

淮北平原浅层地下水化学特征及水质动态研究

朱春芳, 龚建师, 檀梦皎, 陶小虎, 周锴锬, 王赫生, 李 亮, 秦 曦

Hydrochemical characteristics and water quality dynamic analysis of shallow groundwater in Huaibei Plain

ZHU Chunfang, GONG Jianshi, TAN Mengjiao, TAO Xiaohu, ZHOU Kaie, WANG Hesheng, LI Liang, and QIN Xi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202409072>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下水埋深对淮北平原冬小麦耗水量影响试验研究

An experimental study of the influence of groundwater level on water consumption of winter wheat in the Huaibei Plain

顾南, 张建云, 刘翠善, 王振龙, 王国庆 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 15-24

大牛地气田区地下水水质模糊综合评价

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area

梁乃森, 钱程, 穆文平, 段扬, 朱阁, 张日升, 武雄 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 52-59

基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究

Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes

杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 李志明, 刘文波, 康伟 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 154-162

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62-71

地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qinghaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 44-53

潮白河再生水补给河道对周边浅层地下水影响的数值模拟研究

Numerical modeling of the impacts of reclaimed water recharge to the Chaobai River channel on the ambient shallow groundwater

姜瑞雪, 韩冬梅, 宋献方, 李炳华 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 43-54



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202409072

朱春芳, 龚建师, 檀梦皎, 等. 淮北平原浅层地下水化学特征及水质动态研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 56-67.
ZHU Chunfang, GONG Jianshi, TAN Mengjiao, et al. Hydrochemical characteristics and water quality dynamic analysis of shallow groundwater in Huaibei Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 56-67.

淮北平原浅层地下水化学特征及水质动态研究

朱春芳, 龚建师, 檀梦皎, 陶小虎, 周锴锸, 王赫生, 李 亮, 秦 曦
(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 浅层地下水是淮北平原最重要的农业用水供水水源, 水质状况广受关注。文章采用数理统计、舒卡列夫分类、Piper 三线图和水质综合评价得出淮北平原浅层地下水化学特征及水质现状, 运用 Gibbs 图和离子比值关系分析了水化学物质来源, 应用主成分分析法筛选影响地下水质量的典型因子并推演时空演变规律。结果表明: 淮北平原浅层地下水多为弱碱性淡水, pH 值 6.6~8.6, 溶解性总固体 192~5 302 mg/L, 主要水化学类型共 8 类, 主要阴离子为 HCO_3^- , 阳离子为 Na^+ 、 Ca^{2+} , 地下水质量以 IV 类水为主; 水岩作用主要受硅酸盐岩-碳酸盐岩岩石风化作用影响, 从上游淮北平原到中游淮北平原, 岩石风化溶解的水岩作用由碳酸盐岩向硅酸盐岩再向蒸发盐岩演化。通过主成分分析选取溶解性总固体、耗氧量、硝酸盐作为典型因子研究水质动态演化规律, 淮北平原浅层地下水质量在 2010—2021 年经历了明显好转后略有下降, 但典型因子的表现不尽相同; 受原生地质环境影响, 淮北平原浅层地下水可溶物质总量趋向于面状集中分布, 高值点增多且大多分布于中游淮北平原, 氧化还原条件从还原环境向氧化环境演变, 2010—2018 年农业活动等人为污染在上游淮北平原局部加重, 但在 2018 年后得到明显改善。研究结果可为淮北平原浅层地下水污染防治、地下水资源保护提供支撑。

关键词: 淮北平原; 浅层地下水; 水化学特征; 水质; 主成分分析

中图分类号: P641.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0056-12

Hydrochemical characteristics and water quality dynamic analysis of shallow groundwater in Huaibei Plain

ZHU Chunfang, GONG Jianshi, TAN Mengjiao, TAO Xiaohu, ZHOU Kaie, WANG Hesheng,
LI Liang, QIN Xi

(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: Shallow groundwater is the most important source of agricultural water supply in Huaibei Plain, and its water quality has attracted wide attention. In this study, mathematical statistics, Shukarev classification, Piper diagram, and comprehensive evaluation of water quality were used to obtain the Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Huaibei Plain. The sources of water chemicals were analyzed by Gibbs diagram and ion ratio relationship, while principal component analysis (PCA) was used to screen key factors influencing water quality. The spatiotemporal evolution of groundwater quality was further examined. The results show that the shallow groundwater in Huaibei Plain is mostly weakly alkaline fresh water, with pH values of 6.6–8.6 and total dissolved solids (TDS) ranging from 192 mg/L to 5 302 mg/L. The groundwater exhibits eight hydrochemical

收稿日期: 2024-09-18; 修订日期: 2024-11-13

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230079)

第一作者: 朱春芳 (1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究工作。E-mail: 275677116@qq.com

通讯作者: 龚建师 (1979—), 男, 本科, 正高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究工作。E-mail: janso101@163.com

types, with HCO_3^- as the dominant anion and Na^+ and Ca^{2+} as the primary cations, and is primarily classified as Class IV water in terms of quality. The water-rock interaction is mainly affected by the weathering of silicate-carbonate rocks. From the upper reaches of the Huaibei Plain to the middle reaches of the Huaibei Plain, the water-rock interaction of dissolved rock weathering evolves from carbonate rocks to silicate-carbonate rocks and then to evaporative rocks. Through principal component analysis, total dissolved solids, oxygen consumption, and nitrate were identified as key indicators for analyzing groundwater quality dynamics. From 2010 to 2021, groundwater quality showed significant improvement, followed by a slight decline. However, different key indicators exhibited varied trends. Due to the natural geological environment, the total amount of soluble substances in shallow groundwater in the Huaibei Plain tends to be distributed in a planar pattern, and the high value points increased, and most of them are distributed in the middle reaches of the Huaibei Plain. The redox condition changes from reducing environment to oxidizing environment. From 2010 to 2018, agricultural activities increased in the upper reaches of the Huaibei Plain, but notable improvements have been observed since 2018. This study provides technical support for the prevention and control of shallow groundwater pollution and protection of groundwater resources in Huaibei Plain area.

Keywords: Huaibei Plain; shallow groundwater; hydrochemical characteristics; water quality; principal component analysis

地下水是半干旱地区重要的灌溉水源,也是大部分城市的供水水源^[1-2]。淮北平原位于我国南北气候过渡带,是淮河流域典型平原区,地下水在区域社会经济发展中发挥着至关重要的作用。根据 2021 年淮河流域水资源公报^[3],在跨流域调水占总供水量 12.9% 的前提下,地下水源供水量仍占淮北平原(含淮河上游及淮河中游)总供水量的 30.6%。农业用水占总用水量的 57.2%,淮北平原农业用水主要取用浅层地下水。浅层地下水受大气降水补给水循环速度较快,在淮北平原农村地区被广泛开采,是重要的农业灌溉水源和农村分散生活供水水源。

淮河流域平原地区地下水质量较差^[4-7],开展水化学和水质演变研究是淮河流域水资源调查研究的重要工作内容之一。叶念军等^[8]调查研究认为淮河流域浅层地下水质量普遍较差,且存在广泛的原生劣质水;龚建师等^[9-10]研究认为淮河流域浅层地下水受人类活动影响,水污染在城镇周边呈点状、沿河沿路呈条带状、广大农村呈面状;赵贵章等^[11]、朱春芳等^[12]以豫东黄泛区、丰沛平原黄河影响区为例研究认为蒸渗交替强度较大区域原生、次生水质因子交互影响作用更强烈;顾慰祖^[13]研究认为黄泛区黄河南岸至涡阳—阜阳一线水文地球化学过程仍然受近代黄河地下水循环影响;葛伟亚等^[14]提出了控制城镇极重污染源和农村面域污染源的地下水污染防治策略;Xu 等^[15-16]研究认为豫东皖北鲁西南集中存在以铁锰氟砷普遍

叠加的天然劣质水,并提出劣质因子共富集机理。以上研究积累了大量基础数据和规律性认识,从空间维度较全面刻画了淮河流域平原区地下水化学特征及部分成因机理。但对典型水文地质单元如淮北平原水化学物质来源及水质演变及影响因子动态分析研究较少。本文以整合分析历史数据为基础,从时空变化格局下的水化学演化分析淮北平原浅层地下水质量演化机制,为流域尺度地下水环境评价提供基础支撑,为区域水资源安全提供决策参考,具有现实意义。

1 研究区概况

淮北平原位于黄淮海平原南缘,面积约为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$,覆盖河南省东部、安徽省北部,东部与江苏省、山东省相交(图 1)。地处我国南北气候过渡带,降雨量南北差异较大,年际、年内分布极不均匀,汛期(6—9 月)降水占全年降水的 50%~70%。

淮北平原地下水主要分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水和基岩裂隙水 3 种类型。其中分布最广且具供水意义的为松散岩类孔隙水。在淮北平原地下 30~55 m,广泛分布有一层 14~20 m 厚的黏性土层,层位稳定、连续、结构紧密,目前农灌井很少贯穿,天然状态下浅、深含水层间无水力联系。水文地质剖面见图 2。浅层孔隙含水岩组多由上更新统亚黏土、亚砂土、粉砂和细砂组成,仅北部黄泛区及

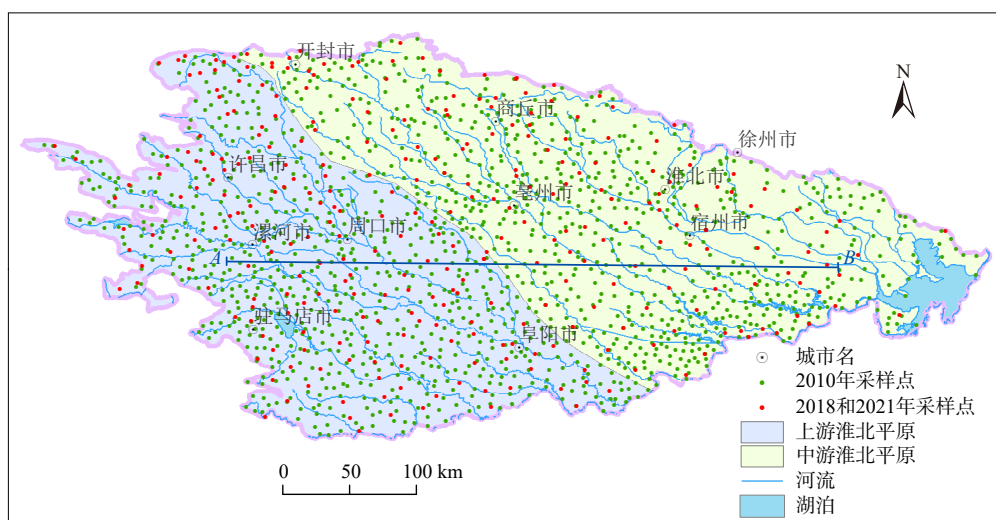


图 1 淮北平原浅层地下水采样点分布图

Fig. 1 Distribution of shallow groundwater sampling points in Huaibei Plain

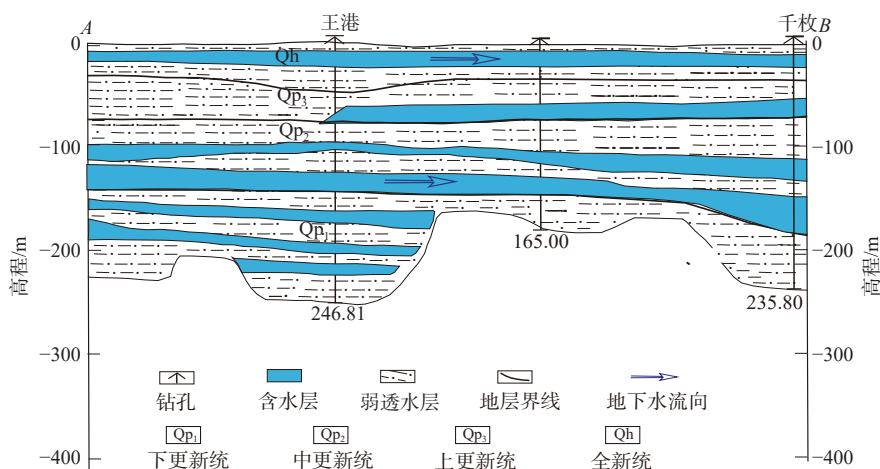


图 2 淮北平原水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile in Huaibei Plain

河谷地带为全新统砂性土和黏性土。地下水自西北流向东南方向,由于地势平坦,流动十分缓慢。浅层地下水主要受大气降水补给,以地面蒸发、植物蒸腾、农村分散开采为主要排泄方式。北部低缓平原区地下水水位埋深大部分为 2~4 m,南部大部分小于 2 m。浅层孔隙地下水水位主要受降水、蒸发及地表水影响,水位变幅一般为 1.5~2.5 m。

淮河中上游水系呈南北不对称分布,北部沙颍河、涡河等主要支流汇水面积较大,在冲洪积作用下形成广袤平原,即淮北平原。本研究依据淮河流域地下水资源评价分区^[17],参照淮河北翼主要支流汇流分区和黄泛区界线,结合淮河地表水分区^[18],大致以涡河西侧与西淝河分水岭为界,将淮北平原划分为淮河上游淮北平原和淮河中游淮北平原(图 1)。

2 材料与方法

2.1 水化学测试数据

研究区分别在 2010、2018 和 2021 年采集浅层地下水样品。2010 年为淮河流域首轮地下水污染调查,共采集浅层地下水样品 1 370 组;2018 和 2021 年为国家地下水监测工程采样,共采集布设的浅层孔隙水水质监测点 307 个。采样时间控制在平水期,样品采集遵循中国地质调查局地下水样品采集规范,样品分析主要指标包括溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)、总硬度、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^{-} 、 NO_2^{-} 、 NH_4^{+} 、 F^{-} 、 I^{-} 、 Mn 、 Fe 、 Zn 、 Hg 、 Cr^{6+} 、 As 、 Pb 、 Cd 、 Se 、pH 值等 30 余项。样品水化学测试 2010 年由国土资源部华东矿产资源监督检测中心完成,2018

和 2021 年由国家地下水监测工程地下水水质测试与质量控制实验室完成。采样点分布见图 1。

2.2 数理统计及分析方法

选取 2021 年浅层地下水化学采集测试数据, 运用数理统计分析淮北平原水化学特征及水质现状。影响淮北平原地下水质量的水质指标众多, 且具有较大的空间变异性^[19-20], 采用主成分分析法 (principal component analysis, PCA), 能有效克服评价指标间的重叠信息和离散信息, 筛选出水质典型影响因子从而进一步分析水质时空演变规律^[21-22]。运用 SPSS26 软件开展主成分分析, 首先对水质参数进行标准化处理, 计算相关系数矩阵, 确认其变量间存在较强的相关性适用于主成分分析。根据相关矩阵的特征值和特征向量, 筛选出特征值大于 1 的主成分, 计算主成分贡献率和方差累计贡献率, 确认其可接受性, 计算主成分荷载值, 筛选得出影响淮北平原浅层地下水质量的典型指标。对选取的典型指标运用 arcgis10.6 软件绘制 2010、2018 和 2021 年浓度空间分布图, 研究其时空动态演化特征。

3 结果

3.1 水化学特征

浅层地下水中主要离子的质量浓度数理统计见表 1。淮北平原 pH 值变化范围为 6.60~8.61, 86% 水样 pH 值在 7.0~8.0 区间, 浅层地下水多呈弱碱性; 总硬度 (以 CaCO₃ 计) 变化范围为 70~2 481 mg/L, 硬水 (300~450 mg/L) 占 35%, 微硬水 (150~300 mg/L) 和极硬水 (>450 mg/L) 各占 30%。溶解性总固体变化范围为 192~5 302 mg/L, 淡水 (<1 000 mg/L) 占 80%, 微咸水 (1 000~3 000 mg/L) 占 19%; 浅层地下水最主要的阳离子为 Na⁺, 离子当量浓度 Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺, 最主要的阴离子为 HCO₃⁻, 离子当量浓度 HCO₃⁻>Cl⁻>SO₄²⁻>NO₃⁻。一般用变异系数表征地下水中水溶性化学物质呈现出的离散度和空间差异^[23], K⁺、I⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻和 Na⁺变异系数较大, I⁻为淮北平原原生性劣质水指标, 较大的变异系数呈现了其明显的空间变异性。NO₃⁻、SO₄²⁻变异系数较大多与人类活动影响相关。

表 1 样品水化学特征
Table 1 Statistics of major ions in groundwater

项目	pH值	总硬度 /(mg·L ⁻¹)	溶解性总固体 /(mg·L ⁻¹)	质量浓度(ρ)/(mg·L ⁻¹)										
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	I ⁻	Mn
平均值	7.61	411	798	84.5	48.8	1.5	131.9	138.0	102.4	489.2	3.4	0.86	0.04	0.37
中位值	7.60	362	596	77.6	38.5	0.7	70.0	64.7	52.8	457.0	0.4	0.72	0	0.26
最小值	6.60	70	192	14.7	6.0	0.04	7.9	0.16	1.8	13.9	—	0.06	—	0.002
最大值	8.61	2 481	5 302	280.6	432.7	67.4	984.4	1 911.1	1 546.3	1 305.8	63.1	5.00	0.93	2.68
标准差	0.34	232	672	40.3	43.0	4.7	163.1	236.4	156.9	191.0	6.8	0.63	0.11	0.36
变异系数	0.04	0.56	0.84	0.65	0.99	3.06	1.24	1.71	1.53	0.39	1.98	0.74	2.59	0.97

注: —表示未检出。

3.2 水化学类型

用舒卡列夫分类法对地下水中化学组分进行分类, 绘制 Piper 三线图^[24](图 3)。淮北平原浅层地下水化学阴离子多靠近 HCO₃⁻ 端, 阳离子多靠近 Na⁺ 和 Ca²⁺ 端; 水化学类型共 28 类, 其中主要水化学类型 8 类占比 78.8%, 分别为 HCO₃—Na•Ca•Mg 型 (26.4%)、HCO₃—Ca•Mg 型 (16.3%)、HCO₃•Cl—Na•Ca•Mg 型 (7.5%)、HCO₃—Na•Mg 型 (6.8%)、HCO₃•SO₄•Cl—Na•Mg 型 (6.2%)、HCO₃—Na•Ca 型 (5.9%)、HCO₃•SO₄•Cl—Na•Ca•Mg 型 (5.2%) 和 HCO₃—Ca 型 (4.6%)。

从淮北平原浅层地下水化学类型分区图 (图 4) 看, 阳离子 Ca 和 Ca•Mg 型主要分布在西部山前平原, Na•Ca•Mg 型全区分布最多, Na•Mg 型集中分布于淮

北平原中部沙颍河—涡河一带, Na 型呈零星分布。阴离子 HCO₃ 型全区分布最广占 60% 以上, HCO₃•SO₄ 型和 HCO₃•SO₄•Cl 型主要分布在淮河北翼支流水系上游和中游, 下游多为 HCO₃•Cl 型, SO₄•Cl 型和 Cl 型全区分布较少。

对比 2010 年水化学历史数据^[25], 上游淮北平原浅层地下水主要水化学类型从 HCO₃—Na•Ca•Mg 型、HCO₃—Ca•Mg 型和 HCO₃•Cl—Na•Ca•Mg 型主导向 HCO₃—Ca•Mg 型、HCO₃—Na•Ca•Mg 型和 HCO₃—Na•Ca 型主导转变, HCO₃ 型显著增加; 中游淮北平原从 HCO₃—Na•Ca•Mg 型、HCO₃•Cl—Na•Ca•Mg 型和 HCO₃—Ca•Mg 型主导转变为以 HCO₃—Na•Ca•Mg 型主导, Ca 型、HCO₃ 型减少, 水化学类型趋于多样化且

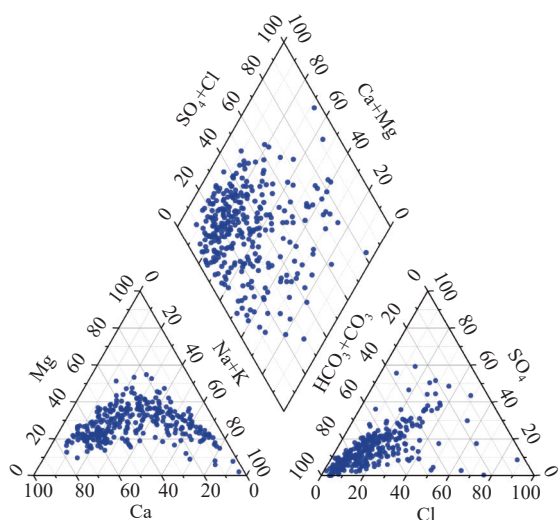


图3 淮北平原浅层地下水 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagram of shallow groundwater in Huaibei Plain

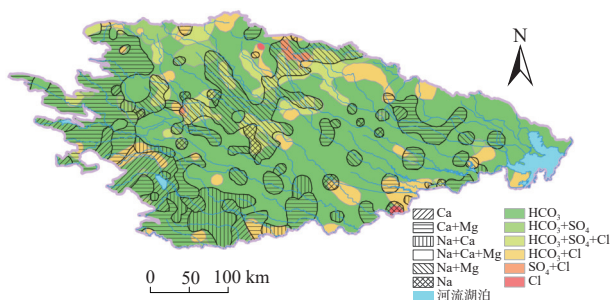


图4 淮北平原浅层地下水水化学类型分区图

Fig. 4 Zoning map of hydrochemical types of shallow groundwater in Huaibei Plain

较为分散。

3.3 地下水质量评价

依据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)^[26]对淮北平原浅层地下水进行质量综合评价,评价指标共26项,包括一般化学指标15项和毒理学指标11项。本次评价把仅由铁、锰、总硬度指标影响的Ⅳ类水单独列为原生易处理型劣质水,归类统计时纳入Ⅰ~Ⅲ类水。评价结果表明,淮北平原浅层地下水以水化学组分含量较高,适用于农业和部分工业用水,适当处理后可做生活饮用水的Ⅳ类水为主,占比约50%。主要影响指标为锰、总硬度、氟化物、溶解性总固体、碘化物等。

图5为淮北平原2010、2018和2021年水化学样品采集测试分析所得的浅层地下水质量适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水(Ⅰ~Ⅲ类水)所占百分比变化图。由图可知,2010—2018年间Ⅰ~Ⅲ类水增幅明显,特别是上游淮北平原增幅较大,约为中游的3倍。2018—2021年间Ⅰ~Ⅲ类水有所下降,中游

淮北平原降幅约为上游的3倍。总体来看,2010—2021年淮北平原浅层地下水质量先经历明显趋好后略有劣化,总体仍为明显趋好态势,特别是上游淮北平原Ⅰ~Ⅲ类水增长近一倍,但中游淮北平原水质先经历略有趋好后呈现明显劣化态势,Ⅰ~Ⅲ类水减少了30%。

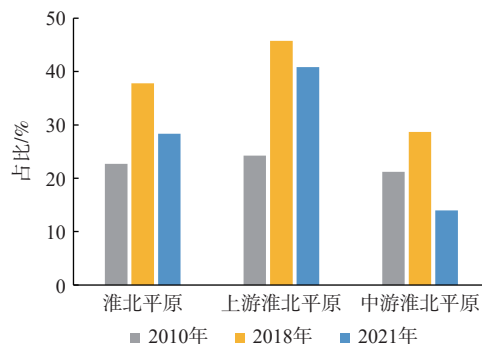


图5 淮北平原浅层地下水适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水比例变化图

Fig. 5 Shallow groundwater in Huaibei Plain suitable for centralized drinking water source and changes of industrial and agricultural water

淮北平原2010、2018和2021年地下水质量综合评价分区见图6,根据地下水质量综合评价结果,划分为Ⅰ~Ⅲ类水、Ⅳ类水和Ⅴ类水。从地下水质量变化情况看,2010—2018年Ⅰ~Ⅲ类水扩大区域主要集中在上游淮北平原山前的河南平顶山—漯河—驻马店一带,以及下游淮北平原淮河支流下游的阜阳—亳州—淮南—淮北—宿州和江苏洪泽湖以西;2018—2021年Ⅰ~Ⅲ类水区域在上游淮北平原山前地带进一步扩大,但在淮河支流下游地区呈显著减少。Wang等^[27]研究表明淮河流域在2010—2018年人为干扰强度呈下降趋势,干扰程度高的地区主要集中在城市地区;自然度高的区域主要分布在淮河流域中游的西南部和西部,这些地区以林地、草地和水体为主。2010—2018年淮北平原污染物排放和资源消耗得到有效控制,同时退耕还林和淮河流域水污染防治条例的实施大大降低了人类活动对环境的干扰,使得淮北平原Ⅰ~Ⅲ类水区域显著增长,但根据2018—2021年地下水质量评价结果,淮北平原特别是中游淮北平原Ⅰ~Ⅲ类水区域呈现面积大幅缩小趋势,建议进一步加强对淮北平原的动态监测和保护。

4 分析与讨论

4.1 水化学物质来源分析

地下水中化学物质来源及演化多与地下水与岩

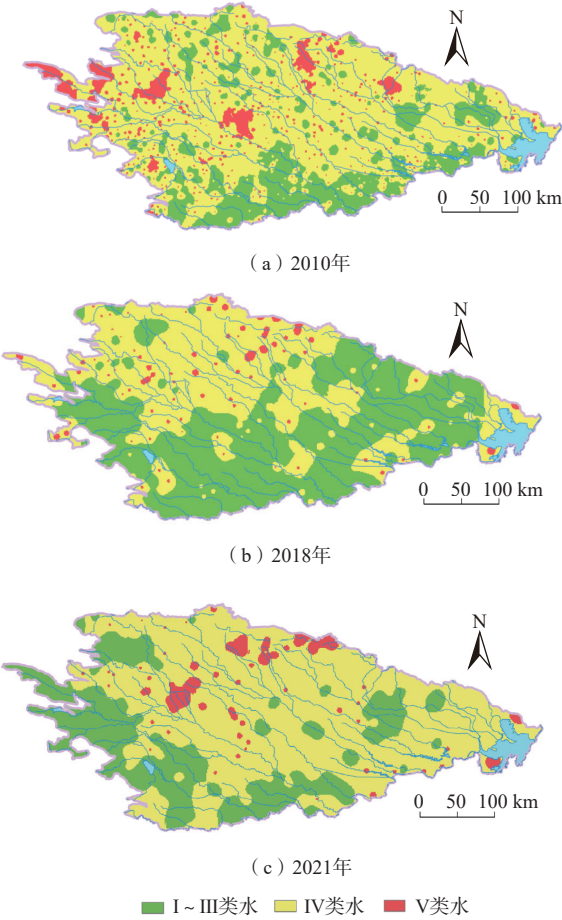


图 6 淮北平原地下水质量综合评价分区图

Fig. 6 Zoning map of groundwater quality comprehensive evaluation in Huaibei Plain

石矿物发生的水岩作用相关,用 Gibbs 图离子比值关系分析大气降水、岩石风化作用和蒸发浓缩作用对本区浅层地下水主要离子的控制和影响^[28-29],如图 7。研究区 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 当量浓度比值为 0.15 ~ 0.99, $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 当量浓度比值为 0.01 ~ 0.96, 表征大部分样品受岩石风化影响为主,少部分样品受蒸发浓缩作用影响。把研究区以涡河西侧与西淝河分水岭为界分为上游淮北平原和中游淮北平原,可以看出,水岩作用从上游淮北平原到中游由岩石风化作用主导向蒸发浓缩作用主导演变,上游淮北平原受大气降水控制影响大于中游。上游淮北平原从西部山前倾斜平原到低缓平原松散岩类孔隙含水层厚度逐渐变大,含水层颗粒由粗变细;上游淮北平原西部第四系松散堆积层相对较薄,含水层多含砂局部含砂砾石,结构松散分选性好,补给条件好透水性强径流较快,有利于岩石风化溶解作用过程。

用 $\text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ 离子当量浓度比值关系(图 8)进一步分析岩石风化溶解的水岩作用中不同岩石种类来源^[30-31]。研究区 $\text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$ 当量浓度比值为 0.07 ~ 10.49, $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 当量浓度比值为 0.04 ~ 1.95, 研究区浅层地下水样品大部分受硅酸盐岩-碳酸盐岩风化溶解的水文地球化学作用影响,少部分受硅酸盐岩-蒸发盐岩风化溶解的水文地球化学作用影响。以涡河为界可以看出,从上游淮北平原到中游淮北平原,岩石风化溶解的水岩作用由碳酸盐岩慢慢向

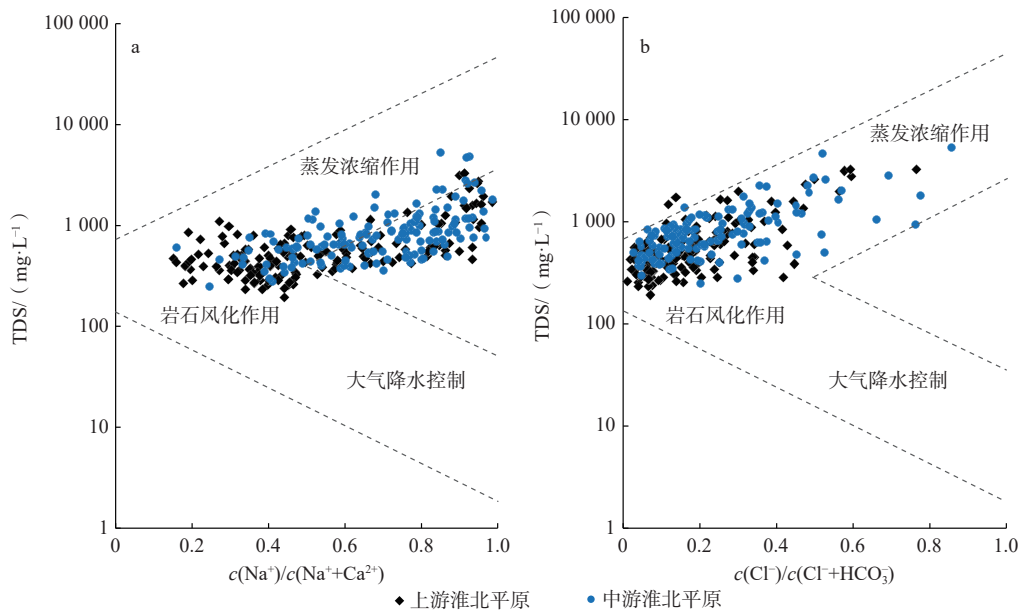


图 7 淮北平原浅层地下水 Gibbs 图

Fig. 7 Gibbs diagram of shallow groundwater in Huaibei Plain

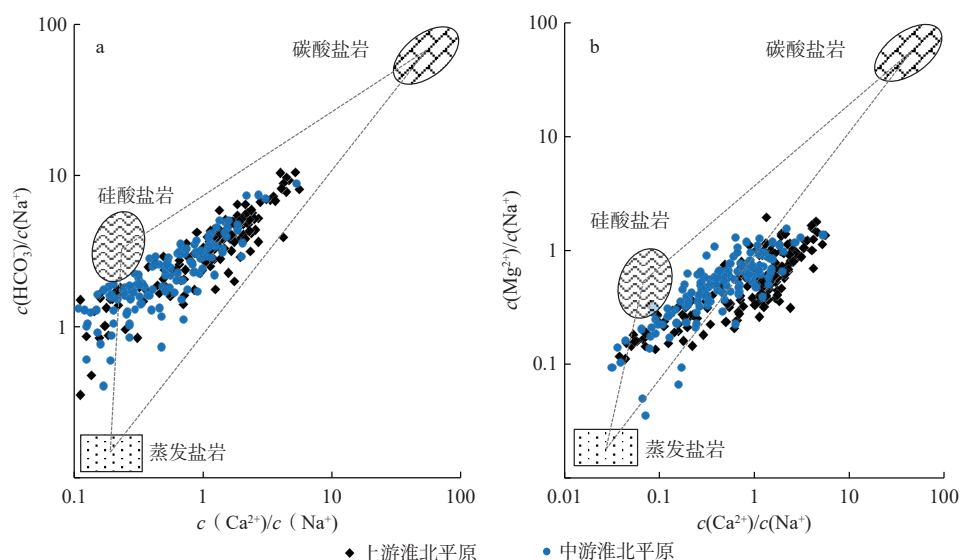


图8 淮北平原 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 离子浓度比值关系

Fig. 8 Relationship of $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$, and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ in shallow groundwater in Huaibei Plain

硅酸盐岩再向蒸发盐岩演化。

4.2 主成分分析

影响地下水质量的水质指标众多,且具有较大的空间变异性。水质指标是多个分类有序变量且变量间存在较强的相关性,剔除检出率较低指标,选取对水质综合评价结果有影响的16个因子采用主成分分析法,能有效克服评价指标间的重叠信息和离散信息,筛选出水质典型影响因子以便进一步分析水质演变规律。

使用SPSS26软件对水质数据进行标准化处理后,选取特征值大于1的6个主成分,累计方差贡献率达76.5%(表2),认为在可接受范围内能包含原始指标主要信息。与主成分1正相关系数较大的因子为溶解性总固体、硫酸盐、钠、氯化物、总硬度、氟化物和碘化物,反映区域原生地质环境影响。与主成分2正相关系数较大的因子为耗氧量、亚硝酸盐和砷,指示还原型氧化还原条件。与主成分3正相关系数较大的因子为硝酸盐,反映农业活动和人类生活输入的污染源。与主成分4正相关系数较大的因子为挥发酚,多与化工生产污染有关。与主成分5正相关系数较大的因子为锌和铅,多与工矿开采活动有关。与主成分6正相关系数较大的因子为氨氮,指示强还原环境。

4.3 地下水质量动态演变分析

地下水质量综合评价结果按单因子评价最差的类别确定,直接分析水质综合评价结果受多因子交互作用影响,无法客观反映其演化细节,主成分分析法能剥离出影响水质的典型主成分指标,通过分析主成分相关系数较大的典型因子的演化过程,探寻水质

表2 特征值、主成分贡献率及累计贡献值

Table 2 Eigenvalues, contribution rate, and cumulative contribution rate of the principal components

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
1	4.676	29.222	29.222	4.676	29.222	29.222
2	2.009	12.557	41.780	2.009	12.557	41.780
3	1.760	10.997	52.777	1.760	10.997	52.777
4	1.436	8.975	61.752	1.436	8.975	61.752
5	1.292	8.074	69.825	1.292	8.074	69.825
6	1.069	6.680	76.506	1.069	6.680	76.506
7	0.962	6.016	82.521			
8	0.849	5.308	87.829			
9	0.591	3.693	91.522			
10	0.409	2.556	94.078			
11	0.323	2.021	96.099			
12	0.233	1.456	97.555			
13	0.159	0.993	98.548			
14	0.108	0.674	99.223			
15	0.096	0.603	99.825			
16	0.028	0.175	100.000			

演化规律。

根据主成分因子荷载(表3),选取与主成分1正相关系数达0.941的溶解性总固体、与主成分2正相关系数达0.820的耗氧量、与主成分3正相关系数达0.751的硝酸盐,分析淮北平原浅层地下水质量演化规律。

(1) 溶解性总固体

溶解性总固体是溶解于水中的无机盐和有机物的总称,水中溶解物质越多,溶解性总固体值越高,根据主成分分析,主要指征原生地质环境。根据本区浅

表 3 主成分因子载荷

Table 3 Various factors loading in principle components						
指标	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5	主成分6
锰	0.240	0.479	-0.002	0.449	-0.490	0.130
总硬度	0.811	0.088	0.388	-0.046	-0.172	-0.043
溶解性总固体	0.941	-0.096	0.049	-0.084	-0.019	0.015
硫酸盐	0.930	-0.093	0.114	-0.081	-0.089	0.046
氯化物	0.898	-0.050	0.132	-0.145	-0.169	0.036
锌	0.007	-0.109	0.128	0.092	0.426	0.258
硝酸盐	-0.014	0.054	0.751	-0.101	0.202	0.090
挥发性酚类	0.397	0.086	-0.141	0.684	0.378	0.059
耗氧量	0.198	0.820	-0.082	-0.405	0.243	-0.011
氨氮	0.055	0.422	-0.103	0.513	-0.071	0.616
钠	0.920	-0.178	-0.170	-0.085	0.074	0.025
亚硝酸盐	0.032	0.785	0.062	-0.318	0.384	-0.065
氟化物	0.483	-0.258	-0.548	-0.032	0.440	-0.003
碘化物	0.217	0.185	-0.508	-0.324	-0.197	0.042
砷	0.084	0.359	-0.132	0.287	-0.244	-0.609
铅	0.259	0.039	0.166	0.336	0.354	-0.460

层地下水化学物质来源及过程分析,岩石风化的水岩溶滤作用也是本区浅层地下水中水化学组分的主要水文地球化学来源。将淮北平原浅层地下水中溶解性总固体划分为 5 个等级,分别为 TDS<500 mg/L, 500 ~ <1 000 mg/L, 1 000 ~ <2 000 mg/L, 2 000 ~ 3 000 mg/L 和 >3 000 mg/L, 见图 9。

从图 9 可知,溶解性总固体空间分布呈现两级分化,500 ~ <1 000 mg/L 面积不断缩小,增长最多的是 TDS<500 mg/L 区域,主要位于淮北平原西部山前冲积平原和淮河上游北岸驻马店—信阳—阜阳—淮南一带以及宿州西部;1 000 ~ <2 000 mg/L 区域从破碎点状分布变为面状集中分布,主要位于淮河北岸支流上游和中游的商丘—周口—开封—许昌东部、安徽淮北中部和山东菏泽南部;TDS≥2 000 mg/L 区域有较大变动,缩小区域位于开封和漯河东部以及江苏宿迁南部,扩大区域主要位于商丘北部、许昌东部、周口中部一带及安徽淮北中部。

本区浅层地下水为松散岩类孔隙地下水,埋藏较浅,主要受大气降水补给,含水层岩性多为亚砂亚黏互层,受岩石风化溶滤作用影响较大。在 TDS>2 000 mg/L 的商丘、淮北等地,孔隙潜水高水位期水位埋深多在 1.8 ~ 3.0 m,季风气候影响加之全球气温升高、平坦的地形地貌条件、砂黏交错的土壤类型、较高的地下水水位,使该区成为土壤易盐碱化和有盐碱化威胁的地区之一。

(2)耗氧量

耗氧量又称高锰酸盐指数,地下水中耗氧量与亚

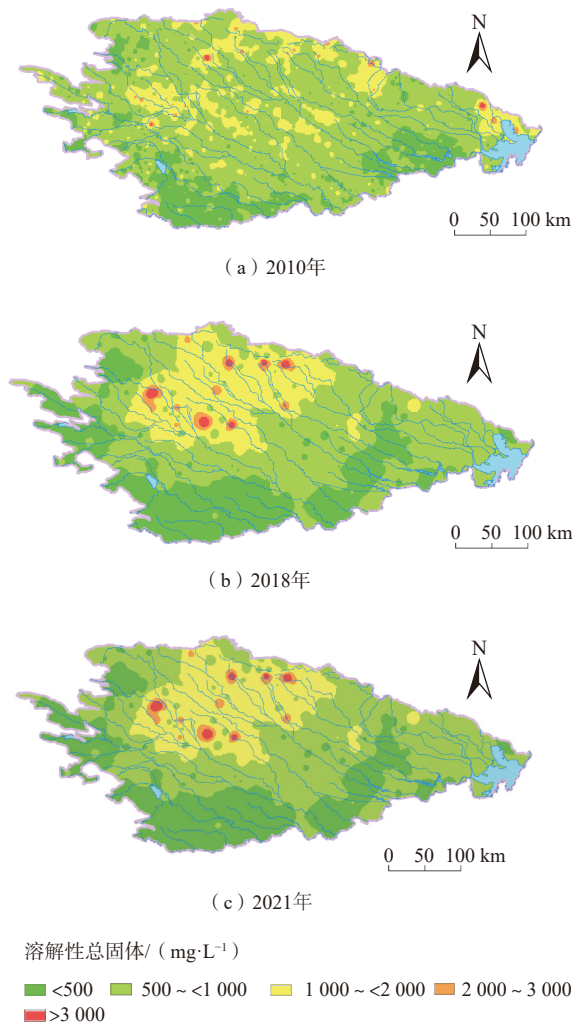
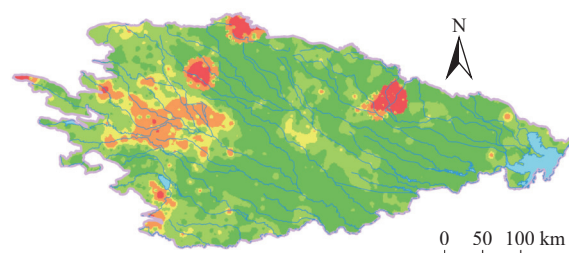


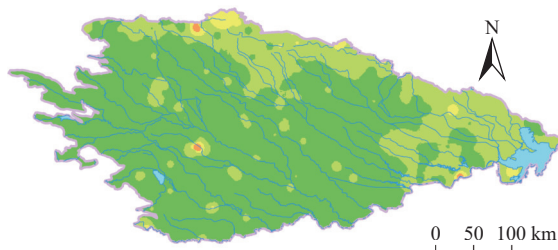
图 9 淮北平原浅层地下水溶解性总固体分区图
Fig. 9 Zoning map of total dissolved solids in shallow groundwater in Huaibei Plain

硝酸盐、亚铁、腐殖质等密切相关,根据主成分分析,主要指征还原型氧化还原条件。根据淮北平原浅层地下水中耗氧量质量浓度,划分为五个等级,分别为耗氧量<1 mg/L、1 ~ <2 mg/L、2 ~ <3 mg/L、3 ~ 10 mg/L 和 >10 mg/L, 见图 10。

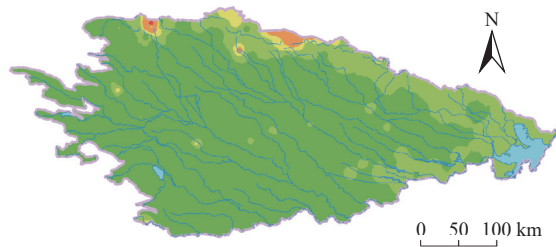
由图 10 可知,淮北平原氧化还原条件整体向氧化环境演变,特别是上游淮北平原的许昌—漯河—周口一带和开封南部从还原环境演变为氧化环境较为明显,此外中游的安徽淮北北部也从强还原环境演变为氧化环境。淮北平原农村地区 2010 年以来广泛实施农村灌溉井工程,在农田区布置高密度的灌溉井抽取浅层地下水用于农田灌溉和农村生活,促进了浅层地下水的循环交替,使地下水氧化还原环境向氧化环境演变。而在地表水丰富的中游淮北平原淮安—宿迁一带,多建地表灌溉水渠用于农田浇灌,且江苏承压



(a) 2010年



(b) 2018年



(c) 2021年

地下水耗氧量质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

■ <1 ■ 1~<2 ■ 2~<3 ■ 3~10 ■ >10

图 10 淮北平原浅层地下水耗氧量质量浓度分区图

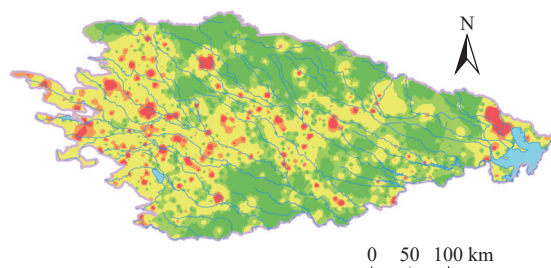
Fig. 10 Zoning map of oxygen consumption in shallow groundwater in Huaibei Plain

地下水禁采令实施多年, 浅层地下水氧化还原条件有慢慢向还原环境演变的趋势。

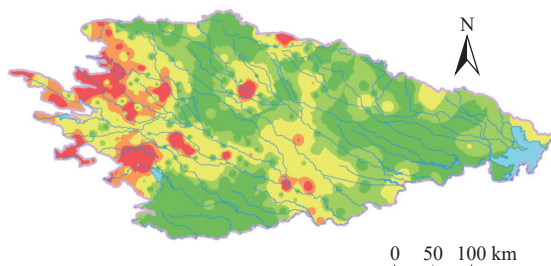
(3) 硝酸盐

硝酸盐是地下水中普遍的污染物, 也是地下水污染特别关注的目标^[32-33], 高浓度的硝酸盐主要与农业化肥使用和生活污水养殖废水排放有关^[34], 淮北平原是我国主要粮食产地之一, 农业化肥施撒引发的硝酸盐污染是本区最重要的人为污染源。根据淮北平原浅层地下水中硝酸盐质量浓度, 划分为 5 个等级, 分别为硝酸盐<2 mg/L、2~<5 mg/L、5~<20 mg/L、20~30 mg/L 和>30 mg/L, 见图 11。

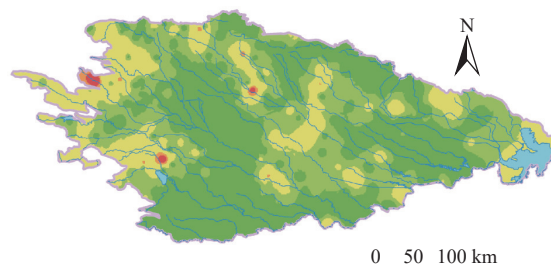
由图 11 可知, 淮北平原浅层地下水受硝酸盐污染影响总体呈大幅下降趋势。2010 年硝酸盐质量浓度 ≥ 20 mg/L 区域以小片面状分散分布于上游淮北平原、中游腹地和江苏洪泽湖西北, 到 2018 年, 硝酸盐质量浓度 ≥ 20 mg/L 区域聚集成面集中分布在上游淮



(a) 2010年



(b) 2018年



(c) 2021年

硝酸盐质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

■ <2 ■ 2~<5 ■ 5~<20 ■ 20~30 ■ >30

图 11 淮北平原浅层地下水硝酸盐质量浓度分区图

Fig. 11 Zoning map of nitrate concentration in shallow groundwater in Huaibei Plain

北平原郑州—许昌—平顶山、漯河和驻马店一带, 在中游面积缩小仅余商丘东南部、菏泽南部和阜阳西部集中分布区, 洪泽湖以北地区消失; 及至 2021 年, 硝酸盐质量浓度 ≥ 20 mg/L 区域大幅缩小, 仅余许昌、驻马店、商丘 3 小片局部分布。

总体来看, 上游淮北平原浅层地下水高浓度硝酸盐分布区经历了从小片面状分散到局部集中范围扩大聚集成面, 最后面积大幅缩小仅剩小片少量分布的过程。2002—2017 年是我国氮肥施用高峰期^[35], 在山前平原, 松散层较薄, 地下水受降雨垂直入渗补给, 径流较快, 广泛分布的农田灌溉井抽取浅层地下水用作农田灌溉也促进了水循环交替, 使得 2010—2018 年淮北平原西部浅层地下水中硝酸盐富集; 随着农业化肥的使用得到控制, 2018—2021 年上游淮北平原浅层地

下水中硝酸盐含量大幅下降,2021年 ≥ 20 mg/L范围仅剩小片零星分布。

地下水质量受多因素影响,包括农业、城市化、工业、采矿、人口增长和气候变化,以及砷和氟化物等原生劣质因子迁移影响。本文从主成分分析入手,找出影响本区浅层地下水质量的3个主成分强相关指标因子,分析其时空演变,进而总结淮北平原浅层地下水质量演化规律。从溶解性总固体看,淮北平原受原生地质环境影响,经水岩溶滤作用溶解于浅层地下水中的可溶物质总量呈两级分化趋势,TDS < 500 mg/L区域大幅增加,1 000~ < 2 000 mg/L区域从破碎点状分布慢慢变为面状集中分布,TDS ≥ 2 000 mg/L区域增多且多分布于中游淮北平原。从耗氧量看,淮北平原特别是上游淮北平原浅层地下水氧化还原条件从还原环境向氧化环境演变。从硝酸盐看,淮北平原浅层地下水受农业生产等人为污染源影响经历了2010—2018年在上游淮北平原局部加重,在2018年后整体得到大幅改善。

5 结论

(1)淮北平原浅层地下水多呈弱碱性,淡水为主,少量微咸水,浅层地下水最主要的阳离子为 Na^+ ,阴离子当量浓度 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,最主要的阴离子为 HCO_3^- ,阴离子当量浓度 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ 。

(2)淮北平原主要的水化学类型共8类, HCO_3^- — $\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 HCO_3^- — $\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型占比最多。阳离子以 $\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型分布面积最大,Ca和 $\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水主要分布在西部山前平原。阴离子以 HCO_3^- 型在全区分布最广。

(3)淮北平原浅层地下水质量现状以Ⅳ类水为主,占比约50%。2010—2021年地下水质量在经历了明显好转后略有下降,总体仍为趋好态势;上游淮北平原水质改善幅度较大,但中游淮北平原呈水质劣化态势。

(4)淮北平原浅层地下水化学组分受岩石风化作用影响为主,其次为蒸发浓缩作用。从上游淮北平原到中游淮北平原,水岩作用由岩石风化作用主导向蒸发浓缩作用主导演变,受大气降水控制影响上游淮北平原大于中游。岩石风化作用主要为硅酸盐岩—碳酸盐岩风化溶解的水岩作用,其次是硅酸盐岩—蒸发盐岩,从上游淮北平原到中游淮北平原,由碳酸盐岩慢慢向硅酸盐岩再向蒸发盐岩演化。

(5)淮北平原浅层地下水中的可溶物质总量分布呈两级分化,氧化还原条件总体从还原环境向氧化环

境演变,浅层地下水受农业活动等人为污染影响于2018年整体得到较大改善。

参考文献 (References):

- [1] 周仰效,李文鹏.地下水水质监测与评价[J].水文地质工程地质,2008,35(1):1-11. [ZHOU Yangxiao, LI Wenpeng. Groundwater quality monitoring and assessment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李圣品,李文鹏,殷秀兰,等.全国地下水水质分布及变化特征[J].水文地质工程地质,2019,46(6):1-8. [LI Shengpin, LI Wenpeng, YIN Xiulan, et al. Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to 2017[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 水资源处.淮河流域及山东半岛水资源公报(2021年度)[EB/OL].(2022-09-30)[2024-01-14]. [Water Resources Branch. Huaihe River basin and Shandong peninsula water resources bulletin (2021)[EB/OL]. (2022-09-30)[2024-01-14]. <http://www.hrc.gov.cn/main/szygb/675300.jhtml>. (in Chinese)]
- [4] HE Guang, FU Yiwen, ZHAO Shuhang. Evaluation of water ecological security in Huaihe River Basin based on the DPSIR-EESSMI-P model[J]. Water Supply, 2023, 23(3): 1127-1143.
- [5] SUN Xiaomin, LIN Jin, GU Weizu, et al. Analysis and evaluation of the renewability of the deep groundwater in the Huaihe River Basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(3): 104.
- [6] 翟晓燕,张永勇.淮河流域水质时空分布及土地利用区域影响[J].水资源保护,2022,38(5):181-189. [ZHAI Xiaoyan, ZHANG Yongyong. Spatio-temporal variations of water quality indices and regional influences of land use types in the Huai River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 181-189. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 官娇娇,郑跃军,曹祥会.我国地下水资源面临的问题及对策思考[J].华东地质,2024,45(3):255-263. [GUAN Jiaojiao, ZHENG Yuejun, CAO Xianghui. The problems faced by groundwater resources in China and countermeasures suggestion[J]. East China Geology, 2024, 45(3): 255-263. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 叶念军,葛伟亚,龚建师,等.淮河流域环境地质调查

- 报告[R]. 南京: 中国地质调查局南京地质调查中心, 2012. [YE Nianjun, GE WeiYa, GONG Jianshi, et al. Environmental geological survey report in Huaihe River Basin[R]. Nanjing: Nanjing Center China Geological Survey, 2012. (in Chinese)]
- [9] 龚建师, 王赫生, 李亮, 等. 淮河流域地下水资源概况及开发潜力[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1052 – 1061. [GONG Jianshi, WANG Hesheng, LI Liang, et al. Groundwater resources and development potential in Huaihe River Basin[J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1052 – 1061. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 龚建师, 叶念军, 葛伟亚, 等. 淮河流域浅层地下水中 Hg-As-Cr⁶⁺ 赋存特征及农业用水建议[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(30): 10698 – 10700. [GONG Jianshi, YE Nianjun, GE Weiya, et al. Hg, As, Cr⁶⁺ distribution characteristics in shallow groundwater of Huaihe Catchment and suggestions of groundwater utilization in agricultural area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(30): 10698 – 10700. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 赵贵章, 王淑丽, 李志萍, 等. 基于小波分析的水质变化及预测研究——以涡河为例[J]. 人民珠江, 2022, 43(2): 79 – 87. [ZHAO Guizhang, WANG Shuli, LI Zhiping, et al. Research on water quality change and prediction based on wavelet analysis: A case study of Guohe river[J]. *Pearl River*, 2022, 43(2): 79 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 朱春芳, 龚建师, 周锴锒, 等. 丰沛平原浅层地下水化学特征分析[J]. 地球与环境, 2022, 50(6): 797 – 804. [ZHU Chunfang, GONG Jianshi, ZHOU Kaie, et al. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Fengpei plain area[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(6): 797 – 804. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [GU Weizu. *Isotope hydrology*[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)]
- [14] 葛伟亚, 叶念军, 龚建师, 等. 淮河流域平原区地下水资源合理开发利用模式研究[J]. 地下水, 2007, 29(5): 37 – 40. [GE Weiya, YE Nianjun, GONG Jianshi, et al. Rational development and utilization of groundwater resource in the plain of the Huaihe river basin[J]. *Ground Water*, 2007, 29(5): 37 – 40. (in Chinese with English abstract)]
- [15] XU Naizheng, ZHANG Fei, XU Naicen, et al. Chemical and mineralogical variability of sediment in a quaternary aquifer from Huaihe River Basin, China: Implications for groundwater arsenic source and its mobilization[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 865: 160864.
- [16] XU Naizheng, LEI Shi, TAO Xiaohu, et al. Exposure risk of groundwater arsenic contamination from Huaihe River Plain, China[J]. *Emerging Contaminants*, 2022, 8: 310 – 317.
- [17] 龚建师, 王赫生, 朱春芳, 等. 淮河流域地下水资源评价成果报告[R]. 南京: 中国地质调查局南京地质调查中心, 2023. [GONG Jianshi, WANG Hesheng, ZHU Chunfang, et al. Report of groundwater resources evaluation in Huaihe River Basin[R]. Nanjing: Nanjing Center China Geological Survey, 2023. (in Chinese)]
- [18] 水利部淮河水利委员会. 淮河流域及山东半岛水资源公报[EB/OL]. (2024-09-10)[2024-09-15]. [Huaihe Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources. Bulletin of water resources in Huaihe river basin and Shandong peninsula [EB/OL]. (2024-09-10)[2024-09-15]. <http://www.hrc.gov.cn/main/szygb/923431.jhtml>. (in Chinese)]
- [19] 沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993. [SHEN Zhaoli, ZHU Wanhua, ZHONG Zuoshen. *Basis of hydrogeochemistry*[M]. Beijing: Geological Press, 1993. (in Chinese)]
- [20] 何宝南, 何江涛, 孙继朝, 等. 区域地下水污染综合评价研究现状与建议[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 51 – 63. [HE Baonan, HE Jiangtao, SUN Jichao, et al. Comprehensive evaluation of regional groundwater pollution: Research status and suggestions[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(3): 51 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 田福金, 马青山, 张明, 等. 基于主成分分析和熵权法的新安江流域水质评价[J]. 中国地质, 2023, 50(2): 495 – 505. [TIAN Fujin, MA Qingshan, ZHANG Ming, et al. Evaluation of water quality in Xin'anjiang River Basin based on principal component analysis and entropy weight method[J]. *Geology in China*, 2023, 50(2): 495 – 505. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 薛伟锋, 褚莹倩, 吕莹, 等. 基于主成分分析和模糊综合评价的地下水水质评价——以大连市为例[J]. 环境保护科学, 2020, 46(5): 87 – 92. [XUE Weifeng, CHU Yingqian, LV Ying, et al. Groundwater quality assessment based on principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation: Taking Dalian as an example[J]. *Environmental Protection Science*, 2020,

- 46(5): 87 – 92. (in Chinese with English abstract)]
- [23] ZHOU Fangying, SUN Shunqiang, MOLNAR J J. Evaluation of the development of circular agriculture in Sichuan Province based on the coefficient of variation[J]. *Asian Agricultural Research*, 2015, 7(3): 56 – 60.
- [24] PIPER A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, 25(6): 914 – 928.
- [25] 朱春芳, 龚建师, 陶小虎, 等. 淮河流域浅层地下水水化学特征 10 年对比分析及其环境变迁意义 [J]. *华东地质*, 2023, 44(3): 282 – 291. [ZHU Chunfang, GONG Jianshi, TAO Xiaohu, et al. Comparison of the hydrochemical characteristics of shallow groundwater in the Huaihe River Basin during a ten-year period and its significance to environmental change[J]. *East China Geology*, 2023, 44(3): 282 – 291. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 中华人民共和国国土资源部和水利部. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [Ministry of Land and Resources and Ministry of Water Resources of the people's Republic of China. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [27] WANG Haoran, ZHANG Mengdi, WANG Chuanying, et al. A novel method for quantifying human disturbances: A case study of Huaihe River Basin, China[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 10: 1120576.
- [28] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088 – 1090.
- [29] GIBBS R J. Water chemistry of the Amazon River[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, 36(9): 1061 – 1066.
- [30] ZHU Bingqi, YANG Xiaoping, RIOUAL P, et al. Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarer and Yili) in northern Xinjiang, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(8): 1535 – 1548.
- [31] FAN Bailing, ZHAO Zhiqi, TAO Faxiang, 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.
- [32] ZHAI Yuanzheng, ZHAO Xiaobing, TENG Yanguo, et al. Groundwater nitrate pollution and human health risk assessment by using HHRA model in an agricultural area, NE China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137: 130 – 142.
- [33] ZHAI Yuanzheng, LEI Yan, WU Jin, et al. Does the groundwater nitrate pollution in China pose a risk to human health? A critical review of published data[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(4): 3640 – 3653.
- [34] HUDAK P F. Regional trends in nitrate content of Texas groundwater[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(1/2): 37 – 47.
- [35] 涂春霖, 陈庆松, 尹林虎, 等. 我国地下水硝酸盐污染及源解析研究进展 [J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3129 – 3141. [TU Chunlin, CHEN Qingsong, YIN Linhu, et al. Research advances of groundwater nitrate pollution and source apportionment in China[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3129 – 3141. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳