



白洋淀流域厚包气带硝态氮迁移转化过程及其主控因素

李 冲, 檀康达, 郑文波, 刘丙霞, 王仕琴

Migration, transformation processes, and dominated factors of nitrate nitrogen in the deep vadose zone in the Baiyangdian Watershed

LI Chong, TAN Kangda, ZHENG Wenbo, LIU Bingxia, and WANG Shiqin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20240520>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

白洋淀流域浅层地下水硝酸盐分布及来源的区域分异特征

Regional characteristics of nitrate sources and distributions in the shallow groundwater of the Lake Baiyangdian watershed

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 230–240

白洋淀流域蒸散发增加的驱动因素

Drivers of evapotranspiration increase in the Baiyangdian Catchment

中国生态农业学报(中英文). 2023, 31(4): 598–607

白洋淀流域农牧系统养分流动与环境损失时空特征

Temporal and spatial characteristics of nutrient flow and losses of the crop–livestock system in Baiyangdian Basin

中国生态农业学报(中英文). 2022, 30(11): 1722–1736

降雨、施肥对补水河流周边土壤硝态氮迁移分布的影响

Effects of rainfall and fertilization on soil nitrate nitrogen migration–distribution around water replenishing rivers

中国生态农业学报(中英文). 2024, 32(7): 1206–1217

华北潮土冬小麦–夏玉米轮作包气带氮素淋溶机制

Mechanism of nitrogen leaching in fluvo–aquic soil and deep vadose zone in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 53–65

华北平原农田关键带硝态氮存储与淋失量研究

Nitrate storage and leaching in the critical zone of farmland in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(9): 1546–1557



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20240520

CSTR: 32371.14.cjea.20240520

李冲, 檀康达, 郑文波, 刘丙霞, 王仕琴. 白洋淀流域厚包气带硝态氮迁移转化过程及其主控因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(2): 314–323

LI C, TAN K D, ZHENG W B, LIU B X, WANG S Q. Migration, transformation processes, and dominated factors of nitrate nitrogen in the deep vadose zone in the Baiyangdian Watershed[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(2): 314–323

白洋淀流域厚包气带硝态氮迁移转化过程 及其主控因素*

李 冲¹, 檀康达^{2,3}, 郑文波², 刘丙霞², 王仕琴^{2**}

(1. 甘肃省农业工程技术研究院 兰州 730030; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 白洋淀流域位于华北平原西部, 受地下水过量开采和农业过量施肥的双重影响, 平原区包气带厚度增大, 氮储量增加, 但目前关于流域尺度受地貌类型控制的厚包气带土壤剖面氮素迁移转化过程仍不明确。本文选择白洋淀流域平原农区两个典型的冲洪积扇不同地貌类型的 9 个深层 (0~20 m) 土壤剖面, 结合水化学和氯离子平衡分析的方法, 研究不同地貌沉积类型农田厚包气带硝态氮 (NO_3^- -N) 累积和淋失特征、转化过程及其影响因素。结果表明: 由地貌类型影响的土壤质地决定着包气带土壤 NO_3^- -N 累积和淋失量的空间差异性分布, 20 m 土壤剖面 NO_3^- -N 累积量变化范围为 $352.7\sim 3\,276.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 根系层以下土壤 NO_3^- -N 淋失通量变化范围为 $9.8\sim 252.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 且从冲洪积扇至湖泊及洼地 NO_3^- -N 累积量呈增加趋势, 氮淋失量呈降低趋势; 0~20 m 土壤剖面上均存在硝化反应, 以砂土为主的冲洪积扇深层土壤硝态氮峰值在硝化和反硝化的共同作用下发生变化, 而在以黏土为主的泛滥平原和湖泊及洼地, 由于土壤有机碳从表层向深层渗透减少, 反硝化反应主要发生在 0~10 m 包气带。该研究可为白洋淀流域及雄安新区面源污染阻控和水环境保护提供科学支撑。

关键词: 硝态氮; 迁移与转化; 厚包气带; 白洋淀流域

中图分类号: S19

Migration, transformation processes, and dominated factors of nitrate nitrogen in the deep vadose zone in the Baiyangdian Watershed*

LI Chong¹, TAN Kangda^{2,3}, ZHENG Wenbo², LIU Bingxia², WANG Shiqin^{2**}

(1. Gansu Academy of Agri-engineering Technology, Lanzhou 730030, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Excess nitrogen is accumulated in the vadose zone because of the overuse of nitrogen fertilizer. The Baiyangdian Watershed is located in the western part of the North China Plain and has been impacted by overexploitation of groundwater, resulting in decreased groundwater levels and increased vadose zone thickness. However, at a large spatial scale, the mechanism and controlling

* 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700500) 和河北省创新能力提升计划项目 (225A3902D) 资助

** 通信作者: 王仕琴, 主要从事水氮循环与地下水环境等方面研究。E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn

李冲, 主要从事作物栽培等方面研究。E-mail: 13893527625@163.com

收稿日期: 2024-08-29 接受日期: 2024-09-11

* This study was supported by the National Key R&D Program of China (2021YFD1700500) and the Project for Innovative Capacity Improvement in Hebei Province (225A3902D).

** Corresponding author, E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn

Received Aug. 29, 2024; accepted Sep. 11, 2024

factors of nitrogen leaching and transformation affected by different geomorphic types and soil texture remain unclear. In this study, we selected 9 deep soil profiles (20 m depth) through two typical alluvial-proluvial fan systems (including the loessal terrace, alluvial-proluvial fan, flood plain, and lake depressions) in the Baiyangdian Watershed to investigate the accumulation, leaching, and transformation processes of nitrate-nitrogen (NO_3^- -N) via hydrochemical analysis and the chloride ion balance method. Results show: 1) The soil texture within a soil profile, which is influenced by geomorphic types, exhibits spatial heterogeneity. Specifically, the alluvial-proluvial fan is characterized by a sandy texture, while the flood plain exhibits a clayey texture. These differences in soil texture play a crucial role in determining the spatial distribution of NO_3^- -N accumulation and leaching within the vadose zone. The NO_3^- -N accumulation ranges from 352.7 to 3 276.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in the soil profiles from 0 to 20 m, with the maximum accumulation occurring in the lake depressions. Conversely, NO_3^- -N leaching below the root zone ranges from 9.8 to 252.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, with the maximum leaching occurring in alluvial-proluvial fan. The NO_3^- -N accumulation shows increasing trend while NO_3^- -N leaching shows decreasing trend from upstream to downstream in soil profiles controlled by the same geomorphic types. The nitrogen accumulation of orchard (1 544.0–3 133.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) is higher than that of vegetables (2 641.6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and wheat-maize/wheat-soybean rotation (352.7–3 276.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) among different land use types. 2) The transformation of nitrogen in the deep vadose zone of the Baiyangdian Watershed is mainly influenced by crop absorption, nitrification, and denitrification. Nitrification occurred in the entire soil profile. The variation in the peak value in the silty loam soil of the alluvial-proluvial fan area was caused by the joint effect of nitrification and denitrification. However, denitrification occurred mainly in 0–10 m soil layer in the flood plain or lake depressions of clay-textured layers because of the decrease in soil organic carbon from the surface to the deep vadose zone. This research not only advances current research on nitrate migration and transformation from point scale to watershed scale but also provides valuable insights for future investigations on the physical and geochemical processes of nitrogen leaching at a watershed scale. Additionally, this study provides scientific support for the control of agricultural non-point source pollution, protection of the aquatic environment, and integration of land use management in the Baiyangdian Watershed.

Keywords: nitrate nitrogen; migration and transformation; deep vadose zone; Baiyangdian Watershed

农业过量施肥引起包气带氮储量增加和地下水硝酸盐浓度增长是国际水文研究的焦点和前沿科学,在全球范围内引起广泛关注^[1-3]。然而,受农业集中开采地下水的影响,地下水位下降引起包气带厚度增加和土壤环境改变,厚包气带氮素的迁移转化过程更加复杂,且主要影响因素不明确,这使得农业管理措施与地下水硝酸盐浓度的响应存在不同步现象,制约了农业面源污染管理的时效性^[1,4]。为此,明确农耕区厚包气带氮素迁移转化过程及其主控因素对有效制定农业管理措施、阻控农田过量施用的氮素进入含水层和保护地下水环境具有重要意义。

硝态氮是包气带氮素的主要存在形式,包气带硝态氮迁移转化的主要过程包括物理过程(如补给速率、氮肥施用、混合稀释和水文迁移路径)和生物地球化学过程(如矿物组成和氧化还原)^[5-6]。例如,降水和灌溉、氮输入量、土地利用、包气带厚度和土壤质地等均会影响包气带硝态氮的累积,其中,土地利用和土壤质地被认为是影响厚包气带氮素累积和运移的关键因素^[7-8]。研究表明,蔬菜和果园等土地利用条件下,高氮输入和高灌溉量导致包气带氮素累积量明显高于其他土地利用类型^[9-10],如华北蔬菜区 0~20 m 深度土壤硝态氮累积量达 6 302.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,黄土高原果园 0~8 m 土壤硝态氮累积量为 4 149~13 633 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。土壤氮迁移速率与其累积特征的影响因素一致,在同等施氮量、相似水文与地下水埋

深条件下,土壤质地及其分层结构特征是影响硝态氮物理运移与化学反应的重要因素^[11]。通常渗透性强的砂土中氮素更容易淋失^[12],细颗粒土壤(如黏土)对氮的阻滞作用主要体现在土壤孔隙较小导致的水氮淋溶缓慢^[13],且细颗粒土壤层越厚,其对氮迁移的阻滞作用越强^[14]。

异氧反硝化、自养氨氧化和硝酸盐异化还原为氨(DNRA)是包气带氮去除的主要生物化学反应^[15]。浅层土壤因有机质、根系和微生物残体的存在使得氮损失由异养过程驱动^[16-18],且认为根系层是矿化、硝化和反硝化发生的活跃层。近期研究表明,深层土壤有机碳含量较低,导致微生物反硝化作用减弱^[19],氮素在深层土壤主要通过物理迁移进入含水层。以往研究从点尺度上揭示了厚包气带氮素迁移转化的主要过程,也提出了土壤质地和土壤分层结构组合对氮素累积和淋失等影响的主要作用^[8]。然而,在冲洪积沉积层,土壤质地和土壤剖面分层结构通常因受到流域尺度地貌类型的影响,呈现出特定土壤沉积规律,同时使得土壤氮素累积也具有一定规律性。然而,目前关于流域尺度厚包气带氮素迁移过程及其主控因素的认识仍然不清晰,制约了流域面源污染防治的区域差异化管理和时效性管理。

白洋淀流域平原区农田广泛分布,农业氮肥投入和土壤氮素累积量大,是华北平原的代表性流域。白洋淀被誉为“九河末梢”,该流域为由多条古河道冲

积、洪积和湖泊及洼地沉积形成的典型区域,土壤沉积具有明显的垂向分层特征。过去关于该区域的氮循环相关研究主要集中在白洋淀淀区、上游入淀河流及其周边地下水,包括地下水硝酸盐来源、风险评价^[20-21]、河流水体与底泥界面氮素迁移转化的微生物作用^[22];近几年,白洋淀补水对包气带氧化还原环境及氮组分迁移转化的影响备受关注^[23-24]。虽然也有研究关注了地下水位波动带氮迁移转化过程^[25],但是相关研究主要集中在河岸带,流域尺度地貌沉积类型、土地利用类型等综合因素对厚包气带氮素迁移过程的影响仍不明确。因此,从全流域尺度研究典型农耕区厚包气带氮素分布特征和影响因素,对农业面源污染防治以及保障雄安新区水环境安全非常重要。

因此,本研究选择白洋淀流域平原农区作为研究区,基于地球化学观测,选择冲洪积扇、泛滥平原、湖泊及洼地等不同地貌类型区典型农田厚包气带土壤剖面,研究流域尺度氮素在厚包气带迁移过程中的累积、淋失等物理过程,并揭示引起氮素转化的主控因子,为白洋淀农业面源污染防治和地下水环境保护提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

白洋淀流域位于华北平原西部(113°40′~116°30′E, 38°01′~40°04′N),地势西北高东南低,西部为山区,东部为平原区,雄安新区位于流域下游汇水区。白洋淀流域平原区面积 $1.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔 5~

26 m。平原区由许多大小不等的冲积扇构成,根据成因可划分为黄土状沉积、冲洪积扇、泛滥平原、河道带、湖泊及洼地(图 1A)。研究区属于暖温带大陆性半干旱季风气候,多年平均降水量 554 mm,降水年内分布不均,75%左右的降水集中在雨季(6—9月),多年平均蒸发量 1 369 mm^[20]。图 2 为研究区内 1981—2020 年降水量变化和 2020 年(土壤剖面采样年份)降水量日变化,其中 1996 年降水量最大(881.9 mm),2017 年降水量最小(210.7 mm),2020 年降水量为 392 mm。

研究区土壤类型包括潮土、褐土、粗骨土等,主要以分布于东南部的褐土和北部、中南部的潮土为主,分别约占研究区总面积的 42.9% 和 23.5%^[26]。土地利用类型包括耕地、工业和生活用地、林地等(图 1B)。平原区主要种植小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*) (小麦-玉米轮作)、果园、蔬菜和棉花(*Gossypium hirsutum*)等,其中小麦-玉米轮作的种植面积占平原区总面积的 44.0%,果园和蔬菜种植面积分别占平原区总面积的 13.8% 和 7.5%。

1.2 野外调查、采样与分析方法

选择南部滹沱河冲洪积扇和北部拒马河冲洪积扇 2 个典型冲洪积扇,开展野外调研和土壤剖面样品采集,调查采样时间为 2020 年 10 月,其中小麦-玉米轮作剖面处于小麦生长季且施肥灌溉后。采样点除了考虑不同土地利用类型(果园、蔬菜、小麦-玉米/小麦-大豆轮作),重点考虑不同地貌类型(冲洪积扇、泛滥平原、湖泊及洼地)的空间位置代表性,共采集 9 个土壤剖面样品(C1-1、C1-2、C1-3、C1-5、

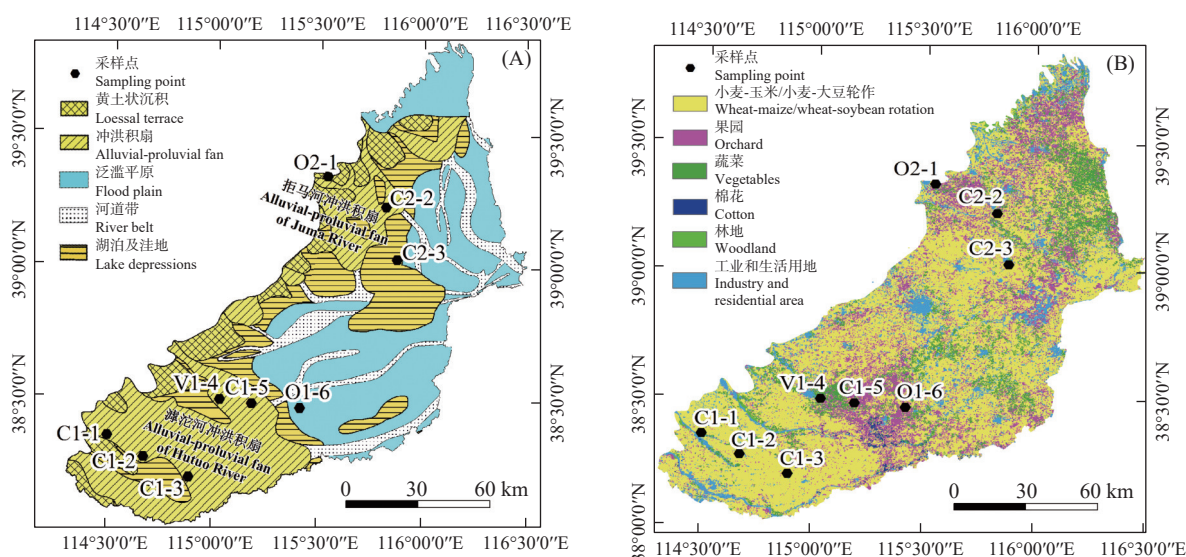


图 1 白洋淀流域平原区地形地貌 (A) 和土地利用图 (B)

Fig. 1 Maps of geomorphic types (A) and land use types (B) in the plain area of the Baiyangdian Watershed

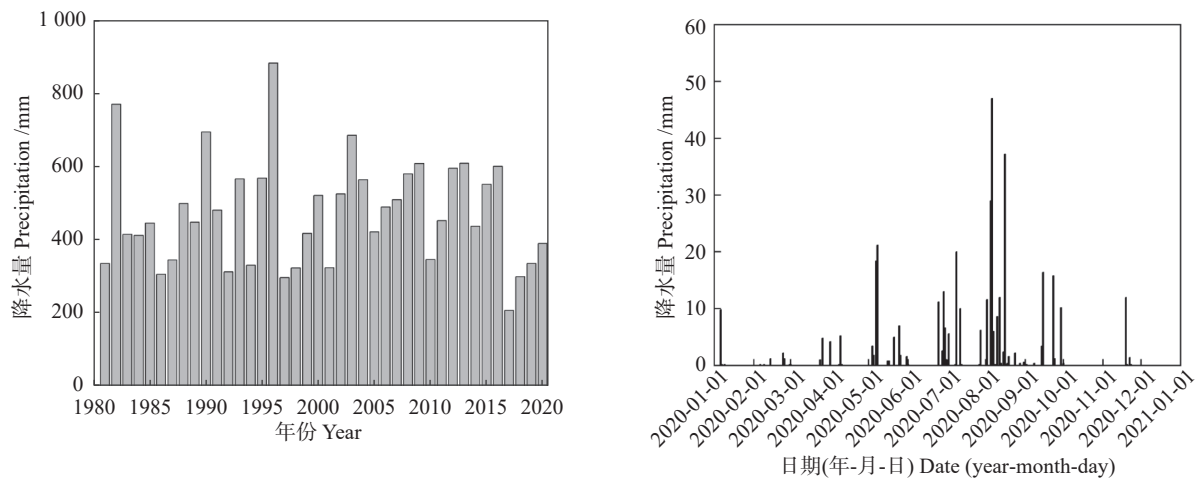


图2 1981—2020年研究区多年平均降水量和2020年日降水量

Fig. 2 Average annual precipitation from 1981 to 2020 and average daily precipitation in 2020 in the study area

C2-2、C2-3、O1-6、O2-1和V1-4;“C”代表小麦-玉米/小麦-大豆轮作,“O”代表果园,“V”代表蔬菜)。C1-1、C1-2和C1-3位于滹沱河冲洪积扇上游(地貌沉积类型主要为冲洪积扇),V1-4、C1-5和O1-6位于滹沱河冲洪积扇下游(地貌沉积类型主要为冲洪积扇和冲洪积泛滥平原),6个采样点同属于滹沱河冲洪积扇沉积地貌区,将此区划分为I区;O2-1、C2-2和C2-3位于拒马河冲洪积扇沉积地貌区,地貌类型主要为洪积扇黄土状沉积、冲洪积扇和湖泊及洼地,将此区划分为II区(图1A和表1)。土壤剖面利用HP-18液压冲击土壤钻机(北京中勘安测科技有限公司,北京)进行样品采集,采样深度为0~20 m。100 cm以内土层采样深度间隔为0~10、10~20、20~30、30~50、50~70和70~100 cm,100 cm以下土层土壤样

品以50 cm为间隔进行取样。土壤样品分为3份:第1份装自封袋密封带回实验室,储存于4℃冰箱中,用于分析硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N);第2份置于晾土盒,自然风干后研磨,用于分析土壤水化学离子(如 NO_3^- 和 Cl^-)、总氮(TN)和土壤有机碳(SOC);第3份样品装入铝盒用于测定土壤质量含水量,且为防止水分蒸发,采样后立即称重,并用胶带将铝盒盖密封带回实验室,于105℃烘干12 h。

室内分析在中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心水资源重点实验室进行。土壤风干土溶滤水的 NO_3^- 和 Cl^- 浓度采用离心过滤的方法,利用离子色谱分析仪(ICS-600, Dionex, 美国)对 NO_3^- 和 Cl^- 浓度进行分析,分析精度通过阴阳离子平衡验证,保证误差范围在5%以内的可信度;利用pH

表1 土壤剖面基本采样情况、水分入渗速率、氮素累积和淋失通量

Table 1 Basic information, water infiltrated flux, nitrogen accumulation and leaching of soil profiles in the Baiyangdian Watershed

采样点 Sampling point	土地利用 Land use type	采样深度 Sampling depth /m	地貌类型 Geomorphologic type	施氮量 Nitrogen fertilizer input /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	灌溉量 Irrigation amount /($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	NO_3^- -N累积量 NO_3^- -N accumulation /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分入渗速率 Water infiltrated flux /($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	NO_3^- -N淋失通量 NO_3^- -N leaching amount /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
I 区 First zone	C1-1 小麦-玉米轮作 Wheat-maize rotation	20	冲洪积扇 Alluvial-proluvial fan	300	360	593.3	54.2	96.5
	C1-2 小麦-玉米轮作 Wheat-maize rotation	20	冲洪积扇 Alluvial-proluvial fan	318	368	432.0	94.1	38.7
	C1-3 小麦-大豆轮作 Wheat-soybean rotation	20	冲洪积扇 Alluvial-proluvial fan	125	255	352.7	62.0	13.9
	V1-4 蔬菜 Vegetables	20	冲洪积扇 Alluvial-proluvial fan	608	780	2 641.6	262.1	252.0
	C1-5 小麦-玉米轮作 Wheat-maize rotation	20	冲洪积扇 Alluvial-proluvial fan	612	378	2 721.9	70.7	13.2
	O1-6 果园 Orchard	20	泛滥平原 Flood plain	300	96	3 133.8	47.5	9.8
	O2-1 果园 Orchard	6	黄土状沉积 Loessal terrace	620	484	1 544.0	190.1	59.3
II 区 Second zone	C2-2 小麦-玉米轮作 Wheat-maize rotation	13	冲洪积扇 Alluvial-proluvial fan	681	250	1 037.9	96.7	12.4
	C2-3 小麦-玉米轮作 Wheat-maize rotation	15	湖泊及洼地 Lake depressions	447	480	3 276.7	95.2	18.2

计(PB-10, Sartorius, 德国)测定上清液 pH; 利用便携式电导率仪(SG7, Mettler, 美国)测定上清液 EC; 土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度采用 KCl 浸提法测定; 土壤 TN 采用凯氏法利用全自动凯氏定氮仪(上海晟声 K1306A, 中国)测定; SOC 利用重铬酸钾氧化外加热法测定。

1.3 数据分析

1.3.1 土壤剖面硝态氮累积量计算

土壤剖面中不同土层硝态氮累积量计算公式如下所示:

$$R_i = c_i \times d_i \times h_i \div 10 \quad (1)$$

式中: R_i 为 i 土层土壤硝态氮累积量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); c_i 为 i 土层硝态氮含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); d_i 为 i 土层的容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); h_i 为 i 土层的厚度 (cm)。

1.3.2 土壤剖面硝态氮淋失速率计算

土壤剖面硝态氮淋失速率计算公式如下所示:

$$A = V \times C \div 100 \quad (2)$$

式中: A 为从根系层以下至某一深度硝态氮的淋失速率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); V 为根系层以下的水分入渗速率 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$), 利用氯离子质量平衡方法 (chloride mass balance method, CMB) 计算; C 为土壤根系层以下的硝态氮浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

利用 CMB 方法计算水分入渗速率需满足以下假设条件: 1) CI 仅来源于大气降水; 2) CI 处于稳态, 且 CI 总量不随时间变化, 不会发生植物吸附和化学转变; 3) 补给水以一维式垂直下渗的活塞流为主。具体计算公式如下:

$$V = P \times \text{CL}_p \div \text{CL}_{\text{sm}} \quad (3)$$

式中: P 为区域年均降水量 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$); CL_p 为降水中 CI 加权平均浓度, 包括干沉降和湿沉降 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); CL_{sm} 为植物根系层以下的 CI 含量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 土壤质地和土壤含水量垂向分布特征

图 3 为所有采样点的土壤质地剖面图。所有剖面土壤质地的垂向分布既具有空间分布差异性, 也存在相互联系性, 体现了地貌沉积控制下的土壤质地沉积特性。位于滹沱河冲洪积扇的 5 个土壤剖面 (C1-1、C1-2、C1-3、V1-4、C1-5) 以砂土为主, 含黏土和粉砂质壤土夹层; 从上游 (C1-1、C1-2、C1-3) 到下游 (V1-4、C1-5), 黏土夹层厚度越来越大, 其中 O1-6 位于滹沱河冲洪积扇前缘下游的泛滥平原区, 土壤质地以粉砂质壤土、壤土、黏土和砂土的互层

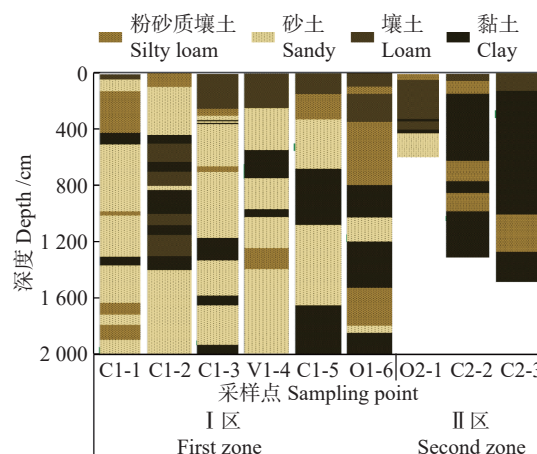


图 3 白洋淀流域不同冲洪积扇剖面土壤质地 (I 区为滹沱河冲洪积扇, II 区为拒马河冲洪积扇)

Fig. 3 Soil texture of soil profile in different alluvial-proluvial fan of the Baiyangdian Watershed (I: alluvial-proluvial fan of Hutuo River; II: alluvial-proluvial fan of Juma River)

为主, 且 O1-6 的黏土层厚度高于滹沱河冲洪积扇其他 5 个剖面。位于北部拒马河冲洪积扇的 3 个剖面土壤质地分层结构从粉砂质壤土和砂土互层转变为黏土和壤土互层为主 (O2-1 剖面深层存在约 2 m 厚度的砂层), 且黏土层厚度较大 (最大为 8 m)。

土壤含水量的垂向变化与土壤质地密切相关, 所有剖面土壤含水量整体表现出在黏土层增加和在砂土层降低的趋势 (图 4)。南部滹沱河冲洪积扇的土壤剖面因砂土和黏土互层变化 (O1-6 剖面除外), 土壤含水量变化剧烈 (2%~32%), 位于滹沱河冲洪积扇下游的 O1-6 剖面的地貌类型为泛滥平原, 土壤含水量变化相对稳定 (5%~25%)。北部拒马河冲洪积扇土壤含水量高于南部 (12%~40%), 且垂向剖面从上到下呈先升高后下降的趋势。

2.2 pH 和土壤有机碳垂向分布特征

由图 4 可知, 土壤剖面 pH 整体呈现弱碱性, 变化范围为 6.77~8.56, 其中根系层 (0~2 m) 土壤受长期施肥的影响, pH 偏低, 但土壤 pH 随土层深度增加而升高, 这主要是由于反硝化作用会消耗 H^+ , 但不同剖面 pH 随深度波动的趋势有所不同。南部滹沱河冲洪积扇 2 m 土层深度以下土壤 pH 呈先上升、后下降、再上升的趋势 (部分剖面土壤 pH 呈先上升、后下降或相对稳定的趋势), 其中 pH 上升和下降的峰值主要发生在砂土和黏土的界面处。从土壤质地分布来看 (图 3), 在 2 m 土层深度以下, 砂土层之间由不同厚度的黏土层阻隔, 土壤剖面 pH 变化也说明界面变化引起了氧化还原条件的变化: 在整个土壤剖面, 浅层黏土 pH 具有逐步升高的趋势, 第一个黏土

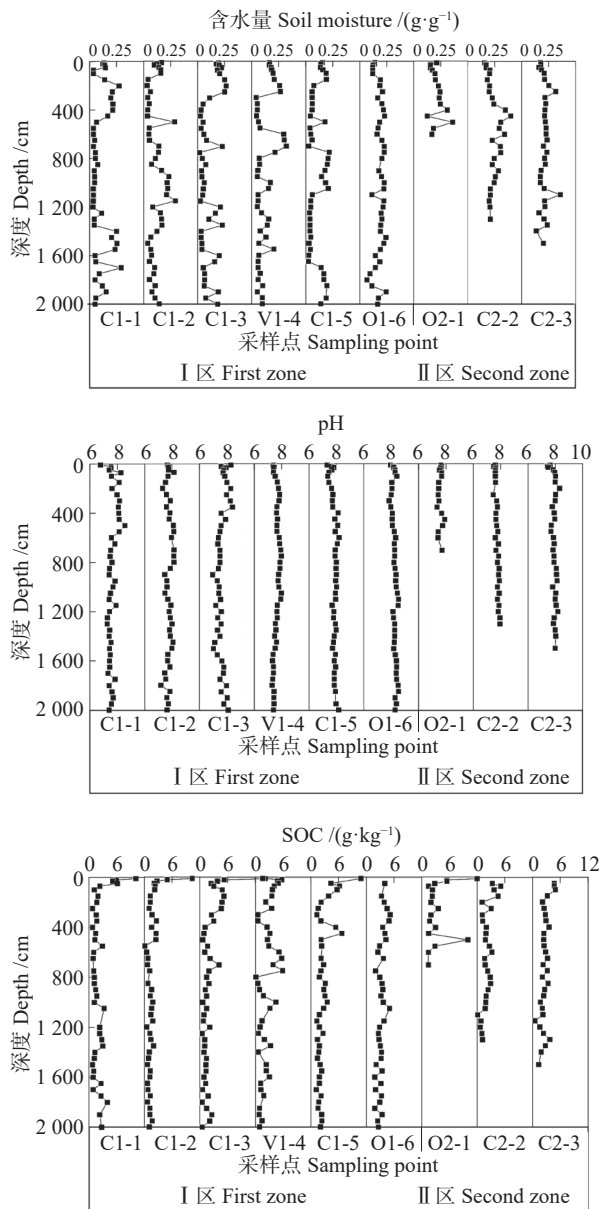


图4 白洋淀流域土壤剖面含水量、pH和有机碳(SOC)垂向分布特征(I区: 滹沱河冲洪积扇; II区: 拒马河冲洪积扇)

Fig. 4 Vertical variation characteristics of soil moisture, pH, and soil organic carbon (SOC) in the whole soil profile in the Baiyangdian Watershed (I: alluvial-proluvial fan of Hutuo River; II: alluvial-proluvial fan of Juma River)

和砂土界面, pH 迅速降低; 砂土到黏土界面, pH 升高, 再到第二个砂土界面, pH 降低。北部拒马河冲洪积扇主要为黏土层, pH 具有逐步上升趋势, 达到峰值后, 深层 pH 较为稳定。

SOC 被认为是微生物参与氮的地球化学过程中能量和电子的重要来源。由图4可见, 所有土壤剖面 SOC 含量随土壤深度增加均存在降低趋势, SOC 含量变化范围为 0.13~11.97 g·kg⁻¹, 深层 SOC 含量大

幅降低是引起深层土壤反硝化作用减弱的主要原因^[19,25]。个别采样点(如 C1-1)深层土壤 SOC 含量存在波动增加的峰值, 该波动峰值主要出现在粉砂质壤土和砂土界面处, 说明界面处具备反硝化条件。

2.3 土壤总氮、硝态氮和铵态氮含量分布特征

图5为9个土壤剖面 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量的垂向分布特征。整体上, 浅层土壤氮素含量高

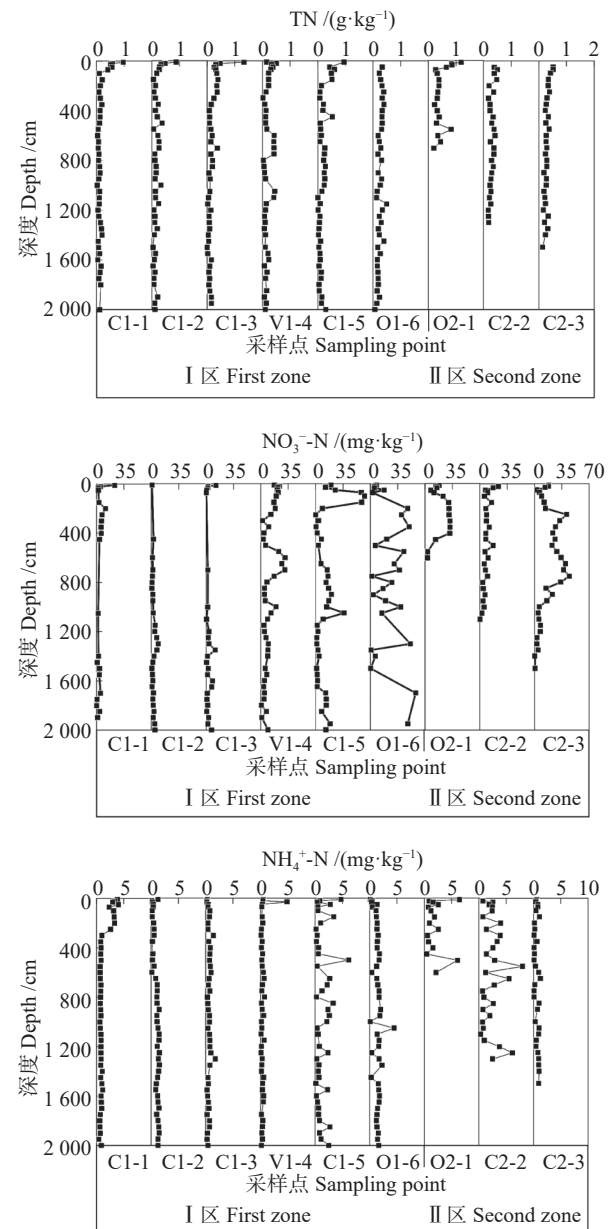


图5 白洋淀流域土壤剖面总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)含量垂向分布特征(I区: 滹沱河冲洪积扇; II区: 拒马河冲洪积扇)

Fig. 5 Vertical variation characteristics of total nitrogen (TN), nitrate (NO₃⁻-N), and ammonium (NH₄⁺-N) content in the soil profile in the Baiyangdian Watershed (I: alluvial-proluvial fan of Hutuo River; II: alluvial-proluvial fan of Juma River)

于深层,说明浅层土壤氮素受地表氮肥施用、矿化及硝化作用等影响更强。从土壤表层到深层, TN 含量明显下降(变化范围为 $0.01\sim 0.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其中 1 m 土层深度内土壤受作物根系吸收利用的影响, 土壤氮素含量显著降低, 而 1 m 土层深度以下相对稳定(图 5)。这是由于 TN 的主要成分为有机氮, 而有机氮在土壤中相对稳定, 不易发生地球化学过程和迁移^[27]。拒马河冲洪积扇的深层土壤 TN 分布比滹沱河冲洪积扇土壤 TN 更加稳定, 而滹沱河冲洪积扇深层黏土界面处土壤 TN 存在增加峰值。NO₃⁻-N 含量在滹沱河冲洪积扇土壤剖面中出现多个峰值(图 5), 最高达 $68.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 从上游(如 C1-1)到下游(如 O1-6)土壤 NO₃⁻-N 含量峰值有所增加。拒马河冲洪积扇土壤剖面 NO₃⁻-N 含量整体呈“抛物线”特点(C2-2 主要呈逐渐降低趋势), 如 O2-1、C2-2 和 C2-3 深层土壤 NO₃⁻-N 含量峰值分别为 31.9、23.7 和 $44.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。NH₄⁺-N 含量远小于 TN 和 NO₃⁻-N 含量(图 5), 在以砂土为主的滹沱河冲洪积扇上游, 土壤剖面除根系层外, 其他深度土壤 NH₄⁺-N 含量较低; 在下游及以黏土为主的拒马河冲洪积扇, 土壤剖面 NH₄⁺-N 含量最高可达 $8.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在拒马河冲洪积扇的剖面中黏土和粉砂质壤土土壤颗粒对 NH₄⁺-N 具有吸附作用, 只有当 NH₄⁺-N 的淋溶能力超过其吸附作用时^[28], NH₄⁺-N 才会向下淋溶; 然而, 以砂土为主的滹沱河冲洪积扇的土壤对 NH₄⁺-N 的阻滞作用较弱, 导致 NH₄⁺-N 能够快速通过淋溶的形式损失^[29]。

3 讨论

3.1 土壤硝态氮累积和淋失及其主控因素

由以上土壤氮素分布特征可见, 深层土壤 NO₃⁻-N 是氮素累积和淋失的主要形态。通过计算土壤 NO₃⁻-N 累积量和淋失通量可见(表 1), 滹沱河冲洪积扇上游 NO₃⁻-N 累积量总体偏低而淋失通量总体偏高, 如 C1-1、C1-2 和 C1-3 土壤剖面中 NO₃⁻-N 累积量分别为 593.3、432.0 和 $352.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 淋失通量分别为 96.5、38.7 和 $13.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 位于冲洪积扇下游的 V1-4、C1-5 和 O1-6 的土壤剖面 NO₃⁻-N 累积量分别为 2 641.6、2 721.9 和 $3\,133.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 淋失通量分别为 252.0、13.2 和 $9.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。同样, 拒马河冲洪积扇上游到下游土壤剖面的 NO₃⁻-N 累积量整体上也呈增加趋势, 而淋失通量呈降低趋势, 如 O2-1 和 C2-3 的土壤剖面 NO₃⁻-N 累积量分别为 1 544.0 和 $3\,276.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 淋失通量分别为 59.3 和 $18.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C2-2 除外, 其累积量和淋失通量分别为 $1\,037.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

和 $12.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。果园地表氮输入量较高, O2-1 的 NO₃⁻-N 累积量较高。

由此可见, 除了受不同作物类型氮输入的影响外, 土壤硝态氮累积和淋失受地貌沉积类型的控制作用更加强烈, 具体表现为南部冲洪积扇(如滹沱河冲洪积扇)土壤颗粒粗、渗透性强, 氮容易淋失进入地下水, 而北部冲洪积扇(如拒马河冲洪积扇)土壤颗粒细、黏土层阻滞作用强, 氮更容易累积在土壤包气带中, 不易淋失。此外, 就不同作物类型来看, 果园 NO₃⁻-N 累积量 ($1\,544.0\sim 3\,133.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 较蔬菜 ($2\,641.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和小麦-玉米/小麦-大豆轮作 ($352.7\sim 3\,276.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 总体偏高, 这主要是因为深根植物根系更发达, 可以更多地摄取土壤水分, 造成深层土壤水分亏缺甚至干层的出现^[30], 影响 NO₃⁻-N 向下迁移, 从而导致包气带中硝态氮的累积。

3.2 土壤氮素转化及其主控因素

氮在转化过程中具有高度的氧化还原活性^[31]。硝化作用作为氮循环过程中的重要一环^[32], 能够将更多有机氮转化为无机氮, 以供植物吸收利用。氮的主要转化过程如矿化、硝化、反硝化、硝酸盐异化还原为氨(DNRA)和厌氧氨氧化等在各种土地利用类型的表层土壤均被观测到^[15,33-34]。研究区所有土壤剖面 0~2 m 土层深度 TN 含量整体随深度增加显著下降, 而 NO₃⁻-N 含量总体来说随土层深度增加逐渐降低, NH₄⁺-N 含量整体也存在降低趋势, 说明除了作物吸收, 硝化作用和反硝化作用同时存在, 共同导致 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量的变化。土壤溶滤水 NO₃⁻/Cl⁻ 也随土层深度增加呈降低趋势(图 6), 这也进一步说明可能存在作物吸收、硝化和反硝化作用。如 C2-3

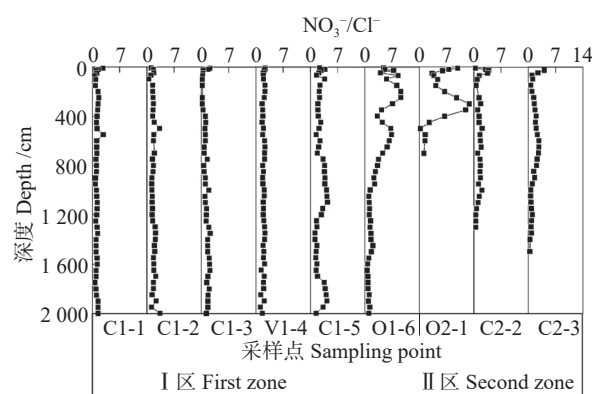


图 6 白洋淀流域土壤剖面 NO₃⁻/Cl⁻ 垂向变化特征 (I 区: 滹沱河冲洪积扇; II 区: 拒马河冲洪积扇)

Fig. 6 Vertical variation characteristics of NO₃⁻/Cl⁻ in soil profile in the Baiyangdian Watershed (I: alluvial-proluvial fan of Hutuo River; II: alluvial-proluvial fan of Juma River)

剖面, 土壤剖面 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 先降低后升高, SOC 含量降低, 表明浅层土壤作物吸收和反硝化作用引起 NO_3^- -N 浓度降低, 但随着土层深度增加, 反硝化作用降低而硝化作用增强, 从而导致硝态氮在根系层以下的土壤中大量累积。

过去研究表明, 深层土壤由于缺乏有机碳, 且土壤含水量较低, 反硝化作用较弱, 更利于硝化作用的发生^[13,35]。对本研究 SOC、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 TN 的综合分析发现(图4-图6), 深层土壤 NO_3^- -N 虽然整体呈下降趋势, 但深层土壤 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 较浅层更加稳定, 说明深层反硝化作用较弱。如黏土为主的 C2-3 剖面, NO_3^- -N 在 0~10 m 土层深度表现为“抛物线”型单峰值累积, 而在 10 m 土层深度以下, NO_3^- -N 含量相对较为稳定, 且有机质含量降低, 表明反硝化作用受限; 剖面 C2-2 的 NO_3^- -N 含量虽然低, 但在垂向分布上也呈“抛物线”型单峰值的特征, 但在 12 m 深度 NO_3^- -N 降至最低, NH_4^+ -N 含量增大, 至深层土壤达峰值, 这可能与 DNRA 作用有关。然而, 以砂土为主的滹沱河冲洪积扇剖面(如 V1-4、C1-5 和 O1-6)表现为多峰值累积特征, 且在上游的 C1-1、C1-2 和 C1-3 剖面深层土壤出现多个 NO_3^- -N 波动峰值, 而这些层位对应着 SOC 和 NH_4^+ -N 波动变化的峰值, 说明深层土壤同样可能存在反硝化作用。过去研究表明, 一次性大量灌溉条件下土壤剖面反硝化能力比灌溉量较低条件下的土壤剖面反硝化能力更强^[36]。SOC 作为土壤反硝化过程的碳源, 其含量及有效性直接影响硝态氮的地球化学过程^[37], 进而影响包气带 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的垂向分布, 本研究中 C1-1 剖面也恰好证明这一点。在上游冲洪积扇渗透性较高的情况下, 由于土壤质地以砂土为主导的“优先流”作用, 降水、灌溉等引起的水分输入将土壤表层氮素和有机碳同时输送到深层土壤, 增加深层氮素含量的同时, 也促进了深层土壤反硝化过程的进行, 进而导致 NO_3^- -N 含量衰减及 NH_4^+ -N 含量增加。

4 结论与展望

本文通过分析白洋淀流域平原区典型地貌类型区农田土壤剖面氮素及其相关环境因子, 分析了土壤氮素累积和淋失规律, 揭示了氮素转化的主要过程及其影响因素, 阐明了地貌沉积类型对硝态氮迁移转化过程的主控作用。本文主要结论如下:

1) 平原区农田厚包气带土壤氮素累积以 NO_3^- -N 为主要存在形式, 且氮素累积和淋失通量受地貌沉积类型的控制作用显著。流域南部冲洪积扇(如滹

沱河冲洪积扇)土壤剖面质地以砂土为主, 土壤渗透性较强, 氮累积量低、淋失量大; 而流域北部冲洪积扇(如拒马河冲洪积扇)土壤剖面质地以黏土和粉质黏土为主, 土壤渗透性低, 氮累积量大、淋失量低。对于同一个冲洪积地貌沉积类型控制的土壤剖面来说, 从上游到下游土壤氮累积量具有增加的趋势, 氮淋失通量具有下降的趋势。

2) 平原区农田厚包气带土壤氮素转化主要受作物吸收、硝化作用和反硝化作用等因素的综合影响, 浅层土壤氮转化过程强烈, 深层土壤氮素受不同地貌类型区土壤质地和有机碳空间差异影响, 存在较大差异。以砂土为主的冲洪积扇土壤剖面因砂土层“优先流”作用, 深层土壤 NO_3^- -N 和有机碳含量均升高, 硝化和反硝化作用造成深层砂土层 NO_3^- -N 峰值变化; 黏土层为主的冲洪积扇土壤剖面深层反硝化作用强烈, 导致土壤剖面 NO_3^- -N 和有机碳在表层累积达峰值后迅速下降, 深层土壤 NO_3^- -N 含量稳定。

综上, 建议针对土壤氮素易发生淋失的大型冲洪积扇上游地区, 加强农田化肥减量的面源污染管理, 而针对白洋淀流域下游以黏土为主的区域, 加强土壤氮素过程消减技术的研发, 由此构建分区分类的面源污染防控技术体系。

参考文献 References

- [1] ASCOTT M J, GODDY D C, WANG L, et al. Global patterns of nitrate storage in the vadose zone[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1416
- [2] HANSEN B, THORLING L, SCHULLEHNER J, et al. Groundwater nitrate response to sustainable nitrogen management[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8566
- [3] LIU M Y, MIN L L, WU L, et al. Evaluating nitrate transport and accumulation in the deep vadose zone of the intensive agricultural region, North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 153894
- [4] HUANG T M, PANG Z H, LIU J L, et al. Groundwater recharge mechanism in an integrated tableland of the Loess Plateau, Northern China: Insights from environmental tracers[J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(7): 2049–2065
- [5] OCAMPO C J, OLDHAM C E, SIVAPALAN M. Nitrate attenuation in agricultural catchments: Shifting balances between transport and reaction[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(1): e2004wr003773
- [6] LIAO L X, GREEN C T, BEKINS B A, et al. Factors controlling nitrate fluxes in groundwater in agricultural areas[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48: W00L09
- [7] TURKELTAUB T, JIA X X, ZHU Y J, et al. Recharge and nitrate transport through the deep vadose zone of the Loess Plateau: A regional-scale model investigation[J]. *Water*

- Resources Research*, 2018, 54(7): 4332–4346
- [8] WANG L S, HE Z B, ZHAO W Z, et al. Fine soil texture is conducive to crop productivity and nitrogen retention in irrigated cropland in a desert-oasis ecotone, Northwest China[J]. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1509
- [9] ZHU X Q, FU W H, KONG X J, et al. Nitrate accumulation in the soil profile is the main fate of surplus nitrogen after land-use change from cereal cultivation to apple orchards on the Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107574
- [10] LIU S X, YANG Z X, LIU Y, et al. Improvement of dissolved organic nitrogen extraction accuracy in unsaturated zones[J]. *Hydrological Processes*, 2022, 36(9): e14680
- [11] MANTOVI P, FUMAGALLI L, BERETTA G P, et al. Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 316(1/2/3/4): 195–212
- [12] GEZA M, DEB S K, LEINAUER B, et al. Modeling NO_3^- leaching during establishment of turfgrasses irrigated with tailored reclaimed water[J]. *Vadose Zone Journal*, 2021, 20(3): 1–19
- [13] ZHOU J Y, GU B J, SCHLESINGER W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25088
- [14] LAZARATOU C V, VAYENAS D V, PAPOULIS D. The role of clays, clay minerals and clay-based materials for nitrate removal from water systems: A review[J]. *Applied Clay Science*, 2020, 185: 105377
- [15] XIN J, LIU Y, CHEN F, et al. The missing nitrogen pieces: A critical review on the distribution, transformation, and budget of nitrogen in the vadose zone-groundwater system[J]. *Water Research*, 2019, 165: 114977
- [16] HEFTING M, CLÉMENT J C, DOWRICK D, et al. Water table elevation controls on soil nitrogen cycling in riparian wetlands along a European climatic gradient[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 67(1): 113–134
- [17] HEFTING M M, BOBBINK R, JANSSENS M P. Spatial variation in denitrification and N_2O emission in relation to nitrate removal efficiency in a N-stressed riparian buffer zone[J]. *Ecosystems*, 2006, 9(4): 550–563
- [18] WANG L, STUART M E, BLOOMFIELD J P, et al. Prediction of the arrival of peak nitrate concentrations at the water table at the regional scale in Great Britain[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(2): 226–239
- [19] CHEN S M, WANG F H, ZHANG Y M, et al. Organic carbon availability limiting microbial denitrification in the deep vadose zone[J]. *Environmental Microbiology*, 2018, 20(3): 980–992
- [20] WANG S Q, TANG C Y, SONG X F, et al. Using major ions and $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ to identify nitrate sources and fate in an alluvial aquifer of the Baiyangdian lake watershed, North China Plain[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2013, 15(7): 1430–1443
- [21] 朱世峰. 耕地变化对白洋淀流域平原区地下水中“三氮”影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- ZHU S F. Cultivated land changes have an impact on the plains of Baiyangdian watershed research on the influence of “three nitrogens” in groundwater[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021
- [22] LÜ J L, WANG S Q, LIU B B, et al. Spatiotemporal heterogeneity of nitrogen transformation potentials in a freshwater estuarine system[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160335
- [23] 曹元元, 郭华明, 高志鹏. 氧化还原动态变化对沉积物砷和氟释放的影响: 以河北白洋淀平原为例[J]. *现代地质*, 2022, 36(2): 533–542
- CAO Y Y, GUO H M, GAO Z P. Redox dynamic effect on fluoride and arsenic released from sediments in the Baiyangdian Plain, Hebei[J]. *Geoscience*, 2022, 36(2): 533–542
- [24] 徐贵贵. 雄安新区容城漏斗区地下水人工补给过程中氮铁锰迁移转化与模拟预测[D]. 长春: 吉林大学, 2022
- XU G G. Migration, transformation and simulation prediction of nitrogen, iron and manganese during artificial recharge of groundwater in Rongcheng funnel area of Xiong'an New Area[D]. Changchun: Jilin University, 2022
- [25] WANG S Q, WEI S C, LIANG H Y, et al. Nitrogen stock and leaching rates in a thick vadose zone below areas of long-term nitrogen fertilizer application in the North China Plain: A future groundwater quality threat[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 28–40
- [26] 尹军. 流域干旱还原理论与方法研究——以白洋淀流域为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017
- YIN J. Research on drought reduction theory and method in Basin — With Baiyangdian River Basin as the case study[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017
- [27] 屈红超. 黄土高原苹果园硝酸盐累积特征与淋溶过程模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
- QU H C. Nitrate accumulation characteristics and leaching process simulation in apple orchard on Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019
- [28] 陈东凯, 骆汉, 吕佼容, 等. 渭北旱塬矮砧密植苹果园土壤矿物质氮积累与空间分布特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 97–103
- CHEN D K, LUO H, LYU J R, et al. Mineral nitrogen accumulation and its spatial distribution in soils in dense planting dwarf rootstock apple orchard on the Weibei dry plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 97–103
- [29] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 103–110
- SHANG F Z, YANG P L, LI Y K, et al. Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7): 103–110

- [30] 姬王佳. 陕北黄土区深剖面土壤水和氮素来源及其对土地利用变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021
- JI W J. Sources of soil water and nitrogen and their response to land use change in deep deposits of Northern Shaanxi, China[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021
- [31] STÜEKEN E E, KIPP M A, KOEHLER M C, et al. The evolution of Earth's biogeochemical nitrogen cycle[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 160: 220–239
- [32] 章子含, 王赞, 高嵩涓, 等. 紫云英与稻秸还田对稻田土壤硝化潜势的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2021, 27(11): 1938–1948
- ZHANG Z H, WANG Y, GAO S J, et al. Effects of returning Chinese milk vetch and rice straw to the field on the nitrification potential of paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11): 1938–1948
- [33] PARAMASIVAM S, ALVA A K, PRAKASH O, et al. Denitrification in the vadose zone and in surficial groundwater of a sandy entisol with citrus production[J]. *Plant and Soil*, 1999, 208(2): 307–319
- [34] CANNAVO P, RICHAUME A, RENAULT P, et al. Denitrification in the upper vadose zone layers: A comparison between a fluvichypercalcaric cambisol and a haplic calcisol[J]. *Agronomie*, 2002, 22(5): 479–488
- [35] WALVOORD M A, PHILLIPS F M, STONESTROM D A, et al. A reservoir of nitrate beneath desert soils[J]. *Science*, 2003, 302(5647): 1021–1024
- [36] WATERHOUSE H, ARORA B, SPYCHER N F, et al. Influence of agricultural managed aquifer recharge (AgMAR) and stratigraphic heterogeneities on nitrate reduction in the deep subsurface[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(5): e2020wr029148
- [37] GAO J B, WANG S M, LI Z Q, et al. High nitrate accumulation in the vadose zone after land-use change from croplands to orchards[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(9): 5782–5790