白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集研发

吕 淇[1,2]，王仕琴[1*]，檀康达[1,2]，刘丙霞[1]，郑文波[1]

1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省节水农业重点实验室，石家庄 050022；
2. 中国科学院大学，北京 100049

摘 要：白洋淀西部农田区长期受高强度农业生产、灌溉排水和氮肥投入影响，土壤剖面中氮素累积及其向深层包气带迁移问题较为突出。土壤硝态氮和亚硝态氮是反映农田氮素迁移、转化及潜在地下水污染风险的重要指标。为探究不同施肥模式下包气带水氮运移与转化规律，2023 年 6 月至 2024 年 9 月，本研究在白洋淀西部雄安新区安新县独连村小麦玉米轮作农田样地，开展长期原位监测，设置常规施肥、减氮 25%施肥、生物炭配施 25%减氮施肥三种管理措施，共采集 5 个时期，11 个深度分层土壤样本（0–10 cm、10–25 cm、25–50 cm、50–75 cm、75–100 cm、100–150 cm、150–200 cm、200–250 cm、250–300 cm、300–350 cm、350–400 cm），利用烘干称重法、氯化钾溶液浸提-全自动间断化学分析法测定土壤含水量、硝态氮、亚硝态氮剖面分布与变化情况，构建了白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集。该数据集内容包括：（1）农田样地的地理位置；（2）样地垂向分层土壤质地；（3）土壤含水量；（4）土壤分层的硝态氮测定值；（5）土壤分层的亚硝态氮测定值。数据集存储为.shp 和.xlsx 格式，由 9 个数据文件组成，数据量为 41.8 KB（压缩为一个文件，35.4 KB）

关键词：白洋淀；高氮农田区；包气带；硝态氮；亚硝态氮

DOI: https://doi.org/10.3974/geodp.2026.05.10

CSTR: https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.05.10

数据可用性声明：

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》出版，可获取：

https://doi.org/10.3974/geodb.2026.04.07.V1 或 https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.04.07.V1.

1 前言

氮素是作物生长不可缺少的关键营养元素，合理施用氮肥能够显著提高农田作物产量和土壤供肥能力。然而，长期过量施用氮肥会导致土壤氮素盈余，尤其是硝态氮在土壤剖面中的大量累积[1]。硝态氮具有较强的水溶性和迁移性，容易随降雨、灌溉和土壤水分下

收稿日期：2026-05-12；**修订日期：**2026-09-22；**出版日期：**2026-10-25

基金项目：国家自然科学基金（442377080）

***通讯作者：**王仕琴，中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心，sqwang@sjziam.ac.cn

数据引用方式：[1] 吕淇，王仕琴，檀康达等. 白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集研发[J]. 全球变化数据学报，2026，10(5)：600–608. https://doi.org/10.3974/geodp.2026.05.10. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.05.10.

[2] 吕淇，王仕琴，檀康达等. 白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志，2026. https://doi.org/10.3974/geodb.2026.04.07.V1. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.04.07.V1.

渗进入深层包气带，进而增加地下水硝酸盐污染风险[2,3]。亚硝态氮虽然在土壤中通常含量较低，但它作为硝化和反硝化过程中的重要中间产物，其时空变化能够反映土壤氮素转化过程及氧化还原环境变化[4,5]。包气带作为水氮转化与运移的关键界面，其分层氮素分布、累积特征与动态变化直接决定氮素流失潜力[6]。因此，对农田包气带硝态氮和亚硝态氮开展分层实测，对于认识农业区氮素累积、迁移和转化过程具有重要意义。

白洋淀是华北平原重要的淡水湿地生态系统，也是雄安新区生态安全格局中的核心区域。白洋淀西部农田区与淀区水环境联系密切，农业生产过程中氮肥投入、灌溉制度、降雨入渗和地下水埋深变化等因素，均可能影响农田土壤氮素在包气带中的迁移与累积[7,8]。周边农田采用的小麦-玉米轮作制度，具有显著的季节性转换特征及高强度施肥特点，该水文条件下使得表层氮素输入引发持续性的深层垂直氮淋溶[9]。系统获取白洋淀西部农田区不同施肥模式下多时期、多深度的土壤含水量和氮素实测数据，是评估该区域农田氮素环境效应的重要基础。

近年来，减氮施肥和生物炭配施被认为是降低农田氮素淋失风险、提高氮肥利用效率和改善土壤理化性质的重要农田管理措施[10,11]。与常规施肥相比，减氮 25%施肥能够直接降低外源氮输入量；生物炭配施减氮处理则通过改善土壤孔隙结构、增强土壤保水保肥能力和影响微生物氮转化过程[12]，改变土壤水分运动和氮素迁移特征[13]。

目前已有研究针对白洋淀高氮累积农田区，不同施肥模式下土壤剖面氮素的长期分层实测数据较为缺乏[14,15]，难以支撑精准氮素管理与面源污染阻控。因此本文在距离白洋淀 10 km 的安新县设立了长期监测试验，为了区分施肥模式的效果，所有样地均采用相同的种植方式与田间管理条件。实验处理包括常规施肥、减氮 25%施肥以及添加生物炭的 25%减氮处理。研究采用高分辨率垂直分层采样策略（共 11 个深度区间，最深处达 400 cm），在 5 个关键物候与水文时期对土壤含水量、硝态氮和亚硝态氮含量进行采样测量，构建白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集，旨在揭示土壤氮素时空分异变化规律，为白洋淀流域农业氮素减排、面源污染治理提供数据支撑和科学依据。

2　数据集元数据简介

《白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集》[16]的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

3　数据研发方法

3.1　研究区概况

研究区位于白洋淀西部雄安新区安新县独连村农田区，东经 115°51′52″、北纬 38°51′57″，距离淀区不到 10 km。该区域地处华北平原中部，地势平坦，农业生产活动强度较高，主要种植制度为小麦-玉米轮作，是白洋淀周边典型粮食生产区之一[14]。区内属温带季风型大陆性气候，受东亚季风强控制，全年降水不均匀，多年平均年降水量约 480.8 mm，雨量主要集中在 6–9 月，年平均气温为 12.6 ℃[18]。

表 1 《白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集
数据集短名	SoilNitrogenBaiyangdianLake
作者信息	吕 淇, 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, lvqi22@mails.ucas.ac.cn 王仕琴, 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, sqwang@sjziam.ac.cn 檀康达, 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, tankangda@ms.sjziam.ac.cn 刘丙霞, 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, bxliu@sjziam.ac.cn 郑文波, 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, wbzheng@sjziam.ac.cn
地理区域	中国雄安新区安新县独连村
数据年代	2023–2024
数据格式	.shp、.xlsx
数据量	41.8 KB
数据集组成	农田样地的地理位置，样地垂向分层土壤质地，土壤含水量，土壤分层的硝态氮测定值，土壤分层的亚硝态氮测定值
基金项目	国家自然科学基金（442377080）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源[17]
数据和论文检索系统	DOI，CSTR，Crossref，DCI，CSCD，CNKI，SciEngine，WDS，GEOSS，PubScholar，CKRSC，OARL

3.2 野外试验布设与采样

2023 年 6 月，作者于雄安新区安新县农业提质增产试点示范农田区，布设了 3 块固定样地（图 1），样地宽度 10 m，纵向长度为 22 m，两端各有 2 m 保护行，占地约 1.12 亩。其中，常规施肥（Conventional fertilization, CF）处理冬小麦和夏玉米利用复合肥的施氮量分别为 210 kg N/ha 和 207 kg N/ha，减氮 25%施肥（Reduced nitrogen fertilization, RF）处理冬小麦和夏玉米施氮量分别为 157.5 kg N/ha 和 155.25 kg N/ha，生物炭配施减氮 25%处理（Biochar application combined with reduced nitrogen fertilization, BRN）在施氮减量 25%的基础上，添加 225 kg/ha 生物炭颗粒。各处理均在相同种植制度和相近田间管理条件下进行，以降低作物类型、耕作制度和自然条件差异对数据解释的干扰。样地长期监测时间为 2023 年 6 月至 2024 年 9 月，覆盖小麦-玉米轮作体系中不同作物生长阶段及施肥、灌溉、降雨影响期。

在土壤采集时，同种施肥模式下的样地用土钻采集 3 个平行样，采样深度分别为 0–10 cm、10–25 cm、25–50 cm、50–75 cm、75–100 cm、100–150 cm、150–200 cm、200–250 cm、

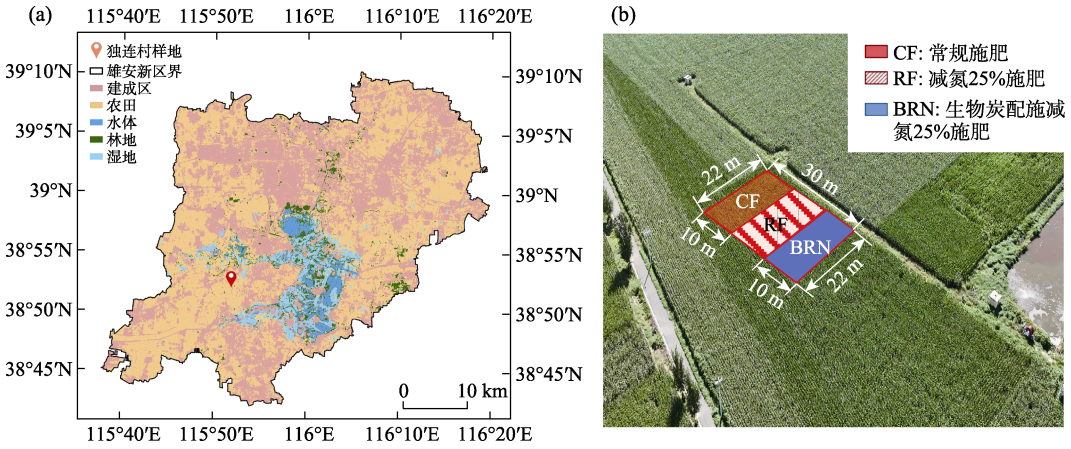


图 1　样地地理位置及试验布设示意图

250–300 cm、300–350 cm、350–400 cm。每个样品分别用铝盒和自封袋装取，铝盒封口处另加防水胶带封紧，立即置于 4 ℃冰箱保存。

3.3　室内试验

将铝盒保存的土壤样品在 105 ℃条件下烘干 8 h 以上直至质量恒定，分别记录鲜土+铝盒质量、干土+铝盒质量以及空铝盒质量。将自封袋中的土样混匀后称重，按照土水比 1:10 的比例加入 2 mol/L 的 KCl 溶液，浸提充足时间后放入离心机中离心，取上清液用滤纸过滤得到待测样液。利用全自动间断化学分析仪（SmartChem200）测定样液中的硝态氮和亚硝态氮含量[19]，最后换算为土壤样品中的硝态氮和亚硝态氮含量。

3.4　数据处理

土壤含水率计算公式如下：

$$\omega = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中，ω 代表土壤重量含水率（%），M_1 为鲜土加铝盒质量（g），M_2 为干土加铝盒质量（g），M_0 为空铝盒质量（g）。

亚硝态氮采用重氮偶合比色法测定。在酸性条件下，浸提液中的亚硝酸盐与磺胺类显色剂发生重氮化反应，再与 N-(1-萘基)乙二胺二盐酸盐偶合生成紫红色偶氮染料，仪器根据吸光度和标准曲线计算浸提液中亚硝态氮浓度。

硝态氮测定时，浸提液中的硝酸盐经镉还原模块还原为亚硝酸盐，再按亚硝态氮显色反应进行测定，并扣除样品原有亚硝态氮含量，得到硝态氮浓度。

土壤硝态氮及亚硝氮计算公式如下：

$$C = \frac{c \cdot V \cdot f}{m} \tag{2}$$

式中，C 为土壤硝态氮或亚硝态氮含量，单位为 mg/kg；c 为全自动间断化学分析仪（SmartChem200）测得的浸提液浓度，单位为 mg/L；V 为浸提液体积，单位为 L；f 为稀释倍数；m 为烘干基土壤质量，单位为 kg。

鲜土质量根据土壤重量含水率换算为烘干基土壤质量：

$$m = \frac{m_f}{1+\omega} \tag{3}$$

式中，m_f 为鲜土质量，单位为 kg，ω 为土壤重量含水率（%）。

利用 Origin 2025 对 0–400 cm 土壤剖面含水率、硝态氮、亚硝态氮含量进行绘图。

4 数据结果

4.1 数据集组成

数据集由样地的地理位置信息（.shp）和 1 个 Excel 文件（.xlsx）组成，Excel 文件包括 4 个 sheet，分别包含土壤剖面的质地和容重，以及土壤含水率、土壤硝态氮、土壤亚硝态氮这三个指标在 2023 年 6 月至 2024 年 9 月监测时间段 5 个时期的 3 个平行样品的监测数据，包括实测值、平均值和标准差。

4.2 数据结果分析

各时期不同施肥方式处理下土壤剖面含水率、硝态氮、亚硝态氮平均值见表 2。监测期间土壤剖面不同深度含水率、硝态氮、亚硝态氮的动态变化情况见图 2。

从时间变化看，2023 年 6 月土壤含水率最低，平均值为 21.2%；2023 年 9 月和 2023 年 11 月含水率较高,平均值分别为 27.9%和 27.7%;2024 年 3 月和 2024 年 9 月分别为 26.5%和 25.8%。这表明研究区土壤水分具有明显的季节性变化特征，夏秋季土壤含水率整体高于初夏和次年春秋时期，可能与降雨、灌溉以及作物生长季水分输入和消耗过程有关[20,21]。从垂向分布来看，土壤含水率在浅层和深层之间表现出明显差异，0–10 cm、10–25 cm、25–50 cm 土层平均含水率分别为 24.3%、24.7%、24.6%；200–300cm 土层平均含水率为 29.7%，表明 200–300 cm 土层为水分相对富集层位。从施肥处理看，CF、RF 和 BRN 处

表 2 各时期不同施肥处理下土壤剖面指标统计表

采样时期	施肥处理方式	指标平均值		
		含水率（%）	硝态氮（mg/kg）	亚硝态氮（mg/kg）
2023 年 6 月	CF	21.2	16.40	0.61
2023 年 9 月	CF	29.9	12.73	0.33
	RF	26.7	14.70	0.29
	BRN	27.0	13.85	0.22
2023 年 11 月	CF	26.6	38.35	0.60
	RF	27.9	32.51	0.69
	BRN	28.7	29.03	0.43
2024 年 3 月	CF	26.6	13.11	0.40
	RF	26.9	10.64	0.18
	BRN	27.0	10.40	0.23
2024 年 9 月	CF	25.5	14.27	0.36
	RF	26.2	12.22	0.22
	BRN	25.7	10.60	0.20

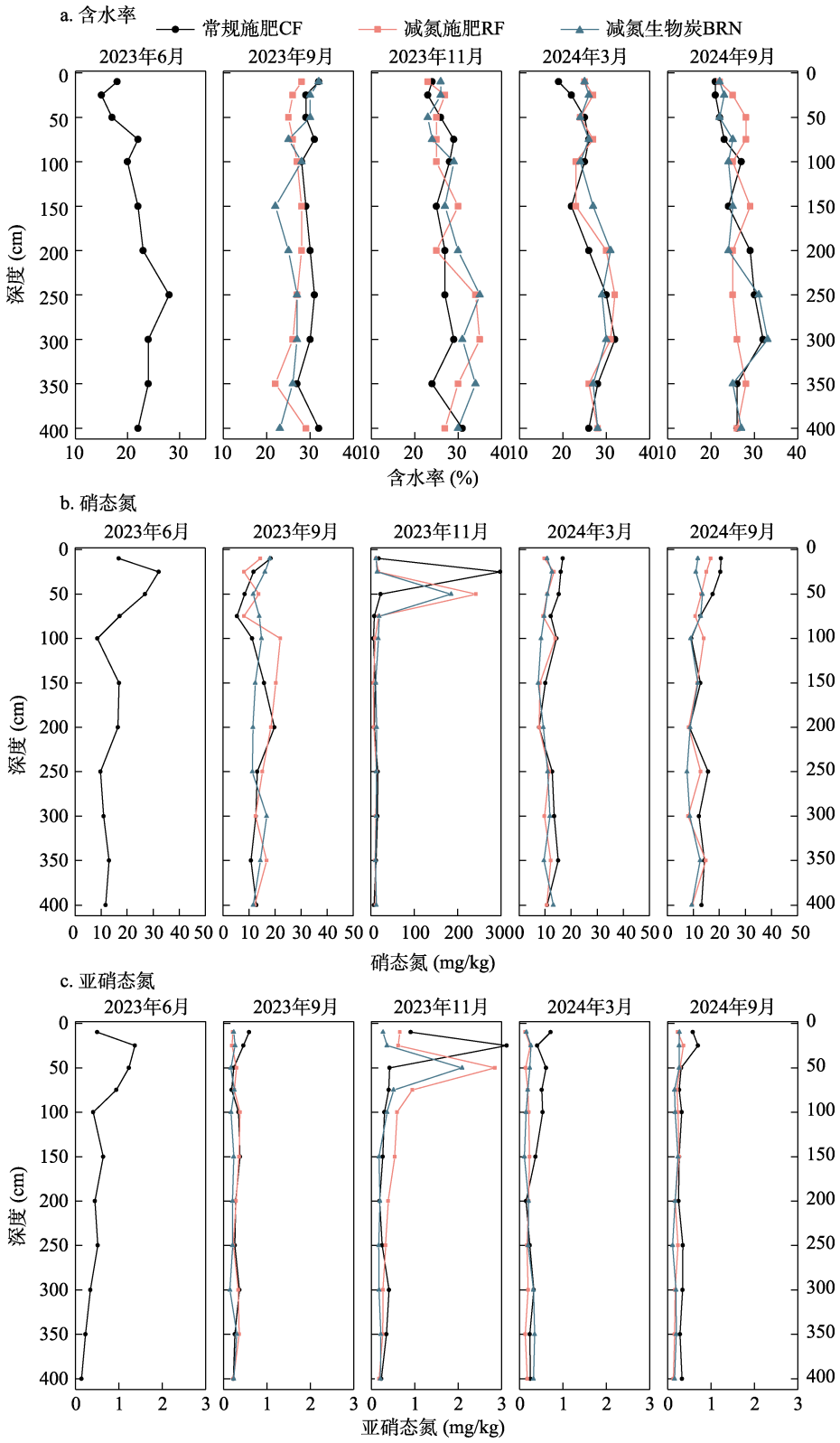


图 2　不同施肥处理下土壤剖面含水率、硝态氮、亚硝态氮动态变化图

理下的土壤含水率平均值分别为 25.75%、26.91%和 27.08%。BRN 处理下的土壤含水率略高于其他处理，说明生物炭配施处理有一定的保水效应，具有改善土壤持水能力[22]。

研究区土壤硝态氮含量变化范围为 3.17–354.23 mg/kg，平均值为 17.60 mg/kg，具有高时空异质性。2023 年 11 月硝态氮平均值最高，达到 33.30 mg/kg，明显高于其他时期，表明硝态氮在秋冬季出现阶段性累积。从垂向分布看，硝态氮主要富集于浅层至根区上部土壤。10–25 cm 和 25–50 cm 土层硝态氮平均值分别为 37.58 mg/kg 和 45.44 mg/kg，明显高于其他土层，是硝态氮累积的主要层位，随着土壤深度加大浓度整体降低。三种不同施肥处理下，土壤硝态氮平均值为 CF（18.97 mg/kg）>RF（17.52 mg/kg）>BRN（15.97 mg/kg），表明减氮和生物炭配施处理均能降低土壤硝态氮平均含量。

亚硝态氮含量总体低于硝态氮，但其垂向分布和时间变化与硝态氮具有一定同步性。亚硝态氮高值主要出现在 10–50 cm 土层，并在 2023 年 11 月表现出明显升高，该时期浅层土壤氮素转化过程较为活跃。不同处理间，常规施肥处理亚硝态氮含量相对较高，减氮和生物炭配施减氮处理相对较低。

从整体相关性看，硝态氮与亚硝态氮之间呈明显正相关，二者在土壤剖面中的时空分布具有较强同步性。特别是 2023 年 11 月，硝态氮和亚硝态氮均在 10–50 cm 土层出现高值，表明该时期浅层土壤氮素累积和转化过程同步增强。土壤含水量与硝态氮、亚硝态氮之间整体相关性较弱，说明土壤含水量并不是决定硝态氮和亚硝态氮分布的主要因素[23]，硝态氮和亚硝态氮的时空异质性还受到施肥时期、作物吸收、土壤质地、微生物转化过程[15,24]以及降雨灌溉后氮素再分配[25]等因素共同影响。

5 讨论和总结

本文基于 2023 年 6 月至 2024 年 9 月开展的三种施肥管理措施下田间长期监测试验，系统性分析了白洋淀西部土壤高氮累积农区的土壤剖面氮素动态变化情况，研究测定了土壤质地、含水率、硝态氮和亚硝态氮含量。本数据集可为白洋淀西部农田氮素淋失风险识别、减氮施肥优化和包气带水氮迁移模型构建提供数据支持。

基于监测数据的分析，研究结果表明：白洋淀西部高氮农田土壤氮素以硝态氮为主，土壤深度 0–400 cm 范围内表层 100 cm 处硝态氮含量较高，常规施肥下存在深层土壤氮淋溶风险。不同施肥处理间，常规施肥处理氮素累积强度最高，减氮 25%处理次之，生物炭配施 25%减氮处理较低，表明减氮和生物炭配施措施具有降低土壤无机氮累积和潜在淋失风险的作用。后续研究可结合降雨、灌溉、施肥量、作物吸氮量和地下水埋深等数据信息，进一步定量评估不同管理措施对氮素淋失和水环境风险的影响。

作者分工：王仕琴对数据集的开发做了总体设计；刘丙霞布设了野外试验；吕淇负责样品采集、室内实验和数据处理以及数据集的整理和数据论文撰写；檀康达和郑文波指导和协助了样品采集。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

[1] 庞耀悦, 范晓懂, 胡笑涛等. 深蓄储水灌溉不同灌水量对冬小麦农田土壤氮素吸收利用与淋失的影响[J]. 土壤通报, 2025, 56(2): 465–474.

[2] Singh, B., Craswell, E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem [J]. *SN Applied Sciences*, 2021, 3(4): 518.

[3] Murphy, N. P., Waterhouse, H., Dahlke, H. E. Influence of agricultural managed aquifer recharge on nitrate transport: the role of soil texture and flooding frequency [J]. *Vadose Zone Journal*, 2021, 20(5): e20150.

[4] Liu, L. C., Zheng, T. Y., Qiu, Y. Y., *et al*. Competitive roles of DNRA and denitrification on organic nitrogen dynamics in partially saturated soil-water systems [J]. *Water Resources Research*, 2025, 61(4): e2024WR038705.

[5] Szczebak, L. D., Willems, J. A., Müller, C., *et al*. Nitrite isotope characteristics and associated soil N transformations [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 5008.

[6] Tan, K. D., Wang, S. Q., Zheng, W. B., *et al*. Geomorphologic and sedimentary features dominate the nitrogen accumulation and leaching in the deep vadose zone from a catchment viewpoint [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 652: 132682.

[7] 李冲, 檀康达, 郑文波等. 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.

[8] 李雪, 刘美英, 闵雷雷等. 华北平原中部地区典型深层包气带氮素迁移转化过程[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(12): 2359–2370.

[9] Zhou, X. N., Du, C. H., Li, H. R., *et al*. Optimization of inter-seasonal nitrogen allocation increases yield and resource-use efficiency in a water-limited wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. *The Crop Journal*, 2024, 12(3): 907–914.

[10] Wang, L., Leghari, S. J., Wu, J. J., *et al*. Interactive effects of biochar and chemical fertilizer on water and nitrogen dynamics, soil properties and maize yield under different irrigation methods [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14(000):15.

[11] 张超群, 张彩虹. 有机物料与抑制剂配施对土壤速效氮含量及作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2025, 56(6): 1717–1725.

[12] Zhang, Q., Niu, W. Q., Du, Y. D., *et al*. Sustainable effects of nitrogen reduction combined with biochar on enhancing maize productivity and nitrogen utilization [J]. *European Journal of Agronomy*, 2025, 162: 127429.

[13] Tian, X. Q., Li, Z., Wang, Y. F., *et al*. Evaluation on soil fertility quality under biochar combined with nitrogen reduction [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 13792.

[14] 杨紫薇, 尹高飞, 赵海璇等. 白洋淀流域种植结构及氮盈余的时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 111–119.

[15] Feng, W. Z., Wang, S. Q., Tan, K. D., *et al*. Simulation of spatial and temporal variation of nitrate leaching

in the vadose zone of alluvial regions on a large regional scale [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 916: 170114.

[16] 吕淇, 王仕琴, 檀康达等. 白洋淀西部土壤高氮累积农区土壤氮素实测数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2026. https://doi.org/10.3974/geodb.2026.04.07.V1. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.04.07.V1.

[17] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05(2017 年更新).

[18] 廖要明, 黄大鹏. 雄安新区气候特征及变化趋势分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(23): 99–105.

[19] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 土壤质量 土壤硝态氮、亚硝态氮和铵态氮的测定 氯化钾溶液浸提流动分析法 (GB/T 42487—2023)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[20] 苗泽, 屈忠义, 白燕英等. 基于 TVDI 的作物生育期农田表层土壤含水率时空动态演变[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 567–577.

[21] Zhao, L., Han, C. Y., Li, Y. N., *et al*. Coordinated regulation of water use-efficiency-cost in a winter wheat-summer maize rotation system and optimization of water allocation strategies [J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 318: 109718.

[22] Zhou, M. R., Ying, S. S., Chen, J. H., *et al*. Effects of biochar-based fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen losses via leaching and ammonia volatilization from an open vegetable field [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(46): 65188–65199.

[23] Li, Y., Ju, X. T., Wu, D. Transient nitrite accumulation explains the variation of N2O emissions to N fertilization in upland agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 177: 108917.

[24] Su, F. M., Wu, J. H., Wang, D., *et al*. Moisture movement, soil salt migration, and nitrogen transformation under different irrigation conditions: field experimental research [J]. *Chemosphere*, 2022, 300: 134569.

[25] Pu, X., Wang, T. T., Cai, K., *et al*. Characterization and source apportionment of rainfall-driven nitrate export from dryland crop systems with agricultural practices at mid-high latitudes [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 375: 109218.