



氮素养分形态配合对水稻生长发育和品质影响的整合分析

李精华^{1, 2}, 陈嘉涛², 李冉^{1, 2}, 李伟芳^{1, 2}, 樊帆³, 阮云泽^{1, 2}, 李婷玉^{1, 2*}

(1. 海南大学三亚南繁研究院, 海南 三亚 572000; 2. 海南大学热带作物学院, 海南 海口 570228;
3. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 作物对氮素养分形态有不同程度的偏好, 一直以来研究者认为水稻是典型的喜铵作物, 也有研究指出增加硝态氮能促进水稻根系的发育和产量的提升, 但尚未明确协同多指标增效的最适铵硝配比。有机无机配合施用也是有效增加稻米品质的重要营养调控手段, 但有机养分占比过高会降低水稻产量。整合现有的研究结果, 定量分析铵硝态氮的配合和有机无机氮的配合对水稻生长发育及产量、品质的影响, 以明确水稻最佳铵硝配比和有机替代方案。采用 Meta 分析方法, 收集了 2000—2021 年间发表的 48 篇文章, 将养分形态配比分类, 研究不同分类条件下水稻生长发育、产量和品质的差异。与纯铵态氮供应相比, 适宜配比的铵硝混合营养显著改善水稻干物质累积、生长发育和光合特性, 其中最佳配比为 75:25, 可分别增加水稻地上部、地下部干物质质量和总干物质质量 36.2%、19.5% 和 26.0%, 分别增加生长发育指标叶面积、分蘖数、根长、根体积、根表面积、氮素积累量 17.9%、28.8%、209.5%、60.5%、139.5%、30.6%, 分别显著提高硝酸还原酶活性、净光合速率、叶绿素 56.5%、16.3%、21.9%。但当硝态氮比例增加到 50% 时, 上述指标无法得到显著提升甚至下降。与纯无机氮供应相比, <40% 的有机氮替代下水稻产量、整精米率、直链淀粉含量分别提升 8.9%、4.5%、1.4%, 稻米垩白度和蛋白质含量分别下降 19.7%、0.7%, 但有机替代比例超过 40% 则无显著改善效果。合理铵硝配比和有机肥替代比例可进一步实现水稻增产、提质、增效。

关键词: 水稻; 氮素养分形态; 有机肥替代比例; 生长发育; 产量; 品质; 整合分析

随着城乡人民生活水平的不断提高和消费观念的变化, 人们对稻米产品的需求由数量型向口味营养型和优质安全型转变^[1]。氮素是植物蛋白质、核酸、磷脂、叶绿素的重要组成元素, 因此氮素营养调控对水稻生长发育和稻米品质的形成至关重要, 但不同氮素养分形态 (如铵态氮和硝态氮) 配比对水稻生理特性的影响不同。水稻是喜铵作物, 铵态氮是水稻无机氮吸收利用的主要形态^[2]。但近些年越来越多的研究表明, 大多植物在同时供应一定配比的硝态氮和铵态氮时, 其生长发育相关指标如生物量、干物质积累量会高于单独供应铵态氮营养, 表现出“联合效应”^[3-5]。水稻在增硝营

养下, 氮素主要同化酶的活性得到有效提高, 增加水稻叶片中叶绿素含量并提高光合系统活力, 叶片光合速率显著增强, 从而促进了水稻的生长^[6]。氮特别是无机氮的过量施用会增加稻米蛋白质含量^[7], 导致米粒硬度增加、粘性减小、口感变差^[8]。研究表明, 有机无机肥配施不仅能提高作物产量, 对稻米品质和口感也有较大的提升作用^[9], 如优化蛋白质含量、提高精米率和整精米率、降低稻米垩白粒率等^[10], 而且能提高稻米胶稠度、降低直链淀粉含量^[11]。

目前关于水稻铵硝配合、有机替代无机等研究较为零散, 且有些研究结果之间存在矛盾, 如孙园园^[12]研究发现纯铵态氮营养培养下水稻生物量高于铵硝混合培养, 而宋文静^[13]发现铵硝配比为 75:25 时的水稻生物量高于纯铵处理。也有研究发现有机与无机配施直链淀粉含量反而高于无机处理^[14]。目前的研究无法形成有效的结论, 即未能阐明协同水稻生长发育、产量和品质提升的最佳氮素养分配合方案。因此本研究通过收集国内外近 20 年以来, 不同氮素养分形态对水稻生长发育及产量和

收稿日期: 2022-09-13; 录用日期: 2022-10-02

基金项目: 海南省院士创新平台科研专项基金项目 (YSPTZX 202019); 海南省重大科技计划 (ZDKJ2021008); 海南省市厅级项目 [农减项目 -2021-1 (2)]; 海南省张福锁院士创新平台基金项目; 海南省院士创新平台科研专项 (SQ2020PTZ0004)。

作者简介: 李精华 (1995-), 硕士研究生, 研究方向为植物营养。
E-mail: ljh18708926530@163.com。

通讯作者: 李婷玉, E-mail: lty@hainanu.edu.cn。

品质的室内培养和大田试验研究，利用整合分析的方法，定量分析不同氮素形态配合比例下水稻生长发育、产量和品质的差异，以期水稻科学营养调控提供重要科学支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

通过中国知网以及 Web of Science 文献数据库检索工具，以“氮”“铵硝”“养分形态”“有机氮”“有机”“有机肥”“水稻”“生长发育”“产量”“光合”和“品质”为关键词开展文献搜索。

所录用的文献必须满足以下标准：（1）研究区域在中国，试验材料为水稻；（2）研究方法为室内培养或大田原位研究；（3）研究必须包含不同氮素形态配合处理和对照，即铵硝态氮配合处理与纯铵态氮对照、有机与无机配合处理和无机肥对照，有机替代比例按照等氮替代计算；（4）不同养分形态处理下的其他管理条件相同，且具有3次或以上重复，试验提供明确的施氮量数据；（5）文献中获得的指标包括地上部、地下部、总干物质重；叶面积、分蘖数、根系形态、氮素累积量；叶片硝酸还原酶活性、净光合速率、叶绿素；产量和稻米品质

（整精米率、垩白度、蛋白质含量、直链淀粉含量）指标中的一个或多个。

1.2 数据库的构建和数据分类

用于整合分析的每项研究都要求是独立的^[15]，从文献中获得的指标包括：干物质（地上部、地下部、总干物质重），生长发育（叶面积、分蘖数、根系形态、氮素累积量），光合特性（叶片硝酸还原酶活性、净光合速率、叶绿素含量），产量和稻米品质（整精米率、垩白度、蛋白质含量、直链淀粉含量）。经筛选本研究收录有效文献共计48篇。有效观测值共653个，各组响应指标的观测样本量分布如图1所示：试验周期一般室内培养试验为17~50 d，大田试验至少包括一个完整的生育周期，大田试验总体施氮量平均为180 kg/hm²，试验年份涵盖2000—2021年。文献中的干物质、生长发育、光合特性、产量、稻米品质（垩白度、整精米率、蛋白质含量、直链淀粉含量）为响应变量；解释变量为氮素形态、铵硝配比、有机替代比例。结合数据库数据分布情况对解释变量进行分组（表1）。响应变量指标及其定义见表2。对文献中用图表形式报道的数据通过Getdata 1.6.4进行数字化处理。

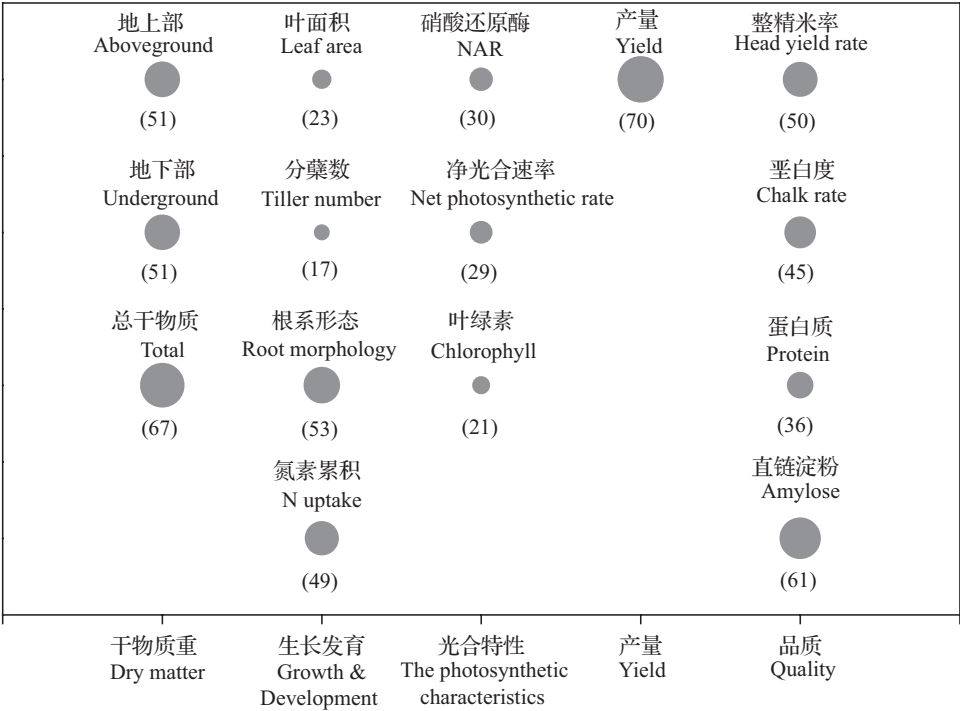


图1 响应指标观测样本量

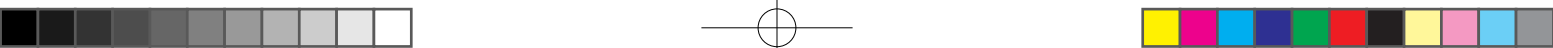


表 1 不同氮素形态对水稻生长发育及产量和品质影响的数据库解释变量分组

解释变量	分组
铵硝	铵态氮，硝态氮，铵硝态氮配合
有机无机	无机氮，有机氮，有机无机氮配合
铵硝比例	75：25；50：50；0：100
有机无机比例	≤40：60；40~60：60~40；>60：40；100：0

表 2 响应变量指标及其定义

响应变量分类	具体指标	定义
干物质	地上部	地上部干物质质量
	地下部	地下部干物质质量
	总干物质	地上部与地下部总和
生长发育	叶面积	完全展开的叶的面积
	分蘖数	每一株分蘖的数量
	根系形态	根长、根体积、根表面积
	氮素积累	一定体积的物质中氮的总量
产量		实测产量
光合特性	叶片硝酸还原酶活性	可催化硝酸离子还原成亚硝酸离子反应的酶活性
	净光合速率	植物光合作用积累的有机物，是总光合速率减去呼吸速率的值
	叶绿素含量	叶绿素 a+ 叶绿素 b
品质	整精米率	整精米占净稻谷试样质量的百分率
	垩白度	稻米中垩白部位的面积占米粒投影面积的百分比
	蛋白质含量	天然的有机化合物的一类，由多种氨基酸组成
	直链淀粉含量	D- 葡萄糖基以 α-(1，4) 糖苷键连接的多糖链

1.3 整合分析

对已收集的同一指标数据统一单位，分别以纯铵态氮处理和无机氮素处理作为对照，计算每组的效应值。采用反应比（RR）的对数（lnRR）作为效应值（Ei）^[16-17]来描述不同铵硝比、有机替代比例对水稻不同指标的响应，公式如：

$$Ei=\ln RR=\ln \left(X_e/X_c \right) \quad (1)$$

其中，X_e是试验组中不同铵硝比、有机替代比例中的响应变量均值，X_c是纯铵态氮对照组或无机氮对照组的响应变量均值。效应值是无单位的，对

于某一种变量的累积效应值的计算采用生态整合分析多重采样的方法^[17]，效应值 95% 的置信区间采用 bootstrapping 的方法计算，抽样频率为 5000 次^[17]。基于 bootstrapping 的方法计算出的置信区间较参数法的范围更宽，因而分析结果更加保守和安全^[17]。便于解释，将 lnRR 的分析结果转化成百分比变化率 [(RR-1) × 100%-100]^[18]。如果 95% 置信区间与 0 重叠，则认为试验组与对照组的差异不显著；如果 95% 置信区间没有与 0 重叠，则认为两组间差异显著，同时同一变量不同分类的累积 Ei 的 95% 置信区间相互不重叠则认为彼此间差异显著^[19]。

1.4 数据处理

本研究使用 R（R Core Team，2015）进行数据分析，通过 SPSS 22.0 进行 Bootstrap 统计分析，利用 R（R 包 plotrix；Jim Lemon 2021）进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 不同铵硝比对水稻干物质的影响

2.1.1 地上和地下部干物质重

基于 51 个样本整合分析结果表明，与单施铵态氮（100：0）相比，铵硝配合可显著提升水稻地上部干物质重，当铵硝配比为 75：25、50：50 时，与对照相比，地上部干物质重分别提升 36.2%、31.2%，但两个不同配比间无显著差异（图 2）。水稻地上部干物质重随着铵硝配施中硝态氮的比例不断增加而呈现下降的趋势，当完全供应纯硝态氮时，与对照相比，水稻地上部干物质无显著变化。

基于 51 个样本整合分析结果表明，与单施铵态氮（100：0）相比，铵硝配施和单施硝态氮（0：100）都可显著提高水稻地下部干物质重，其中纯硝态氮处理提升效果更为明显。当铵硝配比为 75：25、50：50、0：100 时，与对照相比，地下部干物质重分别提升 19.5%、29.3%、54.2%，地下部干物质重随着铵硝配施中硝态氮的比例不断增加而呈现上升趋势（图 2），这与地上部干物质累积对铵硝配比响应的趋势相反。

2.1.2 总干物质重

基于 67 个样本整合分析结果表明，与单施铵态氮（100：0）相比，铵硝配合可显著提升水稻总干物质重，当铵硝配比为 75：25、50：50 时，总干物质重提升幅度均为 26.0%。当铵硝配比为 0：100 时，与对照相比，总干物质无显著变化。整体来

说, 75 : 25 与 50 : 50 的铵硝配比都可显著提高水稻总干物质重且效果相当 (图 2)。

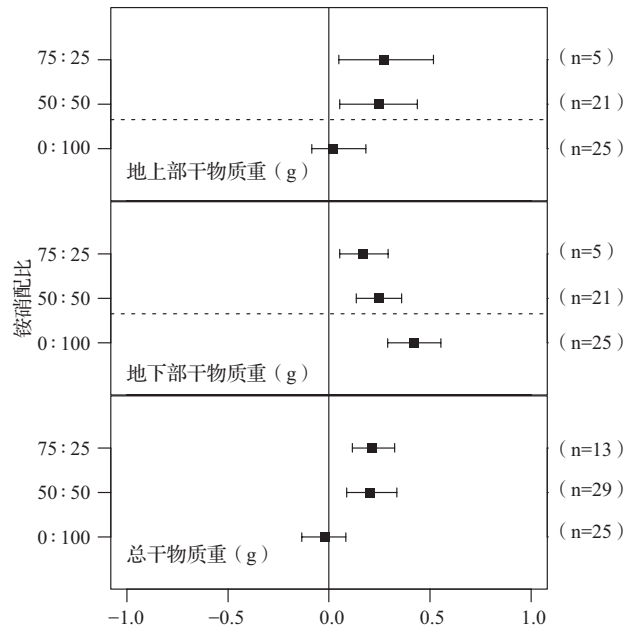


图 2 铵硝比对水稻干物质质量的影响

2.2 不同铵硝比对水稻生长发育的影响

2.2.1 叶面积

基于 23 个样本整合分析结果表明, 与单施铵态氮 (100 : 0) 相比, 适宜的铵硝配合可显著提升水稻叶面积。如当铵硝配比为 75 : 25 时, 与对照相比, 叶面积显著增加 17.9%。而铵硝配比为 50 : 50 时, 叶面积无显著变化。当铵硝配比为 0 : 100 时, 叶面积则显著下降 25.6%, 说明过量硝态氮供应不利于水稻叶面积的增加。铵硝配比为 75 : 25 与 50 : 50 间无显著差异, 与 0 : 100 间差异显著 (图 3)。水稻叶面积在铵硝配比为 75 : 25 时最大, 之后则随着硝态氮比例的增加而呈现下降的趋势。

2.2.2 分蘖数

基于 17 个样本整合分析结果表明, 与单施铵态氮 (100 : 0) 相比, 铵硝配合可显著提升水稻分蘖数。当铵硝配比为 75 : 25、50 : 50 时, 与对照相比, 分蘖数分别增加 28.8%、24.7%, 但两个不同配比间无显著差异。当铵硝配比为 0 : 100 时, 分蘖数显著下降 10.5%, 不利于分蘖数的增加。水稻分蘖数随着铵硝配施中硝态氮比例的增加而呈现下降的趋势 (图 3)。

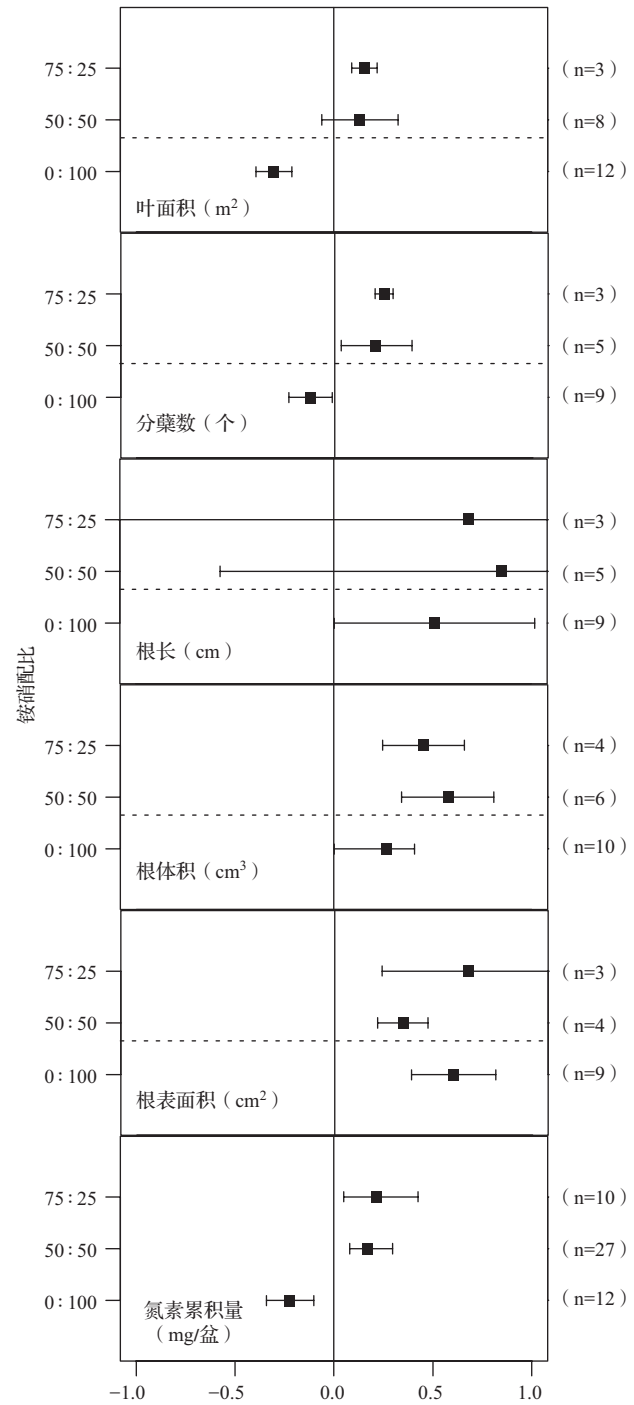


图 3 铵硝比对水稻生长发育的影响

2.2.3 根形态

基于 17 个样本整合分析结果表明, 与单施铵态氮 (100 : 0) 相比, 铵硝配施和单施硝态氮 (0 : 100) 都对水稻根长有提升作用, 但仅纯硝态氮处理提升作用是显著的, 与对照相比, 根长增加 109.7%, 但 3 个不同配比间无显著差异 (图 3), 且根长随着铵硝配施中硝态氮比例的增加而呈现先

升后降的趋势。

基于 20 个样本整合分析结果表明,与单施铵态氮 (100:0) 相比,铵硝配合和单施硝态氮 (0:100) 都显著增加水稻的根体积。当铵硝配比为 75:25、50:50、0:100 时,与对照相比,根体积分别增加 60.5%、84.4%、11.8%,但 3 个不同配比间无显著差异 (图 3)。根体积随着铵硝配施中硝态氮的比例增加而呈现先升后降的趋势,这与根长变化趋势相同。

基于 16 个样本整合分析结果表明,与单施铵态氮 (100:0) 相比,铵硝配合和单施硝态氮 (0:100) 都可显著增加水稻根表面积。当铵硝配比为 75:25、50:50、0:100 时,与对照相比,根表面积分别增加 139.5%、43.0%、89.0%,但 3 个不同配比间无显著差异 (图 3)。

2.2.4 氮素积累量

基于 49 个样本整合分析结果表明,与单施铵态氮 (100:0) 相比,铵硝配合可显著提升水稻氮素积累量。当铵硝配比为 75:25、50:50 时,与对照相比,氮素积累量分别增加 30.6%、20.6%,但两个不同配比间无显著差异 (图 3)。当铵硝配比为 0:100 时,氮素积累量显著下降 18.7%,不利于氮素的积累。在铵硝混合供应下,水稻氮素积累量随着硝态氮比例的增加而呈现下降的趋势。

2.3 不同铵硝配比对水稻硝酸还原酶和光合特性的影响

2.3.1 叶片硝酸还原酶

基于 30 个样本整合分析结果表明,与单施铵态氮 (100:0) 相比,铵硝配合和单施硝态氮都显著提升了水稻叶片硝酸还原酶活性,其中纯硝态氮处理提升效果更为明显。当铵硝配比为 75:25、50:50、0:100 时,与对照相比,硝酸还原酶活性分别增加 56.5%、91.0%、164.1%,但 3 个不同配比间无显著差异 (图 4)。

2.3.2 叶片净光合速率

基于 29 个样本整合分析结果表明,与单施铵态氮 (100:0) 相比,适宜的铵硝配合显著提升水稻叶片净光合速率,当铵硝配比为 75:25 时显著提升 16.3%,而当铵硝配比为 50:50、0:100 时,净光合速率反而显著下降,降幅分别为 11.5%、12.4% (图 4)。水稻净光合速率在铵硝配比为 75:25 时最大,之后则随着铵硝配施中硝态氮比例的不断增加而下降。

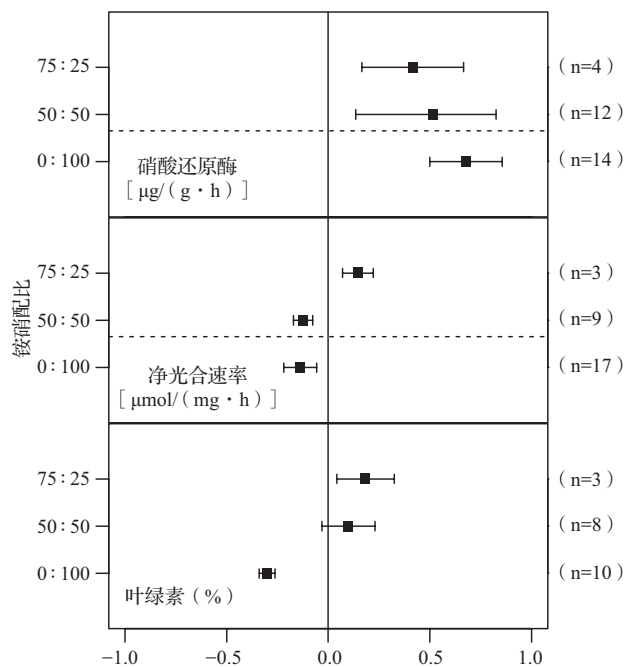


图 4 铵硝比对水稻硝酸还原酶及光合特性的影响

2.3.3 叶绿素

基于 21 个样本整合分析结果表明,与单施铵态氮 (100:0) 相比,适宜的铵硝配合可显著提升水稻叶绿素含量。当铵硝配比为 75:25 时,显著提升 21.9% (图 4)。但铵硝配比为 50:50 时,水稻叶绿素含量无显著提升。当铵硝配比为 0:100 时,叶绿素含量显著下降 25.9%。水稻叶绿素含量在铵硝配比为 75:25 时最高,之后则随着硝态氮比例的增加而呈现下降的趋势。

2.4 不同有机肥替代比例对水稻产量和品质的影响

2.4.1 产量

基于 70 个样本整合分析结果表明,与无机氮相比,有机与无机配合中有机替代比例 ≤ 40% 和 40%~60% 都可显著提高水稻产量,与对照相比,产量分别增加了 8.9%、5.9%,其中有机替代比例 ≤ 40% 的对产量提升效果达到最大 (图 5)。当有机替代比例 >60% 时,产量无显著变化。当采用 100% 有机供应时,水稻产量显著下降,平均降幅为 5.1%。

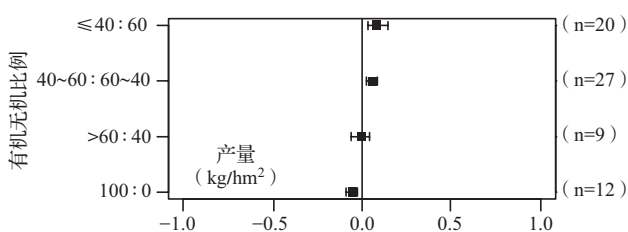


图 5 有机与无机配合对水稻产量的影响



2.4.2 整精米率和垩白度

基于 50 个样本整合分析结果表明, 与无机氮肥相比, 有机替代比例 $\leq 40\%$ 显著提升稻米整精米率 4.5%。当有机替代比例超过 40% 时, 整精米率无显著变化。有机替代比例 $\leq 40\%$ 时水稻整精米率最大, 之后则随着有机比例增加而呈现下降的趋势 (图 6)。

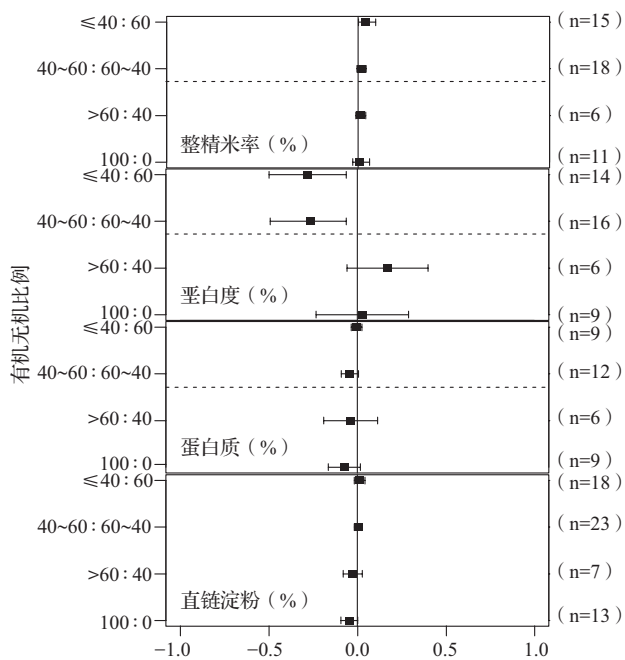


图 6 有机与无机配合对水稻品质的影响

基于 45 个样本整合分析结果表明, 与无机氮肥相比, 有机与无机配合显著降低稻米垩白度。当有机替代比例为 $\leq 40\%$ 、40%~60% 时, 稻米垩白度比例分别下降 19.7%、17.5%, 但两个不同替代比例间无显著差异 (图 6)。当有机替代比例 $>60\%$ 或采用纯有机肥时, 稻米垩白度无显著变化。

2.4.3 蛋白质和淀粉

基于 36 个样本整合分析结果表明, 与无机氮肥相比, 有机与无机配施或纯有机肥供应下水稻蛋白质含量整体呈下降趋势, 且降幅随有机替代比例的增加而增大, 但差异未达到显著水平 (图 6)。直链淀粉含量表现趋势与蛋白质一致。基于 61 个样本整合分析结果发现, 与无机氮肥相比, 有机与无机配施或纯有机肥供应下水稻直链淀粉含量整体呈下降趋势, 且降幅随有机肥替代比例的增加而增大, 但差异未达到显著水平。

3 讨论

养分形态的协同增效是植物营养调控的重要手段。本研究根据大样本数据的分析发现, 铵硝配合可有效改善水稻的生长发育和光合特性, 提升产量。这种协同增效的机制, 一是硝态氮有助于刺激根系的生长和侧根的发生, 这可能与硝酸根离子增加了根源激素和生长素的合成有关^[20], 因此铵硝配合下水稻地下部干物质质量得到显著提升。二是硝酸根离子利于氮在水稻地下部的累积和分配^[21], 铵根离子利于氮在水稻地上部的累积和分配。水稻整体以喜铵为主, 当硝态氮比例过高时, 水稻的各方面指标无显著提升或出现负面效果。如硝态氮比例为 50% 或更高时, 与 25% 硝态氮处理相比, 水稻的地上和总干物质质量呈下降的趋势 (图 2); 当供应纯硝营养时, 与纯铵和其他铵硝配比相比, 水稻的叶面积、分蘖数以及氮素累积量显著下降的趋势 (图 3), 同时硝态氮比例为 50% 或更高时, 与纯铵和其他铵硝配比相比, 净光合速率、叶绿素含量下降或无显著变化 (图 4)。

此外, 有机与无机配施对稻米产量和品质的提升也有较好的效果。有机肥替代对水稻产量的增加主要通过增加有效穗数、穗粒数、千粒重来实现^[22]。同时有机无机肥配施改善了土壤理化性质, 提高群体质量, 因而提升了水稻整体叶面积指数, 提升叶片光合能力, 进而促进水稻增产^[23]。有机无机肥配施改善了大米的碾磨和外观品质, 如提高整精米率、降低垩白度, 主要可能是适当比例的有机肥有助于水稻对钾元素的吸收和积累, 提升钾的转运量^[24], 而增施钾肥有助于提升和改善大米的外观和碾磨品质^[25-26]。有研究发现, 随着有机物料的投入, 水稻叶绿素含量增加, 植株光合速率提高, 促进光合产物的生成及向水稻籽粒运输的效率, 使得营养物质在水稻籽粒中充分聚集, 进而降低稻米的垩白度^[27]。大米的食味品质受蛋白质、直链淀粉含量的影响^[28], 蛋白质和直链淀粉含量的增加会导致米饭的口感下降^[29]。稻米蛋白质含量受氮肥用量、施肥时间、氮素形态等的影响, 直链淀粉含量受遗传特性的影响^[28, 30]。本研究发现有有机无机肥配施对稻米的蛋白质和直链淀粉含量无显著影响。有机替代比例并不是越高越好, 本研究发现, 当有机替代比例超过 60% 时, 水稻产量会显著下降, 替代比例超过 40% 时整精米率没有显



著提升。

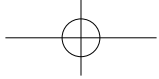
本研究受研究样本中铵硝配比的约束,无法有效分析更多铵硝配比如 25:75 对水稻生长发育、产量和光合特性的影响,随着研究的不断积累,未来作物最佳铵硝配比的分析应考虑更多方案,以便更充分有效地阐明铵硝肥配合施用对水稻生长发育和生理代谢的影响规律。

4 结论

铵硝混合营养比例在 75:25 时,水稻苗期总的干物质量、生长发育以及光合特性等多个指标均得到显著提升且效果最佳,有机替代比例在 $\leq 40\%$ 时,对水稻产量及稻米外观品质的提升效果最好,但有机肥替代比例超过 40% 时,增产效果较差,且无法有效提高整精米率。本研究得到的合理铵硝配比和有机肥替代比例为实现水稻进一步增产、提质、增效提供了重要科学支撑。

参考文献:

- [1] 陈留根,沈明星,姚月明,等.不同有机无机氮比例对水稻产量、品质及环境的影响[J].江苏农业学报,2004(4):249-253.
- [2] 赵首萍,赵学强,施卫明.不同铵硝比例对水稻铵吸收代谢基因表达的影响[J].土壤学报,2006,43(3):436-442.
- [3] 徐海军,孙广玉,张悦,等.不同氮素形态比例对五味子幼苗生长特性的影响[J].植物研究,2010,30(1):51-56.
- [4] 唐伟杰,官春云,林良斌,等.不同硝铵比油菜生长、生理与产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1338-1348.
- [5] 陶爽,华晓雨,王英男,等.不同氮素形态对植物生长与生理影响的研究进展[J].贵州农业科学,2017,45(12):64-68.
- [6] 段英华,张亚丽,沈其荣,等.增硝营养对不同基因型水稻苗期氮素吸收同化的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(2):160-165.
- [7] Dong M H, Sang Z, Wang P, et al. Changes in cooking and nutrition qualities of grains at different positions in a rice panicle under different nitrogen levels[J]. Rice Science, 2007, 14(2): 141-148.
- [8] Nakamura S, Cui J, Zhang X, et al. Comparison of eating quality and physicochemical properties between Japanese and Chinese rice cultivars[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2016, 80(12): 2437-2449.
- [9] 刘欣.不同栽培模式对水稻物质积累、温室气体排放及稻米品质的影响[D].南京:南京农业大学,2017.
- [10] 赵秀哲,王成媛,赵磊,等.不同生育时期追施有机肥对有机水稻产量及品质的影响[J].吉林农业科学,2015,40(6):13-16.
- [11] 李先,刘强,荣湘民,等.有机肥对水稻产量和品质及氮肥利用率的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2010,36(3):258-262.
- [12] 孙园园.水分胁迫和氮素形态对不同基因型水稻生长和氮素吸收的影响及其生理机制[D].雅安:四川农业大学,2010.
- [13] 宋文静.增硝营养调控不同硝响应型水稻品种根系生长的机制研究[D].南京:南京农业大学,2012.
- [14] Wu T D, Li C, Xing X, et al. Straw return and organic fertilizers instead of chemical fertilizers on growth, yield and quality of rice[J]. Earth Science Informatics, 2022, 15: 1363-1369.
- [15] 郑凤英,彭少麟.整合分析中两种假设模型的介绍及实例分析[J].生态科学,2004,23(4):292-294.
- [16] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, et al. Meta 分析导论[M].李国春,吴勉华,余小金,译.北京:科学出版社,2013:23-24.
- [17] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [18] Li Q, Li H, Zhang L, et al. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: a meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 50-60.
- [19] Morgan P B, Ainsworth E A, Long S P. How does elevated CO₂ impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield[J]. Plant, Cell and Environment, 2010, 26: 1317-1328.
- [20] Revsbech N P, Pedersen O, Reichardt W, et al. Microsensor analysis of oxygen and pH in the rice rhizosphere under field and laboratory conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(4): 379-385.
- [21] 陈晓远,高志红,刘振华.供氮形态和水分胁迫对水稻生长及氮素积累和分配的影响[J].华北农学报,2009,24(6):116-122.
- [22] 石鑫蕊,任彬彬,江琳琳,等.有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):154-162.
- [23] 唐海明,肖小平,李超,等.长期施肥模式对双季水稻生理特性与产量的影响[J].中国农业大学学报,2018,23(11):60-71.
- [24] 聂俊,邱俊荣,史亮亮,等.有机肥和化肥配施对抛栽水稻产量、品质及钾吸收转运的影响[J].江苏农业科学,2016,44(2):122-125.
- [25] 周瑞庆.肥料种类及营养元素对稻米产量与品质影响的初步研究[J].作物研究,1988(1):14-17.
- [26] 莫钊文,李武,段美洋,等.减钾对华南早晚兼用型水稻产量形成、品质及钾吸收利用的影响[J].华北农学报,2014,29(1):151-158.
- [27] 王艾平,邓接楼.生物有机肥对水稻产量和品质影响的研究[J].作物杂志,2006(5):28-30.



[28] 吴家青, 熊若愚, 解嘉鑫, 等. 稻米食味品质形成及其响应氮素调控作用的研究进展[J]. 中国稻米, 2021, 27 (2): 28–37.

[29] Champagne E T, Bett-Garber K L, Thomson J L, et al. Unraveling the impact of nitrogen nutrition on cooked rice flavor and texture [J]. Cereal Chemistry, 2009, 86 (3): 274–280.

[30] Wakamatsu K I, Sasaki O, Uezono I, et al. Effect of the amount of nitrogen application on occurrence of white-back kernels during ripening of rice under high-temperature conditions [J]. Japanese Journal of Crop Science, 2008, 77 (4): 424–433.

Integrative analysis of effects of nitrogen nutrient form coordination on rice growth and quality

LI Jing-hua^{1, 2}, CHEN Jia-tao², LI Ran^{1, 2}, LI Wei-fang^{1, 2}, FAN Fan³, RUAN Yun-ze^{1, 2}, LI Ting-yu^{1, 2*} (1. Sanya Nanfan Research Institute of Hainan University, Sanya Hainan 572000; 2. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou Hainan 570228; 3. Institute of Crops Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Crops have different degrees of preference for nitrogen forms. Researchers have always believed that rice is a typical ammonium loving crop, and some studies have pointed out that increasing nitrate nitrogen can promote the development of rice root system and the improvement of rice yield, but the optimal ammonium and nitrate ratio for synergistic multi-index synergistic efficiency has not been clarified. Organic and inorganic combined application is also an important nutrient control method to increase rice quality effectively, but the high proportion of organic nutrients will reduce rice yield. The aim of this study was to integrate the existing research results and quantitatively analyze the effects of the combination of ammonium nitrate nitrogen and organic and inorganic nitrogen on the growth and development, yield and quality of rice, so as to determine the optimal ammonium to nitrate ratio and organic alternative for rice. A total of 48 articles published from 2000 to 2021 were collected by Meta-analysis, and the nutrient form ratio was classified to study the differences in rice growth and development, yield and quality under different classification conditions. Compared with pure ammonium nitrogen supply, ammonium and nitrate mixed nutrition with appropriate ratio significantly improved dry matter accumulation, growth and photosynthetic characteristics of rice. The optimal ratio of 75 : 25 increased dry matter weight of rice shoot and underground root, total dry matter weight of rice by 36.2%, 19.5% and 26.0%, respectively. Leaf area, number of tillers, root length, root volume, root surface area and nitrogen accumulation were increased by 17.9%, 28.8%, 209.5%, 60.5%, 139.5% and 30.6%, respectively. The nitrate reductase activity, net photosynthetic rate and chlorophyll were significantly increased by 56.5%, 16.3% and 21.9%, respectively. However, when the ratio of nitrate nitrogen increased to 50%, the above indexes were not significantly improved or even decreased. Compared with pure inorganic nitrogen supply, the rice yield, whole milled rice rate and amylose content increased by 8.9%, 4.5% and 1.4%, respectively, while the chalkiness and protein content of rice decreased by 19.7% and 0.7%, respectively, under organic nitrogen replacement of <40%, but there was no significant improvement effect when organic nitrogen replacement ratio exceeded 40%. Reasonable ratio of ammonium and nitrate and organic fertilizer replacement ratio can further achieve rice yield increase, quality improvement and efficiency improvement.

Key words: rice; organic forms; organic fertilizer replacement ratio; growth and development; production; quality; integrated analysis