

氮肥用量及运筹对优良食味粳稻越光 产量形成及根系形态的影响

许芸菲 贾浩杨 李叶彤 曹瑞 高梓淇 赵喆 陈立强 梁潇

(辽东学院农学院/辽东学院现代特色农业研究院, 118003, 辽宁丹东)

摘要 为解决辽宁东南沿海地区主栽优质粳稻越光因氮素吸收特性不明及传统施肥技术粗放导致的“优而不丰”生产难题, 采用大田与盆栽试验相结合的方法, 设置农民传统施肥 (TFM) 与轻简高效施肥 (SEM) 2 种模式, 各模式下设立 5 个氮肥梯度 (0、45、90、135 和 180 kg N/hm²)。大田试验系统观测产量形成与干物质积累分配; 盆栽试验同步进行, 重点解析根系形态与生理的调控效应。结果表明, SEM 的实测拟合最高产量为 7820.23 kg/hm² (施氮量 120.29 kg/hm²), 较 TFM (7379.51 kg/hm²) 显著增产 5.97%; 此品种在当地常规施氮量 (100 kg/hm²) 下, SEM 产量 (7777.02 kg/hm²) 亦较 TFM 增产 5.41%。增产主要源于 SEM 优化了穗部性状, 其一次与二次枝梗的粒数、千粒重及着粒密度均显著提高, 从而实现了穗粒数与千粒重的协同增加。SEM 显著促进了中后期根系发育与生理活性, 根系总吸收面积和活跃吸收面积显著扩大。SEM 通过优化施氮量 (约 120 kg/hm²) 和“前控后促”的氮肥运筹, 有效增强了越光生育中后期的根系活力与物质生产能力, 从而实现了产量潜力的充分发挥, 为辽东地区优质粳稻的绿色高产高效栽培提供了理论依据与技术方案。

关键词 优质粳稻; 施氮量; 轻简高效施肥; 根系形态; 产量

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是我国最重要的粮食作物之一, 全国超过半数人口以稻米为主食^[1], 其产量与品质直接关系到国家粮食安全与人民生活水平^[2]。随着国民经济持续发展和消费结构升级, 市场对优质稻米的需求不断增长, 水稻生产的发展阶段已由过去单纯追求高产, 逐步迈向产量与品质协同提升的新阶段^[3]。东北地区是我国优质粳稻的主要产区, 其中辽宁东南沿海稻区以其优越的生态条件成为重要的优质稻种植基地, 越光等水稻品种因其卓越的食味品质在该地区被广泛引种^[4]。在辽宁省水稻生产中, 丹东地区约占全省种植面积 10.0%, 而东部沿黄海稻区又占丹东市稻米产量的 90.0% 以上, 是该区域优质粳稻生产的核心地带^[5]。

氮素是调控水稻产量和品质形成的关键营养元素^[6]。水稻氮代谢以铵态氮 (NH₄⁺-N) 吸收为主, 硝态氮 (NO₃⁻-N) 也参与氮素利用过程, 二者通过谷氨酰胺合成酶/谷氨酸合酶 (GS/GOGAT) 循环等关键酶系统驱动氨基酸合成与植株建成^[7-8]。水稻根系具备高亲和力和低亲和力 2 套

氮吸收系统, 其活性受土壤氮形态及浓度的调控^[9-10]。优质稻品种通常具有根系生物量较小但后期活力较高的特点, 其深层根系扩展能力较弱, 这在一定程度上限制了养分的高效吸收与利用^[11]。因此, 优化氮肥管理策略, 协调根系—冠层关系, 已成为实现水稻“扩库、优源、充实”目标的重要途径。

优质粳稻品种越光在实际生产中常存在“优而不丰”的瓶颈, 即优良食味品质往往伴随较低的氮素吸收效率和产量水平^[12]。在辽东地区的推广过程中, 其氮素吸收特性尚未明确, 加之栽培管理粗放、施肥不合理等问题, 严重制约了该品种潜力的发挥。该区域土壤以盐渍土为主, 高温多湿的气候条件与不科学的施肥方式相互叠加, 导致水稻产量年际间波动较大, 资源利用效率偏低。因此, 建立适合该地区优质粳稻生产的轻简高效施肥方式, 并系统阐明其氮素吸收利用机制, 对实现优质粳稻“提质增产”目标具有重要意义。

综上所述, 针对辽宁东南沿海地区优质粳稻越光氮素吸收规律不明、施肥技术粗放等现实问题,

作者简介: 许芸菲, 主要从事水稻栽培生理研究, E-mail: 3303772338@qq.com

陈立强为通信作者, 主要从事水稻种质资源创新与栽培生理研究, E-mail: 923013@liaodongu.edu.cn

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目 (LJ212411779004); 辽宁省大学生创新创业训练计划项目 (S202511779068); 辽东学院校级博士科研启动基金项目 (2024BS013)

收稿日期: 2025-09-23; 修回日期: 2026-01-23; 网络出版日期: 2026-03-27

本研究拟通过引进轻简高效施肥方式^[13], 系统分析其对该品种根系形态建成、群体物质生产与分配、穗部性状、产量及其构成因素的调控效应, 以期为该区域优质粳稻绿色高产高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

大田试验于辽宁省东港市北井子镇(39°45' N, 123°22' E)进行, 盆栽试验于辽宁省丹东市辽东学院农学院试验基地(40°15' N, 124°42' E)进行, 试验地均属温带季风气候, 年均降水量 850.00 mm, 年均气温 9.50 °C, 年均无霜期 180.00 d。土壤类型以滨海盐土与水稻土为主。试验地土壤均为水稻土, 其 0~20 cm 土层土壤基本理化性质为全氮 1.21 g/kg、速效磷 25.40 mg/kg、速效钾 96.90 mg/kg、有机质 23.20 g/kg、pH 6.39。

1.2 试验材料

供试水稻品种为常规型粳稻越光, 生育期 170 d 左右, 主茎 16 片叶, 以米质优良、食味值

高而闻名, 是当地主栽的优质品种。氮肥为尿素(N≥46.00%), 磷肥为过磷酸钙(P₂O₅≥12.00%), 钾肥为硫酸钾(K₂O≥52.00%)。

1.3 试验设计

大田试验于 2024 年进行, 采用二因素随机区组设计, 设 2 种施肥方式, 分别为农民传统施肥方式(traditional farming method, TFM)和轻简高效施肥方式(simplified and efficient management, SEM); 5 种氮肥梯度, 分别为 0、45、90、135 和 180 kg N/hm², 记为 N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅ 和 N₁₈₀; 不同处理统一施用磷肥 110 kg P₂O₅/hm² (全部基施), 钾肥 110 kg K₂O/hm² (分 2 次施用, 基肥与穗肥各 50%), 每小区面积为 45 m², 重复 3 次; 插秧规格按照当地水平(30.0 cm×16.5 cm), 每穴 2~3 苗, 人工插秧; 小区之间使用 PVC 隔板(高 40.0 cm, 厚 1.5 mm, 入土深度 25.0 cm)防止串水串肥, 各小区单排单灌, 水层、晒田、除草及病虫害防护等均与常规田间管理一致。各处理下的氮肥施用量及方式如表 1 所示。

盆栽试验与大田试验同期展开, 盆栽土壤

表 1 各处理的施氮量
Table 1 Nitrogen application rates of each treatment kg/hm²

施肥方式 Fertilization method	施氮处理 Nitrogen application treatment	基肥 Base fertilizer		返青肥 Green-returning fertilizer		分蘖肥 Tillering fertilizer		穗肥 Panicle fertilizer	
		施氮量 Nitrogen application rate	施用时间 Application time	施氮量 Nitrogen application rate	施用时间 Application time	施氮量 Nitrogen application rate	施用时间 Application time	施氮量 Nitrogen application rate	施用时间 Application time
TFM	N ₀	—	移栽前 1 d	—	移栽后 10 d	—	移栽后 30 d	—	移栽后 60 d
	N ₄₅	22.50	移栽前 1 d	9.00	移栽后 10 d	9.00	移栽后 30 d	4.50	移栽后 60 d
	N ₉₀	45.00	移栽前 1 d	18.00	移栽后 10 d	18.00	移栽后 30 d	9.00	移栽后 60 d
	N ₁₃₅	67.50	移栽前 1 d	27.00	移栽后 10 d	27.00	移栽后 30 d	13.50	移栽后 60 d
	N ₁₈₀	90.00	移栽前 1 d	36.00	移栽后 10 d	36.00	移栽后 30 d	18.00	移栽后 60 d
SEM	N ₀	—	移栽前 1 d	—	—	—	群体叶龄达 10 叶	—	群体叶龄达 13 叶
	N ₄₅	16.20	移栽前 1 d	—	—	10.80	群体叶龄达 10 叶	18.00	群体叶龄达 13 叶
	N ₉₀	32.40	移栽前 1 d	—	—	21.60	群体叶龄达 10 叶	36.00	群体叶龄达 13 叶
	N ₁₃₅	48.60	移栽前 1 d	—	—	32.40	群体叶龄达 10 叶	54.00	群体叶龄达 13 叶
	N ₁₈₀	64.80	移栽前 1 d	—	—	43.20	群体叶龄达 10 叶	72.00	群体叶龄达 13 叶

取自大田耕层。盆钵尺寸为上口径 33 cm, 下底直径 24 cm, 高 27 cm (体积约 0.017 m³), 每盆装土 11 kg。试验共设 10 个处理, 每个处理种植 8 盆, 3 次重复, 共 240 盆; 每盆 2 穴, 每穴 2 苗。于四叶一心期选择长势一致的幼苗移植, 插秧规格和田间管理措施与大田试验保持一致。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 大田试验测定指标 叶面积指数及高效叶

面积指数: 在分蘖末期、齐穗期与成熟期调查茎蘖数。每个处理按平均茎蘖法取代表性植株 6 穴(小区边行不取), 测量绿叶长与叶宽, 并计算叶面积指数与高效叶面积指数, 计算公式如下:

叶面积指数(LAI)=测定株数×平均单株绿叶面积/取样的土地面积;

高效叶面积指数(ELAI)=测定株数×平均单株有效茎蘖的倒 3 叶叶面积/取样的土地面积。

干物质积累量：在分蘖末期、齐穗期与成熟期调查茎蘖数。每个处理按平均茎蘖法取有代表性植株 6 穴（小区边行不取），分成叶片、茎鞘和穗（抽穗后）等部分装袋，于 105 °C 条件下杀青 30 min，再经 80 °C 烘干至恒重。

穗部性状：于成熟期按平均穗数取样法取 10 穴，测定每穗一、二次枝梗数，一、二次枝梗粒数，一、二次枝梗结实率，一、二次枝梗千粒重等穗部性状。

产量及其构成因素：理论产量于成熟期按平均穗数取样法取 10 穴，考察单株有效穗数、穗粒数、结实率和千粒重等产量构成因素；实测产量于成熟期每小区收获 6 m²（去除边行），重复 3 次，脱粒去杂后，按照粳稻标准含水量 14.50% 计算单位面积产量。

1.4.2 盆栽试验测定指标 根系生物量及根冠比：分别于齐穗期及灌浆期，在盆栽试验各处理取样 3 穴。以每穴水稻根为中心挖取长 15 cm、宽 15 cm、深 25 cm 的土块，将挖取的土块装于筛网袋中，用流水冲洗，剪去地上部，称取根鲜重。然后将鲜根（分为 0~10、10~20、20~30 和 >30 cm 4 部分）及地上部鲜重放置烘箱内 105 °C 杀青 30 min，80 °C 烘干至恒重，称量地下部干重和地上部干重，

计算根系分段生物量及根冠比。

根系形态指标：新鲜水稻根系先用自来水冲洗干净，然后将根系平铺在根系专用放置盘中，加水并使水层保持在 1.2~1.5 cm，用牙签将每条不定根单独分开，用直尺测量最大根长，用根系形态专用扫描仪（Epson Perfection V850 Pro）数字化扫描，然后用根系形态分析专用软件（WinRHIZO_Pro 2009b）分析总根长、总根面积和总根体积，根系形态参数为 3 次重复试验的平均值。

根系吸收能力：采用甲烯蓝蘸根法^[14]测定根系总吸收表面积和活跃吸收表面积。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据整理，采用 SPSS Statistics 26.0 软件进行计算、相关性分析，采用 OriginPro 2024b 软件进行辅助分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥方式及施氮量对越光穗部性状、产量及其构成因素的影响

2.1.1 对产量及其构成因素的影响 由表 2 可知，施肥方式与施氮量对越光产量及其构成因素均具有显著影响。在不同施肥方式中，SEM 处理通过显著增加穗粒数和千粒重，从而使理论产量显著

表 2 不同施肥方式及施氮量对越光产量及其构成因素的影响

施肥方式 Fertilization method	施氮量 Nitrogen application rate	穗数 Panicle number (×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 Grains number per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (kg/hm ²)
TFM	N ₀	333.33±6.67c	76.58±1.80c	93.18±0.65a	25.55±0.11ab	6077.52±34.28d
	N ₄₅	393.33±17.64bc	79.66±0.43c	94.83±0.57a	25.78±0.29a	7659.57±61.85c
	N ₉₀	460.67±29.06a	80.80±0.03bc	93.63±0.33a	24.56±0.29c	8559.42±85.44b
	N ₁₃₅	440.00±34.64ab	85.06±3.23ab	89.20±1.02b	24.45±0.51c	8162.47±57.20a
	N ₁₈₀	400.33±24.04a	86.36±1.98a	88.37±0.26b	24.95±0.35bc	7623.00±76.56c
	平均	405.53±43.57 ^a	81.70±4.34 ^b	91.84±1.62 ^a	25.06±0.42 ^b	7616.40±274.47 ^b
SEM	N ₀	335.33±40.83c	76.33±6.24c	91.94±0.70a	25.49±0.13a	6165.73±65.35e
	N ₄₅	407.33±29.33c	82.70±2.06b	91.32±0.24a	26.24±0.10a	7933.68±158.29d
	N ₉₀	444.67±26.44b	83.32±1.15a	91.03±0.72a	26.31±0.05a	8985.96±48.14c
	N ₁₃₅	490.00±22.00a	87.96±1.70a	90.41±0.69a	26.04±0.15a	9941.75±82.06a
	N ₁₈₀	473.33±26.44a	85.33±1.70ab	90.97±0.55a	25.89±0.12a	9210.86±106.15b
	平均	412.13±64.13 ^a	83.13±5.15 ^a	91.13±0.59 ^a	26.00±0.20 ^a	8447.30±372.95 ^a
<i>F_F</i>		1.54ns	6.68 [*]	3.16ns	32.21 ^{**}	87.97 ^{**}
<i>F_N</i>		15.19 ^{**}	16.58 ^{**}	13.32 ^{**}	2.40ns	194.53 ^{**}
<i>F_{F×N}</i>		8.59 ^{**}	3.95ns	8.35 ^{**}	4.28ns	12.59 ^{**}

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。“***”表示影响极显著 ($P < 0.01$) “*”表示影响显著 ($P < 0.05$)，ns 表示差异不显著，上标字母标记为 2 种施肥方式下均值的差异比较。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$). “***” indicates extremely significant effects ($P < 0.01$), “*” indicates significant effects ($P < 0.05$), “ns” indicates no significant difference, and superscript letters are used to compare the means between these two fertilization conditions. The same below.

提高,较 TFM 处理平均增加 10.91%。在不同施氮水平下,穗数、千粒重及理论产量均随施氮量增加呈先升后降的趋势,但 2 种施肥方式下各项指标达到峰值所对应的施氮水平不同。TFM 处理在 N₉₀ 水平下穗数与理论产量最高,而 SEM 处理则在 N₁₃₅ 水平下达到最大值。

穗粒数在不同施肥方式下对施氮量的响应也有所差异。在 TFM 处理下,穗粒数随施氮量增加持续上升,于 N₁₈₀ 时最大;而在 SEM 处理下,穗粒数呈先增后降趋势,在 N₁₃₅ 时最高。结实率方面,TFM 处理随施氮量增加呈先升后降趋势,在 N₄₅ 时达到最大值;SEM 处理则随施氮量增加逐渐下降,但变化幅度较小,差异不显著。

此外,穗数、结实率及理论产量在施肥方式与施氮量二因素互作效应上均达到显著水平。

不同施肥方式及施氮量与越光实测产量间的相关关系如图 1 所示。2 种施肥方式下各处理平均值与实测产量之间均呈现一元非线性关系,其回归方程分别为: $y=-0.105x^2+25.16x+6301.02$ ($R^2=0.85^*$) 和 $y=-0.100x^2+20.84x+6293.75$ ($R^2=0.80^*$)。在 2 种施肥方式中,SEM 处理的平均实测产量高于 TFM 处理。随施氮量增加,2 个处理的实测产量均表现为先上升后下降的趋势。SEM 处理在施氮量为 120.29 kg/hm² 时达到最高产量,为 7820.23 kg/hm²;而 TFM 处理则在施氮量为

104.20 kg/hm² 时达到最高产量,为 7379.51 kg/hm²。在当地常规施氮量^[12] (90~110 kg/hm²,取平均值为 100 kg/hm²) 下,SEM 处理产量为 7777.02 kg/hm²,较 TFM 处理 (7377.75 kg/hm²) 增产 5.41%。整体而言,SEM 处理平均实测产量较 TFM 处理增产 5.97%。

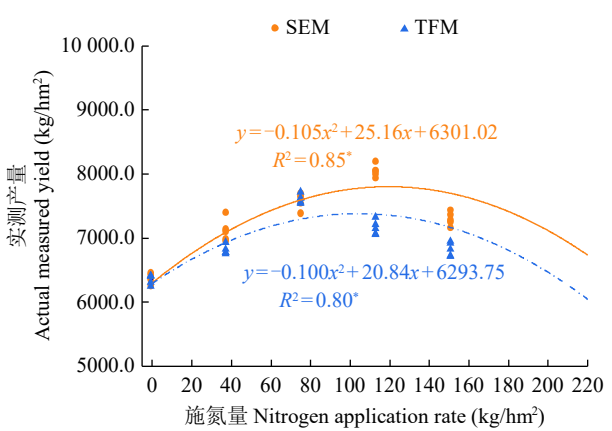


图 1 不同施肥方式及施氮量对越光实测产量的影响
Fig.1 Effects of different fertilization methods and nitrogen application rates on the actual measured yield of Koshihikari

2.1.2 对一次枝梗性状的影响 由表 3 可知,施肥方式与施氮量对越光一次枝梗各性状具有显著影响。与 TFM 处理相比,SEM 处理极显著提高了一次枝梗粒数、千粒重及着粒密度,分别增加 0.88、0.78 g 和 0.07/cm;而一次枝梗数与结实率在处理间差异较小,未达到显著水平。

表 3 不同施肥方式及施氮量对越光一次枝梗性状的影响						
Table 3 Effects of different fertilization methods and nitrogen application rates on primary branch traits of Koshihikari						
施肥方式 Fertilization method	施氮量 Nitrogen application rate	一次枝梗数 Number of primary branches per panicle	一次枝梗粒数 Number of grains per primary branch	一次枝梗结实率 Seed-setting rate of primary branches (%)	一次枝梗千粒重 1000-grain weight of primary branches (g)	一次枝梗着粒密度 Grains per centimeter of primary branches (/cm)
TFM	N ₀	7.38±0.29b	49.53±0.88d	94.36±0.49b	26.46±0.18a	2.77±0.05d
	N ₄₅	7.37±0.31b	51.20±0.50c	95.50±0.22a	26.91±0.17a	2.86±0.03c
	N ₉₀	7.62±0.11ab	52.46±0.47c	95.41±0.15a	25.72±0.13b	2.93±0.03c
	N ₁₃₅	8.17±0.23ab	54.78±0.48b	93.18±0.22c	25.71±0.43b	3.06±0.30b
	N ₁₈₀	8.62±0.15a	56.53±0.39a	92.73±0.02c	25.17±0.32b	3.16±0.20a
	平均	7.83±0.16 ^a	52.90±0.70 ^b	94.24±0.32 ^a	25.99±0.19 ^b	2.96±0.04 ^b
SEM	N ₀	7.60±0.33a	50.37±0.46d	94.46±0.16ab	26.41±0.07a	2.81±0.30c
	N ₄₅	7.99±0.28a	51.91±0.49c	94.53±0.41ab	26.98±0.11a	2.90±0.30c
	N ₉₀	8.16±0.53a	53.92±0.39b	94.94±0.09a	26.91±0.31a	3.05±0.20b
	N ₁₃₅	8.33±0.49a	57.84±0.40a	94.25±0.15b	26.88±0.20a	3.17±0.20a
	N ₁₈₀	8.43±0.36a	54.87±0.68b	94.06±0.32b	26.68±0.16a	3.23±0.20a
	平均	8.10±0.17 ^a	53.78±0.71 ^a	94.45±0.13 ^a	26.77±0.09 ^a	3.03±0.04 ^a
F _F		1.53ns	9.11**	2.54ns	26.74**	16.95**
F _N		4.01*	67.97**	27.38**	4.79**	65.65**
F _{F×N}		0.44ns	6.77**	10.83**	4.52*	0.83ns

从施氮量角度分析,在 TFM 处理下,一次枝梗数、一次枝梗粒数及一次枝梗着粒密度均随施氮

量增加而增加,在 N_{180} 水平达到最大值;一次枝梗结实率与千粒重则随施氮量增加呈先升后降的趋势,均在 N_{45} 水平取得最高值。SEM 处理下一次枝梗性状对施氮量的响应与 TFM 处理存在明显差异。一次枝梗数与千粒重随施氮量变化不显著,一次枝梗粒数与结实率则呈先增后降的趋势,最大值分别出现在 N_{135} 与 N_{90} 水平;而一次枝梗着粒密度随施氮量增加持续上升,在 N_{180} 时达到最高。

此外,施肥方式与施氮量互作对一次枝梗粒数、结实率及千粒重均具有显著影响。

2.1.3 对二次枝梗性状的影响 由表 4 可知,施肥方式与施氮量对越光二次枝梗各性状具有显著影响。与 TFM 处理相比,SEM 处理显著提高了二次枝梗数、粒数、千粒重及着粒密度,分别增加 1.06、1.37、0.83 g 和 0.07 /cm。而二次枝梗结实率处理间差异较小,未达显著水平。

表 4 不同施肥方式及施氮量对越光二次枝梗性状的影响

Table 4 Effects of different fertilization methods and nitrogen application rates on secondary branch traits of Koshihikari						
施肥方式 Fertilization method	施氮量 Nitrogen application rate	二次枝梗数 Number of secondary branches per panicle	二次枝梗粒数 Number of grains per secondary branch	二次枝梗结实率 Seed-setting rate of secondary branches (%)	二次枝梗千粒重 1000-grain weight of secondary branches (g)	二次枝梗着粒密度 Grains per centimeter of secondary branches (/cm)
TFM	N_0	5.46±0.14b	23.85±0.58d	87.19±0.17c	24.39±0.12ab	1.33±0.03d
	N_{45}	6.23±0.59ab	26.21±0.86c	90.46±0.37a	24.70±0.27a	1.47±0.05c
	N_{90}	6.83±0.57ab	28.99±0.15b	88.81±0.19b	23.63±0.35bc	1.62±0.01b
	N_{135}	7.18±0.47a	29.12±0.13b	83.39±0.35d	23.41±0.23c	1.62±0.01b
	N_{180}	7.60±0.19a	30.45±0.31a	79.88±0.46e	23.85±0.33bc	1.70±0.02a
	平均	6.66±0.26 ^b	27.72±0.66 ^b	85.95±1.03 ^a	23.99±0.16 ^b	1.55±0.04 ^b
SEM	N_0	5.88±0.84c	23.49±0.34d	87.07±0.24a	24.47±0.32a	1.31±0.02d
	N_{45}	6.78±0.22bc	28.10±0.01c	86.33±0.22a	25.03±0.09a	1.57±0.01c
	N_{90}	8.13±0.53ab	30.15±0.40b	85.39±0.53b	25.01±0.38a	1.68±0.02b
	N_{135}	8.64±0.35a	32.87±0.25a	84.69±0.29bc	24.97±0.11a	1.83±0.01a
	N_{180}	9.17±0.11a	30.82±0.11b	84.20±0.47c	24.60±0.13a	1.72±0.01b
	平均	7.72±0.37 ^a	29.09±0.86 ^a	85.54±0.31 ^a	24.82±0.11 ^a	1.62±0.05 ^a
F_F		13.35**	33.37**	4.55*	26.25**	34.33**
F_N		11.52**	133.18**	149.52**	2.30ns	137.53**
$F_{F \times N}$		0.69ns	8.98**	65.83**	3.23*	9.17**

从施氮量角度分析,在 TFM 处理下,二次枝梗数、粒数及着粒密度均随施氮量增加而增加,在 N_{180} 水平达到最大值;二次枝梗结实率则随施氮量增加呈先升后降的趋势,在 N_{45} 水平取得最高值,而二次枝梗千粒重的变化规律性较差。SEM 处理下,二次枝梗性状对施氮量的响应与 TFM 处理存在一定差异,二次枝梗数随施氮量的增加而增加,在 N_{180} 时达到最大,二次枝梗粒数、千粒重与着粒密度随施氮量的增加呈先上升后下降的趋势,分别在 N_{135} 、 N_{45} (差异不显著)及 N_{135} 水平下达最大值。

此外,施肥方式与施氮量二因素互作对二次枝梗粒数、结实率、千粒重及着粒密度均具有显著影响。

2.2 不同施肥方式及施氮量对越光群体物质生产及分配的影响

2.2.1 对 LAI 和 ELAI 的影响 不同施肥方式及施氮量对越光 LAI 与 ELAI 的影响如图 2 所示。

分蘖末期,TFM 处理的 LAI 显著高于 SEM 处理。2 种施肥方式下,LAI 随施氮量增加而逐渐升高,表现为 $N_{180} > N_{135} > N_{90} > N_{45} > N_0$ 。齐穗期,TFM 处理的 LAI 与 ELAI 均显著低于 SEM 处理。随施氮量增加,TFM 处理的 LAI 在 N_{45} 至 N_{180} 水平间无显著差异,但均显著高于 N_0 ;ELAI 则随施氮量增加呈先升后降趋势,于 N_{90} 达到峰值。SEM 处理下,LAI 随施氮量增加呈先升后降,在 N_{135} 水平达最大值;ELAI 则随施氮量增加持续升高。成熟期,LAI 与 ELAI 均降至最低,且 TFM 处理仍显著低于 SEM 处理。随施氮量增加,LAI 在 TFM 处理下于 N_{90} 达到最高,而在 SEM 处理下于 N_{135} 最高;ELAI 在 TFM 处理随施氮量增加持续升高,在 SEM 处理下则呈先升后降趋势,于 N_{135} 达到最大值。

2.2.2 对干物质积累量的影响 不同施肥方式及施氮量对越光不同时期干物质积累量的影响如图 3 所示。分蘖末期,TFM 处理的总干物质质量及各

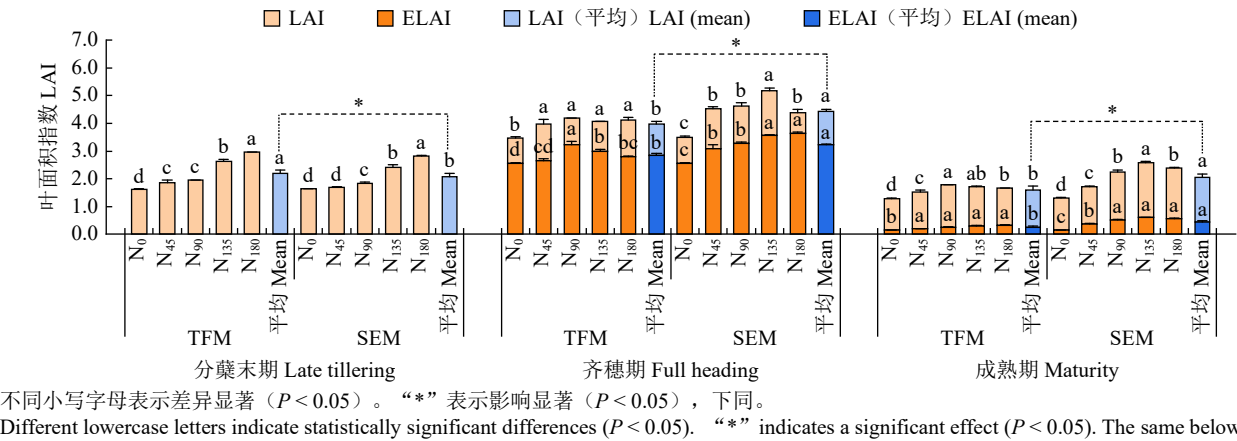


图2 不同施肥方式及施氮量对越光 LAI 和 ELAI 的影响
Fig.2 Effects of different fertilization methods and nitrogen application rates on LAI and ELAI in Koshihikari

部分干物质质量均显著高于 SEM 处理；2 种施肥方式下，干物质质量均随施氮量增加而逐渐升高，表现为 $N_{180} > N_{135} > N_{90} > N_{45} > N_0$ 。齐穗期，SEM 处理的总干物量显著高于 TFM 处理，主要原因是 SEM 处理显著增加了叶片的干物质质量；不同施氮量下 2 种施肥方式干物质质量规律不一致，具体为

TFM 处理随着施氮量的增多，呈逐渐增多趋势，而 SEM 处理则呈先增加后降低的趋势，在 N_{135} 处达到干物质积累量最大值。至成熟期，SEM 处理的总干物质质量及各部分干物质质量均显著高于 TFM 处理，各部分干物质质量平均高出 13.31%；随着施氮量增加，2 种施肥方式均呈现先上升后下降的趋

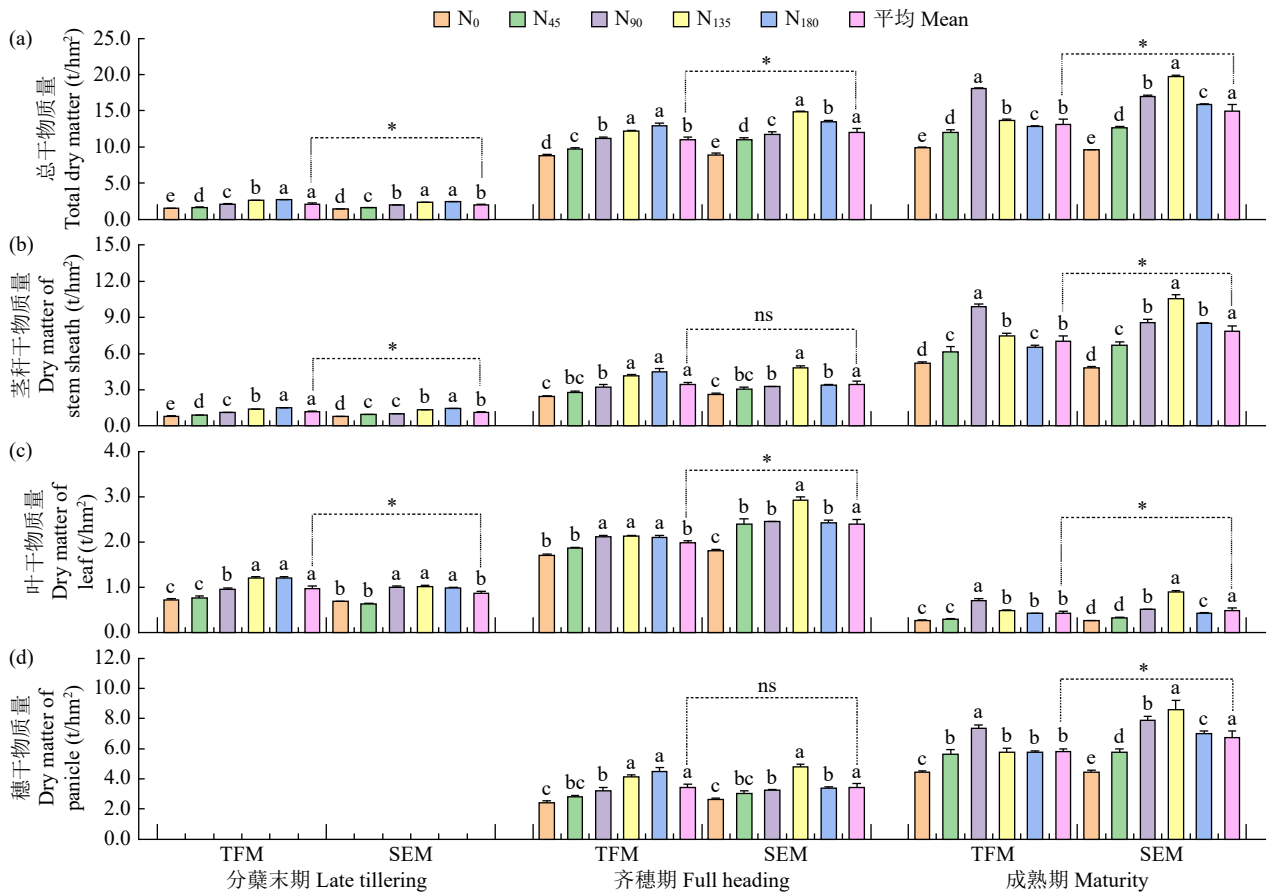


图3 不同施肥方式及施氮量对越光干物质积累量的影响
Fig.3 Effects of different fertilization methods and nitrogen application rates on dry matter accumulation in Koshihikari

势，但峰值二者有一定差别，SEM 处理的峰值出现在 N₁₃₅ 水平，而 TFM 处理则在 N₉₀ 水平。

2.3 不同施肥方式及施氮量对越光根系生理及形态指标的影响

2.3.1 对根系生理指标的影响 由表 5 可知，不同施肥方式与施氮量对越光根干重及根冠比具有显著影响。与 TFM 处理相比，SEM 处理显著提高了

齐穗期各部分的根干重及根冠比及灌浆期 0~10、30 cm 以上的根干重和根冠比。其中齐穗期增加最多的为 30 cm 以上根干重，增幅为 52.63%，其次为 0~10 cm 根干重，涨幅为 20.33%，根冠比则提高了 18.75%；灌浆期增加最多的处理与齐穗期一致，但涨幅较大，为 220.00%，根冠比提高了 12.50%。

表 5 不同施肥方式及施氮量对越光根系生物量与根冠比的影响（齐穗期、灌浆期）

Table 5 Effects of different fertilization methods and nitrogen application rates on root biomass and root-shoot ratio in Koshihikari (full heading stage and grain filling stage)

时期 Stage	施肥方式 Fertilization method	施氮量 Nitrogen application rate	根干重 (g/穴) Root dry weight (g/hill)				根冠比 Root-shoot ratio
			0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	>30 cm	
齐穗期 Full heading stage	TFM	N ₀	2.16±0.03d	1.22±0.01d	0.54±0.01d	0.10±0.00d	0.14±0.01c
		N ₄₅	2.35±0.02c	1.47±0.01b	0.67±0.01b	0.20±0.01b	0.21±0.01a
		N ₉₀	2.76±0.01a	1.49±0.03b	0.69±0.01ab	0.25±0.01a	0.17±0.02b
		N ₁₃₅	2.41±0.04b	1.59±0.02a	0.71±0.01a	0.27±0.02a	0.15±0.01c
		N ₁₈₀	2.36±0.03c	1.31±0.01c	0.62±0.01c	0.13±0.01c	0.14±0.01c
		平均	2.41±0.15 ^b	1.42±0.09 ^b	0.65±0.03 ^b	0.19±0.03 ^b	0.16±0.02 ^b
	SEM	N ₀	2.13±0.02d	1.23±0.02c	0.52±0.02e	0.08±0.00e	0.14±0.00c
		N ₄₅	2.42±0.03c	1.56±0.01b	0.72±0.01c	0.36±0.02b	0.25±0.01a
		N ₉₀	3.16±0.04b	1.59±0.04b	0.79±0.04b	0.42±0.01a	0.20±0.01b
		N ₁₃₅	3.57±0.03a	2.31±0.02a	0.82±0.01a	0.31±0.01c	0.19±0.02b
		N ₁₈₀	3.22±0.01b	1.48±0.04b	0.65±0.01d	0.27±0.01d	0.15±0.01c
		平均	2.90±0.14 ^a	1.63±0.10 ^a	0.70±0.02 ^a	0.29±0.04 ^a	0.19±0.02 ^a
	<i>F_F</i>		56.23**	12.14**	51.22**	47.69**	72.30**
	<i>F_N</i>		103.21**	123.06**	315.29**	89.76**	58.27**
	<i>F_{F×N}</i>		16.27**	2.12ns	0.79ns	21.09**	1.03ns
灌浆期 Grain filling stage	TFM	N ₀	1.73±0.02c	0.64±0.03d	0.20±0.01d	0.01±0.00d	0.07±0.00c
		N ₄₅	1.74±0.03c	1.50±0.02a	0.40±0.02b	0.13±0.00a	0.12±0.00a
		N ₉₀	2.35±0.02b	1.52±0.01a	0.70±0.01a	0.06±0.00b	0.09±0.00b
		N ₁₃₅	2.70±0.07a	1.32±0.02b	0.40±0.01b	0.03±0.00c	0.08±0.00c
		N ₁₈₀	1.54±0.19c	0.77±0.03c	0.27±0.01c	0.02±0.00cd	0.06±0.00d
		平均	2.01±0.12 ^b	1.15±0.10 ^a	0.39±0.05 ^a	0.05±0.01 ^b	0.08±0.00 ^b
	SEM	N ₀	1.79±0.02d	0.63±0.03d	0.19±0.01d	0.01±0.00d	0.07±0.01d
		N ₄₅	1.87±0.02d	1.07±0.07c	0.44±0.07c	0.31±0.01a	0.14±0.05a
		N ₉₀	2.82±0.03b	1.38±0.03b	0.65±0.01b	0.32±0.02a	0.10±0.04b
		N ₁₃₅	3.14±0.04a	1.68±0.04a	0.78±0.03a	0.10±0.01b	0.09±0.04c
		N ₁₈₀	2.56±0.03c	1.11±0.06c	0.41±0.01c	0.05±0.00c	0.07±0.03d
		平均	2.44±0.14 ^a	1.17±0.09 ^a	0.39±0.06 ^a	0.16±0.03 ^a	0.09±0.00 ^a
	<i>F_F</i>		91.51**	0.87ns	1.52ns	655.76**	3.17ns
	<i>F_N</i>		105.96**	170.68**	141.87**	382.65**	547.69**
	<i>F_{F×N}</i>		14.47**	35.50**	29.51**	129.29**	45.48**

从施氮量来看，在 2 种施肥方式下，根干重与根冠比均随施氮量增加呈先升后降趋势。TFM 处理下，齐穗期 0~10 cm 根干重在 N₉₀ 水平下最大，10 cm 以上根干重在 N₁₃₅ 时最高，根冠比则在 N₄₅ 时最大；灌浆期 0~10 cm 根干重在 N₁₃₅ 时最大，10~30 cm 根干重在 N₉₀ 时最高，30 cm 以上根

干重与根冠比均在 N₄₅ 时达最大值。在 SEM 处理下，齐穗期 0~10 cm 根干重在 N₉₀ 时最大，10 cm 以上根干重在 N₁₃₅ 时最高，根冠比在 N₄₅ 时最大；灌浆期 0~30 cm 根干重在 N₁₃₅ 时最大，30 cm 以上根干重在 N₉₀ 时最高，根冠比仍在 N₄₅ 时达最大值。

此外，施肥方式与施氮量二因素互作对各层根干重及根冠比均具有显著影响。

2.3.2 对根系形态指标的影响 由表 6 可知，不同施肥方式与施氮量对越光根系形态具有显著影响。与 TFM 处理相比，SEM 处理显著提高了齐穗期与灌浆期最大根长、总根长、根表面积及总体积，2 个时期各指标平均提高 9.43%、17.64%、13.74%及 10.90%，且趋势一致。

表 6 不同施肥方式及施氮量对越光根系形态的影响
Table 6 Effects of different fertilization methods and nitrogen application rates on root morphology of Koshihikari

时期 Stage	施肥方式 Fertilization method	施氮量 Nitrogen application rate	最大根长 Maximum root length (cm)	总根长 Total root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm ²)	根系总体积 Root volume (m ³)
齐穗期 Full heading stage	TFM	N ₀	34.27±0.46c	1042.00±10.02d	597.00±5.13e	13.21±0.22e
		N ₄₅	41.30±0.72b	1268.67±17.15c	743.00±7.00d	14.07±0.15d
		N ₉₀	47.23±0.35a	1475.33±17.07a	849.00±6.56b	16.53±0.28b
		N ₁₃₅	45.70±0.29a	1346.67±13.54b	889.33±8.11a	17.60±0.35a
		N ₁₈₀	41.63±0.26b	1284.67±8.01bc	791.33±5.49c	15.13±0.09c
		平均	42.03±1.22 ^b	1283.47±38.02 ^b	773.93±27.24 ^b	15.31±0.44 ^b
	SEM	N ₀	34.23±0.19c	1052.67±27.42e	601.33±6.17e	13.02±0.15e
		N ₄₅	44.67±0.26b	1351.00±16.64d	864.67±3.84d	16.30±0.23d
		N ₉₀	52.40±0.55a	1785.33±31.65b	922.00±10.60b	18.27±0.18b
		N ₁₃₅	51.03±3.73a	2094.00±39.80a	1021.33±7.45a	20.43±0.45a
		N ₁₈₀	43.33±0.41b	1605.00±35.09c	895.00±4.73c	17.13±0.15c
		平均	45.13±1.85 ^a	1577.60±96.15 ^a	860.87±37.51 ^a	17.03±0.66 ^a
	F _F		9.15 [*]	417.37 ^{**}	416.58 ^{**}	113.82 ^{**}
	F _N		28.50 ^{**}	275.48 ^{**}	795.26 ^{**}	152.72 ^{**}
	F _{F×N}		1.61ns	79.97 ^{**}	29.03 ^{**}	9.97 ^{**}
灌浆期 Grain filling stage	TFM	N ₀	31.30±0.38e	802.13±6.79d	464.00±8.14d	9.31±0.53d
		N ₄₅	35.63±0.26d	965.00±4.04c	555.00±11.79c	12.10±0.23c
		N ₉₀	42.97±0.67a	1310.67±27.94b	647.33±15.06b	14.13±0.24b
		N ₁₃₅	41.43±0.64b	1551.67±61.23a	768.00±10.58a	16.13±0.34a
		N ₁₈₀	37.80±0.21c	1057.67±23.39c	583.00±4.73c	12.23±0.24c
		平均	37.83±1.13 ^b	1137.43±71.75 ^b	603.47±27.35 ^b	12.78±0.62 ^b
	SEM	N ₀	31.73±0.34e	800.67±4.63e	480.00±10.44d	9.50±0.19d
		N ₄₅	42.30±0.46c	996.33±16.90d	614.33±5.70c	13.37±0.38c
		N ₉₀	46.97±0.27b	1484.33±32.20b	809.67±12.12b	15.70±0.29b
		N ₁₃₅	51.40±0.32a	1891.33±17.17a	964.33±8.11a	17.86±0.22a
		N ₁₈₀	38.47±0.93d	1216.67±76.90c	639.33±22.81c	14.21±0.17c
		平均	42.17±1.83 ^a	1277.87±103.15 ^a	701.53±45.21 ^a	14.13±0.75 ^a
	F _F		184.58 ^{**}	40.39 ^{**}	161.91 ^{**}	48.16 ^{**}
	F _N		278.16 ^{**}	213.64 ^{**}	304.12 ^{**}	168.57 ^{**}
	F _{F×N}		32.21 ^{**}	3.12ns	20.00 ^{**}	2.57ns

从施氮量来看，在 2 种施肥方式下，根系形态各指标均呈先升高后降低的趋势，但各处理各时期的最大值出现在不同的施氮量下。TFM 处理下，齐穗期最大根长及总根长在 N₉₀ 时最大，根表面积及根系总体积在 N₁₃₅ 时最大；灌浆期最大根长在 N₉₀ 时达到最大，其他指标最大值均在 N₁₃₅ 时。SEM 处理下，齐穗期最大根长于 N₉₀ 时达到最大，其他指标均在 N₁₃₅ 时达到最大；灌浆期根系形态各指标均在 N₁₃₅ 时达到最大。

此外，施肥方式与施氮量二因素互作对最大

根长与根表面积具有显著影响。

2.3.3 对根系吸收能力的影响 不同施肥方式及施氮量对越光根系吸收能力的影响如图 4 所示。齐穗期时，TFM 处理的总吸收面积及高效吸收面积均显著低于 SEM 处理。随施氮量增加，TFM 处理的总吸收面积及高效吸收面积均呈先升高后降低的趋势，在 N₉₀ 水平时达到最高。SEM 处理下，总体规律与 TFM 处理相同，但最高峰值出现在 N₁₃₅ 水平；灌浆期的规律与齐穗期相似，但总吸收面积与高效吸收面积均有一定程度的下降。

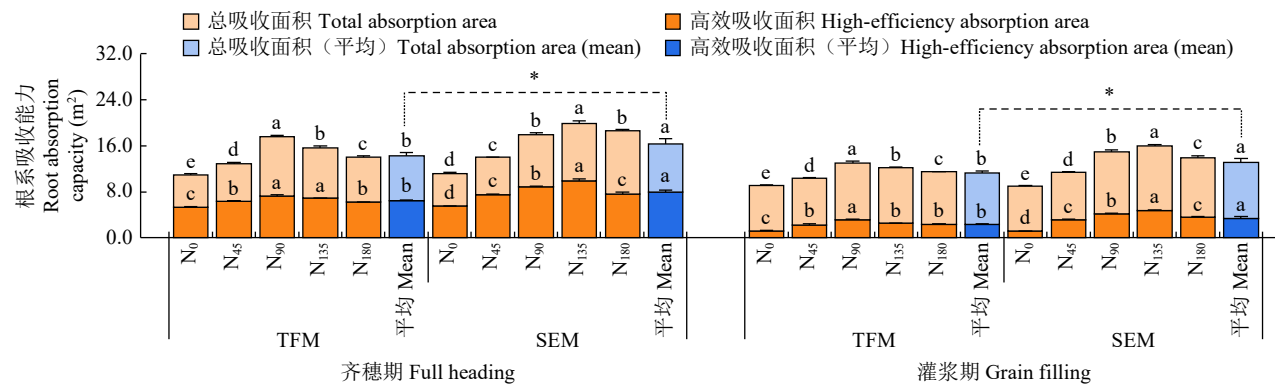
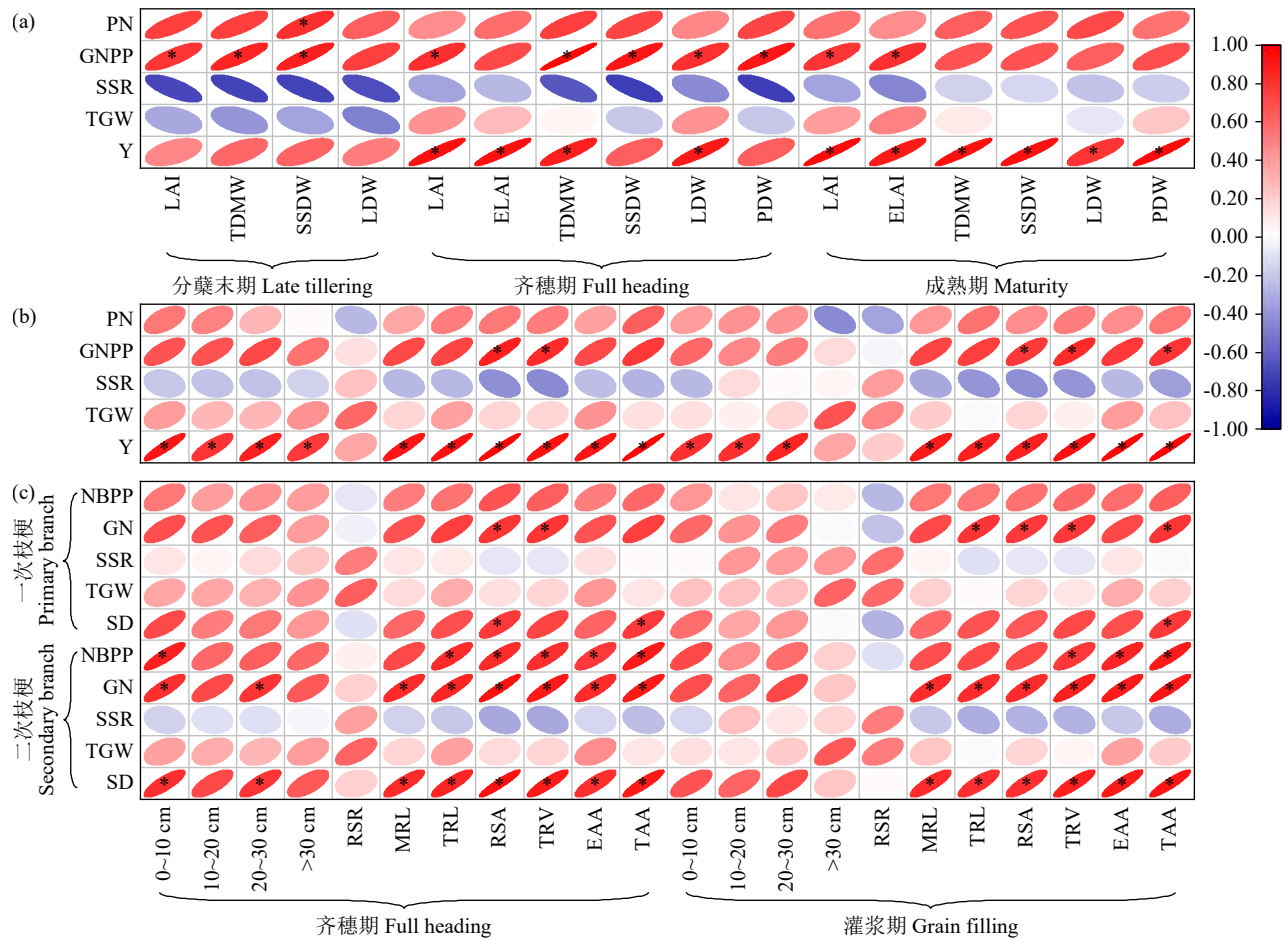


图 4 不同施肥方式及施氮量对越光根系吸收能力的影响

Fig.4 Effects of different fertilization methods and nitrogen application rates on root absorption capacity of Koshihikari

2.4 产量及其构成因素、穗部性状、干物质积累量与根系形态及生理间各指标的相关分析
各指标间相关性分析 ($P \leq 0.01$) 如图 5 所示。

由图 5a 可以看出，越光齐穗期及成熟期干物质积累量对产量的影响较大，且均为正相关关系，除齐穗期茎鞘干物质质量和穗干物质质量外，其他各指



PN: 穗数, GNPP: 穗粒数, SSR: 结实率, TGW: 千粒重, Y: 产量; TDMW: 总干物质质量, SSDW: 茎鞘干物质质量, LDW: 叶干物质质量, PDW: 穗干物质质量; RSR: 根冠比, MRL: 最大根长, TRL: 总根长, RSA: 根表面积, TRV: 根系总体积, EAA: 高效吸收面积, TAA: 总吸收面积, NBPP: 枝梗数, GN: 粒数, SD: 着粒密度。
PN: panicle number, GNPP: grains number per panicle, SSR: seed-setting rate, TGW: 1000-grain weight, Y: yield; TDMW: total dry matter weight, SSDW: stem and sheath dry weight, LDW: leaf dry weight, PDW: panicle dry weight; RSR: root-shoot ratio, MRL: maximum root length, TRL: total root length, RSA: root surface area, TRV: total root volume, EAA: effective absorption area, TAA: total absorption area, NBPP: number of branches per panicle, GN: grain number, SD: spikelet density.

图 5 各指标间相关性分析

Fig.5 Correlation analysis among various parameters

标均呈显著正相关；分蘖末期除叶干物质质量外，其他指标与穗粒数呈显著正相关。

由图 5b 可以看出，越光齐穗期与灌浆期除根冠比及灌浆期 >30 cm 根干重外，其他指标均与产量呈显著正相关关系，说明越光的根系形态建成及生理性状是影响产量的决定性因素。

由图 5c 可以看出，二次枝梗性状与根系形态及生理的相关性较为显著，其中二次枝梗数、粒数、着粒密度与总根长、根表面积、根系总体积、高效吸收面积及总吸收面积均呈显著正相关；一次枝梗粒数与根表面积、根系总体积呈显著正相关。

3 讨论

3.1 不同施肥方式及施氮量对优质粳稻越光干物质积累与产量的影响

合理的施肥方式与适宜的施氮量是水稻实现高产的关键栽培措施之一^[15]。针对优质型粳稻配套栽培技术的探索，一直是水稻栽培研究中的重要方向。已有研究表明，通过抛秧^[16-17]、秸秆还田^[18]以及精准追肥^[19]等栽培手段，可以有效提升优质稻的产量。在施氮量方面，多项研究^[20-22]指出，在适宜范围内适当增加氮肥施用量有助于水稻增产。本研究结果显示，轻简高效施肥方式能够提高优质粳稻品种越光在最高产量水平下所对应的最大施氮量，促进生育中后期干物质积累，提升关键生育时期的 LAI 及 ELAI，从而构建更为合理的群体生长结构，这与张国忠等^[23]的研究相一致。然而，该施肥方式在分蘖末期的群体表现仍逊于传统农民施肥方式，推测可能与基肥释放速率过快有关。未来研究可尝试将基肥替换为肥效释放更为平缓的缓释肥，以期改善前期群体构建，这将是后续工作的重点之一。此外，本研究发现施氮量过高会导致越光产量下降，这可能与自身抗倒伏能力较弱有关。在高氮条件下，茎秆强度不足易引发倒伏，从而限制产量提升^[24]。今后可进一步探讨通过增施硅肥或喷施抗倒伏型叶面肥等途径，增强植株茎秆强度，提高群体抗倒性，进而挖掘越光在高氮条件下的产量潜力，这也是实现其高产稳产的有效路径之一。

本研究优化的轻简高效施肥方式本质上是一

种“前控后促”的氮肥后移策略。虽然该策略显著提高了越光的产量及后期光合物质生产能力，但也需审慎考量其对稻米品质，尤其是食味品质的潜在影响。前人^[25-26]研究认为，氮肥后移或增加穗肥比例通常会提高籽粒蛋白质含量，这可能会对稻米的蒸煮食味品质产生负面影响；然而，也有研究^[27-28]指出，在特定土壤肥力条件下，合理的氮肥后移反而有助于改善米质。不同试验中穗肥施用时期对垩白、蛋白质及食味值的影响结论不尽一致，表明其效应受品种、地力和气候等多因素调控。因此，在本研究确认产量提升的同时，其对于越光这一优质食味品种的最终米质影响，仍需系统的品质测定数据予以全面评估。未来在推广此类施肥模式时，需在“增产”与“优质”之间寻求最佳平衡点。

3.2 不同施肥方式及施氮量对优质粳稻越光根系形态及生理与产量的影响

根系作为水稻吸收水分和养分的主要器官，其形态与生理特性对地上部生长及产量形成具有重要影响^[29-30]。根系生理活性是水稻整体生理功能的重要组成部分，直接调控地上部发育并最终决定籽粒产量^[31-32]。研究^[33]表明，在适宜施氮条件下，氮高效水稻品种通常在各生育期表现出较大的根长和根表面积等形态优势，发达的根系有助于提高土壤氮素吸收效率，减少氮肥损失，从而增加植株氮素积累量。景秀等^[34]进一步指出，在维持适宜根冠比的前提下，良好的根系形态及生理特性有助于提升优质食味粳稻的光合物质生产能力，进而实现稳产高产。本研究结果显示，轻简高效施肥方式显著提高了齐穗期和灌浆期的根系形态指标，特别是 >30 cm 土层的根干重增加明显，这为解释其增产效应提供了根系层面的依据。然而，本研究也发现一些值得深入探讨的现象：尽管多数根系形态和生理指标与产量呈显著正相关，但根冠比在各生育期均未与产量形成显著关联，这一结果与其他水稻品种常见反应有所不同，可能暗示越光品种在根系分配策略上具有独特性。此外，尽管轻简高效施肥方式在分蘖末期的根系形态表现不及传统施肥，但在分蘖期至齐穗期之间出现快速追赶，表明该品种在生育中后期具有较强的根系建成能力。因此，对于优质

粳稻越光而言，中后期根系的形态构建与生理活性可能对最终产量的贡献更为关键。在今后的栽培策略中，应更加注重通过施肥调控促进其中后期根系的优化发育，从而进一步挖掘产量潜力。本研究明确了以中后期根系调控为核心的轻简高效施肥方式可有效提升该区域优质粳稻的产量潜力。

4 结论

通过将施氮量优化至约 120 kg/hm² 并采用“前控后促”的氮肥运筹，轻简高效施肥方式（SEM）最高产量（7820.23 kg/hm²）较传统施肥方式（TFM）增产显著，并在当地常规施氮量（100 kg/hm²）下增产 5.41%。其增产机制主要源于生育中后期根系活力，特别是深层（>30 cm）根系干物质积累（齐穗期增幅 52.63%，灌浆期增幅 220.00%）与吸收能力的增强，进而促进了齐穗后干物质的高效积累与穗部性状的优化。

参考文献

- [1] Yang Z Y, Zhu Y M, Zhang J Y, et al. Comparison of energy use between fully mechanized and semi-mechanized rice production in Southwest China. *Energy*, 2022, 245: 123270.
- [2] 胡群, 夏敏, 张洪程, 等. 氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及品质的影响. *作物学报*, 2017, 43(3): 420-431.
- [3] Ren D Y, Ding C Q, Qian Q. Molecular bases of rice grain size and quality for optimized productivity. *Science Bulletin*, 2023, 68(3): 314-350.
- [4] 严如玉, 甘国渝, 赵希梅, 等. 我国水稻优势产区生产格局及施肥现状研究. *中国稻米*, 2023, 29(3): 1-8.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴（2024）*. 北京：中国统计出版社, 2024.
- [6] 张继宁, 王乐惠, 孙会峰, 等. 稻田施氮量对水稻产量和稻米品质的影响. *土壤通报*, 2024, 55(1): 130-139.
- [7] Yi J, Gao J P, Zhang W Z, et al. Delayed timing of tillering fertilizer improved grain yield and nitrogen use efficiency in japonica rice. *Crop Science*, 2020, 60(2): 1021-1033.
- [8] Yi J, Gao J P, Zhang W Z, et al. Differential uptake and utilization of two forms of nitrogen in japonica rice cultivars from north-eastern China. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1061.
- [9] 余悦, 冉贵平, 皮利民. 植物氮信号感知与根系发育. *植物科学学报*, 2024, 42(6): 825-832.
- [10] 白彦明, 汪军成, 陈明, 等. 植物氮素信号途径研究进展及在作物育种中的应用. *科技导报*, 2025, 43(10): 61-75.
- [11] 张小鹏, 宫彦龙, 闫秉春, 等. 抗倒酯对北方优质稻抗倒伏能力、产量和米质的影响. *中国水稻科学*, 2022, 36(2): 181-194.
- [12] 曹凤有. 黄海稻区优质米品种越光防倒伏栽培技术. *北方水稻*, 2021, 51(2): 52-53.
- [13] 张文忠. 北方水稻氮肥轻简高效利用研究. *中国作物学会. 2019 年中国作物学会学术年会论文摘要集*, 2019: 89.
- [14] 何椿禹, 刘月月, 邵玺文, 等. 种植模式对水稻根系分布与氮素吸收的影响. *灌溉排水学报*, 2023, 42(11): 58-66, 82.
- [15] 刘昆, 黄健, 周沈琪, 等. 穗肥施氮量对不同穗型超级稻品种产量的影响及其机制. *作物学报*, 2022, 48(8): 2028-2040.
- [16] 韩超, 许方甫, 卞金龙, 等. 淮北地区机械化种植方式对不同生育类型优质食味粳稻产量及品质的影响. *作物学报*, 2018, 44(11): 1681-1693.
- [17] 雷振山, 李猛, 卫云飞, 等. 不同种植方式对豫南地区优质食味粳稻产量及品质的影响. *河南农业科学*, 2023, 52(2): 12-20.
- [18] 陈梦云, 李晓峰, 程金秋, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味水稻产量及品质的影响. *作物学报*, 2017, 43(12): 1802-1816.
- [19] Xiong Q Q, Tang G P, Zhong L, et al. Response to nitrogen deficiency and compensation on physiological characteristics, yield formation, and nitrogen utilization of rice. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1075.
- [20] 郭保卫, 胡雅杰, 钱海军, 等. 秸秆还田下适宜施氮量提高机插稻南粳 9108 产量和群体质量. *中国水稻科学*, 2015, 29(5): 511-518.
- [21] 刘红江, 郭智, 张岳芳, 等. 移栽密度及氮肥投入量对水稻氮素利用效率的协同效应. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3952-3960.
- [22] 刘劲松, 伍龙梅, 包晓哲, 等. 短期减施氮肥对华南地区早晚兼用型水稻产量和稻米品质的影响. *中国农业科学*, 2025, 58(8): 1508-1520.
- [23] 张国忠, 李娟, 李毓才, 等. 氮肥减施与移栽密度对杂交粳稻滇禾优 615 产量和食味品质的影响. *作物杂志*, 2023(3): 109-115.
- [24] 王振昌, 程鑫鑫, 谢毅, 等. 不同水肥模式对籼稻和粳稻抗倒伏性能的影响. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 108-118.
- [25] 孙国才, 崔月峰, 卢铁钢, 等. 氮肥用量及前氮后移模式对水稻产量及品质的影响. *中国稻米*, 2012, 18(5): 49-52.
- [26] 剧成欣, 陈尧杰, 赵步洪, 等. 实地氮肥管理对不同氮响应粳稻品种产量和品质的影响. *中国水稻科学*, 2018, 32(3): 237-246.
- [27] 马亮, 董立强, 杨铁鑫, 等. 基于灌浆期籽粒代谢产物解析氮肥后移对优质粳稻产量和品质的影响. *江苏农业科学*, 2024, 52(21): 70-77.
- [28] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 不同土壤肥力条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响. *中国水稻科学*, 2015, 29(1): 56-64.
- [29] 陈晨, 龚海青, 金梦灿, 等. 不同供氮形态下水稻苗期磷吸收累积与根系形态的关系. *中国水稻科学*, 2019, 33(2): 167-175.
- [30] 董立强, 杨铁鑫, 李睿, 等. 株行距配置对超高产田水稻产量及根系形态生理特性的影响. *中国水稻科学*, 2023, 37(4): 392-404.
- [31] 吴昊, 顾汉柱, 王琛, 等. 水稻根系与氮肥高效吸收利用关系研究进展. *江苏农业科学*, 2023, 51(20): 9-14.
- [32] 法晓彤, 孟庆好, 王琛, 等. 水稻根系形态生理对干湿交替灌溉方式的响应研究进展. *作物杂志*, 2024(6): 1-8.
- [33] 戡林, 李廷轩, 张锡洲, 等. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征. *中国农业科学*, 2012, 45(23): 4770-4781.
- [34] 景秀, 周苗, 王晶, 等. 穗分化末期-灌浆初期干旱胁迫对优质食味粳稻根系形态和叶片光合特性的影响. *中国水稻科学*, 2024, 38(1): 33-47.

Effects of Nitrogen Application Rate and Management on Yield Formation and Root Morphology of High-Quality Japonica Rice Cultivar Koshihikari

Xu Yunfei, Jia Haoyang, Li Yetong, Cao Rui, Gao Ziqi, Zhao Zhe, Chen Liqiang, Liang Xiao

(College of Agriculture, Liaodong University/Research Institute of Modern Specialty Agriculture, Liaodong University, Dandong 118003, Liaoning, China)

Abstract To address the persistent production challenge of “high quality but low yield” in the premium japonica rice cultivar Koshihikari, caused by unclear nitrogen (N) uptake characteristics and the use of extensive traditional fertilization practices in the southeastern coastal region of Liaoning Province, a combination of field and pot experiments was conducted. Two fertilization regimes were established: traditional farmer management (TFM) and simplified and efficient fertilization (SEM), each with five nitrogen application rates (0, 45, 90, 135, and 180 kg N/ha). The field experiment systematically evaluated yield formation and dry matter accumulation and partitioning, while the pot experiment focused on analyzing the regulatory effects on root morphology and physiology. The results showed that the maximum fitted yield under SEM was 7820.23 kg/ha at an optimal nitrogen rate of 120.29 kg/ha, which was significantly higher (5.97%) than that under TFM (7379.51 kg/ha). Under the local conventional nitrogen application rate (100 kg/ha), SEM achieved a yield of 7777.02 kg/ha, which was 5.41% higher than that of TFM. The yield increase was mainly attributed to the optimization of panicle traits under SEM, which significantly increased the grain number per primary and secondary branch, 1000-grain weight, and grain density, thereby achieving a synergistic increase in both grain number per panicle and 1000-grain weight. SEM significantly promoted root development and physiological activity during the mid-to-late growth stages. The total and active absorption areas of roots were significantly enlarged. In conclusion, by optimizing the nitrogen application rate (approximately 120 kg/ha) and adopting a “controlled in the early stage and promoted in the late stage” nitrogen management strategy, SEM effectively enhanced root activity and dry matter production capacity during the mid-to-late growth period of Koshihikari, thereby fully realizing its yield potential. This study provides a theoretical basis and a technical solution for green, high-yield, and high-efficiency cultivation of premium japonica rice in the Liaodong region.

Key words High-quality japonica rice; Nitrogen application rate; Simplified and efficient fertilization; Root morphology; Yield