

鄱阳湖流域浅层地下水硝酸盐氮 时空分布特征与来源

董一慧^{1,2} 刘春篁^{1,2} 咎金晶² 李佳乐^{1,2} 郭威¹ 卫承芳²

楚珺² 孙占学^{1,2} Evgeniya Soldatova³ Hirok Chaudhuri⁴¹

(1. 核资源与环境国家重点实验室, 东华理工大学, 江西 南昌 330013;

2. 水资源与环境工程学院, 东华理工大学, 江西 南昌 330013;

3. 俄罗斯莫斯科沃纳德斯基地球化学与分析化学研究所,

俄罗斯 莫斯科 119991; 4. 印度国立杜尔加布尔理工学院物理系,

印度 杜尔加布尔 713209)

【摘要】: 以鄱阳湖流域为研究区, 以区内浅层地下水作为研究对象, 对浅层地下水硝酸盐氮分布特征和时空变化规律进行研究并分析来源。浅层地下水中硝酸盐氮浓度在 0.5~21.6mg/L 范围内, 平均值为 7.0mg/L。丰水期和枯水期, 硝酸盐氮浓度分别为 0.7~21.6 和 0.5~15.7mg/L。高浓度硝酸盐氮主要出现在流域内典型农灌区。水体氮氧同位素特征显示, 地表水主要来源为大气降水, 受其他补给来源及蒸发作用的混合影响; 地下水主要来源为当地大气降水, 与地表水发生混合作用, 受蒸发作用影响较小。硝酸盐氮氧同位素结果显示降雨、灌溉、土地利用类型、肥料施用是影响研究区浅层地下水中硝酸盐氮浓度及分布的主要因素。贝叶斯模型计算结果显示, 土壤氮对地下水硝酸盐氮的贡献率最大, 平均贡献率为 44.6%; 大气降水的贡献率仅次于土壤氮, 平均贡献率为 28.2%; 氮肥, 污水和粪便的贡献率分别为 19.4%和 7.8%。

【关键词】: 鄱阳湖流域 地下水 硝酸盐氮 时空变化 贝叶斯模型

作者简介: 董一慧(1986~), 女, 讲师, 主要研究方向为地下水污染与防治. E-mail:yhdong@ecut.edu.cn; 孙占学 E-mail:zhxsun@ecut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作研究项目(51861145308); 俄罗斯基础研究基金会项目(RFBR18-55-80015); 印度金砖国家科技和创新框架计划合作研究项目(DST/IMRCD/PilotCall2/Enviorganic/2018(G)); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200769); 江西省大学生创新创业训练计划项目(S202010405036)

【中图分类号】:X143 【文献标识码】:A 【文章编号】:1004-8227(2021)12-2972-10

氮作为地球上含量最高的元素,通过氮循环完成物质与能量的转移^[1],是生命构成和植物生长所必需的营养物质。地下水中,硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和氨氮是无机氮最常见的3种形态,它们是重要的地下水污染物^[2]。地下水中氮污染问题极其复杂,主要表现为污染来源的多样性、迁移转化过程的复杂性、以及地下水污染后,修复治理难度大等特点^[3,4]。地下水中氮的主要污染源包括大气氮的干湿沉降、农业活动(农药和化肥等)、地表受污染水体、固体废弃物渗滤液下渗、工业及生活活动产生的废水及粪便等^[5,6,7,8,9,10,11]。氮素通过物理、化学、生物等过程发生迁移转化^[4,12,13]。

硝酸盐氮是衡量水体毒理性与富营养化程度的重要指标,其浓度过高会导致水质恶化,生态环境破坏、人类健康受到威胁^[14,15]。硝酸盐氮经过人体体内相关酶的作用进行转化后,成为化学性质更稳定但具有致癌作用、致畸作用和致突变作用的亚硝基化合物(亚硝基胺和亚硝基酰胺),长时间饮用含高浓度硝酸盐的水使人患高铁血红蛋白症(婴儿最常见)、消化道癌、膀胱癌、卵巢癌、骨骼、皮肤、甲状腺、脑及神经系统等疾病的风险增大,甚至诱发糖尿病、加重肾脏负担^[16]。

鄱阳湖是中国第一大淡水湖,是长江流域最大的天然洪水调蓄区,也是一个典型的季节性吞吐型湖泊,其独特的湿地生态系统对长江流域生物多样性保护起着巨大作用^[17]。作为一个典型的“吞吐型”湖泊,鄱阳湖在丰水期和枯水期发生明显的地表水—地下水相互作用。在丰水期,鄱阳湖水位较高,湖水向地下水补给;在枯水期,鄱阳湖水位降低,成为地下水的排泄区。鄱阳湖流域内地表水与地下水发生水力联系的过程中,硝酸盐氮发生季节性迁移和转化。该流域内人口密集、农业生产活动集中,已有研究表明,区内水环境质量不断下降,且人类活动已对浅层地下水水质造成影响,导致浅层地下水受到不同程度的营养元素、重金属和有机污染,其中硝酸盐氮是典型污染物,已发现流域内超过10%的地下水出现相关污染,硝酸盐氮浓度高达46.6mg/L^[18]。

地下水中硝酸盐氮来源复杂,来源识别方法较多,但传统方法难以定量分析各来源的贡献率。基于狄利克雷分布,在贝叶斯框架下构建逻辑先验分布模型,综合考虑同位素的时空变异性、反硝化反应中同位素分馏作用、硝酸盐氮的多个污染来源等因素^[19,20,21],可运用贝叶斯模型,根据水样氮氧同位素组成精确量化不同来源对地下水硝酸盐氮的贡献比例。

目前对于鄱阳湖流域内浅层地下水中硝酸盐氮污染机制尚不明确,对其污染特征及来源分析可为科学防治鄱阳湖流域内地下水污染提供有效理论支撑。

1 研究区概况

鄱阳湖位于江西省北部、长江中游南岸,是中国最大的淡水湖,也是国际上重要的候鸟越冬地之一。鄱阳湖流域位于113°42'E~118°35'E,24°29'N~30°03'N之间,总面积为162225km²,占江西省总面积的97%。流域内地势整体南高北低,南部主要由谷地和丘陵构成,北部主要由长江和五河水系冲击淤积而成的鄱阳湖平原构成。研究区位于鄱阳湖流域北部,主要为鄱阳湖平原湖区。

2 研究方法

2.1 样品采集

选取鄱阳湖流域内典型水稻种植区和畜禽养殖区,采集115个水样,其中地表水样品47个(丰水期样品21个,枯水期样品26个),浅层地下水样品68个(丰水期、枯水期样品各34个)。采样点分布如图1所示:畜禽养殖区地表水主要取自赣江支流袁水和锦江,包括生活污水和畜禽养殖排污口废水,农业灌溉区地表水主要取自赣江及五大支流入湖口;地下水样品主要取自民用井,井深为0.97~20m。

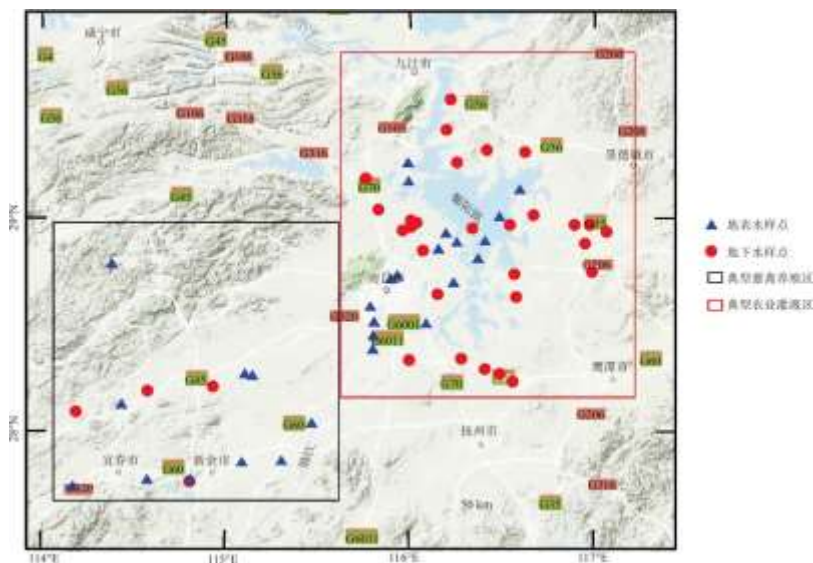


图 1 鄱阳湖流域内采样点分布图

取样前用去离子水将采样瓶清洗干净，取样时用所采水样润洗 3 次采样瓶，收集新鲜水样于 500mL 聚乙烯瓶中，水样装满无气泡，密封保存。用于水化学分析的样品现场用 0.45 μm 过滤器过滤后保存，于 4℃ 冷藏，48h 内进行测试。

2.2 样品分析与计算

样品分析方法见表 1。 $\delta\text{D-H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ 、 $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ 值的分析误差分别小于 0.5%、0.1%、0.2% 和 0.3%。

表 1 样品分析指标及仪器

指标	仪器
水样现场指标 (pH, 温度 (T), 溶解氧 (DO), 电导率 (EC), 氧化还原电位 (Eh))	便携式水质分析仪 (HACH HQ40D)
碱度	MColor 试剂盒
阴离子浓度 (F^- , Cl^- , Br^- , SO_4^{2-})	离子色谱仪 (赛默飞, IC-2100)
阳离子浓度 (K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+})	电感耦合等离子体发射光谱 (Thermo Fisher iCAP7600)
氢氧同位素	水同位素分析仪 (LGR, IWA-45EP)
氮氧同位素	连续流稳定同位素质谱仪 (Thermo Scientific GasBench II 和美国 Thermo Fisher Mat253 检测器)

采用贝叶斯稳定同位素混合模型计算各种污染来源的贡献比例^[22], 表达式为:

$$\begin{aligned}
X_{ij} &= \sum_{k=1}^K P_k (S_{jk} + c_{jk}) + \varepsilon_{ij} \\
S_{jk} &\sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \\
c_{jk} &\sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \\
\varepsilon_{ij} &\sim N(0, \sigma_j^2)
\end{aligned} \tag{1}$$

式中： X_{ij} 表示混合物*i*同位素*j*的 δ 值； P_k 表示来源*k*的比例； S_{jk} 表示第*k*个来源的第*j*种同位素的 δ 值，服从均值为 μ 方差的正态分布； c_{jk} 表示第*k*个来源的*j*同位素的分馏系数，服从均值为 λ 方差为 τ 的正态分布； ε 是残余误差，表示其他各个混合物间无法量化的方差，其均值和标准差在通常情况下均为0。

3 结果与讨论

3.1 浅层地下水水化学特征

研究区内地表水呈现酸性、中性及弱碱性，属于淡水和微咸水。地表水pH值在6.2~8.3之间，平均值为7.9，Eh在28.6~308.3mV之间，平均值为168.1mV，TDS介于42~2194mg/L之间，平均值为163mg/L，EC的变化范围为5~1674 μ s/cm，平均值为230.2 μ s/cm，主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} ，主要阴离子为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 。硝酸盐氮浓度为0.7~35.0mg/L，平均值为5.8mg/L。

浅层地下水水化学指标的统计结果显示(表2)：浅层地下水呈现酸性和中性，属于淡水，处于氧化环境。浅层地下水pH值5.34~7.59之间，平均值为6.47，Eh在71.3~306.7mV之间，平均值为190.5mV，TDS介于17~378mg/L之间，平均值为158mg/L，EC的变化范围为33.6~756 μ s/cm，平均值为301.3 μ s/cm，主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} ，主要阴离子为 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 。硝酸盐氮浓度为0.5~21.6mg/L，平均值为7.0mg/L。地表水中硝酸盐氮浓度平均值小于浅层地下水中的平均值。

氢氧同位素组成可有效指示蒸发作用强弱，示踪水循环过程及区分水体来源。研究区地表水 $\delta D-H_2O$ 范围为-31.01‰~-20.19‰，平均值为-26.70‰， $\delta^{18}O-H_2O$ 范围为-5.62‰~-2.67‰，平均值为-4.62‰；地下水 $\delta D-H_2O$ 范围为-38.73‰~-26.61‰，平均值为-33.64‰， $\delta^{18}O-H_2O$ 范围为-4.44‰~-6.73‰，平均值为-5.90‰。

表2 研究区浅层地下水水化学指标统计

项目	最大值	最小值	平均值	标准偏差
pH	7.59	5.34	6.47	0.57
Eh(mV)	306.70	71.30	190.50	61.30
DO(mg/L)	8.28	1.37	4.31	2.12
EC(μ s/cm)	756.00	33.60	301.30	163.40
TDS(mg/L)	378.00	17.00	158.00	85.00
HCO_3^- (mg/L)	242.86	0.00	99.88	77.46

NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	21.60	0.50	7.00	6.00
F ⁻ (mg/L)	0.29	0.00	0.08	0.09
Cl ⁻ (mg/L)	62.01	0.45	26.74	15.67
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	74.50	1.10	22.20	18.10
K ⁺ (mg/L)	68.00	0.20	12.80	16.40
Ca ²⁺ (mg/L)	82.90	2.70	28.40	18.10
Na ⁺ (mg/L)	44.60	1.34	17.08	9.89
Mg ²⁺ (mg/L)	21.60	0.75	7.74	5.04
δ ¹⁸ O-H ₂ O (‰)	-4.44	-6.73	-5.90	0.57
δD-H ₂ O (‰)	-26.61	-38.73	-33.64	3.28

将研究区水体氢氧稳定同位素组成特征与全球大气降水线 (Global Meteoric Water Line, 简称为 GMWL, 方程为 $\delta D=8 \delta^{18}O+10$)^[23]、我国大气降水线 (China Meteoric Water Line, 简称为 CMWL, 方程为 $\delta D=7.9 \delta^{18}O+8.2$)^[24] 及当地 (江西省北部) 降水线方程 (Local Meteoric Water Line, 简称为 LMWL, 方程为 $\delta D=7.16 \delta^{18}O+8.88$)^[25] 进行对比 (如图 2 所示)。结果显示研究区内地表水氢氧同位素值分布较广, 但都位于 3 条降水线附近, 说明其主要来源为大气降水, 部分地表水样点落在大气降水线下方, 表明地表水受其他补给来源及蒸发作用的混合影响; 浅层地下水的氢氧同位素值偏离全球大气降水线和我国大气降水线, 位于其左上方, 但分布于当地降水线附近, 且与我国大气降水线基本平行, 说明当地大气降水为浅层地下水的主要来源, 浅层地下水与地表水发生了混合作用。浅层地下水的氢氧同位素值较地表水相比更紧密分布于降水线附近, 说明浅层地下水相对于地表水补给来源更简单, 受蒸发作用影响更小。

3.2 浅层地下水硝酸盐氮时空分布特征

时间上, 浅层地下水在丰水期、枯水期“三氮” (硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮) 浓度百分比如图 3、图 4 所示, 硝酸盐氮为无机氮的主要存在形态, 丰水期较枯水期硝酸盐氮浓度百分比普遍较高, 这与丰水期浅层地下水硝酸盐氮来源较多, 水位埋藏较浅, 地表水与浅层地下水水力联系较强有关。

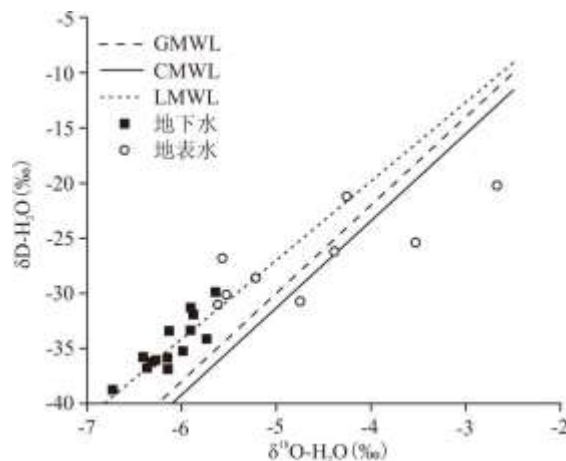


图 2 研究区浅层地下水中氢氧同位素关系

浅层地下水采样点 D22 在丰水期硝酸盐氮浓度最高, 为 21.6mg/L, 该采样点周围为施肥灌溉较频繁的菜地且菜地一侧为臭水沟, 可能受到含氮肥料和地表污水补给影响, 过量施用的氮肥是地下水硝酸盐的主要来源^[26]; 该点枯水期硝酸盐氮浓度为 0.5mg/L, 枯水期时菜地中仍然有灌溉活动, 但臭水沟干枯, 不发生对地下水的补给, 说明地表水对浅层地下水的补给对浅层地下水中硝酸盐氮浓度影响较大。浅层地下水采样点 D3 位于农田, 在丰水期和枯水期时硝酸盐氮浓度分别为 21.2、15.7mg/L, 高浓度硝酸盐氮可能与丰水期施用的粪肥、铵肥的残留及地表水灌溉补给有关。

空间上, 当井深在 0.97~2m 时, 硝酸盐氮浓度在 0.6~3.1mg/L 之间, 相对较低; 当井深为 2~12m 时, 硝酸盐氮浓度在 0.6~21.2mg/L 之间, 相对较高; 当井深在 12~20m 时, 硝酸盐氮浓度在 2.1~3.6mg/L 之间(图 5)。由图 6、7 可见, 硝酸盐氮浓度呈现出明显时空差异。以地下水质量标准中的 III 类水为标准, 丰水期浅层地下水中硝酸盐氮浓度超标率高达 70.58%, 分布于整个流域, 与 Evgeniya 的研究结果一致^[18]; 枯水期该指标超标率为 29.41%, 分布于流域东、南、西三部分, 且均表现出区域分布差异(表 3)。丰水期和枯水期的硝酸盐氮浓度最大值都位于赣江旁水稻种植区, 最小值都出现在畜禽养殖区。硝酸盐氮的时空分布特征说明其在浅层地下水中的分布主要受土地利用类型和农业活动(肥料施用和灌溉等)的影响。

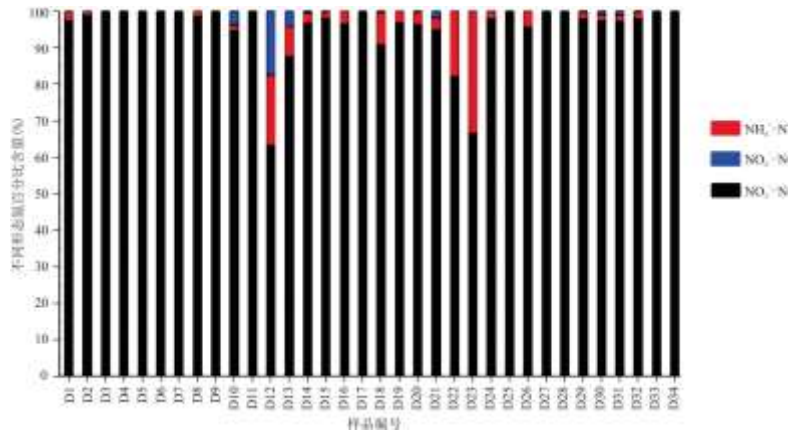


图 3 丰水期浅层地下水“三氮”浓度百分比

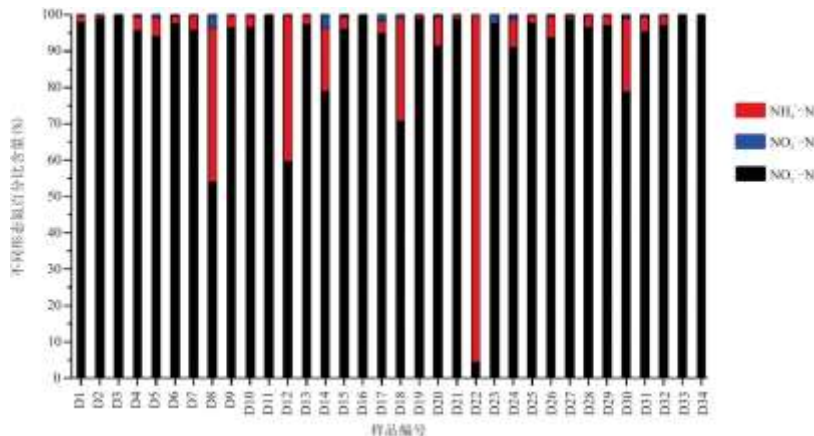


图 4 枯水期浅层地下水“三氮”浓度百分比

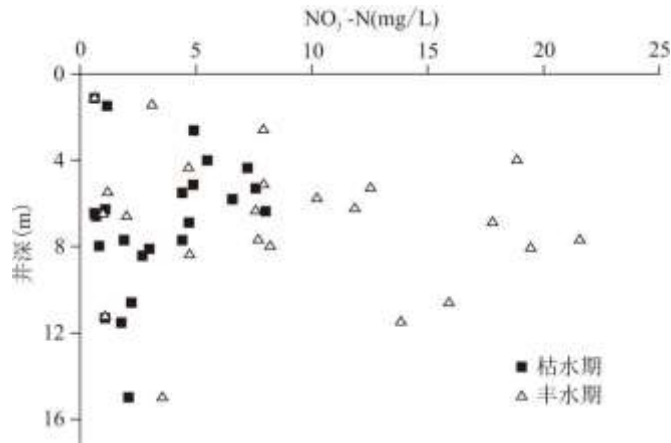


图 5 硝酸盐氮垂向分布特征

3.3 浅层地下水中硝酸盐氮来源分析

硝酸盐氮氧同位素技术是识别水体中硝酸盐氮来源较直接、有效的手段。前人总结了不同来源硝酸盐氮的氮氧同位素值域^[27,28],常用值域范围分别为:来自大气降雨中的 NO_3^- 的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $-4\text{‰}\sim+10\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $+16\text{‰}\sim+60\text{‰}$;来自氮肥的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $-5\text{‰}\sim+7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $+15\text{‰}\sim+22\text{‰}$;来自肥料和降雨中的 NH_4^+ 的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $-8\text{‰}\sim+5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $-6\text{‰}\sim+14\text{‰}$;来自粪便与污水中 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $0\text{‰}\sim+25\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $-6\text{‰}\sim+14\text{‰}$;来自土壤 N 的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $+3\text{‰}\sim+8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 范围为 $-6\text{‰}\sim+14\text{‰}$ 。研究区浅层地下水中硝酸盐氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值域分别为 $-1.07\text{‰}\sim+12.88\text{‰}$ 、 $0.47\text{‰}\sim+20.43\text{‰}$ (图 8),研究区地表水样品的主要来源为肥料和降雨中的 NH_4^+ ,浅层地下水中硝酸盐氮的来源主要有 5 类:(1)土壤 N 与粪肥和污水的混合;(2)土壤氮与粪肥和污水、肥料和降雨中的 NH_4^+ 的混合;(3)粪肥和污水与肥料和降雨中的 NH_4^+ 的混合;(4)肥料和降雨中的 NH_4^+ ;(5)氮肥。

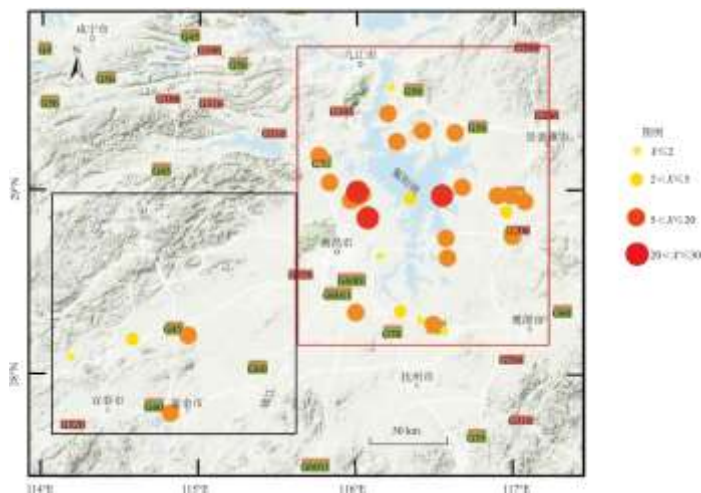


图 6 丰水期浅层地下水中硝酸盐氮分布

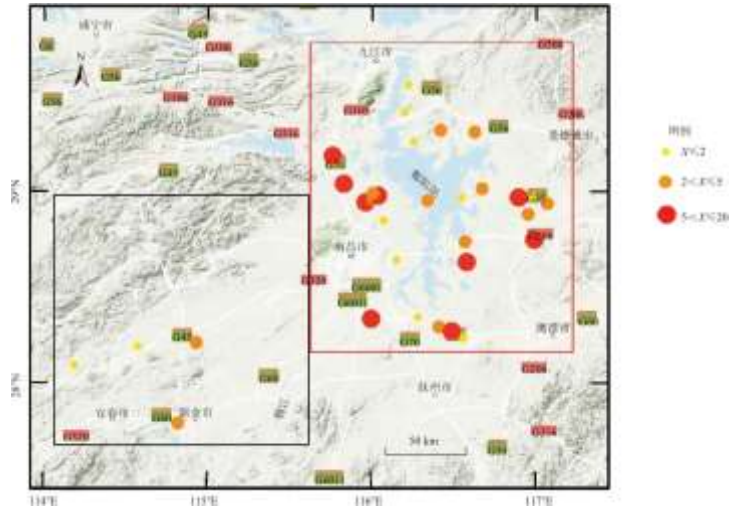


图 7 枯水期浅层地下水中硝酸盐氮分布

表 3 丰水期与枯水期浅层地下水中硝酸盐氮浓度频率分布

硝酸盐氮浓度 (mg/L)	丰水期 (%)	枯水期 (%)
≤ 2	14.71	32.35
$2 < X \leq 5$	14.71	38.24
$5 < X \leq 20$	61.76	29.41
$20 < X \leq 30$	8.82	0.00
> 30	0.00	0.00

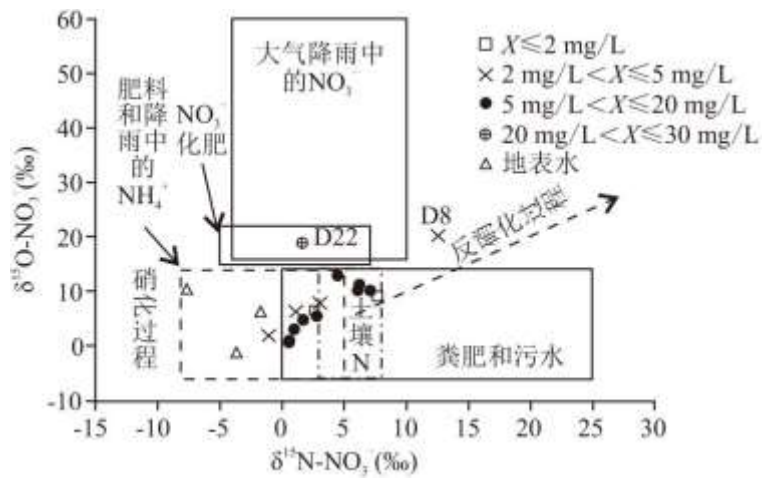


图 8 浅层地下水样品氮氧同位素分布图 (X: 硝酸盐氮浓度)

基于贝叶斯混合模型运用 Rstudio 软件计算大气降水、土壤、氮肥、粪便和污水对鄱阳湖流域地下水硝酸盐氮的贡献率。由表 4 可知,土壤氮的贡献率最大,贡献率介于 20.9%~68.3%,平均贡献率为 44.6%;大气降水的贡献率仅次于土壤氮,介于 6.0%~50.4%,平均贡献率为 28.2%;氮肥、污水和粪便的贡献率较小,分别为 19.4%和 7.8%。

表 4 鄱阳湖流域地下水硝酸盐不同来源的贡献比例

来源	贡献比例 (%)		
	最小值	最大值	平均值±标准差
土壤氮	6.00	50.40	44.60±22.20
大气降水	20.90	68.30	28.20±23.70
氮肥	3.50	35.50	19.40±15.90
污水和粪便	2.40	13.20	7.80±5.40

典型农灌区内,浅层地下水中 NO_3^- 的来源为依次为土壤氮、化肥、大气降水、污水和粪便,平均贡献率依次为 28.5%、26.1%、25.3%、20.1%。畜禽养殖区内,浅层地下水中 NO_3^- 的来源为依次为土壤氮、污水和粪便、大气降水、化肥,平均贡献率分别为 40.2%、27.3%、21.9%和 10.6%。对比分析典型农灌区和畜禽养殖区内浅层地下水中 NO_3^- 来源,占比最多的来源均为土壤氮。农灌区内 4 种不同来源占比较接近。养殖区内土壤氮占比明显高于其他 3 种来源,且该区内化肥的贡献率为 10.6%,明显低于化肥在农灌区的贡献率 26.1%。土壤中的氮素分为有机态氮和无机态氮,绝大部分以有机态存在且不可用,可利用的为无机态氮。土壤中的无机氮常以 NH_4^+ 和 NO_3^- 形态存在,一部分被植物和作物吸收,一部分经硝化作用转变为 NO_3^- 直接渗入含水层,一部分被土壤吸附,在灌溉条件及降水作用下转化为 NO_3^- 并随灌溉水渗入至浅层地下水^[29]。农灌区分布着大量农田,施用在农田的有机氮肥经土壤的矿化作用转化为硝酸盐氮,淋溶入渗至地下水,成为浅层地下水中 NO_3^- 主要来源。大气降水中的氮主要以铵盐和硝酸盐形式存在,流域内南昌市大气中 NH_4^+ 和 NO_3^- 加权平均浓度分别为 65.3 和 25.3 $\mu\text{mol/L}$ ^[30,31],铵盐来自于被雨水溶解的大气气态 NH_3 和被雨水捕获的气溶胶中的 NH_4^+ ,硝酸盐来自于被雨水溶解的 HNO_3 ^[32],二者随雨水进入湖泊或补给地下水。畜禽养殖区的养殖场产生大量含氮废水及含氮生活污水的排放,也是研究区内浅层地下水 NO_3^- 的来源之一。

4 结论

鄱阳湖流域内浅层地下水中硝酸盐氮为无机氮的主要存在形态,丰水期浅层地下水中硝酸盐氮浓度范围为 0.7~21.6mg/L,平均值为 10.0mg/L,枯水期浅层地下水中硝酸盐氮浓度范围为 0.5~15.7mg/L,平均值为 4.1mg/L。较高浓度硝酸盐氮主要采自井深为 2~12m 的浅层地下水。丰水期和枯水期硝酸盐氮浓度分布呈现出时空差异,丰水期大量肥料经过降水和灌溉的淋滤下渗作用使浅层地下水中硝酸盐氮浓度升高;丰水期和枯水期的最高值都出现在水稻种植区,说明土地利用类型、肥料施用和灌溉等会影响浅层地下水中硝酸盐氮的浓度。丰水期和枯水期氨氮浓度时间分布差异较小,主要原因为一部分降雨淋滤下渗的氨氮在经过土壤时被土壤吸附截留,其余部分和土壤重新释放部分的氨氮继续下渗进入地下水中,但空间分布差异明显,说明土地利用类型和农业活动会影响浅层地下水中氨氮的浓度。土壤氮和大气降水对浅层地下水硝酸盐氮的贡献率较大,平均贡献率分别为 44.6%和 28.2%。可通过合理施用氮肥、加强农业废水管理、完善农业废水排放管网、对地表排水沟进行防渗处理等措施,对鄱阳湖流域内的地下水氮污染进行防治。

参考文献:

-
- [1] HISCOCK K M, LLOYD J W, LERNER D N. Review of natural and artificial denitrification of groundwater[J]. *Water Research*, 1991, 25(9):1099-1111.
- [2] 白杨. 农田土吸附/解吸氮素对地下水的影响研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2014.
- [3] YU C, YAO Y Y, HAYES G, et al. Quantitative assessment of groundwater vulnerability using index system and transport simulation, Huangshuihe catchment, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(24):6108-6116.
- [4] 王小丹. 关中盆地氮对浅层地下水污染的数值模拟与预警研究[D]. 长安大学, 2008.
- [5] 毕二平, 李政红. 石家庄市地下水中氮污染分析[J]. *水文地质工程地质*, 2001, 28(2):31-34.
- [6] 孙猛, 董莉莉, 孙明正. 长春市地下水中氮污染分析[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2008, 9(1):58-61.
- [7] 蓝天杉. 北京通州区浅层地下水中“三氮”迁移转化与弱透土层阻滞作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [8] 顾峰雪, 黄玫, 张远东, 等. 1961-2010年中国区域氮沉降时空格局模拟研[J]. *生态学报*, 2016, 36(12):3591-3600.
- [9] 孙志高. 三江平原沼泽湿地氮循环[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [10] MAHDIZADEH K M, GHOLAMI S M, VALIPOUR M. Simulation of open and closed-end border irrigation systems using SIRMOD[J]. *Arch. Agron. Soil Sci*, 2015, 61(7):929-941.
- [11] VAVILIN V A, RYTOV S V. Non-linear dynamic model of nitrogen stable isotope fractionation with formation of nitrous oxide during denitrification[J]. *Water Res*, 2015, 42(2):194-198.
- [12] PINAY G, RUFFINONI C, WONDZELL S, et al. Change in groundwater nitrate concentration in a large river floodplain: Denitrification, uptake, or mixing[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1998, 17(2):179-89.
- [13] 杨维, 郭毓, 王晓华, 等. 氮素在包气带与饱水层迁移转化的实验研究[J]. *环境科学研究*, 2008(3):69-75.
- [14] 郑瑞. 复州河上游氮污染调查及水质净化技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [15] 袁洁. 汉江流域上游氮污染的时空变化格局及其来源解析[D]. 武汉: 中国科学院武汉植物园, 2017.
- [16] LIU J, JIANG L H, ZHANG C J, et al. Nitrate-nitrogen contamination in groundwater: Spatiotemporal variation and driving factors under cropland in Shandong Province, China[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2017, 82(1):12-59.
- [17] 汤明. 城镇化过程对鄱阳湖水域生态环境影响研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [18] EVGENIYA S, NATALIA G, ZHANXUE S, et al. Sources and behaviour of nitrogen compounds in the shallow

groundwater of agricultural areas (Poyang Lake basin, China) [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2017, 202:59-69.

[19] GUO Z F, YAN C Z, WANG Z S, XU F F, YANG F. Quantitative identification of nitrate sources in a coastal peri-urban watershed using hydrogeochemical indicators and dual isotopes together with the statistical approaches [J]. *Chemosphere*, 2020, 243.

[20] FADHULLAH W, YACCOB N S, SYAKIR M I, et al. Nitrate sources and processes in the surface water of a tropical reservoir by stable isotopes and mixing model [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 700:134517.

[21] SHI P, ZHANG Y, SONG J, et al. Response of nitrogen pollution in surface water to land use and social-economic factors in the Weihe River watershed, northwest China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50:101658.

[22] 张妍, 张秋英, 等. 基于稳定同位素和贝叶斯模型的引黄灌区地下水硝酸盐污染源分析 [J]. *中国生态农业报*, 2019, 27 (3):484-493.

[23] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, 133 (3465):1702-1703.

[24] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧同位素研究 [J]. *科学通报*, 1983, 28 (13):801-806.

[25] SUN Z X, GAO B, SHVARTSEV S, et al. The thermal water geochemistry in Jiangxi Province (SE-China) [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, 17:940-943.

[26] 袁利娟, 庞忠和. 地下水硝酸盐污染的同位素研究进展 [J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37 (2):108-113.

[27] KENDALL C, ELLIOTT E M, WANKEL S D. Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems [M]. *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, Blackwell Publishing Ltd, 2007.

[28] 朱琳, 苏小四. 地下水硝酸盐中氮、氧同位素研究现状及展望 [J]. *世界地质*, 2003 (4):396-403.

[29] 邹洪涛, 陈征澳, 虞娜, 等. *环境化学* [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2011.

[30] 孙启斌, 肖红伟, 肖化云, 等. 南昌市大气降水化学特征及来源分析 [J]. *环境科学研究*, 2017 (12):1841-1848.

[31] 周煜. 南昌市新城区大气降水的化学特征与环境指示意义 [D]. 南昌: 南昌大学, 2014.

[32] 肖化云, 刘从强, 李思亮. 贵阳地区夏季雨水硫和氮同位素地球化学特征 [J]. *地球化学*, 2003 (3):248-254.