

多因子协同作用对我国东北地区水稻产量的影响机制

王兆然¹, 杨顺瑛², 翟宏伟³, 王欣⁴, 苏彦华², 齐伟^{1*}

(1 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 211135;
3 黑龙江省方正县水稻研究院, 黑龙江方正 150899; 4 黑龙江省佳木斯市富锦市农业农村局 /
富锦市乡村振兴发展服务中心, 黑龙江富锦 156199)

摘要:【目的】东北地区是我国重要的粮食生产基地。本研究采用整合分析方法 (Meta 分析), 探究农业管理措施与气候因子对寒地水稻产量的协同作用机制, 为区域水稻高产稳产提供理论依据。【方法】基于 Web of Science、PubMed、中国知网 (CNKI)、万方和维普数据库, 以“寒地水稻”“水稻产量”“秸秆还田”“施氮量”“氮循环”为关键词, 检索了 2003—2024 年发表的涉及东北寒地水稻种植的中英文文献, 纳入标准包括: 1) 试验点位于东北三省; 2) 研究包含秸秆还田或氮肥施用的田间试验并设有不还田或不施氮的对照; 3) 数据完整, 提供平均值、标准差 (或标准误) 及重复次数 ($n \geq 3$); 4) 报道水稻产量及至少 1 项土壤理化指标或氮循环基因丰度。最终纳入东北三省 61 个观测点的 175 篇相关文献。其中 154 篇文献的 570 组数据用于量化秸秆还田年限、施氮量、耕作及灌溉方式对水稻产量及土壤理化性质的影响 (随机效应模型); 21 篇文献的 73 组数据用于分析氮循环功能基因与土壤因子的相关性, 以阐明微生物介导机制。【结果】随机森林模型显示, 土壤有机碳 (SOC) 和施氮量是影响水稻产量的主导因子, 贡献率分别为 27.05% 和 24.14%。亚组分析结果显示, 深耕结合覆膜控制灌溉 (PFM-CI) 土壤 SOC 含量和水稻产量分别提升了 20.46% 和 36.24%。在施氮量为 90~180 kg/hm²、秸秆还田量为 6000~9000 kg/hm²、还田年限 5~10 年条件下, 中熟品种的增产效果优于早熟和晚熟品种。硝化与反硝化速率共同调控土壤氮素形态及其有效性, 进而影响寒地水稻产量。相关分析表明, SOC 与反硝化基因 *nosZ* 丰度呈正相关 ($r=0.84$), *nosZ* 丰度与稻田土壤全氮 (TN) 呈极显著正相关 ($r=0.85$, $P<0.001$); SOC 与氨氧化古菌基因 *AOA-amoA* 丰度也呈正相关 ($r=0.22$)。【结论】寒地水稻产量受土壤碳氮含量及微生物转化过程的协同调控。推广深耕结合覆膜控制灌溉模式、优化氮肥与秸秆还田配比, 并选用中熟品种, 是提升东北寒地水稻产量和氮素利用效率的关键策略。

关键词: 水稻产量; Meta 分析; 秸秆还田; 施氮量; 碳氮循环; 功能基因; 东北寒地

Synergistic effects of multiple factors on rice yield in Northeast China

WANG Zhao-ran¹, YANG Shun-ying², ZHAI Hong-wei³, WANG Xin⁴, SU Yan-hua², QI Wei^{1*}

(1 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2 Nanjing Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 211135, China; 3 Rice Research Institute of Fangzheng County, Heilongjiang Province, Fangzheng, Heilongjiang 150899, China; 4 Fujin Agriculture and Rural Bureau / Fujin Rural Revitalization and Development Service Center, Jiamusi, Heilongjiang 156199, China)

Abstract: 【Objectives】Northeast China is a vital grain production region of China. By means of Meta analysis, we studied the synergistic effects of agricultural management practices and climatic factors on rice yield in cold regions, to provide a theoretical basis for high and stable rice production in this area. 【Methods】Literature published from 2003 to 2024 was searched on Web of Science, PubMed, CNKI, WanFang, and VIP databases using the keywords “cold region” or “Northeast China” and “rice yield” or “straw return” or “nitrogen application” or “nitrogen cycle”. The studies were then screened based on the following criteria: 1) Field experiments conducted in the three northeastern provinces of China; 2) Included straw return or nitrogen

收稿日期: 2025-09-04 接受日期: 2025-11-29

基金项目: 国家重点研究计划项目 (2022YFD1500201); 南京土壤研究所“十四五”自主部署项目 (ISSAS2423)。

联系方式: 王兆然 E-mail: wzr2000529@163.com; * 通信作者 齐伟 E-mail: qiwei@sdau.edu.cn

fertilization treatments, with corresponding controls (no straw return or no nitrogen application); 3) Reported complete data with means, standard deviations (SD) or standard errors (SE), and had at least three replicates ($n \geq 3$); 4) Provided rice yield data and at least one indicator of soil properties and/or the abundance of a nitrogen-cycling gene. A total of 175 pieces of literature were acquired from 61 observation sites across the three northeastern provinces. Among these, 570 datasets were extracted from 154 publications, and the effects of straw return duration, nitrogen application rate, tillage, and irrigation methods on rice yield and soil physicochemical properties were quantified using a Random Forest model. Additionally, 73 datasets were obtained from the remaining 21 pieces of literature to examine the correlation between nitrogen-cycling functional genes and soil factors to elucidate the underlying microbially-mediated mechanisms. **【 Results 】** The random forest model identified soil organic carbon (SOC) and nitrogen application rate as the dominant factors influencing rice yield, with contribution rates of 27.05% and 24.14%, respectively. Subgroup analysis revealed that the combination of deep tillage with film mulching and controlled irrigation (PFM-CI) increased SOC content and rice yield by 20.46% and 36.24%, respectively. Under conditions of nitrogen application at 90–180 kg/hm², straw return rates of 6000–9000 kg/hm², and a return duration of 5–10 years, medium-maturing rice varieties exhibited higher yield increases compared with early- and late-maturing varieties. The interaction between nitrification and denitrification processes regulated soil nitrogen forms and availability, thereby significantly affecting rice yield in cold regions. Correlation analysis showed that SOC was positively correlated with the abundance of the denitrification gene *nosZ* ($r=0.84$), and the abundance of *nosZ* was significantly positively correlated with total nitrogen (TN) content in the anaerobic paddy soils ($r=0.85$, $P<0.001$). SOC also showed a positive correlation with the abundance of the ammonia-oxidizing archaeal gene *AOA-amoA* ($r=0.22$). **【 Conclusions 】** Rice yield in cold regions is jointly regulated by soil carbon and nitrogen contents as well as microbial transformation processes. Adopting the deep tillage combined with film mulching and controlled irrigation (PFM-CI) mode, optimizing the nitrogen fertilizer-to-straw return ratio, and selecting medium-maturing varieties are key strategies for enhancing rice yield and nitrogen use efficiency in the cold regions of Northeast China.

Keywords: rice yield; meta-analysis; straw return; nitrogen application rate; C-N cycle; functional genes; cold region of Northeast China

东北地区是我国重要的粮食生产基地, 其中黑龙江省粮食总产量连续 15 年位居全国第一, 被称为“中国粮食安全的压舱石”。黑龙江、吉林和辽宁三省寒地水稻的种植面积和总产均居全国首位, 在保证口粮安全战略中具有不可替代的地位^[1]。然而, 该地区气候寒冷、积温不足、土壤冻结期长等自然条件, 严重限制了土壤养分转化与水稻高产潜力的发挥^[2–3]。土壤有机碳 (SOC) 和氮素是衡量土壤肥力的核心指标, 二者通过影响土壤结构、养分供应及微生物活性, 共同调控作物的生长发育^[4–5]。研究表明, 在寒地生态系统中, 低温不仅抑制土壤微生物活性, 还显著降低 SOC 矿化和氮转化速率, 进一步加剧了水稻高产与水肥资源高效利用之间的矛盾^[6–7]。

秸秆还田与氮肥施用是改善土壤肥力、提升作物产量的重要农业管理措施^[8]。然而, 其效应受到还田方式、氮肥用量、耕作制度及气候因子等多重因素的交互影响^[9–10]。近年来, 黑土有机质下降问题已

得到广泛关注; 而秸秆还田被认为是阻控黑土有机质退化、维系农田可持续性的必要措施。在积温限制的寒地稻作区, 秸秆还田条件下多因子协同作用机制、土壤-微生物-作物系统的级联响应与反馈机制, 以及这一模式对水稻产量的中-长期效应等都是亟待明晰的科学问题^[11]。

Meta 分析作为一种高效的统计方法, 能够整合大量独立研究结果以揭示潜在规律, 尤其适用于多因子互动与非线性响应等复杂农业生态问题的研究^[12]。目前, 针对东北寒地水稻生产系统中碳氮循环阈值效应及其微生物驱动机制的研究仍存在不足。为此, 本研究进一步分析氮循环功能基因丰度及其与土壤理化因子的关系, 以深化微生物对碳氮协同作用驱动机制的认识^[13]。

本研究通过整合 2003—2024 年东北寒地水稻区公开发表的文献数据, 运用 Meta 分析、随机森林模型及结构方程模型等方法, 旨在: 1) 量化秸秆还

田、施氮量、耕作与灌溉方式等对水稻产量及土壤肥力的综合效应; 2) 阐明氮循环关键功能基因与土壤因子的耦合关系, 从微生物途径揭示碳氮协同机制; 3) 明确多因子互作对寒地水稻产量的贡献, 并提出优化调控路径, 梳理适合寒地水稻可持续高产和养分高效利用的综合管理模式。

1 材料与方法

1.1 文献检索与筛选

基于 Web of Science、PubMed、中国知网 (CNKI)、万方和维普数据库, 系统检索 2003—2024 年发表的涉及东北寒地水稻种植的中英文文献。中英文检索词分别包括: “寒地水稻” “水稻产量” “秸秆还田” “施氮量” “氮循环”, 英文检索式为 (“cold region” OR “Northeast China”) AND (“rice yield” OR “straw return” OR “nitrogen application” OR “nitrogen cycle”)。文献筛选遵循预设的纳入与排除标准^[14]。纳入标准包括: 1) 试验位于东北三省; 2) 研究包含秸秆还田或氮肥施用的田间试验并设有不还田或不施氮的对照; 3) 数据完整, 提供平均值、标准差 (或标准误) 及重复次数 ($n \geq 3$); 4) 报道水稻产量及至少一项土壤理化指标或氮循环基因丰度。排除标准包括: 1) 重复发表的文献; 2) 数据不全或无法获取有效数据的文献; 3) 非田间试验或研究类型不符的文献 (如综述、会议摘要等); 4) 未设置合理对照或样本量不足 ($n < 3$) 的研究。

关键词初级检索共获得文献 943 篇。经逐层筛选, 最终纳入 175 篇符合上述检索标准的文献用于 Meta 分析。其中, 154 篇文献 (570 组数据) 用于分析管理措施对产量及土壤理化性质的影响, 21 篇文献 (73 组数据) 用于分析功能基因与土壤理化指标间的相关性。

1.2 数据提取与处理

从符合要求的文献中提取以下信息: 1) 文献基本信息 (作者、发表年份); 2) 试验点信息 (地点、年份); 3) 田间管理措施 (秸秆还田量及年限、施氮量、耕作方式、灌溉模式、水稻品种); 4) 结果数据, 水稻产量 (yield), 土壤理化指标包括有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、碱解氮 (AN)、容重 (BD)、pH、碳氮比 (C/N)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、电导率 (EC), 及功能基因丰度的均值、标准差 (SD) 或标准误 (SE) 和重复次数 (n)。所有原始数据优先从文献表格中直接获取。图表数据采用 GetData Graph digitizer 软件

(<http://www.getdata-graph-digitizer.com/>) 提取, 该软件提取数值与原始数据的平均相对误差通常可控制在 1% 以内, 具有较好可靠性。若文献仅提供标准误 (SE), 则通过公式 $SD = SE \sqrt{n}$ 转化为标准差 (SD)^[15]。对于 $n > 3$ 但未报告变异信息的文献, 使用 R 语言 “metagear” 包估算标准差。

1.3 Meta 分析效应值计算与统计分析

根据处理组和对照组的均值计算响应比 (response ratio, R), 并以其自然对数 (lnR) 作为效应值。效应值的正、负则分别代表正面和负面效应。计算公式^[16]如下:

$$R = \frac{X_t}{X_c} \quad (1)$$

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) = \ln(X_t) - \ln(X_c) \quad (2)$$

式中, X_t 和 X_c 分别表示处理组和对照组的均值。效应值 (lnR) 的方差 (v_i) 基于重复数 (n) 和标准差 (SD) 计算, 计算公式如下:

$$v_i = \frac{SD_t^2}{n_t \times X_t^2} + \frac{SD_c^2}{n_c \times X_c^2} \quad (3)$$

式中, SD_t^2 和 SD_c^2 分别为处理组和对照组的标准差, n_t 和 n_c 分别为处理组和对照组的重复数 (样本量)。每个效应量的权重 (ω) 由其方差的倒数决定。使用方程式 (4) 计算效应值的权重^[17]:

$$\omega = \frac{1}{v_i} \quad (4)$$

首先采用 MetaWin 2.1 软件对效应量进行合并, 并计算 95% 置信区间 (confidence interval, CI)^[18]。随后利用 GraphPad Prism 10 软件基于上述结果绘制森林图。若 95% CI 不包含 0, 表明处理效应在 0.05 水平上显著^[19]。

通过 Q 统计量 (及其对应的组间异质性统计量 Q_b) 和 I^2 指数评估异质性。若 $I^2 > 50\%$ 且 Q 检验 $P < 0.05$, 表明存在显著异质性。其中, Q_b 统计量用于亚组分析, 其显著性 ($P < 0.05$) 表明不同亚组间效应量存在统计学差异, 即该分组因素是异质性的重要来源。本研究基于秸秆还田年限、施氮量、耕作方式及灌溉方式等因子进行亚组分析, 以探寻异质性来源。

使用 R 语言 “Random Forest” 包进行随机森林分析, 以评估各环境因子对水稻产量的相对贡献率。采用结构方程模型 (SEM, Amos Graphics 软件) 综合分析田间管理措施与土壤 SOC、AN 和 TN 及其水稻

产量间的路径关系,模型拟合优度通过多个统计指标进行评价:卡方检验的 P 值为 0.361 (>0.05),表明模型与观测数据的协方差矩阵无显著差异; Tucker-Lewis 指数 (TLI) 和比较拟合指数 (CFI) 分别为 0.98 和 0.99 (均 >0.90 的理想标准),说明模型拟合优良;拟合优度指数 (GFI) 为 0.97 (>0.90),表明模型能解释绝大部分数据方差;近似均方根误差 (RMSEA) 为 0.039 (<0.05),反映模型的近似误差极低。综上所述,所有拟合指标均达到理想标准,表明模型拟合良好。

2 结果与分析

2.1 研究区站点分布

本研究数据集涵盖了东北三省主要水稻种植区 (图 1),包括黑龙江省、吉林省和辽宁省的 61 个观测点,其地理分布具有良好的区域代表性。

2.2 水稻产量与环境变量的关系

基于 570 组数据的随机效应 Meta 回归分析结果 (图 2) 表明,土壤碱解氮与水稻产量呈极显著正相关 ($P<0.001$),土壤有机碳与水稻产量呈显著正相关 ($P<0.05$)。全氮、碳氮比和铵态氮与产量均呈显著正相关 ($P<0.05$);土壤容重与产量呈显著负相关 ($P<0.05$);电导率与产量呈极显著负相关 ($P<0.001$)。进一步分析发现,土壤 pH 与产量之间存在非线性关系 (图 2f)。回归模型拟合结果表明,当 pH 值在 6.5~7.5 范围内时,对产量的促进效应最为明显;而

超出该范围,无论过酸或过碱均对产量产生不利影响。尽管东北黑土区农田土壤 pH 普遍处于该适宜范围,但本研究进一步明确,即使在普遍适宜的 pH 背景下,寻求更优的微域 pH 值对于寒地水稻产量的进一步提升仍具有重要意义。

2.3 水稻产量单因素效应分析

2.3.1 还田年限 秸秆还田是保证土壤有机碳收支平衡和提高土壤有机质含量的重要措施。本研究基于 276 组有效数据,分析了不同秸秆还田年限下的水稻产量及土壤碱解氮、有机碳、全氮和容重等土壤理化因子效应值的变化 (图 3)。异质性检验结果显示,组间异质性显著 ($Q_b=12.6326$, $P<0.05$),表明秸秆还田年限是调控产量和相关土壤指标响应差异的重要因子。具体而言,在 3~5 年与 5~10 年两个阶段,秸秆还田对水稻产量及土壤碱解氮、有机碳和全氮含量均表现出显著正效应,各指标效应值的 95% 置信区间 (CI) 均不包含 0。从各亚组效应值的变化趋势看,响应程度随还田年限增加呈先上升后下降的趋势,并在 5~10 年时段达到峰值。该时段各指标的效应值分别为:水稻产量, 0.2532 [95%CI (0.2072, 0.2992)]; 碱解氮, 0.0894 [95%CI (0.0382, 0.1406)]; 土壤有机质, 0.1101 [95%CI (0.0999, 0.2189)]; 全氮, 0.1017 [95%CI (0.0551, 0.1583)]。

与养分指标不同,长期秸秆还田 (>10 年) 对土壤容重的效应值为负,表明长期秸秆还田显著降低土壤容重,故有利于改善土壤物理结构。然而短期还田 (<5 年) 对土壤容重的影响并不显著,表明秸秆还田对土壤物理性质的改良效应可能需要更长时间才能显现。综上所述,秸秆还田年限对土壤物理性质的影响存在显著阈值效应:5~10 年的秸秆还田可显著提升土壤养分有效性并促进水稻增产;而土壤物理结构的改善则需较长的秸秆还田期限 (>10 年)。

2.3.2 不同熟期水稻品种 基于 95% 置信区间 (CI) 的合并效应值分析表明,秸秆还田处理可显著提高不同熟期水稻品种的产量及土壤理化指标 (碱解氮、有机碳、全氮) 含量 (各指标效应值的 95% CI 均不包含 0),并显著降低土壤容重 (效应值的 95% CI 不包含 0)。这表明,连续秸秆还田对改善土壤肥力具有显著的促进作用。具体来看,中熟品种产量对秸秆还田的响应最为显著,效应值为 0.2846 [95%CI (0.2451, 0.3141)],且土壤容重效应值为 -0.0478 [95%CI (-0.1196, -0.0121)],变化相对较大 (图 4)。土壤肥力指标同步改善,秸秆还田通过驱动土壤有

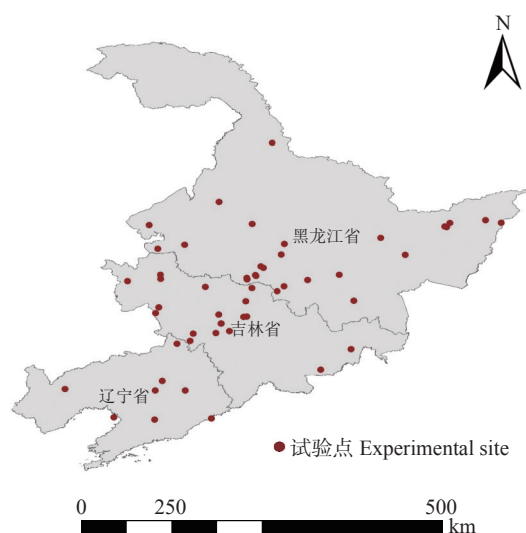


图 1 本研究中试验点分布

Fig. 1 Spatial distribution of experimental sites in this study

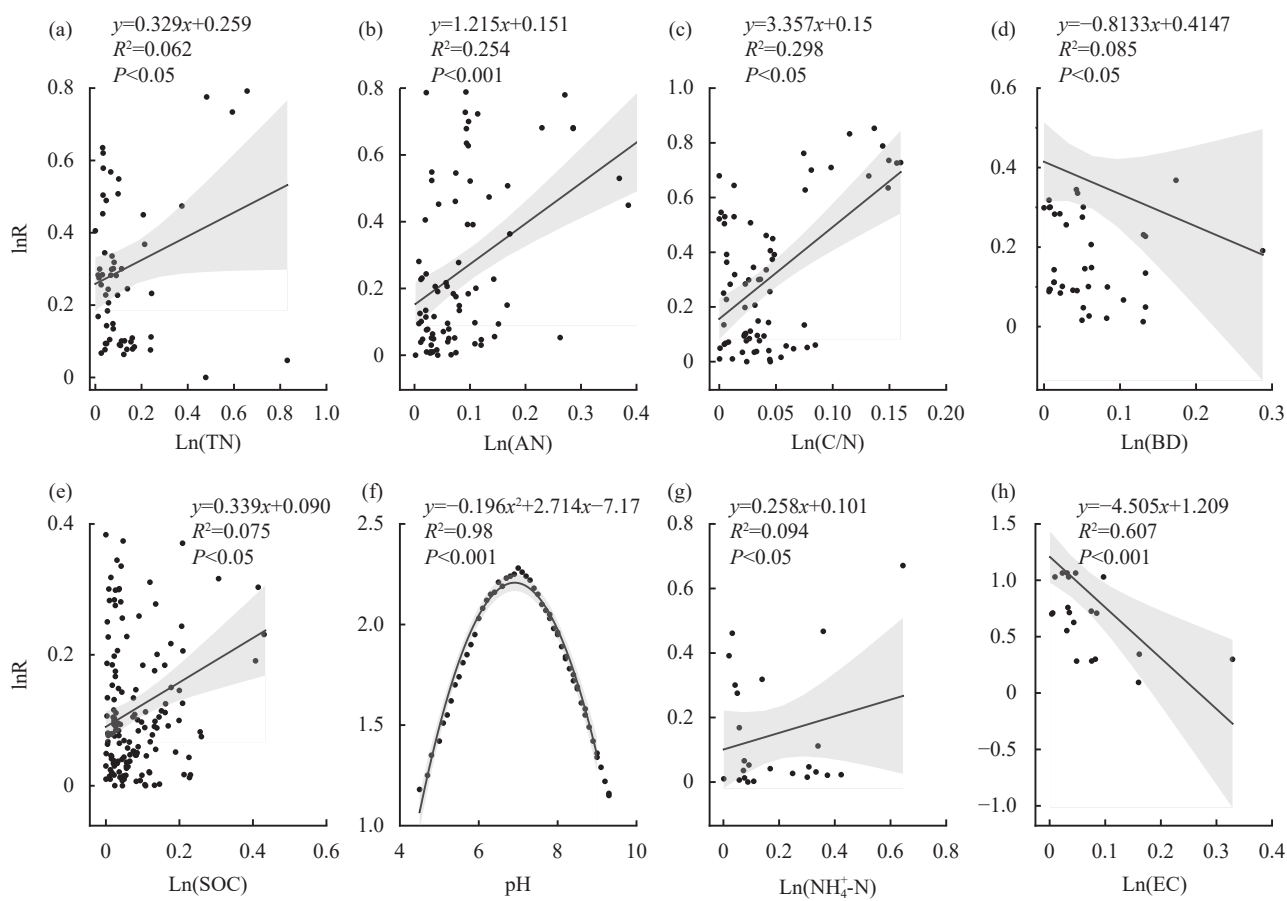


图 2 土壤理化性质对数与水稻产量效应值 ($\ln R$) 的回归关系

Fig. 2 Regression relationships between Logarithm of soil physicochemical properties and the effect size ($\ln R$) of rice yield

注: 灰色区域表示效应值的 95% 置信区间; TN—全氮; AN—碱解氮; C/N—碳氮比; BD—容重; SOC—土壤有机碳; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ —铵态氮; EC—电导率。

Note: The gray area represents the 95% confidence interval of the effect size. TN—Total nitrogen; AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; C/N—Carbon-nitrogen ratio; BD—Bulk density; SOC—Soil organic carbon; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ —Ammonium nitrogen; EC—Electrical conductivity.

机碳积累, 增强了土壤阳离子交换能力, 进而提升了氮素供应能力及其缓冲性能。是秸秆还田促进水稻增产的重要机制。

2.3.3 耕作方式 耕作方式通过调控土壤理化性质而间接影响水稻产量。分析秸秆还田条件下不同耕作方式对水稻产量及土壤理化指标的影响 (图 5), 包括深耕、旋耕与免耕 3 种耕作方式。从效应值来看, 深耕模式在水稻产量及土壤碱解氮、土壤有机碳和全氮方面均表现出最高的正效应, 其效应值分别为 0.2726 [95%CI (0.1977, 0.3475)]、0.0836 [95%CI (0.0709, 0.0963)]、0.0954 [95%CI (0.0717, 0.1191)] 和 0.2726 [95%CI (0.1969, 0.3483)]。旋耕次之, 免耕的效应值最低。从土壤容重效应值的变化来看, 旋耕显著降低土壤容重, 效应值为 -0.0319 [95%CI (-0.0410, -0.0199)]; 而深耕和免耕对土壤容重的影响不显著, 效应值分别为 -0.0415 [95%CI (-0.1553,

0.0412)] 和 -0.0112 [95%CI (-0.0811, 0.0412)]。综合以上分析, 深耕模式在提升秸秆还田的增产和土壤培肥效应方面潜力最大。

2.3.4 灌溉方式 为探究不同灌溉方式下水稻产量及土壤理化性质对秸秆还田措施的响应, 本研究整合了 229 组长期待定位试验数据, 对传统淹水灌溉 (continuous flooding irrigation, CFI)、控制灌溉 (controlled irrigation, CI, 70%~80% CFI)、覆膜控制灌溉 (plastic film mulching with controlled irrigation, PFM-CI) 和干湿交替灌溉 (alternate wetting and drying, AWD) 4 种方式进行分析 (图 6)。其中 PFM-CI 的产量效应值最高, 为 0.2595 [95%CI (0.1586, 0.3975)], 对土壤碱解氮、有机碳、全氮的促进效应也最高, 其效应值分别为 0.1227 [95%CI (0.0819, 0.1435)]、0.2101 [95%CI (0.1758, 0.2444)]、0.1610 [95%CI (0.1100, 0.2070)], 具体而言, 深耕结合覆膜控制灌

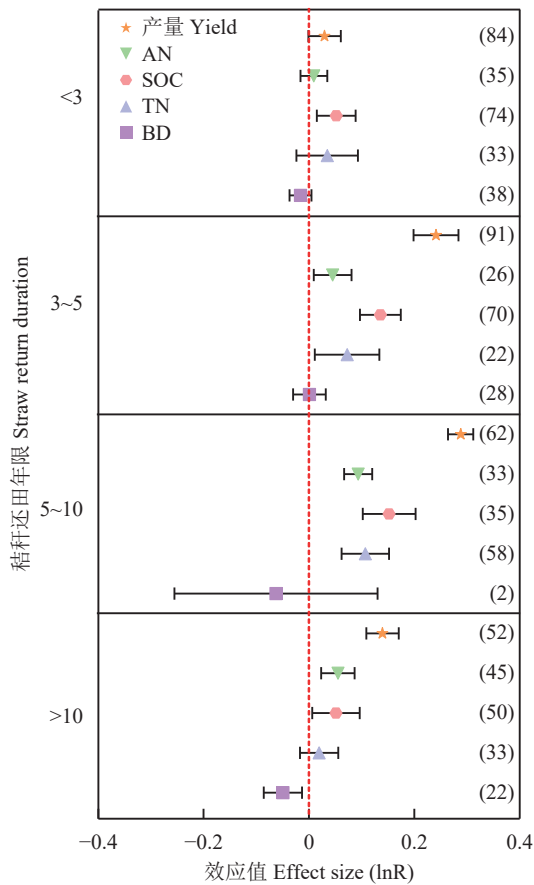


图3 不同秸秆还田年限对水稻产量及土壤理化指标的影响

Fig. 3 Effects of different straw return duration on rice yield and soil physicochemical properties

注：虚线表示效应值为0的参考线。AN—碱解氮；SOC—土壤有机碳；TN—全氮；BD—容重。括号中的数字表示样本量。土壤样品取自0—20 cm深度。

Note: The dotted line indicate $\ln R=0$, which is used to determine the direction and significance of the effect (effects are not significant when the 95% confidence interval overlaps zero). AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen; BD—Bulk density. Numbers in parentheses indicate sample size. Soil samples were taken from a depth of 0–20 cm.

溉 (PFM-CI) 土壤 SOC 含量和水稻产量分别提升了 20.46% 和 36.24%。AWD 和 CI 次之，均显著优于传统 CFI 灌溉模式。同时，PFM-CI 和 CI 有助于降低土壤容重 (BD)，而传统淹水灌溉则表现出一定的土壤压实效应。由以上分析可知，不同灌溉方式对水稻产量和土壤肥力属性的总体效应规律为：PFM-CI > CI ≈ AWD > CFI'。

2.3.5 秸秆还田量和还田方式 基于 276 组长期待试验数据，分析秸秆还田量及还田方式对水稻产量和土壤理化性质的影响。从总体效应看，秸秆还田对水稻产量和土壤碱解氮、有机碳、全氮含量均表现出正向效应，同时对土壤容重表现为负效应（即

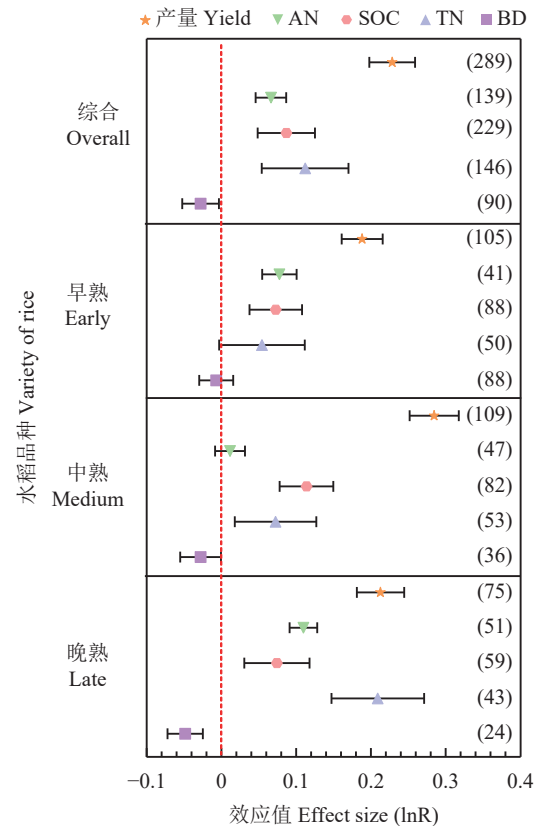


图4 不同水稻品种对水稻产量及土壤理化性状的影响
Fig. 4 Effects of different rice varieties on rice yield and soil physicochemical properties

注：虚线表示效应值为0的参考线。AN—碱解氮；SOC—土壤有机碳；TN—全氮；BD—容重。括号中的数字表示样本量。土壤样品取自0—20 cm深度。

Note: The dotted line indicate $\ln R=0$, which is used to determine the direction and significance of the effect (effects are not significant when the 95% confidence interval overlaps zero). AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen; BD—Bulk density. Numbers in parentheses indicate sample size. Soil samples were taken from a depth of 0–20 cm.

降低容重)。在不同还田量水平下，当还田量为 6000~9000 kg/hm² 时，各指标的效应值最高 (图 7a)，分别为：水稻产量，0.3163 [95%CI (0.2609, 0.3413)]; 土壤碱解氮，0.0894 [95%CI (0.0722, 0.1066)]; 有机碳，0.1313 [95%CI (0.1032, 0.1594)]; 全氮，0.1736 [95%CI (0.1311, 0.2161)]; 土壤容重，-0.0237 [95%CI (-0.0396, -0.0078)]。秸秆还田量 > 9000 kg/hm² 时，效应值反而有所降低，可能是由于秸秆量过大，C/N 比失衡，而发生微生物与水稻“争氮”现象，消耗了土壤中的碱解氮和全氮，不利于水稻增产。由 (图 7b) 可见，在不同还田方式中，经堆沤或家畜过腹后的秸秆间接还田 (IR)，提升水稻产量及土壤碱解氮、有机碳、全氮和容重 (负值) 的效应均优于传统的翻压还田 (SI) 和覆盖还田 (MR)。其中

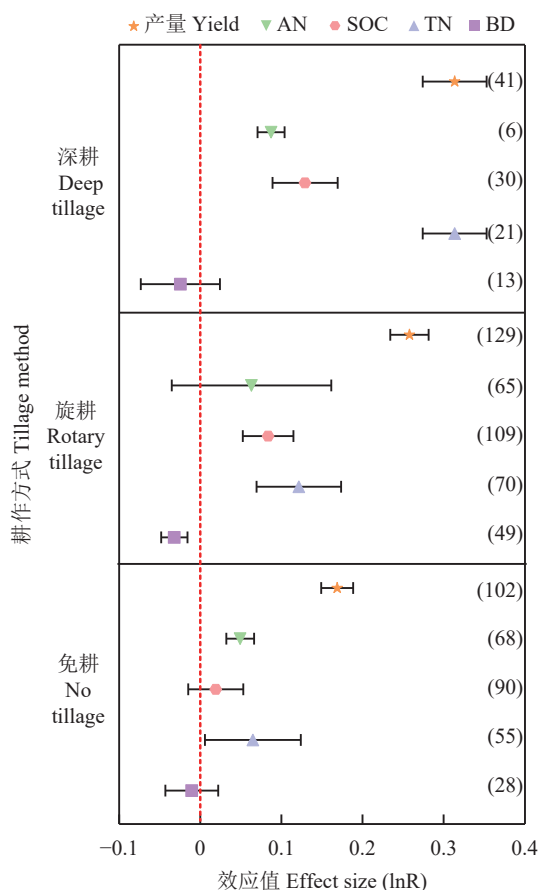


图5 不同耕作方式下水稻产量及土壤理化性状的变化
Fig. 5 Changes of rice yield and soil physicochemical properties under different tillage methods

注: 虚线表示效应值为0的参考线。AN—碱解氮; SOC—土壤有机碳; TN—全氮; BD—容重。括号中的数字表示样本量。土壤样品取自0—20 cm深度。

Note: The dotted line indicate $\ln R=0$, which is used to determine the direction and significance of the effect (effects are not significant when the 95% confidence interval overlaps zero). AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen; BD—Bulk density. The numbers in parentheses indicate the sample size. Soil samples were taken from a depth of 0–20 cm.

覆盖还田的效果最差。因此, 通过堆沤或过腹处理等的秸秆还田是提高其增碳和补充矿质养分的必要措施。

2.3.6 施氮量的影响 通过对289组数据分析发现, 氮肥施用是保证水稻产量和维持土壤肥力的重要措施。在东北稻田中, 施氮量为90~180 kg/hm²时, 水稻产量及土壤碱解氮、有机碳、全氮和容重的效应值均为最高(图8), 分别为0.2767 [95%CI (0.2617, 0.2917)]、0.0875 [95%CI (0.0711, 0.1039)]、0.0977 [95%CI (0.0642, 0.1312)]、0.1242 [95%CI (0.0681, 0.1803)] 和-0.0280 [95%CI (-0.0478, -0.0082)]。当施氮量低于90 kg/hm²时, 水稻产量和

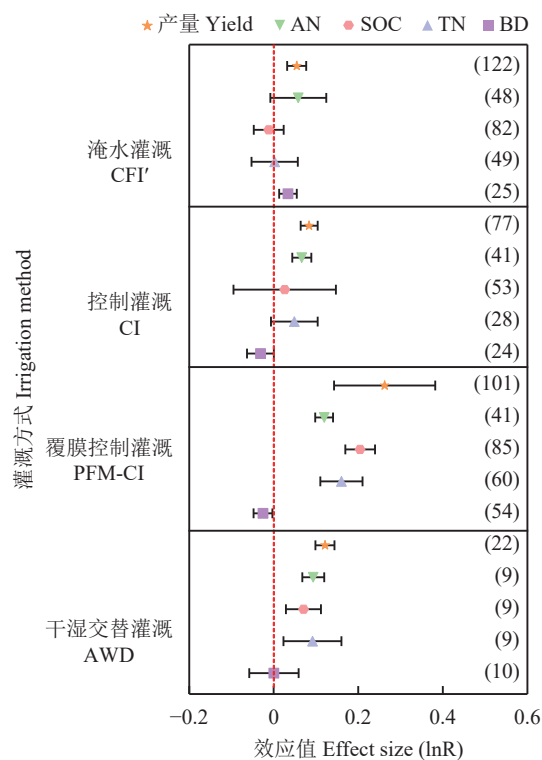


图6 不同灌溉方式对水稻产量及土壤理化性质的影响
Fig. 6 Effects of different irrigation methods on rice yield and soil physicochemical properties

注: 虚线表示效应值为0的参考线。AN—碱解氮; SOC—土壤有机碳; TN—全氮; BD—容重。括号中的数字表示样本量。土壤样品取自0—20 cm深度。

Note: The dotted line indicate $\ln R=0$, which is used to determine the direction and significance of the effect (effects are not significant when the 95% confidence interval overlaps zero). AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen; BD—Bulk density. PFM-CI—Mulching controlled irrigation; AWD—Alternating wet and dry irrigation; CI—Controlled irrigation; CFI'—Flooded irrigation. The numbers in parentheses indicate the sample size. Soil samples were taken from a depth of 0–20 cm.

土壤指标的效应值均未达到最优, 说明氮素供应不足限制了水稻产量和土壤养分的提升。当施氮量>180 kg/hm²时, 东北水稻的产量效应值降至0.2021 [95%CI (0.1835, 0.2207)], 表明较高的施氮量并不利于寒地水稻产量的进一步提高。

2.3.7 活动积温的影响 活动积温是指作物在某一生长时段或整个生长季内逐日平均温度≥10℃的温度累积总和。该气候因子对区域作物布局和熟制起决定作用^[20]。东北寒地水稻生产通常需满足最低活动积温>2100℃, 基于289组相关数据, 分析水稻产量及土壤指标在3个不同活动积温梯度(2100℃~2500℃、2500℃~2800℃和>2800℃)下对秸秆还田措施的响应特征(图9)。积温对土壤容重的影响不显著。在2500℃~2800℃积温范围内, 各项指标(除

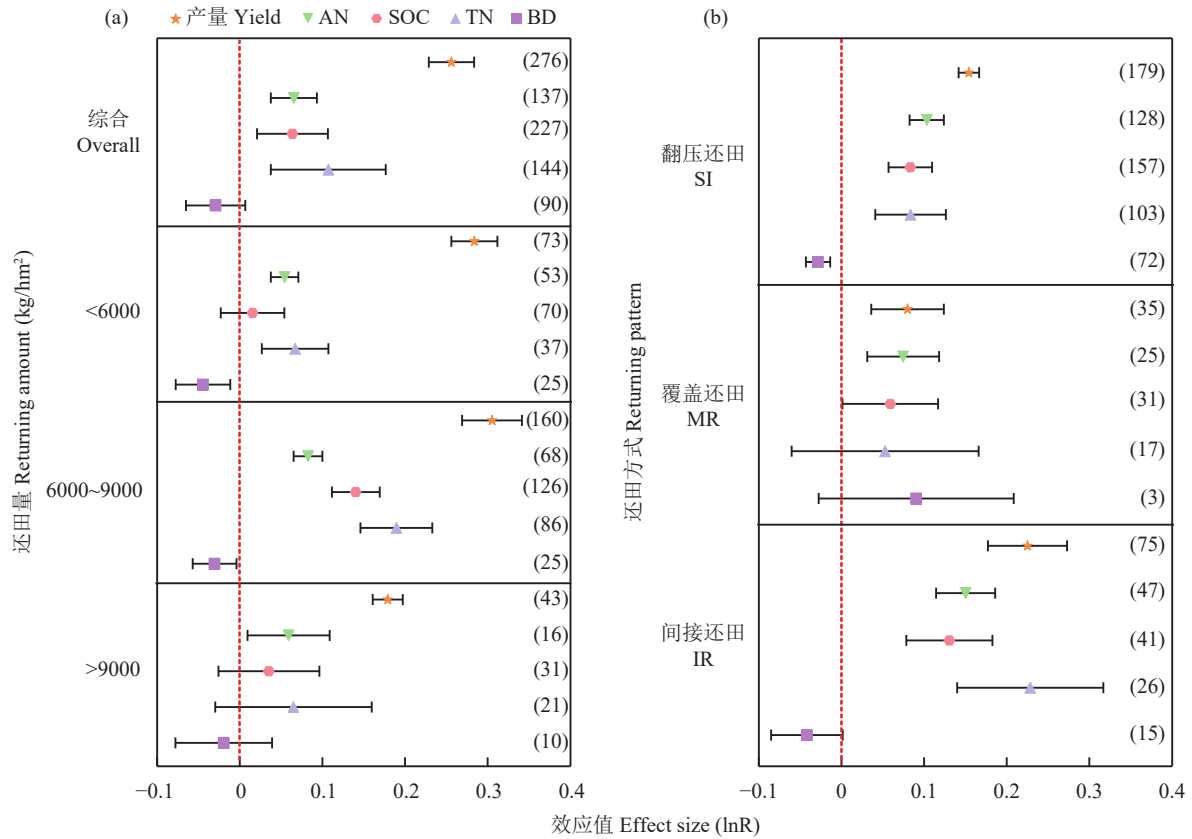


图 7 秸秆还田量 (a) 与还田方式 (b) 对水稻产量及土壤理化指标的影响

Fig. 7 Effects of straw returning amount (a) and returning method (b) on rice yield and soil physicochemical indices

注：虚线表示效应值为 0 的参考线。AN—碱解氮；SOC—土壤有机碳；TN—全氮；BD—容重。括号中的数字表示样本量。土壤样品取自 0—20 cm 深度。

Note: The dotted line indicate $\ln R=0$, which is used to determine the direction and significance of the effect (effects are not significant when the 95% confidence interval overlaps zero). SI—Incorporation into soil; MR—Mulching return; IR—Indirect return. AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen; BD—bulk density. The numbers in parentheses indicate the sample size. Soil samples were taken from a depth of 0–20 cm.

土壤容重外) 均表现出最为显著的正效应, 效应值分别为: 水稻产量, 0.2004 [95%CI (0.1801, 0.2207)]; 碱解氮, 0.1605 [95%CI (0.1448, 0.1762)]; 有机碳, 0.1030 [95%CI (0.0570, 0.1490)] 和全氮, 0.1636 [95%CI (0.0995, 0.2277)]。表明积温并非越高越好, 在 2500 °C ~ 2800 °C 积温条件下的东北寒地稻作区, 实施秸秆还田最有利于实现高产与培肥土壤的协同目标。

2.4 微生物功能基因与土壤因子的耦合关系

nirK、*nirS* 和 *nosZ* 基因是影响反硝化速率的关键基因, 丰度受 NO_3^- -N、全氮及土壤 pH 等环境因素的调控。由相关性分析结果 (图 10) 可知, NO_3^- -N 含量与 *nirK* 基因的表达呈显著正相关 ($r=0.42$, $P<0.05$), 全氮含量与 *nirS* 基因丰度呈显著正相关 ($r=0.16$, $P<0.05$), 全氮含量与 *nirZ* 基因丰度呈显著正相关 ($r=0.85$, $P<0.001$), 优化反硝化速率, 而土壤

pH 对 *nirS* 基因丰度呈负相关 ($r=-0.45$)。土壤有机碳与 *nosZ* 基因丰度呈正相关 ($r=0.84$), 有机碳的增加通过为反硝化细菌提供充足的碳源, 促进 *nosZ* 基因表达, 从而减少氮素损失, 提高水稻产量^[21]。已有研究表明, *nirS* 和 *nosZ* 基因丰度与反硝化速率呈显著正相关, 全氮通过调节 *nosZ* 基因丰度间接影响反硝化速率^[22]。

另外, AOA-*amoA* 和 AOB-*amoB* 是影响硝化速率的关键基因^[23], 其丰度受土壤 NH_4^+ -N、碱解氮、C/N 和 pH 等因素的影响^[24]。结果显示, 土壤容重与 AOA-*amoA* 和 AOB-*amoB* 的基因丰度均呈负相关 ($r=-0.08$; $r=-0.72$), 而有机碳与 AOA-*amoA* 丰度呈正相关 ($r=0.22$), 表明低土壤容重和高有机碳协同作用, 能够增强 AOA-*amoA* 和 AOB-*amoB* 基因的活性, 从而加速铵态氮转化为硝态氮。AOA-*amoA* 基因丰度与 NH_4^+ -N 呈显著正相关 ($r=0.65$, $P<0.01$),

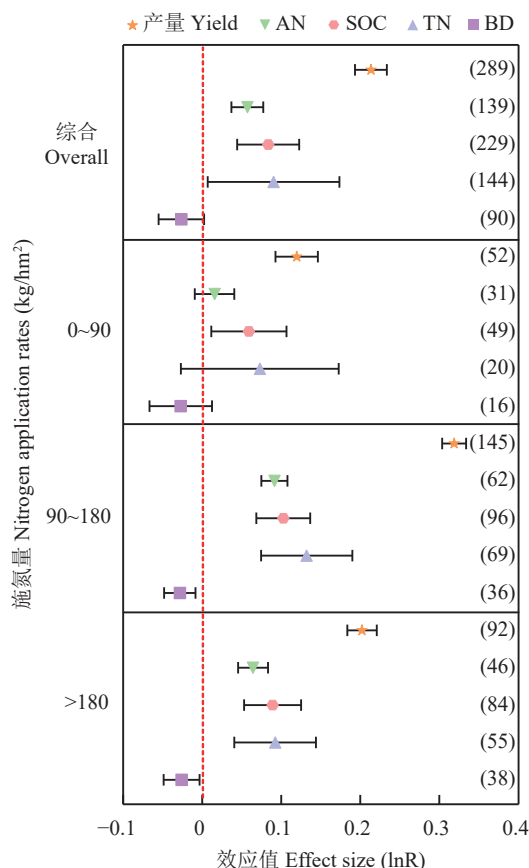


图 8 不同施氮水平对水稻产量及土壤理化指标的影响

Fig. 8 Effects of different nitrogen application levels on rice yield and soil physicochemical properties

注: 虚线表示效应值为 0 的参考线。AN—碱解氮; SOC—土壤有机碳; TN—全氮; BD—容重。括号中的数字表示样本量。土壤样品取自 0—20 cm 深度。

Note: The dotted line indicate $\ln R=0$, which is used to determine the direction and significance of the effect (effects are not significant when the 95% confidence interval overlaps zero). AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen; BD—Bulk density. The numbers in parentheses indicate the sample size. Soil samples were taken from a depth of 0–20 cm.

而 AOB-*amoB* 的基因丰度与碱解氮呈显著正相关 ($r=0.62$, $P<0.001$)。土壤 pH 在一定范围内对硝化速率亦有重要调控作用。

2.5 多因子贡献与路径分析

通过随机森林模型对上述秸秆还田 (包括还田量和方式)、品种、灌溉方式、年平均活动积温 (MAT)、土壤有机碳、土壤碱解氮、全氮、pH、C/N 比、施氮量以及土层深度等因子对水稻产量的相对贡献率 (relative importance, RI) 进行综合分析 (图 11a)。结果表明, 土壤有机碳对水稻产量的影响最大 (RI=27.05%), 其次为施氮量 (RI=24.14%), 二者共解释了 51.19% 的产量变异, 是驱动水稻产量变化的主要因素。这与刘俊杰等^[25]的研究结论一致。进一步分析

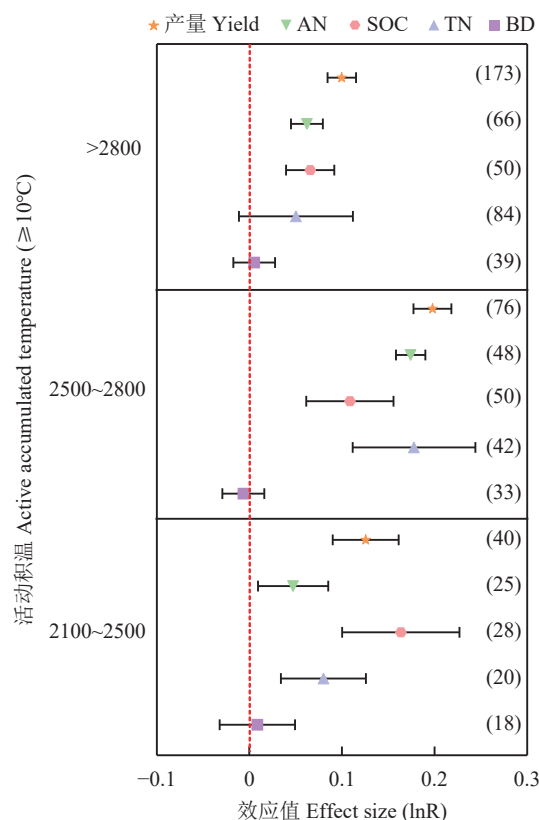


图 9 不同活动积温对水稻产量及土壤理化性质的影响

Fig. 9 Effects of different accumulated temperatures on rice yield, soil physicochemical properties

注: 虚线表示效应值为 0 的参考线。AN—碱解氮; SOC—土壤有机碳; TN—全氮; BD—容重。括号中的数字表示样本量。土壤样品取自 0—20 cm 深度。

Note: The dotted line indicate $\ln R=0$, which is used to determine the direction and significance of the effect (effects are not significant when the 95% confidence interval overlaps zero). AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; SOC—Soil organic carbon; TN—Total nitrogen; BD—Bulk density. The numbers in parentheses indicate the sample size. Soil samples were taken from a depth of 0–20 cm.

表明, 土壤理化因子 (soil variables, SV; RI=39.57%) 是影响水稻产量的首要因素, 其次为管理措施 (RI=24.17%) 和气候因素 (RI=17.39%)。土壤类型和水稻熟制类型 (早、中、晚熟水稻) 等其他因素对水稻产量也有一定影响 (RI=14.14%)。

采用结构方程模型分析耕作、秸秆还田、灌溉和氮肥施用等管理措施与土壤有机碳、全氮和碱解氮及水稻产量间的路径关系 (图 11b)。从拟合参数来看, 模型拟合结果良好 (RMSEA=0.039, GFI=0.97, CFI=0.99, TLI=0.98), 表明模型较好地解释了各变量之间的路径关系, 各路径系数均达到极显著水平 ($P<0.01$)。具体而言, 耕作、秸秆还田和灌溉对土壤 SOC 具有显著正向影响, 其路径系数分别为 0.38、0.36 和 0.25。秸秆还田也显著影响全氮和碱解氮, 路径

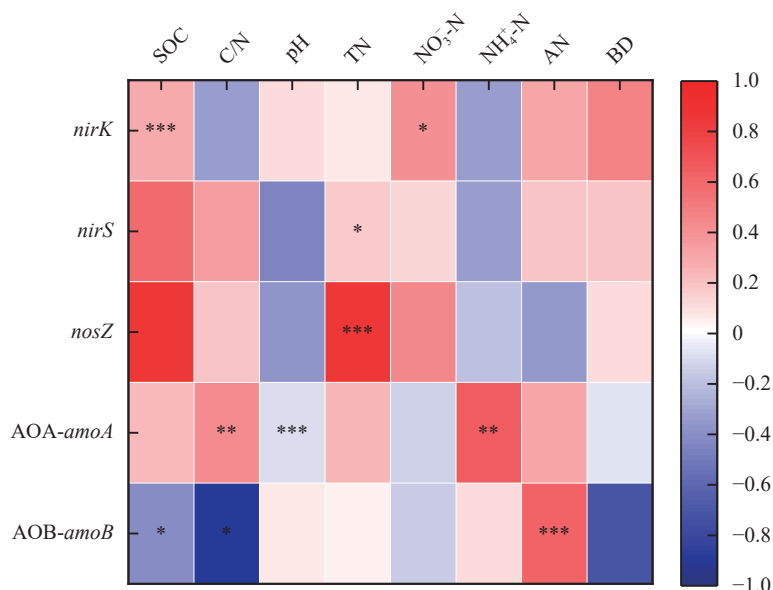


图 10 氮循环功能基因丰度与土壤理化因子的 Pearson 相关性热图
Fig. 10 Pearson correlation heatmap between the abundance of nitrogen cycling functional genes and soil physicochemical properties

注: SOC—土壤有机碳; C/N—碳氮比; NH₄⁺-N—铵态氮; NO₃⁻-N—硝态氮; BD—容重; AN—碱解氮; TN—全氮。*— $P<0.05$, **— $P<0.01$, ***— $P<0.001$ 。

Note: SOC—Soil organic C; C/N—Carbon and nitrogen ratio; NH₄⁺-N—Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N—Nitrate nitrogen; BD—Bulk density; AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; TN—Total nitrogen. *— $P<0.05$, **— $P<0.01$, ***— $P<0.001$.

系数分别为 0.31 和 0.18。此外,灌溉对碱解氮也有显著影响(路径系数 0.16)。施氮是调控全氮(0.41)和碱解氮(0.28)的关键因素。最终在水稻产量形成过程中,碱解氮的贡献最大(0.31),其次为全氮(0.18)和有机碳(0.14)。综合分析表明,优化耕作、秸秆还田及灌溉等措施对维持与提升黑土稻田土壤有机碳有重要作用。在此基础上,合理施用氮肥可进一步优化氮素供应,从而促进水稻生长与增产。

3 讨论

基于文献中试验数据的整合分析,本文系统评估了农田管理、土壤理化性质和气候因子对寒地水稻产量的综合影响,揭示了土壤有机碳和氮素管理是驱动该区水稻增产的主导因子(图 11)。这一发现与陈晓波等^[26]在温带稻区的研究结论一致,但本研究有机碳的贡献率(27.05%)更高,凸显了其在低温限制养分矿化的寒地生态系统中的重要性。氮素有效性及其缓冲能力是影响作物生长和产量形成的核心要素。在寒地水稻生产中,由于积温的限制,氮素管理更为复杂。过量施氮,尤其是后期施氮过多,如“前氮后移”氮素管理模式,均会对水稻产量造成负面影响。施氮量在 90~180 kg/hm² 范围内可实现最佳增产效果(图 8),体现了寒地水稻氮素管理

的显著区域特征。因此在该区域,优化碳氮协同,通过以碳控氮,提高氮素供应的缓冲性和均衡供应,对水稻的增产尤为重要。秸秆还田和有机碳积累还通过激发微生物活性,促进氮的固持与转化,进一步增强氮素供应的缓冲性,提高氮素利用效率及其增产效应^[27-28]。

土壤碱解氮是连接土壤氮库与作物吸收的关键中间库^[29]。过量秸秆还田或高氮投入均会引起 C/N 失衡,表明秸秆还田量和施氮量都有其“阈值效应”。在土壤中,通过优化秸秆还田和氮肥施用实现有机碳与全氮的协同扩容,进而调控碱解氮的供应强度和缓冲性,是发挥其增产潜力的关键^[30-32]。

基于亚组分析和路径解析结果,本研究结果为优化管理提供了明确的方向。与何立谦等^[33]在华北平原的研究发现不同,在本研究中覆膜控制灌溉(PFM-CI)模式在寒地表现出更为显著的增产(36.24%)与固碳(20.46%)效应。其优势主要体现在对秸秆还田模式下有机碳和碱解氮的调控(图 11b)。本研究明确了寒地稻田秸秆还田的技术阈值:还田年限 5~10 年、还田量 6000~9000 kg/hm²,结合深耕和适宜施氮量 90~180 kg/hm²。这与李勇等^[34]提出的“C/N 平衡阈值”理论相符,也与相关的研究^[35-36]结果相一致。关于施氮量,本研究发现氮肥用量 90~180 kg/hm² 是

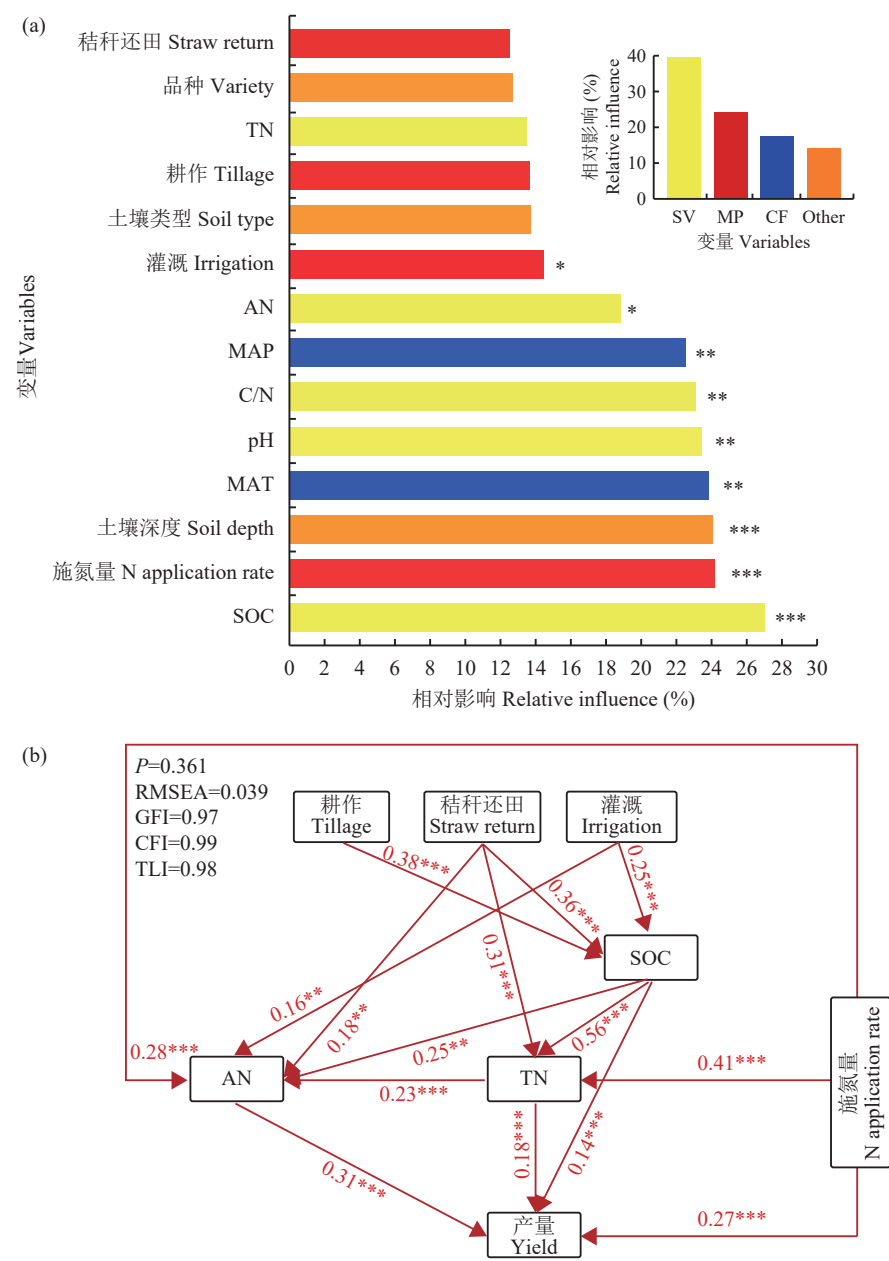


图 11 影响水稻产量的多因子相对贡献率 (a) 及其路径分析 (b)

Fig. 11 Relative contributions of multiple factors to rice yield (a) and their associated path analysis (b)

注: (a) 图中, TN—全氮; AN—碱解氮; MAP—年平均降雨量; C/N—碳氮比; MAT—年平均温度; SOC—土壤有机碳; SV—土壤理化因子指标, 包括有机碳 (SOC)、碱解氮 (AN)、全氮 (TN) 和碳氮比 (C/N); MP—田间管理措施, 包括施氮量、灌溉方式、耕作方式、秸秆还田量与还田方式; CF—气候因子, 包括年平均温度和降水量; Other—其他因素, 包括土壤类型、水稻品种。(b) 图描述了主要变量之间及其与水稻产量的关系, 红色箭头表示变量间的路径系数, 箭头旁的数字为标准化路径系数。*— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ***— $P<0.001$ 。

Note: In Fig. (a), TN—Total nitrogen; AN—Alkali-hydrolyzable nitrogen; MAP—Average annual precipitation; MAT—Annual average temperature; SOC—Organic carbon. SV—Soil property variables included SOC, AN, TN and C/N ratio; MP—Field management measures, included N application rates, irrigation method, tillage method and straw return method; CF—Climatic factors, included mean annual temperature (MAT) and annual average precipitation. Other factors included soil type and rice variety. In Fig.(b), relationship among major variables and rice yield was analyzed using Structural Equation Model (SEM), red arrows indicate significant pathways, and the numbers alongside arrows represent standardized path coefficients. *— $P<0.05$, **— $P<0.01$, ***— $P<0.001$.

东北地区水稻增产的最佳阈值^[37]。施氮量高于 $>180\text{ kg/hm}^2$ 时, 增产效应反而下降, 可能与寒地有效积温限制有关。不同气候条件下的适应性对产量提升至关重要^[38]。中熟品种在 $2500^{\circ}\text{C}\sim 2800^{\circ}\text{C}$ 活动积温下响应最强, 说明在气候变暖背景下, 合理选用中熟品种可充分利用光热资源, 规避后期低温冷害,

是实现高产稳产的重要适应策略^[39]。这也从另外一个侧面反映了寒地稻区秸秆还田、氮素管理和品种熟制选用的特殊性^[40]。

从微生物功能基因角度,本研究为寒地稻田碳氮协同机制提供了新证据^[41]。我们发现反硝化基因 *nosZ* 丰度与有机碳和全氮显著正相关 ($r=0.84$, $r=0.85$),说明秸秆还田驱动的有机碳积累可通过促进反硝化微生物及其功能基因 *nosZ* 活性,是减少 N_2O 温室气体排放、提高氮素留存率的重要过程^[42-44]。同时, SOC 与氨氧化古菌 AOA-*amoA* 基因丰度呈正相关 ($r=0.22$),暗示寒地稻田土壤中碱解氮的形态趋于多样化,表现为硝态氮占比提升^[45-47]。总体而言,寒地稻田中由秸秆还田驱动有机碳积累,通过调控反硝化和硝化微生物功能基因网络 (*nosZ* 为核心),实现了氮素转化过程的优化^[48]。

本研究主要基于已发表文献开展 Meta 分析,所得结论仍有待进一步的田间试验验证。尤其土壤微生物方面,由于文献数据量相对较少,还不足以全面解析寒地稻田中碳氮协同和氮素转化的微生物驱动机制。未来研究可结合长期定位试验以及与生产实际更为接近的大田试验,重点验证最优管理模式及其作用机制。重点聚焦于稻田固碳、碳氮协同、氮肥增效等与东北寒地稻区的积温等气候因子的耦合机制,为实现水稻生产的气候韧性与可持续发展提供前瞻性对策。

4 结论

土壤有机碳库容与氮肥管理的协同效应是水稻增产的核心驱动因子,其贡献度超过了品种和气候等因子。在综合分析的基础上,我们提出了适用于寒地稻田的优化模式:秸秆还田(5~10年,还田量 6000~9000 kg/hm²)—适宜施氮量(90~180 kg/hm²)—深耕—控制灌溉,并结合中熟品种。本研究从构建“土壤—管理—微生物”协同优化系统的角度,为实现寒地水稻高产稳产和可持续发展提供了技术支撑。

参 考 文 献:

[1] Xu Q, Wu H, Feng X, *et al.* Assessing climate change impacts on crop yields and exploring adaptation strategies in Northeast China[J]. *Plant and Soil*, 2024, 285(1): 125–135.

[2] Zhang N W, Xu C, Wang J, *et al.* Anthropogenic soil management performs an important role in increasing soil organic carbon content in northeastern China: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 44(4): 350–369.

[3] Song A Q. Effects of straw return with N fertilizer reduction on crop

yield, plant diseases and pests and potential heavy metal risk in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive wheat-rice cycles[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288(3): 124–134.

[4] Yang G, Wang X, Peng Y, *et al.* Different micro-climate response of indica rice population to nitrogen fertilizer[J]. *Plant Soil and Environment*, 2018, 64(9): 407–412.

[5] Han Y. Straw return alleviates the greenhouse effect of paddy fields by increasing soil organic carbon sequestration under water-saving irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 287(7): 1084–1094.

[6] Tang Z. A comprehensive assessment of rice straw returning in China based on life cycle assessment method: Implications on soil[J]. *Crops and Environment*, 2024, 14(7): 972.

[7] Ma P. Effects of nitrogen application rate on dry matter weight and yield of direct-seeded rice under straw return[J]. *Plant and Soil*, 2023, 13(12): 3058.

[8] Zou Y, Zhang Y, Cui J, *et al.* Nitrogen fertilization application strategies improve yield of the rice cultivars with different yield types by regulating phytohormones [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 21803.

[9] Cai S, Zhao X, Yan X, *et al.* Effects of climate and soil properties on regional differences in nitrogen use efficiency and reactive nitrogen losses in rice[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(5): 29–39.

[10] Ahmad M S, Wu B, Wang H, *et al.* Identification of drought tolerance on the main agronomic traits for rice (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*) germplasm in China[J]. *Agronomy-Basel*, 2021, 11(9): 1740.

[11] Bu F, Wang G, Huang Y, *et al.* Meta-analysis for quantifying carbon sequestration and greenhouse gas emission in paddy soils one year after biochar application[J]. *Agronomy-Basel*, 2022, 12(12): 30–45.

[12] Philibert A, Loyce C, Makowski D, *et al.* Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy[J]. *Ecosystems and Environment*, 2012, 148(23): 72–82.

[13] Chapman S K, Langley J A, Hart S C, *et al.* Plants actively control nitrogen cycling: Uncorking the microbial bottleneck[J]. *New Phytologist*, 2006, 169(1): 27–34.

[14] Zhang L. Meta-analysis of factors affecting C-N fractions and yield of paddy soils by total straw return and N fertilizer application[J]. *Plant and Soil*, 2022, 12(12): 31–48.

[15] Xu L, Yuan S, Wang X, *et al.* High yields of hybrid rice do not require more nitrogen fertilizer than inbred rice: A meta-analysis[J]. *Food and Energy Security*, 2021, 10(2): 276–289.

[16] Xu L, Li X, Wang X, *et al.* Comparing the grain yields of direct-seeded and transplanted rice: A meta-analysis[J]. *Agronomy-Basel*, 2019, 9(11): 767–770.

[17] Xiong D, Ling X, Huang J, *et al.* Meta-analysis and dose-response analysis of high temperature effects on rice yield and quality[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 14(5): 11–19.

[18] Chen C Y. Global warming and shifts in cropping systems together

- reduce China's rice production[J]. *Global Food Security-Agriculture Policy Economics and Environment*, 2020, 24(10): 100359.
- [19] Carrijo D R, Lundy M E, Linquist B A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 173–180.
- [20] Refaee Y Z. Mitigating cold stress in rice: A study of genotype performance and sowing time[J]. *Bmc Plant Biology*, 2024, 24(1): 713.
- [21] Chen Z, Hou H J, Zheng Y, *et al.* Influence of fertilisation regimes on a nosZ-containing denitrifying community in a rice paddy soil[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 92(5): 1064–1072.
- [22] Mooshammer M. Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon: Nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3694.
- [23] Hao J C. Soil microbial nitrogen-cycling gene abundances in response to crop diversification: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838(8): 156–166.
- [24] Chen T. Fine mapping and candidate gene analysis of affecting rice grain length[J]. *Crop Journal*, 2023, 11(2): 540–548.
- [25] 刘俊杰, 张淑香, 王小利, 等. 长期秸秆还田对东北黑土有机碳组分及水稻产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 789–799.
- Liu J J, Zhang S X, Wang X L, *et al.* Effects of long-term straw returning on organic carbon components and rice yield in black soil in Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5): 789–799.
- [26] 陈晓波, 张卫健, 宋春雨, 等. 施氮量对寒地水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 989–996.
- Chen X B, Zhang W J, Song C Y, *et al.* Effects of nitrogen application rate on rice yield and nitrogen fertilizer utilization rate in cold regions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 989–996.
- [27] Jiang C Q, Shen J, Chen H H, *et al.* Review on straw returning modes and the mechanism for reducing nitrogen application and improving efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(8): 11–21.
- [28] 张军, 张洪程, 段祥茂, 等. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(11): 2020–2029.
- Zhang J, Zhang H C, Duan X M. Effects of soil fertility and nitrogen application rates on super rice yield, quality, and nitrogen use efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(11): 2020–2029.
- [29] Wang S J. Soil organic carbon storage impacts on crop yields in rice-based cropping systems under different long-term fertilisation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 161(12): 127–137.
- [30] Zhu H N. Enhancing rice yield and nitrogen utilization efficiency through optimal planting density and reduced nitrogen rates[J]. *Plant and Soil*, 2023, 13(5): 13–23.
- [31] Wang C G. Effect of nitrogen levels on grain yield and quality in improving mid-season japonica rice varieties[J]. *Food Agricultural*, 2025, 105(5): 3010–3023.
- [32] Gu J, Yang J. Nitrogen (N) transformation in paddy rice field: Its effect on N uptake and relation to improved N management [J]. *Crop and Environment*, 2022, 1(1): 7–14.
- [33] 何立谦, 张维宏, 杜雄, 等. 土下覆膜与适宜灌溉水提高冬小麦水分利用率[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 94–99.
- He L Q, Zhang W H, DU X, *et al.* Soil-coated ultrathin plastic-film mulching and suitable irrigation improve water use efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1): 94–99.
- [34] 李勇, 曹文超, 杨劲峰, 等. 秸秆还田下稻田土壤反硝化微生物群落对氮肥用量的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(3): 584–593.
- Li Y, Cao W C, Yang J F, *et al.* Response of soil denitrification microbial community to nitrogen fertilizer amount in paddy field under straw return[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 584–593.
- [35] 汪军, 王德建, 张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 265–270.
- Wang J, Wang D, Zhang G, *et al.* Effects of different N-fertilizer rates with straw incorporation on rice yield and economic benefit of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 265–270.
- [36] Zhu C, Xiang J, Zhang Y, *et al.* Mechanized transplanting with side deep fertilization increases yield and nitrogen use efficiency of rice in Eastern China[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(4): 5653.
- [37] Kang M. Simulating the effects of low-temperature stress during flowering stage on leaf-level photosynthesis with current rice models[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 354: 110087.
- [38] Tian G. Improving rice population productivity by reducing nitrogen rate and increasing plant density[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(8): 475–484.
- [39] Ren K. Optimizing nitrogen fertilizer use for more grain and less pollution[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 360: 132180.
- [40] Wang J. Patterns and determinants of nitrification and denitrification potentials across 24 rice paddy soils in subtropical China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 361: 108799.
- [41] Ayiti O E, Babalola O O, Wang H Y, *et al.* Factors influencing soil nitrification process and the effect on environment and health[J]. *Plant and Soil*, 2022, 6: 47–49.
- [42] 张伟明, 潘君庭, 郭李萍, 等. 秸秆还田对东北黑土区土壤肥力及玉米产量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 654–665.
- Zhang W M, Pan J T, Guo L P, *et al.* Effects of straw returning to the field on soil fertility and maize yield in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 654–665.
- [43] Kuusemets L. Interactions of fertilisation and crop productivity in soil nitrogen cycle microbiome and gas emissions[J]. *Soil*, 2025, 11(1): 1–15.
- [44] Ouyang Y, Evans S E, Friesen M L, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on the abundance of nitrogen cycling genes in

- agricultural soils: A meta-analysis of field studies[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 127: 71–78.
- [45] Sun J, Li H, Wang Y, *et al.* Biochar and nitrogen fertilizer promote rice yield by altering soil enzyme activity and microbial community structure[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2022, 14(12): 1266–1280.
- [46] 吴龙华, 张旭东, 孙波, 等. 长期施肥稻田下稻田土壤微生物群落结构演变及与土壤碳氮的关系[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 1–10.
- Wu L H, Zhang X D, Sun B, *et al.* Evolution of microbial community structure of paddy field under long-term fertilization and its relationship with soil carbon and nitrogen[J]. *Soils*, 2018, 50(1): 1–10.
- [47] Zhang J, Kolstad E L, Zhang W, *et al.* Modeling coupled nitrification–denitrification in soil with an organic hotspot[J]. *Biogeosciences*, 2023, 20(18): 3895–3917.
- [48] 王建国, 李桂花, 刘俊, 等. 寒地水稻氮肥运筹对产量和氮素利用效率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2019, 33(2): 165–174.
- Wang J G, Li G H, Liu J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on yield and nitrogen use efficiency of rice in cold regions[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(2): 165–174.