

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.04.013

引用格式: 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.

丹阳市吕城地区浅层地下水演化特征及成因

金阳^{1,2,3}, 姜月华^{2,3}, 周权平^{2,3}, 雷廷², 贾军元², 杨国强^{2,3}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;
3. 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: 在野外调查和取样分析的基础上, 运用统计学、Piper 三线图、Gibbs 模型及相关性分析等方法对丹阳市吕城地区浅层地下水水化学特征、类型及成因进行了分析。结果表明: 该区浅层地下水 pH 值变化较小, 属于中性偏弱碱性水; 阳离子中 Ca^{2+} 、 Na^{+} 占主导优势, 阴离子中 HCO_3^{-} 占绝对优势; 水化学类型主要有 HCO_3-Ca 型、 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型。近年来浅层地下水 TDS 呈现降低趋势, 表明存在一定程度的淡化现象。分析发现, 第四纪沉积环境、岩石风化作用、水文地质条件与人类经济活动等综合作用是该区浅层地下水演化特征及其差异性的主要原因。

关键词: 浅层地下水; 水化学; 成因分析; 吕城地区

中图分类号: P641.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2021)04-475-08

水资源是保障国家城乡居民用水、支撑社会经济发展的重要战略资源, 在维持生态系统安全和生态环境建设方面具有重要作用^[1]。天然地下水的化学成分是水在漫长的地质历史中不断与大气圈、生物圈、岩石圈等周围介质发生物质、能量、信息交换作用形成的, 研究地下水的组分特征有助于分析地下水演变规律, 揭示地球化学环境及人类经济活动对地下水造成的影响^[2]。浅层地下水是水循环的重要组成部分, 以往对地下水的研究多针对深层地下水^[3-5], 对浅层地下水的关注程度还不够。随着社会经济的发展, 浅层地下水的价值愈来愈被重视, 杨巧凤等^[6]通过研究常规离子和氢氧稳定同位素特征, 明确了深圳沿海带浅层地下水与海水的关系及分布原因; 刘林等^[7]应用多元统计分析法研究马鞍山地区浅层地下水, 成功筛选出人为活动对地下水影响的表征指标; 周锴锷等^[8]分析了淮河流域平原区浅层地下水中铁锰特征和成因, 提出改良建议。

吕城地区居民饮用水以地表长江水为主, 但浅层地下水仍有少数居民偶尔饮用, 且是大多数居民日常洗涤用水的主要来源。随着工农业快速发展, 该区地

下水受到不同程度的影响, 但针对该区浅层地下水水化学演化特征的相关研究尚未进行。因此, 本文通过野外现场调查和采样测试分析, 研究该区浅层地下水演化特征, 并分析其成因, 以期对地下水资源环境管理及合理开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

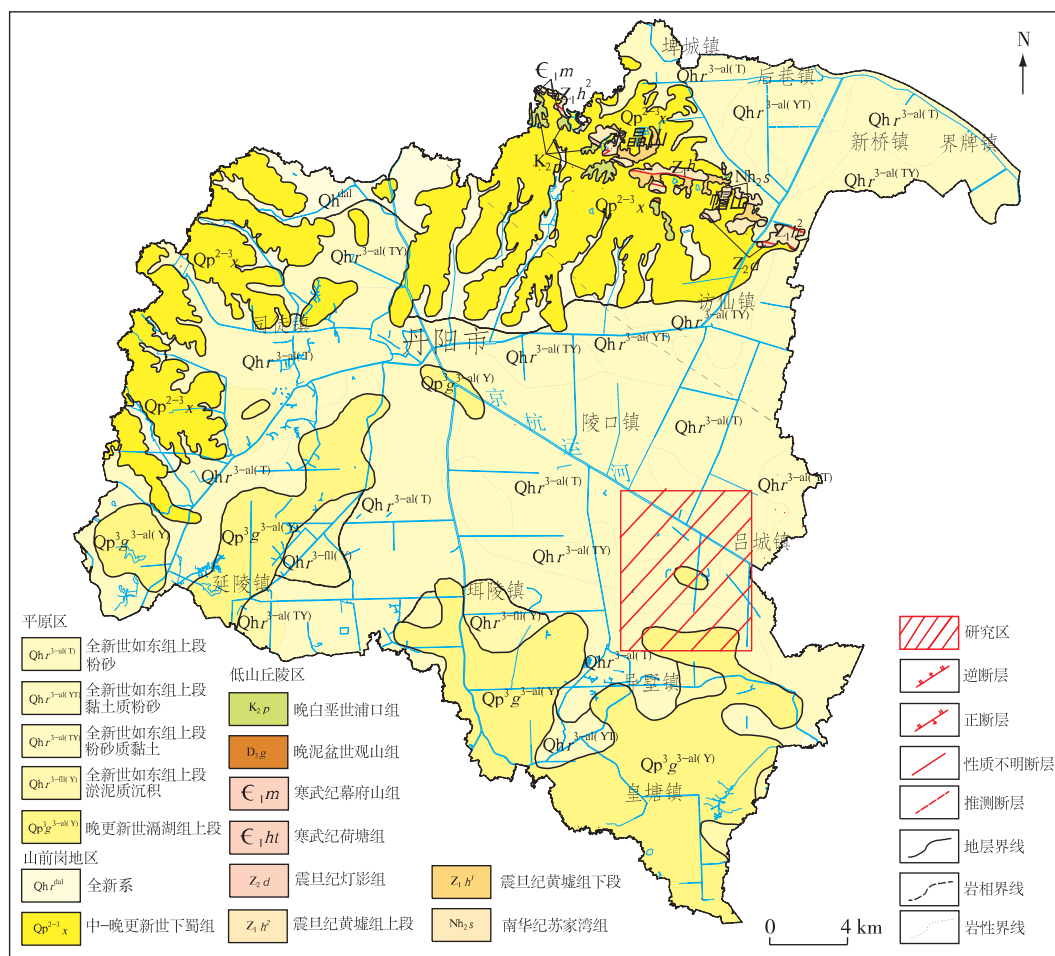
吕城地区位于江苏省丹阳市东部, 长江下游南岸, 属中纬度亚热带湿润季风气候区, 四季分明, 降水充沛, 日照充足, 雨热同期, 多年平均降水量 1 056.5 mm, 多年平均气温 14.9℃。研究区地势平坦开阔, 水网密布, 前第四纪地层由老到新依次为二叠系、三叠系、白垩系、古近系和新近系, 第四系广泛分布。基岩被第四系覆盖, 均未出露, 地表主要出露全新世如东组, 岩性以黄褐色粉质黏土、灰黄色粉土为主(图 1)^[9]。

研究区属太湖冲-湖积平原, 地下水类型主要为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水及碳酸盐岩类岩溶水。其中孔隙水广泛分布于研究区第四系中, 裂隙水

* 收稿日期: 2020-03-29 修订日期: 2020-05-08 责任编辑: 叶海敏

基金项目: 中国地质调查局“长江经济带地质资源环境综合评价(编号: DD20190260)”项目资助。

第一作者简介: 金阳, 1990 生, 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事水工环地质调查及研究工作。Email: sdkjdxjy@163.com。

图1 研究区地质简图^[10]Fig. 1 Geological sketch map of the study area^[10]

多分布在二叠系、白垩系隐伏岩石节理裂隙中。浅层地下水主要补给来源为大气降水垂直入渗和灌溉水回渗,水位埋深呈现明显季节性变化,枯水期和麦作期水位埋深 >1.5 m,丰水期和稻作期水位埋深一般 <0.5 m。河流、水塘等侧向补给为次要补给来源,人工开采、植物蒸发蒸腾、向地表水体排泄及越流补给深层地下水为主要排泄途径。

2 技术方法

2.1 样品采集及测试

按照《DD 2008—01 地下水污染地质调查评价规范》^[11]要求,以“先调查,后采样”为原则,充分利用现有机(民)井,对研究区具有代表性的井点进行取样测试,采样前先抽水一段时间,以保证样品取自潜水含水层原水。采样现场用便携式 GPS 对采样点坐标进

行准确定位,并记录包气带岩土体特征、采样井类型、周边环境及农田分布等详细信息。本次共采集浅层地下水样品 15 组,采样点位置分布如图 2 所示。

浅层地下水样品的分析测试工作在国土资源部华东矿产资源监督检测中心完成,测试指标共 28 项,包括常量元素 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- ,微量元素 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 I^- 等。考虑到水样运输过程中 pH 值、TDS(溶解性总固体)、温度等指标会随时间而发生变化,因此采用便携式水质分析仪在现场完成指标测试。本文主要分析 pH 值、TDS、常量元素和“三氮”(NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N)的水化学特征。

2.2 数据分析方法

在系统采样、科学测试的基础上,利用 SPSS 软件对样品测试结果进行统计分析,AquaChem 水化学软件绘制 Piper 三线图,并对水化学组分进行

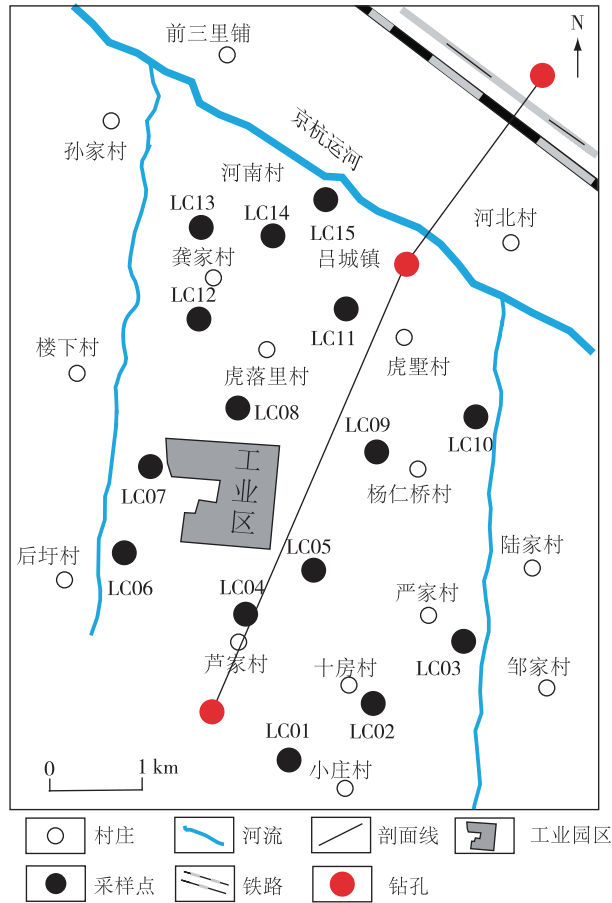


图 2 浅层地下水采样点分布图
Fig. 2 Distribution map of shallow groundwater sampling points

Spearman 相关性分析,进而确定研究区浅层地下水水化学类型和特征,应用 Gibbs 模型探讨研究区浅层地下水演化成因。

3 结果与讨论

3.1 水化学组分统计分析

对浅层地下水样品数据各指标做数理统计分析,由统计结果(表 1)可知,研究区浅层地下水 pH 值为 6.750~7.625,平均值为 7.223,变异系数较小,整体属于中性偏弱碱性水。TDS 值为 284~884 mg/L,属于淡水。

浅层地下水阳离子浓度平均值中, Ca^{2+} 含量占主要优势,各阳离子浓度整体表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+}$;阴离子浓度平均值中, HCO_3^{-} 占优势,分别是 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 的 5.2 倍和 4.79 倍,整体表现为 $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-}$ 。六大阴阳离子变异系数为 0.258~0.575,说明研究区各离子浓度空间分布离散性较大,存在局部富集现象。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^{-} 的变异系数相对较小,表明浅层地下水中三者含量相对稳定; HCO_3^{-} 的平均值和标准偏差都较大,而变异系数较小,反映其绝对含量大,但相对含量差别较小,是浅层地下水中的主要阴离子; Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^{+} 的变异系数相对较大,表明它们在浅层地下水中含量变化大,属于随环境因素而变化的敏感因子^[12]。

表 1 浅层地下水化学组分统计结果

Table 1 Statistical results of chemical composition of shallow groundwater

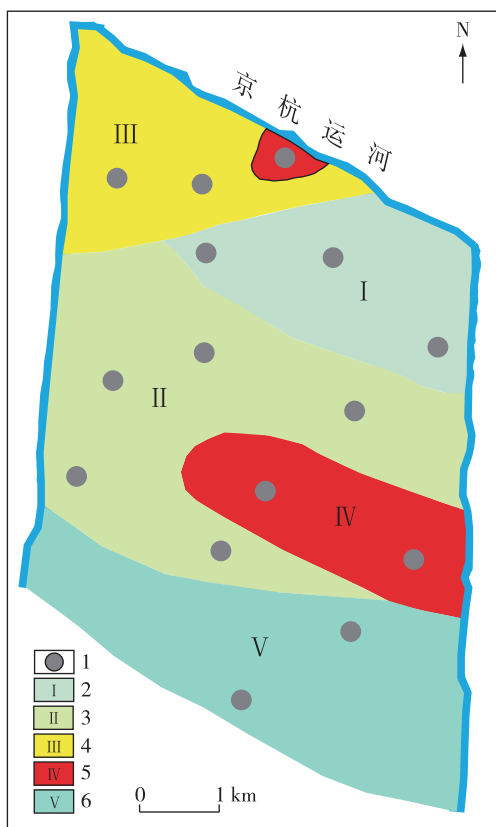
| 指标 | pH 值 | 常规离子/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | | | | | | TDS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 三氮以 N 计算/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | | |
|------|-------|--|------------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---|--|-------------------|-------------------|
| | | Na^{+} | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Cl^{-} | SO_4^{2-} | HCO_3^{-} | | NO_3^{-} | NO_2^{-} | NH_4^{+} |
| 最大值 | 7.625 | 191.796 | 158.737 | 37.936 | 151.191 | 186.584 | 604.247 | 884.000 | 26.416 | 0.356 | 1.516 |
| 最小值 | 6.750 | 29.509 | 49.874 | 13.630 | 26.118 | 0.106 | 158.277 | 284.000 | 0.012 | 0.000 | 0.000 |
| 平均值 | 7.223 | 75.495 | 100.952 | 27.448 | 71.227 | 77.133 | 370.183 | 590.130 | 6.155 | 0.061 | 0.169 |
| 标准偏差 | 0.237 | 41.722 | 28.510 | 7.094 | 40.932 | 43.062 | 126.663 | 164.258 | 7.085 | 0.112 | 0.387 |
| 变异系数 | 0.033 | 0.553 | 0.282 | 0.258 | 0.575 | 0.558 | 0.342 | 0.278 | 1.151 | 1.836 | 2.291 |

“三氮”浓度统计结果表明,硝态氮($\text{NO}_3^{-}\text{-N}$)是该区浅层地下水中溶解氮的主体,其含量远大于氨态氮($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2^{-}\text{-N}$)。三者的变异系数均较大,说明研究区“三氮”含量分布不均,具有明显的地域性差异。通常情况下,天然浅层地下

水多为中性,不存在促使“三氮”沉淀的离子,但在硝化反应作用下,不稳定的氨态氮和亚硝态氮被氧化成相对稳定的硝态氮^[13],研究区地下水呈中性偏弱碱性,且浅层溶解氧含量相对高等因素均有利于向硝态氮转化。

3.2 水化学类型及其分布特征

研究区北侧为京杭运河,东、西两侧为季节性河流,可看作天然水文地质单元,浅层地下水的水化学类型比较复杂。采用舒卡列夫分类法,研究区水化学类型可分为5种,主要以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型为主,各水化学类型的分布情况如图3所示。东北部Ⅰ区为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型;中部Ⅱ区为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;东部Ⅳ区为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;西北部Ⅲ区总体为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型,仅 LC15 井附近为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;南部Ⅴ区为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型。



1.采样点;2. $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型;3. $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;4. $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;5. $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;6. $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型

图3 研究区水化学类型分布图

Fig. 3 Distribution map of hydrochemical types in the study area

运用 Piper 三线图^[14-15]分析研究区浅层地下水的六大常规阴、阳离子变化,进一步查明该区浅层地下水化学特征。由图4可以看出,样品点主要处于5区,对于5区来说,地下水水化学性质以碱土金属和

弱酸为主^[16]。浅层地下水中阴离子以 HCO_3^- 为主, SO_4^{2-} 、 Cl^- 偏少;阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主, Mg^{2+} 较少。

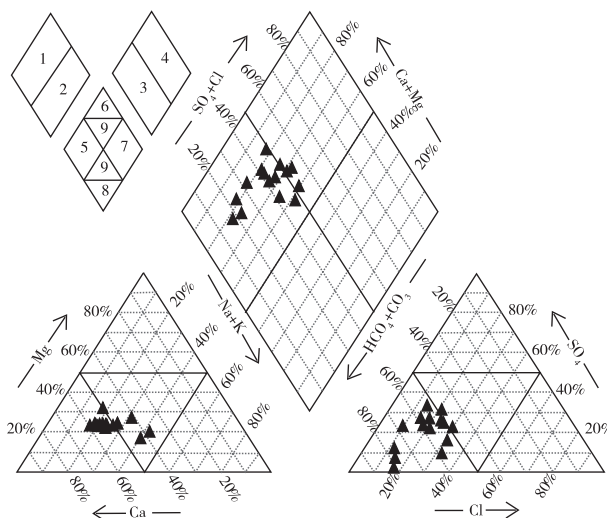


图4 浅层地下水水化学类型 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagram of hydrochemical types of shallow groundwater

3.3 水化学相关性分析

利用相关性分析,可以揭示地下水各离子组分之间的相似性、相异性及来源的一致性和差异性^[17]。计算研究区浅层地下水的 Spearman 相关系数,结果如表2所示。 Cl^- 与 Na^+ 、 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 呈显著相关,而 Mg^{2+} 与 pH 值呈显著负相关,推测其原因可能是地下水中的 Mg^{2+} 随着 pH 值的升高而转化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀后从地下水中析出。TDS 与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 的相关性均为显著。另外, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 与 Na^+ 、 Cl^- 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相关性较好,“三氮”之间相关性不显著。

3.4 水化学特征成因

太湖平原西北部地区第四纪以来共经历3次海侵,分别为晚更新世早期太湖海侵、晚更新世晚期太湖海侵及全新世镇江海侵^[18]。从3次海侵范围来看,太湖海侵对研究区的影响最大,导致 TDS 含量较高,同时为该区黏性土中钙质结核提供物源基础。由于浅层地下水埋深较浅,易于接受大气降水补给,且研究区居民利用简易手压设备开采浅层地下水用于日常洗涤、灌溉,促进了该区排泄循环,从而保证该区 TDS 值未出现超标现象,甚至与以往资料对比,表现为下降趋势,更趋于淡化(表3)。

表 2 浅层地下水水化学参数相关系数

Table 2 Correlation coefficient of hydrochemical parameters of shallow groundwater

| | pH 值 | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | TDS | NO ₃ ⁻ | NO ₂ ⁻ | NH ₄ ⁺ |
|-------------------------------|-------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| pH 值 | 1.000 | -0.315 | -0.181 | -0.649** | -0.170 | 0.013 | -0.352 | -0.391 | -0.198 | -0.042 | 0.018 |
| Na ⁺ | | 1.000 | 0.439 | 0.479 | 0.800** | 0.575* | 0.350 | 0.857** | 0.468 | -0.161 | -0.069 |
| Ca ²⁺ | | | 1.000 | 0.639* | 0.636* | -0.021 | 0.882** | 0.779** | -0.275 | 0.185 | 0.109 |
| Mg ²⁺ | | | | 1.000 | 0.564* | 0.114 | 0.700** | 0.718** | -0.011 | -0.246 | -0.255 |
| Cl ⁻ | | | | | 1.000 | 0.421 | 0.511 | 0.825** | -0.039 | -0.016 | 0.025 |
| SO ₄ ²⁻ | | | | | | 1.000 | -0.282 | 0.293 | 0.493 | -0.326 | -0.156 |
| HCO ₃ ⁻ | | | | | | | 1.000 | 0.736** | -0.350 | 0.064 | 0.018 |
| TDS | | | | | | | | 1.000 | 0.171 | -0.024 | -0.004 |
| NO ₃ ⁻ | | | | | | | | | 1.000 | -0.109 | -0.131 |
| NO ₂ ⁻ | | | | | | | | | | 1.000 | 0.476 |
| NH ₄ ⁺ | | | | | | | | | | | 1.000 |

注: * 和 ** 分别代表在 0.05 水平和 0.01 水平上显著相关。

表 3 近年 TDS 变化情况统计

Table 3 Statistics of TDS changes in recent years

| 年份 | 2006 年 | 2014 年 | 2015 年 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|
| TDS 平均值/(mg·L ⁻¹) | 681.20 | 590.13 | 540.00 |

研究区地下水的补给来源主要为大气降水,由研究区水文地质剖面图(图 5)可知,该区浅层地下水含水层的岩性主要为粉砂和亚砂土,下伏相对隔水的淤泥质黏土及黏土层。大气降水经包气带垂直入渗补给地下水的过程中,通过淋滤、溶解表层土壤组分,与浅层地下水混合,使其水化学特征发生变化。图 3 中 I 区由于自然沉积及城镇化建设等原因导致其地势略高于周边,可视作小范围补给区,地下水由 I 区向周边 II 区、IV 区径流过程中会发生溶滤作用及阳离子交替吸附作用,表现为水化学类型由 HCO₃-Ca 型逐渐演变为 HCO₃·SO₄-Ca·Na 型和 HCO₃·SO₄-Na·Ca 型。LC15 井及 IV 区水化学类型为 HCO₃·Cl-Ca·Na 型,主要是人类活动导致的^[19],LC15 位于吕城镇老城区,生活垃圾、日常污水等容易造成浅层地下水中 Cl⁻ 含量升高。该区 NH₄⁺-N 含量最大值出现于该井点,亦可佐证水化学类型与人类活动密切相关。谢建华等^[20]指出 NH₄⁺-N 对人体健康没有直接的危害风险,但 NH₄⁺-N 的存在意味着地下水正遭受新的污染。由图 2 和图 3 可知,IV 区位于化工区下游,生产过程中容易引起 Cl⁻ 含量增多,是人类活动加剧的结果^[21]。因此,研究区浅层地下水演化特征很大

程度上受第四纪沉积环境和人类活动等因素影响。

为准确判断研究区浅层地下水中离子起源,将样品水化学数据投绘于 Gibbs 图中。Gibbs 根据世界河流、湖泊及主要海洋水 TDS 与 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)、TDS 与 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)关系图,将离子起源分为三类:大气降水控制型、岩石风化型和蒸发-浓缩型^[22-23]。通常 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)值或 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)值>0.5 且 TDS 含量较低时,样品点集中分布在 Gibbs 图的右下角,反映该区域受大气降水影响明显;Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)值或 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)值<0.5 且 TDS 含量中等时,样品点集中分布于中间偏左位置,反映该区岩石组分对地下水影响明显;Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)值或 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)值接近 1 且 TDS 含量较高时,样品点集中分布于右上角,反映该区地下水受蒸发-结晶作用影响^[24-25]。由图 6 可知,该区 TDS 含量对数为 100~1 000,且 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)值总体<0.5,Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)值总体<0.3,均位于 Gibbs 图中间偏左的位置,表明研究区浅层地下水中离子主要受岩石风化作用(成土母质)过程中溶滤作用影响,其次受大气降水影响。

综上所述,研究区浅层地下水在接受大气降水补给及后期径流、排泄过程中,与包气带表层土壤及含(隔)水层介质之间发生溶滤、混合、阳离子交替等相互作用,加之人类活动影响,最终导致浅层地下水演化现状及差异分布。

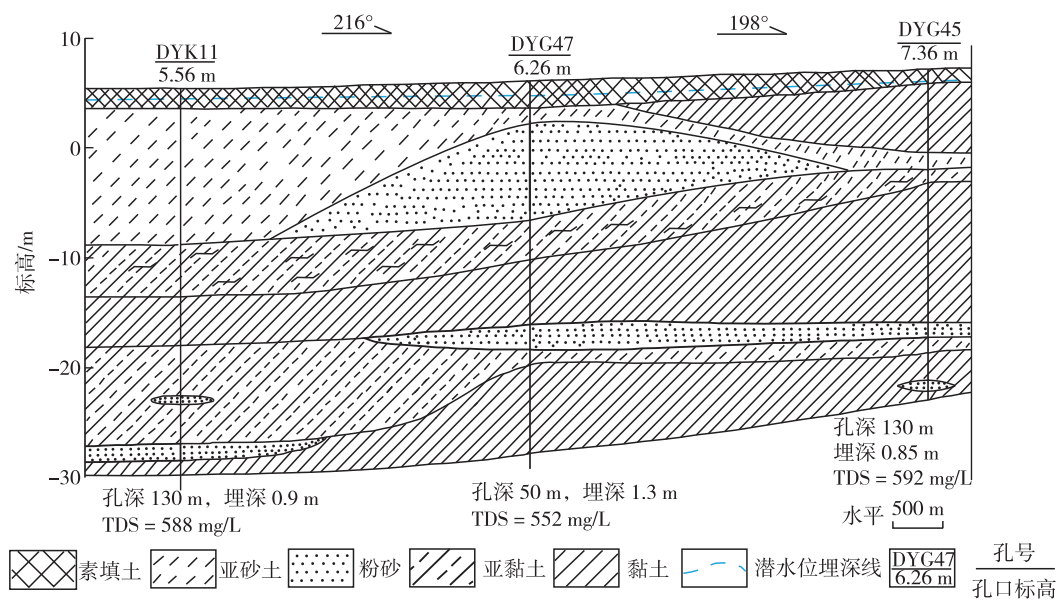


图 5 研究区水文地质剖面图

Fig. 5 Hydrogeological profile of the study area

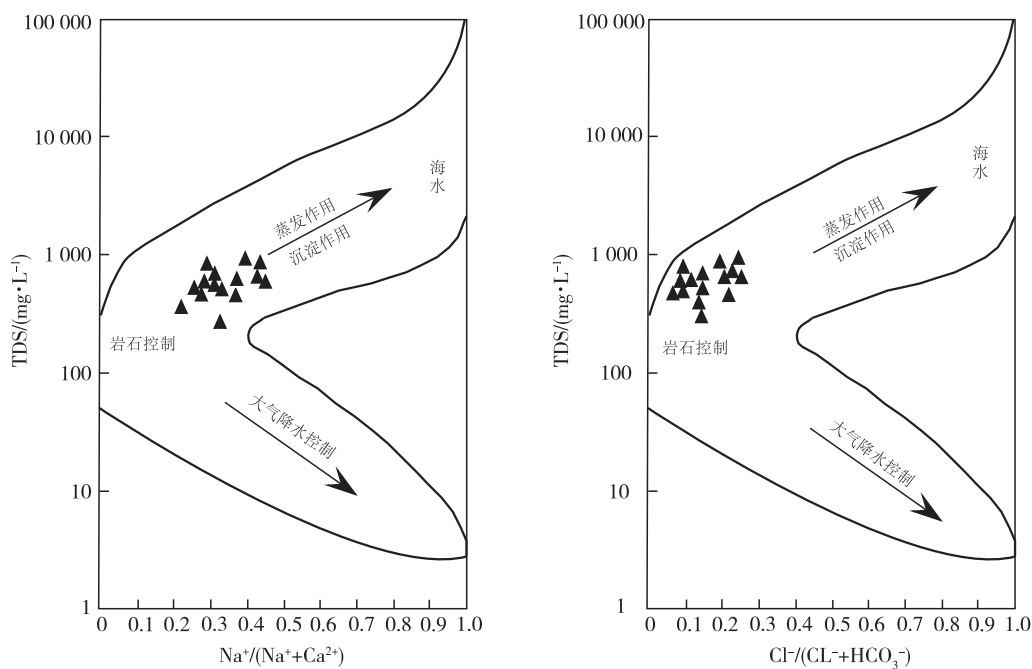


图 6 研究区浅层地下水水化学 Gibbs 分布图

Fig. 6 Gibbs distribution map of hydrochemistry of shallow groundwater in the study area

4 结论

(1) 丹阳市吕城地区浅层地下水以中性偏弱碱性水为主, Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 HCO_3^{-} 占主要优势。地下水

水化学类型主要包括 HCO_3-Ca 型、 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型, TDS 下降表明浅层地下水趋于淡化。“三氮”分布不均匀, 存在区域性富集现象。

(2) 丹阳市吕城地区浅层地下水水化学特征受

原生沉积环境、岩石风化作用、地下水补径排循环条件与人类经济活动的综合影响。岩石风化成土作用及海侵为水化学特征的形成提供物源基础,含水介质和补径排条件为水化学特征提供反应场所及良好的动力条件,人类生产生活在一定程度上改变了浅层地下水演化特征。

参考文献

- [1] 孙跃,刘中刚,侯香梦,等. 安徽合肥地区浅层地下水质量评价[J]. 华东地质, 2019, 40(1):74-80.
- [2] 沈照理,朱宛华,钟佐燊. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社, 1993.
- [3] 牛兆轩,蒋小伟,胡云壮. 滦河三角洲地区深层地下水化学演化规律及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1):27-34.
- [4] 梁靖. 雷州半岛地下水资源特征及开采潜力评价[J]. 华东地质, 2018, 39(4):299-304.
- [5] 张振国,何江涛,王磊,等. 衡水地区深层地下水水化学特征及其演化过程[J]. 现代地质, 2018, 32(3):565-573.
- [6] 杨巧凤,李文鹏,王瑞久. 深圳沿海带浅层地下水的稳定同位素与地球化学[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5):26-32.
- [7] 刘林,周迅,叶永红. 基于多元统计分析的浅层地下水受人为活动影响表征性指标筛选[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(4):305-310.
- [8] 周锴锷,王赫生,龚建师,等. 淮河流域平原区浅层地下水铁锰分布特征及原因浅析[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(2):147-151.
- [9] 金阳. 基于溶质运移的丹阳吕城地区地下水污染特征及机理研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2016.
- [10] 中国地质调查局南京地质调查中心. 江苏1:5万埤城幅、丹阳县幅环境地质调查成果报告[R]. 南京:中国地质调查局南京地质调查中心, 2016.
- [11] 中国地质调查局. DD2008—01 地下水污染地质调查评价规范[S]. 北京:中国地质调查局, 2008.
- [12] 章光新,邓伟,何岩,等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 2006, 17(1):20-28.
- [13] 周迅,姜月华. 氮、氧同位素在地下水硝酸盐污染研究中的应用[J]. 地球学报, 2007, 28(4):389-395.
- [14] 王瑞久. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘察, 1983(6):8-13.
- [15] REDWAN M, MONEIM A A. Factors controlling groundwater hydrogeochemistry in the area west of Tahta, Sohag, Upper Egypt[J]. Journal of African Earth Sciences, 2016, 118:328-338.
- [16] 张兆迪,于开宁,刘景涛. 银川平原水化学特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2):23-30.
- [17] 李炳华,崔学慧,朱亚雷,等. 北京市朝阳区地下水水化学特征及其变化规律[J]. 水资源保护, 2012, 28(5):7-12, 24.
- [18] 蒋梦林,刘志平. 太湖平原西北部第四纪海侵[J]. 地质学刊, 2001, 25(2):78-81.
- [19] 王小明,王璐璐,吴泊人,等. 安徽淮北平原浅层地下水硝酸盐分布特征及污染来源分析[J]. 安徽地质, 2013, 23(2):142-145.
- [20] 谢建华,刘海静,王爱武. 浅析氨氮、总氮、三氮转化及氨氮在水污染评价及控制中的作用[J]. 内蒙古水利, 2011, 30(5):34-36.
- [21] 苗迎,孔祥胜,宋朝静. 南宁市区地下水水化学特征及形成机制[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3):228-233.
- [22] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170(3962):1088-1090.
- [23] FETH J H, GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process[J]. Science, 1971, 172(3985):870-872.
- [24] 张艳,吴勇,杨军,等. 阆中市思依镇水化学特征及其原因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9):3230-3237.
- [25] 朱秉启,杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因[J]. 科学通报, 2007, 52(13):1561-1566.

Evolution characteristics and genesis of shallow groundwater in Lücheng area of Danyang City

JIN Yang^{1,2,3}, JIANG Yuehua^{2,3}, ZHOU Quanping^{2,3}, LEI Ting², JIA Junyuan², YANG Guoqiang^{2,3}

(1.Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2.Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

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

Abstract: Based on the field investigation and sampling analysis, the hydrochemical characteristics, types and genesis of shallow groundwater in Lücheng area of Danyang City were analyzed by using the methods of statistics, Piper trigram, Gibbs model and correlation analysis. The results show that the pH value of shallow groundwater in this area has little change, belonging to neutral and slightly alkaline water. Ca^{2+} and Na^+ were dominant in cations, while HCO_3^- was the absolute dominant in anion. The main hydrochemical types are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$, $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$, $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ and $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$. In recent years, TDS of shallow groundwater shows a decreasing trend, indicating a certain degree of desalination phenomenon. It is found that the comprehensive effects of Quaternary sedimentary environment, rock weathering, hydrogeological conditions and human economic activities are the main reasons leading to the evolution characteristics and differences of shallow groundwater in this area.

Key words: shallow groundwater; hydrochemistry; genesis analysis; Lücheng area