] 张光辉, 聂振龙, 王金哲, 等. 黑河流域水循环过程中地下水同位素特征及补给效应[J]. 地球科学进展, 2005(5): 511-519. DOI: CNKI:SUN:DXJZ.0.2005-05-005.
- [22] 李丹, 张明珠, 庞园, 等. 广州市沿海平原地下水循环及转化规律初探[J]. 人民珠江, 2019, 40(9): 76-84. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2019.09.012.
- [23] 李巧, 周金龙, 高业新, 等. 新疆玛纳斯河流域平原区地下水水文地球化学特征研究[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 238-244. DOI: 10.3969/issn.1000-8527.2015.02.002.
- [24] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 990-998. DOI: 10.3321/issn:1001-8166.2005.09.009.
- [25] 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.
- [26] CLARK I D, FRITZ P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. Lewis Publishers, Chelsea. 1997.

Three types of water transformation rule of a coastal site

WU Chunyong¹, WANG Xuhong¹, FU Bin¹, HOU Shuqiang¹, WANG Xiaoyuan¹, ZHAI Yuanzheng²

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd. Beijing 100840, China;

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Due to the uneven seasonal distribution of atmospheric precipitation during the year, densely distributed surface water bodies, and complex hydrogeological conditions, the mechanism of mutual conversion among the 3 types of water in coastal plain areas is very complex. Once a pollution accident occurs, the pollutants are easily transferred through the three waters conversion, which pose a threat to the health and safety of the surrounding public. Therefore, in order to provide technical basis for the preparation and review of the environmental impact report of the site, it is necessary to study and reveal the conversion laws between atmospheric precipitation, surface

water, and groundwater, determine the impact range of pollutant migration in the 3 types of water under accident conditions, and determine the goals and scope of environmental impact assessment in the selection and evaluation of engineering project sites in the region.

This paper has made full use of the hydrological and geological survey data in the vicinity of the coastal plant site of a project, collected the hydrological data in the coastal area of the North China Plain, analyzed the water levels dynamic change characteristics of the surface water and the groundwater in different aquifers, studied the hydrochemical characteristics of different water bodies and their water quality changes, compared the composition and differences of hydrogen and oxygen isotopes in different water bodies, and judged the mutual transformation relationship between atmospheric precipitation, surface water and groundwater, analyzed the hydraulic connection of groundwater between different aquifers, and comprehensively studied the transformation law of the three water systems around the plant site.

Results indicate that there was a significant seasonal variation in the groundwater level dynamics of the study area with changes in precipitation. The overall performance was that the water level gradually decreases during the dry season and increases during the wet season. There were differences in hydrochemical characteristics between shallow groundwater and different surface waters, which were similar to the deep groundwater of the II water-bearing rock group. The hydrochemical characteristics of groundwater in the III and IV water-bearing rock formations were similar, but there was a significant difference between them and the II water-bearing rock formations. The $\delta(D)$ value of shallow groundwater was -59.1% to -43.3% , with an average value of -48.93% , and the $\delta(^{18}O)$ value was -8.02% to -4.87% , with an average value of -6.05% . The $\delta(D)$ value of deep groundwater of the II water-bearing rock group was -66.5% to -65.5% , with an average value of -66.13% , and the $\delta(^{18}O)$ value was -9.20% to -8.86% , with an average value of -8.99% . The $\delta(D)$ value of deep groundwater of the III water-bearing rock group was -69.6% , and the $\delta(^{18}O)$ value was -9.24% . There were obvious differences and spatial changes in the hydrogen and oxygen isotope composition of groundwater in different water-bearing rock groups, and the shallow groundwater was the most enriched. It showed a trend of change from large to small as the depth increases in vertical direction.

The atmospheric precipitation supplied shallow groundwater and surface water. There was the hydraulic connection between shallow groundwater and different surface water. The general performance was that shallow groundwater received seepage recharge from surface water bodies, such as Yangcheng trunk ditch, Yangcheng wetland, Yangcheng reservoir and pond, and runoff was discharged to Zhangweixin River, Xuanhui River and Yangcheng branch ditch. The runoff of the shallow groundwater was from southwest to northeast on the whole, and finally entered the sea. The shallow groundwater was obviously affected by the evaporation. The deep groundwater was mainly supplied by Pleistocene glacial water, and the hydraulic connection with the shallow groundwater was weak.

Key words: coastal site; 3 types of water transformation; groundwater; hydrogen and oxygen stable isotopes