

# 施氮量与氮磷钾配比对小粒型杂交稻源库特性的影响

潘群肖 龙超 卓乐 殷超 肖敏 周文新 易镇邪

(湖南农业大学农学院, 410128, 湖南长沙)

**摘要** 为明确施氮量与氮磷钾配比对小粒型杂交稻源库特性的影响, 以小粒型杂交稻卓两优 0985 为材料, 在 120 (N1)、150 (N2)、180 (N3) 和 210 kg/hm<sup>2</sup> (N4) 4 个施氮量水平与 1.0:0.5:0.8 (F1)、1.0:0.5:1.0 (F2) 和 1.0:1.0:1.0 (F3) 3 个氮磷钾配比条件下开展大田试验。结果表明, 叶面积指数 (LAI)、高效叶面积指数、叶绿素相对含量 (SPAD 值) 与干物质积累量随施氮量增大而提高, N3 与 N4 处理差异不显著, 但均显著高于 N1 处理; 不同氮磷钾配比处理间, 一般以 F3 处理较高, 但无显著差异。总颖花数与总库容量随施氮量增加而增大, 库容有效充实度表现为 N1>N3>N2>N4, 不同氮磷钾配比处理下库容有效充实度一般以 F2 最大, 但差异不显著。有效穗数随施氮量增大而增加, 穗粒数随施氮量增大呈先增后降趋势, 结实率与千粒重均随施氮量增加而下降, 但差异不显著。产量随施氮量增加呈先增后降趋势, 以 N3 处理产量最高, 互作处理间以 N3F2 处理产量最高, N3F1 处理次之。相关分析表明, LAI、高效 LAI、叶片 SPAD 值、干物质积累量、总颖花数、总库容量、有效穗数与产量呈极显著正相关, 库容有效充实度、结实率与产量呈负相关, 穗粒数与产量呈显著正相关, 千粒重、粒叶比与产量相关性不显著。本试验条件下, 卓两优 0985 以 N3F1 处理为最佳, 其叶面积较大、穗粒数较多、库容量较大且库容有效充实度较高, 粒叶比适中, 源库关系较为协调的同时达到节肥增产的效果。

**关键词** 小粒型杂交稻; 施氮量; 氮磷钾配比; 产量; 源库特性

水稻作为我国最重要的粮食作物之一, 其稳产高产对保障国家粮食安全和促进经济社会平稳发展意义重大<sup>[1]</sup>。氮、磷和钾是水稻生长发育过程中所必需的三大元素, 是决定水稻产量的关键<sup>[2]</sup>。合理施用氮肥能优化作物群体质量指标, 提高作物的光合能力和同化物积累<sup>[3]</sup>; 而过量施用氮肥会导致氮素流失加剧, 反而不利于水稻健康生长及最终产量的形成<sup>[4]</sup>, 同时, 磷肥与钾肥之间的平衡也对水稻生长发育至关重要。不同比例的氮、磷、钾肥料组合不仅会影响植株的整体长势, 还会作用于水稻“源—库”关系。产量形成的本质是源向库转化的过程, 促进源库协调一直是水稻栽培研究的重点<sup>[5-6]</sup>。朱庆森等<sup>[7]</sup>分析了水稻源库关系, 并将水稻分为源库互作型、库限制型和源限制型。“源”是作物进行光合作用合成并输出碳水化合物部位, “库”是指吸收和贮藏同化物的部位或器官, 库源关系协调是实现水稻高产优质的生理基础<sup>[8-9]</sup>。

近年来, 为解决杂交水稻制种机械化困难与机插水稻用种量大的问题, 湖南农业大学开展了

小粒型杂交水稻研究, 其中小粒型杂交稻卓两优 1126 创造了 18.17 t/hm<sup>2</sup> 的高产潜力<sup>[10]</sup>, 其种子虽小, 却拥有较大的产量潜力, 且非常适合机械化播种与收割, 展现出广泛的应用前景。目前, 小粒型杂交稻的施肥研究较少, 郭浪等<sup>[11]</sup>初步明确了小粒型杂交稻适宜施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup>, 在此施氮量下小粒型杂交稻可实现高产; 吕宙等<sup>[12]</sup>研究了小粒型杂交稻卓两优 0985 相较普通杂交稻的产量形成特点为穗粒数较多、库源较大以及灌浆中后期光合优势明显。目前, 小粒型杂交稻在不同施氮量与氮磷钾配比下的源库特性尚不明确。因此, 本研究以小粒型杂交稻卓两优 0985 为材料, 在湖南省衡阳县西渡镇梅花村开展大田试验, 探究不同施氮量与氮磷钾配比对小粒型杂交稻源库特性的影响, 以期制定湘南地区小粒型杂交稻高产高效养分管理策略提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2023-2024 年在湖南省衡阳县西渡镇梅

作者简介: 潘群肖, 主要从事作物高产高效栽培理论与技术研究, E-mail: 2823525797@qq.com

周文新为通信作者, 主要从事作物高产高效栽培研究, E-mail: zwxok@hunau.net; 易镇邪为共同通信作者, 主要从事作物高产抗逆栽培与资源高效利用研究, E-mail: yizhenxie@126.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2301402); 湖南省农业农村厅项目 (湘农办发〔2023〕38 号, 湘农办发〔2024〕27 号)

收稿日期: 2025-01-06; 修回日期: 2025-03-12; 网络出版日期: 2025-03-27

花村 (28°9' N, 111°47' E) 进行。2 年间 0~20 cm 耕层土壤样本基础理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基础肥力  
Table 1 Basic fertility of soil tested

年份 Year	全氮 Total nitrogen (g/kg)	全磷 Total phosphorus (g/kg)	全钾 Total potassium (g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen (mg/kg)	有效磷 Available phosphorus (mg/kg)	速效钾 Available potassium (mg/kg)	有机质 Organic matter (g/kg)	pH
2023	1.64	0.89	15.72	184.78	13.67	238.19	29.86	7.19
2024	1.83	0.97	13.95	193.11	15.41	246.32	34.45	7.24

## 1.2 试验材料

供试水稻品种为小粒型杂交稻卓两优 0985, 全生育期为 134 d。供试氮、磷和钾肥分别为尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%) 和氯化钾 (K<sub>2</sub>O 60%)。

## 1.3 试验设计

本试验为施氮量与氮磷钾配比双因素试验, 采取裂区试验设计, 以施氮量 (N) 为主区, 氮磷钾配比 (F) 为副区。施氮量设置 120 (N1)、150 (N2)、180 (N3) 和 210 kg/hm<sup>2</sup> (N4) 4 个水平; 氮磷钾配比设 1.0:0.5:0.8 (F1)、1.0:0.5:1.0 (F2) 和 1.0:1.0:1.0 (F3) 3 个水平, 共计 12 个处理。小区面积 15 m<sup>2</sup>, 各小区之间用田埂隔开并覆薄膜, 两侧压至犁底层, 以防止水分与肥料串流, 田埂宽 25 cm。各处理氮肥的基肥、分蘖肥和穗肥施用比例为 6:3:1, 磷肥全部作基肥, 钾肥分基肥与穗肥各一半施用。移栽前施基肥, 移栽返青后早施分蘖肥, 幼穗分化 3 期追施穗肥。2023 年 5 月 20 日播种, 6 月 15 日移栽, 2024 年 5 月 15 日播种, 6 月 10 日移栽, 均采用人工移栽, 栽插密度为 20 cm×20 cm, 每穴双本插植。全生育期实施严格的病虫害及杂草监测与防治措施, 其余田间管理操作与常规大田管理保持一致。

## 1.4 测定项目与方法

1.4.1 叶面积指数 (LAI) 与齐穗期高效 LAI 分别在分蘖期、孕穗期、齐穗期和灌浆中期每个小区随机调查 10 穴分蘖数, 求出每穴平均分蘖数, 根据每穴平均分蘖数在每个小区取样 3 株, 逐叶测定长度与宽度, 叶面积=叶长×叶宽×0.75, LAI=(单株叶面积×M)/(10 000×10 000), 式中, M 为各移栽密度 1 hm<sup>2</sup> 的穴数。齐穗期高效 LAI 是指水稻齐穗期植株上 3 叶的 LAI。

1.4.2 叶片叶绿素相对含量 (SPAD 值) 于水稻分蘖期、孕穗期、齐穗期和灌浆中期用 SPAD-502 叶绿素测定仪 (柯尼卡美能达, 日本) 测定每个小

区 30 片主茎叶的 SPAD 值 (每片叶测上、中、下 3 点), 计算平均值表示为该小区叶片 SPAD 值。

1.4.3 千物质积累量 于水稻孕穗期、齐穗期、灌浆中期和成熟期每小区根据单穴平均茎蘖数 (穗数) 取样株 3 株, 分茎、叶和穗等装袋, 烘箱 105 °C 条件下杀青 30 min 后调至 80 °C 下烘至恒重, 最后称重。

1.4.4 总库容量与库容有效充实度 总库容量=每公顷颖花数×单粒质量; 库容有效充实度 (%)=(实际产量/库容)×100。

1.4.5 产量及其构成因素 于水稻成熟期调查有效穗数 (80 穴/小区), 根据单穴平均有效穗数每小区取样 5 穴, 考察穗粒数、千粒重和结实率, 计算理论产量; 每小区割 80 穴测实际产量, 最终产量按 13.5%含水量折算。

1.4.6 粒叶比 以各小区成熟期考种所得每株总粒数 (总颖花数) 与孕穗期、齐穗期、灌浆中期单株绿叶面积计算各时期的粒叶比。粒叶比=每株总粒数/单株绿叶面积 (cm<sup>2</sup>)。

## 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据分析, 用 SPSS 22.0 统计软件进行显著性和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻 LAI 的影响

如表 2 所示, 小粒杂交稻 LAI 均在孕穗期达到最高, 之后随着生育期呈下降趋势。不同施氮量下, LAI 与施氮量呈正相关, 各处理 LAI 均表现为 N4 > N3 > N2 > N1, N3 与 N4 处理差异不显著, 2 年规律一致。氮磷钾配比对 LAI 无显著差异, 2 年各处理基本表现为 F3 > F2 > F1; 在到达齐穗期之前, 等氮条件下均以 F3 处理最高, 说明 F3 处理在分蘖期至齐穗期能促进水稻对氮肥的吸收, 从而提高叶面积。2 年分蘖期与孕穗期 LAI 均以 N4F3 处理为

最高，2023 年齐穗期与灌浆中期分别以 N4F2、N4F3 处理最高；2024 年齐穗期与灌浆中期分别以

表 2 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻 LAI 的影响  
Table 2 Effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on LAI of small-seed hybrid rice

处理 Treatment	2023				2024			
	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	灌浆中期 Mid-filling stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	灌浆中期 Mid-filling stage
N1	3.37c	6.61c	5.94c	5.00c	3.57c	6.80c	6.22c	5.09c
N2	3.75b	7.52b	6.77b	5.72b	3.86b	7.49b	6.84b	5.73b
N3	4.16a	7.88ab	7.07ab	5.98ab	4.38a	7.87ab	7.19ab	5.98ab
N4	4.36a	8.26a	7.35a	6.25a	4.57a	8.00a	7.33a	6.00a
F1	3.87a	7.51a	6.74a	5.67a	4.04a	7.46a	6.85a	5.63a
F2	3.91a	7.48a	6.80a	5.71a	4.09a	7.53a	6.89a	5.72a
F3	3.95a	7.72a	6.80a	5.84a	4.16a	7.64a	6.94a	5.75a
N1F1	3.26d	6.47d	5.81c	4.84c	3.52d	6.75c	6.13c	4.92c
N1F2	3.39d	6.51d	5.96c	5.03c	3.58d	6.78c	6.17c	5.12c
N1F3	3.46d	6.86d	6.05c	5.12c	3.61d	6.86c	6.35c	5.24c
N2F1	3.75c	7.52c	6.78b	5.67b	3.81c	7.41b	6.74b	5.71b
N2F2	3.87c	7.47c	6.81b	5.71b	3.79c	7.45b	6.87b	5.69b
N2F3	3.64c	7.56bc	6.73b	5.78b	3.98c	7.62b	6.91b	5.78b
N3F1	4.14b	7.88b	7.01b	5.91b	4.32b	7.77ab	7.19ab	5.92ab
N3F2	4.12b	7.71bc	7.03b	5.94b	4.39ab	7.84ab	7.24a	5.96ab
N3F3	4.22b	8.06ab	7.16ab	6.09ab	4.43ab	8.01ab	7.13ab	6.05a
N4F1	4.33ab	8.15ab	7.37a	6.24a	4.49ab	7.91ab	7.34a	5.98ab
N4F2	4.26b	8.23a	7.41a	6.16ab	4.59a	8.03a	7.26ab	6.09a
N4F3	4.49a	8.39a	7.27ab	6.36a	4.62a	8.05a	7.38a	5.94ab
N	**	**	**	**	**	**	**	**
F	ns	**	ns	**	**	**	**	**
N×F	**	*	*	ns	ns	ns	**	**

同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。“ns”表示  $F$  检验结果无显著差异，“\*”表示  $F$  检验结果在  $P < 0.05$  水平上差异显著，“\*\*”表示  $F$  检验结果在  $P < 0.01$  水平上差异极显著。下同。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ). “ns” indicates no significant difference based on the  $F$ -test; “\*” indicates significant difference based on the  $F$ -test at  $P < 0.05$  level; “\*\*” indicates extremely significant difference based on the  $F$ -test at  $P < 0.01$  level. The same below.

N4F3、N4F2 处理最高。

由表 3 可知，在相同氮磷钾配比下，高效 LAI 随着施氮量增加呈增大趋势。总体看，高效 LAI 随着施氮量增加而增大，但到 N3 处理增幅不明显，N3 和 N4 处理差异不显著。N4 处理的剑叶、倒二

叶和倒三叶叶面积均最大。不同氮磷钾配比差异不显著，但 F3 均大于 F1 与 F2 处理。在施氮量与氮磷钾配比上看，2 年分别以 N4F2、N4F3 处理的高效 LAI 最高，分别比其他处理高出 0.38%~21.99% 和 0.78%~19.44%。

表 3 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻齐穗期高效 LAI 的影响

Table 3 Effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on high-efficiency LAI at full heading stage of small-seed hybrid rice

处理 Treatment	2023				2024			
	剑叶 Flag leaf	倒二叶 Penultimate leaf	倒三叶 Antepenultimate leaf	合计 Total	剑叶 Flag leaf	倒二叶 Penultimate leaf	倒三叶 Antepenultimate leaf	合计 Total
N1	1.40	1.50	1.48	4.38c	1.42	1.51	1.45	4.38c
N2	1.51	1.69	1.65	4.85b	1.49	1.60	1.66	4.75b
N3	1.65	1.75	1.78	5.18a	1.61	1.71	1.75	5.07a
N4	1.67	1.79	1.78	5.24a	1.62	1.76	1.75	5.13a
F1	1.56	1.69	1.65	4.90a	1.54	1.63	1.63	4.80a
F2	1.55	1.68	1.68	4.91a	1.52	1.66	1.64	4.82a
F3	1.56	1.69	1.69	4.94a	1.54	1.64	1.69	4.87a

续表 3 Table 3 (continued)

处理 Treatment	2023				2024			
	剑叶 Flag leaf	倒二叶 Penultimate leaf	倒三叶 Antepenultimate leaf	合计 Total	剑叶 Flag leaf	倒二叶 Penultimate leaf	倒三叶 Antepenultimate leaf	合计 Total
N1F1	1.39	1.50	1.43	4.32c	1.43	1.48	1.41	4.32c
N1F2	1.39	1.52	1.45	4.36c	1.41	1.49	1.46	4.36c
N1F3	1.41	1.49	1.54	4.44c	1.42	1.55	1.49	4.46c
N2F1	1.50	1.71	1.64	4.85b	1.51	1.57	1.63	4.71b
N2F2	1.51	1.62	1.68	4.81b	1.47	1.61	1.67	4.75b
N2F3	1.53	1.75	1.64	4.92b	1.49	1.62	1.68	4.79b
N3F1	1.66	1.73	1.77	5.16a	1.60	1.68	1.78	5.06a
N3F2	1.65	1.75	1.79	5.19a	1.63	1.76	1.67	5.06a
N3F3	1.63	1.76	1.80	5.19a	1.60	1.68	1.79	5.07a
N4F1	1.69	1.80	1.76	5.25a	1.63	1.77	1.72	5.12a
N4F2	1.67	1.82	1.78	5.27a	1.58	1.79	1.74	5.11a
N4F3	1.64	1.75	1.81	5.20a	1.65	1.72	1.79	5.16a
N				**				**
F				ns				**
N×F				ns				ns

2.2 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻叶片 SPAD 值的影响

由表 4 可知，叶片 SPAD 值在孕穗期达到最大值，之后逐渐降低，但降幅不大，在灌浆中期仍保持较高水平，具有明显的叶片 SPAD 值优势。叶片

SPAD 值各时期与施氮量呈正比，N4 与 N3 处理差异不显著，且在施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 时增幅降低；不同氮磷钾配比处理下，处理间差异不显著，F1 处理 SPAD 值均低于 F2 与 F3 处理。2 年灌浆中期均以 N4F1 处理 SPAD 值最高，可见不同施氮量与氮

表 4 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻叶片 SPAD 值的影响  
Table 4 Effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on SPAD value of small-seed hybrid rice

处理 Treatment	2023				2024			
	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	灌浆中期 Mid-filling stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	灌浆中期 Mid-filling stage
N1	39.46c	42.57b	42.22b	38.20b	39.92b	43.14b	41.45b	38.29b
N2	41.91b	44.68ab	43.64ab	39.03b	41.34b	43.53b	42.35b	39.58b
N3	42.40ab	45.30a	44.40a	40.61ab	42.08ab	45.53ab	44.41ab	41.53ab
N4	44.33a	46.37a	45.11a	41.14a	43.50a	46.23a	45.35a	42.40a
F1	41.86a	44.46a	43.73a	39.53a	41.67a	44.41a	43.18a	40.24a
F2	42.04a	44.68a	43.96a	39.81a	41.50a	44.46a	43.51a	40.53a
F3	42.18a	45.05a	43.84a	39.90a	41.97a	44.79a	43.48a	40.58a
N1F1	39.13c	41.67b	41.63b	37.43b	39.83b	42.89b	40.85b	37.45c
N1F2	39.43c	42.83b	42.47b	38.80b	39.87b	43.03b	41.56b	38.46bc
N1F3	39.83c	43.20b	42.57b	38.37b	40.07b	43.51b	41.95b	38.95bc
N2F1	41.77bc	44.63ab	43.71ab	38.80b	41.53ab	43.37b	42.12b	39.34b
N2F2	41.93b	44.43ab	43.43ab	38.47b	40.73b	43.24b	42.39b	39.61b
N2F3	42.03b	44.97ab	43.77ab	39.83ab	41.77ab	43.98b	42.54b	39.79b
N3F1	42.37ab	45.21a	44.53ab	40.43ab	42.10a	44.81ab	44.02ab	41.23ab
N3F2	42.41ab	45.17ab	44.77a	40.78ab	41.72ab	45.34ab	44.53ab	41.62ab
N3F3	42.43ab	45.53a	43.90ab	40.63ab	42.43a	45.78ab	44.67a	41.73ab
N4F1	44.17ab	46.33a	45.03a	41.47a	43.23a	46.57a	45.74a	42.93a
N4F2	44.39a	46.27a	45.17a	41.17a	43.67a	46.23a	45.57a	42.43a
N4F3	44.43a	46.51a	45.13a	40.78ab	43.60a	45.89ab	44.74a	41.84ab
N	**	**	**	**	**	**	**	**
F	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N×F	ns	**	ns	*	ns	ns	*	ns

磷钾配比对小粒杂交稻叶片 SPAD 值有显著差异,且受施氮量影响较大,受氮磷钾配比影响比较小,N3 和 N4 处理则有利于 SPAD 值在生育中后期维持较高水平。

### 2.3 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻干物质积累量的影响

由表 5 可知,干物质积累量随着生育期推进不断增加,在成熟期达到最大值。各个时期干物质积累量表现为 N4、N3 和 N2 处理显著大于 N1 处理,N4 与 N3 处理差异不显著,且 2 年表现一致。氮磷钾配比对干物质积累量有影响,总体上

差异不显著,但 F2 和 F3 处理均大于 F1 处理,尤其在灌浆中期与成熟期 F2 优势更为显著。施氮量与氮磷钾配比互作对干物质积累量有显著影响,整体上高施氮水平且在适宜氮磷钾配比条件下干物质积累量最大,2 年干物质积累量成熟期均以 N3F2 处理最高,2023 和 2024 年干物质积累量分别比其他处理高出 0.70%~13.84% 和 0.66%~16.47%。综上所述,施氮量能提高小粒型杂交稻各个时期的干物质积累量,灌浆中期与成熟期均以 N3 处理干物质积累量最大,F2 处理较为适宜提升干物质积累量。

表 5 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻干物质积累量的影响  
Table 5 Effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on dry matter accumulation in small-seed hybrid rice

处理 Treatment	2023				2024			
	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	灌浆中期 Mid-filling stage	成熟期 Maturity stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	灌浆中期 Mid-filling stage	成熟期 Maturity stage
N1	6.46c	10.25c	13.38c	15.32c	7.24c	10.64b	12.58b	14.55c
N2	7.77b	11.17b	14.32b	16.35b	7.82b	11.35a	13.81a	15.89b
N3	8.20a	11.81a	15.25a	17.23a	8.14ab	11.58a	14.20a	16.50a
N4	8.29a	11.46ab	14.61ab	16.85ab	8.30a	11.64a	14.09a	16.27ab
F1	7.63a	11.09a	14.35a	16.40a	7.80a	11.26a	13.60a	15.75a
F2	7.67a	11.20a	14.46a	16.51a	7.83a	11.33a	13.72a	15.88a
F3	7.74a	11.23a	14.36a	16.41a	7.99a	11.34a	13.70a	15.79a
N1F1	6.37c	10.12c	13.28c	15.25c	7.12c	10.51b	12.38b	14.33c
N1F2	6.42c	10.28c	13.35c	15.30c	7.16c	10.63b	12.57b	14.58c
N1F3	6.58c	10.35c	13.51c	15.41c	7.44bc	10.79b	12.78b	14.75c
N2F1	7.71b	11.13b	14.21b	16.19bc	7.73b	11.21ab	13.67a	15.81b
N2F2	7.78b	11.18b	14.39b	16.32b	7.79b	11.34a	13.85a	15.88b
N2F3	7.82b	11.20b	14.37b	16.55ab	7.95ab	11.50a	13.92a	15.97ab
N3F1	8.18ab	11.67ab	15.26a	17.24a	8.05ab	11.57a	14.23a	16.58a
N3F2	8.19ab	11.89a	15.34a	17.36a	8.12ab	11.64a	14.29a	16.69a
N3F3	8.22ab	11.86a	15.14ab	17.09ab	8.24a	11.54a	14.08a	16.24ab
N4F1	8.25a	11.43ab	14.66ab	16.92ab	8.31a	11.73a	14.11a	16.29ab
N4F2	8.29a	11.45ab	14.75ab	17.05ab	8.25a	11.69a	14.15a	16.35ab
N4F3	8.34a	11.50ab	14.43b	16.57ab	8.34a	11.51a	14.02a	16.18ab
N	**	**	**	**	**	**	**	**
F	**	**	**	**	**	*	**	**
N×F	ns	ns	**	**	**	**	**	**

### 2.4 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻总库容量的影响

由表 6 可知,随着施氮量增加,总颖花量与总库容量逐渐增加,各处理间存在一定显著差异,N3 与 N4 处理显著高于 N1 处理,N3 与 N4 处理差异不显著,N1 与 N2 处理间差异显著。比较不同氮磷钾配比对总颖花数及总库容量的影响,以 F3 处理总颖花量和总库容量最大,各氮磷钾配比处理间差

异不显著。互作处理中,总颖花数与总库容量均以 N4F1 处理最大,总颖花数与总库容量呈正相关,且两者与施氮量也呈正相关,但施氮量到达 N3 时,增幅并不明显。库容有效充实度随施氮量增加而降低,N4 处理库容最大,库容有效充实度最低,N3 处理在大库容下拥有较大库容有效充实度。不同氮磷钾配比中,F3 处理总库容量最大,但库容有效充实度最低,差异不显著。互作处理中,库容有效

表 6 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻总库容量的影响  
Table 6 Effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on the total sink capacity of small-seed hybrid rice

处理 Treatment	2023			2024		
	总颖花数 ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	总库容量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	库容有效充实度 of sink capacity (%)	总颖花数 ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	总库容量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	库容有效充实度 of sink capacity (%)
N1	53 282.68c	11 828.75c	78.79a	53 158.74c	11 806.56c	79.70a
N2	60 559.64b	13 426.07b	75.75ab	59 180.27b	13 132.10b	75.16b
N3	63 445.88ab	14 059.61ab	77.74a	61 982.94ab	13 741.62ab	76.05ab
N4	65 399.58a	14 479.47a	73.97b	62 086.44a	13 758.35a	74.35b
F1	59 770.46a	13 263.07a	76.91a	58 912.90a	13 072.77a	76.19a
F2	60 360.91a	13 400.12a	77.46a	59 055.88a	13 116.31a	76.70a
F3	61 716.03a	13 651.59a	75.16a	59 262.49a	13 126.64a	75.80a
N1F1	52 195.82c	11 556.15d	79.78a	52 444.16c	11 616.38c	80.23a
N1F2	52 912.89c	11 778.41d	79.04a	53 215.45c	11 840.44c	79.30a
N1F3	54 752.35c	12 160.50d	77.46ab	53 819.76c	11 969.51c	79.54a
N2F1	59 179.52b	13 120.10c	75.53b	58 667.68b	13 030.09b	74.90b
N2F2	60 316.12b	13 402.24bc	77.38ab	59 077.35b	13 132.90b	75.23b
N2F3	62 206.98b	13 760.18b	74.42b	59 799.76ab	13 233.69b	75.34b
N3F1	62 449.25ab	13 851.24ab	78.98ab	62 011.98ab	13 741.86ab	76.12ab
N3F2	63 189.11ab	13 990.07ab	78.56ab	62 310.02a	13 820.36a	76.63ab
N3F3	64 688.43ab	14 328.49ab	75.72b	61 620.99ab	13 661.37ab	75.32b
N4F1	65 566.65a	14 595.14a	73.52b	62 680.58a	13 940.16a	73.96b
N4F2	65 281.60a	14 485.99a	74.97b	61 735.37ab	13 692.91ab	75.73b
N4F3	65 334.08a	14 360.43ab	73.33b	61 848.37ab	13 637.57ab	73.47b
N	**	**	**	**	**	**
F	**	**	**	ns	ns	*
N×F	*	**	**	**	**	**

充实度以 N1F1 处理最高，N4F3 处理最低。

### 2.5 施氮量与氮磷钾配比对产量及其构成因素的影响

如表 7 和表 8 所示，各处理下有效穗数均随着施氮量增加而增加，在不同氮磷钾配比下差异不显著，但 F3 处理有效穗数均大于 F2 与 F1 处理；2023 年随着施氮量增加穗粒数增多，施氮量达到 180  $\text{kg}/\text{hm}^2$  穗粒数开始减少，2024 年穗粒数在施氮量达到 150  $\text{kg}/\text{hm}^2$  时达到最大值。结实率与千粒重均随施氮量增加而呈下降趋势，以 N1 处理最高，在施氮量与氮磷钾处理间均以 F2 处理最大，但差异不显著。产量随着施氮量增大而提高，在施氮量达到 180  $\text{kg}/\text{hm}^2$  时达到最大值后开始降低，产量在不同氮磷钾配比处理下以 F2 处理较高，但差异不显著。N3 处理 2 年产量均较高归因于有效穗数与穗粒数较多。互作处理方面，产量均以 N3F1 与 N3F2 最大，有效穗数均以 N4F3 处理最大，穗粒数分别以 N3F2 和 N2F3 最大，结实率分别以 N1F2 与 N1F3 处理最大，千粒重无显著

差异，均以 N1F2 处理最大。可见施氮量对小粒型杂交稻有明显增产作用，N3 处理最佳，氮磷钾配比处理差异不显著，但 F2 处理总体上表现优于 F1 与 F3 处理。卓两优 0985 产量构成特性为千粒重小和穗粒数多，因此，选择适宜的施氮量与氮磷钾配比来增加有效穗数可以明显提高产量优势。

### 2.6 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻不同时期粒叶比的影响

由表 9 可知，2023 年粒叶比均大于 2024 年，且 2 年均表现为灌浆中期 > 齐穗期 > 孕穗期。随着施氮量的增加，各时期粒叶比均有下降趋势，但处理间差异不显著。不同氮磷钾配比处理对各时期粒叶比也无显著差异。从施氮量与氮磷钾配比互作看，2 年粒叶比在孕穗期分别以 N2F3 与 N3F1 处理处于较高水平，N4F3 处理处于较低水平，各处理间差异不显著；齐穗期分别以 N2F3 与 N2F1 处理处于较高水平，N4F2 与 N47F3 处理处于较低水平；灌浆中期以 N1F1 处理最高，N4F3 与 N4F2 处于较低水平。

表7 2023年施氮量与氮磷钾配比对小粒型杂交稻产量及其构成因素的影响

Table 7 Effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on rice yield and its components of small-seed hybrid rice in 2023

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	穗粒数 Grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	实际产量 Actual yield ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )
N1	228.25c	233.44b	81.45a	22.20a	9.64c	9.32c
N2	241.62b	250.64a	78.27ab	22.17a	10.51b	10.17b
N3	251.47ab	252.30a	79.50ab	22.16a	11.17a	10.93a
N4	266.35a	245.54ab	76.18b	22.14a	11.03ab	10.71a
F1	244.56a	244.40a	79.26a	22.19a	10.51a	10.20a
F2	245.23a	246.14a	79.47a	22.20a	10.64a	10.38a
F3	250.97a	245.91a	77.83a	22.12a	10.61a	10.26a
N1F1	225.78c	231.18c	81.47a	22.14a	9.41c	9.22c
N1F2	226.87c	233.23c	82.04a	22.26a	9.66c	9.31c
N1F3	232.09c	235.91bc	80.85ab	22.21a	9.83c	9.42c
N2F1	238.31bc	248.33ab	78.62ab	22.17a	10.32bc	9.91bc
N2F2	241.39bc	249.87ab	78.49ab	22.22a	10.52b	10.37b
N2F3	245.17b	253.73a	77.70b	22.12a	10.69b	10.24b
N3F1	249.03b	250.77ab	80.96ab	22.18a	11.21a	10.94a
N3F2	248.18b	254.61a	80.47ab	22.14a	11.26a	10.99a
N3F3	257.19ab	251.52ab	77.07b	22.15a	11.04ab	10.85ab
N4F1	265.13a	247.30ab	75.98b	22.26a	11.09ab	10.73ab
N4F2	264.48a	246.83ab	76.88b	22.19a	11.14ab	10.86ab
N4F3	269.43a	242.49b	75.68b	21.98a	10.87ab	10.53ab
N	**	**	**	ns	**	**
F	*	ns	ns	**	**	**
N×F	ns	ns	ns	**	**	**

表8 2024年施氮量与氮磷钾配比对小粒型杂交稻产量及其构成因素的影响

Table 8 Effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on rice yield and its components of small-seed hybrid rice in 2024

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	穗粒数 Grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	实际产量 Actual yield ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )
N1	237.39b	223.93b	82.00a	22.21a	9.68c	9.41c
N2	243.43b	243.11a	78.17ab	22.19a	10.27b	9.87b
N3	258.51a	239.77a	78.65ab	22.17a	10.81a	10.45a
N4	265.69a	233.68ab	76.39b	22.16a	10.51ab	10.23ab
F1	250.48a	235.20a	78.76a	22.19a	10.29a	9.96a
F2	251.43a	234.88a	79.10a	22.21a	10.37a	10.06a
F3	251.87a	235.29a	78.54a	22.15a	10.29a	9.95a
N1F1	236.64b	221.62b	81.87a	22.15a	9.51c	9.32c
N1F2	237.41b	224.15b	81.75a	22.25a	9.68c	9.39c
N1F3	238.13b	226.01b	82.37a	22.24a	9.86bc	9.52bc
N2F1	241.56b	242.87a	77.94b	22.21a	10.16b	9.76bc
N2F2	243.96b	242.16a	77.82b	22.23a	10.22b	9.88b
N2F3	244.77b	244.31a	78.76ab	22.13a	10.42ab	9.97b
N3F1	257.45a	240.87ab	79.21ab	22.16a	10.88a	10.46a
N3F2	259.95a	239.70ab	79.11ab	22.18a	10.93a	10.59a
N3F3	258.12a	238.73ab	77.63b	22.17a	10.61ab	10.29ab
N4F1	266.25a	235.42ab	76.03b	22.24a	10.60ab	10.31ab
N4F2	264.38a	233.51ab	77.72b	22.18a	10.64ab	10.37ab
N4F3	266.45a	232.12b	75.41b	22.05a	10.28b	10.02b
N	**	**	**	ns	**	**
F	ns	ns	ns	*	ns	**
N×F	ns	ns	ns	*	**	**

表 9 施氮量与氮磷钾配比对小粒杂交稻叶片不同时期粒叶比的影响  
Table 9 Effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on grain-leaf ratio of small-seed hybrid rice at different growing stages

处理 Treatment	2023			2024		
	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	灌浆中期 Mid-filling stage	孕穗期 Booting stage	齐穗期 Full heading stage	灌浆中期 Mid-filling stage
N1	0.806a	0.897a	1.067a	0.782a	0.855a	1.050a
N2	0.806a	0.894a	1.059ab	0.790a	0.865a	1.033a
N3	0.805a	0.898a	1.061ab	0.787a	0.862a	1.037a
N4	0.792a	0.890a	1.046b	0.777a	0.847a	1.034a
F1	0.798a	0.888a	1.057a	0.790a	0.861a	1.047a
F2	0.808a	0.888a	1.058a	0.785a	0.858a	1.034a
F3	0.801a	0.908a	1.059a	0.777a	0.854a	1.030a
N1F1	0.807a	0.898ab	1.078a	0.777a	0.856ab	1.066a
N1F2	0.813a	0.888ab	1.052ab	0.785a	0.862ab	1.039ab
N1F3	0.798a	0.905ab	1.069a	0.785a	0.848ab	1.027ab
N2F1	0.787a	0.873b	1.044ab	0.792a	0.870a	1.027ab
N2F2	0.807a	0.886ab	1.056ab	0.793a	0.860ab	1.038ab
N2F3	0.823a	0.924a	1.076a	0.785a	0.865a	1.035ab
N3F1	0.793a	0.891ab	1.057ab	0.798a	0.862ab	1.047ab
N3F2	0.820a	0.899ab	1.064ab	0.795a	0.861ab	1.045ab
N3F3	0.803a	0.903ab	1.062ab	0.769a	0.864ab	1.019b
N4F1	0.804a	0.890ab	1.051a	0.792a	0.854ab	1.048ab
N4F2	0.793a	0.881ab	1.060ab	0.769a	0.850ab	1.014b
N4F3	0.779a	0.899ab	1.027b	0.768a	0.838b	1.041ab
N	**	ns	**	**	**	**
F	*	**	ns	**	*	**
N×F	**	**	**	**	*	**

2.7 小粒杂交稻源、库指标与产量的相关性

由表 10 可知, LAI、高效 LAI、叶片 SPAD

值、干物质积累量、总颖花数、总库容量、有效穗数与产量呈极显著正相关, 库容有效充实度、结实

表 10 小粒杂交稻源库性状与产量的相关性  
Table 10 Correlation between source-sink traits and yield of small-seed hybrid rice

源性状 Source trait	实际产量 Actual yield		库性状 Sink trait	实际产量 Actual yield		
	2023	2024		2023	2024	
LAI	分蘖期	0.898**	0.878**	总颖花数 Total spikelets	0.935**	0.938**
	孕穗期	0.897**	0.898**	总库容量 Total sink capacity	0.938**	0.942**
	齐穗期	0.929**	0.916**	库容有效充实度 Available filled ratio of sink capacity	-0.401	-0.646*
	灌浆中期	0.907**	0.918**	有效穗数 Effective panicle number	0.827**	0.855**
	剑叶	0.962**	0.879**	穗粒数 Grains per panicle	0.834**	0.634*
	倒二叶	0.889**	0.921**	结实率 Seed-setting rate	-0.565	-0.627*
	倒三叶	0.962**	0.852**	千粒重 1000-grain weight	-0.193	-0.217
	高效 LAI	0.964**	0.926**	理论产量 Theoretical yield	0.989**	0.988**
SPAD 值 SPAD value	分蘖期	0.848**	0.765**	孕穗期粒叶比 Grain to leaf ratio at booting stage	-0.214	0.178
	孕穗期	0.876**	0.814**	齐穗期粒叶比 Grain to leaf ratio at full heading stage	-0.039	-0.132
	齐穗期	0.896**	0.876**	灌浆中期粒叶比 Grain to leaf ratio at mid-filling stage	-0.239	-0.221
	灌浆中期	0.870**	0.894**			
干物质积累量 Dry matter accumulation	孕穗期	0.953**	0.888**			
	齐穗期	0.970**	0.934**			
	灌浆中期	0.972**	0.932**			
	成熟期	0.988**	0.956**			

“\*” 和 “\*\*” 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平显著和极显著相关。

“\*” and “\*\*” indicate significant and extremely significant correlations at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  levels, respectively.

率与产量呈负相关,且 2024 年表现为显著负相关,穗粒数与产量呈极显著或显著正相关,千粒重、粒叶比与产量相关性不显著。

### 3 讨论

#### 3.1 施氮量与氮磷钾配比对卓两优 0985 源性状的影响

水稻“源”通常指生产与输出同化物的器官或组织,叶片是源的主体部分<sup>[13]</sup>。研究<sup>[14-16]</sup>表明,增施氮肥可以增加水稻 LAI 和 SPAD 值。前人<sup>[17-18]</sup>认为水稻上三叶长度应适中,以确保在最大叶面积的前提下适当增加水稻上三叶的叶面积比例,这有利于实现冠层结构的最佳配置。王杰等<sup>[19]</sup>认为,生育后期维持较高的高效 LAI 对于提高最终产量至关重要。本研究表明,水稻高效 LAI 与产量呈显著正相关,与上述结果一致。本研究发现,随施氮量的增加,水稻 LAI、高效 LAI 和叶片 SPAD 值显著提高,能在灌浆期保持较高的叶绿素含量,且叶绿素含量降低速率较慢,叶片功能期较长,促进花后光合物质积累,从而提高产量,这与刘光明等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。但本研究同时发现,氮磷钾配比处理间差异均不显著, LAI 与高效 LAI 均以 F3 处理最大, F2 与 F3 处理 SPAD 值与干物质积累量均大于 F1 处理,可知 F2 与 F3 处理源特性强于 F1 处理。通常情况下,合理的氮磷钾配比能够促进作物拥有更大的叶面积、更高的叶片 SPAD 值以及更强的光合作用能力,进而延长高光效持续时间,有利于更多的干物质积累。

干物质积累与分配是作物器官分化和产量形成的关键前提条件,通过提高干物质质量可以达到增强“源”的目的<sup>[21]</sup>。本试验结果显示,不同施氮量下,干物质积累量表现为 N4、N3 和 N2 处理显著高于 N1 处理,而 N4 与 N3 处理之间差异不显著,且 2 年试验结果一致。关于氮磷钾配比的影响,尽管总体差异不显著,但 F2 和 F3 处理下的干物质积累量均高于 F1 处理,特别是在灌浆中期和成熟期, F2 处理的优势较为明显。

#### 3.2 施氮量与氮磷钾配比对卓两优 0985 库性状的影响

“库”是指利用或贮藏同化物的器官或组织,穗部籽粒是库的主体部分<sup>[22]</sup>。作物产量是一个受多种因素综合影响的过程,由植株早期生长发育和后

期物质积累转运共同决定。单位面积总颖花数、饱粒千粒重、总颖花数×饱粒千粒重分别反映了库的数量、质量和总库容量<sup>[23]</sup>。陈年来<sup>[24]</sup>研究认为,库容量大有利于提高叶片同化物向库器官的分配比例,促进产量提升。本试验结果表明,随着施氮量增加,总颖花量和总库容量逐渐增加,其中 N1 与 N2 处理之间差异显著, N3 和 N4 处理差异不显著,但均显著高于 N1 处理。比较不同氮磷钾配比对总颖花数及总库容量的影响,以 F3 处理总颖花量和总库容量最大,各氮磷钾配比处理间差异不显著;库容有效充实度随施氮量增加而降低, N4 处理总库容量最大,库容有效充实度最低, N3 处理在较大总库容量的同时拥有较大库容有效充实度。

郭浪等<sup>[11]</sup>以小粒不育系卓 234S 系列杂交稻组合为材料开展研究,发现施氮量显著影响小粒型杂交稻产量,有效穗数随施氮量增加而增加,每穗总粒数随施氮量增加呈先升后降趋势,结实率和千粒重随施氮量增加呈下降趋势,小粒型杂交稻在施氮 180 kg/hm<sup>2</sup> 条件下可实现高产,本研究结果与其基本一致。但也有研究<sup>[25-26]</sup>表明,随着施氮量的增加,群体有效穗数、每穗粒数、结实率和产量呈先增高后降低的趋势。研究结果有所差异,其原因可能是品种与施氮水平不一致。适量施用磷肥可以增加水稻有效穗数和每穗粒数,使籽粒更为饱满,从而提高产量<sup>[27]</sup>,过量施用磷肥则会抑制水稻生长发育,增加无效分蘖和空粒数,降低成穗率和结实率,影响千粒重提高,导致减产<sup>[28]</sup>,产量随着施磷量的增加先增加后减少<sup>[29]</sup>。才硕等<sup>[30]</sup>研究表明,施钾能够显著提高水稻有效穗数、每穗粒数和产量,增加生物产量,促进茎鞘物质运转,提高颖花伤流量,降低抽穗后的根系活力衰退值。2023 年,小粒型杂交稻卓两优 1126 在云南蒙自市取得了单产 17.79 t/hm<sup>2</sup> 的高产,创造了当地水稻百亩片的最高产量纪录<sup>[31]</sup>,卓两优 1126 产量的提高主要得益于在保持千粒重和结实率稳定的基础上,通过平衡有效穗数与每穗粒数使群体总颖花数显著提升<sup>[32]</sup>。卓两优 0985 的千粒重和结实率与其差异不显著,同样也可通过调整有效穗数与每穗粒数实现超高产。

孙永健等<sup>[33]</sup>研究表明,氮磷钾配施能够提高水稻对氮素的吸收,当氮磷钾配比为 1.0:0.5:1.0 时,中氮(180 kg/hm<sup>2</sup>)水平能提高水稻产量,当氮肥

过量时,会增加茎鞘与叶片的氮滞留量,使水稻茎叶徒长,没有高效流向穗部,产量无明显提高;刘凤等<sup>[34]</sup>研究表明,当氮磷钾比例均为 1.0:0.5:1.0 时,中氮水平处理的产量显著高于低氮水平处理,与高氮水平处理差异不显著。本研究与上述研究结果较为一致,N3F2 (180 kg/hm<sup>2</sup>, 1.0:0.5:1.0) 处理的产量高于其他处理,N3F1 处理次之,但从节肥增产方面考虑,N3F1 处理为最佳处理。N4 处理总库容量比 N3 处理高,但其产量比 N3 低,这主要是因为 N4 处理的结实率比 N2 处理低。在施氮量同为 180 kg/hm<sup>2</sup> 条件下,F2 处理产量高于 F3 处理,其原因可能是施磷量过大,影响其产量,这与林诚等<sup>[35]</sup>研究一致。

### 3.3 施氮量与氮磷钾配比对卓两优 0985 源库协调性的影响

作物“源”的生长发育直接决定了光合产物的生产与运转能力,进而影响“库”的容量;而“库”的生长发育又会反馈调节“源”的光合产物合成和运输,从而调节“源”的强度,二者关系的建立、发展和平衡将决定作物的产量。源库关系的协调对作物产量影响显著,粒叶比是衡量群体源库协调程度的常用指标<sup>[5]</sup>。冯跃华等<sup>[36]</sup>研究表明,随施氮量的增加,颖花粒叶比、实粒粒叶比和粒重粒叶比均降低,特别是过多施用氮肥,单位叶面积所承载的颖花数、实粒数和粒重减少,源库关系失调,直接导致产量降低。吕宙等<sup>[12]</sup>研究了小粒型杂交稻卓两优 0985 的产量形成特性,发现其粒叶比和施氮条件下营养器官物质输出率均高于对照品种丰两优 4 号,卓两优 0985 高产主要得益于穗粒数多和花后物质积累量大,且低氮条件下也表现出较高产量,具有较小的叶面积、较多的穗粒数、较大的库源比、明显的灌浆中后期光合优势以及较高的经济系数。本研究结果表明,粒叶比与产量相关性不显著,N1 处理粒叶比较高,但 N1 处理的叶面积和穗粒数均最低,单位叶面积上担负的籽粒数和籽粒质量高,整体产量低;N2 处理穗粒数较高,叶面积较低,粒叶比较高,但产量处于中等水平;N3 处理穗粒数较多,叶面积较大,产量最高,粒叶比合理,源库关系协调;N4 处理叶面积大,粒叶比最低,说明其叶面积过大,影响冠层光合速率,降低籽粒质量。N3 处理源库生理优势较强,源器官和库器官同步增长,光合产物积累多,营养物质转运较快,

能及时满足发育所需,主要体现在有较多的穗粒数,施氮不仅增强了源的生产能力,还增大了库容量,有利于籽粒产量提高。

张宇等<sup>[37]</sup>认为,粒叶比增大,可以增强库对源物质的“拉动”,促进可溶性碳水化合物从茎鞘向籽粒的转运。综合互作处理分析发现,N3F2 处理源库关系合理,产量较高,属于源库协调型。本研究发现,随着施氮量增加,粒叶比表现下降趋势,尤其施氮过多的处理,单位叶面积所承载的颖花数、实粒数和粒重减少,粒叶比最低,源库关系失调,导致产量降低,这一点与唐启源等<sup>[38]</sup>的研究结果一致。不同施氮水平下,杂交稻保持系叶片源和籽粒库均受到施氮量的较大影响,各时期单株绿叶面积以及粒叶比随着施氮量增加而变化的趋势存在差异<sup>[39]</sup>。

综上所述,施氮量与氮磷钾配比显著影响水稻的源库特性。本试验表明,在源特性方面,卓两优 0985 在 N3 处理下具有较高的叶面积与 SPAD 值,水稻具有充足的“源”,使叶片后期的光合作用更强;在库特性方面,卓两优 0985 在 N3 处理下提高有效穗数与穗粒数,增大库容,产量高于其他处理。且在 N3 处理下粒叶比适中,表明适宜的施氮量处理能较好地协调源库关系。本试验中各数据在氮磷钾配比处理间差异并不显著,可能是由于试验田土壤中的碱解氮与速效钾处于高水平,土壤条件肥力较高,各种养分含量丰富且比例协调,能够基本满足水稻生长对氮磷钾的需求,设置不同的氮磷钾配比,水稻可能表现不出明显差异;也有可能是由于钾肥的用量差距较小,不同氮磷钾配比之间的差异难以体现,关于氮磷钾配比处理的差异有待进一步研究证实。王伟妮等<sup>[40]</sup>研究显示,氮、磷和钾肥的施用均可以显著提高水稻产量,且 3 种肥料配施的增产效果明显优于 2 种肥料配施,当肥料用量处于低中水平时,氮、磷和钾肥互作效应均表现为协同促进作用,但当肥料用量超过一定水平后则表现为拮抗作用。卜容燕等<sup>[41]</sup>研究从肥料投入经济效益角度出发,指出氮肥和钾肥不合理施用会导致负的经济效益,而磷肥则不明显。合理的氮磷钾配比能够使 3 种元素发挥协同作用,满足水稻不同生长阶段对各种养分的需求,促进水稻生长发育和产量形成。此外,卓两优 0985 在中高氮水平后再增施氮肥对产量有限,在氮磷钾配比处理下差

异不显著,应根据当地的土壤和小粒型品种的特性,选择能最大发挥水稻产能的施氮量,再搭配适当比例的磷肥和钾肥,有助于小粒型杂交稻产量的进一步提高。

#### 4 结论

小粒型杂交稻在施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理下 LAI 与高效 LAI 较大,灌浆中期 SPAD 值较高,有明显的光合优势,干物质积累量较多,穗粒数较多,源库关系较为协调,因而产量较高;小粒型杂交稻源库特性在不同氮磷钾配比下差异不显著,综合考虑增产效果与经济效益,小粒型杂交稻卓两优 0985 在 N3F1 (180 kg/hm<sup>2</sup>, 1.0:0.5:0.8) 处理下效益最佳,源库关系较为协调的同时,达到节肥增产的效果。

#### 参考文献

- [1] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 2022 年我国水稻产业发展分析及 2023 年展望. 中国稻米, 2023, 29(2): 1-4.
- [2] 乔胜锋, 邓亚萍, 瞿寒冰, 等. 不同籼稻品种对低磷响应的差异及其农艺生理性状. 中国水稻科学, 2021, 35(4): 396-406.
- [3] 李波, 宫亮, 曲航, 等. 辽河三角洲稻区施氮水平对水稻生长发育及产量的影响. 作物杂志, 2020(1): 173-178.
- [4] 宋志文, 赵蕾, 毕俊国, 等. 滴灌条件下施氮量对不同氮效率水稻品种物质积累及养分吸收的影响. 作物学报, 2024, 50(8): 2025-2038.
- [5] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 等. 水稻高产群体质量及其优化控制探讨. 中国农业科学, 1993, 26(6): 1-11.
- [6] 屠乃美, 官春云. 水稻幼穗分化期间减源对源库关系的影响. 湖南农业大学学报, 1999, 25(6): 6-12.
- [7] 朱庆森, 张祖建, 杨建昌, 等. 亚种间杂交稻产量源库特征. 中国农业科学, 1997, 30(3): 52-59.
- [8] Osorio S, Ruan Y L, Fernie A R. An update on source-to-sink carbon partitioning in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 516.
- [9] Doehrlert D C. Sink strength: dynamic with source strength. *Plant, Cell & Environment*, 1993, 16(9): 1027-1028.
- [10] 俞慧友. 云南个旧杂交中稻超高产攻关亩产突破 1200 公斤. 中国科技网. (2022-09-15)[2025-01-06]. <http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/202209/247eb0527ec44176a19afe15f6a27da0.shtml>.
- [11] 郭浪, 肖敏, 崔璨, 等. 施氮量对小粒型杂交稻产量与氮素利用效率的影响. 杂交水稻, 2023, 38(5): 108-114.
- [12] 吕宙, 易秉怀, 陈平平, 等. 施氮量与移栽密度对小粒型杂交水稻产量形成的影响. 中国水稻科学, 2024, 38(4): 422-436.
- [13] Tadahiko M. *Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment*. Netherlands: Springer Science & Business Media, 1997.
- [14] 许桂玲, 王玲莉, 叶勇, 等. 不同施氮量对机插杂交籼稻群体质量及产量的影响. 耕作与栽培, 2018(4): 1-3.
- [15] 陈露, 张伟杨, 王志琴, 等. 施氮量对江苏不同年代中粳稻品种产量与群体质量的影响. 作物学报, 2014, 40(8): 1412-1423.
- [16] 宋晓华, 柳楷婧, 彭波, 等. 施氮水平对豫南地区杂交粳稻群体质量和产量的影响. 杂交水稻, 2019, 34(4): 39-43.
- [17] 杨建昌, 朱庆森, 曹显祖. 水稻群体冠层结构与光合特性对产量形成作用的研究. 中国农业科学, 1992, 25(4): 7-14.
- [18] 苏祖芳, 郭宏文, 李永丰, 等. 水稻群体叶面积动态类型的研究. 中国农业科学, 1994, 27(4): 23-30.
- [19] 王杰, 张武汉, 孙平勇, 等. 3 个杂交稻新组合源库特性与产量形成研究. 湖南农业科学, 2014(12): 4-7.
- [20] 刘光明, 赵灿, 蒋岩, 等. 施氮量对水稻源库协同衰老特征的影响. 植物生理学报, 2022, 58(1): 173-185.
- [21] 王素兰. 水稻籽粒灌浆期间茎鞘非结构性同化物积累及其调节. 扬州: 扬州大学, 2003.
- [22] Venkateswarlu B, Visperas R M. Source-sink relationships in crop plants. *Agricultural and Food Sciences, Biology*, 1987, 2: 125.
- [23] 熊洁, 耿春苗, 丁艳锋, 等. 不同库容类型杂交早籼稻品种源库结构对垩白的影响. 中国农业科学, 2011, 44(19): 3970-3980.
- [24] 陈年来. 作物源库关系研究进展. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(1): 1-10.
- [25] 王振洋, 王冀川, 袁杰, 等. 不同施氮量与栽插密度对水稻群体生长及产量构成的影响. 新疆农业科学, 2022, 59(12): 2969-2978.
- [26] 黄梅燕, 潘文兴, 农永前, 等. 不同施氮量和种植密度对水稻葛 68 优 9938 产量的影响. 农业科技通讯, 2021(11): 107-110.
- [27] 李前, 侯云鹏, 高军, 等. 不同供磷水平对水稻干物质累积、磷素吸收分配及产量的影响. 吉林农业科学, 2015, 40(3): 37-41.
- [28] 樊禄芹, 樊禄栋. 施用磷肥对水稻产量结构及经济效益的影响. 北方水稻, 2020, 50(4): 20-23.
- [29] 龚金龙, 张洪程, 李杰, 等. 施磷量对超级稻南粳 44 产量和质量的影响. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 447-451.
- [30] 才硕, 潘晓华, 吴建富, 等. 施钾量对超高产早籼稻品种产量和稻米质量的影响. 江西农业学报, 2011, 23(5): 1-5, 9.
- [31] 李建武, 辛业芸, 李文友, 等. 杂交水稻新组合卓两优 1126 百亩片单产 17.79 t/hm<sup>2</sup> 超高产栽培技术. 中国稻米, 2024, 30(4): 105-107, 112.
- [32] 刘慧敏, 周杰强, 胡远艺, 等. 水稻小粒不育系新组合卓两优 1126 的高产特征. 中国水稻科学, 2024, 38(2): 160-171.
- [33] 孙永健, 孙园园, 蒋明金, 等. 施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响. 中国农业科学, 2016, 49(24): 4745-4756.
- [34] 刘凤, 石爱龙, 祝海竣, 等. 施氮量与肥料配比对水稻群体生长和产量的影响. 杂交水稻, 2024, 39(3): 117-126.
- [35] 林诚, 李清华, 王飞, 等. 不同施磷水平对冷浸田水稻磷含量、光合特性及产量的影响. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(5): 553-558.
- [36] 冯跃华, 潘剑, 何腾兵, 等. 不同施氮水平对超级稻源库特性的影响. 中国农学通报, 2010, 26(15): 252-256.
- [37] 张宇, 赵宝平, 柳妍娣, 等. 施氮量对裸燕麦源库生理特性和茎鞘 NSC 积累与转运的影响. 麦类作物学报, 2024, 44(2): 206-213.
- [38] 唐启源, 邹应斌, 米湘成, 等. 不同施氮条件下超级杂交稻的产量形成特点与氮肥利用. 杂交水稻, 2003, 18(1): 47-51.
- [39] 杨玲娟, 张卫星, 张伟贵, 等. 不同施氮水平对杂交水稻保持系源库特征的影响. 中国农学通报, 2014, 30(9): 82-87.
- [40] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、质量及养分吸收利用的影响. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645-653.
- [41] 卜容燕, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 中稻氮磷钾肥的施肥效果及推荐用量. 中国农学通报, 2010, 26(14): 218-221.

## Effects of Nitrogen Application Rate and N-P-K Ratio on Source-Sink Characteristics of Small-Seed Hybrid Rice

Pan Qunxiao, Long Chao, Zhuo Le, Yin Chao, Xiao Min, Zhou Wenxin, Yi Zhenxie

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China)

**Abstract** To elucidate the effects of nitrogen application rate and N-P-K ratio on the source-sink characteristics of small-seed hybrid rice, a field experiment was conducted using the small-seed hybrid rice variety Zhuoliangyou 0985 as material. The experiment involved four nitrogen application levels [120 (N1), 150 (N2), 180 (N3), and 210 kg/ha (N4)] and three NPK ratios [1.0:0.5:0.8 (F1), 1.0:0.5:1.0 (F2), and 1.0:1.0:1.0 (F3)]. The results showed that leaf area index (LAI), high-efficiency LAI, relative content of chlorophyll (SPAD values), and dry matter accumulation increased with increasing nitrogen application rate. There were no significant differences between N3 and N4 treatments, but both were significantly higher than the N1 treatment. Among different N-P-K ratios, the F3 treatment generally resulted in higher values, though the differences were not significant. Total spikelets and total sink capacity increased with the increase of nitrogen application rate, and the available filled ratio of sink capacity followed the order of N1 > N3 > N2 > N4. Under different N-P-K ratios, the effective filling degree of sink capacity was generally the highest in F2, though the difference was not significant. Effective panicles increased with the increase of nitrogen application rate, while the number of grains per panicle initially increased and then decreased. Both seed-setting rate and 1000-grain weight decreased with the increase of nitrogen application rate, but these differences did not reach a significant level. Yield showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of nitrogen application, with the N3 treatment producing the highest yield. Among the interaction treatments, N3F2 achieved the highest yield, followed by N3F1. Correlation analysis indicated that LAI, high-efficiency LAI, leaf SPAD value, dry matter accumulation, total spikelets, total sink capacity, and effective panicles were extremely significantly and positively correlated with yield. The available filled ratio of sink capacity and seed-setting rate were negatively correlated with yield, while the number of grains per panicle was significantly and positively correlated with yield. No significant correlations were found between 1000-grain weight, grain-leaf ratio, and yield. Under the conditions of this experiment, N3F1 was considered the optimal treatment for Zhuoliangyou 0985. It had a relatively large leaf area, a high number of grains per panicle, a large sink capacity, and a high available filled ratio of sink capacity, with a moderate grain-leaf ratio, which coordinated source-sink relationship and achieved the dual effects of fertilizer saving and yield increase.

**Key words** Small-seed hybrid rice; Nitrogen application rate; N-P-K ratio; Yield; Source-sink characteristics