常州市地下水化学特征与成因分析

苏东[1,2)],龚绪龙[1,2)],杨磊[1,2)],黄敬军[1,2)],许书刚[1,2)],龚亚兵[1,2)],崔龙玉[1,2)]

1) 江苏省地质调查研究院,南京,210049;

2) 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室,南京,210049

www.geojournals.cn/georev

内容提要:常州市是长江三角洲地区典型的工业化城市,多年来的快速发展对地下水环境产生了系列影响,地下水化学组分受到天然条件和人为活动的双重因素控制,现状地下水化学成因和影响因素亟需深入研究。本文在地下水赋存条件分析的基础上,综合采用统计分析、离子比值、主成分分析法对常州各层地下水化学特征和成因开展分析。结果表明,区域潜水水化学类型以 HCO_3^-—Ca^{2+} · Mg^{2+}、HCO_3^-—Ca^{2+} 和 HCO_3^- · Cl^-—Na^+ · Ca^{2+} 型为主,第Ⅰ承压水以 HCO_3^-—Na^+ · Ca^{2+} 和 HCO_3^-—Ca^{2+} 型为主、第Ⅱ承压水以 HCO_3^-—Na^+ · Ca^{2+} 型为主。从浅层至深层,地下水的碱性逐渐增强,ρ(TDS)均值降低,水化学类型由多元向单一转变。地下水化学组分主要受矿物溶解、阳离子交替吸附和人类活动共同影响。其中,潜水和第Ⅰ承压水化学成因主要受控于碳酸盐、硅酸盐、蒸发岩盐和硫酸盐矿物溶解作用,且二者受人类活动影响特征较显著。第Ⅱ、Ⅲ承压水受碳酸盐、硅酸盐矿物溶解和阳离子交替吸附作用明显,人类活动对深层地下水影响甚微。

关键词:地下水;工业化城市;水化学;离子比值;主成分分析

地下水是生态环境系统中最为活跃灵敏的因子,积极参与浅表和深层的多项物质循环与能量交换,是一种极有价值的信息载体(张人权等,2011)。地下水化学组分是地下水环境的重要组成部分,可间接表征地下水与围岩介质的相互作用,并在一定程度上反映人类活动对地质环境的影响程度。近年来,对不同成因背景下地下水化学特征的研究日益受到重视,其有助于了解地下水环境的变化过程,对于指导地下水资源合理开发利用及生态环境保护具有重要意义(尹子悦等,2018)。

常州市位于长江三角洲腹地,北临长江,南接太湖,是长三角地区典型的工业城市。区域历史上长期开采地下水,诱发了系列地面沉降问题(于军等,2006),2005年,地区深层地下水实现禁采,地下水位逐步回升,水动力场发生了较大程度变化(胡建平,2011)。近年来,城市工农业的迅速发展也带来了部分地下水环境问题,化工、有色等传统产业富集的乡镇区已发现有不同程度的浅层地下水污染(姜月华等,2011;马浩,2011)。在此背景下,现状地下水化学特征和影响因素亟需重点关注。

有部分学者对区内地下水问题进行了研究,大多集中在地下水质量(黄金玉等,2016)、地下水污染(吴登定等,2006;顾礼明等,2012)、地下水脆弱性(李定龙等,2013)、健康风险(杨彦等,2013)、水土地质环境(姜月华等,2015;贾军元,2015)等方面,且重点针对浅层地下水,鲜有对多含水层地下水水化学特征和成因的系统研究。后工业化背景下(宋林飞,2018),人类活动对于区内地下水环境的干扰程度不可忽略,人类活动的加剧增加了揭示区域地下水化学成因的难度(薛东青等,2022)。因此,本文通过调查取样和测试分析,采用统计分析、离子比值、主成分分析等多种方法,研究区域地下水禁采10余年后,人类活动影响下各含水层地下水水化学特征,探讨水化学组分的来源和成因机制,以期为同类型地区地下水资源的保护与管理提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理与地形地貌条件

研究区位于长江三角洲太湖平原西北缘,地处江苏省南部,地理坐标为东经119°39′54.3″~120°

注:本文为常州市人民政府、江苏省自然资源厅合作项目"常州城市地质调查",江苏省地质勘查基金项目"苏锡常都市圈西部环境地质调查"(编号:苏财建[2017]160号),部省合作项目"苏南现代化建设示范区综合地质调查(苏财建[2016]140号)"的成果。

收稿日期:2022-05-29;改回日期:2022-12-28;网络首发:2023-01-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.01.015

作者简介:苏东,男,1993年生,硕士,工程师,主要从事水文地质研究;Email: sudong1993@126.com。

11′43.4″,北纬 31°20′06.3″~32°03′41.7″,面积 1862 km^2。区内地形平坦广阔,大部分地区高程 5~10 m,地貌单元主要为冲湖积平原和长江漫滩平原,在长三角地区具有很好的代表性。

1.2 地质与水文地质概况

研究区大面积出露第四系,是较为典型的长江三角洲地层沉积区。北部沿江地区以现代漫滩冲积物或全新世冲海积粉细砂为主,南部以晚更新世湖沼积或冲湖积沉积物为主,第四系厚度在 40~200 m,总体呈现出自北向南变浅的趋势。第四系自上而下划分为全新统如东组、上更新统滆湖组、上更新统昆山组、中更新统启东组和下更新统海门组,下伏新近系上新统盐城组。

区域含水层发育特征受历史时期海侵海退、构造活动影响,随地形地貌差异性较大。松散岩类孔隙水是本次重点研究对象,在区内分布甚广,且在垂向上多层叠置,由地表向下,相继发育潜水和第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ承压水。浅层含水层顶板埋深在 40 m 以浅,厚度在 0~35 m,赋存潜水和第Ⅰ承压水(浅层地下水),含水层受晚更新世和全新世冲湖积相、滨海相沉积影响,平面上变化复杂且不稳定,多呈夹层状或透镜状不连续分布。地下水位埋深 0.5~5.0 m,沿长江地区埋深小于 2 m;浅层地下水与外界水力联系密切,常年受大气降水、地表水入渗补给。深层含水层顶板埋深在 150 m 以浅,厚度 20~100 m,赋存第Ⅱ、Ⅲ承压水(深层地下水),含水层受早、中更新世区域性古河道和海水顶托控制,在平面展布上具汊支多、连续性好的特征,含水层厚度、富水性沿古河道呈现出清晰的规律性,层间一般有厚度比较稳定的黏土、淤泥质亚黏土层。地下水埋深在 10~50 m,沿长江地区埋深小于 15 m。

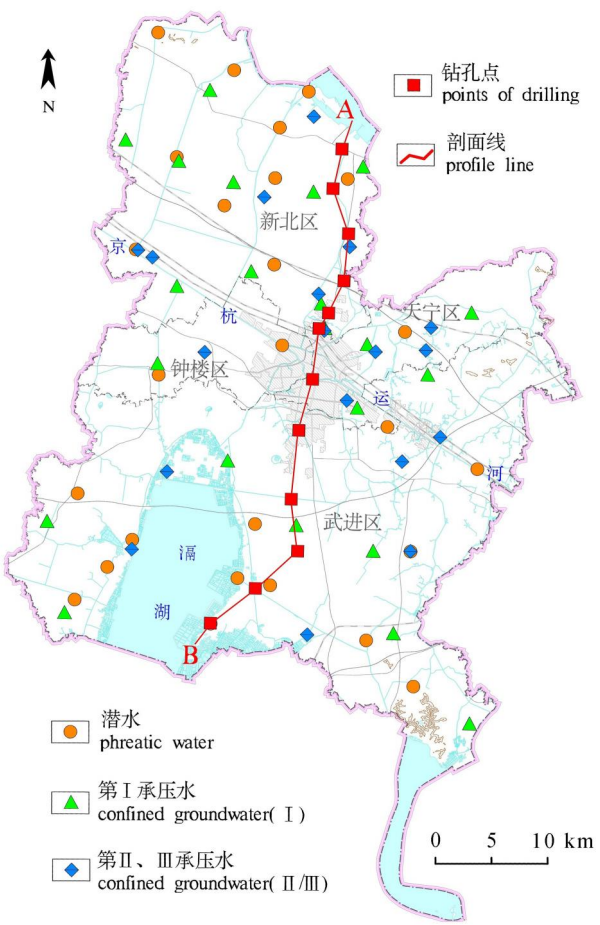


图 1 常州市地理简图及本文地下水化学采样点分布图

Fig. 1 Geographical map of Changzhou City, Jiangsu Province, and the sampling points for hydrochemistry of the groundwater

2 研究方法

本次研究依托“常州城市地质调查”、“苏南现代化建设示范区综合地质调查”项目,开展常州市 1∶5 万水文地质调查和样品采集测试工作。地下水样品采集点位包含区内机井、民井和专门型地下水监测井,于 2018 年 12 月分层位采集了 67 组水样,包含潜水样品 26 组、第Ⅰ承压水样品 22 组,第Ⅱ、Ⅲ承压水样品 19 组,相对均匀地分布于整个研究区(图 1)。水样采集前,进行了 0.5~2 h 的抽水洗井工作,确保排出井管 3 倍以上体积的地下水。采集时通过 0.45 μm 微孔滤膜对水样进行过滤,去除样品中悬浮物。使用聚乙烯瓶采集 500 mL 原水 1 瓶,另采集 1 瓶 100 mL 水样添加 HNO_3 使 pH 值小于 2,测试指标包含全分析和无机毒理学指标 45 项。上述样品采集后立即放入保温箱(4℃)中保存,并在 48 h 内送往国土资源部南京矿产资源监督检测中心测试,测试方法参照《DZ/T 0064-2021 地下水质分析方法》。

在数据处理和分析时,选用 AquaChem、Origin 软件绘制相关图件,并开展离子比值特征分析;采用 SPSS 软件对地下水主要离子含量进行数理统计,开展主成分分析,综合研究地下水化学成因及影响因素。

3 结果和讨论

3.1 地下水化学特征

研究区潜水 pH 值在 7.22~8.23,TDS(Total dissolved solids,溶解性固体总量)的质量浓度

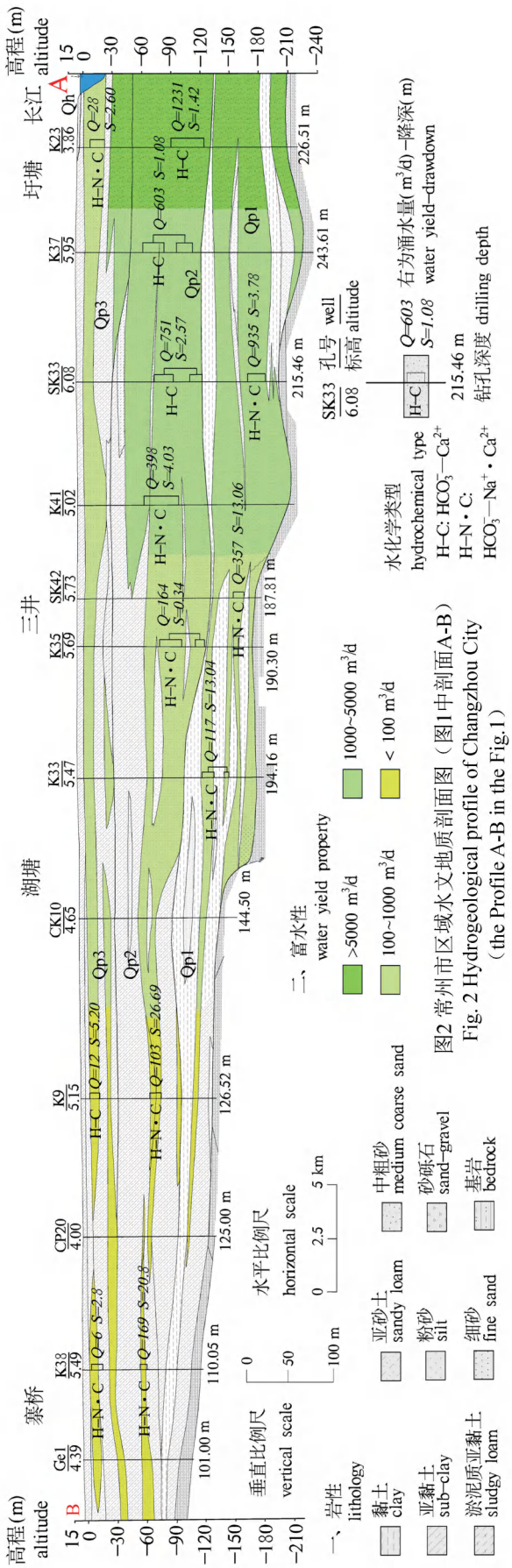


图2 常州市区域水文地质剖面图(图1中剖面A-B)

Fig. 2 Hydrogeological profile of Changzhou City (the Profile A-B in the Fig.1)

[ρ(TDS)]在 224~718 mg/L 之间,均值为 494 mg/L,水化学类型较多且零散,以 HCO_3^-—Ca^{2+} · Mg^{2+}(30.8%)、HCO_3^-—Ca^{2+}(19.2%)和 HCO_3^- · Cl^-—Na^+ · Ca^{2+}(19.2%)型为主;第Ⅰ承压水 pH 值在 7.36~8.59 之间,ρ(TDS)在 282~677 mg/L 之间,均值为 433 mg/L,水化学类型以 HCO_3^-—Na^+ · Ca^{2+}(40.9%)和 HCO_3^-—Ca^{2+}型(22.7%)为主;第Ⅱ、Ⅲ承压水 pH 值在 7.34~8.87 之间,ρ(TDS)在 220~524 mg/L 之间,均值为 411 mg/L,水化学类型主要为 HCO_3^-—Na^+ · Ca^{2+}型(68.4%)(表 1)。从潜水至承压水,HCO_3^-的质量浓度均值升高,Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-、NO_3^-和 COD_{Mn}(COD, Chemical Oxygen Demand,化学需氧量,用高锰酸钾作化学氧化剂测定的 COD 记为 COD_{Mn})均值降低,地下水的碱性逐渐增强,ρ(TDS)均值降低,水化学类型由多元向单一转变。体现出由上至下,含水层密闭性增强,地下水径流变缓的水化学特征,这与姜月华等(2008)运用同位素方法研究苏锡常地区地下水赋存条件得到的结论一致。

3.2　地下水水化学成因

3.2.1　地下水主要控制因素

在补径排过程中,地下水化学组分会受到矿物溶解、蒸发浓缩、交替吸附、混合作用和人类活动等多重因素的影响。通常采用 Gibbs 图反映地下水各离子的起源主控因素,可分为岩石风化型、降水控制型和蒸发浓缩型 3 类(Gibbs, 1970;王亚平等, 2010)。区域地下水 Gibbs 图显示(图 4),水样 ρ(TDS)基本在 100~1000 mg/L,且大部分样品的 $\rho(Na^+)/[\rho(Na^+)+\rho(Ca^+)]$ 和 $\rho(Cl^-)/[\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)]$ 比值在 0~0.5,指示地下水主要受岩石风化作用控制。少量Ⅱ、Ⅲ承压水的 $\rho(Na^+)/[\rho(Na^+)+\rho(Ca^+)]$ 值在 0.5~0.9 之间,但 ρ(TDS)相对不变,表明深层承压水在径流过程中还受到了阳离子交换吸附作用的影响(蒙琪, 2021)。在 $\rho(TDS)-\rho(Cl^-)/[\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)]$ 图中,潜水和第Ⅰ承压水的 $\rho(Cl^-)/[\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)]$ 值整体稍大于第Ⅱ、Ⅲ承压水,指示二者同时受到了大气降水和蒸发浓缩的影响。

3.2.2　溶滤作用

离子比值法可进一步定性分析地下水化学成因机制(Zhou Yu et al., 2012)。由于 Cl^-化学性质相对稳定,在地下水天然补径排过程中,不参与水岩溶解作用,不易被植物吸收,只受蒸发浓缩和混合作用

表 1 常州市地下水水化学参数统计

Table 1 Statistical parameters of the dissolved chemical compoments of groundwater in Changzhou City, Jiangsu

地下水类型	统计值	质量浓度 ρ(mg/L)											pH
		$Na^+ + K^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	COD_{Mn}	TDS	
潜水	最小值	20.80	25.40	2.92	2.92	97.60	23.00	0.054	0.004	0.089	0.51	224	7.22
	最大值	103.70	156.00	41.70	150.00	649.00	134.00	13.700	22.400	52.500	47.70	718	8.23
	平均值	52.18	89.48	23.81	63.74	330.33	61.82	1.053	0.998	13.954	3.55	494	7.74
	变异系数	0.39	0.36	0.47	0.69	0.43	0.49	2.90	4.38	1.30	2.59	0.30	0.04
第Ⅰ承压水	最小值	24.75	34.70	11.90	2.00	206.00	11.50	0.020	0.004	0.048	0.64	282	7.36
	最大值	83.02	142.00	46.90	86.20	610.00	142.00	0.226	1.480	13.000	2.77	677	8.59
	平均值	47.07	80.59	21.97	23.86	364.05	45.50	0.104	0.176	2.702	1.17	433	7.97
	变异系数	0.35	0.34	0.46	0.98	0.31	0.70	0.62	1.77	1.36	0.44	0.25	0.04
第Ⅱ、Ⅲ承压水	最小值	30.60	8.23	12.80	2.00	159.00	6.64	0.020	0.004	0.062	0.50	220	7.34
	最大值	111.84	110.00	29.70	58.20	488.00	39.80	0.666	0.074	2.200	1.93	524	8.87
	平均值	71.89	57.20	18.42	12.03	395.16	23.56	0.220	0.027	0.419	0.72	411	8.22
	变异系数	0.31	0.42	0.25	1.46	0.19	0.50	0.77	0.75	1.16	0.47	0.18	0.05

注:pH 值无量纲。

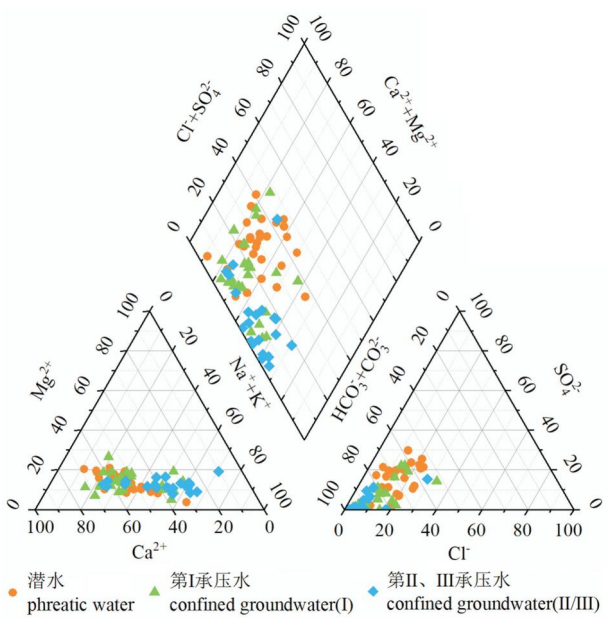


图 3 常州市地下水 Piper 三线图(图中各离子的单位是毫克当量百分比;离子毫克当量数=离子的毫摩尔数×离子电价)

Fig. 3 Piper diagram of groundwater in Changzhou City (the unit of the ions in figures is milligram equivalent percent; Ion milliequivalents = Ion milligram mole×Ion electrovalence)

影响,故可用 $\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$ 反映地下水中 Na^+ 和 Cl^- 的来源(谢达,2019)。图 5a 表明,潜水和第Ⅰ承压水中,$\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$ 在 1∶1 线上下均有分布,表明地下水中的 Na^+、Cl^- 主要来源于蒸发岩盐溶解,同时受到了外界水源入渗混合的影响。第Ⅱ、Ⅲ承压水的 $\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$ 几乎均位于 1∶1 线上部,表明地下水中除蒸发岩盐矿物溶解作用较小,Na^+ 更多来源于钠长石等铝硅酸盐矿物风化溶解或阳离子交换作用(赵琪,2016)。个别位于区域北部沿江一带的第Ⅱ、Ⅲ承压水点位分布在 1∶1 线以下,可能在一定程度上受到了长江水或其他外界水源的影响,引起地下水 Cl^- 含量较大。

地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源,通常采用 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]/[\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(HCO_3^-)]$ 比值确定。当比值接近 1 时,表明碳酸盐和硅酸盐矿物溶解是其主要来源(曾妍妍等,2020)。图 5b 显示,潜水和第Ⅰ承压水的 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]/[\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(HCO_3^-)]$ 基本在 1∶1 线两侧分布,指示浅层地下水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐和硅酸盐矿物的溶解。第Ⅱ、Ⅲ承压水的 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]/[\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(HCO_3^-)]$ 主要分布于 1∶1 线下部,指示深层承压水中的 $[\gamma(HCO_3^-)+\gamma(SO_4^{2-})]$ 大于 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]$,还需要一定量 Na^+ 实现电荷守恒,这与前述规律一致。

地下水中 SO_4^{2-} 和一般来源于硫酸盐矿物或人类活动导致的化石燃料排放,采用 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})-\gamma(HCO_3^-)]/[\gamma(SO_4^{2-})-\gamma(Na^+)+\gamma(Cl^-)]$ 进一步分析地下水中 SO_4^{2-} 来源,其中 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})-\gamma(HCO_3^-)]$ 代表地下水中石膏溶解产生的 Ca^{2+} 浓度,$[\gamma(SO_4^{2-})-\gamma(Na^+)+\gamma(Cl^-)]$ 代表石膏溶解产生的 SO_4^{2-} 浓度(魏兴等,2019)。图 5c 显示,各含水层地下水的 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})-\gamma(HCO_3^-)]/[\gamma(SO_4^{2-})-\gamma(Na^+)+\gamma(Cl^-)]$ 样点均在 1∶1 周围,仅个别潜水样点有小

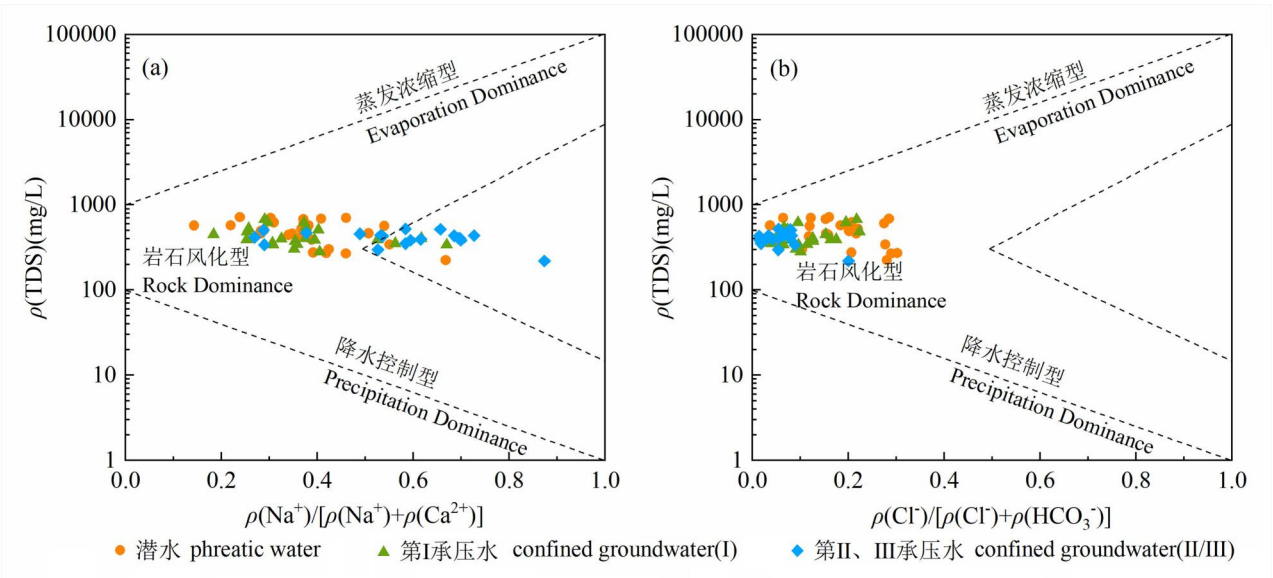


图 4 常州市地下水 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram of the groundwater in Changzhou City

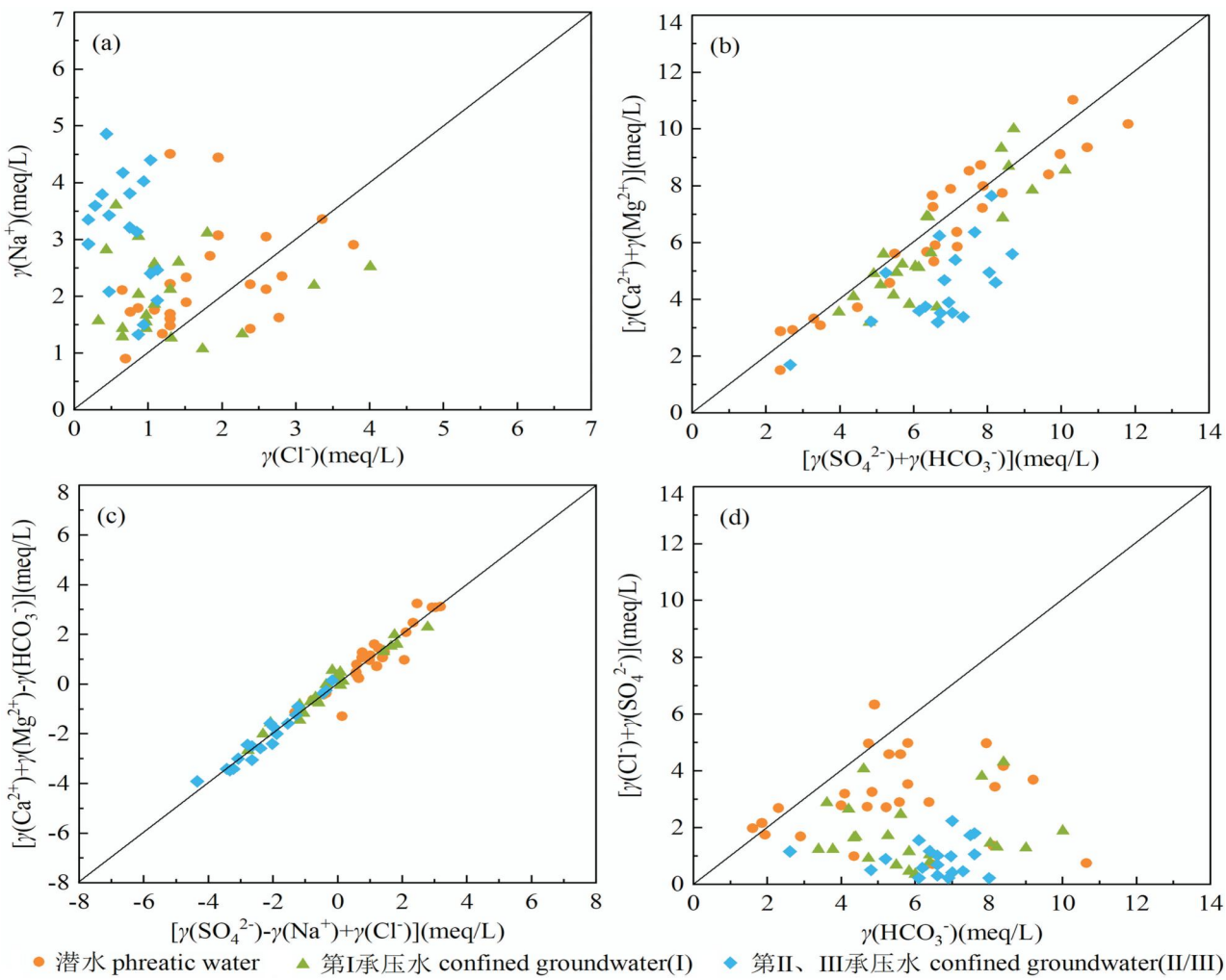


图 5 常州市地下水主要离子含量关系图

Fig. 5 Relationship diagram of the main ion content of groundwater in Changzhou City

幅度偏离,表明区内地下水中 SO_4^{2-} 大部分来源于石膏溶解,但部分地区的潜水在一定程度上受到了人类活动的影响。

由于蒸发岩盐和碳酸盐矿物均影响区内地下水化学组分的形成,采用[γ(Cl⁻)+γ(SO_4^{2-})]/γ(HCO_3^-)]表征两种溶滤作用的影响程度,γ(Cl⁻)与γ(SO_4^{2-})之和代表蒸发岩盐的溶解情况,γ(HCO_3^-)可表示碳酸盐的溶解情况(董学良,2020)。如图 5d 所示,三个含水层的[γ(Cl⁻)+γ(SO_4^{2-})]/γ(HCO_3^-)]比值大部分位于 1∶1 线以下,但各层均有差异。潜水和第Ⅰ承压水点位有少量在 1∶1 线上,表明部分区域地下水受碳酸盐矿物溶解和蒸发岩盐溶解作用共同影响;而第Ⅱ、Ⅲ承压水的点位则相对集中地分布在 1∶1 线下方,指示深层地下水受蒸发岩盐溶解影响微弱,更多受控于碳酸盐矿物溶解作用。自浅层至深层地下水,碳酸盐矿物溶解作用对地下水化学组分形成的影响逐渐增强。

3.2.3 阳离子交替吸附作用

在上述分析中,阳离子交替吸附作用参与了地下水化学组分的形成。进一步采用氯碱指数(*CAI*-1、*CAI*-2)来研究孔隙水与沉积物之间发生的阳离子交换作用(魏国孝,2011;Thakur et al.,2016),其计算公式为:

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

$$CAI\text{-}2=\frac{\gamma(Cl^-)-[\gamma(Na^+)+\gamma(K^+)]}{\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(HCO_3^-)+\gamma(CO_3^{2-})+\gamma(NO_3^-)}$$

其中,γ 为离子的毫克当量浓度(meq/L)。*CAI*-1、*CAI*-2 值小于 0,则表明发生了正向阳离子交换作用,且负值的绝对值越大,作用越强;反之,则发生了反向阳离子交换作用。

在 *CAI* 图中(图 6),浅层地下水的点位相对集中地分布在 $X=0$ 线附近,部分第Ⅰ承压水监测点 *CAI*-1 值在-6~1,*CAI*-2 值在-0.5~0.5 之间,表明地下水除了受到岩盐、硅酸盐、碳酸盐等矿物溶解影响外,还受到了阳离子交替吸附作用的影响,且第Ⅰ承压水的吸附作用更为明显,由于阳离子吸附能力大小的差异,含水介质表面吸附的 Na^+ 置换了地下水中的 Ca^{2+},导致水中 Na^+ 含量增多。第Ⅱ、Ⅲ承压水的 *CAI*-1、*CAI*-2 值几乎均小于 0,部分样点的 *CAI*-1 值小于-10、*CAI*-2 值小于-0.5,指示深层地下水经历了漫长充分的阳离子交替吸附作用,且作用较强烈,岩层中的 Na^+、K^+ 被大量置换至地下水中。

3.2.4 人类活动的影响

城市化进程中,人类活动对于地下水的影响愈发显著。地下水中 NO_3^- 主要来自于农业化肥的使用和城市生活污水排放,SO_4^{2-} 常来源于工业活动和大气沉降(蒲俊兵等,2010)。结合 Cl^- 化学性质的稳定性,采用 γ(NO_3^-)/γ(Cl⁻)与 γ(Cl⁻)的关系来判断 NO_3^- 的来源(Widory et al.,2005)。由图 7a 可知,潜水样点分布相对零散,γ(NO_3^-)/γ(Cl⁻)和

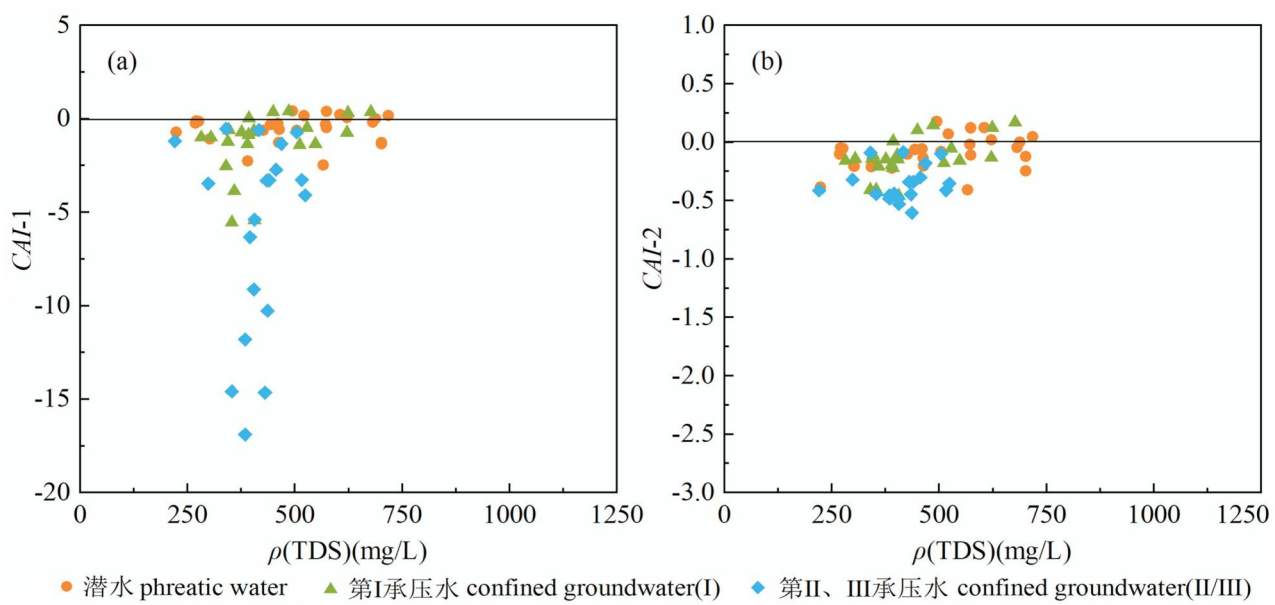


图 6 常州市地下水氯碱指数与 TDS 关系图

Fig. 6 Relationship diagram between chlor alkali index and TDS of groundwater in Changzhou City

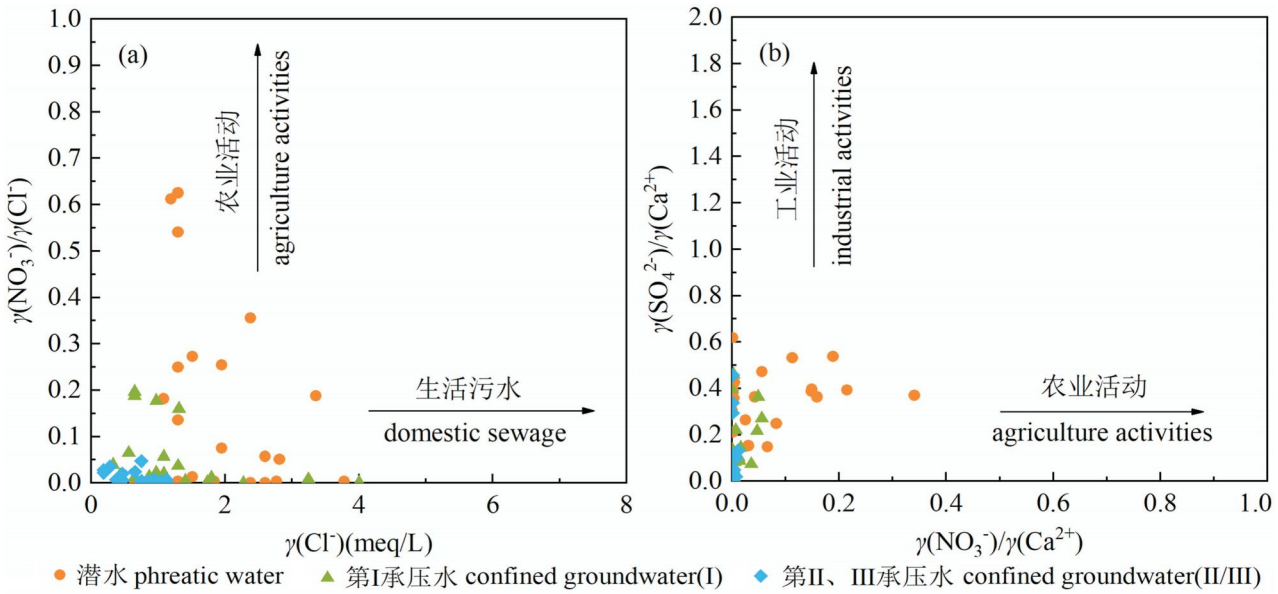


图 7 常州市地下水离子比值关系图

Fig. 7 Relationship diagram of ion ratio of groundwater in Changzhou City

$\gamma(Cl^-)$值变化幅度较大。呈现出自坐标原点向高$\gamma(NO_3^-)/\gamma(Cl^-)$值和高$\gamma(Cl^-)$值两个趋势,结合点位分布进一步分析,高$\gamma(NO_3^-)/\gamma(Cl^-)$值样点主要位于主城区周边乡村和农耕用地区,区域以蔬果、稻田种植为主,需大量施加粪肥和无机肥料,故NO_3^-主要来源于农业活动;高$\gamma(Cl^-)$值区样点位于主城区及城镇集聚区,居民生活用水排放可能带来了一定量Cl^-。

前述表明,地下水中SO_4^{2-}有部分可能来源于人类工业活动,进一步采用$\gamma(SO_4^{2-})/\gamma(Ca^{2+})$与$\gamma(NO_3^-)/\gamma(Ca^{2+})$的变化关系加以识别(左禹政等,2017)。图 7b 中,潜水和第Ⅰ承压水点位分布零散,有向高$\gamma(SO_4^{2-})/\gamma(Ca^{2+})$值富集的趋势,但比值整体偏小,指示工业活动对区内浅层地下水影响相对不高。两图中,第Ⅱ、Ⅲ承压水的点位均相对富集,表明人类工农业活动对区内深层地下水的影响甚微。

3.3　水化学组分影响因素

主成分分析法是一种降维的统计方法,其通过矩阵变换和矩阵旋转,对多指标水化学组分进行主成分提取,得到起主要支配作用的几个主成分(F_1、F_2、F_3……),从而遴选分析出影响水化学指标的主要因素(Carrolls et al.,2005;Yang Pingheng et al.,2010)。

$$F_1 = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \cdots\cdots + a_nX_n$$

$$F_2 = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \cdots\cdots + b_nX_n$$

$$F_3 = c_1X_1 + c_2X_2 + c_3X_3 + \cdots\cdots + c_nX_n$$

……

$$F_i = i_1X_1 + i_2X_2 + i_3X_3 + \cdots\cdots + i_nX_n$$

其中,X_1……X_n 为水化学指标;a、b、c……i 为主成分系数,常选择系数绝对值较大的指标来表征该主成分的水化学意义(水文地球化学作用、人类活动等)。

采用该方法提取潜水、第Ⅰ承压水和第Ⅱ、Ⅲ承压水主成分因子,对水化学形成的影响因素进一步探究(表 2)。

潜水中有 3 个主成分特征值大于 1(表 2)。第一主成分 F_1 主要由 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、TDS 组成,贡献占比 36.43%。潜水含水层岩性主要是以灰黄、黄褐色粉质黏土为主,含有大量方解石、长石等碳酸盐、硅酸盐矿物,潜水埋深较浅,长期受到大气降水的入渗补给,较强烈的水动力交换促进了含水介质中矿物的溶解。因而 F_1 主要反映了碳酸盐、硅酸盐矿物溶解对潜水化学组分的影响。第二主成分 F_2 主要由 Na^+、SO_4^{2-}、Cl^-组成,贡献占比 20.80%。前述离子比例分析表明,Na^+、SO_4^{2-}、Cl^-均是蒸发岩盐、硫酸盐矿物(石膏等)溶解的产物。因而 F_2 反映了蒸发岩盐、硫酸盐矿物的溶解作用。第三主成分由 NH_4^+、NO_2^-和 COD_{Mn} 组成,贡献占比 18.96%。NH_4^+和 NO_2^-主要来源于农作物化肥,是典型的农

表 2 常州市地下水潜水、第Ⅰ承压水、第Ⅱ、Ⅲ承压水主成分分析表

Table 2 Principal component analysis of phreatic water, the first, the second and the third confined groundwater of the groundwater in Changzhou City

潜水				第Ⅰ承压水				第Ⅱ、Ⅲ承压水				
指标	主成分系数			指标	主成分系数			指标	主成分系数			
	F_1	F_2	F_3		F_1	F_2	F_3		F_1	F_2	F_3	F_4
Ca^{2+}	0.964	0.169		TDS	0.966	−0.137	0.173	HCO_3^-	0.932	0.174		0.116
Mg^{2+}	0.955			Ca^{2+}	0.928		−0.142	TDS	0.833		0.517	
HCO_3^-	0.907	−0.165	0.201	Mg^{2+}	0.813		0.248	COD_{Mn}	−0.749	−0.247		0.353
TDS	0.899	0.429		Cl^-	0.803	0.184	0.137	Ca^{2+}	0.696	−0.682	0.108	
Na^+	0.147	0.791		HCO_3^-	0.783	−0.534		Mg^{2+}	0.592		0.552	0.314
SO_4^{2-}	0.381	0.633	−0.223	SO_4^{2-}		0.855	0.252	Na^+		0.877	0.284	
Cl^-	0.379	0.560	−0.113	Na^+	0.116	0.718	0.437	NO_2^-	0.226	0.660	−0.197	
NO_3^-	−0.261	0.425		NO_3^-	−0.170	0.557	0.115	SO_4^{2-}	0.264	0.146	0.884	
NH_4^+	0.176	−0.279	0.927	NO_2^-	−0.388	−0.469	0.374	Cl^-	−0.149	−0.564	0.709	
NO_2^-	−0.229	0.371	0.750	NH_4^+	0.283	0.454	−0.193	NH_4^+			0.212	0.795
COD_{Mn}	0.272	−0.466	0.742	COD_{Mn}	0.313		0.830	NO_3^-			0.112	−0.775
方差贡献率(%)	36.43	20.80	18.96	方差贡献率(%)	37.14	21.22	11.50	方差贡献率(%)	28.35	19.21	18.68	13.37
累积贡献率(%)	36.43	57.23	76.19	累积贡献率(%)	37.14	58.36	69.87	累积贡献率(%)	28.35	47.56	66.24	79.61

注:方差贡献率表示主成分 F_i 的方差在全部方差中的比重,贡献率值越大,表明主成分 F_i 综合 X_1……X_n 水化学指标信息的能力越强;累积贡献率表示前面 i 个主成分累计提取了 X_1……X_n 多少的信息,贡献率值越高,表明主成分 F_1……F_i 揭示的水化学影响因素越全面。

业污染源,目前已成为地下水资源污染的主要威胁因素(Bouwer,2000);COD_{Mn} 则主要表征水体受工业污染状况。因而 F_3 反映了人类工农业活动对潜水的影响。

第Ⅰ承压水有 3 个主成分特征值大于 1(表 2)。第一主成分 F_1 由 TDS、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^- 和 HCO_3^- 组成,贡献占比 37.14%。研究区第Ⅰ承压水含水层岩性主要是以灰-灰黄色粉砂、细砂和粉土为主,富集碳酸盐、硅酸盐矿物,地下水径流导致的溶滤作用使得 Ca^{2+}、HCO_3^- 等离子进入地下水中,因而 F_1 主要反映了碳酸盐、硅酸盐矿物溶解对第Ⅰ承压水化学组分的影响。F_2 由 SO_4^{2-}、Na^+、NO_3^- 和 NH_4^+ 组成,贡献占比 21.22%。SO_4^{2-} 和 Na^+ 为石膏的特征产物,而 NO_3^- 和 NH_4^+ 均为农业特征污染因子,表征了农业施肥对地下水的影响。因而 F_2 表征了硫酸盐矿物溶解和农业活动对地下水的影响。F_3 由 COD_{Mn} 组成,贡献率仅为 11.50%。前述水文地质条件表明,第Ⅰ承压水与外界仍存在较为密切的水力联系,外界水源通过潜水和间接影响到第Ⅰ承压水,因而工业活动也可在一定程度上对第Ⅰ承压水产生影响,但程度较低。

第Ⅱ、Ⅲ承压水有 4 个主成分特征值大于 1(表 2)。第一主成分 F_1 由 HCO_3^-、TDS、Ca^{2+}、Mg^{2+} 组成,贡献占比 28.35%,其中 COD_{Mn} 呈现负相关关系,即该指标与上述 4 个指标在地下水中含量呈反比关系(郭笃发,2004)。第Ⅱ、Ⅲ承压水含水层岩性以灰-灰黄色粉砂、细砂、中砂和含砾粗砂为主,在长期的径流溶解下,岩层中的碳酸盐、硅酸盐矿物的溶滤至地下水中,HCO_3^-、Ca^{2+}、Mg^{2+} 成为影响地下水形成的主要指标,因而 F_1 主要反映了碳酸盐、硅酸盐矿物溶解对第Ⅱ、Ⅲ承压水化学组分的影响。第二主成分 F_2 由 Na^+ 和 NO_2^- 组成,贡献占比 19.21%,同时,Ca^{2+} 也体现了负相关关系(−0.682),表示随 Na^+ 的增加,Ca^{2+} 对应减少,可解释为阳离子交替吸附作用对地下水组分的影响。F_3 由 SO_4^{2-} 和 Cl^- 组成,贡献比例 18.68%。二者皆是蒸发岩盐、硫酸盐矿物的主要组分,在长期水岩作用下,岩盐、石膏中的 Cl^-、SO_4^{2-} 被溶滤至地下水中。F_4 由 NH_4^+ 和 NO_3^- 组成,贡献占比 79.61%,其为农业氮肥特征因子。但结合前述水文地质条件和离子比值法分析,深层承压水埋深在 50m 以深,且与上覆浅层地下水联系尚不密切,故难以受到人类活动直接或间接的影响。因而,分析该处 NH_4^+ 可能主要来源于深层沉积环境下黏土矿物中赋存的氮(Jiang Yuehua et al.,2008)

在长期径流环境下,吸附于黏土矿物表面或固定于长石活云母中的 NH_4^+ 通过水岩作用进入地下水中(谢建成等,2007)。

4　结论

(1)常州市潜水水化学类型以 HCO_3^-—Ca^{2+} · Mg^{2+}、HCO_3^-—Ca^{2+} 和 HCO_3^- · Cl^-—Na^+ · Ca^{2+} 型为主,第Ⅰ承压水以 HCO_3^-—Na^+ · Ca^{2+} 和 HCO_3^-—Ca^{2+} 型为主、第Ⅱ承压水以 HCO_3^-—Na^+ · Ca^{2+} 型为主。受赋存条件影响,从潜水至深层承压水,地下水的碱性逐渐增强,TDS 含量均值降低,水化学类型由多元向单一转变。

(2)岩石风化作用是研究区内地下水化学组分的主要控制因素,阳离子交替吸附和人类活动均有一定影响。地下水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 主要来源于碳酸盐、硅酸盐矿物溶解;Na^+、SO_4^{2-}、Cl^- 主要来源于蒸发岩盐、硫酸盐矿物溶解,同时 Na^+ 还受到阳离子交替吸附作用影响;三氮主要来源于人类活动,少量来源于深层含氮矿物溶解。

(3)常州市潜水水化学组分形成贡献:碳酸盐、硅酸盐矿物溶解>蒸发岩盐、硫酸盐矿物溶解>工农业活动;第Ⅰ承压水化学组分形成贡献:碳酸盐、硅酸盐矿物溶解>硫酸盐矿物溶解、农业活动>工业活动;第Ⅱ、Ⅲ承压水化学组分形成贡献:碳酸盐、硅酸盐矿物溶解>阳离子交替吸附作用>蒸发岩盐、硫酸盐矿物溶解>含氮矿物溶解。

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "**&**" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "**#**" is in Chinese without English abstract)

董学良. 2020. 西林吉矿泉水文地球化学特征与水资源评价. 导师:卞建民, 孙永泉. 长春. 吉林大学硕士学位论文: 1~124.

顾礼明, 张晟, 金玉, 翟康, 彭晓岚, 陈玲, 张健. 2012. 浅层地下水与地表水污染物交换关系研究——以常州市老城区为例. 环境科技, 25(2): 4~8.

郭笃发. 2004. 莱州湾东南岸海水入侵区地下水中若干离子的主成分分析. 海洋科学, (9): 6~9.

胡建平. 2011. 苏锡常地区地下水禁采后的地面沉降效应研究. 导师:施斌. 南京. 南京大学博士研究生毕业论文: 1~101.

黄金玉, 姜月华, 苏晶文, 张泰丽. 2016. 长江三角洲地区地下水调查点特殊分布的评价方法解析. 地质学报, 90(10): 2948~2961.

贾军元, 葛伟亚, 常晓军, 雷廷. 2015. 苏南城镇化过程中的水土污染现状及防治建议. 中国地质学会 2015 学术年会论文摘要汇编(下册): 12~14.

姜月华, 贾军元, 许乃政, 王敬东, 康晓钧. 2008. 苏锡常地区地下水同位素组成特征及其意义. 中国科学(D 辑: 地球科学), (4): 493~500.

姜月华, 苏晶文, 张泰丽, 王寒梅, 王光亚, 赵建康, 施斌, 吴吉春, 张礼中, 周爱国. 2015. 长江三角洲经济区环境地质. 北京: 地质出版社: 1~654.

姜月华, 周迅, 贾军元, 周权平, 李云峰, 李云. 2011. 江苏溧阳某地浅层地下水有机污染特征及其启示. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会论文集, 418.

李定龙, 王宗庆, 杨彦. 2013. 基于综合方法的区域浅层地下水脆弱性评价——以常州市为例. 环境化学, 32(11): 2099~2108.

马浩. 2011. 苏锡常地区水土地质环境特征及质量分析. 导师: 于青春, 徐慧珍. 北京. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~95.

蒙琪. 2021. 石羊河流域中下游浅层地下水水化学特征及其成因. 干旱区资源与环境, 35(3): 80~87.

蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 苟鹏飞, 殷建军. 2010. 重庆岩溶地下河水文地球化学特征及环境意义. 水科学进展, 21(5): 628~636.

宋林飞. 2018. 苏南现代化建设阶段性特征与高质量发展. 学海, (4): 87~91.

王亚平, 王岚, 许春雪, 杨忠芳, 季俊峰, 夏学齐, 安子怡, 袁建. 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(Z1): 446~456.

魏国孝. 2011. 现代吉兰泰盆地地下水演化规律及古大湖补给水源研究. 导师: 陈发虎. 兰州. 兰州大学硕士学位论文: 1~151.

魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌. 2019. 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律. 环境科学, 40(9): 4042~4051.

吴登定, 姜月华, 贾军远, 蔡鹤生. 2006. 运用氮、氧同位素技术判别常州地区地下水氮污染源. 水文地质工程地质, (3): 11~15.

谢达. 2019. 新集一矿地下水水化学形成及演化特征. 导师: 王来斌. 淮南. 安徽理工大学硕士学位论文: 1~79.

谢建成, 杨晓勇. 2007. 铵(氮)在岩石和矿物中地球化学行为研究进展. 地质找矿论丛, (1): 1~8.

薛东青, 谢明忠, 李少虎, 杜丽媛, 刘咏康, 李鹏. 2022. 河北省任丘市浅层地下水化学特征及形成机制. 地质论评, 68(1): 245~252.

杨彦, 于云江, 魏伟伟, 李定龙, 杨洁. 2013. 常州市浅层地下水重金属污染对城区、城郊居民健康风险评价. 环境化学, 32(2): 202~211.

尹子悦, 林青, 徐绍辉. 2018. 青岛市大沽河流域地下水水化学时空演化及影响因素分析. 地质论评, 64(4): 1030~1043.

于军, 王晓梅, 武健强, 谢建宝. 2006. 苏锡常地区地面沉降特征及其防治建议. 高校地质学报, (2): 179~184.

张人权, 梁杏, 靳孟贵, 万力, 于青春. 2011. 水文地质学基础(第六版). 北京: 地质出版社: 2~6.

曾妍妍, 周金龙, 乃尉华, 李麟, 谭鹏飞. 2020. 新疆喀什噶尔河流域地下水形成的水文地球化学过程. 干旱区研究, 37(3): 541~550.

赵琪. 2016. 长江下游沿海平原地下水补径排条件与水化学形成机理研究. 导师: 林学钰. 长春. 吉林大学硕士学位论文: 1~96.

左禹政, 安艳玲, 吴起鑫, 屈坤杰, 樊光辉, 叶祖鑫, 秦玲, 钱娟婷, 涂成龙. 2017. 贵州省都柳江流域水化学特征研究. 中国环境科学, 37(7): 2684~2690.

Bouwer H. 2000. Integrated water management: emerging issues and challenges. Agricultural Water Management, 45(3): 217~228.

Carroll S, Goonetilleke A. 2005. Assessment of high density of onsite wastewater treatment systems on a shallow groundwater coastal aquifer using PCA. Environmetrics, 16(3): 257~274.

Dong Xueliang. 2020**&**. Hydrogeochemical characteristics of xilinji mineral water and evaluation of water resources. Jilin University: 1

~124.

Gibbs R J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. American Association for the Advancement of Science, 170: 1088~1090.

Gu Liming, Zhang Sheng, Jin Yu, Zhai Kang, Peng Xiaolan, Chen Ling, Zhang Jian. 2012&. Research on exchange relationship of surface water and ground water pollutants—taking old city zone of Changzhou as an example. Environmental Science and Technology, 25(2): 4~8.

Guo Nufa. 2004&. Principal component analysis on the ious in the groundwater intrusion area of Laizhou Bay coast. Marine Sciences, (9): 6~9.

Hu Jianping. 2011&. A study on the land subsidence effect after prohibiting extraction of groundwater in Suzhou-Wuxi-Changzhou area, Nanjing University: 1~101.

Huang Jinyu, Jiang Yuehua, Su Jingwen, Zhang Taili. 2016&. Analysis of the special distribution of groundwater survey points in the Yangtze River Delta. Acta Geologica Sinica, 90(10): 2948~2961.

Jia Junyuan, Ge Weiya, Chang Xiaojun, Lei Ting. 2015#. Present situation and prevention suggestions of water and soil pollution in the process of urbanization in southern Jiangsu. Abstract compilation of papers of 2015 academic annual meeting of Chinese Geological Society (Volume II): 12~14.

Jiang Yuehua, Jia Junyuan, Xu Naizhen, Wang Jingdong, Kang Xiaojun. 2008&. Isotopic characteristics of groundwater in Changzhou, Wuxi and Suzhou area and their implications. Science in China(Series D: Earth Sciences), (6): 778~787.

Jiang YueHua, Jia JunYuan, Xu Naizhen, Wang Jingdong, Kang Xiaojun. 2008 #. Isotopic characteristics of groundwater in Changzhou, Wuxi and Suzhou area and their implications. Scientia Sinica(Terrae), (4): 493~500.

Jiang Yuehua, Su Jingwen, Zhang Taili, Wang Hanmei, Wang Guangya, Zhao Jiankang, Shi Bin, Wu Jichun, Zhang Lizhong, Zhou Aiguo. 2015#. Environmental geology of the Yangtze River Delta economic zone. Beijing: Geological Publishing House: 1~654.

Jiang Yuehua, Zhou Xun, Jia Junyuan, Zhou Quanping, Li Yunfeng, Li Yun. 2011#. Organic pollution characteristics and enlightenment of shallow groundwater in Liyang, Jiangsu province. Proceedings of the 13th annual meeting of the Chinese society of mineral and rock geochemistry, 418.

Li Dinglong, Wang Zongqing, Yang Yan. 2013&. Regional shallow groundwater vulnerability assessment based on comprehensive approach—take Changzhou as an example, Environmental Chemistry, 32(11): 2099~2108.

Ma Hao. 2011&. Soil-water geological environment characteristics and quality analysis of Su-Xi-Chang region, China University of Geosciences (Beijing): 1~95.

Meng Qi. 2012&. Hydrochemical characteristics and controlling factors of the shallow groundwater in the midstream and downstream areas of Shiyang river basin. Journal of Arid Land Resources and Environment, 35(3): 80~87.

Pu Junbing, Yuan Daoxian, Jiang Yongjun, Gou Pengfei, Yin Jianjun. 2010&. Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China. Advances in Water Science, 21(5): 628~636.

Song Linfei. 2018 #. Phased characteristics and high-quality development of modernization in southern Jiangsu. Academia Bimestrie, (4): 87~91.

Thakur T, Rishi M S, Naik P K, Sharma P. 2016. Elucidating hydrochemical properties of groundwater for drinking and agriculture in parts of Punjab, India. Environmental Earth Sciences, 75(6): 1~15.

Wang Yaping, Wang Lan, Xu Chunxue, Yang Zhongfang, Ji Junfeng, Xia Xueqi, An Ziyi, Yuan Jian. 2010&. Hydro-geochemistry and genesis of major ions in the Yangtze River, China. Geological Bulletin of China, 29(Z1): 446~456.

Wei Guoxiao. 2011&. Research on groundwater recharge and evolution in Jilantai basin and water supply for Jilantai-Hetao Paleo-Megalake. Lanzhou University: 1~151.

Wei Xing, Zhou Jinlong, Nai Weihua, Zeng Yanyan, Fan Wei, Li Bin. 2019&. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang. Environmental Science, 40(9): 4042~4051.

Widory D, Petelet-Giraud E, Negrel P, Ladouche B. 2005. Tracking the sources of nitrate in groundwater using coupled nitrogen and boron isotopes: a synthesis. Environmental Science & Technology, 39(2): 539.

Wu Dengding, Jiang Yuehua, Jia Yuanjun, Cai Hesheng. 2006&. Analyses of pollution source of nitrogen in groundwater with $\delta^{15}N-NO_3$ and $\delta^{18}O-NO_3$ in Changzhou. Hydrogeology & Engineering Geology, (3): 11~15.

Xie Da. 2019&. Formation and evolution characteristics of groundwater in Xinji No. 1 Coal Mine. AnHui University of Science and Technology: 1~79.

Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong. 2007&. Development of the geochemical behavior of ammonium(nitrogen)in rocks and minerals. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, (1): 1~8.

Xue Dongqing, Xie Mingzhong, Li Shaohu, Du Liyuan, Liu Yongkang, Li Peng. 2022&. Chemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Renqiu City, Hebei Province. Geological Review, 68(1): 245~252.

Yang Pingheng, Yuan Daoxian, Yuan Wenhao, Kuang Yinglun, Jia Peng, He Qiufang. 2010&. Formations of groundwater hydrogeochemistry in a karst system during storm events as revealed by PCA. Chinese Science Bulletin, 55(14): 1412~1422.

Yang Yan, Yu Yunjiang, Wei Weiwei, Li Dinglong, Yang Jie. 2013&. Health risk assessment of heavy metals in shallow groundwater in urban and suburban areas of Changzhou. Environmental Chemistry, 32(2): 202~211.

Yin Ziyue, Lin Qing, Xu Shaohui. 2018&. Spatial-temporal variations and controlling factors of groundwater hydrochemical characteristics in the Dagu River Basin. Geological Review, 64(4): 1030~1043.

Yu Jun, Wang Xiaomei, Wu Jianqiang, Xie Jianbao. 2006&. Characteristics of land subsidence and its remedial proposal in Suzhou-Wuxi-Changzhou area. Geological Journal of China Universities, (2): 179~184.

Zeng Yanyan, Zhou Jinlong, Nai Weihua, Li Lin, Tan Pengfei. 2020&. Hydrogeochemical processes of groundwater formation in the Kashgar River Basin, Xinjiang. Arid Zone Research, 37(3): 541~550.

Zhang Renquan, Liang Xing, Jin Menggui, Wan Li, Yu Qingchun. 2011#. Fundamentals of hydrogeology(The sixth edition). Beijing: Geological Publishing House: 2~6.

Zhao Qi. 2016&. Groundwater Recharge, Discharge, Runoff Conditions and Chemical Constituents Formation Mechanism in the Coastal Plain, Downstream of Yangtze River. Jilin University: 1~96.

Zhou Yu, Wang Yanxin, Li Yilian, Francois Zwahlen, Julie Boillat. 2012&. Hydrogcochemical characteristics of central Jianghan Plain, China. Environmental Earth Sciences, 68(3): 765~778.

Zuo Yuzheng, An Yanling, Wu Qixin, Qu Kunjie, Fan Guanghui, Ye

Zuxin, Qin Ling, Qian Juanting, Tu Chenglong. 2017&. Study on the hydrochemical characteristics of Duliu River basin in Guizhou Province. China Environmental Science, 37(7): 2684~2690.

Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of groundwater in Changzhou City

SU Dong[1,2], GONG Xulong[1,2], YANG Lei[1,2], HUANG Jingjun[1,2], XU Shugang[1,2], GONG Yabing[1,2], CUI Longyu[1,2]

1) *Geological Survey of Jiangsu Province*, *Nanjing*, 210049;

2) *Key Laboratory of Earth Fissure Geological Disaster*, *Ministry of Natural Resources*, *Nanjing*, 210049

Abstract: Changzhou is a typical industrialized city in the Yangtze River Delta. The rapid development has had a series of impacts on the groundwater environment over the years. The chemical components of groundwater are controlled by natural conditions and human activities. It needs a further study of the present situation of groundwater chemical genesis and influencing factors. Based on the analysis of the occurrence conditions of hydrogeology, this paper analyzes the chemical characteristics and genesis of groundwater at different aquifer through statistical analysis, ion ratio and principal component analysis. The results show that the main hydrochemical types of phreatic water are HCO_3^-—Ca^{2+} · Mg^{2+}, HCO_3^-—Ca^{2+} and HCO_3^- · Cl^-—Na^+ · Ca^{2+} type, the main hydrochemical types of the first confined groundwater are HCO_3^-—Na^+ · Ca^{2+} and HCO_3^-—Ca^{2+} type, the main hydrochemical types of the second and third confined groundwater is HCO_3^-—Na^+ · Ca^{2+} type. From shallow layer to deep layer, the alkalinity of groundwater increases gradually, the mean value of TDS content decreased, hydrochemical types have changed from pluralism to singleness. The chemical composition of groundwater is mainly affected by mineral dissolution, cation alternating adsorption and human activities. The chemical genesis of phreatic water and the first confined groundwater is mainly controlled by the dissolution of carbonate, silicate, evaporated rock salt and sulfate minerals, and they are significantly affected by human activities. The second and third confined groundwater are obviously affected by the dissolution of carbonate and silicate minerals and cation exchange. Human activities have little impact on deep groundwater.

Keywords: groundwater; industrialized city; hydrochemistry; ion ratio; principal component analysis

Acknowledgements: This artical was supported by cooperation project between Changzhou Municipal People's Government and Department of Natural Resources of Jiangsu Province "Urban Geological Survey Project in Changzhou", Jiangsu geological survey fund project "Environmental Geological Survey in West of Suzhou-Wuxi-Changzhou Metropolitan Area" (No. Su Cai Jian[2017] No. 160), ministerial and provincial cooperation project "comprehensive geological survey of Southern Jiangsu modernization demonstration area" (No. Su Cai Jian[2016] No. 140)

First author: SU Dong, male, born in 1993, master, major in groundwater science and engineering, engineer, is mainly engaged in hydrogeology research; Email: sudong1993@126.com

Manuscript received on: 2022-05-29; Accepted on: 2022-12-28; Published online on: 2023-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2023.01.015　　**Edited by**: ZHANG Yuxu