doi:10.3799/dqkx.2017.056

江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征

於昊天[1,2],马 腾[1,2*],邓娅敏[3],杜 尧[1,2],沈 帅[1,2],鲁宗杰[3]

1.中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北武汉 430074
2.中国地质大学环境学院,湖北武汉 430074
3.中国地质大学地质调查研究院,湖北武汉 430074

摘要:浅层地下水是江汉平原东部地区重要的供水水源,但面临着污染及天然水质异常等问题.基于水化学与氢氧同位素结果,并运用数理统计和因子分析等方法,查明了研究区浅层地下水的化学特征、控制过程以及影响因素.结果显示,浅层地下水的化学类型主要为 HCO_3-Ca 型;其中潜水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量与承压水接近,Fe、As 和 NH_4^+ 含量低于承压水,而 Cl^-、SO_4^{2-}、Mn 和 NO_3^- 含量高于承压水.浅层地下水主要为大气降水补给,其中潜水经历了一定程度的蒸发以及与地表水的混合.在影响浅层地下水化学特征的因素中,地质成因在总体上可能起主导作用;人类活动的输入显著地改变着潜水的化学特征,而浅层承压水则主要受径流过程中水-岩相互作用的影响.

关键词:江汉平原东部;浅层地下水;水化学;因子分析;离子比值法;水文地质.

中图分类号:P64 **文章编号:**1000-2383(2017)05-0685-08 **收稿日期:**2017-01-15

Hydrochemical Characteristics of Shallow Groundwater in Eastern Jianghan Plain

Yu Haotian[1,2], Ma Teng[1,2*], Deng Yamin[3], Du Yao[1,2], Shen Shuai[1,2], Lu Zongjie[3]

1.*State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
2.*School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
3.*Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: The shallow groundwater is an important water supply source in the eastern Jianghan plain, but it is confronted with pollution and inferior quality of natural water. This study identifies the chemical characteristics, control processes and influencing factors of shallow groundwater in the study area based on the results of water chemistry, hydrogen and oxygen isotope, using methods of mathematical statistics and factor analysis. Results show that the shallow groundwater chemical types are mainly HCO_3-Ca, the contents of Ca^{2+} and Mg^{2+} in the phreatic water are close to those in confined water, the contents of the As, Fe, NH_4^+ are lower than those in confined water, but the contents of the Cl^-, SO_4^{2-}, Mn and NO_3^- are higher than those in confined water. The shallow groundwater mainly originates from precipitation and the phreatic water has experienced a degree of evaporation and the mixture of surface water. Among the influencing factors of shallow groundwater chemical characteristics, the geologic origin may play a leading role; human activities have dramatically changed the chemical characteristics of the phreatic water, and the shallow confined water is mainly affected by water-rock interaction of the runoff process.

Key words: eastern Jianghan plain; shallow groundwater; hydrochemistry; factor analysis; ion ratio method; hydrogeology.

江汉平原是我国重要的商品棉、粮、油基地,也是人口最为集中的地区之一.地下水是当地工业、农业以及居民生活用水的重要供水水源.然而,随着城镇化进程的加快以及人类活动的加剧,当地地下水

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.41372252);国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题(No.2012ZX07204-003-04).

作者简介:於昊天(1991-),男,博士,主要从事地下水污染与防治、水文地球化学等方面的科研工作.ORCID:0000-0002-2412-3959.E-mail:tiantian12132@163.com
* **通讯作者:**马腾,ORCID:0000-0003-2827-9579.E-mail:mateng@cug.edu.cn

引用格式: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.

的水质开始呈现恶化趋势(邓娅敏等,2015;龚香宜等,2015).此外,作为一种天然的地下水水质异常,高砷地下水在仙桃、洪湖等地被陆续发现(郝华勇,2007;汪爱华和赵淑军,2007).这些水质安全问题在靠近武汉城市圈的江汉平原东部地区十分突出.

近年来,学者们在江汉平原开展了大量的地下水研究工作,主要集中于地下水资源分布(王学雷等,2006)、地下水化学特征(Zhou *et al*.,2012;朱芳冰等,2015)与地下水动态监测(Gan *et al*.,2014)等方面.由于大数据的限制,目前尚未有学者对该地区地下水化学进行统计学分析,对地下水演化过程与规律的认识仍显不足.在研究方法中,因子分析可以通过较少的代表性组合变量来表征多变量的组合,并以此来探讨影响地下水化学组成的主要因子(Liu *et al*.,2003);数理统计及离子比值法可用于探讨地下水成因及水文地球化学演化过程(Nosrati and Eeckhaut,2011;郭华明等,2013).

本文以江汉平原东部地区为研究区,在分析浅层潜水和承压水化学特征的基础上,运用数理统计、离子比值和因子分析等方法,查明浅层地下水水化学的控制过程,并结合土地利用类型以及补径排特征来分析浅层地下水化学的主要影响因素,为当地地下水的开发利用提供理论指导.

1　研究区概况

江汉平原位于长江中游,湖北省中南部,西起宜昌枝江,东迄武汉,北自荆门钟祥,南与洞庭平原相连,主要地区包括荆州、仙桃、潜江和天门四个市,并涵盖武汉、孝感、荆门和宜昌周边部分地区.

研究区位于江汉平原东部,主要为仙桃市和洪湖市东部,南以长江为界,北接汉水与天门、汉川为界,由北至南覆盖脉旺咀幅、彭场镇幅、杨林尾福和陆溪口幅 4 个 1∶5 万标准图幅(图 1),地理坐标为北纬 29°50′～30°30′,东经 113°30′～113°45′.研究区属于亚热带季风气候区,多年平均气温为 16.8 ℃,全区降水丰富,多年平均降水量为 1 208 mm 左右,主要集中于 5～8 月份,年平均蒸发量为 1 379 mm 左右,主要集中于 6～8 月份.汉江、通顺河、东荆河、内荆河和长江是流经研究区的主要地表水系,也是控制研究区地下水补给、径流与排泄的重要因素.地势总体西北高、东南低,坡度为 1°～3°.研究区覆盖层主要为第四系沉积物,第四系厚度在图幅沉积中心超过200 m,出露地层主要为全新统郭河组,第四系的岩性主要为粘土、亚

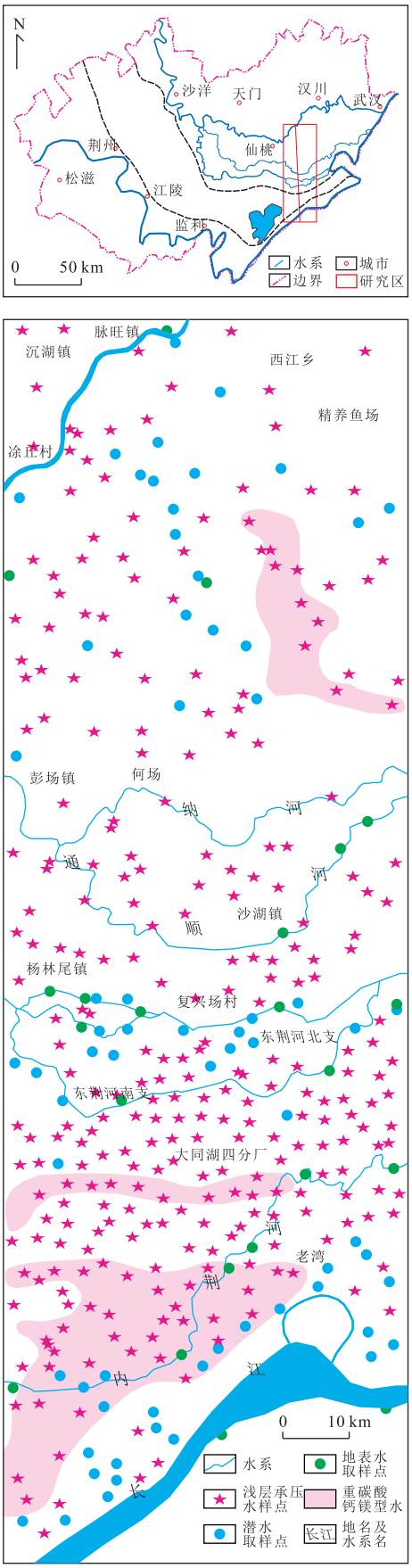

图 1　研究区在江汉平原位置

Fig.1　Location of the study area in the Jianghan plain

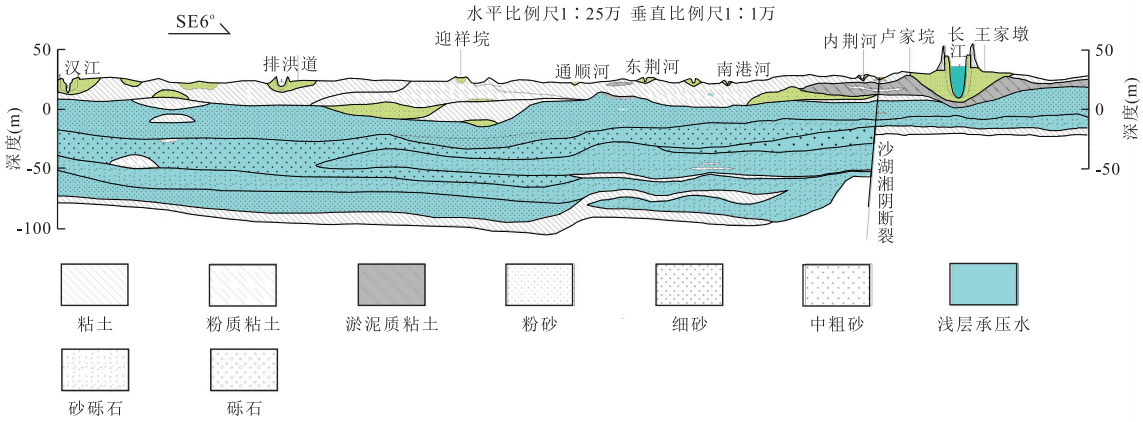

图 2　江汉平原研究区水文地质剖面

Fig.2　Hydrogeological profile of the study area in the Jianghan plain

砂土、粉砂、细砂及砂砾石.

根据图 2 可知,研究区含水系统包括全新统孔隙潜水含水系统和上、中更新统孔隙承压含水系统.浅层孔隙潜水含水系统岩性主要为粘土、亚粘土、亚砂土以及淤泥质粘土等,透水性较差,水位埋深为 1～2 m,局部地区与地表水联系紧密,其水位、水温和水质受地表水影响较大.上、中更新统孔隙承压水含水系统岩性主要为粉砂、砂和砂砾石,沉积相由上至下从河漫滩相过渡为河流冲积相,出现多个沉积旋回.含水层由北往南厚度变薄,水位埋深一般为 1～3 m,水量丰富,是研究区内主要的取水层位.

2　样品采集与测试

本研究分别于 2014 年 8 月和 2015 年 7 月在研究区进行了水样采集工作,共采集地下水样 409 件,所有采集的地下水样均取自深度为 1～40 m 的敞口井、民用手压井及机井,其中 102 件为潜水样品,307 件为浅层承压水样品.

在现场,采用 HACH 双通道多参数水质分析仪 HQ40D 测定 pH、电导率、温度、氧化还原电位和溶解氧;采用 HACH DR2800 测定 NH_4^+ 含量;取 500 mL 未过滤的水样冷藏保存,于 24 h 内采用盐酸滴定法测定碱度.其余指标在实验室内进行测试分析,主要有:常规阳离子、常规阴离子、总砷以及氢氧同位素.处理手段为:水样取出后经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤后去除水样中的颗粒物和悬浮物,其中阴离子样过滤后直接装入 50 mL 聚乙烯瓶低温保存,在室内利用离子色谱仪(Dionex 1000)分析,最低检出浓度为 0.01 mg/L;阳离子样过滤后装入 50 mL聚乙烯瓶,加入浓 HNO_3 使其 pH 值小于 2 后低温保存,室内利用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-AES,Thermo IRIS Intrepid II XSP)测定,最低检出浓度为 0.001 mg/L;用于地下水砷含量分析的水样加入浓 HCl 酸化保存,且取样瓶外侧用锡箔纸包裹进行避光,室内利用氢化物发生－原子荧光光度计(吉天 AFS-930)测定,最低检出浓度为 0.01 μg/L;氢氧同位素直接装入 50 mL 聚乙烯瓶中,瓶中不留气泡,室内利用水同位素仪(LGR/美国 IWA-45EP)测定,精度为 0.01‰.所有测试工作在中国地质大学(武汉)地质调查研究院完成,为保证评价结果的可靠性,选取阴阳离子平衡相对误差小于 5%的样品用于分析.

3　结果与讨论

3.1　地下水化学特征

地下水化学特征及其演化规律研究是建立在对有关水化学参数进行描述统计分析的基础上完成的,数理统计分析的结果可以反映研究区最近一段时间内地下水组分的基本情况.因此,对地下水的 pH 值、溶解性总固体(TDS)和常规离子等水化学参数进行特征值分析(表 1).

由表 1 可知,研究区浅层地下水为中性环境,pH 值为 6.14～7.77,在潜水和浅层承压水中该指标的变异系数分别为 0.04 和 0.01,为各项统计指标中变异系数最小者,表明研究区内地下水的 pH 值相对稳定.TDS含量为187～1082mg/L,潜水的变异

表 1　浅层地下水水化学指标的统计结果

Table 1　Mathematical statistic results of geochemistry of shallow groundwater

参数	单位	潜水				浅层承压水				GB5749-2006
		极小值	极大值	均值	变异系数	极小值	极大值	均值	变异系数	
pH		6.14	7.72	6.83	0.04	6.39	7.77	6.91	0.01	6.5～8.5
TDS	mg/L	270.00	1 082.00	578.00	22.00	187.00	877.00	465.00	4.34	1 000
K^+	mg/L	0.47	43.00	5.27	0.88	0.51	14.60	1.73	0.07	—
Na^+	mg/L	4.92	138.60	31.40	3.29	2.12	81.00	19.80	0.47	—
Ca^{2+}	mg/L	53.90	235.50	146.00	4.45	22.90	205.00	121.00	1.13	—
Mg^{2+}	mg/L	14.40	60.30	27.30	1.09	7.20	45.30	25.20	0.35	—
Cl^-	mg/L	0.29	140.00	30.10	3.93	0.00	293.00	4.57	1.01	250
SO_4^{2-}	mg/L	0.00	209.00	60.30	6.56	0.00	24.60	1.55	0.18	250
HCO_3^-	mg/L	206.00	907.00	534.00	16.70	171.00	909.00	582.00	5.37	—
As	μg/L	0.00	52.30	8.20	1.89	0.00	1 015.00	45.70	4.62	10
Fe	mg/L	0.00	11.30	1.16	0.30	0.01	32.20	5.60	0.26	0.3
Mn	mg/L	0.00	6.49	0.93	0.16	0.02	4.55	0.52	0.04	0.1
NH_4^+	mg/L	0.01	6.35	0.52	0.18	0.04	19.70	2.59	0.17	0.5
NO_3^-	mg/L	0.00	298	24.6	6.34	0.00	62.60	0.48	0.21	10
δD	‰	−48.90	−23.50	−34.90	1.67	−54.80	−31.00	−46.50	0.35	—
$\delta^{18}O$	‰	−7.67	−3.22	−5.70	0.28	−8.61	−4.60	−7.34	0.05	—
总硬度（以 $CaCO_3$）	mg/L	195.00	748.00	479.00	14.30	113.00	695.00	408.00	3.70	450

系数为 22.0，明显高于浅层承压水的变异系数 4.34，表明 TDS 含量的空间变异性在潜水中更大.

研究区内浅层地下水化学类型主要为 HCO_3-Ca型，浅层承压水中 HCO_3-Ca·Mg 型水主要分布在长江和汉江附近呈带状分布.潜水中最主要的阳离子为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}，其毫克当量百分数平均值分别为 66.95%和 20.58%；HCO_3^- 为主要的阴离子，其毫克当量百分数平均值为 82.41%.浅层承压水中最主要的阳离子为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}，其毫克当量百分数平均值分别为 66.92%和 23.10%；主要的阴离子为 HCO_3^-，其毫克当量百分数平均值为 98.48%.潜水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量与浅层承压水接近，暗示了共同的来源，来源可能为方解石和白云石的溶解；潜水中的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量远高于浅层承压水，主要是因为潜水处于近地表，更易被人类活动影响.

Fe、Mn 和 As 等重金属元素在潜水中的平均浓度分别为 1.16 mg/L、0.93 mg/L 和 8.20 μg/L，而在承压水中分别为 5.60 mg/L、0.52 mg/L 和45.73 μg/L.潜水中 Fe 和 As 含量显著低于承压水，而 Mn 含量稍高于承压水.氨氮、硝态氮含量分别在浅层承压水、潜水中较高，均值分别为 2.59 mg/L 和24.6 mg/L，这种差异应主要受氧化还原环境所控制.

3.2　氢氧同位素特征

为研究地下水、地表水与大气降水的关系，笔者将地下水与地表水中$\delta^{18}O$和δD关系绘制成图3，由于缺少研究区大气降水线，采用武汉的大气降水线$y=7.96x+5.10$(Gan *et al*.,2014).由图 3 可知，潜水和浅层承压水中 $\delta^{18}O$ 变化范围为−8.50‰～−3.16‰ 和 −8.61‰～ −4.60‰，平均值分别为−5.77‰和−7.30‰；δD 变化范围为−55.80‰ ～−23.51‰和−54.87‰～−31.01‰，平均值分别为−35.80‰和−46.32‰.潜水和浅层承压水位于大气降水线的左上方，地表水位于大气降水线附近，表明地表水和浅层地下水的来源均为大气降水.通过分析研究区主要河流以及地表水的氢氧同位素特征可

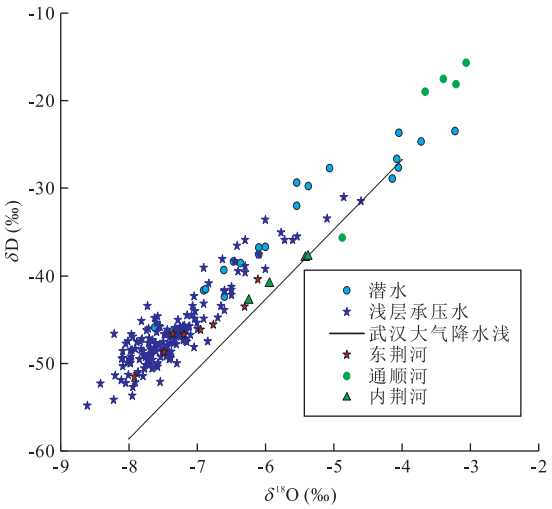

图 3　氢氧同位素特征

Fig.3　Hydrogen and oxygen isotope characteristics

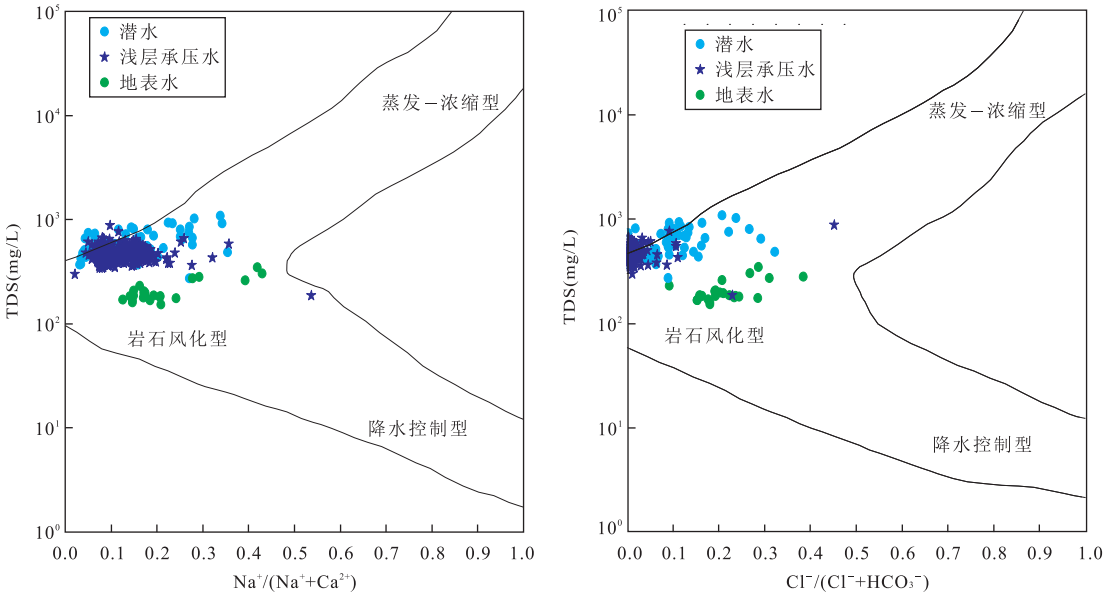

图 4　研究区内采样点的吉布斯(Gibbs)图

Fig.4　Gibbs figures of the samples in the study area

表 2　旋转成分矩阵

Table 2　Rotated component matrix

指标	潜水			浅层承压水			
	F_1	F_2	F_3	F_1	F_2	F_3	F_4
TDS	0.945	−0.121	0.292	0.973	0.095	0.158	0.022
K^+	0.065	−0.024	0.874	−0.214	0.808	0.075	0.041
Na^+	0.688	−0.408	0.288	0.305	−0.241	0.779	0.199
Ca^{2+}	0.927	0.003	−0.183	0.907	0.151	−0.120	−0.002
Mg^{2+}	0.793	0.036	0.359	0.679	−0.132	0.300	−0.229
Cl^-	0.595	−0.577	0.247	−0.089	0.231	0.871	−0.069
SO_4^{2-}	0.704	−0.473	0.321	0.043	−0.117	0.086	0.508
HCO_3^-	0.828	0.440	−0.127	0.973	0.105	−0.021	0.002
NH_4^+	0.073	0.864	−0.164	0.284	0.797	−0.084	−0.132
NO_3^-	0.227	−0.195	0.771	0.048	0.200	−0.032	0.671
Fe	0.102	0.902	−0.245	0.185	0.864	0.030	−0.007
Si	−0.240	0.732	0.226	0.277	0.133	0.025	−0.758
方差贡献率(%)	37.657	25.541	16.724	29.330	18.986	12.643	11.656
累计方差贡献率(%)	37.657	63.198	79.922	29.330	48.316	60.959	72.615

知,通顺河相对于其他两条河流更富集重同位素,内荆河水样点大致落于大气降水线附近,东荆河水样点位于浅层承压水中,表明通顺河水与潜水相互作用密切,东荆河水与浅层承压水的相互作用密切,而内荆河与浅层地下水的相互作用不明显.浅层地下水氢氧同位素值域与地表水接近,其中潜水相比于浅层承压水更富集重同位素,表明其受到一定程度的蒸发作用.

3.3　水化学控制过程

地下水化学成分是地下水在流动过程中经过漫长的地质历史时期形成的,主要受到地下水所流经区域地质环境的影响(Boateng *et al*.,2016),通过离子比值法可以了解地下水化学特征形成的主要作用及影响因素(Zhou *et al*.,2012).

Gibbs 图可以较直观地反映出地下水主要组分是“降水控制类型”、“矿物风化类型”或是“蒸发－浓缩类型”,是定性分析地下水化学成因的一种重要手段(王亚平等,2010).本研究大部分水样点分布在 Gibbs 图左侧中部(图 4),地下水样 TDS 含量中等(约 500 mg/L)而 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 或者 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 比值小于 0.5,说明浅层地下水离子主要来源于矿物的风化水解,在影响浅层地下水

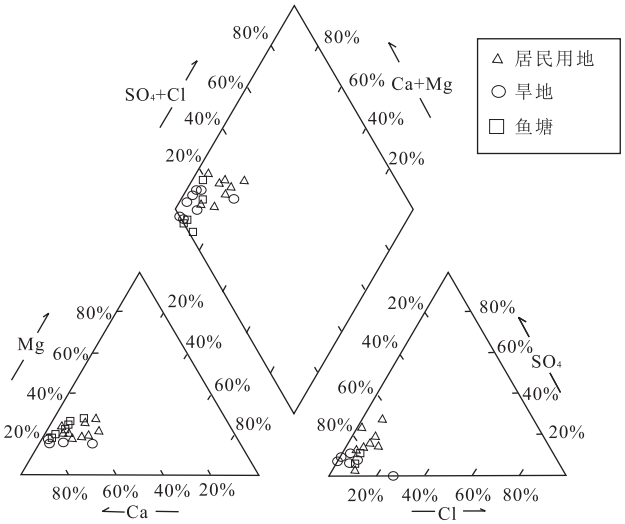

图 5　不同土地利用类型下潜水的 Piper 三线图

Fig.5　The Piper diagram of preatic water in the different landuse types

化学特征的因素中，地质成因起主导作用.

地下水中的可溶离子主要来源于沉积物及土壤中矿物的风化水解作用、人类活动以及大气降水的输入.因子分析方法可以在损失较少信息的基础上对水化学指标进行综合分析(李俊霞等，2010；吴春勇等，2011)，有效地揭示各项指标的内在联系和水化学特征的形成规律(Nosrati and Eeckhaut，2011；Tlili-Zrelli *et al*.，2012)，提取出影响地下水水化学的形成作用机制.本研究通过软件 IBM SPSS Statistics 19.0 对浅层地下水中 TDS、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、HCO_3^-、SO_4^{2-}、NH_4^+、NO_3^-、Fe 和 Si 等 12 个指标进行主成分法的因子分析.为更好地解释各个因子的实际含义，对各因子用最大方差法进行旋转，得到旋转后的因子载荷矩阵(表 2).

通过因子分析，共提取 3 个公因子：(1)公因子 F_1，潜水和浅层承压水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 和 TDS 的载荷较大，该因子贡献率分别占 37.657%和 29.330%，在各因子中贡献最大；该因子主要反映白云石和方解石矿物溶解对水化学组分的影响，同时 TDS 在该因子中的载荷相对于其他因子较大，说明该因子是控制研究区地下水化学的主要因素；(2)公因子 F_2，潜水中 Fe、NH_4^+ 和 Si 载荷较大，浅层承压水中除了 Fe 和 NH_4^+ 载荷较大外，K^+ 的载荷也较大；该因子主要反映为含铁及硅酸盐矿物的溶解，氨氮的来源主要是有机物；(3)公因子 F_3，潜水中 K^+ 载荷较大，NO_3^- 也表现出一定的载荷，而浅层承压水中 Na^+ 和 Cl^- 的载荷较大，该因子主要反映为人类活动的输入.

3.4　影响地下水化学的主要因素

江汉平原地区地势平坦，由西向东缓倾，水流滞缓，平均水力梯度在万分之一左右.研究区主要以农业和渔业为主，不同的土地利用方式潜在地影响着潜水的水化学特征.研究区内的土地利用类型主要包括鱼塘、旱地以及居民用地.从图 5 可以看出，旱地的潜水水化学类型全部为 HCO_3-Ca，鱼塘附近潜水水化学类型表现为 HCO_3-Ca 和 HCO_3-Ca·Mg 各占 50%，居民用地的潜水水化学类型表现为 HCO_3-Ca 和 HCO_3-Ca·Mg 分别占 75%和 25%.

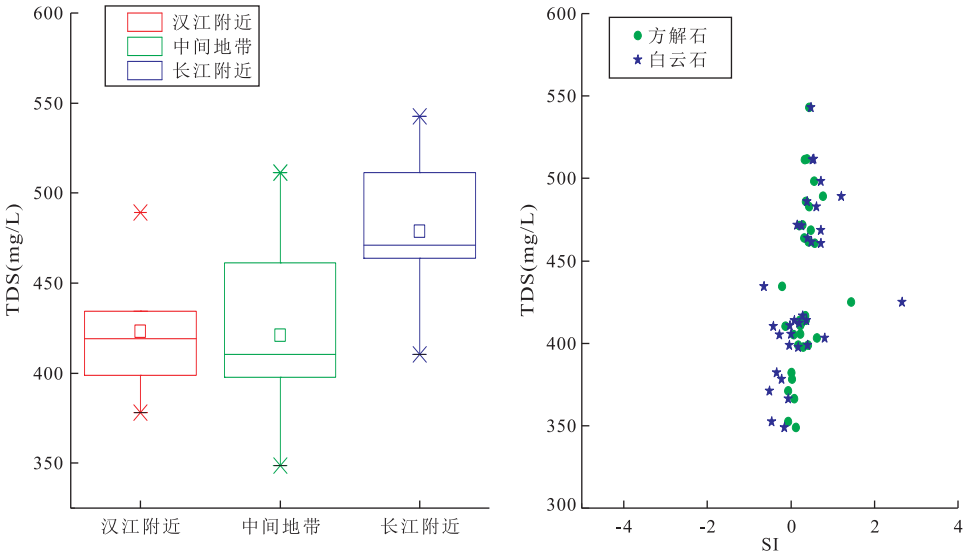

图 6　纵向剖面上 TDS 变化图及与饱和指数 SI 关系

Fig.6　TDS with the change of SI in the longitudinal section

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在 3 种不同土地利用类型条件下的含量相差不大，说明碳酸盐溶解过程未体现出区域差异性.而居民生活区的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量明显高于鱼塘和旱地，体现了生活垃圾淋滤对潜水水化学的影响.

浅层承压水在流动的过程中，水化学会发生一系列的变化，由于浅层承压水与潜水之间存在隔水层，其化学特征主要与流经含水层介质的性质有关，受土地利用类型的影响较小.饱和指数 SI 在水文地球化学领域是一个很重要的参数，经常用于识别地下水中一些常见矿物成分的饱和程度.本研究通过地球化学模型软件 PHREEQC 对白云石和方解石的饱和指数进行了分析计算，并利用研究区靠近汉江、长江以及两者之间河间地块部分的浅层承压水的饱和指数 SI 值及 TDS 值来分析影响浅层承压水的主要因素.

研究区浅层承压地下水的流向为汉江至长江，总体为自西北流向东南.通过分析研究区剖面（A-A'）附近浅层承压水 TDS 的变化趋势以及与饱和指数 SI 值的关系（图 6）可知：白云石和方解石的 SI 值范围分别为－0.64～2.67 和－0.21～1.44，平均值为 0.28 和 0.31，说明白云石和方解石在浅层承压水中处于动态饱和状态；地下水 TDS 值随着白云石和方解石饱和指数 SI 值的增大而增加，且从汉江至长江，地下水 TDS 值随着地下水流向增加.此结果表明白云石和方解石矿物的溶解是影响区内浅层承压水水化学组成的主要因素.

4　结论

（1）江汉平原东部地区浅层地下水的水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型，浅层承压水中 HCO_3-Ca・Mg型水主要分布在长江以及汉江附近呈带状分布.通过分析地表水及浅层地下水化学特征可知，潜水水质受地表水及人类活动影响较大，空间变异性较强.浅层潜水中溶解性总固体、总硬度、氯离子、硫酸盐、硝酸盐和锰含量明显高于浅层承压水，而铁、氨氮以及砷含量低于浅层承压水.

（2）地下水与地表水氢氧同位素表征，浅层地下水的来源为大气降水，且与地表水相互作用强烈.潜水相对浅层承压水靠近地表，蒸发作用更为强烈，导致更富集重同位素.研究区主要河流中，通顺河水与潜水相互作用密切，东荆河水与浅层承压水的相互作用密切，而内荆河与浅层地下水的相互作用不明显.

（3）离子比值分析表明，在影响浅层地下水化学特征的因素中，地质成因在总体上可能起主导作用.而进一步的因子分析提取出了 3 个公因子，分别代表白云石和方解石矿物溶解、含铁及硅酸盐矿物的溶解和人类活动的输入，指示了多重因素对浅层地下水水化学的影响.基于不同土地利用类型下潜水水化学的差异，以及承压水 TDS 和饱和指数沿地下水流向的变化规律，可知：人类活动显著地改变着潜水的化学特征，特别是居民用地的生活垃圾；而影响浅层承压水水化学组成的主要因素为白云石和方解石矿物的溶解.

References

Boateng, T. K., Opoku, F., Acquaah, S. O., et al., 2016. Groundwater Quality Assessment Using Statistical Approach and Water Quality Index in Ejisu-Juaben Municipality, Ghana. *Environmental Earth Sciences*, 75(6): 1－14. doi:10.1007/s12665－015－5105－0

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 Jianghan Plain. *Earth Science*, 40(11): 1876－1886 (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 Jianghan Plain, Central China. *Journal of Geochemical Exploration*, 138(3): 81－93. doi: 10.1016/j.gexplo.2013.12.013

Gong, X.Y., Sun, Y.L., He, Y.Z., et al., 2015. Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in the Groundwater of Jianghan Plain. *Geological Science and Technology Information*, 34(1): 210－215 (in Chinese with English abstract).

Guo, H.M., Guo, Q., Jia, Y.F., et al., 2013. Chemical Characteristics and Geochemical Processes of High Arsenic Groundwater in Different Regions of China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(3): 83－96 (in Chinese with English abstract).

Hao, H.Y., 2007. Research on Rural Drinking Water Safety in the Jianghan Plain. *China Rural Water and Hydropower*, 3(7): 31－35 (in Chinese with English abstract).

Li, J.X., Su, C.L., Xie, X.J., et al., 2010. Application of Multivariate Statistical Analysis to Research the Environment of Groundwater: A Case Study at Datong Basin, Northern China. *Geological Science and Technology Information*, 29(6): 94－100 (in Chinese with English abstract).

Liu, C.W., Lin, K.H., Kuo, Y.M., 2003. Application of Factor

Analysis in the Assessment of Groundwater Quality in a Blackfoot Disease Area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313(1－3): 77－89. doi: 10.1016/s0048－9697(02)00683－6

Nosrati, K., van den Eeckhaut, M. V. D., 2011. Assessment of Groundwater Quality Using Multivariate Statistical Techniques in Hashtgerd Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 65(1): 331－344. doi: 10.1007/s12665－011－1092－y

Tlili-Zrelli, B., Hamzaoui-Azaza, F., Gueddari, M., et al., 2012. Geochemistry and Quality Assessment of Groundwater Using Graphical and Multivariate Statistical Methods, a Case Study: Grombalia Phreatic Aquifer (Northeastern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 6(9): 3545－3561. doi: 10.1007/s12517－012－0617－3

Wang, A. H., Zhao, S. J., 2007. Survey of Endemic Arsenic Poisoning Areas in Xiantao City, Hubei Province. *China Tropical Medicine*, 7(8): 1486－1487 (in Chinese with English abstract).

Wang, X. L., Lü, X. G., Ren, X. Y., 2006. Comprehensive Evaluation on Wetland Water System and Water Resources Management in the Jianghan Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 26(3): 311－315 (in Chinese with English abstract).

Wang, Y. P., Wang, L., Xu, C. X., et al., 2010. Hydro-Geochemistry and Genesis of Major Ions in the Yangtze River, China. *Geological Bulletin of China*, 29(2/3): 446－456 (in Chinese with English abstract).

Wu, C. Y., Su, X. S., Guo, J. M., et al., 2011. Multivariate Statistical Analysis of Hydrogeochemical Evolution of Groundwater in Cretaceous Aquifer Ordos Desert Plateau. *Global Geology*, 30(2): 244－253 (in Chinese with English abstract).

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. doi: 10.1007/s12665－012－1778－9

Zhu, F. B., Zhou, H., Liu, R., 2015. Geochemical Characteristics and Origin of Formation Water in Western Depression, Liaohe Basin. *Earth Science*, 40(11): 1870－1875 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

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.

龚香宜，孙云雷，何炎志，等，2015.江汉平原地下水中有机氯农药的残留及分布特征.地质科技情报，34(1)：210－215.

郭华明，郭琦，贾永锋，等，2013.中国不同区域高砷地下水化学特征及形成过程.地球科学与环境学报，35(3)：83－96.

郝华勇，2007.江汉平原农村饮用水安全问题研究.中国农村水利水电，3(7)：31－35.

李俊霞，苏春利，谢先军，等，2010.多元统计方法在地下水环境研究中的应用——以山西大同盆地为例.地质科技情报，29(6)：94－100.

汪爱华，赵淑军，2007.湖北省仙桃市地方性砷中毒病区水砷调查与分析.中国热带医学，7(8)：1486－1487.

王学雷，吕宪国，任宪友，2006.江汉平原湿地水系统综合评价与水资源管理探讨.地理科学，26(3)：311－315.

王亚平，王岚，许春雪，等，2010.长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因.地质通报，29(2/3)：446－456.

吴春勇，苏小四，郭金淼，等，2011.鄂尔多斯沙漠高原白垩系地下水水化学演化的多元统计分析.世界地质，30(2)：244－253.

朱芳冰，周红，刘睿，2015.辽河盆地西部凹陷稠油分布区地层水化学特征.地球科学，40(11)：1870－1875.