

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.03.011

引用格式:陶小虎,王赫生,龚建师,等. 苏北阜宁县地下水水化学特征及成因分析[J]. 华东地质, 2023, 44(3): 357-366. (TAO X H, WANG H S, GONG J S, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of the groundwater in Funing County, Northern Jiangsu[J]. East China Geology, 2023, 44(3): 357-366.)

## 苏北阜宁县地下水水化学特征及成因分析

陶小虎<sup>1,4</sup>, 王赫生<sup>1,4</sup>, 龚建师<sup>1,4</sup>, 许乃政<sup>1,4</sup>, 檀梦皎<sup>1,4</sup>, 胡小雨<sup>2</sup>,  
戴飞虎<sup>3</sup>, 孟显超<sup>3</sup>, 朱春芳<sup>1,4</sup>, 周锴锬<sup>1,4</sup>, 李亮<sup>1,4</sup>

- (1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;
2. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029;
3. 阜宁县自然资源和规划局, 江苏 盐城 224400;
4. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为了查明苏北阜宁县潜水和承压水的水化学成因和补给特征, 文章采集区域内地表水、潜水、承压水(第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水)的水样, 结合数理统计分析、Piper 三线图、Gibbs 模型和水化学特征系数等手段, 分析了不同水体的氢氧同位素关系和矿化度分布、主要阴阳离子关系、水化学特征。结果表明: ① 阜宁县地下水总体为弱碱性, 潜水和承压水中阳离子质量浓度都呈现  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ , 潜水中阴离子质量浓度呈现  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ , 第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水中阴离子质量浓度皆呈现出  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ ; 潜水的总溶解固体(TDS)比第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水偏高, 局部区域的潜水为微咸水和咸水, 第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水的水质明显优于潜水。② 地下水的补给与大气降水相关, 潜水为现代降水补给, 第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水源于晚更新世或者更早时期的降水补给。③ 地下水水化学特性受降水影响较小, 主要受到水岩作用、阳离子交换作用控制, 其中第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水的盐分主要来源于硅酸盐岩风化, 人类活动对地下水化学组分影响相对较弱。

**关键词:** 阜宁县; 地下水; 水化学特征; 氢氧同位素; 水化学成因

**中图分类号:** X523

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2023)03-357-10

苏北阜宁县隶属江苏省盐城市, 位于淮河流域三角洲, 受黄河、淮河以及海洋相互作用影响, 区域内出露地层主要为海陆相交互沉积类型<sup>[1-2]</sup>。区内地下水资源丰富, 其中潜水水质相对较差, 20 世纪 90 年代前在农村开发使用多, 目前使用较少, 仅作为洗涤或牲畜喂养用水; 第Ⅰ承压水受沉积环境影响, 水质欠佳, 多为微咸水、咸水, 基本不开采; 第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ承压水是主要开采层, 曾经是该县城镇人民生活 and 工业生产的主要水源。由于不合理的开发利用, 阜宁县也面临着地下水超采及水质异常等问题<sup>[3-4]</sup>。

地下水化学成分是地下水环境的重要组成部分

分, 容易受到地层中矿物成分影响而改变。研究地下水化学特征和形成机制, 有助于了解区域地下水环境的演变过程<sup>[5-9]</sup>。环境稳定同位素可以用来示踪地下水的补给来源与补给环境, 研究地下水与其他水体间的关系<sup>[10-12]</sup>。许多学者对苏北地区特别是盐城沿海地区的地下水化学特征进行了大量的研究, 如研究盐城市地下水的水质控制因素问题<sup>[13]</sup>, 分析盐城市地下水的主要来源、水质状况以及人类活动影响问题<sup>[14-16]</sup>, 研究苏北滨海城市地下水咸化问题<sup>[17-18]</sup>等。但涉及阜宁县域范围内的水化学分析仍较少, 且采样相对稀疏、部分数据较老。

\* 收稿日期: 2023-03-15 修订日期: 2023-06-13 责任编辑: 袁静

**基金项目:** 中国地质调查局“长江下游及淮河流域水文地质与水资源调查监测(编号: DD20221756)”、“淮河南系水文地质与水资源调查监测(编号: DD20230428)”项目联合资助。

**第一作者简介:** 陶小虎, 1987 年生, 男, 工程师, 博士, 主要从事地下水环境研究。Email: taoxiaohu\_cgs@126.com。

**通信作者简介:** 王赫生, 1984 年生, 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水工环地质调查研究。Email: 411099641@qq.com。

阜宁县是江苏省自然资源调查监测试点项目中第一个县域范围内地下水资源调查试点县,为了更好地完成工作,亟需对县域范围内的水化学特征及成因作详细的调查和研究,以期全面掌握县域地下水资源数量、质量、空间分布和动态变化特征,为县域推进地下水资源统一调查评价提供参考。

本文以阜宁县为研究区,在调查采样的基础上,通过水文地球化学方法和稳定同位素(D和 $^{18}\text{O}$ )示踪方法,结合数理统计分析、Piper 三线图、Gibbs 模型和水化学特征系数等手段,分析阜宁县的地下水水化学特征及成因,以助力科学合理地管理地下水资源,为苏北地区高质量发展提供基础数据和技术支撑。

## 1 研究区概况

阜宁,古称黄浦,素有“江淮乐地”之称,是苏北重要的特色农业生产基地强县。阜宁县地处北亚热带向南暖温带的过渡带,且受海洋气候的影响,属于亚热带湿润季风气候。境内沟渠交错,河网密布,有废黄河、苏北灌溉总渠、淮河入海水道和通榆河 4 条基本平行的流域性河流,均呈西南至东北向。区域内地势平坦,自然坡度较小,由西向东微倾,沉积了巨厚的松散堆积物,属于堆积平原地貌。根据其成因类型可细分为 3 个地貌单元:在西部的废黄河以东、射阳河至沿岗河以西地区,黄河夺淮后的大量泥沙覆盖而形成黄泛区,属黄淮平原;在东北部,串场河至沿岗河以东地区属滨海平原,南部、西南部地势极其低洼,为中间低、四周高的碟形洼地,属里下河平原;县域南部、西南部,地势极其低洼,为中间低、四周高的碟形洼地,属里下河平原。

研究区以松散岩类孔隙水为主,根据地下水赋存条件及水力特性等,可分为潜水含水层、承压含水层(第Ⅰ、第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压含水层)。其中潜水含水层由全新统粉土、粉砂、粉质黏土、淤泥质粉质黏土等组成,厚度一般 $<20\text{ m}$ ,富水性较差,局部为咸水;第Ⅰ承压含水层由上更新统海陆交互相沉积物组成,岩性为粉土、粉砂夹粉质黏土或互层,厚 $20\sim 25\text{ m}$ ,富水性一般,水质较差;第Ⅱ承压含水层由中更新统河湖相沉积砂层组成,岩性以中细砂为主,厚 $20\sim 35\text{ m}$ ,富水性稍好;第Ⅲ承压含水层由下更新世河湖相沉积砂层组成,厚 $20\sim 30\text{ m}$ ,岩性以细中砂、中粗砂、细砂为主;第Ⅳ承压水含水层由新近纪盐城组上部河湖相沉

积砂层组成,岩性以中砂、中粗砂为主,厚 $20\sim 50\text{ m}$ 。第Ⅲ、第Ⅳ承压水含水层富水性较好,水质较优,然而由于长期区域性的大量开采,已形成了区域性地下水降落漏斗。

## 2 样品采集及测试方法

2021 年 1 月在阜宁县内对地表水和地下水进行水化学和氢氧稳定同位素采样,共计 72 组水样,取样点分布见图 1。地表水采样点水源主要为河流和湖泊,共 13 组。地下水采样点水源主要为在家庭潜水井、备用水源井,共 59 组。其中,潜水 32 组,第Ⅱ承压水 10 组,第Ⅲ承压水 9 组,第Ⅳ承压水 8 组。第Ⅰ承压水因无合适的井孔点,未能采集水样。此外,对第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水分别采集一组 $^{14}\text{C}$ 水样。采集水化学测试水样选用的是 2 个 1.5 L 的聚乙烯瓶,采集稳定同位素水样选用的是 550 ml 的聚乙烯瓶,采集 $^{14}\text{C}$ 水样所选用的是 3 个 25 L 的聚乙烯瓶。事先按照规范清洁采样瓶,并在采样前用样品水冲洗 2~3 次,采样时将瓶内装满水样。对于水化学测试水样,其中一瓶添加 1:1 浓硝酸 10 ml,另一瓶保持原水。尽可能排除样品中气泡,在瓶口缠绕生料带,保证气密性,防止空气影响样品的化学成分和同位素组成。取样完毕后在取样瓶上贴上统一编号,并进行现场水质简易检测。所有水化学和氢氧稳定同位素水样皆送往中国地质调查局



图 1 研究区及采样点分布图

Fig. 1 The study area and its sampling sites

南京地质调查中心实验室进行检测,其中无机水化学指标由 AFS-2202a 原子荧光光谱仪、Dionex-2500 离子色谱仪、Icap Q 电感耦合等离子体质谱仪、ICAP 6300Duo 电感耦合等离子体光谱仪、TU-1950 紫外-可见分光光度计等仪器测定,共 43 项,包括  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ ;氢氧稳定同位素值由德国 Finnigan 公司生产的 MAT 253 稳定同位素质谱仪测定。 $^{14}\text{C}$  水样由中国地质科学院水文地质环境研究所测试,检测仪器采用 GCT 6220 超低本底液体闪烁计数仪。所有检测方法 & 精度都符合自然资源部《DZ0064—2021 地下水水质分析方法》<sup>[19]</sup> 的要求。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 水化学特征及类型

##### 3.1.1 统计特征

研究区地下水主要离子质量浓度数理统计分析见表 1。地下水(潜水和第Ⅱ承压水、第Ⅲ承压水以及第Ⅳ承压水)pH 值为 7.16~8.48,为中弱碱性水。第Ⅱ承压水、第Ⅲ承压水以及第Ⅳ承压水均为淡水,TDS

最大值为 736 mg/L。潜水中淡水占比 50.0%,微咸水占比 46.9%,咸水占比 3.1%,TDS 最大值为 4 321 mg/L。地下水硬度相对较高,无软水;潜水中微硬水占比 15.6%,硬水占比 43.8%,极硬水占比 40.6%;第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水均为微硬水。潜水和第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水中阳离子呈现  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ ,主要阴离子均为  $\text{HCO}_3^-$ ,其中潜水中阴离子浓度呈现  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ ,承压水中阴离子浓度呈现  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ ;潜水的主要离子浓度平均值大于承压水中的离子浓度,潜水和承压水具有明显的差异。不同深度地下水中的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的质量浓度平均值具有明显的垂向差异,随着含水层深度的加深逐步变小。

结合表 1 中的变异系数上看,潜水中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  变异系数  $> 1$ ,属于强偏差,其他参数变异系数相对较小,表明其空间变异较大,可能受到人类活动或者环境因素影响。研究区第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水中极少数水样中检出  $\text{NO}_3^-$ ,导致变异系数异常;其他参数变异系数都  $< 1$ ,均为中等偏差或者弱偏差,表明第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水中化学参数空间变化性相对较小。

表 1 研究区地下水水化学特征统计结果

Table 1 Hydrochemical characteristic of the groundwater in the study area

类型	项目	pH 值	TDS	总硬度	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
潜水	平均值	7.81	1 129	469	250	116	633	7.18	26.0	245	80.7	64.9
	中值	7.81	999	410	141	110	629	3.68	11.0	186	77.9	60.1
	标准值	0.27	735	215	392	79.0	178	8.34	35.0	224	28.2	40.6
	最大值	8.48	4 321	1 170	2 084	380	1 110	31.8	123	1 250	160	213
	最小值	7.16	200	168	8.30	14.0	196	0	1.20	6.80	41.3	8.10
	变异系数	0.04	0.65	0.46	1.57	0.68	0.28	1.16	1.35	0.92	0.35	0.63
第Ⅱ承压水	平均值	8.00	489	194	42.3	52.2	406	0.49	2.24	122	44.3	20.3
	中值	8.01	494	183	32.7	50.0	479	0	1.70	135	44.1	20.0
	标准值	0.17	131	29.1	29.7	25.9	116	0.99	1.42	47.8	7.10	4.11
	最大值	8.28	736	246	115	96.4	504	2.48	5.30	202	52.5	28.9
	最小值	7.79	296	162	10.7	19.3	175	0	1.20	42.2	32.4	15.2
	变异系数	0.02	0.27	0.15	0.70	0.50	0.29	2.00	0.64	0.39	0.16	0.20
第Ⅲ承压水	平均值	8.00	546	207	36.2	61.7	476	0.24	1.47	141	42.1	24.7
	中值	7.99	565	214	48.2	67.5	487	0	1.40	149	39.5	27.4
	标准值	0.22	112	35	19.3	34.2	46.8	0.67	0.21	29.6	6.73	5.49
	最大值	8.33	666	261	59.1	109	544	2.15	1.80	174	52.8	31.6
	最小值	7.66	373	156	6.80	12.8	385	0	1.10	95.7	33.5	16.6
	变异系数	0.03	0.21	0.17	0.53	0.56	0.10	2.83	0.14	0.21	0.16	0.22
第Ⅳ承压水	平均值	7.93	453	191	27.6	42.9	411	0.25	2.06	111	41.3	21.4
	中值	7.95	432	187	17.4	36.7	433	0	1.48	107	39.5	20.6
	标准值	0.12	83.8	37.7	21.7	24.3	83.3	0.65	1.18	25.7	10.8	3.87
	最大值	8.09	650	277	66.5	104	479	1.96	4.80	154	62.4	29.6
	最小值	7.67	358	150	8.70	23.6	206	0	1.00	61.1	26.4	16.2
	变异系数	0.01	0.19	0.20	0.79	0.57	0.20	2.65	0.58	0.23	0.26	0.18

注:pH 和变异系数为无量纲,其余参数的单位为 mg/L, $\text{NO}_3^-$  浓度值以 N 计。

针对潜水中  $\text{TDS}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  (以 N 计) 空间变异性较大的特征, 采用克里金方法对其进行空间分析, 表明潜水  $\text{TDS}$  值为  $200 \sim 4\,321 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 大部分潜水  $\text{TDS}$  值  $< 2\,000 \text{ mg/L}$ , 即研究区域潜水多为淡水(图 2)。在新沟镇北部、阜城镇西部、郭墅镇(澳洋工业园)南部, 潜水的  $\text{TDS}$  值  $> 2\,000 \text{ mg/L}$ , 中心区域超过  $3\,000 \text{ mg/L}$ , 属于微咸水和咸水范畴。 $\text{Cl}^-$  浓度较高区域和  $\text{TDS}$  值较高范围分布一致。苏北平原历史上曾多次受到海侵影响, 阜宁县

地区有障壁沙坝, 局部地区潜水有海水残留或者盐岩存在, 可能导致现今的咸水水质类型。另外, 上述 3 个城镇为阜宁县城区和工业聚集区, 不能排除人为污染的影响。从图 2 中亦可看出, 在郭墅镇(澳洋工业园)  $\text{NO}_3^-$  浓度亦相对较高。在阜宁县最北部(羊寨镇),  $\text{NO}_3^-$  浓度最大, 东部和西部相对较小, 调查时发现北部废黄河附近多见禽类养殖场, 潜水也有可能受到牲畜排泄物的显著影响, 导致空间差异较大。

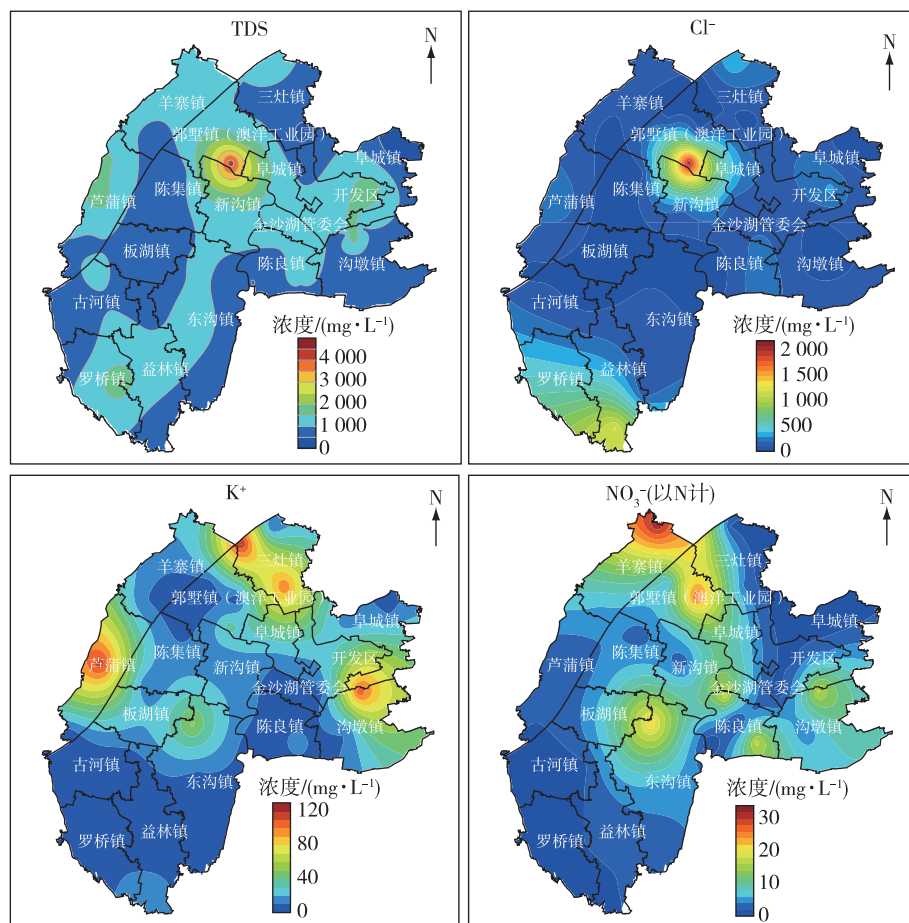


图 2 研究区潜水  $\text{TDS}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  浓度等值线图

Fig. 2 Geospatial distribution of  $\text{TDS}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  of the phreatic water in the study area

### 3.1.2 水化学类型

利用舒卡列夫分类方法和 Piper 三线图对地下水的类型进行分析, 结果见图 3。在阳离子三角图中, 区域内地下水(潜水和第 II 承压水、第 III 承压水以及第 IV 承压水)偏向于右下, 以  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  型为主。在阴离子三角图中, 地下水偏向于左下, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  型为主。在菱形中, 多数水样分布在 1 区和 3 区。因此, 研究区地下水主要为碱金属-重碳

酸型, 地下水水化学特征可能受盐岩溶滤作用控制。少量潜水水样(4 组)阴离子偏向于  $\text{Cl}^-$ , 主要为图 2 中  $\text{Cl}^-$  浓度较高区域的水样, 化学类型为  $\text{Na-Cl}$ , 推断该区域潜水化学特征受到了海水混合或者海相沉积影响。除 1 组承压水水样外, 所有承压水的水化学类型都为  $\text{Na-HCO}_3$ 。有少部分(4 组潜水、1 组第 II 承压水)水样阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 该类水样主要采集于阜宁县东南

区域。

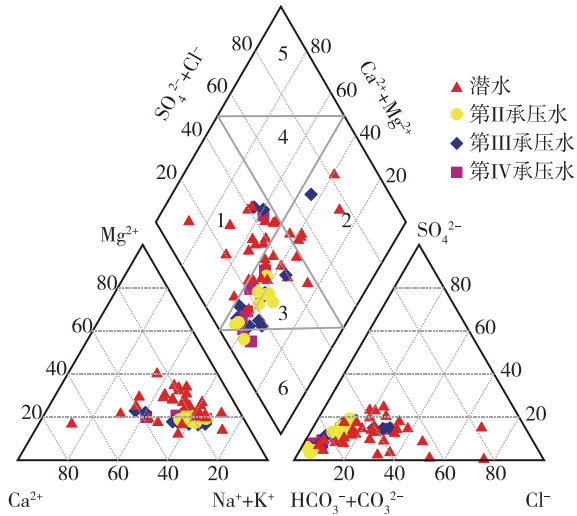


图3 研究区地下水的Piper三线图

Fig. 3 Piper diagram of groundwater in the study area

### 3.2 氢氧同位素组成分布特征

地下水的主要补给源一般都来源于大气降水、地表水的入渗,地下水中的稳定氢氧同位素组成主要受到大气降水、地表水入渗稳定氢氧同位素的组成和入渗后发生环境改变的影响<sup>[20-22]</sup>。研究表明,大气降水的稳定氢氧同位素组成 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值呈现线性关系,拟合后得到全球降水线(GMWL): $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ <sup>[23]</sup>。根据全球大气降水同位素监测网(GNIP)中南京地区数据,可拟合出南京的大气降水线方程(LMWL(南京)):  $\delta\text{D}=8.49\delta^{18}\text{O}+17.7$ 。根据研究区水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 数据绘制散点图,并与GMWL和LMWL(南京)做对比(图4)。

由图4可知,地下水样品和地表水样品都位于全球大气降水线附近,潜水、地表水和第II、第III、第IV承压水的点均位于南京的大气降水线(LMWL(南京))的下方。潜水和地表水表现相对一致,说明潜水和地表水的水力联系密切。第II、第III、第IV承压水相对一致,在图中基本呈现出聚集分布特点,表明第II、第III、第IV承压水的来源相近。潜水和第II、第III、第IV承压水的 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值普遍比潜水和地表水偏负,具有明显的分层性。这是由于阜宁县潜水径流速度快,易接受大气降水的补给,且和地表水之间联系强,第II、第III、第IV承压水可更新能力弱,难以直接接受现代降雨补给。

本次对阜宁县第II、第III、第IV承压水的 $^{14}\text{C}$ 年

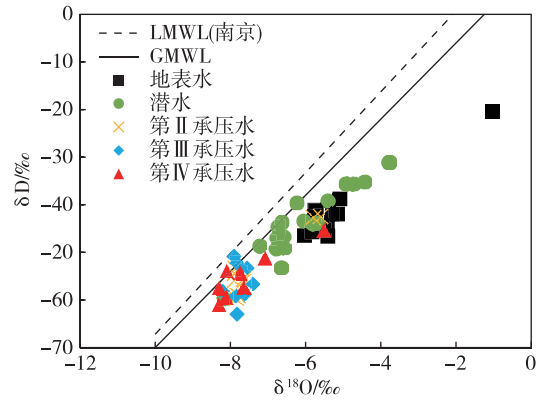


图4 研究区大气降水、地表水和地下水的 $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 分布图

Fig. 4 Plot of  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  of atmospheric precipitation, surface water and groundwater in the study area

龄测试结果为26.27~35.53 ka,表明其补给可能来源于晚更新世或者更早时期的降水补给。盐城地区潜水中氡浓度和地表水相近,而承压水中几乎不含有氡<sup>[14]</sup>,说明第II、第III、第IV承压水无现代降水补给,因此可以确认第II、第III、第IV承压水为古水。

氡盈余(d)常被用来反映地下水中的补给水体受到蒸发作用的强度<sup>[24-25]</sup>。采用公式 $d=\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O}$ 计算得到研究区的氡盈余值,其中地表水的氡盈余值为 $-12.18\text{‰}\sim 4.86\text{‰}$ ,平均值为 $-0.18\text{‰}$ ;潜水的氡盈余值为 $-0.98\text{‰}\sim 10.22\text{‰}$ ,平均值为 $4.59\text{‰}$ ;第II承压水的氡盈余值为 $2.30\text{‰}\sim 9.54\text{‰}$ ,平均值为 $5.19\text{‰}$ ;第III承压水的氡盈余值为 $-0.42\text{‰}\sim 12.33\text{‰}$ ,平均值为 $5.66\text{‰}$ ;第IV承压水的氡盈余值为 $-1.26\text{‰}\sim 10.93\text{‰}$ ,平均值为 $5.81\text{‰}$ 。上述氡盈余值都小于全球大气降水的平均氡盈余值(10‰),这表明研究区水体中的大气降水补给都受到了一定程度的蒸发作用的影响。从地表水到潜水、第II、第III、第IV承压水的平均氡盈余值来看,随着深度的增加,氡盈余值越大,表明大气降水补给不仅受到了蒸发影响,可能还受到水岩作用的影响。

### 3.3 水化学特征成因分析

Gibbs模型可以将天然水组分的控制因素分为大气降水控制型、岩石风化控制型和蒸发-结晶控制型<sup>[26]</sup>。将研究区采样点的水化学数据绘制于Gibbs模型中(图5),可以看出大部分地下水和地表水指向水岩作用区域和蒸发作用区域,表明岩石风化作用和蒸发-



结晶作用主导了本区水文地球化学过程。潜水受蒸发作用影响最大,河水受蒸发作用影响相对较小,并偏向

降水作用影响。第Ⅱ、第Ⅲ和第Ⅳ承压水更偏向于岩石风化控制型,表明它们主要受到水岩作用。

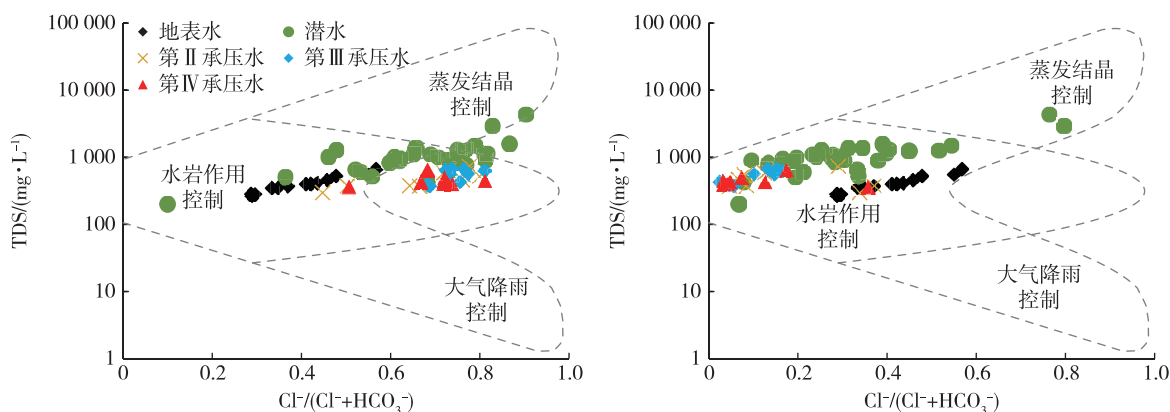


图5 阜宁县地下水水化学 Gibbs 图

Fig. 5 The Gibbs diagram of hydrochemistry of groundwater in Funing County

钠氯系数  $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-}$  是单位体积水体中钠离子与氯离子的当量比值,可以一定程度上反映地下水的成因,海水的钠氯系数为 0.85<sup>[20]</sup>。在钠氯系数  $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-}$  与  $Cl^-$  质量浓度的相关性图(图 6)上,除少数潜水外,大多数潜水以及第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水的钠氯系数都  $>0.85$ ,不具有明显的古海水特征。绝大多数地下水的钠氯系数都  $>1$ ,数值偏高,这是因为含水层(特别是第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压含水层)发生了含钠硅酸盐的溶解或者阳离子交换,将矿物颗粒吸附的  $Na^+$  交换到地下水中,从而导致它们的钠氯系数偏高。统计分析表明,阜宁县潜水及第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水的钠氯系数值分别为 0.91~7.91(平均值 2.24)、1.23~12.93(平均值 6.40)、4.16~26.63(平均值 8.96)和 1.40~22.03(平均值 10.79)。从平均值来看,阜宁县地下水的钠氯系数有分层现象,且埋深越深,钠氯系数越高。此外,从图 6 中还可以看出,随着  $Cl^-$  浓度的增加,地下水的钠氯系数值减小,并逐渐趋向于海水值,表明  $Cl^-$  浓度较高区域的地下水的盐分有可能与残留海水混合有关。

钙镁系数  $\gamma_{Ca^{2+}}/\gamma_{Mg^{2+}}$  也可以用来反映地下水化学成因,一般在海水中的值约为 5.5<sup>[14]</sup>。在  $\gamma_{Ca^{2+}}/\gamma_{Mg^{2+}}$  与  $Cl^-$  质量浓度的相关性图(图 7)上,研究区潜水、第Ⅱ、第Ⅲ和第Ⅳ承压水的  $\gamma_{Ca^{2+}}/\gamma_{Mg^{2+}}$  值分别为 0.25~3.02、0.55~1.00、0.72~1.27 和 0.51~1.25,均小于相应的海水值 5.5。因此,根据钙镁系数,基本可以排除前面提到的阜宁县的潜水和第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水是受到现代海水入侵形成或为古海水

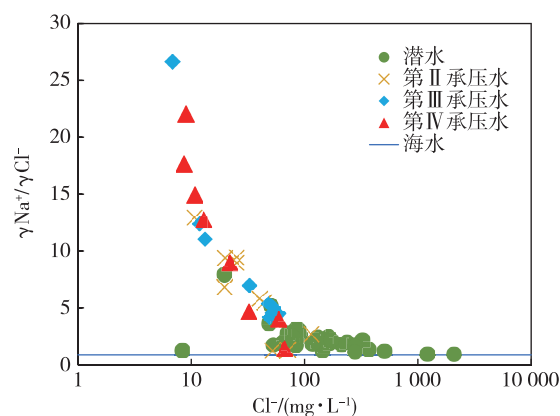


图6 阜宁县地下水  $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-}$  与  $Cl^-$  质量浓度相关性图

Fig. 6 Relation between the  $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-}$  and mass concentration of  $Cl^-$  of the Funing groundwater

残留混合形成的推断。

### 3.4 地下水水化学组分的人为影响分析

地下水中  $NO_3^-$  含量  $>10$  mg/L(以 N 计)时即不适用于人类饮用<sup>[27]</sup>。本区潜水水样中 1 组未能检出  $NO_3^-$ , 23 组的  $NO_3^-$  含量为 0.02~10 mg/L; 8 组水样中  $NO_3^-$  含量  $>10$  mg/L, 含量最高达到 31.8 mg/L。第Ⅱ承压水中 8 组未检出  $NO_3^-$ , 另 2 组水样的  $NO_3^-$  含量分别为 2.48 mg/L 和 2.46 mg/L; 第Ⅲ承压水水样中 1 组检出  $NO_3^-$ , 含量为 2.14 mg/L; 第Ⅳ承压水水样中 1 组检出  $NO_3^-$ , 含量为 1.96 mg/L。这表明研究区第Ⅱ、第

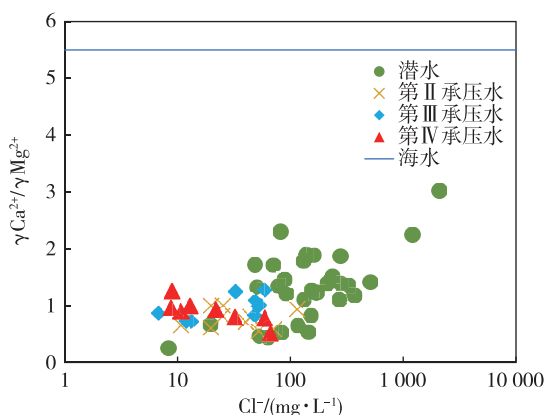


图7 阜宁县地下水  $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{Cl}^-$  质量浓度相关性图

Fig. 7 Relation between the  $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Mg}^{2+}$  and mass concentration of  $\text{Cl}^-$  of the Funing groundwater

Ⅲ、第Ⅳ承压水中  $\text{NO}_3^-$  都符合国家生活饮用水卫生标准,而25%的潜水样本中  $\text{NO}_3^-$  超标,推测可能是受到人类活动影响或者地质环境影响。

一般地下水受到人类活动影响时,其  $\gamma\text{NO}_3^-/\gamma\text{Na}^+$  与  $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Na}^+$  的比值会升高<sup>[28-30]</sup>。由  $\gamma\text{NO}_3^-/\gamma\text{Na}^+$  与  $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Na}^+$  的关系图(图8)可以看出,本区地下水中  $\gamma\text{NO}_3^-/\gamma\text{Na}^+$  与  $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Na}^+$  的比值都较低,基本集中于硅酸盐岩和盐岩风化区附近,而远离人类活动区,这说明阜宁县地下水整体上主要是自然状况下的水岩作用的化学演化,可排除人类活动的影响。此外,由于大部分第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水中未能检出,表明它们的盐分主要受硅酸盐岩风化的影响。

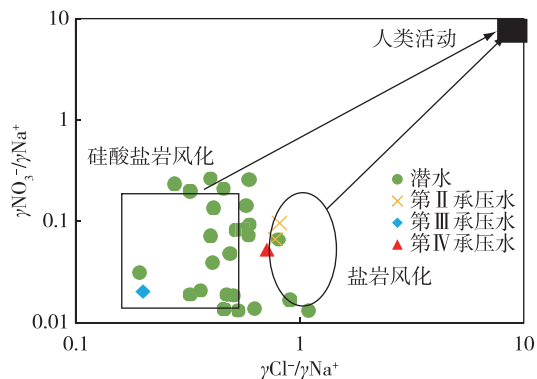


图8 阜宁县地下水中  $\gamma\text{NO}_3^-/\gamma\text{Na}^+$  与  $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Na}^+$  相关性图

Fig. 8 Relation between the  $\gamma\text{NO}_3^-/\gamma\text{Na}^+$  and  $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Na}^+$  of Funing groundwater

## 4 结论

(1)阜宁县潜水的TDS比第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水高,局部区域的潜水为微咸水和咸水,表明第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水的水质明显优于潜水。该区地下水化学类型主要为  $\text{Na-HCO}_3$ , 局部地区潜水的化学类型为  $\text{Na-Cl}$ 。

(2)研究区水样的氢氧同位素和 $^{14}\text{C}$ 年龄测试结果表明,潜水应为现代降水补给,第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水的来源相近,为晚更新世或者更早时期的降水补给。

(3)研究区地下水水化学特征受降水影响较小,主要受到水岩作用、阳离子交换作用控制,其中第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ承压水的盐分主要来源于硅酸盐岩风化,人类活动对地下水化学组分影响相对较弱。

## 参考文献

- [1] 陈万里,顾洪群.江苏第四纪海侵及近代海岸变迁研究[J].江苏地质,1998,22(A12):45-50.  
CHEN W L, GU H Q. Quaternary transgression and modern costal changes in Jiangsu[J]. Jiangsu Geology, 1998, 22(A12): 45-50.
- [2] 薛春汀,刘健,孔祥淮.全新世淮河三角洲初步研究[J].第四纪研究,2010,30(5):892-901.  
XUE C T, LIU J, KONG X H. Preliminary study of holocene Huaihe river delta on west coastal plain of Yellow Sea, China [J]. Quaternary Sciences, 2010, 30 (5): 892-901.
- [3] 黄敬军,陆华.江苏沿海地区深层地下水开发利用现状及环境地质问题[J].水文地质工程地质,2004,31(6):64-68.  
HUANG J J, LU H. Aquifers and environmental geological problems in the coastal areas in Jiangsu Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(6): 64-68.
- [4] 康博.江苏沿海地区地下水演化与合理开发利用研究[D].长春:吉林大学,2017.  
KANG B. The study of groundwater evolution and rational exploitation and utilizing in Jiangsu coastal area[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [5] 李亮,龚建师,王赫生,等.安徽省亳州市浅层地下水水化学特征及成因机理[J/OL].(2023-02-09)[2023-04-03].[https://9.cglhub.com/detail\\_38502727e7500f26c36d01340c0bf98c42552f13171bea581921b0a3ea255101fc](https://9.cglhub.com/detail_38502727e7500f26c36d01340c0bf98c42552f13171bea581921b0a3ea255101fc)

- 1cf1fbb4666ae6fe8645b7c867bb740397903f685bfc4e8ef4bd4b89669aa6c9d2a74ed67614001ccc2d2ce9375a4e?.
- LI L, GONG J S, WANG H S, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Bozhou City, Anhui Province[J/OL]. (2023-02-09) [2023-04-03]. [https://9.cglhub.com/detail\\_38502727e7500f26c36d01340c0bf98c42552f13171bea581921b0a3ea255101fc1cf1fbb4666ae6fe8645b7c867bb740397903f685bfc4e8ef4bd4b89669aa6c9d2a74ed67614001ccc2d2ce9375a4e?](https://9.cglhub.com/detail_38502727e7500f26c36d01340c0bf98c42552f13171bea581921b0a3ea255101fc1cf1fbb4666ae6fe8645b7c867bb740397903f685bfc4e8ef4bd4b89669aa6c9d2a74ed67614001ccc2d2ce9375a4e?).
- [6] 王晓曦,王文科,王周锋,等.滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J].水文地质工程地质, 2014, 41(1): 25-33, 73.
- WANG X X, WANG W K, WANG Z F, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of river water and groundwater along the downstream Luanhe River, northeastern China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 25-33, 73.
- [7] 金阳,姜月华,周权平,等.丹阳市吕城地区浅层地下水演化特征及成因[J].华东地质, 2021, 42(4): 475-482.
- JIN Y, JIANG Y H, ZHOU Q P, et al. Evolution characteristics and Genesis of shallow groundwater in Lvcheng area of Danyang city[J]. East China Geology, 2021, 42(4): 475-482.
- [8] 张春潮,侯新伟,李向全,等.三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制[J].水文地质工程地质, 2021, 48(3): 62-71.
- ZHANG C C, HOU X W, LI X Q, et al. Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 62-71.
- [9] 李志红,胡伏生,周文生,等.银川地区承压水水化学特征及控制因素[J].水文地质工程地质, 2017, 44(2): 31-39.
- LI Z H, HU F S, ZHOU W S, et al. Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of confined water in Yinchuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 31-39.
- [10] WEN Y, QIU J H, CHENG S, et al. Hydrochemical evolution mechanisms of shallow groundwater and its quality assessment in the Estuarine Coastal Zone: a case study of Qidong, China[J]. Int. J. Environ. Res. Public Health, 2020, 17: 3382.
- [11] 钱会,马致远.水文地球化学[M].北京:地质出版社, 2005.
- QIAN H, MA Z Y. Hydrogeochemistry [M]. Beijing: The Geological Publishing House, 2005.
- [12] 陈建生,韩莉文,马芬艳.苏北平原隐伏玄武岩地下水研究[J].河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 1-8.
- CHEN J S, HAN L W, MA F Y. Study on the concealed basalt groundwater in Subei Plain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 1-8.
- [13] 卞锦宇,方瑞.盐城市地下水水质控制因素分析[J].水文地质工程地质, 2003, 30(5): 56-60.
- BIAN J Y, FANG R. Analysis of controlling factors of groundwater quality in Yancheng area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(5): 56-60.
- [14] 张岩,付昌昌,毛磊,等.江苏盐城地区地下水水化学特征及形成机理[J].长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 598-605.
- ZHANG Y, FU C C, MAO L, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of the groundwater in Yancheng, Jiangsu province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(4): 598-605.
- [15] 王建,张华兵,许君利,等.盐城地区地下水溶质来源及其成因分析[J].环境科学, 2022, 43(4): 1908-1919.
- WANG J, ZHANG H B, XU J L, et al. Provenance of groundwater solute and its controlling factors in Yancheng area[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1908-1919.
- [16] 王建,茅悦,许君利,等.江苏盐城地区地下水质量评估与成因分析[J].安徽农业大学学报, 2023, 50(1): 116-125.
- WANG J, MAO Y, XU J L, et al. Groundwater quality and cause analysis in Yancheng area, Jiangsu Province[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2023, 50(1): 116-125.
- [17] 刘彦,龚绪龙,李进,等.苏北海岸带浅部弱透水层孔隙水咸化过程[J].水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 57-62, 71.
- LIU Y, GONG X L, LI J, et al. Salinization process of shallow aquitard porewater in north Jiangsu coastal zone[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(1): 57-62, 71.
- [18] 侯国华,高茂生,党显璋,等.江苏盐城滨海地区浅层地下水咸水的水盐来源及咸化成因[J].海洋地质与第四纪地质, 2020, 41(4): 48-59.
- HOU G H, GAO M S, DANG X Z, et al. Water and salt sources and salinization of shallow saline groundw-



- ater in the coastal area of Yancheng, Jiangsu [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 41(4): 48-59.
- [19] 中华人民共和国自然资源部. DZ0064—2021 地下水质分析方法[S].  
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. DZ 0064—2021 Methods for analysis of groundwater quality[S].
- [20] 周慧芳, 谭红兵, 张西营, 等. 江苏南通地下水补给源、水化学特征及形成机理[J]. *地球化学*, 2011, 40(6): 566-576.  
ZHOU H F, TAN H B, ZHANG X Y, et al. Recharge source, hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Nantong, Jiangsu Province [J]. *Geochimica*, 2011, 40(6): 566-576.
- [21] 苟富刚, 龚绪龙, 李进, 等. 江苏滨海平原微承压水层位水土体含盐特征及其相关性分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(3): 72-76.  
GOU F G, GONG X L, LI J, et al. Salt characteristics and correlation analysis of soil and water body of micro confined water layer in Jiangsu coastal plain[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2017, 28(3): 72-76.
- [22] 刘春雷, 李亚松, 曹胜伟, 等. 福建省厦门市水热型地热系统地球化学特征及成因模式[J]. *华东地质*, 2023, 44(2): 128-140.  
LIU C L, LI Y S, CAO S W, et al. Geochemical characteristics and genetic model of hydro-geothermal system in Xiamen City, Fujian Province[J]. *East China Geology*, 2023, 44(2): 128-140.
- [23] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133: 1702-1703.
- [24] 杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 等. 基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 154-162.  
YANG N, SU C L, ZENG H B, et al. Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 154-162.
- [25] 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 等. 长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 166-172.  
WANG S Y, HE X B, DING Y J, et al. Characteristics and influencing factors of stable hydrogen and oxygen isotopes in groundwater in the permafrost region of the source region of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 166-172.
- [26] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB5749—2022 生活饮用水卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 1-10.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB5749—2022 Standards for drinking water quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022: 1-10.
- [28] FAN B L, ZHAO Z Q, TAO F X, et al. Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: a comparison among the upstream, midstream and downstream[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 17-26.
- [29] ROY S, GAILLARDET J, ALLEGRE C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(9): 1277-1292.
- [30] 郑涛, 焦团理, 胡波, 等. 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(2): 766-775.  
ZHENG T, JIAO T L, HU B, et al. Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the central Guohe River basin[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 766-775.

## Hydrochemical characteristics and genesis of the groundwater in Funing County, Northern Jiangsu

TAO Xiaohu<sup>1,4</sup>, WANG Hesheng<sup>1,4</sup>, GONG Jianshi<sup>1,4</sup>, XU Naizheng<sup>1,4</sup>, TAN Mengjiao<sup>1,4</sup>,  
HU Xiaoyu<sup>2</sup>, DAI Feihu<sup>3</sup>, MENG Xianchao<sup>3</sup>, ZHU Chunfang<sup>1,4</sup>, ZHOU Kaie<sup>1,4</sup>, LI Liang<sup>1,4</sup>

(1. *Nanjing Center, China Geology Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*;

2. *Water Resources Service Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu, China*;

3. *Funing Bureau of Natural Resources and Planning, Yancheng 224400, Jiangsu, China*;

4. *Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China*)

**Abstract:** For investigating hydrochemical evolution and recharge characteristics of the groundwater in Funing County, northern Jiangsu Province, the study collected various water samples from regional surface water, phreatic water and confined water (the II, III and IV confined water) and analyzed their hydrogen and oxygen isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$ ) relations, distributive rules of water salinity, major ions' relations and hydrochemical characteristics in combination of mathematical statistical analysis, Piper three-line diagram, Gibbs model and hydrochemical characteristic coefficient. The results show that: ① the groundwater in Funing is weakly alkaline in general, mass concentration of cations in both phreatic water and confined water are distributed in the sequence of  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ ; those of anions in the phreatic water presents as  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$  while that in the II, III and IV confined water presents as  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ ; The total dissolved solids (TDS) of the phreatic water is relatively higher than that of the II, III and IV confined water, with locally brackish and saline water; The water quality in the confined area is significantly better than that in the phreatic area. ② The groundwater recharge in the study area is related to the atmospheric precipitation. The phreatic water is closely associated with modern precipitation while the II, III and IV confined water mainly sourced from precipitation replenishment in Late Pleistocene or even earlier; ③ The chemical characteristics of groundwater in the region are less affected by precipitation and more controlled by water rock interaction and cation exchange, among which the salinity of the II, III, and IV confined water mainly come from the weathering of silicate rocks, and human activities have slight impact on the chemical composition of the groundwater.

**Key words:** Funing County; groundwater; hydrochemical characteristics; hydrogen and oxygen isotopes; hydrochemical genesis