

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.363>



## 基于典型钻孔的江汉平原地下水成因分析

王露霞, 梁杏\*, 李静

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 江汉平原地下水需求量日益增加、水质持续恶化, 深入探究地下水的成因, 对于地下水的合理利用与评价具有重要意义。选取江汉平原腹地 YLW01 钻孔和江汉附近 HJ007 钻孔为研究对象, 钻探采集原状土柱, 提取孔隙水, 分析其水化学和氡氧同位素特征。研究表明: YLW01 孔中深层砂性土孔隙水为咸水, TDS 为 1 131~4 013 mg/L, 粘性土孔隙水为淡水; HJ007 孔孔隙水均为淡水。YLW01 孔中深层砂性土孔隙水的高  $\text{SO}_4^{2-}$  含量 (459~2 124 mg/L), 由石膏溶解形成; HJ007 孔中深层孔隙水的高  $\text{NO}_3^-$  含量 (22~315 mg/L), 由土壤中硝化作用形成。孔隙水化学成分主要受矿物溶解和阳离子交替吸附作用影响, 在长江和汉江带作用程度不同。氡氧同位素特征表明孔隙水来源于大气降水, 且汉江带浅层地下水受到明显的地表水混合。江汉平原两个钻孔水化学与同位素的差异受长江和汉江影响带河湖相沉积环境、沉积物粒度及矿物组成所控制。

**关键词:** 江汉平原地下水; 水化学特征; 地下水; 水文地球化学过程。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2020)02-701-10

收稿日期: 2019-01-14

## Analysis of Origin of Groundwater in Jianghan Plain Based on Typical Drillings

Wang Luxia, Liang Xing\*, Li Jing

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** With the increasing demand of groundwater and the continuous deterioration of water quality in Jianghan plain, it is of great significance to deeply explore the causes of groundwater for rational utilization and evaluation of groundwater. Taking YLW01 in central region and HJ007 near Hanjiang river as the study objects, porewater samples were squeezed from the drilled undisturbed soil columns to analyze hydrochemical characteristics and hydrogen and oxygen isotopic characteristics. The results show that: YLW01 porewater samples of sandy soil in middle-deep depth were saline water and the total dissolved solids (TDS) ranged from 1 131 to 4 013 mg/L, while other porewater samples of clay were fresh water; HJ007 porewater samples were all fresh water. The high concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  (459~2 124 mg/L) of YLW01 porewater in middle-deep depth sandy soil was caused by Gypsum dissolution; the high concentration of  $\text{NO}_3^-$  (22~315 mg/L) of HJ007 porewater in middle-deep depth was caused by nitrification in soil. The chemical composition of porewater was mainly affected by mineral dissolution and cation exchange, and the degree of action in the Yangtze and Hanjiang River zone was different. Hydrogen and oxygen isotopic characteristics indicated that porewater came from atmospheric precipitation and the shallow groundwater in Hanjiang River zone was obviously mixed with surface water. The differences in chemical and isotopic concentrations of the two boreholes in Jianghan Plain were controlled by the sedimentary environment, sediment particle size and mineral composition of the Yangtze and Hanjiang River effecting zones.

**Key words:** Jianghan Plain; porewater; hydrochemical characteristics; groundwater; hydrogeochemical processes.

基金项目: 中国地质调查局项目 (No.12120114069301); 国家自然科学基金项目 (No.41772268)。

作者简介: 王露霞 (1993-), 女, 硕士, 主要从事水文-环境地质方面的工作, ORCID: 0000-0003-4525-420X. E-mail: luxia\_wang@163.com

\* 通讯作者: 梁杏, ORCID:0000-0001-9838-5161. E-mail: xliang@cug.edu.cn

引用格式: 王露霞, 梁杏, 李静, 2020. 基于典型钻孔的江汉平原地下水成因分析. 地球科学, 45(2):701-710.

江汉平原位于湖北省中南部,素有“鱼米之乡”之称,是重要的水产品和棉花产地.近年来,由于城镇化建设的快速发展和人类活动的加剧,地下水污染(Zhou *et al.*, 2011; 王建伟等, 2016; 杨静等, 2018)和天然水质异常等问题(甘义群等, 2014; 邓娅敏等, 2015)逐渐凸显.

目前,江汉平原地下水的研究主要集中在含水层的水化学特征(於昊天等, 2017; 段艳华等, 2014; Zhou *et al.*, 2012),含水层中沉积物特征与环境演变(李红梅等, 2015; 王妍妍等, 2017),含水层中砷(Gan *et al.*, 2014; Duan *et al.*, 2017)、抗生素(Yao *et al.*, 2015)、有机质(于凯, 2016)和氮(Du *et al.*, 2017; 沈帅等, 2017; 沈帅等, 2018)的分布与成因以及含水层与弱透水层水文地质参数反演等(陈晨等, 2017; 张婧玮等, 2017).系统的研究含水系统中(含水层和弱透水层)地下水的化学与同位素特征尚未见报道.

本文选取江汉平原腹地的钻孔 YLW01(深度 200 m)和汉江附近的钻孔 HJ007(深度 140 m),获取不同深度的土样,采用机械压榨法和真空蒸馏法分别提取用于不同测试目的的孔隙水,分析其水化学和同位素特征,进一步系统分析江汉平原地区地下水(包括砂性土孔隙水和粘性土孔隙水)的赋存与演化规律,为该地区地下水的开发利用提供理论依据.

## 1 研究区概况

江汉平原,位于长江中游,湖北省的中南部,西起宜昌枝江,东迄武汉,北自荆门钟祥,南与洞庭湖平原相连,属于亚热带季风气候区,多年来平均气温为 16.8 °C,七月份气温最高,多年平均降雨量为 1 208 mm,集中在 5~8 月份,多年平均蒸发量 1 379 mm 左右,7 月份蒸发量最大.

燕山运动以来,江汉盆地逐渐下降,沉积了巨厚的新生代地层.江汉平原上部由第四纪沉积物组成,盆地中心厚度可达 300 m,盆地边缘厚度过渡为 100 m 左右.主要由粘土、亚砂土、粉砂、细砂及砂砾石组成,沉积物颗粒较粗,孔隙率和渗透性较高,为平原区主要孔隙含水系统.区内地层发育较为单一,以第四系为主,根据地下水的埋藏条件将第四系孔隙水划分为浅层孔隙潜水、中层孔隙承压水和深层孔隙承压水.研究区内长江、汉江、通顺河、东荆河、内荆河等河流湖泊是该研究区内的主要地表

水系,也是控制该区地下水补给、径流、排泄的重要因素(图 1).

研究区内浅层孔隙潜水含水层主要由全新统(Qhg)冲湖积物组成,分布广泛,厚度为 10~20 m.冲积物主要分布于汉江、通顺河、东荆河南支、内荆河两岸以及排洪道两侧;湖积物主要围绕大片湖泊、渔场周边分布,含水层与弱透水层交互分布,砂层厚度较薄,水量少,渗透性差,受降雨、地表水体的影响较大.中层孔隙承压含水层主要由上、中更新统(Q<sup>3</sup>ps+Q<sup>2</sup>pj)组成,深度范围为 10~100 m.该层含水层顶底部为厚层弱透水层,中间夹有薄层弱透水层,受季节影响较小,地下水位较稳定,富水性中等,为主要的地下水开采层位.深层孔隙承压含水层主要由下更新统、新近系(Q<sup>1</sup>pd+Ng)组成,深度范围为 100~200 m.含水层中间夹有不同厚度的弱透水层,形成局部隔水带,含水层分布稳定,厚度较大,富水性中等,水质较好,为本区可开发利用的可靠水源.

本文选取两个典型钻孔 YLW01 和 HJ007 进行研究(钻孔位置如图 1).YLW01 钻孔位于江汉平原腹地,深度 200 m,揭露第四系,钻孔附近为东荆河、内荆河;HJ007 钻孔位于江汉平原汉江附近,深度 140 m,揭露第四系和新近系,钻孔附近为通顺河和汉江.钻孔岩性变化和含水层、弱透水层的划分如图 2.区内第四系地层为一套岩相复杂多变的内陆河湖相沉积,由于江汉平原腹地和汉江附近沉积环境和沉积物来源不同,导致两个钻孔的水化学和同位素特征的差异.

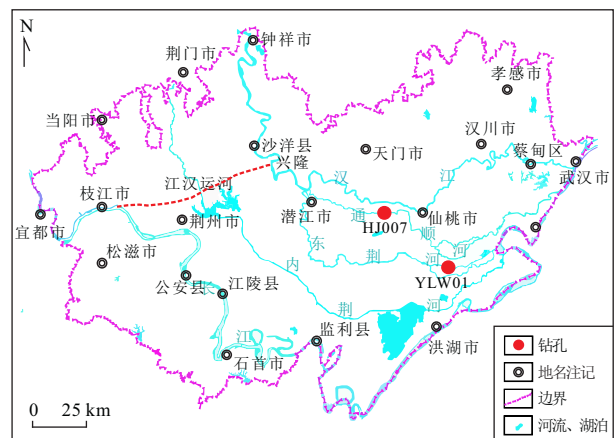


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 Location map of the research area

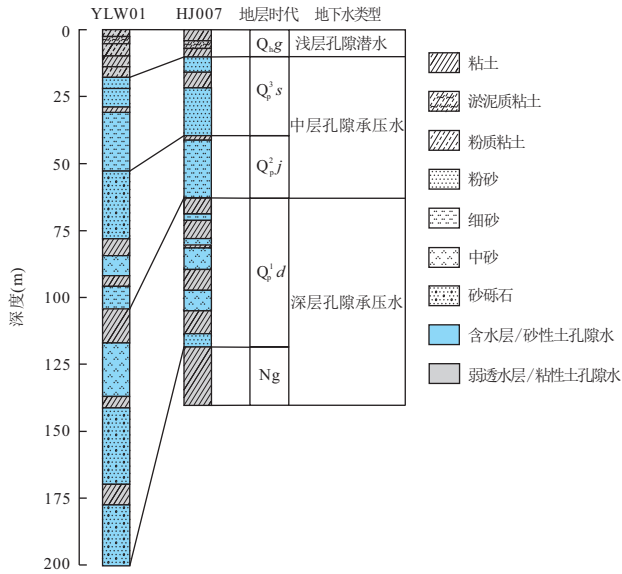


图2 钻孔柱状图

Fig.2 Stratigraphic columns of the drilled boreholes

## 2 样品的采集与测试

### 2.1 样品的采集及预处理

野外采用 Geo-probe 钻机直接取样,分别采集压榨样、蒸馏样和总有机碳(TOC)样.压榨样尺寸为直径 10 cm、长 15 cm,现场依次用保鲜膜、锡箔纸、胶带、密封袋密封.蒸馏样使用 5 mL 玻璃瓶现场采集,装满并使用封口膜密封.TOC 样使用 50 mL 离心管现场采集,装满并使用封口膜密封,所有样品 4~5 °C 保存.本次共采集压榨样 44 份,其中 YLW01 钻孔 23 件,HJ007 钻孔 21 件;蒸馏样 83 份,YLW01 钻孔 49 件,HJ007 钻孔 34 件;TOC 样 54 份,YLW01 钻孔 32 份,HJ007 钻孔 22 份.

压榨样使用高压压榨仪提取孔隙水,经 0.45 μm 滤膜过滤后用于水化学测试,其中用于测定阳离子的水样加入浓 HNO<sub>3</sub>使其 pH 小于 2.蒸馏样使用全自动真空冷凝抽提系统(仪器型号 LI-2100)提取氘氧同位素水样.TOC 样风干磨细过 150 目筛,称取约 1 g 样品至 50 mL 离心管中,缓慢加入过量的 1 mol/L 的 HCl,充分混匀,去除碳酸盐等无机碳,静置 12 h;静置完成后,将离心管在 7 000 r/min 离心 5 min,倒掉上清液;将样品烘干捣碎过 150 目筛,再包样上机测试.

### 2.2 样品分析

孔隙水碱度采用滴定法在实验室内测定.孔隙水阴离子采用离子色谱仪(美国赛默飞,IC-2100)测定,阳离子采用电感耦合等离子体发射光谱仪(美

国赛默飞,ICAP-7600)测定,阴阳离子的测试精度高于 0.01 mg/L;孔隙水氘氧同位素利用水同位素分析仪(美国 LGR,IWA-45EP)测定,δD、δ<sup>18</sup>O 测试结果为相对于维也纳标准平均海水(VSMOW)的千分偏差,用 δ/‰ 表示,δD 测试精度为 ±0.5‰,δ<sup>18</sup>O 测试精度为 ±0.1‰,以上测试工作均在中国地质大学(武汉)地质调查研究院完成.沉积物 TOC 含量利用总有机碳分析仪(德国 Elementar,vario-TOC SELECT)测定,用 % 表示,测试精度为 ±0.01%,该项工作在中国地质大学(武汉)盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地完成.

## 3 测试结果

### 3.1 孔隙水水化学特征

两个钻孔孔隙水主要化学成分(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)及总溶解固体(TDS)垂向变化趋势见图 3.

YLW01 孔粘性土孔隙水的 TDS 含量为 63~850 mg/L,均为淡水,砂性土孔隙水的 TDS 含量为 158~4 013 mg/L,在 90~144 m 范围内为微咸水.HJ007 孔粘性土孔隙水的 TDS 含量为 195~817 mg/L,砂性土孔隙水的 TDS 含量为 290~607 mg/L,均为淡水.YLW01 孔孔隙水水化学类型主要为 Ca-HCO<sub>3</sub>、Ca·Na-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Ca-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>;HJ007 孔孔隙水水化学类型主要为 Ca-HCO<sub>3</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>.

YLW01 孔孔隙水各组分含量垂向上差异较大,中深层含量比浅层含量高,TDS、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量整体随深度先增加后减小,Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在中深层范围内波动较大;HJ007 孔孔隙水各组分含量垂向上差异不大,TDS、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量整体随深度先增加后减小,Na<sup>+</sup>含量随深度缓慢增加,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量随深度减小(图 3).YLW01 孔和 HJ007 孔的孔隙水离子组分垂向分布特征具有较大的差异,YLW01 孔在埋深 89~144 m 范围内的砂性土孔隙水 TDS、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量异常高,TDS 含量为 1 131~4 013 mg/L,Ca<sup>2+</sup>含量为 220~1 218 mg/L,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量为 459~2 125 mg/L;HJ007 孔孔隙水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量在埋深 18 m 以下较高,为 13~464 mg/L.

### 3.2 孔隙水氘氧同位素特征

YLW01 孔孔隙水 δ<sup>18</sup>O 的变化范围为 -9.79‰~-4.91‰,平均值为 -7.69‰;δD 的变

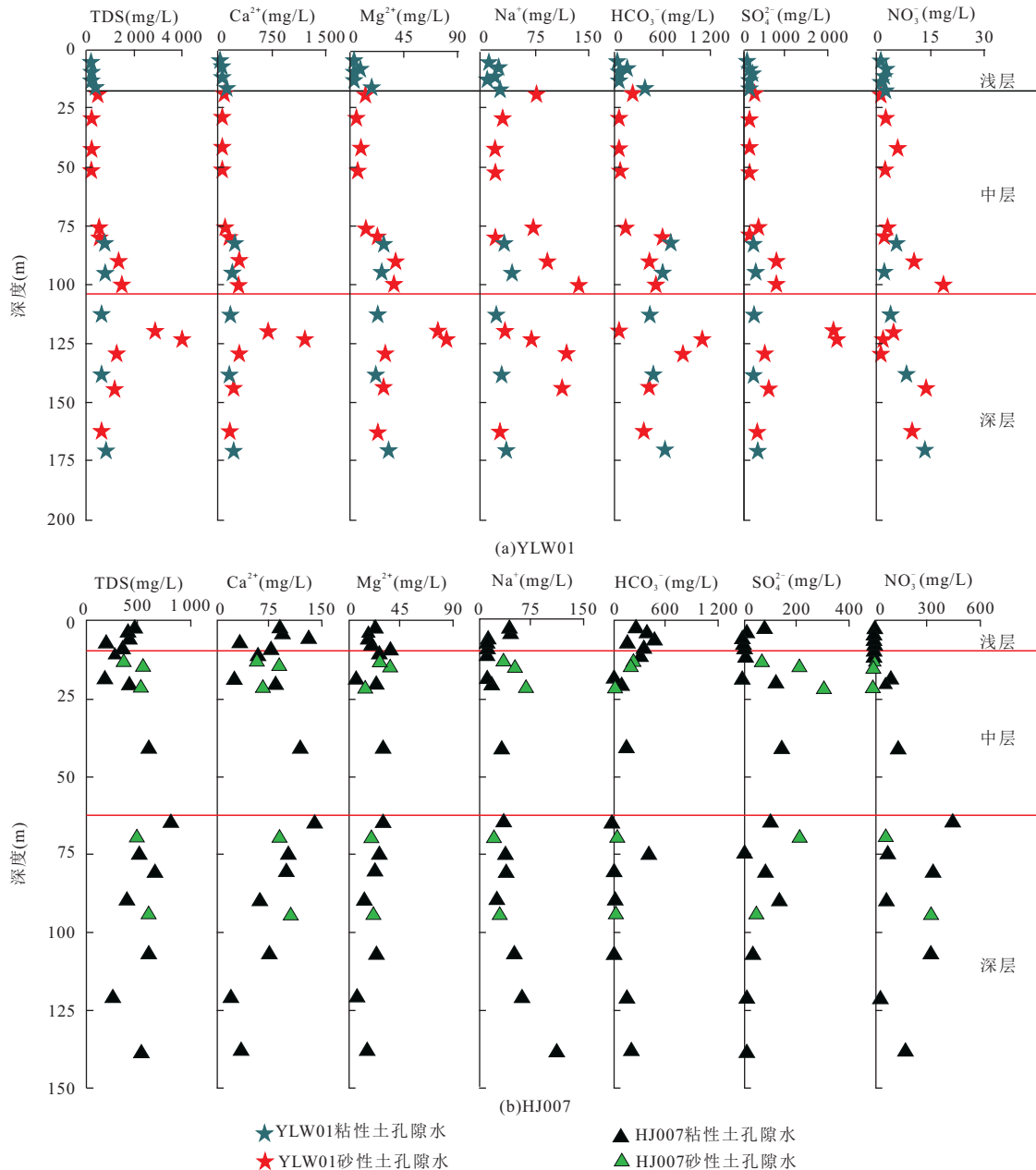


图 3 孔隙水 TDS 及主要组分垂向分布图

Fig. 3 TDS and solute concentrations of porewater versus depth

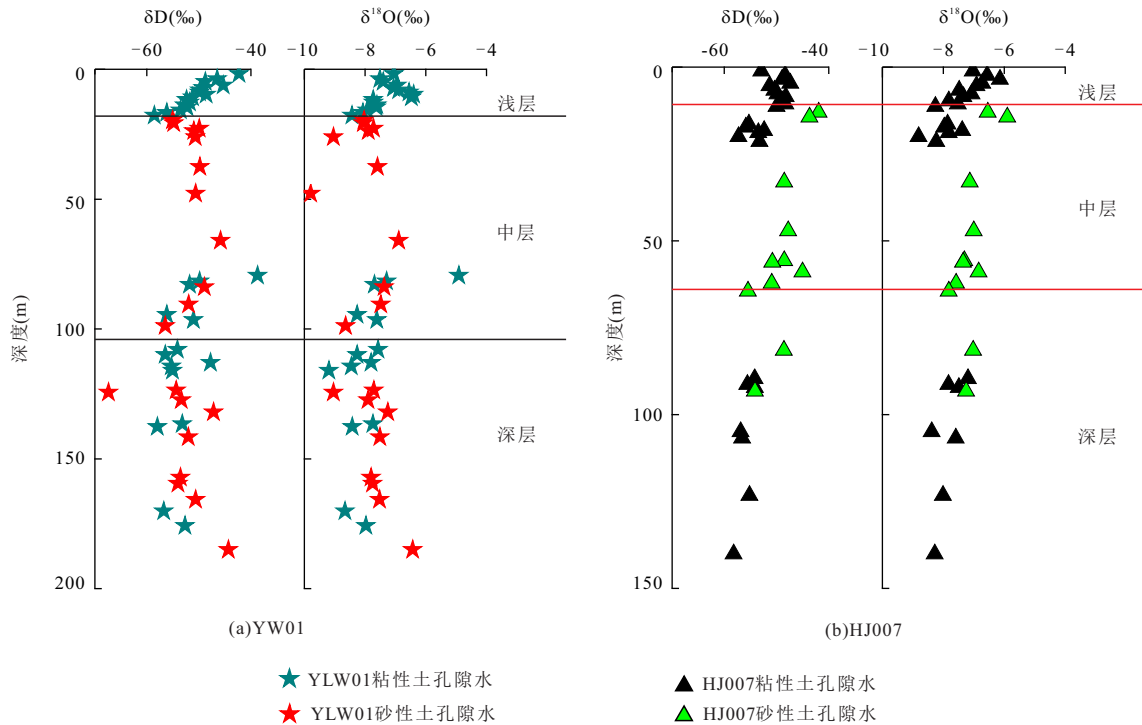
化范围为  $-67.37\text{‰} \sim -38.72\text{‰}$ , 平均值为  $-51.76\text{‰}$ . HJ007 孔孔隙水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围为  $-8.81\text{‰} \sim -5.90\text{‰}$ , 平均值为  $-7.42\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  的变化范围为  $-58.22\text{‰} \sim -41.93\text{‰}$ , 平均值为  $-51.48\text{‰}$ . 由孔隙水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  垂向分布图(图 4) 易知, YLW01 孔和 HJ007 孔中深层孔隙水的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  的变化趋势大致相同, 整体随深度减小; 而浅层孔隙水的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  变化趋势则相反. YLW01 孔从地表至 20 m, 氢氧同位素逐渐偏负,  $\delta\text{D}$  值从  $-40\text{‰}$  降至  $-60\text{‰}$ ; 而 HJ007 钻孔中氢同位素逐渐偏正, 从地

表至埋深 10 m,  $\delta\text{D}$  值从  $-53\text{‰}$  增至  $-49\text{‰}$ .

## 4 孔隙水成因分析

### 4.1 孔隙水来源

为确定孔隙水与大气降水的关系, 绘制  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  的关系图(图 5), 其中当地大气降水线采用武汉大气降水线  $\delta\text{D} = 7.95\delta^{18}\text{O} + 5.03$  (王涛, 2012). 由图 5 可知, 孔隙水基本位于大气降水线附近, 表明孔隙水来源于大气降水, 但 YLW01 孔和 HJ007 孔孔隙水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  关系式的斜率和截距均小于当地大气

图4 孔隙水 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 垂向分布图Fig.4 Stable isotopes ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) of porewater versus depth

降水线,表明在降水过程中受到二次蒸发的影响,雨水在降落过程中受到干燥大气影响发生分馏(Clark and Fritz, 2006; 赵玮, 2017). YLW01孔和HJ007孔浅层孔隙水比中深层孔隙水更富集重同位素,表明受到一定程度的蒸发作用.

由图4易知, YLW01孔和HJ007孔浅层孔隙水 $\delta D$ 随深度变化趋势相反,这种差异是由于浅层孔隙水埋深较浅,受到不同地表水的补给混合. YLW01钻孔浅层孔隙水受到东荆河的补给, HJ007钻孔浅层孔隙水受到通顺河和汉江的补给,由图5,东荆河比汉江、通顺河更富集重同位素,  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 偏正,导致YLW01孔浅层孔隙水从埋深20 m至地表 $\delta D$ 逐渐增大, HJ007孔浅层孔隙水 $\delta D$ 逐渐减小. HJ007孔浅层土壤颗粒的平均粒径(约为54  $\mu m$ )比YLW01孔浅层土壤颗粒的平均粒径(约为20  $\mu m$ )大,表明HJ007孔浅层孔隙水受到汉江、通顺河的补给较多, YLW01孔浅层孔隙水受到东荆河的补给较少,几乎保留了古水特征.

## 4.2 水文地球化学过程

**4.2.1 岩土矿物溶解** Gibbs图可以用来分析孔隙水的水化学成分主要受到3种机制的影响:a. 大气降水;b. 岩石风化;c. 蒸发作用(Gibbs, 1970). 由图6知,孔隙水基本位于岩石风化区域,  $Na^+/(Na^+$

$Ca^{2+})$ 值和 $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 值基本均小于0.5,说明YLW01孔和HJ007孔孔隙水化学成分主要来源于岩石风化.

使用phreeqc软件计算孔隙水中方解石、白云石和石膏的饱和指数. 由孔隙水中矿物饱和指数垂向分布图(图7), YLW01孔和HJ007孔地层中石膏、白云石、方解石均发生不同程度的溶解. YLW01孔孔隙水中石膏的饱和指数均小于0,处于非饱和状态,中浅层孔隙水方解石和白云石的饱和指数小于0,处于非饱和状态,而中深层基本大于0,处于饱和状态;由孔隙水主要组分相关关系表(表1)可知,孔隙水中 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 之间具有显著的相关性,表明这些离子主要来源于方解石、白云石、石膏的溶解. HJ007孔石膏、方解石、白云石的饱和指数基本均小于0,处于非饱和状态,不断溶解中;孔隙水中 $Ca^{2+}$ 与 $SO_4^{2-}$ 具有显著的相关性,表明 $SO_4^{2-}$ 主要来源于石膏的溶解,而孔隙水中 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 的相关性较差,表明 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 不仅来源于方解石、石膏的溶解,还存在含Ca、Mg的硅酸盐矿物的溶解以及阳离子交替吸附作用等.

**4.2.2 阳离子交替吸附作用** 由孔隙水的 $Cl^-$  VS  $Na^+$ 分布图(图8a)可以看出,孔隙水基本位于平衡线的下方,  $Cl^-$ 不足以平衡 $Na^+$ ,表明 $Na^+$ 主要来源

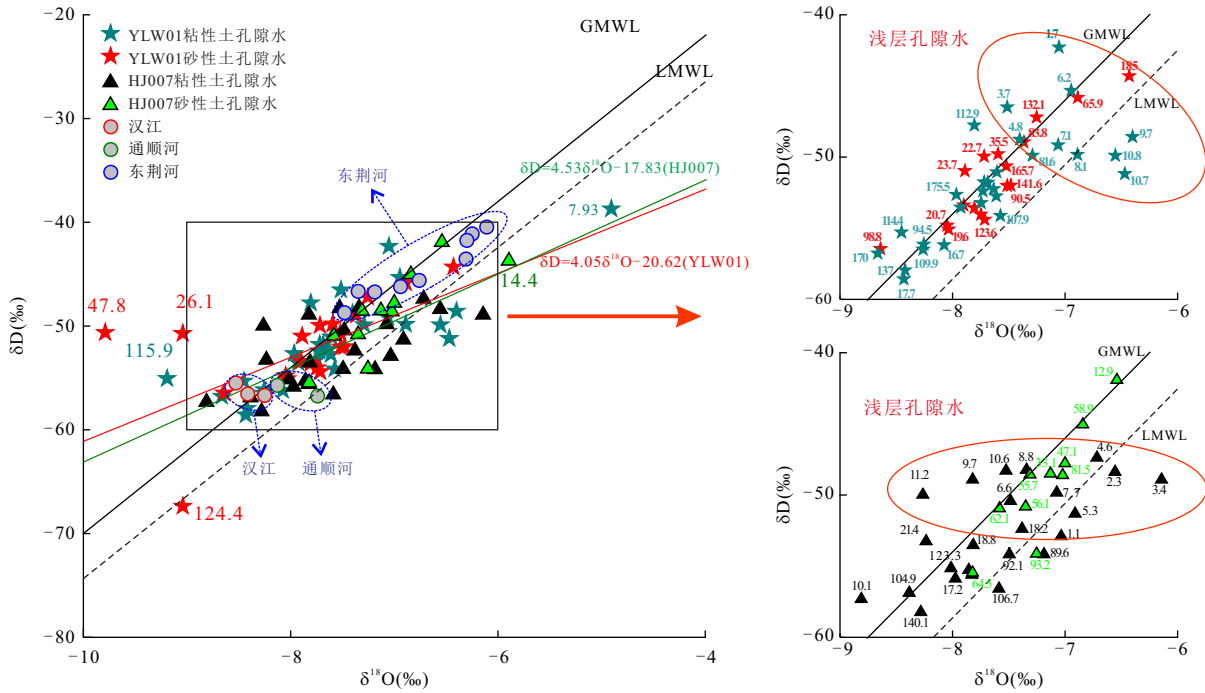


图5 孔隙水、地表水 δD 与 δ<sup>18</sup>O 关系图

Fig.5 Plots of δD versus δ<sup>18</sup>O for porewater and river water samples

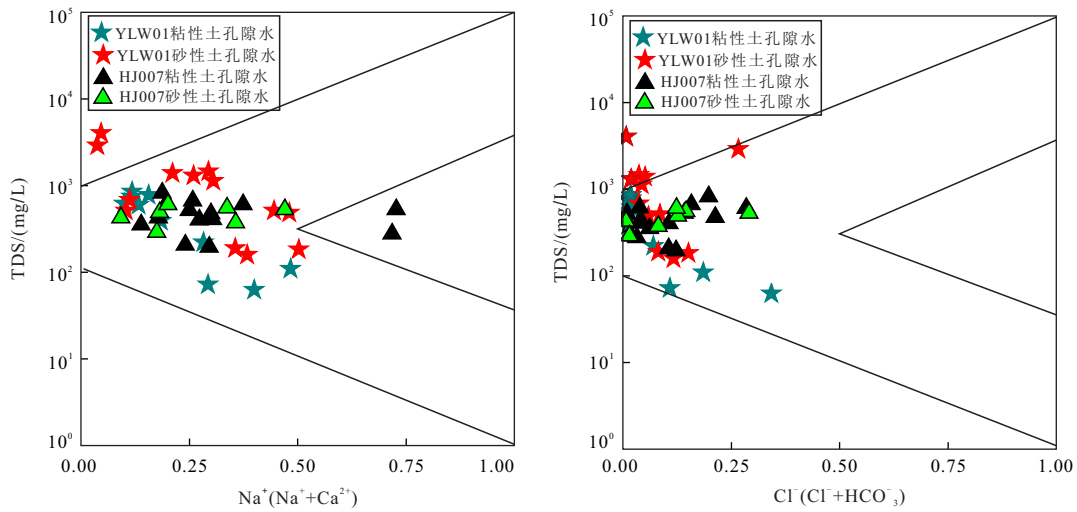


图6 孔隙水 Gibbs 图

Fig.6 Gibbs figures of porewater

表 1 孔隙水中主要组分的相关性一览表

Table 1 Correlation between main components of porewater

	YLW01				HJ007			
	TDS	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TDS	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
TDS	1	0.985**	0.970**	0.972**	1	0.721**	0.435*	0.428
Ca <sup>2+</sup>		1	0.944**	0.941**		1	0.442*	0.745**
Mg <sup>2+</sup>			1	0.937**			1	0.166
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				1				1

注: \*在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关; \*\*在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关

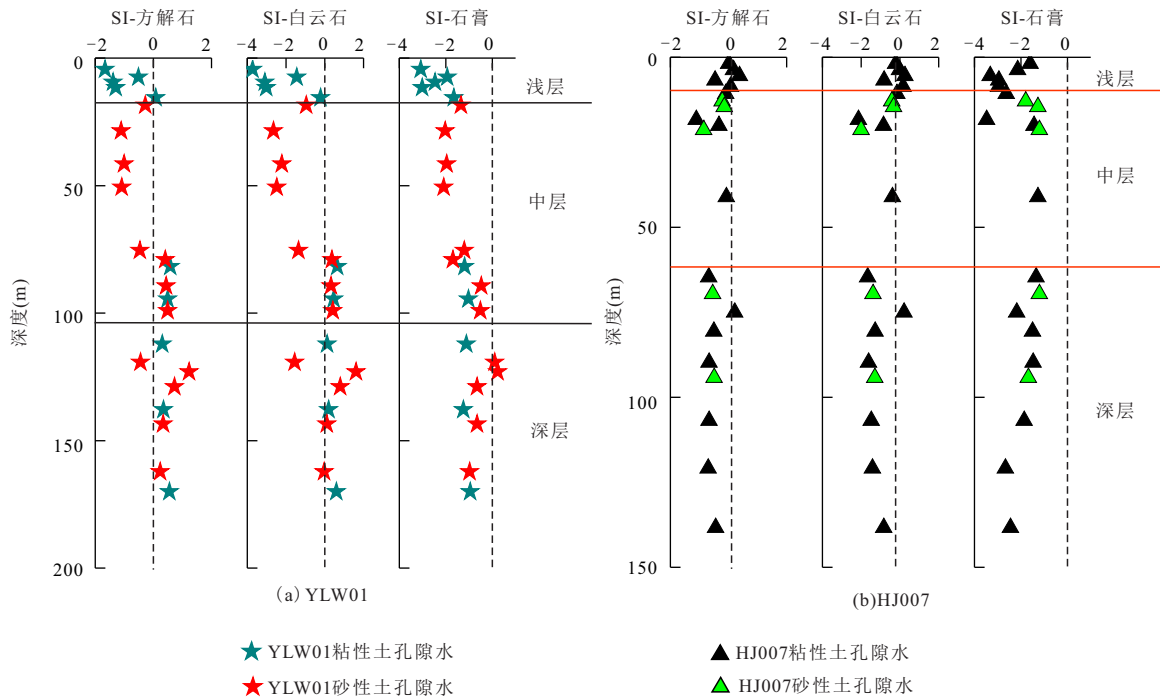


图7 孔隙水中矿物饱和度指数垂向分布

Fig.7 Mineral saturation indices in porewater versus depth

于硅酸盐的溶解和阳离子交替吸附作用所致。由孔隙水的 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)$  VS  $(Na^++Cl^-)$ 分布图(图8b)可以看出, YLW01孔孔隙水基本位于-1:1关系线附近, 表明YLW01孔除发生碳酸盐、硫酸盐的溶解沉淀外, 主要受阳离子交换作用影响(Ge *et al.*, 2017), 而HJ007孔中深层孔隙水基本位于关系线上方, 除了离子交换和碳酸盐、硫酸盐作用外, 多余的Ca、Mg来自蒙脱石和绿泥石等粘土矿物的风化溶解(Gan *et al.*, 2014)。氯碱指数(Chloro-Alkaline Indices: CAI)可以用来进一步研究孔隙水与沉积物之间发生的阳离子交换吸附作用(王恒, 2016)。氯碱指数的计算公式为:

$$CAI-1 = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-}$$

由孔隙水氯碱指数随深度变化分布图(图8c), CAI-1均为负值, 认为全区孔隙水中的 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 与沉积物中的 $Na^+$ 发生交换, YLW01孔孔隙水CAI-1的绝对值随深度变化逐渐增大, 阳离子交换作用增强, HJ007孔孔隙水CAI-1的绝对值随深度变化逐渐减小, 接近于0, 阳离子交换作用减弱。

**4.2.3 硝化作用** 该地区地下水中存在较高含量天然有机氮矿化形成的 $NH_4-N$ (Du *et al.*, 2017; 沈帅等, 2017), 若地下水中发生硝化作用, 氨氮被氧化成 $NO_3^-$ , 并释放能量, 合成有机物,  $NO_3^-$ 与TOC成

正比。由孔隙水 $NO_3^-$ 与土壤TOC关系图(图9a)易知, YLW01孔孔隙水 $NO_3^-$ 与土壤TOC没有明显的变化关系, 表明硝化反应较弱,  $NO_3^-$ 主要来源于降水, 含量较低; HJ007孔土壤TOC与孔隙水 $NO_3^-$ 对比(图9b), 两者呈现明显的正比关系, 表明孔隙水中发生了硝化作用,  $NO_3^-$ 是 $NH_3-N$ 氧化后的产物, 含量较高。

## 5 结论

(1) YLW01孔孔隙水水化学类型主要为 $Ca-HCO_3$ 、 $Ca \cdot Na-HCO_3 \cdot SO_4$ 、 $Ca-HCO_3 \cdot SO_4$ , HJ007孔孔隙水水化学类型主要为 $Ca-HCO_3$ 、 $Ca \cdot Mg-HCO_3$ 、 $Ca \cdot Mg-HCO_3 \cdot SO_4$ 。YLW01孔中深层孔隙水的TDS、 $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 含量较高, HJ007孔中深层孔隙水的 $NO_3^-$ 含量较高, 这种差异是由于YLW01孔所在的江汉平原腹地与HJ007孔所在汉江附近的沉积环境、沉积物来源和后期演变规律不同所致, 两个钻孔分别属于长江影响带和汉江影响带。

(2) 孔隙水的氦氧同位素特征, 指示其来源于大气降水, 且在降水过程中二次蒸发导致同位素分馏。浅层孔隙水受到一定程度的蒸发和不同地表水体的混合, HJ007孔浅层孔隙水受到汉江和通顺河的补给, YLW01孔受东荆河影响较小。

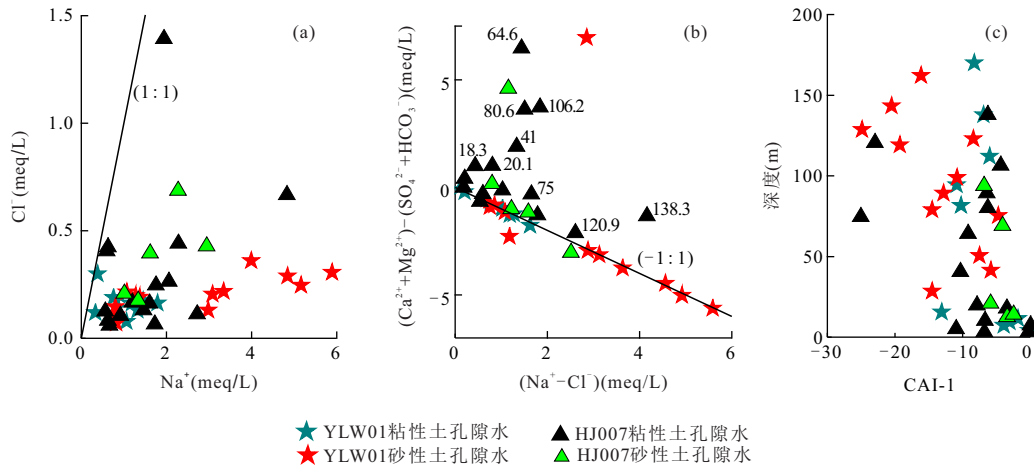
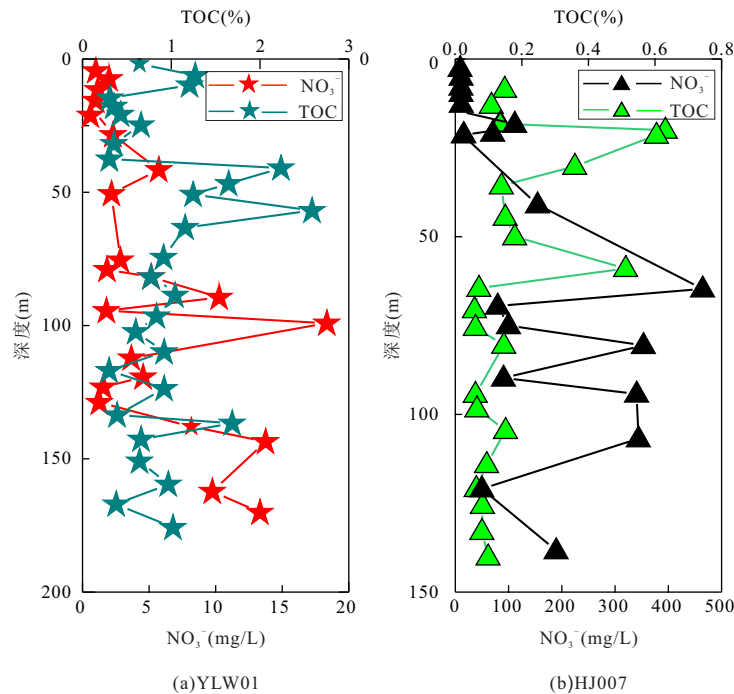


图 8 孔隙水特征离子比分布图

Fig.8 Plots of characteristic ion ratio of porewater

图 9 孔隙水  $\text{NO}_3^-$  与土壤 TOC 关系图Fig.9 Relation between  $\text{NO}_3^-$  of porewater and TOC of soil

(3) 孔隙水化学成分主要受到矿物溶解作用、阳离子交替吸附作用和硝化作用的影响。YLW01 孔主要发生石膏、白云石和方解石的溶解, 中深层石膏的大量溶解导致孔隙水 TDS、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量较高, 阳离子交替吸附作用较强, 且随深度逐渐增强, 为主控因素, 硝化作用较弱。HJ007 孔除存在石膏、白云石和方解石的溶解, 还发生含 Ca、Mg 的粘土矿物溶解, 中浅层阳离子交替吸附作用较强, 中深层阳离子交替吸附作用较弱, 但发生强烈的硝化作用导致孔隙水  $\text{NO}_3^-$  含量较高。

## References

- Chen, C., Wen, Z., Liang, X., et al., 2017. Estimation of Hydrogeological Parameters for Representative Aquifers in Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42(5): 727–733 (in Chinese with English abstract).
- Clark, I. D., Fritz, P., 2006. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Translated by Zhang, H., Zhang, X. J., CRC Press, Zhengzhou (in Chinese).
- Deng, Y. M., Wang, Y. X., Li, H. J., et al., 2015. Seasonal Variation of Arsenic Speciation in Shallow Groundwater from Endemic Arsenicosis Area in Jiangnan Plain. *Earth*



- Science*, 10(11):1876—1886 (in Chinese with English abstract).
- Duan, Y.H., Gan, Y.Q., Guo, X.X., et al., 2014. Hydrogeochemistry and Arsenic Contamination of Groundwater in the Monitoring Field, Jiangnan Plain. *Geological Science and Technology Information*, 33(2): 140—147 (in Chinese with English abstract).
- Duan, Y. H., Gan, Y. Q., Wang, Y. X., et al., 2017. Arsenic Speciation in Aquifer Sediment under Varying Groundwater Regime and Redox Conditions at Jiangnan Plain of Central China. *Science of The Total Environment*, 607—608: 992—1000.
- Du, Y., Ma, T., Deng, Y.M., et al., 2017. Sources and Fate of High Levels of Ammonium in Surface Water and Shallow Groundwater of the Jiangnan Plain, Central China. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 19(2): 161—172. <https://doi.org/10.1039/c6em00531d>
- Gan, Y.Q., Wang, Y.X., Duan, Y.H., et al., 2014. Dynamic Changes of Groundwater Arsenic Concentration in Dynamic the Monitoring Field Site, Jiangnan Plain. *Earth Science Frontiers*, 21(4):37—49 (in Chinese with English abstract).
- Gan, Y. Q., Wang, Y. X., Duan, Y. H., et al., 2014. Hydrogeochemistry and Arsenic Contamination of Groundwater in the Jiangnan Plain, Central China. *Journal of Geochemical Exploration*, 138: 81—93. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.12.013>
- Ge, Q., Liang, X., Jin, M.G., et al., 2017. Origin and Geochemical Processes of Porewater in Clay-Rich Deposits in the North Jiangsu Coastal Plain, China. *Geofluids*, (4): 1—13.
- Gibbs, R. J., 1970. Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*, 170(3962): 1088—1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- Li, H.M., Deng, Y.M., Luo, L.W., et al., 2015. Geochemistry of High Arsenic Shallow Aquifers Sediment of the Jiangnan Plain. *Geological Science and Technology Information*, 34(3): 178—184 (in Chinese with English abstract).
- Shen, S., Ma, T., Du, Y., et al., 2017. Dynamic Variations of Nitrogen in Groundwater under Influence of Seasonal Hydrological Condition in Typical Area of Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42(5): 674—684(in Chinese with English abstract).
- Shen, S., Ma, T., Du, Y., et al., 2018. The Spatial Distribution Characteristic and Genesis of Nitro-Gen of Shallow Groundwater in the East of Jiangnan Plain. *Environmental Science & Technology*, 41(2):47—56(in Chinese with English abstract).
- Wang, H., 2016. A Methodological Study on the Hydrogeochemical Characterization of Hierarchically Nested Groundwater Flow Systems(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 32—35 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.W., Zhang, C.X., Pan, Z.Z., et al., 2016. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Jiangnan Plain Groundwater. *China Environmental Science*, 36(10): 3089—3098 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., 2012. The Stable Isotope Temporal-Spatial Distribution of Modern Precipitation over East Monsoon China and Its Implication for Climate(Dissertation). Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing, 16—18(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.Y., Huang, S.B., Zhao, L., et al., 2017. Evolution of Quaternary Sedimentary Environment in Shallow Aquifers, at Shahu Area, Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42(5):751—760 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Xiao, T.Y., Li, H.B., et al., 2018. Spatial Distribution and Influencing Factors of the NO<sub>3</sub>-N Concentration in Groundwater in Jiangnan Plain. *China Environmental Science*, 38(2): 710—718 (in Chinese with English abstract).
- Yao, L. L., Wang, Y. X., Tong, L., et al., 2015. Seasonal Variation of Antibiotics Concentration in the Aquatic Environment: A Case Study at Jiangnan Plain, Central China. *Science of The Total Environment*, 527—528: 56—64.
- Yu, H. T., Ma, T., Du, Y., et al., 2017. Hydrochemical Characteristics of Shallow Groundwater in Eastern Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42(5): 685—692 (in Chinese with English abstract).
- Yu, K., 2016. The Sources and Influences of Dissolved Organic Matter on Temporal Variations of Groundwater Arsenic Concentrations: A Case Study in Jiangnan Plain (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. W., Liang, X., Ge, Q., et al., 2017. Calculation Method about Hydraulic Conductivity of Quaternary Aquitard in Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42(5):761—770(in Chinese with English abstract).
- Zhao, W., 2017. Study on the Isotopes and Moisture Source in Precipitation in the Shule River Basin(Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou, 45—49(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Wang, Y. X., Zwahlen, F., et al., 2011. Organochlo-

- rine Pesticide Residues in the Environment of Central Jianghan Plain, China. *Environmental Forensics*, 12(1): 106–119. <https://doi.org/10.1080/15275922.2010.547546>
- Zhou, Y., Wang, Y. X., Li, Y. L., et al., 2012. Hydrogeochemical Characteristics of Central Jianghan Plain, China. *Environmental Earth Sciences*, 68(3): 765–778. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1778-9>
- 附中文参考文献**
- 陈晨, 文章, 梁杏, 等, 2017. 江汉平原典型含水层水文地质参数反演. *地球科学*, 42(5): 727–733.
- Clark, I.D., Fritz, P., 2006. 水文地质学中的环境同位素. 张慧, 张新基, 译, 郑州: 黄河水利出版社, 28–60.
- 邓娅敏, 王焰新, 李慧娟, 等, 2015. 江汉平原砷中毒病区地下水砷形态季节性变化特征. *地球科学*, 40(11): 1876–1886.
- 段艳华, 甘义群, 郭欣欣, 等, 2014. 江汉平原高砷地下水监测场水化学特征及砷富集影响因素分析. *地质科技情报*, 33(2): 140–147.
- 甘义群, 王焰新, 段艳华, 等, 2014. 江汉平原高砷地下水监测场砷的动态变化特征分析. *地学前缘*, 21(4): 37–49.
- 李红梅, 邓亚敏, 罗莉威, 等, 2015. 江汉平原高砷含水层沉积物地球化学特征. *地质科技情报*, 34(3): 178–184.
- 沈帅, 马腾, 杜尧, 等, 2017. 江汉平原典型地区季节性水文条件影响下氮的动态变化规律. *地球科学*, 42(5): 674–684.
- 沈帅, 马腾, 杜尧, 等, 2018. 江汉平原东部浅层地下水氮的空间分布特征. *环境科学与技术*, 41(2): 47–56.
- 王恒, 2016. 基于水化学演化规律的盆地地下水循环研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学, 32–35.
- 王建伟, 张彩香, 潘真真, 等, 2016. 江汉平原地区地下水中有有机磷农药的分布特征及影响因素. *中国环境科学*, 36(10): 3089–3098.
- 王涛, 2012. 中国东部季风区区域降水稳定同位素的时空分布特征及其气候意义(硕士学位论文). 南京: 南京信息工程大学, 16–18.
- 王妍妍, 黄爽兵, 赵龙, 等, 2017. 江汉平原沙湖地区浅层含水层第四纪沉积环境演化. *地球科学*, 42(5): 751–760.
- 杨静, 肖天昀, 李海波, 等, 2018. 江汉平原地下水中硝酸盐的分布及影响因素. *中国环境科学*, 38(2): 710–718.
- 於昊天, 马腾, 邓娅敏, 等, 2017. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征. *地球科学*, 42(5): 685–692.
- 于凯, 2016. 高砷地下水系统中有机质来源及其对砷动态变化的影响研究—以江汉平原为例(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 张婧玮, 梁杏, 葛勤, 等, 2017. 江汉平原第四系弱透水层渗透系数求算方法. *地球科学*, 42(5): 761–770.
- 赵玮, 2017. 疏勒河流域大气降水同位素特征及水汽来源研究(博士学位论文). 兰州: 兰州大学, 45–49.