

滴灌配施不同形态氮肥管理对水稻根际氮转化过程及产量形成的影响

杨昌南 何子欣 谈亚文 张学智 张业诚 田浩然 危常州 张新疆*

(石河子大学 农学院, 石河子 832000; *通信作者, email: xinjiangzhang0218@126.com)

Effects of Drip Irrigation Combined with Different Nitrogen Form Management Practices on Rhizospheric Nitrogen Transformation Process and Yield Formation in Rice

YANG Changnan, HE Zixin, TAN Yawen, ZHANG Xuezhi, ZHANG Yecheng, TIAN Haoran, WEI Changzhou, ZHANG Xinjiang*

(College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832000, China; * Corresponding author, email: xinjiangzhang0218@126.com)

Abstract: 【Objective】 A field experiment was conducted in an arid region to investigate the effects of nitrogen form and drip irrigation placement on nitrogen transformation dynamics in rice rhizosphere and yield formation, aiming to address low nitrogen use efficiency in drip-irrigated rice and provide theoretical and technical support for improving nitrogen management in these systems. 【Method】 A three-factor randomized complete block design was adopted. The experimental factors included nitrogen application methods under drip irrigation, i.e., surface drip irrigation (Su) and subsurface drip irrigation at a depth of 10 cm (Sh); nitrogen forms, including no nitrogen application (N0), nitrate nitrogen (NN, calcium nitrate), and ammonium nitrogen combined with a nitrification inhibitor (AN, ammonium sulfate + DMPP, where DMPP is a nitrification inhibitor); and rice cultivars, namely Liangxiang 3 (LX3) and Ningjing 48 (NJ48). The three factors were fully crossed, resulting in 12 treatment combinations with three replicates for each combination. We conducted a comparative analysis of the following parameters across the different treatment combinations: rhizosphere soil pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content, nitrification rate and denitrification potential, aboveground nitrogen accumulation, and yield components. 【Result】 Dry matter accumulation, nitrogen accumulation, and yield differed significantly among the treatment combinations. Overall, the AN treatment outperformed the NN and N0 treatments, with the Sh+AN combination yielding the highest results. The rhizosphere soil pH was significantly lower in the AN treatment than in the NN treatment. At both the tillering and heading stages, the soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content differed significantly among nitrogen forms, with the AN treatment being significantly higher than the N0 and NN treatments. The highest values were observed in the Sh+AN combination (LX3: 20.39 mg/kg; NJ48: 21.05 mg/kg). Similarly, soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content varied significantly among nitrogen forms, with the NN treatment significantly exceeding the N0 and AN treatments. The Su+NN combination showed the highest levels (LX3: 61.71 mg/kg; NJ48: 59.97 mg/kg). The soil potential nitrification rate and denitrification potential were significantly higher in the NN treatment than in the N0 and AN treatments. While these rates were slightly higher under Su irrigation compared to Sh, the difference was not statistically significant. 【Conclusion】 Shallow subsurface drip irrigation at 10 cm depth combined with ammonium nitrogen stabilization management (Sh + AN) better maintained $\text{NH}_4^+\text{-N}$ levels in the rice rhizosphere and suppressed nitrification-related nitrogen loss. Consequently, this practice enhanced nitrogen uptake and increased grain yield. Therefore, the Sh+AN strategy can be recommended as an optimized nitrogen and irrigation management practice for drip-irrigated rice in the arid region of Xinjiang, effectively balancing yield enhancement with the mitigation of nitrogen loss.

Keywords: drip-irrigated rice; irrigation method; nitrogen form; nitrogen transformation; nitrogen use efficiency; yield

摘 要: 【目的】针对干旱区滴灌水稻氮素利用率低的问题,探究不同形态氮肥结合滴灌施肥位置对水稻根际土壤氮转化动力学特征及产量形成的影响机制,为滴灌水稻氮肥高效利用提供理论依据和技术参考。【方法】采用三因素完全随机区组试验设计。试验因素包括滴灌施肥方式,分为地表滴灌施肥(Su)和地下埋深 10 cm 滴灌施

收稿日期: 2025-10-18; 修改稿收到日期: 2026-03-20。

基金项目: 兵团财政科技计划资助项目(2022ZD054); 国家自然科学基金资助项目(32060721)。

肥(Sh);氮肥分为不施氮(N0)、施硝态氮肥(NN, 硝酸钙)和施铵态氮肥配施硝化抑制剂(AN, 硫酸铵+DMPP, DMPP为硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐);水稻品种选用粮香3号(LX3)和宁粳48号(NJ48)。三因素完全随机组合,共设12个处理,每处理设置3个重复。对比分析不同处理组合下水稻根际土壤pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量、硝化速率和反硝化势,水稻地上部氮积累量及产量构成。【结果】两个水稻品种的干物质积累量、氮积累量和产量在不同处理组合间差异显著,总体表现为AN处理高于NN和N0处理,其中,以Sh+AN处理组合最高。AN处理的根际土壤pH值显著低于NN处理。在两个水稻品种的分蘖期和孕穗期,不同氮肥形态间土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量表现为AN处理显著高于N0和NN处理,其中以Sh+AN处理组合的含量最高(LX3: 20.39 mg/kg; NJ48: 21.05 mg/kg)。不同氮肥形态管理间土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量则表现为NN处理显著高于N0和AN处理,其中以Su+NN处理组合最高(LX3: 61.71 mg/kg; NJ48: 59.97 mg/kg)。两个品种的土壤氮初级硝化速率和反硝化势均表现为NN处理显著高于N0和AN, Su处理略高于Sh,但两者无显著性差异。【结论】地下10 cm滴灌结合铵态氮稳定化管理(Sh+AN)有利于维持水稻根际 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水平,抑制根际氮硝化损失,进而提高水稻氮吸收量和促进产量增加。该方法可以推荐为新疆干旱区兼顾滴灌水稻产量提升和减少氮素损失的优化施肥选择。

关键词:滴灌水稻;施肥方式;氮肥形态;氮转化;氮素利用率;产量

水稻(*Oryza sativa* L.)是全球半数人口的主粮作物,同时也是耗水量最大的粮食作物。传统淹灌水稻栽培所需水量是小麦等其他谷物的2~3倍^[1]。我国新疆西北绿洲干旱区降雨少、土壤蒸发量大、水资源短缺,限制了水稻规模化种植^[2]。与传统淹灌水稻生产相比,滴灌水稻生产可以减少用水60%,肥料使用20%^[3],但仍存在氮肥低效利用风险^[4-5]。高频滴灌导致的水稻根系与土壤氮空间分布的低匹配性和旱地土壤氮素的气态损失均是造成滴灌稻作体系氮素利用效率偏低的重要原因^[6-7]。滴灌条件下氮肥利用率偏低并非完全由“滴灌方式”单独造成,过高的滴灌施氮量和土壤氮肥形态与滴灌系统的不匹配也可能放大氮素损失风险。已有研究表明,在滴灌条件下氮肥损失存在多种途径,例如硝态氮肥相较于铵态氮肥更易发生淋溶损失^[8];同时,灌溉方式的改变(如局部湿润与干湿交替灌溉)会加速氮素转化与迁移过程^[9]。此外,在特定水氮管理条件下,滴灌增加了 NH_3 挥发损失和 N_2O 排放^[10]。多项研究表明,农田 NH_3 挥发损失占总氮源的2.1%~24.1%^[11-12], N_2O 排放占总氮源的0.16%~5%^[13-14],甚至更高。因此,有必要在滴灌稻作体系中进一步厘清引发水稻氮低效利用的关键土壤氮转化过程。

土壤硝化与反硝化过程的强度直接取决于氮底物输入的形态、浓度及其所处的土壤微环境(水分、氧气状况等)^[15]。有研究表明,在恒定60%田间持水量下,铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)输入可促进土壤硝化转化^[16],而硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)在水分饱和条件下更易激发强烈的反硝化作用。水稻作为典型的喜铵作物^[17-18],对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收偏好会进一步反馈调节根际土壤中的氮形态与浓度^[17, 19-20],也是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能促进水稻前期生长与氮素积累的主要原因^[21]。不同形态氮素在土壤中的化学行为迥异: NH_4^+ 可

通过土壤胶体吸附减少淋失^[22],在耕层存留时间较长,而 NO_3^- 则移动性更强,易发生淋溶损失^[23]。前人研究表明,通过调控施肥位置可以塑造根区水、肥、气的空间分布,创造土壤异质性微环境,从而差异化地影响土壤硝化与反硝化反应的速率。适宜的施肥深度有助于延长土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的滞留时间^[24],提高作物氮利用率^[25-26],减少 N_2O 排放(30%~50%)^[27-28]和维持根际pH稳定^[29]。滴灌系统下不同的水氮空间配置(地表/地下)可以通过重塑根区理化环境调控土壤氮有效性^[24]。此外,水稻根系强大的泌氧特性^[30-31]与滴灌水分运移耦合,可形成独特的根-土界面氧化-还原微域^[32],进而调控氮素形态转化与损失途径^[33]。由此可见,滴灌深度不仅决定了水分和养分的空间分布,还可能通过影响根区氧动态进而调节 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化与迁移^[33],而氮肥形态则因其化学行为与水稻吸收特性的差异,可能与灌溉制度产生交互效应,共同调控土壤氮素转化过程和水稻氮利用效率。然而,现有滴灌水稻系统的研究多为灌溉或施肥的单因素研究^[34-35],关于滴灌深度与施氮形态的互作如何调控土壤氮转化关键过程尚不明晰。

基于此,本研究提出科学假设:通过改变施用氮肥的形态与位置可以差异化地调控滴灌水稻根际土壤氮硝化与反硝化进程,进而成为干预滴灌水稻氮利用效率和产量的关键手段。为验证此假设,本研究通过田间试验,设置滴灌水稻不同施氮形态($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)与施肥方式(地表滴灌施肥和地下10 cm滴灌施肥)的双因子组合处理,旨在揭示滴灌水稻不同施肥组合下土壤氮硝化与反硝化过程差异性,以期为构建滴灌水稻增产增效的氮肥管理策略和深入分析滴灌水稻氮素高效利用提供理论参考。

表 1 2024 年试验点 0–20 cm 深度土壤理化性质

Table 1. Physical and chemical properties of soil at 0–20 cm depth at the experimental site in 2024

pH 值 pH value	有机质 Organic matter (g/kg)	碱解氮 Alkali hydrolyzable N (mg/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	土壤容重 Bulk density (g/cm ³)	田间持水量 Field water capacity (%)
8.39	18.3	54.3	10.5	321.3	1.37	24.7

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2024 年 4 月至 10 月在新疆石河子市石河子大学农学试验场二连(东经 86°0′39″, 北纬 44°19′9″, 海拔 412 m)进行。该区域为温带大陆性气候, 水稻生育期内平均降雨量为 110 mm, 平均温度为 18.5℃。该试验地常年采用滴灌水稻种植模式。滴灌水稻生长季为 5 月初至 10 月初。冬季休耕无其他作物种植。供试水稻品种为粮香 3 号和宁粳 48 号。土壤基础理化性质如表 1。

1.2 试验设计

采用三因素完全随机区组设计。试验因子包括滴灌施肥方式(F): 地表滴灌(Su)与地下埋深 10 cm 滴灌(Sh); 氮肥形态(N): 不施氮(N0)、硝态氮[NN, 供试氮肥为 Ca(NO₃)₂, N 11.8%]、铵态氮配施硝化抑制剂(AN, 供试氮肥为 (NH₄)₂SO₄, N 21.2%, 为保证铵态氮在土壤中供应的稳定性, 施用 (NH₄)₂SO₄ 时添加硝化抑制剂 DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐, 购自武威金仓生物科技有限公司)以延缓土壤 NH₄⁺向 NO₃⁻的转化, DMPP 添加量为氮施用量的 0.5%); 水稻品种(V): 粮香 3 号(LX3)和宁粳 48(NJ48)。三者完全组合, 共构成 12 个处理(2 种灌溉施肥方式×3 种氮肥形态×2 个品种)。每个处理组合设置 3 个重复(区组), 所有处理在每个区组内随机排列, 共 36 个试验小区。每个试验小区包含 2 条种植膜, 小区面积为 17.5 m²(长 7.0 m×宽 2.5 m)。

试验采用“两管四行”滴灌种植模式, 种植宽度 1.25 m, 两种灌溉系统均采用每两行水稻配置一条滴灌带(滴头流量 2.0 L/h, 间距 0.25 m), 播种前完成两种滴灌系统的滴灌带铺设。Su 处理为地表滴灌, 滴灌带铺设于覆膜下, 滴灌带与薄膜由铺膜机一次性完成铺设(即一膜两管四行)。Sh 处理为地下滴灌: 将滴灌带在原地表滴灌带正下方埋设至土表下 10 cm, 以形成地下埋深 10 cm 的滴灌供水方式。

于 2024 年 4 月 29 日播种, 播种深度 2~3 cm, 株距 10 cm, 行距 26 cm, 人工点播(直播), 每穴 6~8 粒, 播种密度 3.0 × 10⁵ 穴/hm²。于三叶期定苗, 每穴 5 株水稻。所有处理(含对照)同步施用磷钾肥, 磷肥为磷酸二氢钾施用量为 110 kg/hm²(折合 P₂O₅), NN 处理和 AN 处理水稻生育期氮肥施用量均为 300 kg/hm²(折合纯 N), 所有肥料分 3 次施用, 分别是出苗-拔节施肥 1 次(2024 年 6 月 7 日), 拔节-扬花期施肥 1 次(2024 年 7 月 10 日), 扬花期-成熟期施肥 1 次(2024 年 8 月 13 日), 施肥比例为 2:4:4。其他田间管理与大田生产要求一致。

试验期间滴灌处理(su 和 sh)采用时域反射仪(TRIME-TDR, IMKO, 德国)监测土壤含水量。在整个试验期内, 每天固定时间(9:00)监测 0~20 cm 土层土壤含水量; 当土壤含水量低于设定灌水下限(田间持水量的 90%)时, 即启动补充灌溉。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集与处理

根际土壤采样: 分别于水稻分蘖期(2024 年 7 月 10 日)和孕穗期(2024 年 8 月 13 日)施肥后 1 d、3 d 和 7 d 选择长势均匀连续 6 穴水稻连根挖出带回实验室用于采集根际土。根际土壤采用室内手动剥离的方法, 选择根际核心区域使用镊子剥离粘连在根表的土壤。所采的根际土壤分为两部分, 一部分用于直接测定根际土壤 pH、铵态氮和硝态氮含量, 另一部分用于后续室内培养测定土壤初级硝化速率和反硝化势。

植株采样: 分别于水稻分蘖期、孕穗期和成熟期三个时期每小区选择长势均匀连续 3 穴水稻, 稻株从茎基部切断, 分为地上部分, 地上部按照不同器官(茎、叶和穗)分类后带回实验室用蒸馏水洗净后在 105℃下杀青 30 min, 80℃下烘干至恒重后用于测定干物质量和氮含量。在水稻成熟期, 每个小区选定 3 个长势一致的 1 m²的区域估算水稻产量。从每个小区取 15 穴水稻确定产量组成, 包括穗数、穗粒数、结实率和千粒重。产量根据水分含量 14.5%折算。

1.3.2 根际土壤 N 周转室内培养试验

1.3.2.1 根际土 ^{15}N 室内好氧培养

分别采集分蘖期和孕穗期施肥后 7 d 的新鲜根际土样用于开展 ^{15}N 同位素成对标记室内培养试验。同一生育期采集的根际土壤分别分为三组：1) 用于 $^{15}\text{NH}_4^+-\text{N}$ 标记，即在土壤中加入 $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ (^{15}N 原子丰度为 10.1 atom%) 溶液；2) 用于 $^{15}\text{NO}_3^--\text{N}$ 标记，即在土壤中加入 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ (^{15}N 原子丰度为 10.2 atom%) 溶液；3) 不添加任何标记或非标记氮肥的对照处理，对照用于表征本底自然丰度/提取空白。

根际土好氧培养及取样具体步骤：1) 根际土壤含水率测定：使用酒精燃烧法快速测定根际土壤含水率；2) 根际土好氧培养：称取相当于 30.0 g 干土重的新鲜土于 420 mL 培养瓶中，瓶内均匀加入 50 mg (N)/kg 土壤的 $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 或 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ 作为氮源(上海稳定性同位素工程技术研究中心生产)，轻轻盖上瓶口创造好氧条件，并将培养瓶放置于 $25\pm 1^\circ\text{C}$ 的恒温培养箱中避光培养，每个处理设置 3 个重复。为尽可能还原田间土壤状态，土壤培养期间每天打开瓶盖室内放置 3 min，并通过称重法加水使土壤含水量保持在新鲜根际土样时的原始含水量；3) 根际土培养后的取样：分别在根际土加入 ^{15}N 标记溶液之后的 2 h, 2 d, 5 d, 8 d 进行破坏性取样，向培养瓶中加入 2 mol/L 的氯化钾溶液，置于摇床中振荡 1 h (25°C , 250 r/min) 后使用定量滤纸(Whatman Grade 50)过滤并收集滤液；4) 对照处理设置：称取相当于 30.0 g 干土的新鲜土于 420 mL 培养瓶中，不添加任何标记或非标记氮肥，立即加入 2 mol/L 氯化钾溶液进行提取。

土壤 $^{15}\text{NH}_4^+-\text{N}$ 及 $^{15}\text{NO}_3^--\text{N}$ 丰度测定方法：使用微扩散法^[36]富集土壤待测液中的 ^{15}N 样品。操作步骤包括：吸取 20 mL 待测液于蓝盖瓶中，加入碱性试剂 MgO 使 NH_4^+-N 转化为 NH_3 ，立即盖上放置加有草酸试剂的滤纸片的瓶盖，使得密闭蓝盖瓶内的 NH_3 被滤纸吸收。收集滤纸并干燥包样后，使用同位素质谱仪(Europa Scientific Integra, Crewe, UK)测定土壤样品中的 $^{15}\text{NH}_4^+-\text{N}$ 丰度；富集待测液样品中的 $^{15}\text{NO}_3^--\text{N}$ 时，需要先将样本中的 NH_4^+-N 转化为 NH_3 后去除，再添加戴氏合金使待测液中的 NO_3^--N 还原为 NH_4^+-N ，随后重复上述方法可测定土壤样品中的 $^{15}\text{NO}_3^--\text{N}$ 丰度值。

1.3.2.2 根际土厌氧培养

分别采集分蘖期和孕穗期施肥后 7 d 的新鲜根际土样用于开展厌氧室内培养试验。采用土壤厌

氧处理(通过土壤淹水和培养瓶顶空充氮气实现)并向土壤中加入 KNO_3 ，于 25.0°C 恒温条件培养后测定反硝化势和气态产物 N_2O 和 N_2 排放速率。同一生育期采集的根际土壤共分为两组：1) 不加乙炔处理，用于测定 N_2O 的排放速率；2) 添加乙炔处理(乙炔体积分数 10%)，加乙炔和不加乙炔处理的差值用于计算土壤 N_2 的排放速率。

厌氧培养具体步骤：1) 测定根际土壤含水量，方法同 1.3.2.1；2) 称取相当于 20.0 g 干土的新鲜土于 250 mL 培养瓶中，用带气体采样口的硅橡胶塞密封，每个处理设置 6 个重复；3) 根际土预培养：在培养开始前，加乙炔处理的培养瓶内先加入 10% 的乙炔在好氧状态下预培养 24 h，以确保乙炔在土壤孔隙结构中充分扩散以发挥抑制效果，不加乙炔的处理同样预培养 24 h；4) 根际土预培养结束后，所有处理按水：土比 1：1 加入蒸馏水，然后每 1 kg 土壤加入 361 mg KNO_3 ，马上塞紧硅橡胶塞，连接到抽真空装置进行抽真空-充入高纯氮气操作，每次充氮气 600 s，以建立厌氧条件。随后用 20 mL 注射器从加乙炔处理培养瓶中取出一定量气体，马上加入相同体积的乙炔，使培养瓶内乙炔的浓度达到 10.0%；5) 将所有培养瓶置于摇床上震荡 900 s (25.0°C , 250 r/min)，再置于 25.0°C 恒温培养箱内培养 6 h 后，采集气体样品用于测定 N_2O 浓度。

根际土 N_2O 的测定和 N_2 产生速率的计算：采样前先用 20 mL 注射器反复抽提培养瓶中气体，使其充分混合，然后采集顶空气体 20.0 mL，用气相色谱仪(Agilent 7890)测定 N_2O 浓度。分别在培养开始后的 6 h、24 h、48 h、72 h 重复以上厌氧培养步骤获得对应时间点的 N_2O 产生速率；加乙炔与不加乙炔处理的差值用于计算 N_2 产生速率。

1.3.3 根际土壤 pH、铵-硝态氮含量及植株氮含量测定方法

根际土壤 pH 测定：取新鲜根际土用 DMP-2 mV/pH 计(南京 Quark 有限公司)测定 pH(土：水比为 1：5)；

根际土壤铵-硝态氮含量测定：采集的根际土壤使用 KCl 浸提后使用紫外可见分光光度计(Spectrum-2500, 上海)测定土壤 NH_4^+-N 浓度和 NO_3^--N 浓度。

植株地上部氮含量测定：分别于水稻拔节期、扬花期和成熟期三个时期取水稻不同器官干物质样粉碎，过 0.25 mm 筛后，使用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮后用凯氏定氮法测定。

1.3.4 数据处理与分析方法

1.3.4.1 氮肥农学利用率计算

1) 氮农学利用率 [Agronomic Efficiency of Nitrogen, AEN (kg/kg)];

$$AEN = (Y_i - Y_0) / N;$$

式中 Y_i 为某一施氮处理(如 Su_NN)的籽粒产量 (kg/hm²); Y_0 为与该处理品种和灌溉施肥方式均相同的不施氮对照(如 Su_N0)的籽粒产量 (kg/hm²); N 为施氮量。

1.3.4.2 ¹⁵N 室内好氧培养速率计算

2) 初级硝化速率 (Kirkham and Bartholomew, 1954, mg/(kg·d)) = $\{([NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t) / t\} \times \{\log(^{15}[NO_3^-]_0 / ^{15}[NO_3^-]_t) / \{\log([NO_3^-]_0 / [NO_3^-]_t)\}\}$;

$[NO_3^-]_0$ 和 $[NO_3^-]_t$ 分别为培养初始和培养结束的 NO_3^- 浓度 (mg/kg), $^{15}[NO_3^-]_0$ 和 $^{15}[NO_3^-]_t$ 分别为培养初始和培养结束的 $N-NO_3^-$ ¹⁵N 丰度 (%)。

1.3.4.3 厌氧室内培养速率计算

3) N_2O 产生速率 [$\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$]

$$V_{N_2O} = [\rho_1 \times C_1 \times (V_g + V_l \times \alpha) \times 273 \times \alpha] / [W \times (273 + T)] / 6;$$

4) N_2 产生速率 [$\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$]

$$V_{N_2} = V_{\text{乙炔处理 } N_2O} - V_{\text{无乙炔处理 } N_2O};$$

式中, V_{N_2O} 为 N_2O 产生速率; $V_{\text{乙炔处理 } N_2O}$ 和 $V_{\text{无乙炔处理 } N_2O}$ 分别为加乙炔处理和未加乙炔处理的 N_2O 产生速率[乙炔阻断 $N_2O \rightarrow N_2$ 的还原, 因此加乙炔条件下的 N_2O 可代表 $(N_2O + N_2)$ 产生量], 单位为 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$; ρ_1 为标准状态下 N_2O-N 的浓度, 1.25 g/L; C_1 为 N_2O 摩尔分数, 单位为 nmol/mol; V_g 是培养瓶上部有效空间体积, 单位 mL; V_l 为液体体积, 单位 mL; α 为 Bunsen 校正系数, 25 °C 时为 0.549; W 为烘干土重, 单位 kg; T 为测定气体时的温度, 25 °C; a 为单位转换系数, 为 10^{-9} 。累积产生量为相邻两次测定的气体产生速率的平均值与测定时间间隔乘积的累加值。

1.3.4.4 统计分析

使用 Excel 2019 进行数据整理与初步处理。采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析。试验为两因素完全随机设计, 因素包括灌溉施肥方式(F)和氮肥形态(N)。采用两因素方差分析, 以检验灌溉施肥方式(F)、氮肥形态(N)及其交互作用(F × N)对各观测指标的影响。在主效应分析中, 氮肥形态(N)的主效应基于模型估计的边际均值(estimated marginal means)进行比较, 即在不同灌溉施肥方式(F)水平上取平均值; 灌溉施肥方式(F)的主效应则基于在不同氮肥形态(N)水平上的边际均值进行比较。上述边际均值均由 SPSS 软件在方差分析过程中自动

计算获得。对于处理组合间的比较, 将不同处理组(F × N)视为单一因素, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行检验, 并进行 Tukey's HSD 多重比较。在分析前, 对数据进行正态性检验(Shapiro-Wilk)和方差齐性检验(Levene's test)。当方差分析显示总体效应显著($P < 0.05$)时, 进一步采用 Tukey's 诚实显著差异法(Tukey's HSD)进行多重比较, 以比较不同处理组间的均值差异。所有图表均使用 Origin Pro 2022 绘制。

2 结果与分析

2.1 水稻产量与氮素利用效率

氮肥形态对两个水稻品种(LX3 和 NJ48)的产量构成及产量均产生了显著影响(表 2)。与 N0 相比, NN 和 AN 处理均显著提高水稻产量, 其中, NN 处理水稻产量平均提高 75.56%, AN 处理平均提高 99.30%。灌溉施氮方式对水稻结实率、千粒重和产量产生显著影响, Sh 处理的水稻产量整体高于 Su 处理。灌溉施氮方式与氮肥形态对水稻产量的交互效应未达到显著水平, 但不同灌溉施氮方式和氮肥形态间水稻产量存在显著差异, 两个品种中均是 Sh_AN 处理组合产量最高。

氮肥农学利用率在不同灌溉施肥方式和氮肥形态间未表现出显著差异。然而, 从均值来看, AN 处理的氮肥农学利用率普遍高于 NN 处理。LX3 的氮肥农学利用率均值(NN: 10.9 kg/kg, AN: 13.1 kg/kg)略高于 NJ48。

2.2 滴灌水稻干物质积累和氮吸收

2.2.1 水稻干物质积累量

氮肥形态显著影响水稻各生育期地上部干物质积累(图 1)。在分蘖期, 与 N0 相比, 在 LX3 和 NJ48 在 NN 处理下, 地上部干物质质量分别提高 0.74 和 0.58 t/hm², AN 处理分别提高 1.30 和 2.76 t/hm²(图 1-A 和图 1-B); 在孕穗期, 与 N0 相比, LX3 和 NJ48 在 NN 处理下地上部干物质质量分别提高 2.06 和 3.11 t/hm², AN 处理分别提高 4.53 和 4.77 t/hm²(图 1-C 和图 1-D); 成熟期, 与 N0 相比, LX3 和 NJ48 在 NN 处理下地上部干物质质量分别提高 8.44 和 4.84 t/hm², AN 处理分别提高 12.34 和 10.17 t/hm²(图 1-E 和图 1-F)。

灌溉施氮方式对水稻地上部干物质质量的影响随生育期推进而增强。分蘖期, 不同灌溉方式间水稻地上部干物质质量差异不显著(图 1-A 和图 1-B); 在孕穗期, Sh 处理水稻地上部干物质质量平

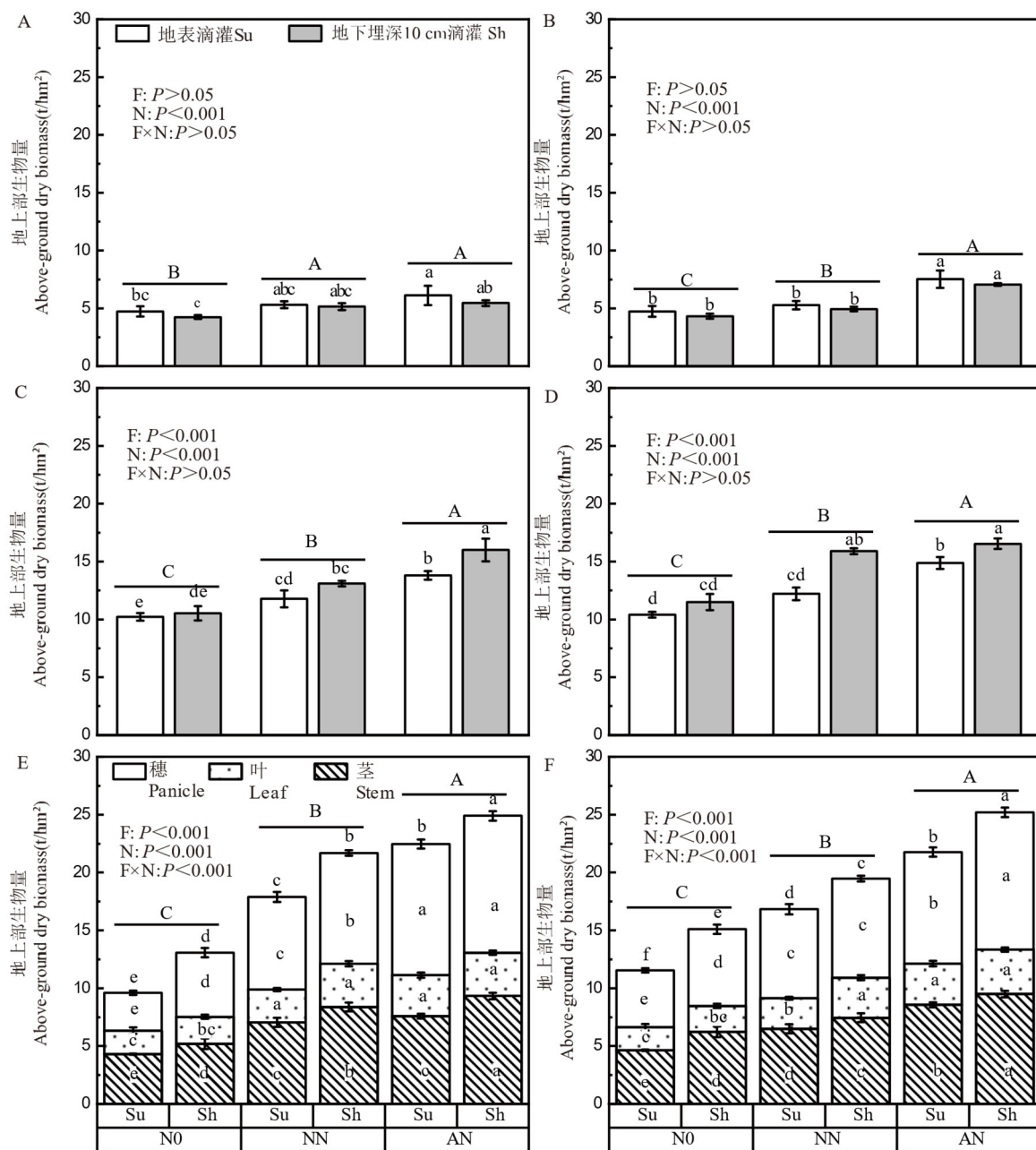
表 2 不同灌溉施肥方式及氮肥形态管理对滴灌水稻产量构成及氮肥农学利用率的影响

Table 2. Effects of fertigation approaches and nitrogen form on yield components and agronomic nitrogen use efficiency of drip-irrigated rice

品种 Cultivar	氮肥形态 Nitrogen form	灌溉施肥方式 Fertigation approach	穗数 Panicle number ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm^2)	氮肥农学 利用率 AEN (kg/kg)
LX3	N0	Su	3.2 $\pm$ 0.3 d	65.4 $\pm$ 0.4 c	58.9 $\pm$ 6.0 c	21.6 $\pm$ 0.2 c	2.7 $\pm$ 0.5 d	
		Sh	3.3 $\pm$ 0.3 d	73.3 $\pm$ 3.1 b	78.7 $\pm$ 2.4 b	23.0 $\pm$ 0.3 c	4.4 $\pm$ 0.4 c	
		平均 Average	3.2 $\pm$ 0.3 B	69.4 $\pm$ 1.8 B	68.8 $\pm$ 4.2 B	22.3 $\pm$ 0.3 B	3.5 $\pm$ 0.3 B	
	NN	Su	3.5 $\pm$ 0.1 cd	75.0 $\pm$ 4.7 b	83.2 $\pm$ 0.9 ab	25.5 $\pm$ 0.7 b	5.6 $\pm$ 0.7 b	9.8 $\pm$ 1.3 a
		Sh	4.0 $\pm$ 0.3 ab	84.5 $\pm$ 2.2 a	89.7 $\pm$ 4.8 a	26.6 $\pm$ 1.8 ab	8.0 $\pm$ 0.7 a	12.0 $\pm$ 1.4 a
		平均 Average	3.7 $\pm$ 0.2 A	79.7 $\pm$ 3.5 A	86.5 $\pm$ 2.8 A	26.1 $\pm$ 0.9 A	6.8 $\pm$ 0.3 A	10.9 $\pm$ 2.2 A
	AN	Su	3.7 $\pm$ 0.1 bc	76.2 $\pm$ 1.0 b	82.5 $\pm$ 2.2 ab	26.3 $\pm$ 0.6 ab	6.2 $\pm$ 0.3 b	11.7 $\pm$ 0.6 a
		Sh	4.2 $\pm$ 0.3 a	85.9 $\pm$ 2.6 a	87.5 $\pm$ 7.2 a	27.8 $\pm$ 1.6 a	8.7 $\pm$ 1.1 a	14.5 $\pm$ 2.1 a
		平均 Average	4.0 $\pm$ 0.2 A	81.1 $\pm$ 1.8 A	85.0 $\pm$ 4.7 A	27.0 $\pm$ 3.1 A	7.5 $\pm$ 2.3 A	13.1 $\pm$ 2.6 A
	方差分析 Analysis of variance							
	氮肥形态 Nitrogen form(N)		**	**	**	**	**	ns
	灌溉施肥方式 Fertigation approach(F)		*	**	**	*	**	ns
	氮肥形态 $\times$ 灌溉施肥方式(N $\times$ F)		ns	ns	*	ns	ns	ns
NJ48	N0	Su	2.6 $\pm$ 0.3 c	108.0 $\pm$ 13.5 b	65.2 $\pm$ 2.6 d	20.0 $\pm$ 0.2 c	3.8 $\pm$ 0.3 d	
		Sh	2.9 $\pm$ 0.3 bc	110.7 $\pm$ 14.9 ab	69.9 $\pm$ 2.7 c	22.6 $\pm$ 0.4 b	5.1 $\pm$ 0.4 c	
		平均 Average	2.9 $\pm$ 0.3 B	109.9 $\pm$ 14.2 B	69.1 $\pm$ 2.7 C	21.3 $\pm$ 0.3 B	4.5 $\pm$ 0.3 C	
	NN	Su	3.3 $\pm$ 0.1 ab	115.1 $\pm$ 10.4 ab	77.1 $\pm$ 0.9 b	23.0 $\pm$ 0.7 b	6.7 $\pm$ 1.0 bc	9.5 $\pm$ 1.9 a
		Sh	3.3 $\pm$ 0.3 ab	115.8 $\pm$ 7.3 ab	79.0 $\pm$ 3.4 b	25.1 $\pm$ 1.8 a	7.5 $\pm$ 1.3 b	7.9 $\pm$ 2.4 a
		平均 Average	3.3 $\pm$ 0.2 A	115.4 $\pm$ 8.9 AB	78.1 $\pm$ 2.1 B	24.1 $\pm$ 1.3 A	7.1 $\pm$ 1.1 B	8.7 $\pm$ 3.2 A
	AN	Su	3.5 $\pm$ 0.1 a	124.1 $\pm$ 9.6 ab	76.2 $\pm$ 0.5 bc	23.3 $\pm$ 0.6 ab	7.6 $\pm$ 0.7 ab	12.7 $\pm$ 1.3 a
		Sh	3.4 $\pm$ 0.1 ab	130.4 $\pm$ 8.3 a	85.7 $\pm$ 0.3 a	24.2 $\pm$ 1.6 ab	9.1 $\pm$ 1.0 a	13.2 $\pm$ 2.0 a
		平均 Average	3.4 $\pm$ 0.1 A	127.2 $\pm$ 8.9 A	80.9 $\pm$ 0.4 A	23.8 $\pm$ 1.1 A	8.4 $\pm$ 1.1 A	13.0 $\pm$ 2.4 A
	方差分析 Analysis of variance							
	氮肥形态 Nitrogen form (N)		*	*	**	*	**	ns
	灌溉施肥方式 Fertigation approach(F)		ns	ns	**	*	*	ns
	氮肥形态 $\times$ 灌溉施肥方式(N $\times$ F)		ns	ns	*	ns	ns	ns

数据为平均值 $\pm$ 标准差($n = 3$)。同一品种内, 同列数据采用双因素方差分析(氮肥形态 $\times$ 灌溉施肥方式)检验各因素及其交互作用的效应。主效应比较基于模型估计的边际均值进行, 不同大写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上氮肥形态主效应差异显著(Tukey's HSD 检验)。对于处理组间的比较, 将不同处理组($F \times N$)视为单一因素, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行检验, 并使用 Tukey's HSD 方法进行多重比较。不同小写字母表示处理组间差异显著($P < 0.05$)。氮肥形态管理包括 N0(不施氮处理, 施 N 用量为 $0 \text{ kg}/\text{hm}^2$)、NN(施硝酸钙, 施 N 用量为 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$)、AN[施硫酸铵+DMPP, 施 N 用量为 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$]。灌溉施肥方式包括 Su(地表滴灌施肥)、Sh(地下埋深 10 cm 滴灌施肥)。F 表示施肥方式, N 表示氮肥形态管理, $F \times N$ 表示两者间的交互作用。LX3: 粮香 3 号; NJ48: 宁梗 48。*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著, ns 表示不显著。下同。

Values are presented as mean $\pm$ standard deviation (SD) ($n = 3$). For a given variety, a two-way analysis of variance (ANOVA) was conducted to evaluate the effects of nitrogen form management practices (N), fertilization method (F), and their interaction ($F \times N$). Main effects were compared based on estimated marginal means, and different uppercase letters indicate significant differences in the main effect of nitrogen form management practices at $P < 0.05$ (Tukey's HSD test). For comparisons among treatment combinations, all treatments ($F \times N$) were considered as a single factor and analyzed using one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. Nitrogen form management practices included N0 (no nitrogen application, $0 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$), NN (calcium nitrate, $300 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$), and AN (ammonium sulfate with DMPP nitrification inhibitor, 300 kg hm^{-2}). Fertilization methods included Su (surface drip fertigation) and Sh (subsurface drip fertigation at a depth of 10 cm). F represents fertilization method, N represents nitrogen form management practices, and $F \times N$ represents their interaction. LX3, Liangxiang 3; NJ48, Ningjing 48; * and ** indicate significance at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively, while ns indicates no significant difference. The same below.



A、B 为分蘖期，C、D 为孕穗期，E、F 为成熟期；A、C、E 分别代表品种 LX3 的地上部生物量，B、D、F 分别代表品种 NJ48 的地上部生物量。数据以平均值±标准误(SE)表示($n = 3$)，误差棒表示标准误(SE)。采用双因素方差分析(氮肥形态×灌溉施肥方式)检验各因素及其交互作用的效应。主效应比较基于模型估计的边际均值进行。不同大写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上氮肥形态主效应差异显著(Tukey's HSD 检验)。对于处理组间的比较，将不同处理组($F \times N$)视为单一因素，采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行检验，并使用 Tukey's HSD 方法进行多重比较。不同小写字母表示处理组间差异显著($P < 0.05$)。氮肥形态包括 N0(不施氮处理，施 N 用量为 0 kg/hm²)、NN(施硝酸钙，施 N 用量为 300 kg/hm²)、AN(施硫酸铵+DMPP，施 N 用量为 300 kg/hm²)。灌溉施肥方式为：Su(地表滴灌施肥)、Sh(地下埋深 10 cm 滴灌施肥)。F 表示灌溉施肥方式，N 表示氮肥形态， $F \times N$ 表示两者间的交互作用。下同。

A and B represent the tillering stage; C and D represent the booting stage; E and F represent the maturity stage. A, C and E show the aboveground biomass of variety LX3, while B, D and F show that of NJ48. Data are presented as mean $\pm$ standard error (SE) ($n = 3$), and error bars represent standard errors (SE). A two-way analysis of variance (ANOVA) was conducted to evaluate the effects of nitrogen form management practices (N), fertilization method (F), and their interaction ($F \times N$). Main effects were compared based on estimated marginal means, and different uppercase letters indicate significant differences in the main effect of nitrogen form management practices at $P < 0.05$ (Tukey's HSD test). For comparisons among treatment combinations, all treatments ($F \times N$) were considered as a single factor and analyzed using one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. Nitrogen form management practices included N0 (no nitrogen application, 0 kg/hm²), NN (calcium nitrate, 300 kg/hm²), and AN (ammonium sulfate + DMPP, 300 kg/hm²). Fertilization methods included Su (surface drip fertigation) and Sh (subsurface drip fertigation at a depth of 10 cm). F represents fertigation method, N represents nitrogen form, and $F \times N$ represents their interaction. The same below.

图 1 不同施肥方式及氮肥形态对滴灌水稻地上部生物量的影响

Fig. 1. Effects of different fertigation approaches and nitrogen form management practices on aboveground biomass of drip-irrigated rice

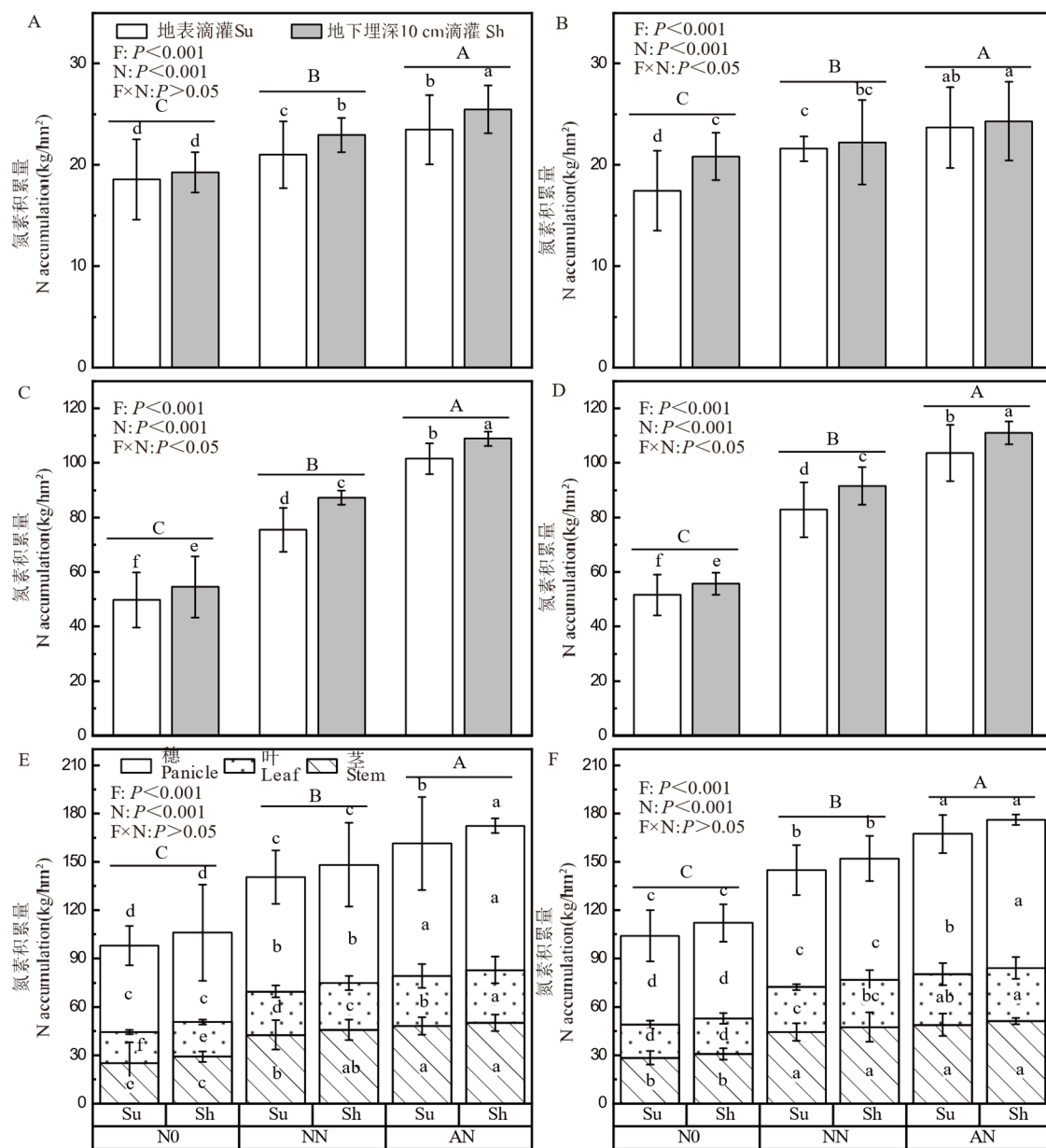
均值较 Su 增加 1.71 t/hm², 且差异达到显著水平(图 1-C 和图 1-D); 在成熟期, Sh 处理水稻地上部干物质质量平均值较 Su 增加 3.23 t/hm², 且差异达到显著水平(图 1-E 和图 1-F)。

在孕穗期, 灌溉施氮方式与氮肥形态对 NJ48 干物质积累量存在显著的交互影响, 但对 LX3 干物质积累量没有显著的交互影响(图 1-C 和图 1-D); 在成熟期, 灌溉施氮方式与氮肥形态存在显

著的交互效应, 其中 Sh_AN 处理组合的干物质量在两个品种中均达到最高值(图 1-E 和图 1-F)。

2.2.2 水稻氮积累量

氮肥形态对水稻各生育期地上部氮积累量均产生显著影响, 在分蘖期, 与 N0 相比, LX3 和 NJ48 在 NN 处理下地上部氮积累量分别提高 3.07 kg/hm²和 2.79 kg/hm², AN 处理下分别提高 5.56 kg/hm²和 4.87 kg/hm²(图 2-A 和图 2-B); 在孕穗



A、B 为分蘖期, C、D 为孕穗期, E、F 为成熟期; A、C、E 分别代表品种 LX3 的地上部氮积累量, B、D、F 分别代表品种 NJ48 的地上部氮积累量。试验处理、数据表示方法及误差棒含义同图 1。

A and B represent the tillering stage; C and D correspond to the booting stage; E and F show the maturity stage; A, C and E depict the nitrogen accumulation of variety LX3, and B, D and F depict that of NJ48. Treatment abbreviations, data presentation, and error bar conventions are as described in Fig. 1.

图 2 不同施肥方式和氮肥形态对滴灌水稻氮积累量的影响

Fig. 2. Effects of different fertigation approaches and nitrogen form management practices on nitrogen accumulation of drip-irrigated rice

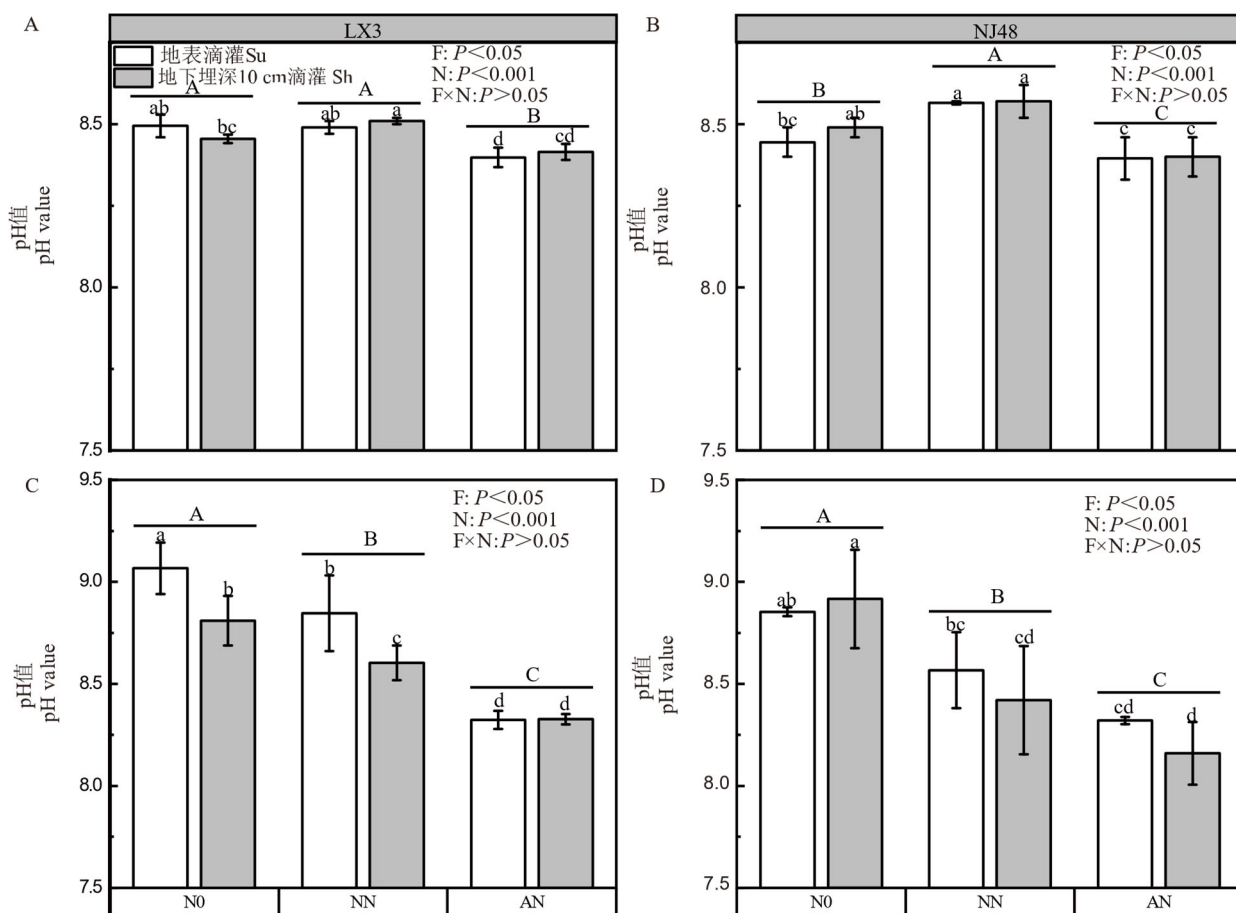


图 3 不同施肥方式及氮肥形态管理对滴灌水稻根际土壤 pH 值的影响
 Fig. 3. Effects of different fertigation approaches and nitrogen form management practices on rhizosphere soil pH values in drip-irrigated rice

A and B represent the rhizosphere soil pH at the tillering stage; C and D represent the booting stage; A and C correspond to variety LX3; B and D correspond to NJ48. Treatment abbreviations, data presentation, and error bar conventions are as described in Fig. 1.

图 3 不同施肥方式及氮肥形态管理对滴灌水稻根际土壤 pH 值的影响

Fig. 3. Effects of different fertigation approaches and nitrogen form management practices on rhizosphere soil pH values in drip-irrigated rice

期, 与 N0 相比, LX3 和 NJ48 在 NN 处理下地上部氮积累量分别提高 29.20 kg/hm² 和 33.57 kg/hm², AN 处理下分别提高 53.11 kg/hm² 和 53.66 kg/hm² (图 2-C 和图 2-D); 在成熟期, 与 N0 相比, LX3 和 NJ48 在 NN 处理下地上部氮积累量分别提高 42.25 kg/hm² 和 40.30 kg/hm², AN 处理下分别提高 64.93 和 63.65 kg/hm² (图 2-E 和图 2-F)。

施氮方式对水稻地上部氮积累量的影响在不同生育期表现不同。灌溉施氮方式对氮积累量的影响在孕穗期最为显著, Sh 处理显著高于 Su 处理。至成熟期, 灌溉施氮方式的主效应不显著, 但品种 LX3 在 AN 处理下, Sh 的氮积累量仍显著高于 Su。交互效应分析表明, 在分蘖期(NJ48)和孕穗期(LX3 和 NJ48), 灌溉施氮方式与氮肥形态对氮积累量存在显著交互作用, Sh_AN 组合的氮积累量最高。

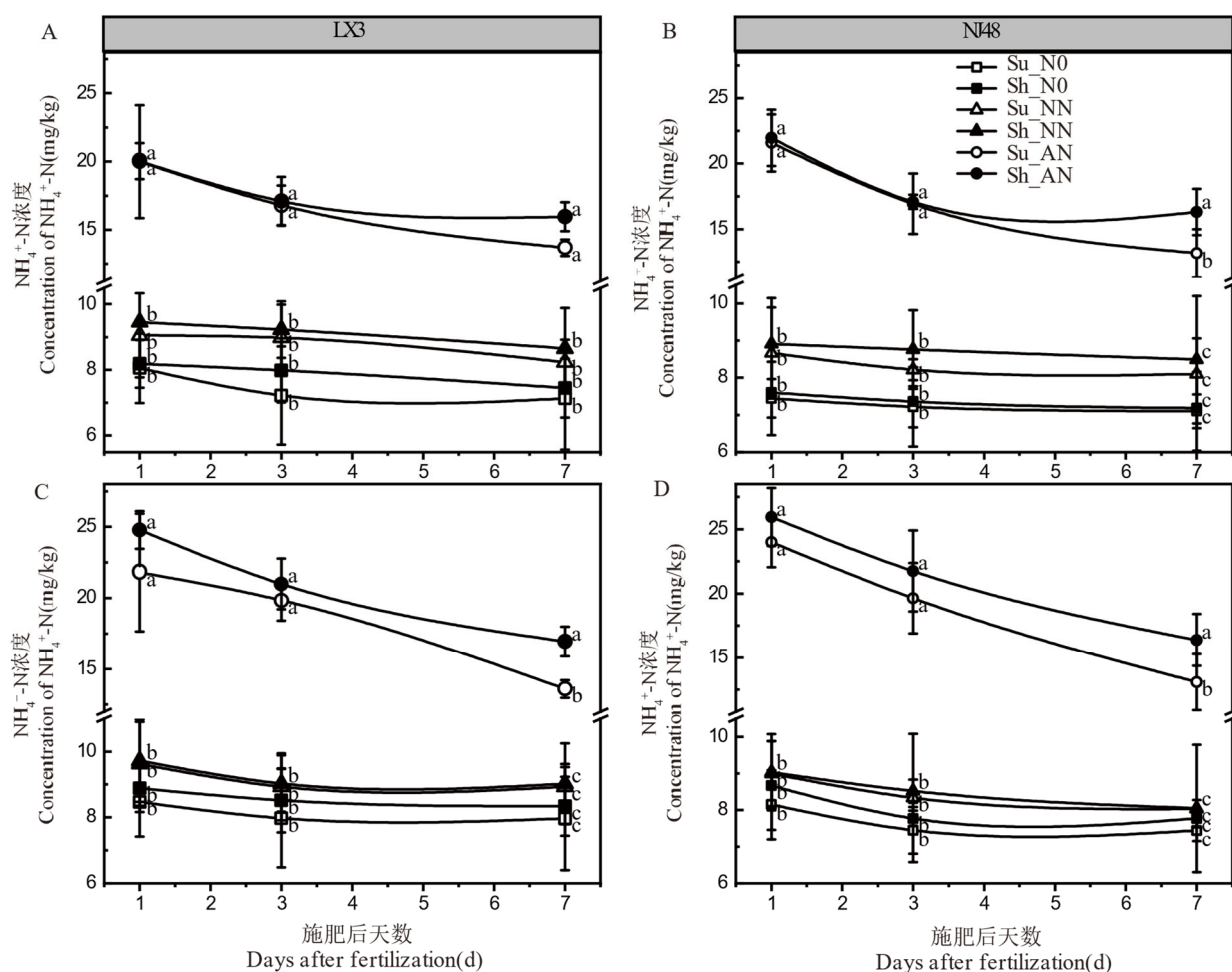
2.3 根际土壤环境变化

2.3.1 水稻根际土 pH 值变化

氮肥形态显著调控根际土壤 pH 值 (图 3)。在三个生育期内, 与 N0 相比, NN 处理提高了根际土壤 pH, 而 AN 处理则降低了根际土壤 pH。灌溉施氮方式对根际土壤 pH 的影响因品种和生育期而异: 总体来看, Sh 处理的根际土壤 pH 普遍低于 Su 处理; 在分蘖期的 AN 处理下, LX3 品种 Sh 处理的根际土壤 pH 显著低于 Su 处理。灌溉施氮方式与氮肥形态的交互效应在两个生育期对根际土壤 pH 的影响均不显著。

2.3.2 水稻根际土壤 NH₄⁺-N 含量和 NO₃⁻-N 含量变化

不同氮肥形态塑造了迥异的根际无机氮动态 (图 4, 图 5)。AN 处理显著提高了根际土壤 NH₄⁺-N 含量, 且其高含量维持时间更长; 在同一氮肥形



A、B 为分蘖期；C、D 为孕穗期；A、C 分别代表品种 LX3 的根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量；B、D 分别代表品种 NJ48 的根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。试验处理及误差棒含义同图 1。

A and B represent the rhizosphere soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content at the tillering stage; C and D represent the booting stage; A and C correspond to variety LX3; B and D correspond to NJ48. Treatment abbreviations and error bar conventions are as described in Fig. 1.

图 4 不同施肥方式和氮肥形态管理对滴灌水稻根际土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 含量变化的影响

Fig. 4. Effects of different fertigation approaches and nitrogen form management practices on changes in ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) content in rhizosphere soil of drip-irrigated rice

态下, Sh 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量总体高于 Su, 尤其是在 AN 处理下; 施肥后 7 d, Sh_AN 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均含量较 Su_AN 高约 2.27~3.35 mg/kg, 差异达到显著水平, 表明地下滴灌有助于土壤更好的保持铵态氮环境, 提高了其在根际的滞留时间(图 4)。

氮肥形态同样对水稻根际土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量表现出一定的影响(图 5)。NN 处理显著提高了根际土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。同一氮肥形态下, Su 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量普遍高于 Sh 处理。在不同处理组合中, Su_NN 组合的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量通常最高(图 5)。

2.4 根际土壤氮转化关键过程

2.4.1 水稻根际土壤氮初级硝化速率变化

氮肥形态对根际土壤初级硝化速率有显著影响。NN 处理土壤硝化速率最高, AN 处理次之, N0 最低(图 6)。在分蘖期, Su 处理的硝化速率略高

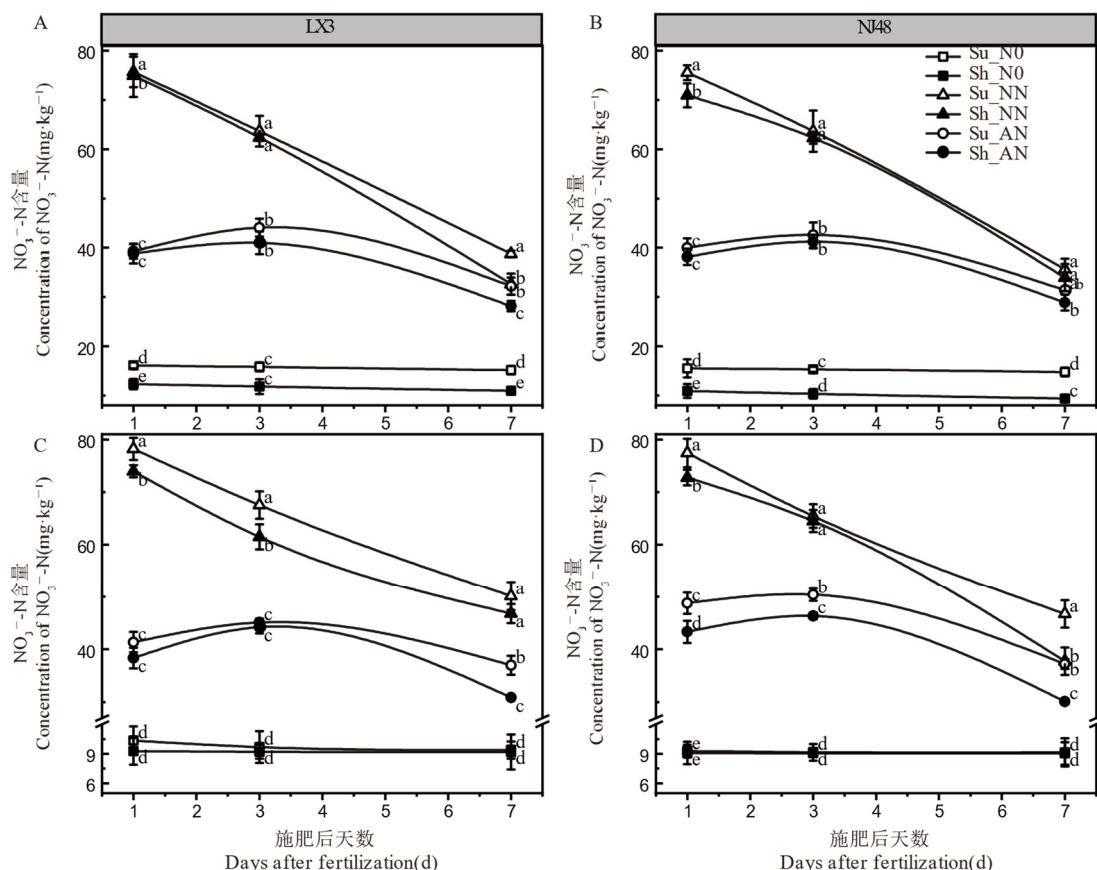
于 Sh 处理, 且该效应在 LX3 中达到显著水平。交互分析显示, 在 NN 条件下, Su_NN 处理的硝化速率总体高于 Sh_NN 处理(图 6)。

2.4.2 水稻根际土壤反硝化势变化

本研究以 N_2O 和 N_2 排放速率之和表征土壤反硝化势。反硝化势同样受氮肥形态管理显著调控, NN 处理的反硝化势最高(图 7), 其次是 AN 处理, N0 最低。灌溉施肥方式对反硝化势的影响较微弱且不稳定, 仅在 LX3 分蘖期观察到 Su 处理显著高于 Sh 处理。施氮方式与氮肥形态管理的交互效应对土壤反硝化势的影响没有达到显著水平(图 7)。

2.5 土壤氮供应与转化过程指标与滴灌水稻产量和氮利用效率的关联分析

为评估土壤氮供应与转化过程指标与滴灌水稻产量/氮肥农学利用效率(AEN)间的统计关联,



A、B 为分蘖期; C、D 为孕穗期; A、C 分别代表品种 LX3 的根际土壤 NO_3^- -N 含量; B、D 分别代表品种 NJ48 的根际土壤 NO_3^- -N 含量。试验处理及误差棒含义同图 1。

A and B represent the rhizosphere soil NO_3^- -N content at the tillering stage; C and D represent the booting stage; A and C correspond to variety LX3; B and D correspond to NJ48. Treatment abbreviations and error bar conventions are as described in Fig. 1.

图 5 不同施肥方式和氮肥形态管理对滴灌水稻根际土壤硝态氮 (NO_3^- -N) 含量变化的影响

Fig. 5. Effects of different fertigation approaches and nitrogen form management practices on changes in nitrate nitrogen (NO_3^- -N) content in rhizosphere soil of drip-irrigated rice

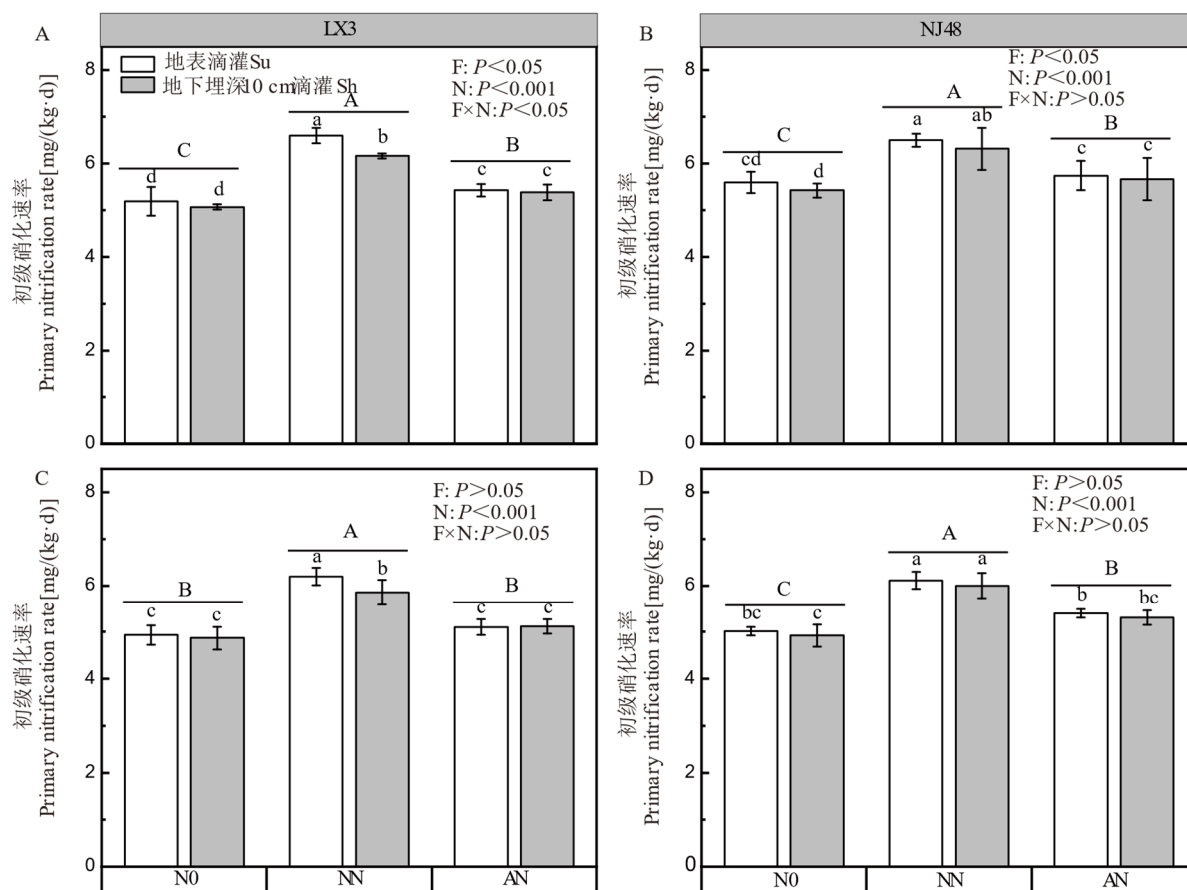
本研究基于重复水平数据开展 Spearman 相关分析(双尾检验)。Spearman 相关分析结果表明, 滴灌水稻产量与植株氮积累量及地上部干物质均显著正相关(表 3)。在土壤供给端指标中, 孕穗期根际土壤 NO_3^- -AUC 与水稻产量在两个品种中均显著正相关, 在分蘖期, 两者间的正相关关系仅在 LX3 品种下达到显著水平。在土壤过程指标中, 根际土壤反硝化势与水稻产量在两个品种中均显著正相关, 而根际土壤 pH 与产量的相关性总体不显著。LX3 在分蘖期与孕穗期时 AEN 与土壤 pH 呈显著负相关, 其余指标与 AEN 的相关性均未达到显著水平($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 滴灌施肥位置对水稻根际微环境及氮转化的调控机制

本研究发现, 地下 10 cm 滴灌施肥(Sh)相较于地表滴灌施肥(Su)显著提高了水稻根际铵态氮

(NH_4^+ -N)的滞留时间(分蘖期 Sh 处理 NH_4^+ -N 含量较 Su 提高 10.7%~11.2%), 且在施肥后 7 d 内维持了较高的 NH_4^+ -N 含量水平(图 4)。该结果表明, 滴灌施肥位置作为重要的水分调控因子, 显著影响了土壤中不同形态氮素的时空分布特征。已有研究指出, 地下滴灌形成的垂直湿润峰能够限制土壤孔隙中氧气的扩散速率, 使根际溶解氧含量显著低于地表滴灌条件^[24,37], 从而改变根际氧化还原环境。在本研究中, Sh 处理下根际 NH_4^+ -N 的持续积累, 伴随着初级硝化速率的降低(图 6), 表明低溶氧环境对硝化过程产生了明显抑制作用。土壤氮的硝化过程依赖于好氧条件, 其关键功能菌(如 *Nitrosomonas*)对氧分压变化高度敏感, 当根际溶氧水平下降时, 氨单加氧酶(AMO)活性受限, 进而抑制 NH_4^+ 向 NO_3^- 的转化^[38-39]。可见, Sh 处理可能通过减缓土壤氧气补给、降低根际 Eh 值, 为土壤中 NH_4^+ -N 的滞留创造了更为有利的微环境条件。



A、B 为分蘖期；C、D 为孕穗期；A、C 分别代表品种 LX3 的根际土壤氮初级硝化速率；B、D 分别代表品种 NJ48 的根际土壤氮初级硝化速率。试验处理、数据表示方法及误差棒含义同图 1。

A and B represent the rhizosphere soil primary nitrification rate at the tillering stage; C and D represent the booting stage; A and C correspond to variety LX3; B and D correspond to NJ48. Treatment abbreviations, data presentation, and error bar conventions are as described in Fig. 1.

图 6 不同施肥方式和氮肥形态管理对滴灌水稻根际土壤氮初级硝化速率的影响

Fig.6. Effects of different fertigation approaches and nitrogen form management practices on the primary nitrogen nitrification rates in rhizosphere soil of drip-irrigated rice

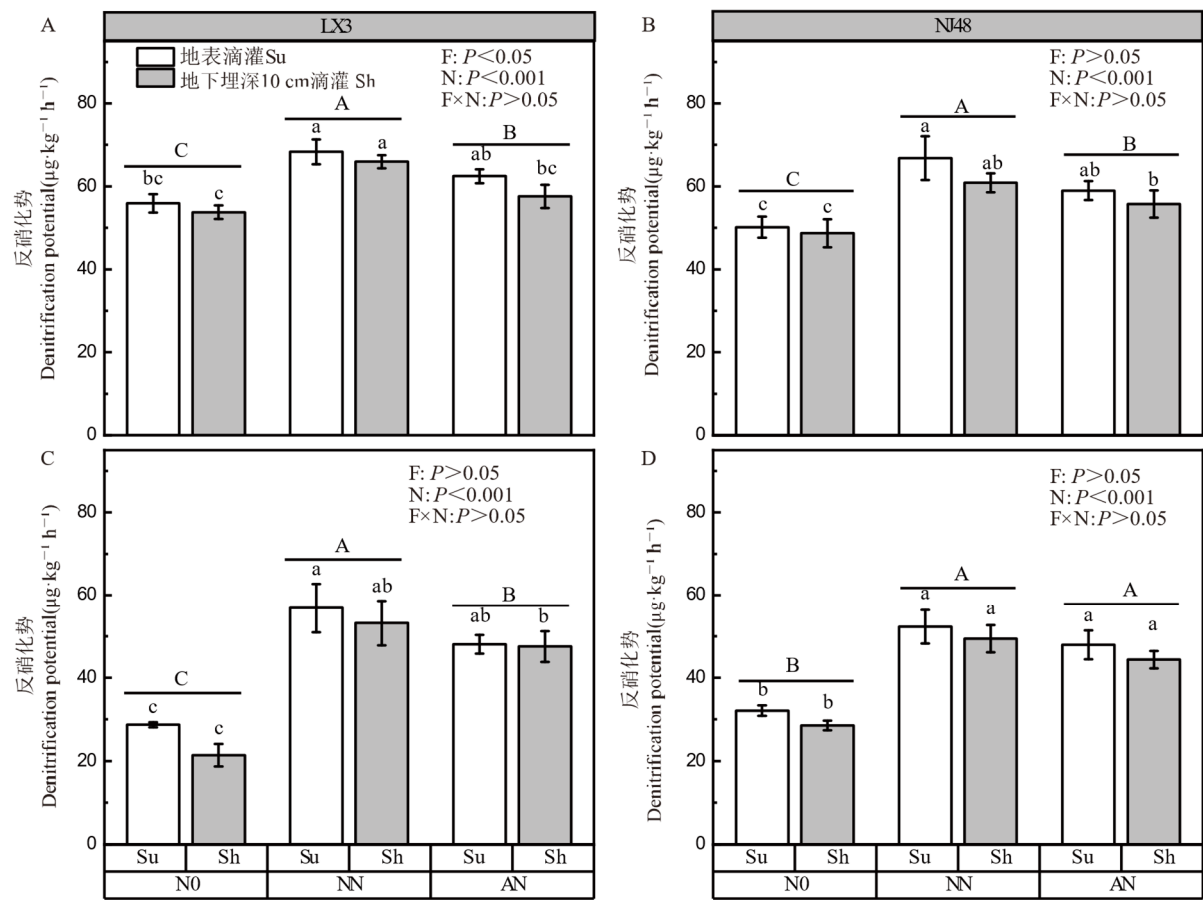
从主效应角度分析，施肥方式可能主要通过调控根际溶解氧含量进而影响土壤氮转化过程，其作用在铵态氮稳定化管理(AN)处理条件下表现得尤为明显。交互效应分析进一步表明，Sh 与 AN 的结合显著增强对硝化过程的抑制，使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在根际的有效供应期明显延长(图4、图6)。可见，滴灌条件下通过调控施肥位置与氮肥形态管理相互耦合，可以通过影响水稻根际微环境进而调控土壤氮转化路径。Sh 处理在延缓 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化的同时，还导致根际土壤 pH 呈现一定的下降趋势(图3)。尽管本研究中不同施氮组合处理根际土壤 pH 变化幅度较小，但长期施肥尺度下，根际 pH 的变化对根际微生物群落结构及与土壤氮转化功能的影响仍需进一步关注。

3.2 水稻氮代谢及产量形成对氮肥形态管理的差异响应

本研究结果显示，与硝态氮(NN)相比，铵态氮稳定化管理处理(AN)显著提高了水稻各生育期

的干物质积累和氮积累量(图 1~2)，并最终表现为更高的产量水平(表 2)。这一结果与水稻“喜铵”的营养特性相一致^[21, 40]。此外，从根际土壤氮转化过程来看，AN 处理显著降低了土壤初级硝化速率和反硝化势(图 6、图 7)，减少了 NO_3^- 的生成，有利于维持土壤中较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水平；同时， NH_4^+ 可通过土壤胶体吸附作用增强其在耕层中的稳定性，从而降低淋溶损失风险。相比之下，NN 处理在根际土壤中迅速形成较高的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度(图 5)，显著提高了初级硝化速率和反硝化势(图 6、图 7)。虽然硝态氮在部分生育阶段可能对结实率和千粒重产生一定促进作用，但其较强的土壤迁移性容易导致土壤 NO_3^- 淋洗损失，同时较高浓度的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 更易通过反硝化途径造成氮素的气态损失，从而整体降低土壤氮生物有效性和水稻氮肥利用效率。

从主效应角度分析，氮肥处理是调控根际氮转化强度的决定性因素，从交互效应角度看，其



A、B 为分蘖期；C、D 为孕穗期；A、C 分别代表品种 LX3 的根际土壤氮反硝化势；B、D 分别代表品种 NJ48 的根际土壤氮反硝化势。试验处理、数据表示方法及误差棒含义同图 1。

A and B represent the rhizosphere soil denitrification potential at the tillering stage; C and D represent the booting stage; A and C correspond to variety LX3; B and D correspond to NJ48. Treatment abbreviations, data presentation, and error bar conventions are as described in Fig. 1.

图 7 不同施肥方式和氮肥形态管理对滴灌水稻根际土壤氮反硝化势的影响

Fig. 7. Effects of different N application methods and nitrogen form management practices on the denitrification potential in rhizosphere soil of drip-irrigated rice

表 3 滴灌水稻根际土壤氮供应与转化过程指标与产量及氮肥农学利用率 (AEN) 的 Spearman 相关性分析

Table 3. Spearman correlation of rhizosphere soil nitrogen supply and transformation indicators with rice yield and agronomic efficiency of nitrogen(AEN) in drip-irrigated rice

指标 Indicator	生育期 Growth duration	品种 Variety	产量 Yield	氮肥农学 利用率 AEN	NO ₃ ⁻ AUC	NH ₄ ⁺ AUC	pH 值 pH value	硝化速率 Nitrogen nitrification rate	反硝化势 Denitrification potential	氮积累量 Nitrogen accumulation	干物质 Dry matter weight
产量 Yield	分蘖期 Tillering	LX3	1.000		0.482*	0.777**	-0.430	0.498*	0.373	0.866**	0.575*
	孕穗期 Booting	NJ48	1.000		0.428	0.822**	-0.239	0.337	0.319	0.884**	0.620**
	分蘖期 Tillering	LX3	1.000		0.503*	0.692**	-0.445	0.420	0.637**	0.878**	0.839**
	孕穗期 Booting	NJ48	1.000		0.742**	0.437	-0.355	0.412	0.490*	0.893**	0.849**
氮肥农学 利用率 AEN	分蘖期 Tillering	LX3		1.000	-0.455	0.441	-0.629*	-0.434	-0.350	0.448	0.168
	孕穗期 Booting	NJ48		1.000	-0.315	0.483	-0.252	-0.364	-0.154	0.462	0.294
	分蘖期 Tillering	LX3		1.000	-0.378	0.322	-0.601*	-0.308	0.196	0.566	0.469
	孕穗期 Booting	NJ48		1.000	0.427	-0.392	-0.284	-0.420	-0.133	0.455	0.210

相关系数为 Spearman 秩相关系数(双尾检验)。*, ** 分别表示 P<0.05、P<0.01 水平上差异显著。土壤 NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 的动态变化采用施肥后 1~7 d 的曲线下面积(AUC)进行综合表征, NO₃⁻_AUC、NH₄⁺_AUC 分别指根际土壤 NO₃⁻-N 与 NH₄⁺-N 含量在施肥后 1~7 d 的累积指标。

Correlation coefficients are Spearman's rank correlation coefficients (two-tailed test). *, ** indicate significance at P<0.05, and P<0.01, respectively. The dynamics of soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N were comprehensively characterized by the area under the curve (AUC) over 1~7 days after fertilization. NO₃⁻_AUC and NH₄⁺_AUC represent the cumulative contents of NO₃⁻-N and NH₄⁺-N in rhizosphere soil during 1~7 days after fertilization.

效应大小明显受到滴灌施肥位置的调节。在 Sh 条件下, AN 处理对硝化和反硝化的抑制效应被进一步放大,说明水分和根际溶解氧含量的改变可强化氮肥形态管理对根际氮转化的调控作用,是滴灌稻作体系中实现氮素高效利用的重要机制基础。

3.3 水氮耦合对滴灌水稻产量构成的协同增效效应

综合分析表明,滴灌施肥位置与氮肥处理的耦合,对水稻根际微环境、氮转化过程及产量形成具有显著的协同调控效应。Sh+AN 处理在两个品种中均获得最高产量,其增产幅度显著高于单一因素调控下的处理组合(表 2)。从根际环境调控机制来看,Sh 处理可能通过降低水稻根际溶氧水平,进而抑制土壤氮的硝化过程并延缓 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化;AN 处理则通过铵态氮配施硝化抑制剂形成相对稳定的氮素供应环境,有利于维持较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水平,从而增强水稻根系对氮素的直接吸收能力^[35]。二者耦合后,不仅延长了水稻根际有效氮的供应期,还可通过降低土壤氮的硝化-反硝化损失风险,使更多氮素保持在土壤中以供水稻吸收(图 2),进而促进干物质形成和产量提升。相关分析结果进一步表明,孕穗期根际 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 动态、反硝化势及植株氮积累量与产量之间存在显著统计关联(图 7),说明根际氮转化过程通过影响土壤氮供给强度和持续性,间接促进了滴灌水稻产量的形成。总体而言,滴灌水稻系统中,灌溉方式与氮肥处理并非孤立发挥作用,而是通过共同塑造了水稻根际微环境格局,协同调控土壤氮转化路径与效率,从而决定了滴灌水稻氮素利用水平和产量的形成。

4 结论

水稻地下 10 cm 滴灌结合铵态氮稳定化管理(Sh+AN)有利于维持土壤中较高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水平,延缓 NH_4^+ 向 NO_3^- 的转化过程,从而在水稻根际形成相对稳定的氮素供应环境。该处理显著提高了水稻氮积累量和干物质积累,促进滴灌水稻产量形成,可以作为干旱区滴灌水稻兼顾产量提升和氮素损失控制的优化施肥选择。未来研究有必要对根际微环境变化驱动根际微生物介导的 N 周转进行探究。

参考文献:

[1] Lai Z, Fan J, Yang R, Xu X, Liu L, Li S, Zhang F, Li Z.

- Interactive effects of plant density and nitrogen rate on grain yield, economic benefit, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-fertigated maize in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263: 107453.
- [2] 张文强. 新疆水稻水足迹及其预测分析[J]. 南方农业, 2023, 17(18): 46-48.
- Zhang W Q. Water footprint of rice and its prediction analysis in Xinjiang[J]. *South China Agriculture*, 2023, 17(18): 46-48. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郭庆人, 陈林. 水稻膜下滴灌栽培技术在我国发展的优势及前景分析[J]. 中国稻米, 2012, 18(4): 36-39.
- Guo Q R, Chen L. Advantages and prospects of rice drip irrigation under plastic film in China[J]. *China Rice*, 2012, 18(4): 36-39. (in Chinese with English abstract)
- [4] Li J, Yang C, Zhang X, Wu S, Chi H, Zhang X, Wei C. Soil nitrogen distribution affects nitrogen utilization and yield of drip-irrigated rice[J]. *Agronomy*, 2024, 14(3): 593.
- [5] 从夕汉, 施伏芝, 阮新民, 罗玉祥, 马廷臣, 罗志祥. 氮肥水平对不同基因型水稻氮素利用率、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1219-1226.
- Cong X H, Shi F Z, Ruan X M, Luo Y X, Ma T C, Luo Z X. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen use efficiency and grain yield and quality of different rice varieties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1219-1226. (in Chinese with English abstract)
- [6] 葛鑫, 戴其根, 霍中洋, 孟立明, 许轲. 农田氮素流失对环境的污染现状及防治对策[J]. 环境科学与技术, 2003, 26(6): 53-54, 57-67.
- Ge X, Dai Q G, Huo Z Y, Meng L M, Xu K. Countermeasures to curb pollution due to nitrogen loss in farmland[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 26(6): 53-54, 57-67. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨昌南, 李娟娟, 程李洋, 李小燕, 李晓东, 由纪蓉, 张新疆, 危常州. 深层根系减少及氮利用不足引发常规滴灌和氮肥量下水稻颖花退化[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(12): 2415-2430.
- Yang C N, Li J J, Cheng L Y, Li X Y, Li X D, You J R, Zhang X J, Wei C Z. Insufficient deep-root growth and nitrogen utilization under conventional drip irrigation and nitrogen application rates causes spikelet degeneration in rice [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(12): 2415-2430. (in Chinese with English abstract)
- [8] 习金根, 周建斌, 赵满兴, 陈竹君. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 337-342.
- Xi J G, Zhou J B, Zhao M X, Chen Z J. Leaching and transforming characteristics of different nitrogen fertilizers added by fertigation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2004, 10(4): 337-342. (in Chinese with English abstract)
- [9] 吴蕴玉, 张展羽, 郝树荣, 陈文猛, 潘永春, 郑成鑫. 不同灌溉模式稻田氮素淋失特征[J]. 节水灌溉, 2019(3): 71-75, 81.
- Wu Y Y, Zhang Z Y, Hao S R, Chen W M, Pan Y C, Zheng C X. Nitrogen leaching losses from paddy fields under

- different irrigation modes[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(3): 71-75, 81. (in Chinese with English abstract)
- [10] 谢诗猛, 刘登峰, 刘慧, 胡宏昌, 董志强, 王天赐, 明广辉. 气候变化影响下澜湄流域下游水稻生产用水量模拟与分析[J]. *人民珠江*, 2024, 45(1): 13-33.
Xie S M, Liu D F, Liu H, Hu H C, Dong Z Q, Wang T C, Ming G H. Simulation and analysis of water consumption for rice production in downstream Lancang-Mekong river basin under the influence of climate change[J]. *Pearl River*, 2024, 45(1): 13-33. (in Chinese with English abstract)
- [11] Wan Y, Ju X, Ingwersen J, Schwarz U, Stange C F, Zhang F, Streck T. Gross nitrogen transformations and related nitrous oxide emissions in an intensively used calcareous soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 102-112.
- [12] Lin D X, Fan X H, Hu F, Zhao H T, Luo J F. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake Region, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 639-645.
- [13] Van Groenigen J W, Velthof G L, Oenema O, Van Groenigen K J, Van Kessel C. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: A case study for arable crops[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(6): 903-913.
- [14] Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, Fixen P E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 133(3/4): 247-266.
- [15] Loick N, Dixon E R, Abalos D, Vallejo A, Matthews G P, McGeough K L, Well R, Watson C J, Laughlin R J, Cardenas L M. Denitrification as a source of nitric oxide emissions from incubated soil cores from a UK grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 1-7.
- [16] Tang Z, Liu X, Li G, Liu X. Mechanism of biochar on nitrification and denitrification to N₂O emissions based on isotope characteristic values[J]. *Environmental Research*, 2022, 212: 113219.
- [17] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 水稻对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. *中国水稻科学*, 1998, 12(4): 249-252.
He W S, Li S X, Li H T. Characteristics of ammonium and nitrate uptake in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998, 12(4): 249-252. (in Chinese with English abstract)
- [18] 胡君利, 林先贵, 褚海燕, 尹睿, 王俊华, 张华勇, 曹志洪, 胡正义. 古水稻土与现代水稻土的供氮差异及其氮肥效应[J]. *土壤学报*, 2007, 44 (03): 556-560.
Hu J L, Lin X G, Chu H Y, Yin R, Wang J H, Zhang H Y, Cao Z H, Hu Z Y. Different nitrogen supply capacities and nitrogenous fertilizer efficiencies in ancient and present paddy soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (03): 556-560. (in Chinese with English abstract)
- [19] 狄廷均, 朱毅勇, 仇美华, 阚建鸾, 张晓曼, 徐国华, 沈其荣. 水稻根系细胞膜 H⁺-ATPase 对铵硝营养的响应差异[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(4): 360-366.
Di T J, Zhu Y Y, Qiu M H, Kan J L, Zhang X M, Xu G H, Shen Q R. Response of plasma membrane H⁺-ATPase of rice root to ammonium and nitrate nutrition[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(4): 360-366. (in Chinese with English abstract)
- [20] 徐晓鹏, 傅向东, 廖红. 植物铵态氮同化及其调控机制的研究进展[J]. *植物学报*, 2016, 51(2): 152-166.
Xu X P, Fu X D, Liao H. Advances in study of ammonium assimilation and its regulatory mechanism in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2016, 51(2): 152-166. (in Chinese with English abstract)
- [21] 宋付朋, 张民, 史衍玺, 胡莹莹. 控释氮肥的氮素释放特征及其对水稻的增产效应[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 619-627.
Song F P, Zhang M, Shi Y X, Hu Y Y. Releasing characteristics of controlled-release nitrogen fertilizer and its effects on rice yield[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 619-627. (in Chinese with English abstract)
- [22] 马慧婷, 李京芳, 刘菲, 陈亮. 土壤中氨氮与典型抗生素的吸附-解吸相互作用特征研究[J]. *岩矿测试*, 2025, 44(5): 911-925.
Ma H T, Li J F, Liu F, Chen L. Adsorption-desorption interaction characteristics of ammonium nitrogen and typical antibiotics in soil[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2025, 44(5): 911-925. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 郑纪慈. 稻田土壤中 N 的渗漏损失研究[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(S1): 62-66.
Wang J Y, Wang S J, Chen Y, Zheng J C. Leaching loss of nitrogen in rice field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(S1): 62-66. (in Chinese)
- [24] 冯冰聪, 马杰, 刘勇, 张潇雨, 陈雅丽, 翁莉萍. 氮素在农田土壤中迁移转化的研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(2): 277-287.
Feng B C, Ma J, Liu Y, Zhang X Y, Chen Y L, Weng L P. Research progress of nitrogen transport and transformation in farmland soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(2): 277-287. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘杨, 周静, 梁晴, 张鑫. 灌溉方式与秸秆还田对小麦产量及水氮利用效率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2025(4): 138-150.
Liu Y, Zhou J, Liang Q, Zhang X. Effects of different irrigation methods and straw incorporation on winter wheat yield and water and nitrogen use efficiency[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2025(4): 138-150. (in Chinese with English abstract)
- [26] 邵继承, 李锐, 杨恒山, 张玉芹, 张瑞富. 浅埋滴灌条件下优化施氮对西辽河平原春玉米田碳、氮足迹的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 278-284, 292.
Tai J C, Li R, Yang H S, Zhang Y Q, Zhang R F. Effects of optimal nitrogen application on carbon and nitrogen footprints of spring maize fields under shallow buried drip irrigation in the xiliaohe plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 278-284, 292. (in Chinese with English abstract)
- [27] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depending on type of irrigation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(3/4): 251-260.
- [28] 张晓丽, 张宏媛, 卢闯, 逢焕成, 靳存旺, 高喜, 程挨平, 李玉义. 河套灌区不同秋浇年限对土壤细菌群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(19): 3380-3392.
Zhang X L, Zhang H Y, Lu C, Pang H C, Jin C W, Gao X,

- Cheng A P, Li Y Y. Effects of the different autumn irrigation years on soil bacterial community in Hetao irrigation district[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(19): 3380-3392. (in Chinese with English abstract)
- [29] 聂福霄. 小麦浅埋滴灌高产节水技术应用研究[J]. 种子科技, 2025, 43(8): 65-67.
- Nie F X. Study on application of high yield and water saving technology of shallow buried drip irrigation for wheat[J]. *Seed Science & Technology*, 2025, 43(8): 65-67. (in Chinese with English abstract)
- [30] Armstrong W. Radial oxygen losses from intact rice roots as affected by distance from the apex, respiration and waterlogging[J]. *Physiologia Plantarum*, 1971, 25(2): 192-197.
- [31] Kotula L, Ranathunge K, Schreiber L, Steudle E. Functional and chemical comparison of apoplastic barriers to radial oxygen loss in roots of rice (*Oryza sativa* L.) grown in aerated or deoxygenated solution[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(7): 2155-2167
- [32] Mei X, Wong M, Yang Y, Dong H, Qiu R, Ye Z. The effects of radial oxygen loss on arsenic tolerance and uptake in rice and on its rhizosphere[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 165: 109-117.
- [33] 孙凯, 胡丽燕, 张伟, 孟美瑶, 戴传超. 水稻根系泌氧对土壤微生物区系及氮素矿化影响的研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3413-3420.
- Sun K, Hu L Y, Zhang W, Meng M Y, Dai C C. Effects of rice root radial oxygen loss on soil microflora and organic nitrogen mineralization: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(12): 3413-3420. (in Chinese with English abstract)
- [34] 马世浩, 杨丞, 王贵兵, 张赓, 李小坤. 水稻节水灌溉技术模式研究进展[J]. 节水灌溉, 2021 (8): 19-24.
- Ma S H, Yang C, Wang G B, Zhang G, Li X K. Research progress of rice water-saving irrigation technology mode[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(8): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- [35] Zhao L, Tang Q, Song Z, Yin Y, Wang G, Li Y. Increasing the yield of drip-irrigated rice by improving photosynthetic performance and enhancing nitrogen metabolism through optimizing water and nitrogen management[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1075625.
- [36] 张珮仪, 温腾, 张金波, 蔡祖聪. 扩散法测定土壤无机氮 ^{15}N 丰度方法优化研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 948-957.
- Zhang P Y, Wen T, Zhang J B, Cai Z C. On improving the diffusion method for determination of $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ and $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ in soil extracts[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 948-957. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张玉铭, 邢力, 李晓欣, 秦树平, 李燕楠, 韩建, 胡春胜. 作物根系对根际土壤 N_2O 产生与排放的调控机制研究进展[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2023, 31(8): 1322-1329.
- Zhang Y M, Xing L, Li X X, Qin S P, Li Y N, Han J, Hu C S. Research progress on the regulatory mechanisms of crop roots on N_2O production and emissions in rhizosphere soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(8): 1322-1329. (in Chinese with English abstract)
- [38] Nardi P, Laanbroek H J, Nicol G W, Renella G, Cardinale M, Pietramellara G, Weckwerth W, Trinchera A, Ghatak A, Nannipieri P. Biological nitrification inhibition in the rhizosphere: Determining interactions and impact on microbially mediated processes and potential applications[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2020, 44(6): 874-908.
- [39] Sedlacek C J, Giguere A T, Dobie M D, Mellbye B L, Ferrell R V, Woebken D, Sayavedra-Soto L A, Bottomley P J, Daims H, Wagner M, Pjevac P. Transcriptomic response of *Nitrosomonas europaea* transitioned from ammonia- to oxygen-limited steady-state growth[J]. *MSystems*, 2020, 5: 10.1128/msystems.00562.
- [40] 李宝珍, 王松伟, 冯慧敏, 徐国华. 氮素供应形态对水稻根系形态和磷吸收的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(6): 665-668.
- Li B Z, Wang S W, Feng H M, Xu G H. Effects of nitrogen forms on root morphology and phosphate uptake in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(6): 665-668. (in Chinese with English abstract)