

佳木斯江北水源地准保区不同土地利用类型 地下水土中氮磷的分布特征

王明会¹, 郭平^{2,3}, 董维红^{2,3}, 郝安静^{2,3}, 于睿^{2,3}, 陈指路^{2,3},
潘存兴^{2,3}, 赵程鹏^{2,3}, 王瀚伯^{2,3}, 杨镇^{2,3}, 张振海¹

(1. 黑龙江省地质矿产局 黑龙江省第六地质勘查院, 黑龙江 佳木斯 154000;
2. 吉林大学 新能源与环境学院, 地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130012;
3. 吉林大学 吉林省水资源与水环境重点实验室, 长春 130012)

摘要: 以黑龙江省佳木斯市江北水源地准保护区为研究区, 选取 7 种典型土地利用类型, 研究不同土地利用类型下地下水和包气带氮磷的分布特征. 结果表明: 在 0~180 cm 包气带深度内水浇地中氨态氮(NH_4^+)显著低于其他土地利用方式($p < 0.05$, 下同); 居民点包气带可溶性氮、磷分布特征与其他土地利用方式差异最大, 其中硝态氮(NO_3^- , 0~150 cm)、亚硝态氮(NO_2^- , 0~120 cm)和溶解态磷(DP, 0~90 cm)的含量显著高于其他土地利用方式, 且含量随土壤深度的增加而降低; 所有土地利用类型的地下水中, NO_3^- 是总氮(TN)主要组成成分, 其中居民点和水浇地地下水中 NO_3^- 含量和 TN 显著高于其他土地利用方式, 农业生产、粪便和废水是居民点位地下水中 NO_3^- 的主要来源. Pearson 相关分析结果表明: 研究区地下水 NO_2^- 含量与 0~30 cm 深度土壤中的 NH_4^+ , NO_2^- 和 NO_3^- 含量以及电导率呈显著正相关; NH_4^+ 含量与 150~180 cm 深度土壤的 pH 值呈显著正相关; TN 与 0~30 cm 深度土壤中的 NH_4^+ 和 NO_2^- 含量呈显著正相关. 研究结果为深入了解不同土地利用方式下包气带土壤氮、磷分布特征与浅层地下水水质的关系提供理论依据.

关键词: 土地利用类型; 包气带土壤; 地下水; 氮; 磷

中图分类号: X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2024)05-1274-11

Distribution Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Groundwater and Soil under Different Land Use Types in Quasi-protected Area of Jiangbei Water Source Area in Jiamusi

WANG Minghui¹, GUO Ping^{2,3}, DONG Weihong^{2,3}, HAO Anjing^{2,3}, YU Rui^{2,3}, CHEN Zhilu^{2,3},
PAN Cunxing^{2,3}, ZHAO Chengpeng^{2,3}, WANG Hanbo^{2,3}, YANG Zhen^{2,3}, ZHANG Zhenhai¹

(1. Sixth Geological Exploration Institute of Heilongjiang Province, Bureau of Geology and
Mineral Resources of Heilongjiang Province, Jiamusi 154000, Heilongjiang Province, China;

2. Key Laboratory of Ground Water Resources and Environment of the Ministry of Education,
College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130012, China;

3. Jilin Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130012, China)

收稿日期: 2024-01-25.

第一作者简介: 王明会(1982—), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 从事水土污染机理的研究, E-mail: 342714583@qq.com.

通信作者简介: 张振海(1982—), 男, 汉族, 高级工程师, 从事测绘和水土污染的研究, E-mail: 274005562@qq.com.

基金项目: 黑龙江省地质矿产局科研基金(批准号: HKY202311).

Abstract: Taking the quasi-protected area of Jiangbei water source area in Jiamusi City, Heilongjiang Province as the research area, we selected seven typical land use types to study the distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in groundwater and aeration zone under different land use types. The results show that the NH_4^+ content in the irrigated land is significantly lower ($p < 0.05$, same below) than that in other land use types within the depth range of 0—180 cm in the aeration zone. The distribution characteristics of dissolved nitrogen and phosphorus in residential area aeration zone are the most different from those in other land use types. The contents of NO_3^- (0—150 cm), NO_2^- (0—120 cm), and DP (0—90 cm) in the residential area aeration zone are significantly higher than those in other land use types, and their contents decrease with the increase of soil depth. For all land use types of groundwater, NO_3^- is the main component of TN, and the contents of NO_3^- and TN in the groundwater of residential areas and irrigated land are significantly higher than those in other land use types. Agricultural production, manure and wastewater are the main sources of NO_3^- in groundwater at residential areas. The results of Pearson correlation analysis show that the content of NO_2^- in groundwater is significantly positively correlated with the contents of NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , and conductivity in the soil at 0—30 cm depth. There is a significant positive correlation between NH_4^+ content and soil pH value at 150—180 cm depth. TN is significantly positively correlated with NH_4^+ and NO_2^- contents in 0—30 cm soil. The research results provide a theoretical basis for an in-depth understanding of the relationship between the distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the aeration zone soil and the quality of shallow groundwater under different land use types.

Keywords: land use type; aeration zone soil; groundwater; nitrogen; phosphorus

氮(N)元素和磷(P)元素作为植物必需的营养元素,其在土壤中的含量和有效性直接影响农业生产,也关系到水体的健康^[1-2]。土地利用是人类在土地上各种活动的综合反映,是影响土壤N和P含量及分布的重要因子,而降水和灌溉会使土壤中的N和P发生淋溶,导致地下水污染^[3]。对于不同土地利用方式土壤或地下水中N和P的相关研究目前报道较多^[4-7],但对二者关系的研究相对较少。

大尺度区域土壤养分含量主要受气候条件、土壤母质和地形地貌等差异影响,在小尺度区域上,由于气候和土壤母质相对均一,因此土地利用类型及其空间分布、施肥以及农作物种植模式等因素的影响相对较大^[8-9]。果园土壤剖面总磷(TP)远高于灌木林地、乔木林地和撂荒地的TP,而有效磷残留量以灌木林地最低,撂荒地最高,但不同土地利用类型间差异不显著^[10]。丘陵地带的旱地土壤中总氮(TN)和 NH_4^+ 显著低于临近的草地,林地最低,氮素流失严重^[11]。TN随土壤深度增加而降低,且呈草地>园地>耕地>荒地的趋势^[12]。人为对土地的开发利用会显著改变土壤剖面N和P存量,且不同的种植类型也会产生不同影响。但目前研究中所涉及的土地利用类型种类较少,而且主要关注耕地和草地,极少关注居民点以及不同种植类型的影响。

不同土地利用方式下人类生产方式如施肥和灌溉等存在差异影响了地下水中N和P的分布及其与土壤理化性质和养分关系。研究表明:设施栽培条件下地下水 NO_3^- 污染和次生盐渍化严重,并与土壤 NO_3^- 和盐渍化密切相关^[13];种植模式对浅层地下水中TN和 NO_3^- 浓度影响显著,土壤中TN和 NO_3^- 平均含量与浅层地下水中TN和 NO_3^- 浓度呈显著相关^[4]。通常蔬菜地伴随高施肥和高灌溉,导致产生更高的地下水中N和P污染风险^[14]。除了农业生产,人为排污也是地下水污染的重要因素^[15]。一项针对广州市地下水的研究表明,在水稻田、菜园、林地和城区4种土地利用方式中,城区地下水硝态氮污染最严重(超标率为48.22%),显著高于水稻田(超标率为40.00%)、菜园(超标率为36.25%)和林地(超标率为6.25%),这主要是由于城区人口密度大、工业化程度高、生活与工业排污量大所致^[16]。目前的研究对地下水污染更多关注的是 NO_3^- 浓度,但根据区域特性差异,也应更多关注地下水的N形态。

本文以黑龙江省佳木斯市江北水源地准保护区为研究区,选取水稻田、居民点、旱地、水浇地、撂

荒地、林地和岸边带 7 种典型土地利用类型, 分别采集不同土地利用类型的包气带(0~180 cm)土壤样品和浅层地下水样品, 通过分析比较水、土样品的 N 和 P 形态以及与理化指标的关系, 考察包气带和地下水中 N 和 P 对土地利用的响应关系, 以及地下水中 N 和 P 的来源和关键影响因子, 以期为水源地保护区土壤养分流失机制研究和地下水面源污染有效控制提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省东北部的佳木斯市江北水源地准保护区, 地处三江平原西南部, 松花江左岸, 地势较平坦, 总体地势南西高, 北东低. 地貌单元主要为高漫滩和低漫滩, 水文地质剖面如图 1 所示. 多年平均气温 1.8~2.2 °C, 每年最高气温为 7 月, 多年平均气温 22.5 °C, 极端最高气温达 39.2 °C; 最低气温出现在 1 月, 平均气温为 -18.5 °C, 极端最低气温达 -41.7 °C. 多年平均降水量为 536.8 mm, 降水主要集中在 6~9 月, 占全年降水量的 73.2% 以上. 全年无霜期 136.6 d, 年有效积温平均值为 2 559.5 °C.

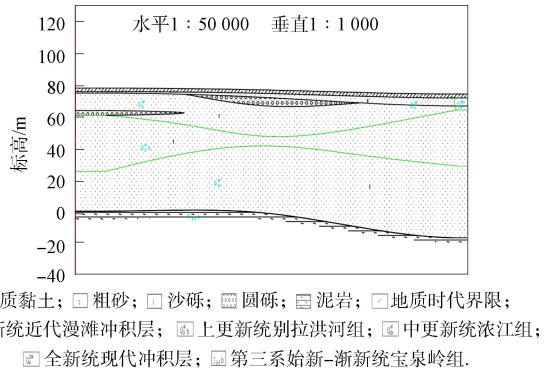


图 1 佳木斯市江北水源地准保护区水文地质剖面
Fig. 1 Hydrogeologic profile of quasi-protected area of Jiangbei water source area in Jiamusi

1.2 样品采集

于 2023 年 7 月, 在佳木斯市江北水源地准保护区选择典型土地利用类型(水稻田(ST)、居民点(JM)、旱地(HD)、水浇地(SJ)、撂荒地(LH)、林地(LD)和岸边带(AB), 其中居民点位于一处垃圾堆附近)采集包气带土壤和地下水样品, 共设 7 个包气带采样点(不同土地利用类型各 1 个), 23 个地下水采样点(水稻田 11 个、居民点 7 个、旱地 1 个、水浇地 1 个、撂荒地 1 个、林地 1 个、岸边带 1 个), 采样点分布信息如图 2 所示. 包气带采样点共采集 0~180 cm 深度的土壤样品, 每 30 cm 混合为一份样品, 每个采样点采集 3 份样品作为平行; 地下水样品收集自研究区内的民用井(18 个)和监测井(5 个), 每个采样点收集 2 份水样作为平行。

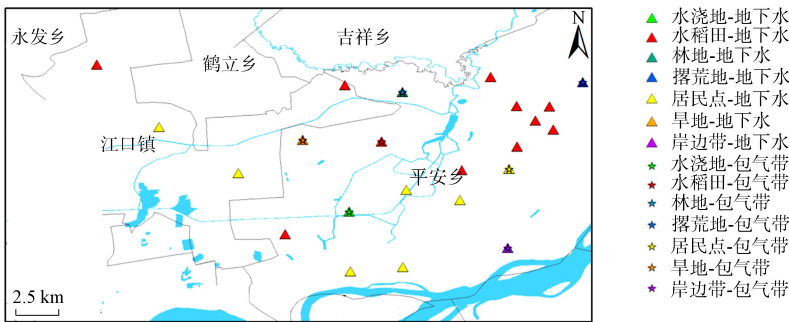


图 2 佳木斯市江北水源地准保护区地下水和包气带样品采样点空间分布示意图
Fig. 2 Schematic diagram of spatial distribution of sampling points of groundwater and aeration zone samples in quasi-protected area of Jiangbei water source area in Jiamusi

1.3 测定方法

地下水理化指标包括高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总悬浮物(TSS)、氨态氮(NH₄⁺)、硝态氮(NO₃⁻)、亚硝态氮(NO₂⁻)、总氮(TN)、可溶性磷(DP)、总磷(TP)、pH 值、氯离子(Cl⁻)、电导率(EC)和氧化还原点位(ORP), 其中 pH 值、EC 和 ORP 使用 pH 测定仪(pHS-3E 型, 上海仪电科学仪器股份有限公司)进行测定, Cl⁻ 使用离子色谱仪(ICS-2100 型, 美国戴安公司)进行测定, 其他各项指标参考《水和废水监测分析方法》^[17] 进行测定, 土壤样品理化指标测定方法均按照《土壤农化分析》^[18] 进行测定。

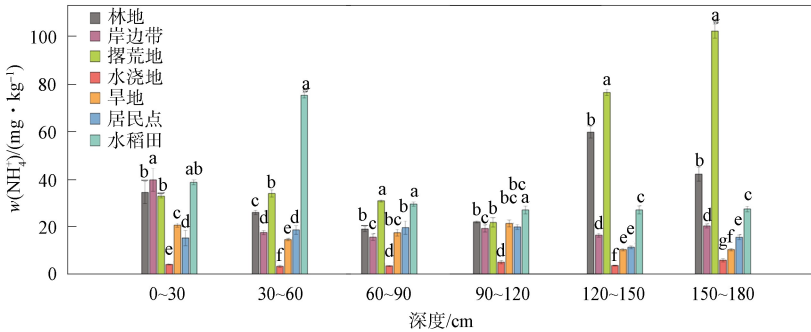
1.4 数据分析

使用 SPSS 22.0 对数据进行单因素方差分析和 Pearson 相关分析, 使用 ORIGIN 和 R 语言绘制图表。

2 结果

2.1 不同土地利用类型下土壤可溶性 N 和 P 分布特征

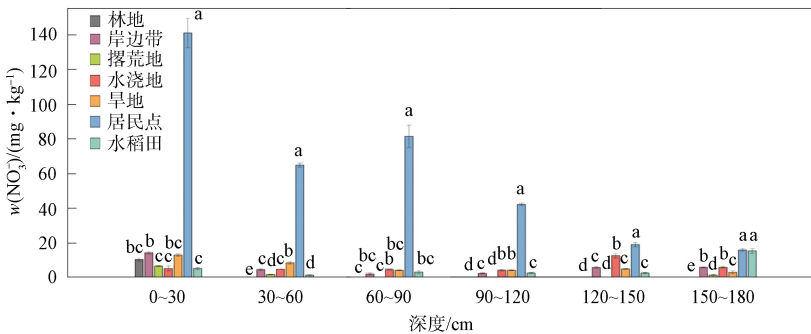
图 3~图 6 分别为不同土地利用类型下 0~180 cm 深度土壤中 NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- 和 DP 的分布特征。由图 3 可见, 研究区内不同土地利用类型土壤中 NH_4^+ 随土壤深度变化较小, 但不同土地利用类型之间存在显著 ($p < 0.05$, 下同) 差异。其中水浇地在 0~180 cm 深度下 $w(\text{NH}_4^+)$ 均显著低于其他土地利用类型; 林地和撂荒地在 120 cm 深度后土壤 $w(\text{NH}_4^+)$ 大幅度增长, 显著高于其他土地利用类型; 水稻田在 30~60 cm 深度时土壤 $w(\text{NH}_4^+)$ 最高, 显著高于其他土地利用类型。



a~g 表示同一参数和深度下不同土地利用类型之间在 0.05 水平上存在显著差异 ($p < 0.05$, LSD, $n=3$)

图 3 不同土地利用类型下 0~180 cm 深度土壤中 NH_4^+ 的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of NH_4^+ in 0—180 cm soil depth under different land use types



a~e 表示同一参数和深度下不同土地利用类型之间在 0.05 水平上存在显著差异 ($p < 0.05$, LSD, $n=3$)

图 4 不同土地利用类型下 0~180 cm 深度土壤中 NO_3^- 的分布特征

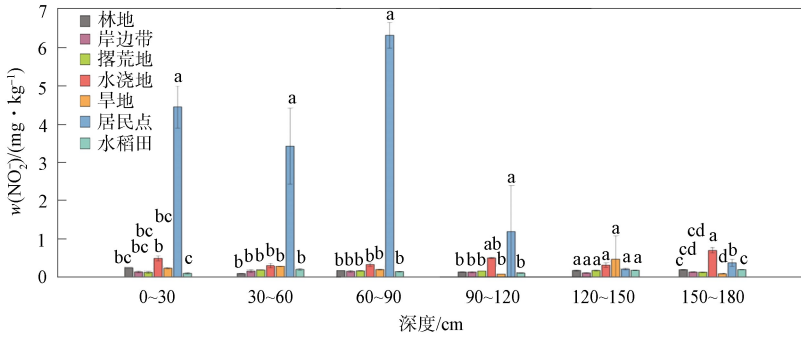
Fig. 4 Distribution characteristics of NO_3^- in 0—180 cm soil depth under different land use types

由图 4 可见: 研究区内居民点在各层土壤中 $w(\text{NO}_3^-)$ 均高于其他土地利用类型, 并随土壤深度增加而逐渐减少; 在 0~120 cm 深度土壤中, 其 $w(\text{NO}_3^-)$ 显著高于其他土地利用类型 1 个数量级以上; 撂荒地和林地土壤 $w(\text{NO}_3^-)$ 随深度的变化趋势相同, 在深度大于 30 cm 后, 土壤中 $w(\text{NO}_3^-)$ 骤减, 几乎消失, 并显著低于其他土地利用类型。

由图 5 可见: 研究区内 $w(\text{NO}_2^-)$ 和 $w(\text{NO}_3^-)$ 的分布特征相近, 居民点在 0~120 cm 深度内土壤 $w(\text{NO}_2^-)$ 均高于其他土地利用类型, 当在 0~90 cm 深度内时, 其 $w(\text{NO}_2^-)$ 显著高于其他土地利用类型 1 个数量级以上; 除居民点外, 其他土地利用类型在各深度土壤间 $w(\text{NO}_2^-)$ 差异较小。

由图 6 可见: 研究区内 $w(\text{DP})$ 在 0~90 cm 深度内, 各土地利用类型整体随深度增长而降低, 在 90 cm 深度后, 土壤中 $w(\text{DP})$ 随深度变化不明显; 各土地利用类型土壤均在 0~30 cm 时, $w(\text{DP})$ 最高, 其中居民点最高, 其次为水稻田和水浇地, 林地最低; 当土壤深度大于 30 cm 后, 水稻田土壤中

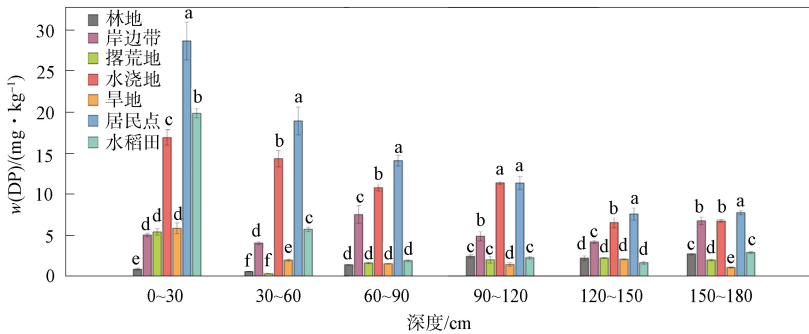
$w(\text{DP})$ 骤减, 但居民点和水浇地仍显著高于其他土地利用类型中的 $w(\text{DP})$.



a~d 表示同一参数和深度下不同土地利用类型之间在 0.05 水平上存在显著差异 ($p < 0.05$, LSD, $n = 3$)

图 5 不同土地利用类型下 0~180 cm 深度土壤中 NO₃⁻ 的分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of NO₃⁻ in 0—180 cm soil depth under different land use types



a~f 表示同一参数和深度下不同土地利用类型之间在 0.05 水平上存在显著差异 ($p < 0.05$, LSD, $n = 3$)

图 6 不同土地利用类型下 0~180 cm 深度土壤中 DP 的分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of DP in 0—180 cm soil depth under different land use types

2.2 不同土地利用类型可溶性 N 和 P 结构特征

图 7 为不同土地利用类型下各深度土壤样品中溶解无机氮(DIN)和 DP 的主成分分析(PCA). 由图 7 可见, 第一和第二主成分分别解释了研究区内不同土地利用类型下 DIN 和 DP 不同深度的结构差异的 49.9%和 40.0%. PCA 结果表明, 研究区内居民点与其他土地利用类型的 N 和 P 分布差异最大, 而旱地和岸边带以及林地和水稻田的 DIN 和 DP 分布特征较相似.

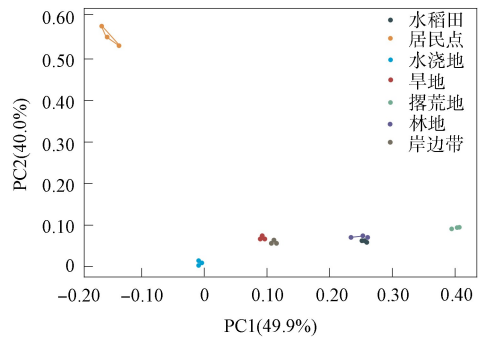


图 7 不同土地利用类型下各深度土壤样品中 DIN 和 DP 的 PCA

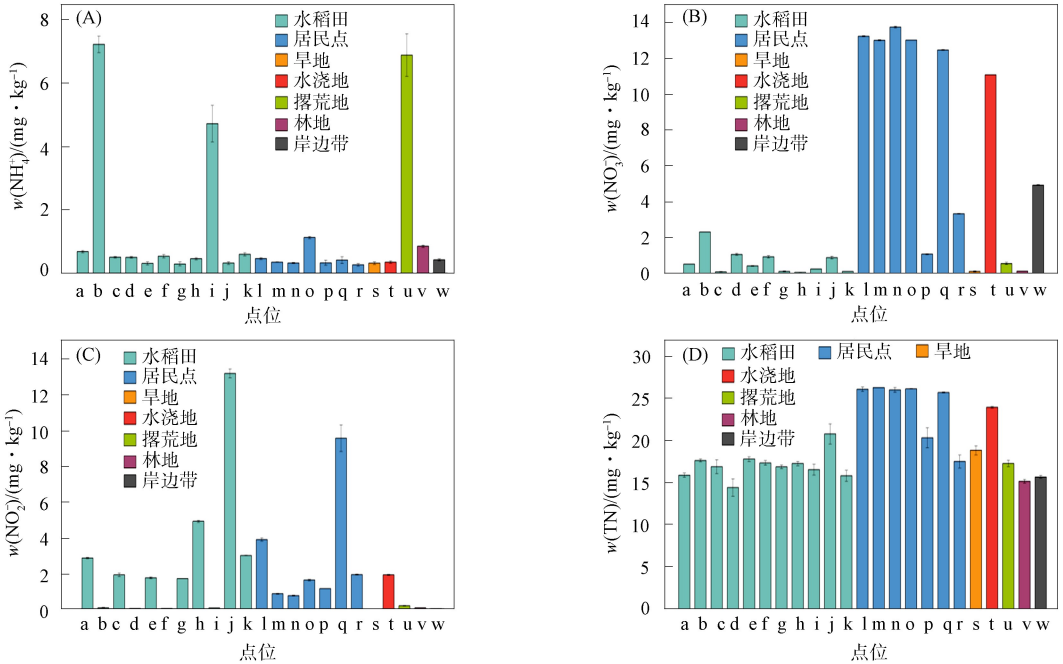
Fig. 7 PCA of DIN and DP soil samples at different depths under different land use types

2.3 不同土地利用类型地下水 N 和 P 特征

2.3.1 不同土地利用类型地下水 N 特征

图 8 为不同土地利用类型地下水 NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻ 和 TN 的分布特征. 由图 8(A)可见: 研究区内不同土地利用类型地下水中 $w(\text{NH}_4^+)$ 的空间离散性较大, 其中 ST-A4, ST-B7 和 LH-B2 这 3 个点位的 $w(\text{NH}_4^+)$ 显著高于其他点位 4 倍以上; 剩余点位地下水中 $w(\text{NH}_4^+)$ 差异较小, 在 0.27~1.13 mg/L 内波动. 由图 8(B)可见: 研究区内不同土地利用类型地下水中 $w(\text{NO}_3^-)$ 存在明显差异, 其中居民点地下水中 $w(\text{NO}_3^-)$ 最高, 平均值为 9.98 mg/L, 显著高于水稻田、旱地、撂荒地、林地和岸边带中的 $w(\text{NO}_3^-)$; 其次为水浇地和岸边带; 水稻田、旱地、撂荒地和林地之间 $w(\text{NO}_3^-)$ 差异较小, 在 0.08~2.30 mg/L 内波动. 由图 8(C)可见: 研究区内不同土地利用类型地下水中 $w(\text{NO}_2^-)$ 的空间离散性较大, 其中水稻田中 $w(\text{NO}_2^-)$ 的空间差异性最大, 最小值为 0.04 mg/L, 最大值为

13.14 mg/L, 平均值为 2.67 mg/L; 居民点中 $w(\text{NO}_2^-)$ 也存在明显的空间差异性, 最小值为 0.85 mg/L, 最大值为 9.53 mg/L, 平均值为 2.81 mg/L. 由图 8(D)可见: 研究区内不同土地利用类型地下水中 $w(\text{TN})$ 存在明显差异, 其中居民点和旱地显著高于其他土地利用类型的 $w(\text{TN})$, 平均 $w(\text{TN})$ 分别为 23.99, 23.92 mg/L, 其他土地利用类型 TN 差异较小, 为 14.04~20.76 mg/L.



a. ST-A1; b. ST-A4; c. ST-A5; d. ST-B1; e. ST-B3; f. ST-B5; g. ST-B6; h. ST-B4; i. ST-B7; j. ST-C1; k. ST-C4; l. JM-A6; m. JM-A7; n. JM-A9; o. JM-A10; p. JM-C2; q. JM-C3; r. JM-C5; s. HD-A3; t. SJ-A8; u. LH-B2; v. LD-A2; w. AB-A11.

图 8 不同土地利用类型地下水中 $w(\text{NH}_4^+)$ (A), $w(\text{NO}_3^-)$ (B), $w(\text{NO}_2^-)$ (C) 和 $w(\text{TN})$ (D) 的分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of $w(\text{NH}_4^+)$ (A), $w(\text{NO}_3^-)$ (B), $w(\text{NO}_2^-)$ (C) and $w(\text{TN})$ (D) in groundwater under different land use types

为考察地下水水质与土地利用类型之间的关系, 参考中华人民共和国地下水质量标准^[19], 绘制研究区不同土地利用模式下地下水中 N 污染空间分布示意图, 如图 9 所示, 其中 NO_3^- 含量均为Ⅲ类水及以下, 因此未展示. 由图 9 可见, 研究区内地下水中 NH_4^+ 共有 7 处为超Ⅲ类水, 其中 4 处为水稻田 (2 处Ⅴ类), 3 处分别为撂荒地 (Ⅴ类)、居民点 (Ⅳ类) 和林地 (Ⅳ类). 研究区内地下水中 NO_2^- 共有 6 处超Ⅲ类水 (均为Ⅳ类), 其中 4 处为居民点, 2 处为水稻田. 表明研究区内水稻田和居民点处的浅层地下水分别存在更高的 NH_4^+ 和 NO_2^- 超标风险.

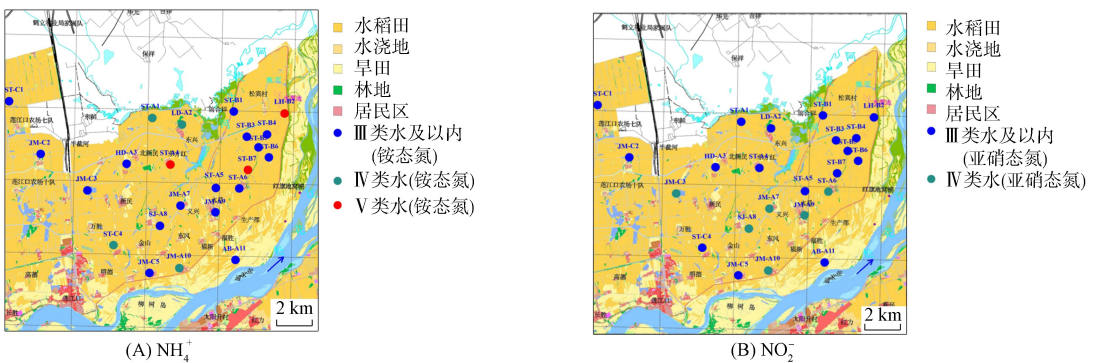
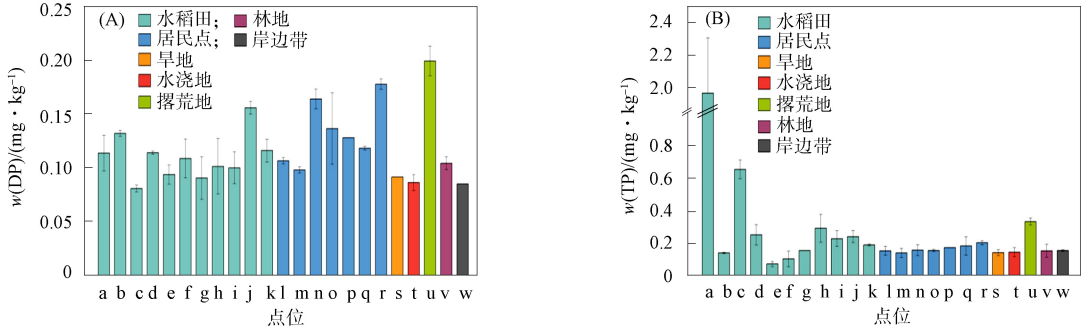


图 9 不同土地利用条件下地下水中 NH_4^+ (A) 和 NO_2^- (B) 污染空间分布示意图

Fig. 9 Schematic diagram of spatial distribution of NH_4^+ (A) and NO_2^- (B) contamination in groundwater under different land use types

2.3.2 不同土地利用类型下地下水中 P 的特征

图 10 为不同土地利用类型地下水磷 DP 和 TP 分布特征. 由图 10(A)可见, 研究区内不同土地利用类型地下水中 DP 差异较小, 其中撂荒地显著高于其他土地利用类型, 为 0.20 mg/L, 其他采样点 DP 在 0.08~0.18 mg/L 内波动. 由图 10(B)可见: 研究区内水稻田各采样点地下水中 TP 之间空间差异性较大, 其中最小值为 0.07 mg/L, 最大值为 1.97 mg/L, 平均值为 0.39 mg/L; 与 DP 的结果类似, 撂荒地地下水中 TP 显著高于居民点、旱地、水浇地、林地和岸边带.



a. ST-A1; b. ST-A4; c. ST-A5; d. ST-B1; e. ST-B3; f. ST-B5; g. ST-B6; h. ST-B4; i. ST-B7; j. ST-C1; k. ST-C4; l. JM-A6; m. JM-A7; n. JM-A9; o. JM-A10; p. JM-C2; q. JM-C3; r. JM-C5; s. HD-A3; t. SJ-A8; u. LH-B2; v. LD-A2; w. AB-A11.

图 10 不同土地利用类型地下水 DP(A)和 TP(B)分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of DP (A) and TP (B) in groundwater under different land use types

2.4 地下水中硝态氮来源

粪便、工业废水和生活污水中常含有高浓度的 Cl^- , 而化学肥料中几乎没有 Cl^- , 且因 Cl^- 具有保守性, 因此, $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{Cl}^-)$ 和 $c(\text{Cl}^-)$ 可用来区分地下水中的 NO_3^- 是源自农业活动还是粪便及废水. 图 11 为研究区内地下水中 $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{Cl}^-)$ 与 $c(\text{Cl}^-)$ 的关系. 由图 11 可见: 研究区内撂荒地、林地和 2 个居民点以及所有水稻田点位处于 $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{Cl}^-)$ 和 $c(\text{Cl}^-)$ 都很低的区域, 表明其 NO_3^- 主要来自农业生产; 岸边带和 2 个居民点点位处于 $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{Cl}^-)$ 、 $c(\text{Cl}^-)$ 低的区域, 表明导致其 NO_3^- 增长的主要原因为过高的肥料施用; 水浇地和 3 个居民点点位处于 $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{Cl}^-)$ 中、 $c(\text{Cl}^-)$ 高的区域, 表明其 NO_3^- 主要来自粪便和生活废水.

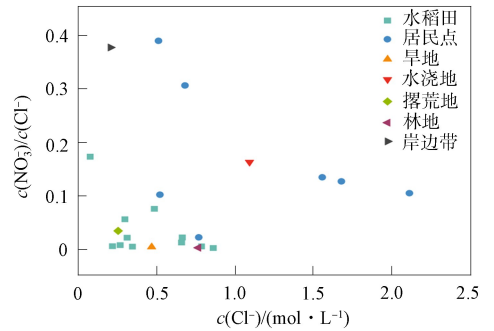


图 11 地下水中 $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{Cl}^-)$ 与 $c(\text{Cl}^-)$ 的关系

Fig. 11 Relationship between $c(\text{NO}_3^-)/c(\text{Cl}^-)$ and $c(\text{Cl}^-)$ in groundwater

2.5 地下水中 N 和 P 与土壤和地下水理化性质的关系

为明确影响研究区内地下水中 N 和 P 的关键因素, 将研究区内采集的 0~30 cm 和 150~180 cm 深度土壤与相应点位的地下水数据进行 Pearson 相关分析, 结果如图 12 所示. 由图 12 可见: 地下水中 NH_4^+ 与 150~180 cm 深度土壤的 pH 值呈显著正相关; 地下水中 NO_2^- 与 0~30 cm 深度土壤中的 NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- 和 EC 呈显著正相关; 地下水中 TN 与 0~30 cm 深度土壤中的 NH_4^+ 和 NO_2^- 呈显著正相关; 地下水中 DP 与 150~180 cm 深度土壤的 pH 值呈显著正相关.

土壤养分和分布是自然因子和人为因子共同作用的结果, 因此不同土地利用类型下包气带氮分布存在差异^[20-22]. 研究区内水浇地在 0~180 cm 深度内土壤中 NH_4^+ 均显著低于其他土地利用方式 (图 3), 这可能与管理方式有关. 研究区内水浇地主要为蔬菜大棚, 使用的氮肥以硝态氮肥和农家肥为主^[23]. 因此, 长期输入包气带中的 NH_4^+ 量较少. 此外, 即使存在少量 NH_4^+ , 土壤对阳离子的固定效应^[24]也会使 NH_4^+ 难以从土壤中向下迁移, 因此各土地利用类型下, NH_4^+ 随土壤深度变化较小.

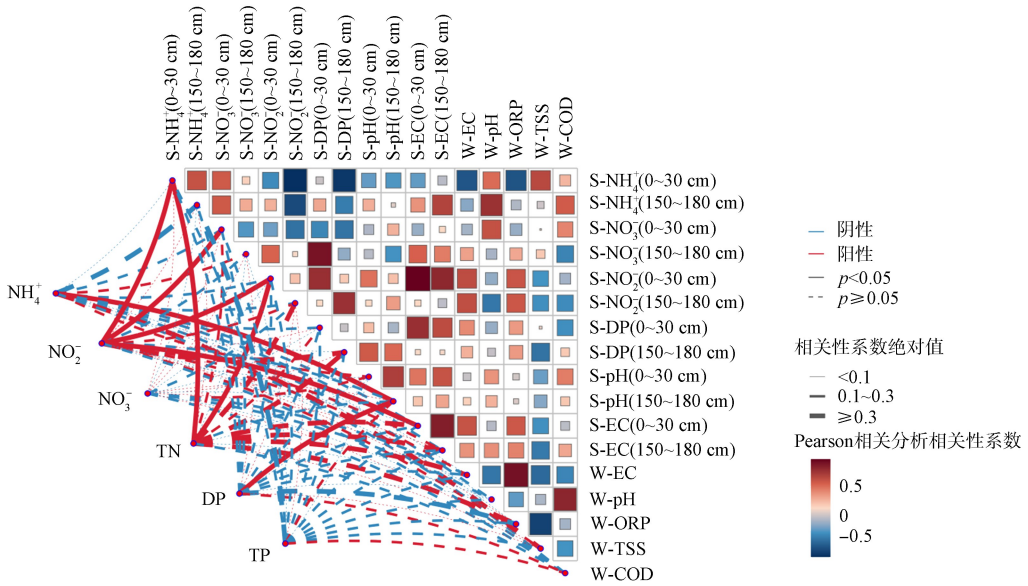


图 12 地下水中 N 和 P 含量与土壤和地下水理化性质的 Pearson 相关分析

Fig. 12 Pearson correlation analysis of N and P content in groundwater with soil and groundwater physicochemical properties

居民点垃圾堆积会显著增加包气带中 NO_3^- , NO_2^- 和 DP, 影响深度范围分别为 0~150 cm, 0~120 cm 和 0~90 cm, 其质量比随着土壤深度的增加而降低(图 3~图 5). 王秀珍等^[25]通过土柱实验也得到了类似结果. 林地和撂荒地仅表层(0~30 cm)土壤中存在较低浓度的 NO_3^- , 在 30 cm 深度后, 土壤中 NO_3^- 几乎为 0. 陆安祥等^[26]在草地中也得到了类似结果, 这可能是较低外源氮输入所致. PCA 分析表明, 旱地和岸边带以及林地和水稻田的 DIN 和 DP 分布特征较相似(图 6), 这可能是因为研究区内土地被开垦程度较大, 岸边带和林地的采样点物理距离上分别与旱地和水田临近, 因此其 DIN 和 DP 分布特征较相似.

相比于土壤, 地下水中 N 和 P 更易受环境影响, 且易发生迁移、扩散和稀释, 因而由它们导致的污染变异性更强^[27-28]. 本文结果表明, 研究区内地下水中 NH_4^+ 和 NO_2^- 的空间离散性较大(图 7 和图 9), 而 NO_3^- 和 TN 对土地利用类型存在明显响应, 表现为居民点和水浇地处的地下水中 NO_3^- 和 TN 显著高于其他土地利用类型(图 8 和图 10). 张明华等^[7]研究表明, 人类居住会显著增加地下水硝酸盐的含量. 研究区地下水中 NO_3^- 是 TN 的主要组成成分, 可见 TN 也受人类活动的影响. NO_2^- 在环境中不稳定, 易被氧化^[29], 因此形成了较大的空间差异性. 然而 NH_4^+ 易被土壤固定, 难以在土壤中迁移, 而且迁移性受包气带介质性质影响较大^[30-31], 因此在不同土地利用类型地下水中含量低且空间差异性较大.

研究区内水浇地和部分居民点点位地下水中的 $c(Cl^-)$ 较高, 而 $c(NO_3^-)/c(Cl^-)$ 较低(图 11), 表明该条件下硝酸盐的主要来源为粪便和废水^[32]. 研究表明, 研究区内水浇地主要使用专用肥配施农家肥, 也证实了该结果. 部分居民点点位 $c(Cl^-)$ 较低而 $c(NO_3^-)/c(Cl^-)$ 较高(图 11), 表明该条件下硝酸盐的主要来源为农业活动^[32], 导致该结果的原因可能是居民点邻近农田, 且部分居民院内也种植玉米等作物. Pearson 相关分析结果表明, 地下水中 NH_4^+ 与 150~180 cm 深度土壤的 pH 值呈显著正相关, 且研究区内地下水中具有较高含量的 NH_4^+ . 因此, 研究区内较高含量 NH_4^+ 可能来自微生物的异化硝酸盐还原过程(DNRA), 而 pH 值的变化会影响亚硝酸盐还原酶的活性, 进而影响 DNRA 过程^[33]. 研究区内地下水中具有较高的 NO_2^- 和适中的 NO_3^- , 而在高 NO_2^-/NO_3^- 条件下, 有利于 DNRA 过程的发生^[34].

3 结 论

本文考察了黑龙江省佳木斯市江北水源地准保区不同土地利用类型地下水、土中的 N 和 P 分布

特征以及二者的关系,得到如下结论:

- 1) 在 7 种土地利用类型中,居民点处对包气带和地下水中氮和组成影响最大,其中对包气带的氮磷含量影响深度大于 90 cm;
- 2) 地下水中 NH_4^+ 和 NO_2^- 的空间离散性较大,而 NO_3^- 和 TN 对土地利用类型存在明显响应;
- 3) 研究区内地下水中较高含量的 NH_4^+ 与土壤氮含量没有关联,可能源于微生物的硝酸盐异化过程,而地下水中 NO_2^- 和 TN 受控于表层土壤的氮。

参 考 文 献

- [1] 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本状况 [J]. 土壤学报, 1989(3): 280-286. (LU R K. General Status of Nutrients (N,P,K) in Soils of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 1989(3): 280-286.)
- [2] HU M M, WANG Y C, DU P C, et al. Tracing the Sources of Nitrate in the Rivers and Lakes of the Southern Areas of the Tibetan Plateau Using Dual Nitrate Isotopes [J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 132-140.
- [3] 张学军, 任发春, 赵营, 等. 引黄灌区设施菜田硝态氮淋失的季节性特征 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1964-1972. (ZHANG X J, REN F C, ZHAO Y, et al. Seasonal Changes of Nitrate Leaching in Greenhouse Vegetable Field in Yellow River Irrigation Region of Ningxia, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(10): 1964-1972.)
- [4] 陈成龙, 高明, 木志坚, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系 [J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3254-3263. (CHEN C L, GAO M, MU Z J, et al. Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3254-3263.)
- [5] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5594-5602. (GAO J L, LUO F M, GAO Y, et al. Ecological Soil C, N, and P Stoichiometry of Different Land Use Patterns in the Agriculture-Pasture Ecotone of Northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5594-5602.)
- [6] 王登超, 张蒙蒙, 安静, 等. 黔中森林不同土地利用类型土壤养分及计量特征 [J]. 安徽农业科学, 2023, 51(2): 93-98. (WANG D C, ZHANG M M, AN J, et al. Soil Nutrient and Quantitative Characteristics of Different Land Use Types of Forest in Central Guizhou [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(2): 93-98.)
- [7] 张明华, 阎雪蕊, 吉莉, 等. 太原市地下水中硝酸盐氮的空间分布特征及土地利用类型的响应 [J]. 当代化工研究, 2023(8): 26-28. (ZHANG M H, YAN X R, JI L, et al. Spatial Distribution Characteristics of Nitrate-Nitrogen in Groundwater and Response of Land-Use in Taiyuan City [J]. Modern Chemical Research, 2023(8): 26-28.)
- [8] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1707-1716. (CHEN C L, GAO M, NI J P, et al. Nitrogen Losses under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1707-1716.)
- [9] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例 [J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2940-2946. (WU D, HUANG Z L, XIAO W F, et al. Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed [J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2940-2946.)
- [10] 薛晓辉, 熊劲松, 汪炎林. 黔西北不同利用类型土壤全磷及有效磷的分布与残留 [J]. 河南农业科学, 2017, 46(7): 44-48. (XUE X H, XIONG J S, WANG Y L. Distribution and Residue of Soil Total P and Available P under Different Land Use Types in Northwest Guizhou [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(7): 44-48.)
- [11] 丁子健, 蒋师丞, 任百慧, 等. 土地利用方式对低山丘陵区土壤理化性质及微生物群落的影响 [J]. 草地学报, 2024, 32(2): 426-435. (DING Z J, JIANG S C, REN B H, et al. Effects of Land Use Patterns on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities in Low Hilly Land [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2): 426-435.)

- [12] 王敬宽,吕鹏超,张楷悦,等.不同土地利用方式对盐碱地土壤团聚体及碳氮含量的影响[J].山东农业科学,2023,55(10):86-94.(WANG J K, LÜ P C, ZHANG K Y, et al. Effects of Different Land Use Patterns on Soil Aggregates and Carbon and Nitrogen Contents in Saline and Alkali Land [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(10): 86-94.)
- [13] 谭军利,刘昊昊,王西娜,等.宁夏引黄灌区日光温室集约种植区浅层地下水硝态氮含量与耕层土壤硝态氮含量的关系[J].土壤通报,2023,54(2):364-373.(TAN J L, LIU H H, WANG X N, et al. Relationship between Nitrate Nitrogen Content in Shallow Groundwater and Soil in Intensive Greenhouse System of the Ningxia Yellow River Irrigation Region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 364-373.)
- [14] 巩建华,柯尊伟,李季.河北省藁城市蔬菜种植区化肥施用与地下水硝酸盐污染研究[J].农村生态环境,2004,20(1):56-59.(GONG J H, KE Z W, LI J. Use of Chemical Fertilizer and Contamination of Groundwater in Vegetable Cultivation Area: A Case Study in Gaocheng City, Hebei Province [J]. Rural Eco-Environment, 2004, 20(1): 56-59.)
- [15] 王仕琴,郑文波,孔晓乐.华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J].中国生态农业学报,2018,26(10):1476-1482.(WANG S Q, ZHENG W B, KONG X L. Spatial Distribution Characteristics of Nitrate in Shallow Groundwater of the Agricultural Area of the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1476-1482.)
- [16] 耿玉栋,张千千,孙继朝,等.不同土地利用方式和地下水埋深对水中硝态氮浓度分布的影响[J].环境污染与防治,2016,38(6):63-68.(GENG Y D, ZHANG Q Q, SUN J C, et al. Impact of Land Use Types and Groundwater Depth on the Distribution of Nitrate Nitrogen in Groundwater [J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(6): 63-68.)
- [17] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1989:1-8.(EDITORIAL BOARD OF "METHODS OF WATER AND WASTEWATER MONITORING AND ANALYSIS" OF THE STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION ADMINISTRATION. Methods of Water and Wastewater Monitoring and Analysis [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989: 1-8.)
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:1-495.(BAO S D. Soil Agrochemical Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 1-495.)
- [19] 中华人民共和国国土资源部.地下水质量标准:GB/T 14848—2017[S].北京:中国标准出版社,2017:1-6.(THE MINISTRY OF LAND AND RESOURCES PRC. Standard for Groundwater Quality: GB/T 14848—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-6.)
- [20] 姚卫举,牟晓杰,万斯昂,等.不同土地利用方式土壤碳、氮、磷、硫含量及其生态化学计量特征[J].江苏农业科学,2023,51(17):231-239.(YAO W J, MU X J, WAN S A, et al. Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur Contents and Their Eco-stoichiometric Characteristics under Different Land Use Patterns [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(17): 231-239.)
- [21] 李艳利,徐宗学,刘星才.浑太河流域氮磷空间异质性及其对土地利用结构的响应[J].环境科学研究,2012,25(7):770-777.(LI Y L, XU Z X, LIU X C. Spatial Variability Analysis of Water Nitrogen and Phosphorus and Their Response to Land-Use Structures in the Huntai River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(7): 770-777.)
- [22] 汤洁,陈静书,李昭阳,等.吉林西部盐碱农田有机碳矿化和激发效应对氮磷添加的响应[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(4):1204-1216.(TANG J, CHEN J S, LI Z Y, et al. Response of Organic Carbon Mineralization and Priming Effect to Nitrogen and Phosphorus Addition in Saline-Alkali Farmland in Western Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1204-1216.)
- [23] 孙喜军,吕爽,任媛媛,等.西安市设施菜地土壤硝态氮现状分析[J].中国农学通报,2023,39(28):70-74.(SUN X J, LÜ S, REN Y Y, et al. Analysis of Nitrate Nitrogen Status in Soil of Protected Vegetable Fields in Xi'an [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(28): 70-74.)
- [24] 陈怀满.环境土壤学[J].地球科学进展,1991(2):49-50.(CHEN H M. Environmental Pedology [J]. Advances in Earth Science, 1991(2): 49-50.)
- [25] 王秀珍,方海兰,史志华.城市生活污水和矿化垃圾中氮磷淋失的模拟研究[J].环境污染与防治,2007,29(5):336-339.(WANG X Z, FANG H L, SHI Z H. Simulation on the Movement of Nitrogen and Phosphorus

- in Living Sewage Sludge from Municipal and Aged Refuse [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(5): 336-339.)
- [26] 陆安祥, 赵云龙, 王纪华, 等. 不同土地利用类型下氮、磷在土壤剖面中的分布特征 [J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3923-3929. (LU A X, ZHAO Y L, WANG J H, et al. Distribution Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Agricultural Soil Profiles under Different Landuse [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3923-3929.)
- [27] 周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 等. 土壤与地下水污染修复主要技术研究进展 [J]. *中国矿业*, 2021, 30(增刊2): 221-227. (ZHOU C S, ZOU S Z, ZHU D N, et al. Research Progress of Main Technologies for Remediation of Soil and Groundwater Pollution [J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(Suppl 2): 221-227.)
- [28] 危润初, 肖长来, 方樟. 黑龙江建三江地区地下水动态趋势突变点分析 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(1): 202-210. (WEI R C, XIAO C L, FANG Z. Trends Mutation Nodes of Groundwater Dynamic in Jiansanjiang Area of Heilongjiang Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(1): 202-210.)
- [29] 罗泽娇, 靳孟贵. 地下水三氮污染的研究进展 [J]. *水文地质工程地质*, 2002(4): 65-69. (LUO Z J, JIN M G. Research Progress of Ammonia, Nitrite and Nitrate Pollution in Grountwater [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002(4): 65-69.)
- [30] 田华. 氨氮在滦河三角洲典型包气带介质上的吸附性能研究 [J]. *环境工程学报*, 2011, 5(3): 507-510. (TIAN H. Ammonia-Nitrogen Adsorption Characteristics onto Vadose Zone Soils in Luanhe Delta [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(3): 507-510.)
- [31] 张玉玲, 司超群, 陈志宇, 等. 土壤硝酸盐氮的空间变异特征及影响因素分析 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48(1): 241-251. (ZHANG Y L, SI C Q, CHEN Z Y, et al. Spatial Variability of Soil Nitrate Nitrogen and Its Influencing Factors [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48(1): 241-251.)
- [32] YIN C, YANG H Q, WANG J F, et al. Combined Use of Stable Nitrogen and Oxygen Isotopes to Constrain the Nitrate Sources in a Karst Lake [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 303: 107089-1-107089-9.
- [33] 殷士学. 淹水土壤中硝态氮异化还原成铵过程的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2002. (YIN S X. Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium in Submerged Soils [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2002.)
- [34] YOON S, CRUZ-GARCÍA C, SANDFORD R, et al. Denitrification versus Respiratory Ammonification: Environmental Controls of Two Competing Dissimilatory $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ Reduction Pathways in *Shewanella loihica* Strain PV-4 [J]. *The ISME Journal*, 2015, 9(5): 1093-1104.

(责任编辑: 单 凝)