DOI:10.11686/cyxb2025410
http://cyxb.magtech.com.cn
陈雪姣, 马黎华, 王喜, 等. 垄作稻田土壤无机氮变化及其对环境因子的响应. 草业学报, 2026, 35(9): 8－21.
CHEN Xue-jiao, MA Li-hua, WANG Xi, *et al*. Dynamics of soil inorganic nitrogen and its response characteristic to environmental factors in paddy fields under ridge tillage. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(9): 8－21.

# 垄作稻田土壤无机氮变化及其对环境因子的响应

陈雪姣[1], 马黎华[1*], 王喜[1], 尹仲毅[1], 靳皓琛[2], 蒋先军[1]
(1. 西南大学资源环境学院, 长江流域农业绿色发展跨学科研究中心, 重庆 400715; 2. 四川省生态环境监测总站, 四川 成都 610041)

**摘要**: 为探究水稻不同生育时期土壤无机氮的变化规律以及与土壤环境条件的响应关系, 选取垄作(RT)、平作(CT)两种水稻耕作模式, 开展连续两年(2021－2022)的田间监测试验。结果表明: 1)RT 和 CT 土壤铵态氮含量峰值出现在分蘖期－拔节期(RT: 89.7 mg·kg$^{-1}$, CT: 52.1 mg·kg$^{-1}$), 硝态氮含量峰值出现在成熟期(RT: 42.7 mg·kg$^{-1}$, CT: 58.4 mg·kg$^{-1}$)。在 0～20 cm 深度的稻田土层中, 不同耕作模式的铵态氮含量为 RT＞CT, 硝态氮含量为 CT＞RT。2)两种耕作模式下植物全株平均含氮量最高出现在分蘖时期, 氮利用率最高也出现在分蘖期, 在拔节期－抽穗期全株氮素吸收量较大, 并伴随着土壤铵态氮含量的明显降低。3)土壤温度和电导率呈上升趋势, 而土壤含水率在不同生育时期因灌溉和排水呈现波动。在拔节期, RT 的铵态氮与土壤温度呈现显著相关关系, 硝态氮与土壤温度在抽穗期和成熟期呈现显著相关关系, CT 的铵态氮在分蘖期和抽穗期与土壤温度均呈现显著相关关系, 硝态氮在抽穗期与土壤含水率呈现显著相关关系。4)根据非线性回归的模拟结果, RT 和 CT 的铵态氮含量表现为先增加后降低的变化趋势, RT 的硝态氮含量变化也为先增加后降低的趋势, CT 的硝态氮含量变化呈现非线性增加的趋势。铵态氮、硝态氮在生育早期主要受作物吸收调控, 其贡献最高(78.5%), 在生育后期环境因子的影响增强, 贡献率升至 61.1%, 相较于硝态氮, 铵态氮对环境因子的响应更为敏感。综上, 水稻分蘖期的土壤无机氮变化最剧烈, 分蘖期和成熟时期土壤无机氮对于土壤环境温度的变化最为敏感。垄作能够增加稻田铵态氮含量, 降低硝态氮的积累。研究结果可为区域性水稻种植养分资源优化管理提供科学依据。

**关键词**: 水稻; 垄作; 土壤温度; 土壤含水率; 土壤电导率

# Dynamics of soil inorganic nitrogen and its response characteristic to environmental factors in paddy fields under ridge tillage

CHEN Xue-jiao[1], MA Li-hua[1*], WANG Xi[1], YIN Zhong-yi[1], JIN Hao-chen[2], JIANG Xian-jun[1]
1. *Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*; 2. *Sichuan Provincial Environmental Monitoring Center, Chengdu* 610041, *China*

**Abstract**: To investigate the dynamics of soil inorganic nitrogen across rice (*Oryza sativa*) growth stages and the responses to soil environmental factors, a two-year (2021－2022) field monitoring experiment was conducted under ridge tillage (RT) and conventional tillage (CT). It was found that: 1) The ammonium nitrogen ($NH_4^+$-N) peaked at the tillering jointing stage (RT: 89.7 mg·kg$^{-1}$; CT: 52.1 mg·kg$^{-1}$), whereas nitrate nitrogen ($NO_3^-$-N) reached its maximum at maturity (RT: 42.7 mg·kg$^{-1}$; CT: 58.4 mg·kg$^{-1}$). $NH_4^+$-N concentrations in the 0－20 cm soil layer were consistently higher under RT, while $NO_3^-$-N concentrations were higher under CT. 2) Whole-plant

收稿日期: 2025-10-13; 改回日期: 2025-12-15
基金项目: 四川省区域创新合作项目(2023YFQ0034)资助。
作者简介: 陈雪姣(2001－), 女, 重庆武隆人, 在读硕士。E-mail: 2770515641@qq.com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: malh@swu.edu.cn

average nitrogen content and nitrogen use efficiency peaked at the tillering stage, and high nitrogen uptake during the jointing stage—heading stage coincided with a marked reduction in soil ammonium nitrogen. 3) Soil temperature and electrical conductivity showed overall increasing trends during the rice growth period, whereas soil moisture fluctuated among growth stages reflecting irrigation and drainage practices. Under RT, $NH_4^+$-N exhibited a significant correlation with soil temperature at the jointing stage, while $NO_3^-$-N showed significant correlations during the heading and maturity stages. Under CT, $NH_4^+$-N was significantly correlated with soil temperature during the tillering and heading stages, whereas $NO_3^-$-N was significantly correlated with soil moisture content at the heading stage. 4) Simulation results based on nonlinear curve fitting indicated that $NH_4^+$-N contents under both RT and CT followed a pattern of initial increase followed by a decrease. $NO_3^-$-N content under RT exhibited a similar trend, whereas $NO_3^-$-N content under CT showed a nonlinear increasing pattern. Crop uptake dominated the variations in both ammonium and nitrate nitrogen during the early growth stages (78.5%), whereas environmental factors became increasingly important during the later stages, contributing up to 61.1% of the explained variation. Compared with nitrate nitrogen, ammonium nitrogen was more sensitive to environmental factors. In conclusion, the most pronounced changes in soil inorganic nitrogen occurred during the tillering stage of paddy rice. Variations in soil inorganic nitrogen during both the tillering and maturity stages were most sensitive to changes in soil temperature. Ridge tillage increased $NH_4^+$-N concentrations in paddy soil while reducing the accumulation of $NO_3^-$-N. These findings provide a scientific basis for optimizing nutrient management strategies in regional rice production systems.

**Key words**: paddy rice; ridge tillage; soil temperature; soil moisture content; soil electrical conductivity

水稻(*Oryza sativa*)是全球超过半数人口的主粮,其稳定生产对粮食安全至关重要[1]。氮素是水稻生长发育的关键养分,直接影响作物生理代谢和产量形成[2]。土壤无机氮含量受施肥、水分条件及多种环境因子的共同调控,在水稻生育时期内呈现明显的动态变化。然而,目前关于垄作条件下土壤无机氮的动态规律缺乏连续观测,且在不同生育阶段的累积与转化特征尚不明确。水稻对铵态氮和硝态氮的吸收利用具有显著的生育时期特异性,营养生长期以铵态氮为主,生殖生长后期对硝态氮的利用能力则增强[3],其全生育时期氮素需求呈现“前期高、中期低、后期高”的变化特征[4-6],传统施肥模式难以同步满足水稻不同生育阶段对氮素形态和数量的动态需求,常导致氮肥利用效率偏低。相较于传统连续淹水稻田,垄作通过改变水分分布和土壤氧化还原条件,重构稻田水分、温度和通气性等环境梯度,从而影响土壤无机氮的生成、转化与供应。同时,无机氮动态变化与氨挥发、硝化-反硝化及淋溶等氮素损失过程密切相关,这些过程不仅影响土壤有效氮的供给,还会导致活性氮向大气和水体输出,诱发水体富营养化、温室气体排放增加等环境问题[7-8]。因此,明确垄作条件下土壤无机氮的动态变化规律及其与环境因子的关系,对于提高氮肥利用效率、保障水稻稳产和减少环境污染具有重要意义。

稻田特殊的淹水排水环境导致在生长前期长期淹水条件下厌氧环境强烈抑制硝化作用,土壤铵态氮易于积累,其含量动态主要受施肥、有机质矿化(增加)以及水稻吸收和土壤吸附(减少)等过程调控,整体维持在较高水平[9-10];与此相反,硝态氮在淹水期因硝化作用被抑制而始终维持在极低浓度,其含量的显著增加仅发生在中期晒田和后期落干等土壤转为好氧的时期[11]。研究表明,铵态氮含量变化直接受氨挥发影响,挥发速率通常在施肥后数日至一周内达到高峰[12];随后则因水稻根系的优先吸收和土壤吸附等过程而逐渐减少[13]。水稻对铵态氮的强烈吸收不仅直接满足自身需求,还通过减少硝化作用底物和改变根际厌氧环境,间接阻碍了硝态氮在生长前期的积累。当生育后期排水使土壤复氧后,硝化作用增强会导致硝态氮含量增加,但这些硝态氮常因反硝化、植物吸收和淋溶等过程而难以长期积累[14-15]。正是由于铵态氮在稻田土壤中的主导地位及其与水稻生理的高度适配,其对水稻生长发育的影响通常比硝态氮更为直接[16]。在分蘖期,水稻植株以土壤铵态氮作为氮源时,根系的生物量累积以及根系活性均显著优于采用硝态氮处理的情形[17-18]。水稻抽穗期至成熟期,在适宜施氮量范围内适度增加氮肥供应(以$NH_4^+$-N为主),促进光合产物向籽粒的转运分配,从而有效提高产量形成能力[19]。

稻田土壤无机氮变化及主导形态与气候条件以及所处的土壤环境条件密切相关[20]。温度是调控土壤氮素氨化与硝化过程的关键环境因子,其通过调节功能微生物的群落结构与酶活性,影响氮素转化[21-24]。研究表明,在15～35 ℃范围内,氨氧化速率随温度升高呈线性增加趋势,而硝化速率则随着土壤温度(15～35 ℃)的升高呈先上升再下降的趋势[25]。其中,氨氧化过程的最适温度为35 ℃,硝化过程的最适温度范围较窄(25～30 ℃)[26-27]。除了温度,降水量差异导致的土壤含水率变化往往与铵态氮含量呈负相关关系,有研究发现,降水减少使土壤$NH_4^+$-N显著降低,对$NO_3^-$-N无显著影响[28]。土壤盐分累积是加剧农田氮素损失的重要驱动因素,土壤盐渍化提高了电导率(electrical conductivity,EC),氨气挥发量随之增加,导致氮肥利用效率降低[29-30]。土壤无机氮转化速率会受到高浓度土壤盐分的严重抑制,土壤盐渍化也会明显降低有机氮的矿化速率,导致硝化作用受阻[31]。

垄作通过改变田间微地形,引起土壤水热条件等环境因子的变化,进而影响稻田土壤无机氮的转化与分布[32]。垄体表面积增大,接受更多的太阳辐射,升温更快,昼夜温差增大,尤其在水稻生长前期有助于提高土壤温度,促进微生物活性[33],但是垄体干湿交替频繁,水分蒸发可能暂时浓缩盐分离子,导致EC短时升高;而沟区水分滞留,EC相对稳定,但整体处于强烈的厌氧还原环境,其氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)值普遍低于传统耕作模式[34]。研究发现,垄体部分多处于非淹水或湿润状态,导致土壤氧化还原电位(ORP)较高,成为硝化作用的活跃区域,显著促进铵态氮($NH_4^+$-N)向硝态氮($NO_3^-$-N)的转化,这一过程改变了传统平作稻田以$NH_4^+$-N为主的无机氮库结构[35-36],沟区作为厌氧功能区,既能保存$NH_4^+$-N,也是侧向运移$NO_3^-$-N进行反硝化损失的主要场所[37]。

本研究关注稻田土壤无机氮动态变化及其对环境因子的响应特征,基于垄作(ridge tillage,RT)与水旱平作(conventional tillage,CT)两种稻田耕作模式,围绕水稻不同生育时期无机氮的变化规律,以及土壤温度、湿度和盐分对于土壤氮素形态的影响开展研究,探索适宜西南地区高产增效的水稻栽培方式,结果可以为西南地区水稻应对气候变化以及实现稻田的养分高效利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究依托重庆市北碚区1990年建立的垄作免耕长期定位试验平台,2021年北碚区全年总降水量为1515 mm,2022年全年总降水量为960 mm,位于重庆市北碚区紫色土肥力肥效长期定位监测基地内(30°26′ N,106°26′ E),海拔230 m,多年平均气温18.3 ℃(近30年),年日照时数1277 h,多年平均降水量为1105 mm,作物有效生长周期达334 d,土壤由中生代侏罗纪沙溪庙组灰棕紫色砂泥岩风化发育而成,属中性紫色土。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共设定两种不同的耕作处理方式,分别为垄作和水旱平作。针对每一种耕作处理,均设置4个重复,小区单元面积为20 $m^2$(5 m×4 m),种植密度为350穴·小区$^{-1}$(通过株距10 cm×行距30 cm实现)。具体包括:

1) 垄作(RT),实行水稻和油菜(*Brassica napus*)轮作,起垄(垄顶宽25 cm,沟宽30 cm,深35 cm,垄沟比1.0∶1.2),水稻和油菜种植于垄上,每个小区设5垄。水稻分蘖期淹水层在垄顶以上3～5 cm;水稻收获后,种植油菜,垄沟自然存续降水,第2年油菜收获后种植水稻。

2) 平作(CT),实行水稻和油菜轮作制度,水稻季淹水层深度为5 cm,水稻收获后种植油菜,第2年油菜收获后翻耕灌水,种植水稻。

采用TDR315H型土壤温湿盐探头(CR300-TDR315H,北京天诺基业科技有限公司)和CR300数据采集器(CR300-TDR315H,北京天诺基业科技有限公司)收集不同深度的土壤含水率、温度和电导率数据,装置安装方式如图1所示,在水稻生育时期,传感器连续每1 h自动记录原位监测值。

两种耕作方式施肥及其他田间管理措施一致,肥料均施用于土壤表层,生育时期耕层基本理化指标见表1。施肥方式:过磷酸钙基肥均一次性施用;尿素按基、追比2∶1配施(基肥占总量的2/3,分蘖期追施1/3);氯化钾采

用1∶1的基肥、追肥比进行配施；施肥量为尿素 273 kg·hm$^{-2}$，过磷酸钙 500 kg·hm$^{-2}$，氯化钾 150 kg·hm$^{-2}$。5月中旬施底肥；追肥于5月下旬进行。

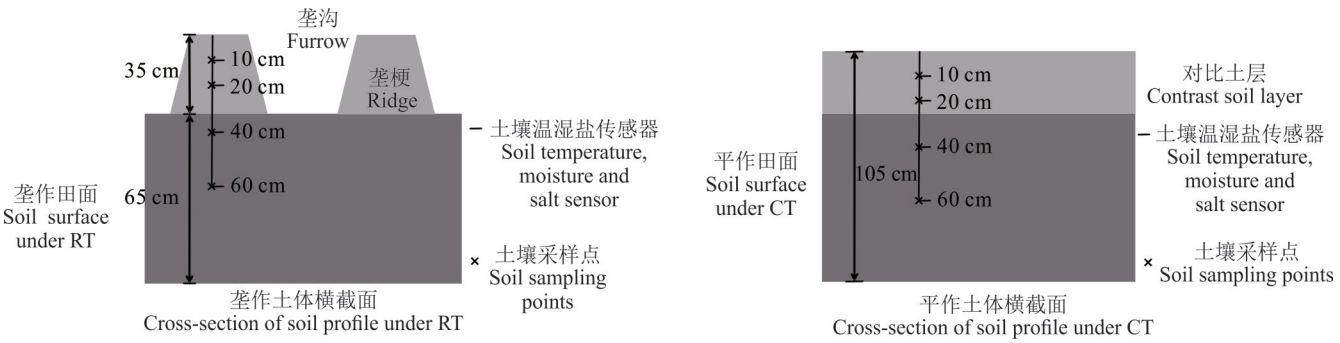



**图1　垄作、平作田块土壤剖面结构及采样点分布**

**Fig. 1　The distribution of soil profile and sampling points under ridge tillage (RT) and conventional tillage (CT) in paddy fields**

**表1　不同耕作方式下耕作土壤的基本理化指标**

**Table 1　Basic physical and chemical properties of soil under different tillage practices**

| 处理 Treatment | pH | 有机质 Organic matter (g·kg$^{-1}$) | 速效钾 Available potassium (mg·kg$^{-1}$) | 速效磷 Available phosphorus (mg·kg$^{-1}$) | 速效氮 Available nitrogen (mg·kg$^{-1}$) | 全钾 Total potassium (g·kg$^{-1}$) | 全磷 Total phosphorus (g·kg$^{-1}$) | 全氮 Total nitrogen (g·kg$^{-1}$) | 容重 Bulk density (g·cm$^{-3}$) | 孔隙度 Porosity (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RT | 7.5 | 28.2 | 65.5 | 20.2 | 149.5 | 19.7 | 0.84 | 1.64 | 1.25 | 49.8 |
| CT | 7.2 | 29.1 | 68.0 | 31.3 | 154.5 | 18.9 | 1.01 | 1.64 | 1.32 | 47.6 |

注：RT、CT分别代表垄作、平作，下同。

Note: RT represent ridge tillage; CT represent conventional tillage, the same below.

采用HOBO U30微型气象站（北京天诺基业科技有限公司）开展定位观测工作（2021－2022；5月8日－8月15日），重点监测水稻生育时期大气温度与降水量动态。在观测期间，小型气象站间隔1 h自动记录数据，日均温度与日均降水量数据如图2所示。

### 1.3　采样与指标测量

在水稻生育期（5月8日－8月15日）每间隔10 d进行一次土壤采样，并在每次施肥后补充采样。在不同生育时期进行水稻全株采样，测定其不同器官的生物量、全氮含量及铵态氮、硝态氮含量，根据公式（1）计算氮吸收量，氮利用率根据公式（2）计算。不同土层深度的土壤样品采用直径为5 cm的土钻按5点法[38]获取，人工剔除植物残体、砾石后按土层进行等质量混合，密封保存备用。每层土样取对应的5 g新鲜样品经2 mol·L$^{-1}$ KCl溶液浸提（土液比1∶10），在室温下使用摇床振荡1 h后，静置 30 min，用定型滤纸过滤浸提液，采用KCl浸提－连续流动分析法（AA3 AutoAnalyzer，全自动连续流动分析仪，德国）同步测定硝态氮（$NO_3^-$-N）与铵态氮（$NH_4^+$-N）含量[39]。土壤容重采用环刀法[40]测定，利用以上采样和测定方法对水稻整个生育期不同土层内硝态氮和铵态氮吸收量进行计算。

氮吸收量按干物质量与植株全氮含量计算，公式如下：

$$N = DM \times \frac{C_N}{1000} \tag{1}$$

式中：$N$为氮吸收量（g·m$^{-2}$），$DM$为干物质量（g·m$^{-2}$），$C_N$为植株全氮含量（g·kg$^{-1}$）。

### 1.4　数据处理

在统计分析前，对所有数据进行正态性（Shapiro-Wilk 检验）和方差齐性（Levene）检验。当数据不满足正态

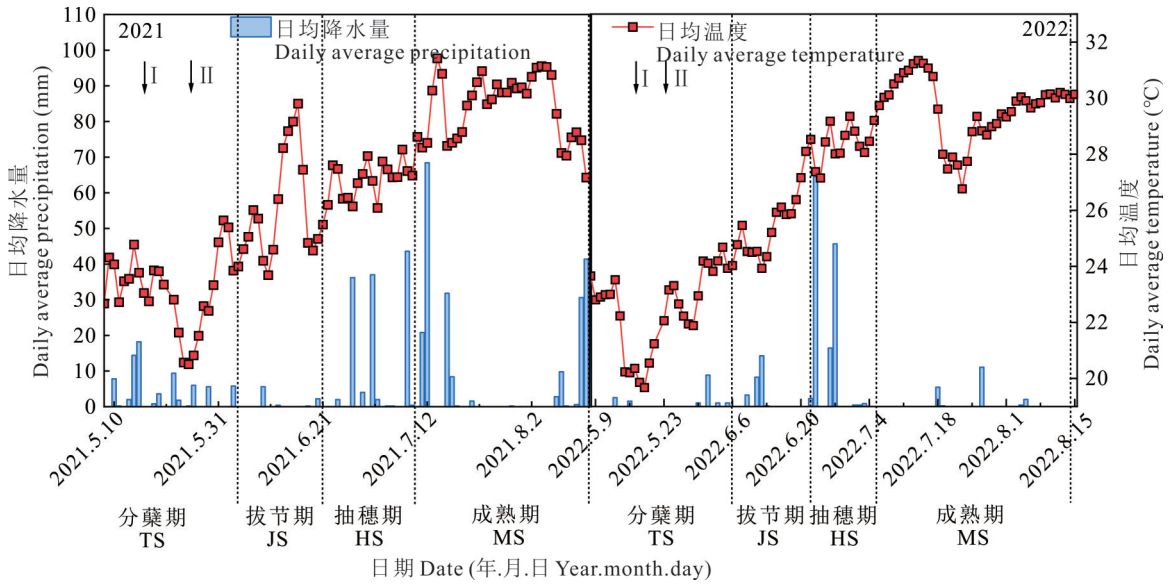



**图2 2021–2022年日均降水量和气温**

**Fig. 2 Daily mean precipitation and temperature during 2021–2022**

Ⅰ:第1次施肥时间 First fertilization time;Ⅱ:第2次施肥时间 Second fertilization time. TS:分蘖期 Tillering stage;JS:拔节期 Jointing stage;HS:抽穗期 Heading stage;MS:成熟期 Maturation stage. 下同 The same below.

分布或方差齐性假设时,采用对数或平方根转换以满足方差分析的前提条件。在满足正态性和方差齐性的前提下,采用独立样本$t$检验比较垄作与平作在整个生育期内的土壤铵态氮、硝态氮含量,以及植株生物量、含氮量和氮利用率等指标的差异。土壤温度、含水率、电导率等环境因子在不同耕作处理之间的差异同样采用独立样本$t$检验进行分析。为进一步分析耕作模式与生育时期对土壤无机氮含量的影响,以耕作模式(两个水平)和生育时期(4个水平)为固定因子,对土壤铵态氮和硝态氮含量分别进行双因素方差分析(Two-way ANOVA),以评估两个因素的主效应及其交互效应,共获得36个样本($N$=36),当主效应或交互效应显著($P$<0.05)时,采用LSD法进行多重比较;当交互效应显著时,优先分析不同生育时期下耕作模式的简单效应。为描述不同耕作模式下土壤铵态氮和硝态氮随生育时期变化的动态特征,采用非线性回归方法对无机氮含量进行曲线拟合,选用二次多项式函数作为经验模型。根据模型拟合优度($R^2$)筛选最优模型,并通过整体显著性检验($F$检验)判断拟合模型是否显著优于随机误差模型。在无机氮动态变化分析中,环境因子对土壤无机氮变化的吸收量依据公式(4)进行计算,植株对土壤无机氮变化的吸收量根据公式(5)进行计算。

所有统计分析均在IBM SPSS Statistics 26.0中完成;采用Microsoft Excel 2019进行数据整理;图形绘制在Origin 2025和Microsoft PowerPoint 2019中完成。

氮肥利用效率(recovery efficiency of nitrogen,REN)用于评价作物对施用氮肥的吸收程度,计算公式如下:

$$REN=\frac{N_{\text{uptake-N}}-N_{\text{uptake-0}}}{F_{\text{N}}}\times 100\% \tag{2}$$

式中:$N_{\text{uptake-N}}$为施氮处理植株的氮吸收量(kg·hm$^{-2}$),$N_{\text{uptake-0}}$为不施氮对照处理的氮吸收量(kg·hm$^{-2}$),$F_{\text{N}}$为施用的氮肥量(kg·hm$^{-2}$),植株氮吸收量依据公式(1)计算。

土层铵态氮和硝态氮的含量与土壤温度、含水率以及电导率的相关系数计算公式如下:

$$R=\frac{n\sum x_i y_i-\left(\sum x_i\right)\left(\sum y_i\right)}{\sqrt{\left[n\sum x_i^2-\left(\sum x_i\right)^2\right]\left[n\sum y_i^2-\left(\sum y_i\right)^2\right]}} \tag{3}$$

式中:$R$为相关系数,$n$为不同生育时期土壤温度、含水率以及电导率数值对应的铵态氮、硝态氮含量的样本数量;$x$为对应数据点的土壤温度、含水率或者电导率;$y$为对应的土壤铵态氮或硝态氮含量。$R$绝对值越接近于1表明

两个指标之间的线性相关关系越强，$R$越接近0表明两个指标之间的线性相关关系越弱。

0～20 cm土层深度的硝态氮和铵态氮的吸收量采用以下公式计算：

$$\sum A = h \times p \times d \times 0.1 \tag{4}$$

式中：$\sum A$为硝态氮、铵态氮的吸收量（$g \cdot m^{-2}$）；$h$为土层厚度（cm）；$p$为硝态氮、铵态氮的浓度（$mg \cdot kg^{-1}$）；$d$为土壤容重（$g \cdot cm^{-3}$）；0.1为单位换算系数。

铵态氮（$NH_4^+$-N）与硝态氮（$NO_3^-$-N）吸收量：

$$N = \frac{g \times c}{1000} \tag{5}$$

式中：$N$为吸收量，$g$为植株生物量（$g \cdot m^{-2}$），$c$为植株含氮量（$g \cdot kg^{-1}$）。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同生育时期土壤无机氮含量的变化

两种不同处理的铵态氮含量最大值均分别出现在拔节期和分蘖期，硝态氮含量峰值出现在成熟期（图3），土壤无机氮的变化可能受到了作物吸收与耕作模式对于土壤环境因子改变的双重影响。两种耕作模式的铵态氮含量都呈现先增加后减少的趋势，2021年土壤铵态氮含量在拔节期出现最高值，RT为89.7 $mg \cdot kg^{-1}$，比CT（52.1 $mg \cdot kg^{-1}$）高显著72.17%（$P<0.05$）；RT和CT的土壤铵态氮含量在2022年分蘖期达到最大值，RT为84.7 $mg \cdot kg^{-1}$，比CT（50.4 $mg \cdot kg^{-1}$）极显著高68.1%（$P<0.01$）；在成熟期，CT的硝态氮含量逐渐增加，RT的硝态氮含量先增加后逐渐减少，至8月15日，CT的含量比RT显著高36.7%（2021年，$P<0.05$）和23.9%（2022年，$P<0.05$）；在拔节期和抽穗期，CT的硝态氮含量增加明显，RT的硝态氮含量低于CT。

无机氮（铵态氮与硝态氮）含量均受“生育时期”显著影响，然而，“耕作模式”单一因素及其与“生育时期”的交互作用对铵态氮和硝态氮的影响均不显著（图3）。尽管总体统计上无显著交互作用，但RT与CT处理间铵态氮和硝态氮含量的最大值仍呈显著差异。

### 2.2　不同生育时期作物吸收无机氮的变化

RT处理的水稻全株氮含量2021和2022年分别在分蘖期和拔节期显著高于CT处理，且两种处理的氮含量峰值均出现在分蘖期（表2）。具体而言，2021年分蘖期RT处理的氮含量为45.45 $g \cdot kg^{-1}$，显著高于CT处理（38.64 $g \cdot kg^{-1}$），2022年，RT处理（42.78 $g \cdot kg^{-1}$）亦高于CT处理（41.48 $g \cdot kg^{-1}$）；在生物量方面，两个处理均在成熟期达到最大值，且RT处理显著优于CT，从拔节期到抽穗期是生物量累积最快的阶段，RT与CT处理在此期间的增长率分别为140.86%和128.49%（2021年），以及120.45%和131.60%（2022年）。在两个生长年度中，RT与CT处理的氮利用率均随生育进程推进而有所降低，且RT处理植株含氮量和氮利用率2021和2022年分别在分蘖期和拔节期显著高于CT处理。

根据两年的观测数据，土壤铵态氮的变化与水稻全株氮吸收量存在负响应关系，即水稻全株氮吸收量较大值对应土壤铵态氮的较小值，水稻全株氮吸收量较小值对应土壤铵态氮的较大值（图4）。水稻全株氮吸收量在抽穗期达到最大值，在拔节期－抽穗期增长最迅速；同时，铵态氮平均浓度在拔节期－抽穗期下降最迅速。可以认为水稻在拔节期到抽穗期由于根系氮素的吸收造成土壤铵态氮浓度的下降。稻田土壤铵态氮平均浓度水平在成熟期低于初始的分蘖期，土壤硝态氮平均浓度水平在成熟期高于初始的分蘖期，并且存在一定的波动变化。

### 2.3　不同生育时期土壤环境条件的变化

水稻不同生育时期的土壤平均含水率、电导率和温度结果如图5所示。2021年的4个生育时期中，相比于CT，RT的含水率更高，RT在成熟期0～20 cm土层的含水率均值达50.19%，高于常规耕作CT的43.62%。两种耕作模式的土壤温度都随生育时期推进出现上升趋势，RT的土壤温度在不同生育时期皆高于CT。同时，RT的土壤平均电导率低于CT。2022年，RT在0～20 cm土层的含水率和温度均高于常规耕作CT，CT在整个生育期的电导率均值比RT高。

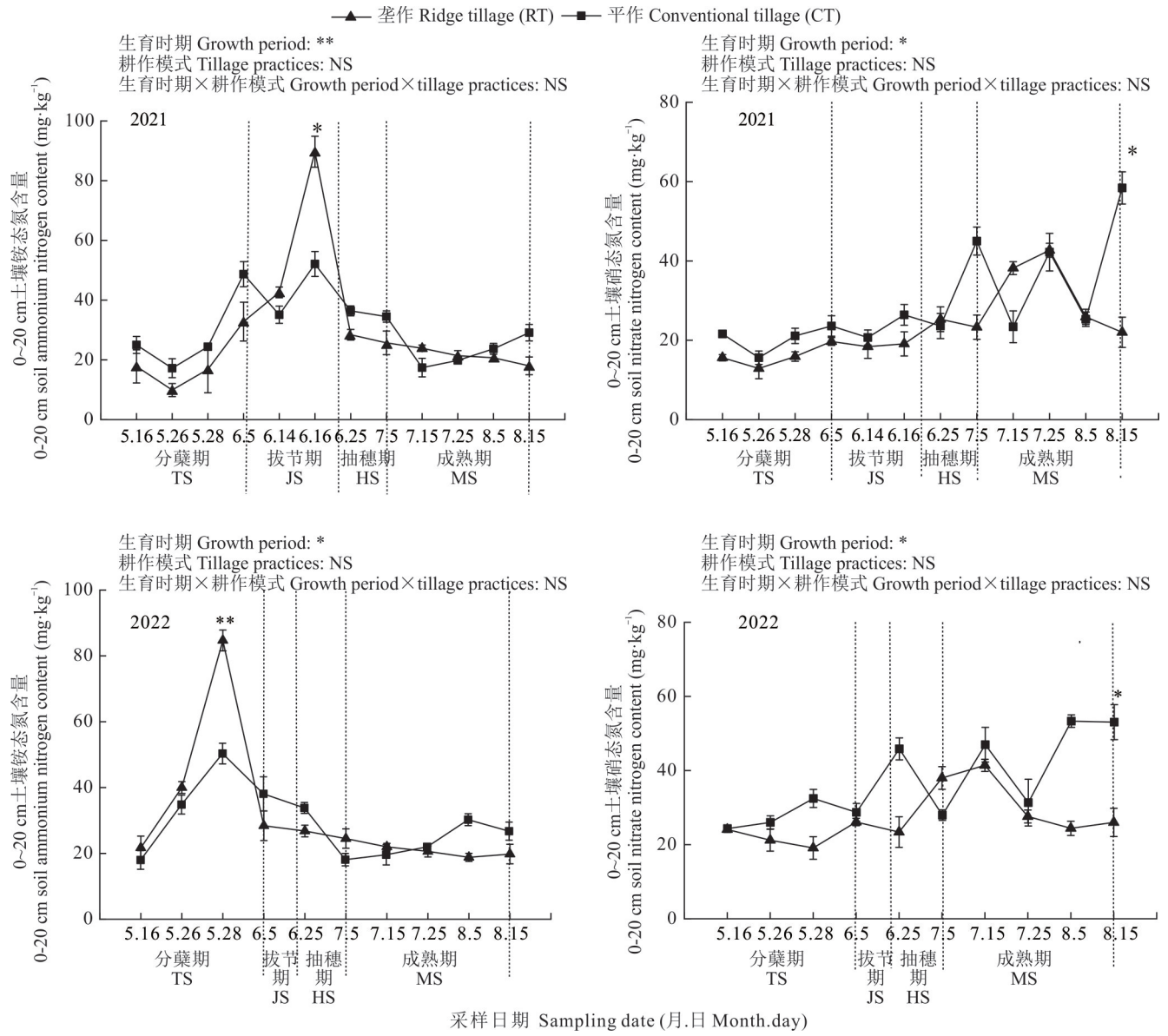



**图3 耕作模式与生育时期对0~20 cm土壤铵态氮和硝态氮含量的影响**

**Fig. 3 Effets of tillage mode and growth stage on the content of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in the 0−20 cm soil layer**

*表示$P<0.05$,**表示$P<0.01$,NS表示没有显著相关性,下同。* indicates $P<0.05$,** indicates $P<0.01$,NS indicates no significant correlation, the same below.

RT和CT表层土壤(0~20 cm)的温度、含水率、电导率,以及与铵态氮和硝态氮含量相关性分析结果如图5所示。RT处理中,土壤铵态氮含量在拔节期与土壤温度呈极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数为0.95,和土壤含水率在抽穗期呈显著负相关关系($P<0.05$),相关系数为−0.53;土壤硝态氮含量在抽穗期与土壤温度的相关系数为0.94,呈极显著正相关关系($P<0.01$),在成熟期与土壤温度呈显著正相关关系($P<0.05$),相关系数为0.74。

分蘖期的CT土壤铵态氮含量与土壤温度呈极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数为0.62,同时与土壤含水率呈显著相关关系($P<0.05$),相关系数为0.47;在抽穗期,土壤铵态氮含量和土壤温度相关系数为−0.57,呈显著负相关关系($P<0.05$),土壤硝态氮含量与土壤含水率的相关系数为−0.52,呈显著负相关关系($P<0.05$);土壤温度和土壤含水率在成熟期与土壤铵态氮含量分别呈极显著正相关关系($P<0.01$)和显著相关关系($P<0.05$),相关系数为0.62、0.75。

**表 2　两种耕作模式下水稻在不同生育时期的含氮量、生物量和氮利用率**

**Table 2　The nitrogen content, biomass and nitrogen use efficiency of paddy rice under two tillage modes at different growth stages**

| 生育时期 Growth stage | 处理 Treatment | 含氮量 Nitrogen content (g·kg$^{-1}$) | | 生物量 Biomass (g·m$^{-2}$) | | 氮利用率 Nitrogen use efficiency (%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2021 | 2022 | 2021 | 2022 | 2021 | 2022 |
| 分蘖期 Tillering stage | RT | 45.45 | 42.78 | 202.12 | 256.78 | 21.86 | 20.58 |
| | CT | 38.64 | 41.48 | 208.88 | 198.45 | 18.59 | 19.95 |
| | *P* 值 *P* value | 0.024 | 0.456 | 0.104 | 0.036 | 0.009 | 0.553 |
| 拔节期 Jointing stage | RT | 42.88 | 42.33 | 404.53 | 492.89 | 20.63 | 20.36 |
| | CT | 38.59 | 39.12 | 392.41 | 423.67 | 18.56 | 18.82 |
| | *P* 值 *P* value | 0.057 | 0.043 | 0.098 | 0.100 | 0.204 | 0.040 |
| 抽穗期 Heading stage | RT | 41.93 | 41.21 | 974.36 | 1086.56 | 20.17 | 19.82 |
| | CT | 36.91 | 38.45 | 896.60 | 981.23 | 17.75 | 18.49 |
| | *P* 值 *P* value | 0.061 | 0.067 | 0.126 | 0.021 | 0.131 | 0.219 |
| 成熟期 Maturation stage | RT | 41.15 | 42.56 | 1497.44 | 1659.78 | 19.79 | 20.47 |
| | CT | 36.03 | 37.80 | 1334.52 | 1517.89 | 17.33 | 18.18 |
| | *P* 值 *P* value | 0.459 | 0.491 | 0.031 | 0.044 | 0.191 | 0.201 |

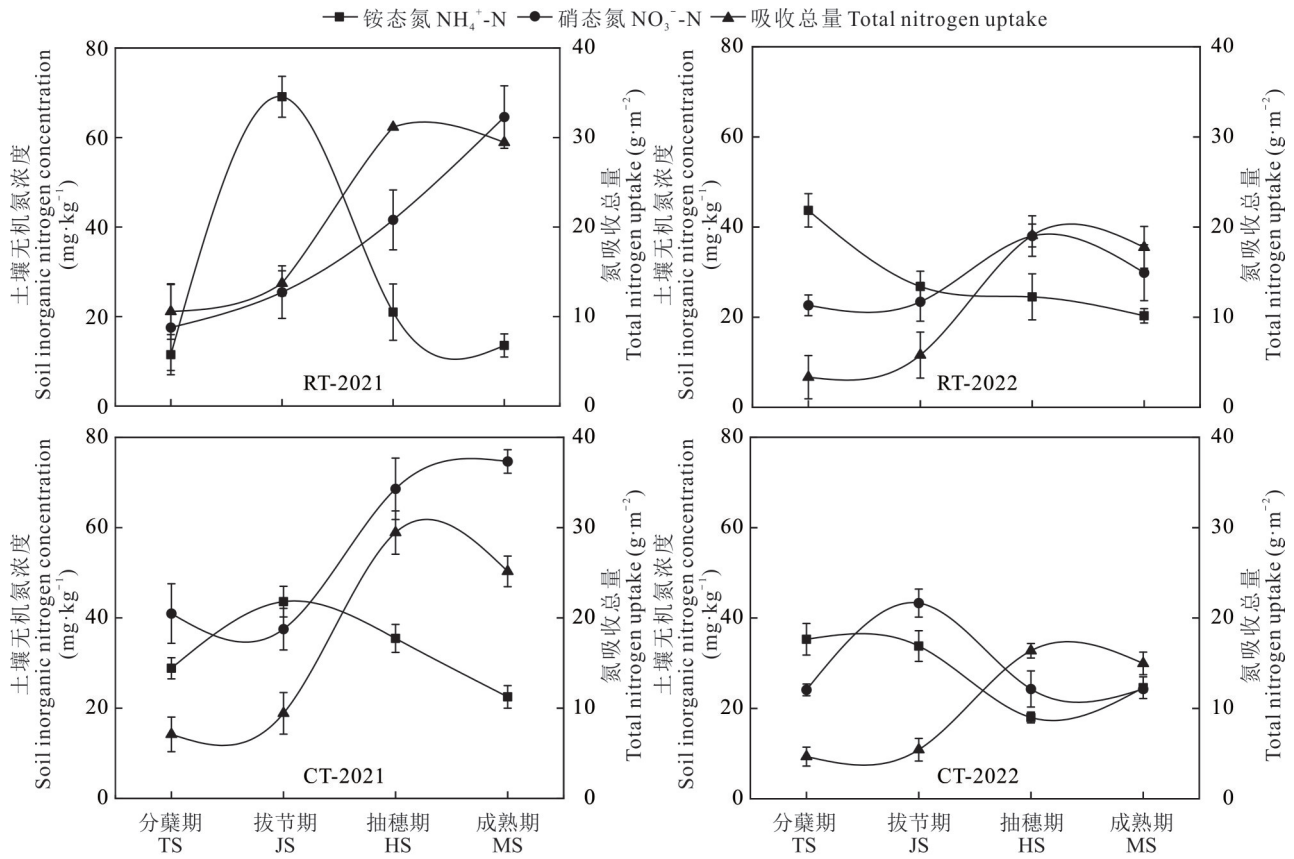



**图 4　不同生育时期水稻氮吸收总量与土壤无机氮浓度的变化**

**Fig. 4　Changes in total nitrogen uptake of paddy rice and concentration of soil inorganic nitrogen during different growth stages**

### 2.4　土壤环境和作物吸收对土壤铵态氮与硝态氮的影响

采用二次多项式回归模型对土壤铵态氮和硝态氮含量随水稻移栽后种植天数的变化进行拟合分析，在 2021 年，RT 和 CT 的铵态氮含量均呈现先增加后下降的变化趋势，且垄作处理的铵态氮含量始终高于平作，进入 2022

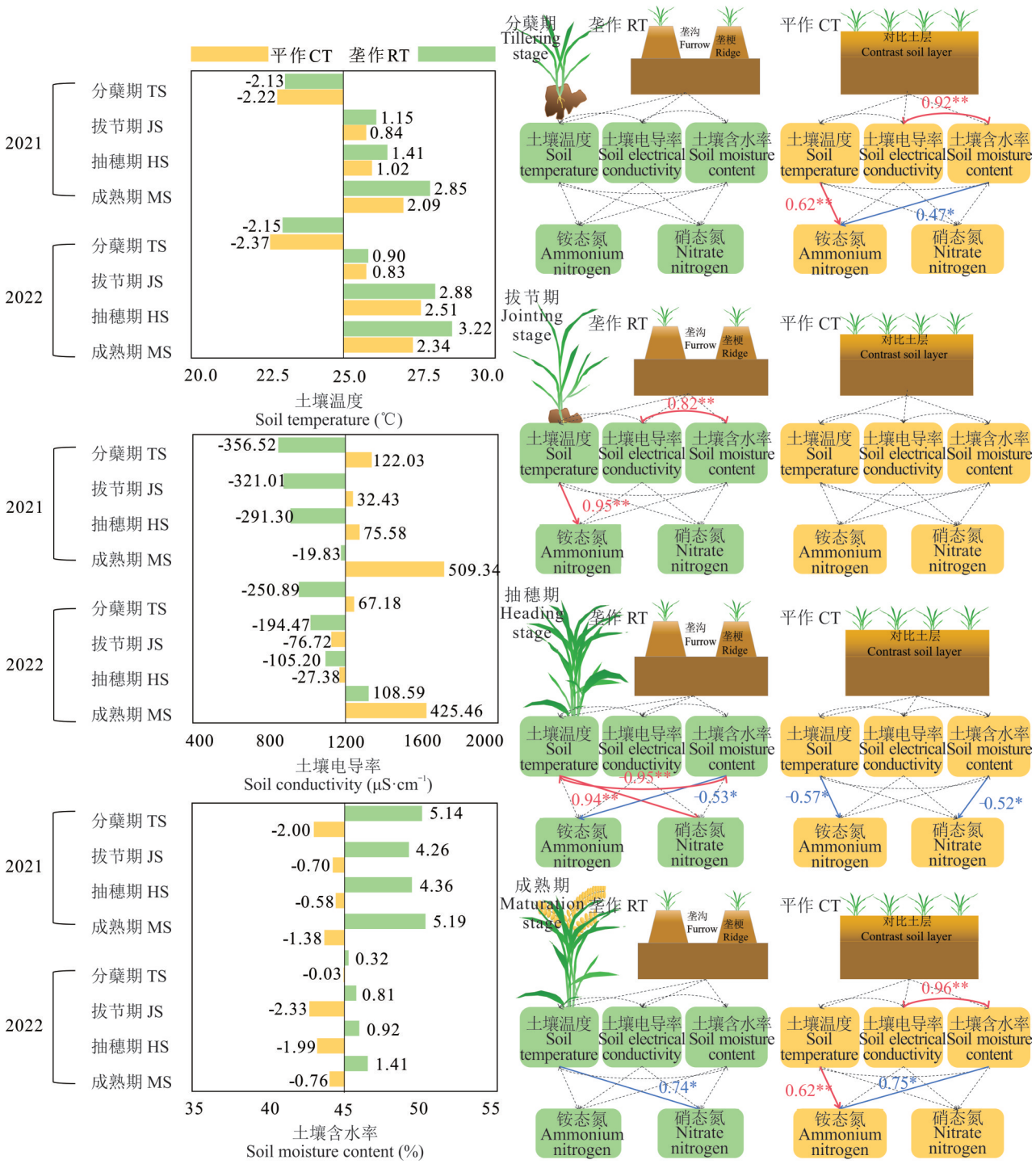



**图5 两种耕作模式和生育时期下土壤温度、含水率、电导率特征及其与无机氮含量的相关性**

**Fig. 5 Soil temperature, moisture content and electrical conductivity characteristics and their relationships with inorganic nitrogen content under different tillage practices and growth stages**

土壤温度、含水率和电导率均为0～20 cm土层连续监测值,按生育期进行平均计算。The data in the soil temperature, moisture content, and electrical conductivity were continuously monitored at 0－20 cm depth and averaged by growth stage.

年,RT的铵态氮含量呈持续下降趋势,而CT则仍表现出先增加后下降的波动。RT与CT硝态氮含量的变化规律存在明显差异,RT的土壤硝态氮含量呈现先增加后减少的变化趋势,而CT的硝态氮含量随移栽天数增加呈现非线性持续增加趋势(图6)。RT铵态氮变化模拟的$R^2$值为0.42(2021年)和0.24(2022年),高于CT的$R^2$值0.34(2021)和0.16(2022)。根据$R^2$值,除2022年对于硝态氮含量的模拟外,其他变化模拟均表现为RT好于

CT。在样本量为12的条件下,对回归模型进行整体显著性(*F*检验)分析发现,不同处理和年份间模型显著性存在差异,部分模型整体通过显著性检验($P<0.05$),说明二次回归方程在统计学意义上能够描述土壤铵态氮和硝态氮含量随移栽时间变化的总体趋势。

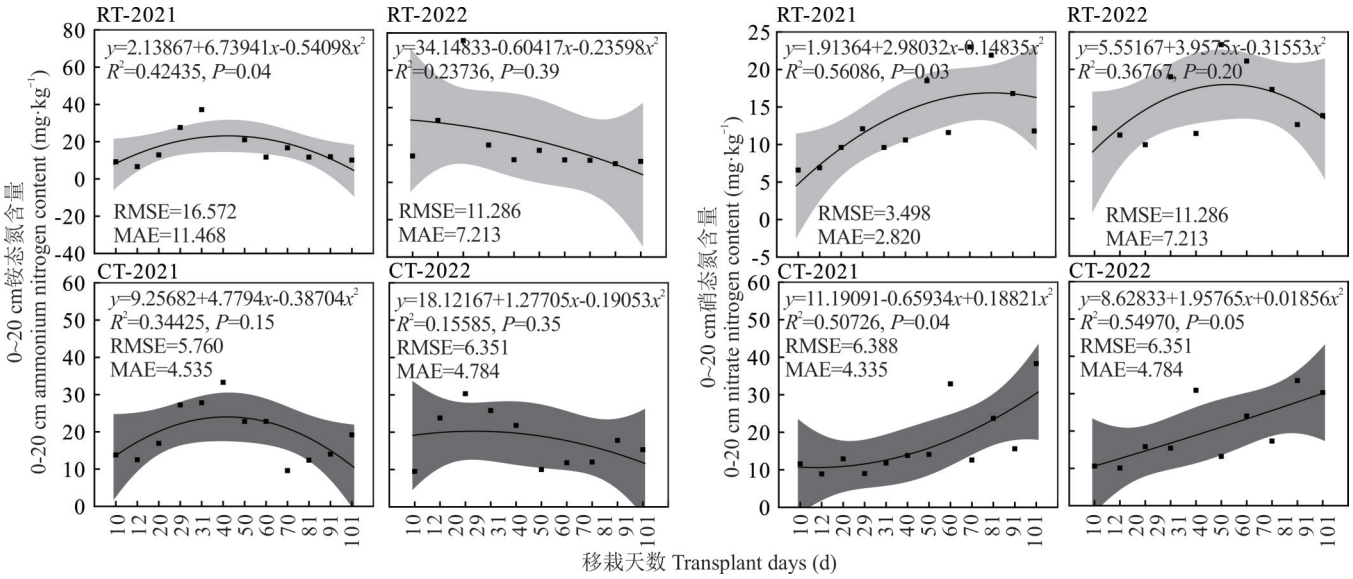



**图6　土壤铵态氮、硝态氮含量随水稻移栽后种植天数的变化模拟**

**Fig. 6　Changes simulated in soil $NH_4^+$-N and $NO_3^-$-N content with days after transplanting of paddy rice**

RMSE:均方根误差 Root mean square error;MAE:平均绝对误差 Mean absolute error.

不同生育时期RT处理中作物吸收对铵态氮($NH_4^+$-N)的相对贡献高于CT,而对硝态氮($NO_3^-$-N)的相对贡献则低于CT(图7)。在RT处理下,$NH_4^+$-N变化在生育前期主要受作物吸收控制,分蘖期作物吸收贡献最高(78.5%),环境因子贡献相对较低(21.5%),进入拔节期后,作物吸收的相对贡献下降,而环境因子的贡献逐渐增强,随着水稻生育进程的推进,在成熟期环境因子成为主导因素,其贡献率升至61.1%,而作物吸收的贡献降至38.9%。在CT处理下,$NH_4^+$-N变化同样在生育早期作物吸收贡献较高,分蘖期达到75.8%,在水稻拔节期,作物吸收的相对贡献下降,进入抽穗期和成熟期后,环境因子的贡献提高,并在成熟期达到51.3%,高于作物吸收。

对于$NO_3^-$-N,两种处理下环境因子与作物吸收的贡献相对更为均衡。在RT处理中,分蘖期$NO_3^-$-N的变化主要由作物吸收驱动(69.2%),但其贡献随生育进程推进逐渐降低,相应地,环境因子的贡献持续上升,在成熟期达到51.1%,与作物吸收(48.9%)接近。在CT处理下,作物吸收在生育前期仍占主导作用(分蘖期为73.1%),但在生育后期其贡献明显减弱,成熟期环境因子的贡献超过作物吸收,占比为52.8%,成为影响$NO_3^-$-N变化的主要因素。

## 3　讨论

### 3.1　水稻不同生育时期土壤无机氮含量的变化规律

基于连续两年的田间监测结果,本研究表明垄作与平作在水稻全生育期内的土壤无机氮动态变化存在显著差异。总体而言,垄作处理下土壤铵态氮含量普遍高于水旱平作,而硝态氮含量则相对较低,这一差异在水稻分蘖期和拔节期尤为明显,表明垄作通过调控关键生育阶段的无机氮形态分布,对稻田氮素供给格局产生重要影响。结合水稻氮吸收特征(图4)可以发现,作物氮需求高峰与土壤无机氮含量快速下降阶段高度一致,说明作物吸收是导致特定生育时期土壤无机氮显著减少的主要驱动力。这一结果进一步印证了作物生长过程对土壤氮素动态的主导作用,尤其是在生育前期,无机氮($NH_4^+$-N 和 $NO_3^-$-N)主要受作物吸收调控,而在生育后期环境因子的影响逐渐增强,并在成熟期占据主导地位(图7),其中,相较于硝态氮,铵态氮对环境因子的响应更为敏感。从

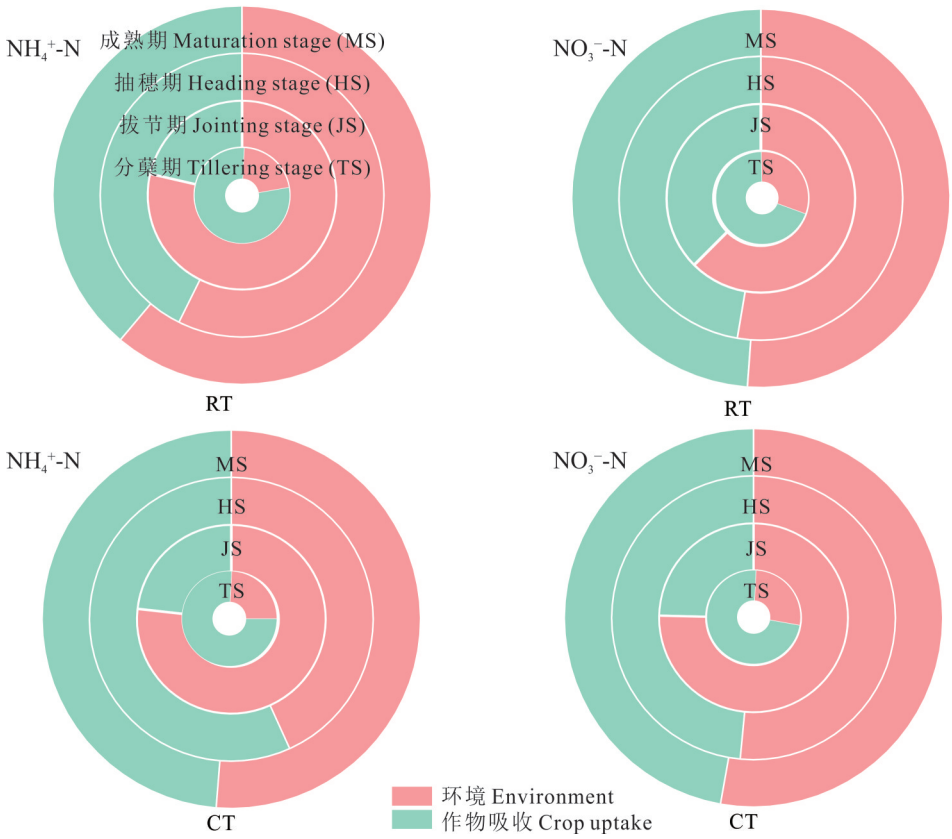



**图7 环境因子与作物吸收对无机氮变化的贡献比例**

**Fig. 7 Contribution proportions of environmental factors and crop uptake to inorganic nitrogen variation**

土壤理化过程角度分析，垄作通过改变地表微地形及土壤水热条件，提高了表层土壤的通气性和孔隙度，从而有利于氨化作用的发生，使 $NH_4^+$-N 在表层土壤中形成短期累积，同时，垄作条件下连续或周期性的排水－保水水分格局在一定程度上抑制了硝态氮在表层土壤中的累积，导致垄面土壤以铵态氮占优势。随着生育时期的推进，土壤铵态氮含量逐渐降低，而硝态氮含量呈现上升趋势，反映出稻田土壤氮素形态随水分和氧化还原条件变化而发生的动态转化。此外，与水旱平作相比，垄作免耕稻田在整个生育时期内保持了相对较高且稳定的土壤含水量和渗透速率，使土壤氧化还原电位维持在适宜范围内，从而稳定了硝化与反硝化过程，减缓了硝态氮的剧烈波动。这一结果与近年来关于垄作、垄沟－覆膜及改良水分管理调控土壤氮循环的研究结论一致[41−42]，表明垄作通过协同调节土壤水分、通气性和氮转化过程，有助于优化稻田无机氮供应格局。

### 3.2 不同耕作模式下无机氮变化对土壤环境条件的响应

土壤水分、温度和盐分状况是影响土壤无机氮转化与累积的关键环境因子，其动态变化直接调控铵态氮和硝态氮的形成、转化及去向。本研究结果表明，垄作免耕通过改变土壤水热条件和盐分分布格局，有利于调节土壤氮素转化过程，使无机氮形态向更有利于作物吸收的方向转变。在水稻拔节期，随着土壤温度的升高，铵态氮含量显著增加。已有研究表明，垄作或垄沟－覆膜等措施可通过提高地表温度和改善局部水分条件，增强微生物活性并改变氮转化速率，常表现为垄顶表层 $NH_4^+$-N 的相对富集及 $NO_3^-$-N 的空间再分配，本研究的观测结果与其一致。以往也有研究中提到，垄作免耕通过改变地表微地形增加了土壤表面积，提高了太阳辐射吸收效率(15%～20%)[43]，使垄作处理表层土壤平均温度较水旱平作提高 0.2～2.0 ℃(图5)，从而为氨化作用及 $NH_4^+$-N 的短期积累提供了有利条件。水旱平作条件下，反复的干湿交替显著改变了土壤的物理、化学和微生物环境，进而重塑无机氮($NH_4^+$-N 与 $NO_3^-$-N)的时空分布及转化，在干燥阶段，土壤含水量降低、通气条件改善，有机底物逐渐积累；随后的复湿过程往往诱发明显的矿化与硝化脉冲，使无机氮在短时间内发生剧烈变化[44]。在较低含水量条件下，厌氧过程受到抑制，而当土壤水分回升至适宜的好氧范围时，硝化作用增强，$NH_4^+$-N 向 $NO_3^-$-N 的转

化速率显著提高[45]，这解释了水旱平作处理中硝态氮波动幅度较大且整体含量高于垄作处理的现象。在0～20 cm表层土壤中，垄作免耕处理下$NH_4^+$-N的年际变幅较大，表明垄作通过改变土层水分分布格局，调控了矿化与硝化过程的强度，从而对无机氮动态产生了显著影响。与此同时，垄作处理的土壤平均电导率低于水旱平作（图5），垄作通过起垄改变耕层微地形和土体结构，提高了土壤孔隙度与水分渗透能力，使盐分更易随水分迁移排出耕层，从而降低了作物根际环境中的盐分浓度并减轻返盐风险。较低的电导率条件有利于维持相对稳定的氮转化环境，抑制过强的硝化与反硝化过程，从而在一定程度上减缓$NH_4^+$-N的消耗并抑制$NO_3^-$-N的过度积累[31]。

综合来看，土壤铵态氮和硝态氮含量随水稻移栽时间的变化可通过二次回归模型较好地描述其总体趋势。尽管部分模型的决定系数（$R^2$）较低（图6），这一现象在农田土壤养分动态研究中较为常见，主要源于土壤无机氮受施肥管理、降水条件、温度变化、微生物矿化与硝化作用以及作物根系吸收等多重因素的共同影响，单一时间变量难以解释其全部变异。需要指出的是，$R^2$反映的是模型对变异的解释程度，而整体显著性检验（$F$ 检验）用于评估模型是否显著优于随机误差模型，在部分处理和年份中，回归模型整体通过显著性检验（$P<0.05$），表明拟合曲线在统计学意义上能够反映土壤无机氮含量随移栽时间变化的总体趋势；对于未通过显著性检验的处理，其结果可能与样本量相对有限（$n=12$）、数据离散性较大以及环境因子干扰等因素有关。未来研究可通过增加采样频次、延长观测周期或引入气象因子与管理措施等变量，以进一步提高模型对土壤无机氮动态变化的解释能力。

## 4　结论

本研究表明，垄作通过构建“垄体偏好好氧－沟区偏好还原”的微域环境，实现了对不同氮素形态的差异化调控，使土壤中有效氮含量（尤其是铵态氮）维持在较高水平，同时通过沟区的截留与反硝化减少了硝态氮的积累与潜在损失；在垄作条件下，水稻根系更容易进入富氧且含氮稳定的土层，提高铵态氮和硝态氮的吸收速率，使同等施肥条件下植株体内的总氮积累更高，从而促进植株生长，提升生物量；在垄作稻田的拔节期和抽穗期，土壤无机氮含量与土壤温度、土壤含水率和土壤电导率的关系更密切，因此，可以在拔节期适当提高追肥中铵态氮肥料占比，将氮肥条施于垄体，减缓肥料向沟区迁移。以上研究结果，可用于指导水稻不同生育时期的精准变量施肥、预测土壤供氮潜力与作物氮素吸收的匹配性，为区域尺度水稻田氮素高效利用及减排措施制定提供科学参考。

## 参考文献 References：


[1] Lu B, Xu C S, Li Z Y, *et al*. Influence of the temperature during grain filling stage and nitrogen application rate on yield and quality of indica hybrid rice. Field Crops Research, 2024, 309: 109333.

[2] Pandey A, Devi L L, Gupta S, *et al*. Jasmonate signaling modulates root growth by suppressing iron accumulation during ammonium stress. Plant Physiology, 2024, 196(4): 2213－2231.

[3] Liu S Y, Chi Q D, Cheng Y, *et al*. Importance of matching soil N transformations, crop N form preference, and climate to enhance crop yield and reducing N loss. Science of the Total Environment, 2019, 657: 1265－1273.

[4] Zhou Y, Sun T, Zhang Y H, *et al*. Effects of nitrogen fertilization levels on matter accumulation and nitrogen uptake in different source and library types of japonica rice. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(11): 2096－2117.
周宇, 孙童, 张艳红, 等. 施氮量对不同源库类型粳稻物质积累与氮素吸收的影响. 中国农业科学, 2025, 58(11): 2096－2117.

[5] Jin Z Q, Tao Y, Yue R, *et al*. Trade-off between grain yield and bioactive substance content of colored rice under coupled water and nitrogen conditions. Field Crops Research, 2024, 309: 109312.

[6] Yan J, Wu Q X, Qi D L, *et al*. Rice yield, water productivity, and nitrogen use efficiency responses to nitrogen management strategies under supplementary irrigation for rain-fed rice cultivation. Agricultural Water Management, 2022, 263: 107486.

[7] Khanam S, Ray K S, Bhuiyan H R, *et al*. Advancing nutrient management in agriculture: Rice straw to nitrogen, phosphorus and potassium-containing hydrogel as slow-release fertilizer. Industrial Crops & Products, 2025, 224: 120380.

[8] Lin Y L, Feng Z, Asano H, *et al*. Genome-wide association study identifies key chromosomal regions in rice promoting the enrichment of diazotrophic iron-reducing bacteria in paddy soil. Plant and Soil, 2025, 514(1): 269－285.

[9] Zhou G D, Wei C L, Li P H, *et al*. Modeling the effect of milk vetch-rice rotation on N runoff loss in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Plants, 2024, 13(22): 3160.

[10] Huang D L Y, Tang B R, Ma Y Y, *et al*. The effect of as on the transformation of nitrogen in paddy soil: A case study towards purple soil. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(5): 784－795.
黄邓铃尧, 唐炳然, 马媛媛, 等. 水稻土中砷对氮素转化的影响: 以紫色土为例. 生态环境学报, 2025, 34(5): 784－795.

[11] Hou Q, Ni Y M, Huang S, *et al*. Effects of substituting chemical fertilizers with manure on rice yield and soil labile nitrogen in paddy fields of China: A meta-analysis. Pedosphere, 2023, 33(1): 172－184.

[12] Zhou L, Rong X M, Xie G X, *et al*. Effects of different nitrogen fertilizers on ammonia volatilization and its dynamic characteristics of double cropping rice. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 143－147.
周亮, 荣湘民, 谢桂先, 等. 不同氮肥施用对双季稻稻田氨挥发及其动力学特性的影响. 水土保持学报, 2014, 28(4): 143－147.

[13] Zhang Y, Zhang Y X, Lv X M, *et al*. Study on physiological mechanism of $NO_3^-$ alleviating $NH_4^+$ stress in wheat. Plant Physiology Journal, 2021, 57(2): 480－492.
张燕, 张云秀, 吕雪梅, 等. $NO_3^-$缓解小麦$NH_4^+$胁迫的生理机制研究. 植物生理学报, 2021, 57(2): 480－492.

[14] Zhang X J, Wei J J, Chen C J, *et al*. Optimization of annual nitrogen fertilizer application to increase the productivity of a forage triticale-silage maize multiple cropping system in an irrigated area. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 38－52.
张晓娟, 魏娇娇, 陈彩锦, 等. 氮肥周年优化对灌区饲用小黑麦-青贮玉米复种系统生产力的影响. 草业学报, 2025, 34(4): 38－52.

[15] Xiao A P, Ma R, Wang B, *et al*. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on seed yield and its components of *Stipa bungeana*. Pratacultural Science, 2026, 43(2): 321－333.
肖爱萍, 马榕, 王斌, 等. 氮磷钾配施对长芒草种子生产性能和发芽特性的影响. 草业科学, 2026, 43(2): 321－333.

[16] Xu G W, Zhao X H, Jiang M M, *et al*. Nitrogen forms and irrigation regimes interact to affect rice yield by regulating the source and sink characteristics. Agronomy Journal, 2021, 113(5): 4022－4036.

[17] Liu H, Wu S J, Chen X R, *et al*. Effects of oxygenation and nitrogen forms on root biological characteristics and cadmium accumulation in rice. Chinese Journal of Ecology, 2024, 44(6): 1971－1979.
刘慧, 吴松瑾, 陈馨睿, 等. 充氧和氮素形态对水稻根系生物学特征及镉累积的影响. 生态学杂志, 2024, 44(6): 1971－1979.

[18] Fu S, Wang Y Q, Liu X M, *et al*. Dry matter,nitrogen accumulation of maize and soil nitrogen in response to different forms of nitrogen fertilizers. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023(4): 122－129.
付帅, 王艳群, 刘晓明, 等. 不同形态氮肥对玉米干物质、氮素积累及土壤氮素的影响. 中国土壤与肥料, 2023(4): 122－129.

[19] Moises C, Andrade H F, Monzon P J, *et al*. Nitrogen deficiency in maize fields of the Southern Pampas does not affect kernel number but reduces weight per kernel. Field Crops Research, 2024, 312: 109394.

[20] Yan E R, Wang X H, Huang J J, *et al*. Decline of soil nitrogen mineralization and nitrification during forest conversion of evergreen broad-leaved forest to plantations in the subtropical area of eastern China. Biogeochemistry, 2008, 89(2): 239－251.

[21] Yin Z Y, Ma L H, Li Z L, *et al*. Impact of high temperature on soil water, heat and salt in purple paddy under different tillage patterns. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(5): 80－91.
尹仲毅, 马黎华, 李兆磊, 等. 高温条件对不同耕作模式紫色水稻土水、热、盐的影响. 草业学报, 2024, 33(5): 80－91.

[22] Xiong Z, Zheng F Z, Wu C, *et al*. Nitrogen supply mitigates temperature stress effects on rice photosynthetic nitrogen use efficiency and water relations. Plants, 2025, 14(6): 961.

[23] Ouyang X J, Zhou G Y, Wei S G, *et al*. Soil organic carbon and nitrogen mineralization during the succession sequence of vegetation restoration in a south subtropical forest. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1688－1694.
欧阳学军, 周国逸, 魏识广, 等. 南亚热带森林植被恢复演替序列的土壤有机碳氮矿化. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1688－1694.

[24] Bai X Y, Li J W, Jiang H B, *et al*. Effects of multiple temperature variations on nitrogen removal and microbial community structure in tidal flow constructed wetlands. Environmental Research, 2024, 266: 120616.

[25] Wang G J, Tian D L, Zhu F, *et al*. Net nitrogen mineralization in soils under four forest communities in Hunan Province. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1607－1615.
王光军, 田大伦, 朱凡, 等. 湖南省4种森林群落土壤氮的矿化作用. 生态学报, 2009, 29(3): 1607－1615.

[26] Song L C, Ma W W, Li G, *et al*. Effects of temperature changes on nitrogen mineralization in soils with different degradation gradients in the Gahai Wetland. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(9): 27－37.
宋良翠, 马维伟, 李广, 等. 温度变化对尕海湿地不同退化梯度土壤氮矿化的影响. 草业学报, 2021, 30(9): 27－37.

[27] Heumann S, Böttcher J. Temperature functions of the rate coefficients of net N mineralization in sandy arable soils. Part Ⅱ.

Evaluation. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167(4): 390－396.

[28] Shrestha D, Masarik K, Kucharik C. Nitrate losses from Midwest US agroecosystems: Impacts of varied management and precipitation. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 78(2): 141－153.

[29] Xu J B. Characteristics of nitrogen migration and transformation and numerical simulation in soils with different salinization degrees under nitrogen application conditions in Xinjiang. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
徐金波. 施氮条件下新疆不同盐碱化程度土壤氮素迁移转化特性及数值模拟. 西安: 西安理工大学, 2023.

[30] Li Y S, Ai Z Y, Mu Y X, *et al*. Rice yield penalty and quality deterioration is associated with failure of nitrogen uptake from regreening to panicle initiation stage under salinity. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1120755.

[31] Musarrat R, Naila S, Liaqat A, *et al*. Nitrogen enriched chemically produced carbon supplementary impacts on maize growth under saline soil conditions. Journal of King Saud University Science, 2023, 35(1): 102292.

[32] Zhang P, Zhang Z Z, Liu X Y, *et al*. Effect of mulching and biochar addition on the distribution and emission characteristics of $N_2O$ from furrow-ridge tillage soils. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118584.

[33] Li H, Zeng S, Luo X W, *et al*. Effects of small ridge-and-furrow mulching degradable film on dry direct-seeded rice. Scientific Reports, 2021, 11(1): 317.

[34] Xu Y G, Feng J Y, Li H S. Water management increased rhizosphere redox potential and decreased Cd uptake in a low-Cd rice cultivar but decreased redox potential and increased Cd uptake in a high-Cd rice cultivar under intercropping. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141701.

[35] Qin C. Study on the mechanism of improving soilnitrogen fertility by combination ridge with no-tillage in paddy field. Chongqing: Southwest University, 2021.
秦川. 稻田垄作免耕提高土壤氮素肥力的作用机制研究. 重庆: 西南大学, 2021.

[36] Xiong Z H, Liu J Q, Ye L, *et al*. Characterization of crop yield and nutrient apparent balance between direct and burning straw return in rice-rapeseed rotation system. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(16): 3293－3303.
熊志豪, 刘君权, 叶琳, 等. 稻油轮作系统秸秆直接还田与焚烧还田的作物产量和养分表观平衡特征. 中国农业科学, 2025, 58(16): 3293－3303.

[37] Zhang P, Wang D M, Zhang Z Z, *et al*. How biochar curbs the negative impacts of plastic mulching on soil enzymes and microorganisms while elevating crop yields in ridge-furrow systems. Environmental Research, 2024, 263(P2): 120155.

[38] Zhang F, Yang Q. Effects of co-utilization of Chinese milk vetch and rice straw on the potassium cycle and potassium balance in paddy soil. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1): 72－80.
张帆, 杨茜. 紫云英与双季稻秸秆协同利用影响稻田土壤钾循环与平衡. 草业学报, 2021, 30(1): 72－80.

[39] Liu H, Jiao Y, Dou W Y, *et al*. Compensation effect and mechanism of nitrogen reduction combined with biochar application on soil fertility and rice yield. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 391－401, 469.
刘慧, 焦岩, 窦婉毓, 等. 减氮配施生物炭对土壤肥力和水稻产量的补偿效应与机制. 农业机械学报, 2024, 55(9): 391－401, 469.

[40] Liu L Y, Feng T J, Xiao H J, *et al*. Response of soil moisture storages and soil carbon stocks to typical patterns of farmland shelterbelt systems in the Hetao Irrigation area, China. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(5): 1495－1510.
刘莉苑, 冯天骄, 肖辉杰, 等. 河套灌区典型农田防护林土壤水碳储量对林带配置的响应. 土壤学报, 2025, 62(5): 1495－1510.

[41] Kun H, Yao G X, Li Z, *et al*. Ridge and furrow cultivation raises water and nitrogen use efficiency and crop climate adaptability. Agricultural Water Management, 2025, 317: 109657.

[42] Yin Z Y. Effects of ridging on water heat transport and nitrogen distribution in paddy soil. Chongqing: Southwest University, 2023.
尹仲毅. 垄作对稻田土壤水热运移及氮素分布的影响. 重庆: 西南大学, 2023.

[43] Zhang C, Dong Z Y, Guo Q, *et al*. Ridge-furrow rainwater harvesting combined with supplementary irrigation: Water-saving and yield-maintaining mode for winter wheat in a semiarid region based on 8-year in-situ experiment. Agricultural Water Management, 2022, 259: 107239.

[44] Wu K K, Li W T, Wei Z B, *et al*. Effects of mild alternate wetting and drying irrigation and rice straw application on $N_2O$ emissions in rice cultivation. Soil, 2022, 8(2): 645－654.

[45] Wang H, Yan Z F, Ju X T, *et al*. Quantifying nitrous oxide production rates from nitrification and denitrification under various moisture conditions in agricultural soils: Laboratory study and literature synthesis. Frontiers in Microbiology, 2023, 13: 1110151.