

施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响

吴培¹ 陈天晔¹ 袁嘉琦¹ 黄恒¹ 邢志鹏¹ 胡雅杰^{1,*} 朱明¹ 李德剑² 刘国林²
张洪程^{1,*}

(¹扬州大学 江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009; ²江苏省兴化市农业局, 江苏 兴化 225700; *通讯联系人, E-mail: huyajie@yzu.edu.cn; hczhang@yzu.edu.cn)

Effects of Interaction Between Nitrogen Application Rate and Direct-sowing Density on Yield Formation Characteristics of Rice

WU Pei¹, CHEN Tianye¹, YUAN Jiaqi¹, HUANG Heng¹, XING Zhipeng¹, HU Yajie^{1,*}, ZHU Ming¹, LI Dejian²,
LIU Guolin², ZHANG Hongcheng^{1,*}

(¹Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou University/ Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; ²Bureau of Agriculture of Xinghua County of Jiangsu Province, Xinghua 225700, China; * Corresponding author, E-mail: huyajie@yzu.edu.cn; hczhang@yzu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】To reveal the effects of interaction between nitrogen application rate and direct-sowing density on yield formation characteristics of rice, 【Method】 Nanjing 9108, a *japonica* cultivar with good taste, was used as the experimental material. We designed four nitrogen application rates, namely N₁(0 kg/hm²), N₂(150 kg/hm²), N₃(225 kg/hm²), N₄(300 kg/hm²), and five direct-sowing densities, namely D₁(90×10⁴/hm²), D₂(180×10⁴/hm²), D₃(270×10⁴/hm²), D₄(360×10⁴/hm²), D₅(450×10⁴/hm²). 【Result】 The rice yield increased with the increase of nitrogen rate. Under the nitrogen application rate of N₁, N₂, N₃, the grain yield of rice was first increased and then decreased with the increase of direct-sowing density. Under these nitrogen application rates, the highest yield was 6.74 t/hm², 7.78 t/hm², 8.93 t/hm², respectively, which was obtained at the direct-sowing densities of D₄, D₃, D₂. Under the nitrogen rate of N₄, the yield decreased with the increase of direct-sowing density, and the highest yield was 9.55 t/hm², which was obtained at the direct-sowing density of D₁. Appropriate direct-sowing densities under different nitrogen application rates can improve rice yield, among which the yield of N₄D₁ was the highest, due to its moderate number of stems and tillers, large panicle type and LAI in the mid- and late-growth stages, high photosynthetic potential and crop growth rate, superior net assimilation rate and dry matter weight in the later growth. 【Conclusion】 Under the high nitrogen rate of 300 kg/hm², mechanical direct-sowing rice can easily achieve high yield, and appropriate direct-sowing density can further improve rice yield. However, given green production and cost saving and efficiency increasing, to reduce the nitrogen rate to 225 kg/hm², and the direct-sowing density to 180×10⁴/hm² can still obtain yield around 9 t/hm², which is also worthy of promotion.

Key words: rice; mechanical direct-sowing; nitrogen application rate; direct-sowing density; yield; photosynthesis and matter production

摘要: 【目的】旨在阐明施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响。【方法】以优质食味粳稻南粳 9108 为试验材料, 设置 4 个施氮量处理, 即 N₁(0 kg/hm²)、N₂(150 kg/hm²)、N₃(225 kg/hm²)、N₄(300 kg/hm²), 5 个直播密度处理, 即 D₁(90×10⁴/hm²)、D₂(180×10⁴/hm²)、D₃(270×10⁴/hm²)、D₄(360×10⁴/hm²)、D₅(450×10⁴/hm²)。【结果】随施氮量增加, 机直播稻产量增加。在 N₁、N₂ 和 N₃ 施氮量下, 机直播稻产量随直播密度增加先增后降, 分别在 D₄、D₃ 和 D₂ 密度下获得最高产量, 其最高产量分别为 6.74、7.78 和 8.93 t/hm²; 在 N₄ 施氮量下, 水稻产量随直播密度增加而降低, 在 D₁ 密度下获得最高产量, 为 9.55 t/hm²。不同施氮量下采用适宜直播密度可以提高水稻产量, 其中 N₄ 施氮量配套 D₁ 直播密度机直播稻产量最高, 其有效穗数适宜, 穗型较大, 生育中后期 LAI 较大、光合势高, 生育后期群体生长率、净同化率和干物质积累量等指标均较优。【结论】机直播稻在 300 kg/hm² 的高氮水平下易取得高产, 配套适宜直播密度可进一步提高水稻产量, 但从稻田绿色生产和节本增效角度考虑, 机直

收稿日期: 2018-10-15; 修改稿收到日期: 2018-11-18。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0300503); 国家自然科学基金资助项目(31601246); 江苏省农业科技自主创新基金资助项目(CX[15]1002); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2018355)。

播稻适当降低施氮量至 225 kg/hm², 配套 180×10⁴/hm² 直播密度仍可获得 9 t/hm² 左右的产量, 也值得推广。

关键词: 水稻; 机械直播; 施氮量; 直播密度; 产量; 光合物质生产

中图分类号: S143.1; S511.01; S511.048

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2019)03-0269-13

水稻是我国重要的口粮作物之一, 其稳产高产对保障我国粮食安全至关重要^[1]。随着社会经济的快速发展, 大量农村优质劳动力向城镇转移, 机械化、轻简化的水稻种植方式深受农民青睐。目前, 我国主要的水稻机械化种植方式包括机械移栽和机械直播两种。与机械移栽相比, 机械直播省去育秧、栽插等繁琐环节, 作业速度快、成本低、标准化程度高, 便于规模化生产, 因其省工节本优势显著在我国不同稻区迅速发展^[2-8]。氮肥用量和种植密度是影响水稻产量形成和高效群体质量构成的重要栽培调控措施^[9-11], 就目前生产来看, 稻农多采用撒直播、高肥高播量的生产方式, 直播稻群体结构差、病虫害和倒伏易发, 导致产量减少, 既不利于粮食安全又增加了生产成本^[12]。同时, 过高的氮肥投入, 氮肥流失多、利用效率低, 不仅造成了浪费还加剧了农业面源污染, 严重影响生态环境的可持续发展^[9]。因此, 如何优化创新直播稻栽培技术模式亟待科学地开展相关研究。前人大多在人工撒播条件下从品种、播期、密度、肥料、水浆管理等单因素进行直播稻栽培技术相关研究^[13-17], 而在机械化轻简化栽培越来越受到关注的新形势下, 如何通过密肥调控实现直播稻稳产高产的研究相对较少, 特别是近年来优质食味水稻推广面积不断扩大, 机直播条件下优质食味水稻稳产高产形成的最佳氮密配套措施及其产量形成和光合物质生产特征如何, 更缺乏系统的比较研究。因此, 本研究立足长江中下游地区, 以大面积推广的优质食味粳稻品种南粳 9108 为材料, 探讨施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响, 明确机直播稻在各施氮量水平下的最佳直播密度及其产量形成规律, 以期直播稻大面积稳产节本增效绿色生产提供理论支撑和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试材料

试验于 2016 和 2017 年在扬州大学农学院校外试验基地江苏省兴化市钓鱼镇进行。该地位于江淮之间的江苏里下河地区, 属北亚热带湿润气候区, 年平均温度 15℃, 年日照时数 2305.6 h, 年降水量 1024.8 mm, 无霜期 227 d。土壤地力中等, 为黏泥

土, 质地黏性。0—20 cm 土层含有机质 26.7 g/kg, 全氮 1.87 g/kg, 速效磷 13.4 mg/kg, 速效钾 150.6 mg/kg。试验地前茬为小麦, 产量 6.58 t/hm²。

供试材料为优质食味粳稻南粳 9108, 由江苏省农业科学院粮食作物研究所提供。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 以施氮量为主区, 直播密度为裂区, 设置 4 个施氮量处理, 施氮量以纯氮计, 分别为 0 kg/hm² (N₁)、150 kg/hm² (N₂)、225 kg/hm² (N₃)、300 kg/hm² (N₄); 在各施氮量下设置 5 个直播密度处理, 目标基本苗分别为 90×10⁴/hm² (D₁)、180×10⁴/hm² (D₂)、270×10⁴/hm² (D₃)、360×10⁴/hm² (D₄)、450×10⁴/hm² (D₅), 重复 3 次, 共 60 个小区, 各小区面积为 30 m²。主区间筑埂隔离, 覆膜包埂, 保证单独排灌。根据当地换茬时间和水稻及时抢播抢种的要求, 安排水稻适宜播期, 于 6 月 12 日人工模拟机械条播, 行距 25 cm, 播后 2 叶 1 心进行小区间苗。氮肥用尿素于翻耕前、分蘖始期、倒 4 叶和倒 2 叶施用, $m_{\text{基肥}} : m_{\text{分蘖肥}} : m_{\text{促花肥}} : m_{\text{保花肥}} = 4 : 3 : 1.5 : 1.5$ 。各小区磷钾肥统一用量, 磷肥(以 P₂O₅ 计)120 kg/hm² 全作基肥, 钾肥(以 K₂O 计)240 kg/hm² 分基肥、促花肥等量施用。水分和病虫害管理按当地水稻大面积生产的高产栽培要求统一实施。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖数

每小区选取 3 个观察点, 每点确定 2 m 距离, 分别于拔节期、抽穗期、成熟期记录茎蘖数。

1.3.2 干物质和叶面积

分别于上述时期, 按照调查的平均茎蘖数各小区采用五点取样, 随机取 10 株代表性样本, 分解为茎鞘、叶和穗(抽穗以后), 将各器官在 105℃ 下杀青 30 min, 75℃ 下烘干至恒重后测定干物质质量; 用比叶重法测定叶面积。

1.3.3 产量及产量构成因素

在收获前各小区选取 3 个观察点, 连续调查 5 行, 每行 2 m, 计算每公顷有效穗数; 各小区按平均穗数取 1 m² 装进塑料窗纱口袋内, 风干后, 脱粒、去杂质(不去空瘪粒), 调查每穗颖花数和结实率; 以 1000 粒实粒样本(干种子)称重, 重复 3 次(误差不超过 0.05 g), 求千粒重。成熟期各小区连续选割

表 1 氮密互作对机直播稻生育进程的影响

Table 1. Effect of nitrogen-density interaction on the growth stage in mechanical direct-sowing rice.

施氮量 Nitrogen application rate	直播密度 Direct-sowing density	播种期 Sowing (Month-Day)	拔节期 Jointing (Month-Day)	抽穗期 Heading (Month-Day)	成熟期 Maturity (Month-Day)	播种-拔节 Sowing- Jointing/d	拔节-抽穗 Jointing- Heading/d	抽穗-成熟 Heading- Maturity/d	总生育期 Total period of duration/d
N ₁	D ₁	06-12	08-10	09-01	10-25	59	22	54	135
	D ₂	06-12	08-10	09-01	10-25	59	22	54	135
	D ₃	06-12	08-10	09-01	10-25	59	22	54	135
	D ₄	06-12	08-10	09-01	10-25	59	22	54	135
	D ₅	06-12	08-10	09-01	10-25	59	22	54	135
N ₂	D ₁	06-12	08-10	09-02	10-27	59	23	55	137
	D ₂	06-12	08-10	09-02	10-27	59	23	55	137
	D ₃	06-12	08-10	09-02	10-27	59	23	55	137
	D ₄	06-12	08-10	09-02	10-27	59	23	55	137
	D ₅	06-12	08-10	09-02	10-27	59	23	55	137
N ₃	D ₁	06-12	08-10	09-04	10-30	59	25	56	140
	D ₂	06-12	08-10	09-04	10-30	59	25	56	140
	D ₃	06-12	08-10	09-04	10-30	59	25	56	140
	D ₄	06-12	08-10	09-04	10-30	59	25	56	140
	D ₅	06-12	08-10	09-04	10-30	59	25	56	140
N ₄	D ₁	06-12	08-10	09-05	11-03	59	26	59	144
	D ₂	06-12	08-10	09-05	11-03	59	26	59	144
	D ₃	06-12	08-10	09-05	11-03	59	26	59	144
	D ₄	06-12	08-10	09-05	11-03	59	26	59	144
	D ₅	06-12	08-10	09-05	11-03	59	26	59	144

N₁, 0 kg/hm²; N₂, 150 kg/hm²; N₃, 225 kg/hm²; N₄, 300 kg/hm². D₁, 90×10⁴/hm²; D₂, 180×10⁴/hm²; D₃, 270×10⁴/hm²; D₄, 360×10⁴/hm²; D₅, 450×10⁴/hm².

5 行(除去边行), 每行 5 m, 测定籽粒含水量, 去除杂质, 以 14.5% 含水量折算实产。

1.4 数据计算和统计分析

茎蘖成穗率(%)=有效穗数/拔节期茎蘖数×100;

结实期叶面积衰减率(LAI/d)=|LAI₂-LAI₁|/(t₂-t₁)。式中, LAI₁和 LAI₂为抽穗期和成熟期两次测定的叶面积指数, t₁和 t₂为前后两次测定的时间;

光合势(m² d/m²)=(L₁+L₂)×(t₂-t₁)/2。式中, L₁和 L₂为前后两次测定的叶面积, t₁和 t₂为前后两次测定的时间;

群体生长率[g/(m² d)]=(W₂-W₁)/(t₂-t₁)。式中, W₁和 W₂为前后两次测定的干物质量, t₁和 t₂为前后两次测定的时间;

净同化率[g/(m² d)]=[(lnLAI₂-ln LAI₁)/(LAI₂-LAI₁)]×(W₂-W₁)/(t₂-t₁)。式中, W₁和 W₂为前后两次测定的干物质量, t₁和 t₂为前后两次测定的时间, LAI₁和 LAI₂为前后两次测定的叶面积指数;

由于两年数据基本一致, 故以 2017 年数据进行分析。采用 Microsoft Excel 2010 进行数据录入和整理, 运用 DPS 7.05 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 生育进程

机直播水稻各处理统一于 6 月 12 日播种(表 1), 不同密度处理对生育进程影响无明显差异, 随氮肥

施用量增加, 水稻播种至拔节期生育进程无明显差异, 抽穗期和成熟期相应延迟, 在 N₄ 施氮量下表现出贪青迟熟现象。N₂、N₃、N₄ 各施氮处理总生育期较 N₁(无氮处理)延长 2~9 d。

2.2 产量及其构成因素

由表 2 可知, 施氮量和直播密度及二者互作效应均对机直播稻产量影响达极显著水平。随施氮量增加, 机直播稻产量增加, N₂、N₃、N₄ 平均产量分别较 N₁ 增加 17.92%、31.84%、39.20%。N₁、N₂、N₃ 施氮量下, 机直播稻产量随直播密度增加呈先增后降趋势, 各施氮量下最高产量为 6.74 t/hm²、7.78 t/hm²、8.93 t/hm², 分别在 D₄、D₃、D₂ 直播密度获得; N₄ 施氮量下, 产量随直播密度增加而降低, 最高产量为 9.55 t/hm², 在 D₁ 直播密度获得。随着施氮量增加达到最高产的直播密度降低, 各施氮量下最高产量的排序为 N₁D₄<N₂D₃<N₃D₂<N₄D₁。氮密互作效应下, N₄D₁ 组合产量最高, N₄D₂ 次之且与之差异不显著, 再次是 N₄D₃, N₃D₂ 与之无显著差异且几乎相同。机直播稻在 N₄ 的高氮水平下易取得高产, 配合适宜直播密度可进一步提高水稻产量, N₃D₂ 适当减氮增密也可达到一定高产水平。

进一步分析施氮量和直播密度互作对机直播稻产量构成因素的影响。方差分析表明(表 2), 施氮量和直播密度对有效穗数影响达极显著水平, 二者互作效应对有效穗数影响不显著; 施氮量和直播密度及二者互作效应对每穗颖花数和群体颖花量影

表2 氮密互作对机直播稻产量及其构成因素的影响

Table 2. Effect of nitrogen-density interaction on the yield and yield components in mechanical direct-sowing rice.

施氮量 Nitrogen application rate	直播密度 Direct-sowing density	有效穗数 Productive panicle number/($\times 10^4$ hm $^{-2}$)	每穗颖花数 Spikelet number per panicle	群体颖花量 Population spikelet number/($\times 10^4$ hm $^{-2}$)	结实率 Seed-setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	2017年实产 2017 yield /(t hm $^{-2}$)	2016年实产 2016 yield /(t hm $^{-2}$)
N ₁	D ₁	283.14 j	82.1 ghi	23 249.40 j	96.09 ab	27.32 abc	5.78 k	5.89 l
	D ₂	307.45 i	80.3 hij	24 695.30 ij	96.60 ab	27.40 abc	6.17 j	6.27 kl
	D ₃	325.82 gh	77.9 ij	25 373.73 ij	96.84 ab	27.65 ab	6.45 ij	6.50 jk
	D ₄	342.88 f	76.9 j	26 358.36 i	96.97 a	27.77 a	6.74 i	6.90 ij
	D ₅	352.54 ef	71.4 k	25 174.86 j	96.53 ab	27.64 ab	6.39 ij	6.51 jk
	均值 Mean		322.37	77.7	24 970.33	96.61	27.56	6.31
N ₂	D ₁	316.68 hi	93.4 de	29 588.39 h	93.53 abc	26.93 abc	7.18 h	7.24 hi
	D ₂	346.20 f	89.2 ef	30 865.57 fgh	93.68 abc	26.96 abc	7.44 fgh	7.54 fgh
	D ₃	364.92 de	87.8 f	32 024.54 fg	93.88 abc	27.04 abc	7.78 ef	7.80 ef
	D ₄	378.09 cd	80.6 hij	30 454.85 gh	94.08 abc	27.38 abc	7.49 fgh	7.61 fgh
	D ₅	388.05 bc	77.1 ij	29 915.10 gh	94.74 abc	27.17 abc	7.30 gh	7.33 gh
	均值 Mean		358.79	85.6	30 569.69	93.98	27.10	7.44
N ₃	D ₁	338.37 fg	108.0 b	36 526.07 cd	92.09 abc	26.48 abc	8.53 c	8.61 cd
	D ₂	368.43 de	101.9 c	37 559.49 bc	93.35 abc	26.57 abc	8.93 b	8.99 bc
	D ₃	381.60 cd	93.3 de	35 594.16 cd	93.49 abc	26.84 abc	8.47 c	8.54 d
	D ₄	391.59 abc	84.4 fgh	33 058.59 ef	93.52 abc	26.75 abc	8.05 de	8.20 de
	D ₅	398.60 ab	79.0 ij	31 488.32 fgh	93.21 abc	26.90 abc	7.59 fg	7.72 fg
	均值 Mean		375.72	93.3	34 845.33	93.13	26.71	8.32
N ₄	D ₁	354.90 ef	115.4 a	40 968.00 a	91.09 c	26.02 c	9.55 a	9.72 a
	D ₂	380.64 cd	104.2 bc	39 652.43 ab	91.92 bc	26.08 c	9.33 a	9.40 ab
	D ₃	394.53 abc	94.7 d	37 351.11 c	92.69 abc	26.29 bc	8.94 b	8.99 bc
	D ₄	402.48 ab	86.7 fg	34 885.22 de	92.96 abc	26.44 abc	8.38 cd	8.44 d
	D ₅	407.94 a	80.7 hij	32 913.54 ef	92.49 abc	26.14 c	7.70 ef	7.76 f
	均值 Mean		388.10	96.3	37 154.06	92.23	26.20	8.78
方差分析 Variance analysis	N	**	**	**	ns	ns	**	**
	D	**	**	**	ns	ns	**	**
	N×D	ns	**	**	ns	ns	**	**

小写字母表示差异达5%显著水平; N—施氮量, D—直播密度, ns表示不显著, *和**分别表示差异达到5%和1%显著水平。下同。

Values within a column followed by different small letters are significantly different at 5% probability levels; N, Nitrogen application rate; D, Sowing density; ns indicates no significant difference; * and ** mean significant difference at the 5% and 1% levels, respectively. The same as follows.

响达极显著水平; 施氮量和直播密度及二者互作效应对结实率、千粒重影响不显著。随施氮量增加, 机直播稻有效穗数和每穗颖花数显著增加, 结实率和千粒重略有降低。与 N₁ 相比, N₂、N₃、N₄ 平均穗数分别增加 11.31%、16.57%、20.38%, 平均每穗颖花数分别增加 10.14%、20.07%、23.94%。随直播密度增加, 机直播稻穗数增加, 每穗颖花数降低, 结实率和千粒重无明显差异。以 N₄ 为例, 与 D₁ 处理相比, D₂、D₃、D₄、D₅ 处理穗数分别增加 7.27%、11.16%、13.40%、14.96%, 每穗颖花数分别下降 9.76%、17.99%、24.91%、30.11%。相关分析表明(表 3), 穗数与每穗颖花数呈显著或极显著负相关关系, 产量与群体颖花量呈极显著正相关。有效穗数和每穗颖花数是群体颖花量的构成因子, 通

径分析表明(表 3), N₁、N₂ 施氮量下有效穗数对群体颖花量的贡献量较大, N₃、N₄ 施氮量下每穗颖花数对群体颖花量的贡献量较大。在不同的施氮量下, 合理的直播密度可以协调有效穗数和每穗颖花数, 从而获得较高的群体颖花量, 有利于水稻高产。

2.3 茎蘖数和成穗率

由表 4 可知, 施氮量和直播密度对机直播稻各关键生育时期群体茎蘖数和最终茎蘖成穗率影响达显著或极显著水平, 二者互作效应无显著影响。随施氮量增加, 机直播稻拔节期、抽穗期、成熟期群体茎蘖数均呈增加趋势且增幅逐渐减小; 随直播密度增加, 各关键时期茎蘖数显著上升, 随生育进程增幅有减小趋势。茎蘖成穗率方面, 随氮肥施用量增加机直播稻茎蘖成穗率先增后降, 且都在 N₂

表 3 产量与其构成因素之间的相关系数及直接途径系数

Table 3. Correlation coefficients and path coefficients between yield and its components.

施氮量 Nitrogen application rate	产量构成因素 Yield components	产量构成因素间相关系数 Correlation coefficient among yield components					对 Y 效应 Effect on Y (P _{i-Y})	对 X ₃ 效应 Effect on X ₃ (P _{i-X₃})
		X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y(Yield)		
		N ₁	有效穗数 Productive panicle number (X ₁)	-0.920*	0.850	0.697		
	每穗颖花数 Spikelet number per panicle (X ₂)		-0.575	-0.375	-0.696	-0.602	1.339	
	群体颖花量 Population spikelet number (X ₃)			0.957*	0.936*	0.997**	0.759	
	结实率 Seed-setting rate (X ₄)				0.847	0.945*	0.027	
	千粒重 1000-grain weight (X ₅)					0.960**	0.227	
N ₂	有效穗数 Productive panicle number (X ₁)	-0.942*	0.234	0.867	0.770	0.391	2.951	
	每穗颖花数 Spikelet number per panicle (X ₂)		0.105	-0.940*	-0.812	-0.064	2.885	
	群体颖花量 Population spikelet number (X ₃)			-0.168	-0.057	0.971**	0.983	
	结实率 Seed-setting rate (X ₄)				0.593	-0.038	-0.008	
	千粒重 1000-grain weight (X ₅)					0.167	0.228	
N ₃	有效穗数 Productive panicle number (X ₁)	-0.948*	-0.769	0.837	0.906*	-0.663	1.146	
	每穗颖花数 Spikelet number per panicle (X ₂)		0.932*	-0.630	-0.897*	0.864	2.019	
	群体颖花量 Population spikelet number (X ₃)			-0.309	-0.770	0.984**	0.926	
	结实率 Seed-setting rate (X ₄)				0.674	-0.154	0.251	
	千粒重 1000-grain weight (X ₅)					-0.721	-0.176	
N ₄	有效穗数 Productive panicle number (X ₁)	-0.981**	-0.927*	0.932*	0.671	-0.880*	0.968	
	每穗颖花数 Spikelet number per panicle (X ₂)		0.982**	-0.877	-0.626	0.953*	1.932	
	群体颖花量 Population spikelet number (X ₃)			-0.791	-0.558	0.990**	1.135	
	结实率 Seed-setting rate (X ₄)				0.876	-0.698	0.119	
	千粒重 1000-grain weight (X ₅)					-0.437	0.092	

*和**分别表示在 5%和 1%水平上显著相关。
* and ** significantly correlated at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 4 氮密互作对机直播稻茎蘖数和成穗率的影响

Table 4. Effect of nitrogen-density interaction on the number of stems and tillers and the percentage of productive tillers in mechanical direct-sowing rice.

施氮量 Nitrogen application rate	直播密度 Direct-sowing density	茎蘖数 No. of stems and tillers/(×10 ⁴ ·hm ⁻²)			茎蘖成穗率 Percentage of productive tillers /%
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	
N ₁	D ₁	395.34 j	293.70 l	283.14 k	71.62 abc
	D ₂	443.52 i	319.80 k	307.45 j	69.32 cde
	D ₃	482.62 gh	344.70 ij	325.82 hi	67.51 def
	D ₄	539.38 e	363.75 ghi	342.88 gh	63.57 gh
	D ₅	604.70 c	381.60 efg	352.54 fg	58.30 j
	均值 Mean	493.11	340.71	322.37	66.06
N ₂	D ₁	433.16 i	331.05 jk	316.68 ij	73.11 a
	D ₂	475.81 h	366.15 fgghi	346.20 g	72.76 a
	D ₃	506.83 f	388.35 def	364.92 ef	72.00 abc
	D ₄	567.11 d	406.80 cd	378.09 de	66.67 ef
	D ₅	645.57 b	423.60 bc	388.05 bcd	60.11 ij
	均值 Mean	525.70	383.19	358.79	68.93
N ₃	D ₁	467.88 h	358.35 hi	338.37 gh	72.32 ab
	D ₂	512.56 f	392.55 de	368.43 ef	71.88 abc
	D ₃	545.92 de	410.10 cd	381.60 cde	69.90 bcd
	D ₄	595.66 c	421.80 bc	391.59 abcd	65.74 fg
	D ₅	665.77 b	436.50 ab	398.60 abc	59.87 ij
	均值 Mean	557.56	403.86	375.72	67.94
N ₄	D ₁	501.63 fg	377.10 efgh	354.90 fg	70.75 abc
	D ₂	549.98 de	405.45 cd	380.64 cde	69.21 cde
	D ₃	593.72 c	427.35 bc	394.53 abcd	66.45 f
	D ₄	647.28 b	437.70 ab	402.48 ab	62.18 hi
	D ₅	705.66 a	451.65 a	407.94 a	57.81 j
	均值 Mean	599.65	419.85	388.10	65.28
方差分析 Variance analysis	N	**	**	**	*
	D	**	**	**	**
	N×D	ns	ns	ns	ns

表5 氮密互作对机直播稻叶面积指数及结实期叶面积衰减率的影响

Table 5. Effect of nitrogen-density interaction on leaf area index and decreasing rate of leaf area at grain-filling stage in mechanical direct-sowing rice.

施氮量 Nitrogen application rate	直播密度 Direct-sowing density	叶面积指数 Leaf area index			结实期叶面积衰减率 Decreasing rate of leaf area at grain-filling stage/ (LAI d ⁻¹)
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	
N ₁	D ₁	2.21 l	4.38 j	1.55 l	0.0522 h
	D ₂	2.49 k	4.79 i	1.90 k	0.0536 gh
	D ₃	2.68 j	5.01 hi	2.03 jk	0.0552 fgh
	D ₄	3.09 i	5.13 h	2.11 j	0.0560 fg
	D ₅	3.31 h	4.98 hi	1.94 jk	0.0564 fg
	均值 Mean	2.76	4.86	1.90	0.0547
N ₂	D ₁	3.46 h	6.43 g	3.15 hi	0.0595 de
	D ₂	3.77 g	6.82 ef	3.48 fg	0.0607 cde
	D ₃	3.99 f	7.04 de	3.68 e	0.0610 cde
	D ₄	4.37 d	6.97 def	3.39 g	0.0651 ab
	D ₅	4.64 bc	6.64 fg	3.02 i	0.0659 a
	均值 Mean	4.04	6.78	3.34	0.0624
N ₃	D ₁	3.74 g	7.19 cd	3.83 de	0.0601 de
	D ₂	3.97 f	7.44 bc	3.99 cd	0.0617 cd
	D ₃	4.22 de	7.22 cd	3.65 ef	0.0638 abc
	D ₄	4.55 c	7.05 de	3.40 g	0.0651 ab
	D ₅	4.79 ab	6.92 def	3.20 h	0.0664 a
	均值 Mean	4.25	7.16	3.61	0.0628
N ₄	D ₁	4.06 ef	7.92 a	4.49 a	0.0581 ef
	D ₂	4.24 d	7.84 a	4.30 b	0.0600 de
	D ₃	4.67 bc	7.67 ab	4.04 c	0.0615 cd
	D ₄	4.71 abc	7.41 bc	3.72 e	0.0625 bcd
	D ₅	4.87 a	7.20 cd	3.45 g	0.0636 abc
	均值 Mean	4.51	7.61	4.00	0.0611
方差分析 Variance analysis	N	**	**	**	**
	D	**	**	**	**
	N×D	ns	**	**	ns

水平下达最高；随直播密度增加机直播稻茎蘖成穗率呈下降趋势。说明在一定范围内增加施氮量可以增加水稻茎蘖成穗率，而后随施氮量增加水稻茎蘖成穗率又会下降；增加直播密度加强了水稻群体内部竞争从而使其茎蘖成穗率降低。

2.4 叶面积指数及结实期叶面积衰减率

由表5可知，施氮量和直播密度对机直播稻各关键生育时期叶面积指数和结实期叶面积衰减率影响达极显著水平，二者互作效应对水稻抽穗期和成熟期叶面积指数影响达极显著水平，对拔节期叶面积指数和结实期叶面积衰减率无显著影响。随施氮量增加，机直播稻拔节期、抽穗期、成熟期 LAI 均增加且增幅有减小趋势。拔节期机直播稻 LAI 随直播密度增加显著增加，抽穗期、成熟期 LAI 在 N₁、N₂、N₃ 施氮量下随直播密度增加先增后降，在 N₄ 施氮量下呈下降趋势，分别在 D₄、D₃、D₂、D₁ 直播密度下达到最大值且 N₁D₄<N₂D₃<N₃D₂<N₄D₁。说明低氮条件下应适当增加直播密度，高氮条件下应适当降低直播密度，以保证机直播稻中后期获得较大的 LAI。氮密互作条件下，生育中后期 LAI 在 N₄D₁、N₄D₂、N₄D₃ 等高氮处理下表现最好，N₃D₂ 也能达到相应较高水平。结实期叶面积衰减率方面，机直播稻结实期叶面积衰减率随施氮量增加先增后降，说明在一定范围内增施氮肥能够加

快水稻叶面积衰减速度，但随氮肥施用量增加水稻抽穗至成熟期天数延长，高氮条件下叶面积衰减率反而会有所下降。随直播密度增加，直播稻结实期叶面积衰减率呈上升趋势，以 N₄ 施氮量为例，该水平下，与 D₁ 相比 D₂、D₃、D₄、D₅ 叶面积衰减率分别上升 3.14%、5.78%、7.53%、9.39%，说明增加直播密度增加了机直播稻叶面积衰减速度。

2.5 光合势

由表6可知，施氮量和直播密度对机直播稻各生育阶段光合势影响达极显著水平，二者互作效应对水稻拔节至抽穗和抽穗至成熟阶段光合势影响达极显著水平，对播种至拔节阶段光合势无显著影响。随施氮量增加，机直播稻各生育阶段光合势均呈增加趋势，以抽穗至成熟阶段为例，N₂、N₃、N₄ 处理平均光合势分别较 N₁ 处理高 52.48%、8.39%、13.49%。播种至拔节期，由于直播密度不同导致群体起点差异，机直播稻光合势表现为随直播密度增加而增加的趋势，各直播密度处理间差异显著。拔节至抽穗期，N₁、N₂ 施氮量下光合势随直播密度增加而增加，N₃、N₄ 施氮量下不同直播密度处理光合势差异较小。抽穗至成熟期光合势在不同施氮量下差异较大，N₁、N₂、N₃ 施氮量下光合势随直播密度增加先增后降，N₄ 施氮量下随密度增加光合势降低，分别在 D₄、D₃、D₂、D₁ 处理下达最大值，且

表 6 氮密互作对机直播稻光合势的影响

Table 6. Effect of nitrogen-density interaction on photosynthetic potential in mechanical direct-sowing rice.

施氮量 Nitrogen application rate	直播密度 Direct-sowing density	光合势 Photosynthetic potential/($\times 10^4$ m ² d·hm ⁻²)		
		播种-拔节 Sowing-Jointing	拔节-抽穗 Jointing-Heading	抽穗-成熟 Heading-Maturity
N ₁	D1	65.33 m	72.49 j	160.10 i
	D2	73.59 l	80.13 i	180.53 h
	D3	79.16 l	84.63 hi	190.07 h
	D4	91.21 k	90.44 h	195.38 h
	D5	97.79 j	91.24 h	186.76 h
	均值 Mean	81.42	83.79	182.57
N ₂	D1	102.10 j	113.71 g	263.46 g
	D2	111.21 hi	121.78 f	283.25 f
	D3	117.58 gh	126.77 ef	294.83 ef
	D4	128.79 de	130.36 de	284.87 f
	D5	136.90 bc	129.73 de	265.55 g
	均值 Mean	119.32	124.47	278.39
N ₃	D1	110.35 i	136.64 cd	308.43 de
	D2	117.23 gh	142.68 bc	319.91 cd
	D3	124.51 ef	143.01 bc	304.34 de
	D4	134.08 cd	144.94 b	292.66 ef
	D5	141.17 ab	146.32 b	283.47 f
	均值 Mean	125.47	142.72	301.76
N ₄	D1	119.67 fg	155.70 a	366.10 a
	D2	124.96 ef	156.99 a	358.20 ab
	D3	137.91 abc	160.48 a	345.49 b
	D4	138.96 abc	157.56 a	328.39 c
	D5	143.61 a	156.89 a	314.12 cd
	均值 Mean	133.02	157.52	342.46
方差分析 Variance analysis	N	**	**	**
	D	**	**	**
	N×D	ns	**	**

N₁D₄<N₂D₃<N₃D₂<N₄D₁。氮密互作方面，抽穗至成熟阶段光合势以 N₄D₁、N₄D₂、N₄D₃ 等高氮处理最高，N₃D₂ 处理也能达到较高水平。

2.6 干物质积累

由表 7 可知，施氮量和直播密度以及二者互作效应对机直播稻各关键生育时期干物质积累量影响达显著或极显著水平。增加施氮量可以显著增加机直播稻干物质质量。拔节期由于群体起点差异，干物重呈现随直播密度增加显著增加的质量势。随着水稻群体的生长，抽穗期干物质质量差异在直播密度间有所缩小。成熟期不同施氮量处理下差异较大，N₁、N₂、N₃ 施氮量下机直播稻干物质质量表现为随直播密度增加先升后降，N₄ 施氮量下表现为下降趋势，各氮肥水平下最高值 N₁D₄<N₂D₃<N₃D₂<N₄D₁。说明增施氮肥能够增加机直播稻的干物质积累量，但是在不同施氮量下都存在一个最适直播密度，直播密度过低群体生物量不足导致干物质积累量不

足，直播密度过高群体竞争激烈也会导致最终干物质质量下降。氮密互作方面，抽穗期和成熟期干物质质量以 N₄D₁、N₄D₂、N₄D₃ 等高氮处理最高，N₃D₂ 处理也能达到较高水平。

2.7 阶段物质积累及其比例

由表 8 可知，施氮量和直播密度以及二者互作效应对机直播稻各生育阶段干物质积累量影响达显著或极显著水平。随施氮量增加，机直播稻各阶段干物质积累量增加。随直播密度增加，机直播稻播种至拔节期群体干物质积累量呈显著增加趋势；拔节至抽穗期水稻群体干物质积累量随直播密度增加呈显著下降趋势；N₁、N₂、N₃ 水平下，抽穗至成熟期干物质积累量随直播密度增加先增后降，N₄ 水平下积累量呈显著下降趋势。各阶段积累比例和积累量变化规律一致。氮密互作方面，抽穗至成熟阶干物质积累量以 N₄D₁、N₄D₂、N₄D₃ 等高氮处理最高，N₃D₂ 处理也能达到相应较高水平。

表7 氮密互作对机直播稻干物质质量的影响

Table 7. Effect of nitrogen-density interaction on the dry matter weight in mechanical direct-sowing rice.

施氮量 Nitrogen application rate	直播密度 Direct-sowing density	拔节期 Jointing/(t hm ⁻²)	抽穗期 Heading/(t hm ⁻²)	成熟期 Maturity/(t hm ⁻²)
N ₁	D ₁	1.42 m	7.49 h	10.40 o
	D ₂	2.37 j	7.74 gh	11.38 n
	D ₃	2.82 i	7.75 gh	11.77 mn
	D ₄	3.25 gh	7.98 g	12.30 l
	D ₅	3.58 f	8.06 g	11.96 lm
	均值 Mean	2.69	7.80	11.56
N ₂	D ₁	1.78 l	8.85 f	12.78 k
	D ₂	2.76 i	8.93 ef	13.55 ij
	D ₃	3.35 fg	9.11 ef	14.19 g
	D ₄	3.86 e	8.98 ef	13.74 hi
	D ₅	4.11 d	8.93 ef	13.25 j
	均值 Mean	3.17	8.96	13.51
N ₃	D ₁	2.09 k	9.66 bc	15.43 de
	D ₂	3.08 h	9.77 bc	15.82 d
	D ₃	3.83 e	9.84 bc	15.39 de
	D ₄	4.28 cd	9.64 c	14.77 f
	D ₅	4.58 ab	9.21 de	13.92 ghi
	均值 Mean	3.57	9.62	15.07
N ₄	D ₁	2.30 jk	10.59 a	17.42 a
	D ₂	3.32 g	10.54 a	16.92 b
	D ₃	4.11 d	10.48 a	16.38 c
	D ₄	4.37 bc	10.00 b	15.19 ef
	D ₅	4.75 a	9.55 cd	14.08 gh
	均值 Mean	3.77	10.23	16.00
方差分析 Variance analysis	N	**	**	**
	D	**	*	**
	N×D	*	**	*

表8 氮密互作对机直播稻不同阶段干物质积累量及其比例的影响

Table 8. Effect of nitrogen-density interaction on the dry matter accumulation and its rate at different growth periods in mechanical direct-sowing rice.

施氮量 Nitrogen application rate	直播密度 Direct-sowing density	播种-拔节 Sowing-Jointing		拔节-抽穗 Jointing-Heading		抽穗-成熟 Heading-Maturity	
		物质积累量 Dry matter accumulation	比例 Ratio/%	物质积累量 Dry matter accumulation	比例 Ratio/%	物质积累量 Dry matter accumulation	比例 Ratio/%
N ₁	D ₁	1.42 m	13.61	6.07 fgh	58.35	2.92 k	28.04
	D ₂	2.37 j	20.85	5.36 ij	47.15	3.64 j	32.00
	D ₃	2.82 i	23.97	4.93 jkl	41.85	4.02 ij	34.18
	D ₄	3.25 gh	26.44	4.73 kl	38.43	4.32 hi	35.13
	D ₅	3.58 f	29.88	4.49 l	37.50	3.90 ij	32.62
	均值 Mean	2.69	22.95	5.11	44.66	3.76	32.39
N ₂	D ₁	1.78 l	13.89	7.07 cd	55.32	3.94 ij	30.79
	D ₂	2.76 i	20.37	6.17 fg	45.49	4.63 gh	34.13
	D ₃	3.35 fg	23.63	5.76 ghi	40.55	5.08 efg	35.82
	D ₄	3.86 e	28.07	5.12 jk	37.25	4.77 fgh	34.68
	D ₅	4.11 d	31.01	4.82 kl	36.37	4.32 hi	32.62
	均值 Mean	3.17	23.40	5.79	43.00	4.55	33.61
N ₃	D ₁	2.09 k	13.52	7.57 b	49.06	5.77 cd	37.42
	D ₂	3.08 h	19.49	6.69 de	42.29	6.04 bc	38.22
	D ₃	3.83 e	24.88	6.01 fgh	39.04	5.55 de	36.08
	D ₄	4.28 cd	28.96	5.36 ij	36.28	5.14 ef	34.76
	D ₅	4.58 ab	32.90	4.63 kl	33.28	4.71 fgh	33.82
	均值 Mean	3.57	23.95	6.05	39.99	5.44	36.06
N ₄	D ₁	2.30 jk	13.21	8.29 a	47.60	6.83 a	39.19
	D ₂	3.32 g	19.61	7.22 bc	42.68	6.38 ab	37.71
	D ₃	4.11 d	25.12	6.36 ef	38.85	5.90 bcd	36.03
	D ₄	4.37 bc	28.77	5.63 hi	37.10	5.18 ef	34.13
	D ₅	4.75 a	33.73	4.80 kl	34.07	4.53 h	32.20
	均值 Mean	3.77	24.09	6.46	40.06	5.77	35.85
方差分析 Variance analysis	N	**	-	**	-	**	-
	D	**	-	**	-	**	-
	N×D	*	-	**	-	**	-

2.8 群体生长率和净同化率

由表9可知,施氮量和直播密度对机直播稻各生育阶段群体生长率和净同化率影响达显著或极显著水平,氮肥和直播密度二者互作效应对播种至拔节期净同化率无显著影响,对其他生育阶段群体

生长率和净同化率影响达显著或极显著水平。各施氮量下,机直播稻群体生长率均以拔节至抽穗期最高,抽穗至成熟期次之,播种至拔节阶段最小。总体来看,机直播稻群体生长率变化趋势与前文干物质积累变化规律一致。氮密互作方面,抽穗至成熟

表9 氮密互作对机直播稻不同阶段群体生长率和净同化率的影响

Table 9. Effect of nitrogen-density interaction on the crop growth rate and net assimilation rate at different growth periods in mechanical direct-sowing rice.

施氮量 Nitrogen application rate	直播密度 Direct-sowing density	群体生长率 Crop growth rate/ (g m ⁻² d ⁻¹)			净同化率 Net assimilation rate/ (g m ⁻² d ⁻¹)		
		播种-拔节 Sowing-Jointing	拔节-抽穗 Jointing-Heading	抽穗-成熟 Heading-Maturity	播种-拔节 Sowing-Jointing	拔节-抽穗 Jointing-Heading	抽穗-成熟 Heading-Maturity
N ₁	D ₁	2.40 m	27.60 b	5.40 k	0.86 k	8.70 a	1.98 c
	D ₂	4.02 j	24.38 d	6.74 j	1.47 h	6.93 b	2.16 b
	D ₃	4.78 i	22.39 ef	7.45 ij	1.76 fg	6.01 d	2.26 ab
	D ₄	5.51 gh	21.48 f	8.00 fghi	2.01 e	5.34 efg	2.36 a
	D ₅	6.06 f	20.39 fg	7.23 ij	2.19 d	4.98 ghi	2.24 ab
	均值 Mean	4.55	23.25	6.96	1.66	6.39	2.20
N ₂	D ₁	3.01 l	30.75 a	7.16 ij	1.08 j	6.42 c	1.56 ij
	D ₂	4.68 i	26.81 bc	8.41 efgh	1.65 g	5.21 fgh	1.69 ghi
	D ₃	5.68 fg	25.02 cd	9.24 de	1.97 e	4.66 ij	1.78 defgh
	D ₄	6.54 e	22.26 ef	8.67 efg	2.21 d	4.00 kl	1.74 fgh
	D ₅	6.96 d	20.95 f	7.86 ghi	2.3 cd	3.75 l	1.71 ghi
	均值 Mean	5.38	25.16	8.27	1.84	4.81	1.70
N ₃	D ₁	3.54 k	30.28 a	10.31 bc	1.25 i	5.74 de	1.93 cde
	D ₂	5.22 h	26.75 bc	10.79 ab	1.81 f	4.84 hi	1.95 cd
	D ₃	6.49 e	24.03 de	9.92 cd	2.21 d	4.30 jk	1.89 cdef
	D ₄	7.25 cd	21.44 f	9.17 de	2.42 bc	3.76 l	1.83 cdefg
	D ₅	7.76 ab	18.53 g	8.40 efgh	2.54 ab	3.20 m	1.74 fgh
	均值 Mean	6.05	24.21	9.72	2.05	4.37	1.87
N ₄	D ₁	3.90 jk	31.90 a	11.57 a	1.35 hi	5.52 ef	1.91 cdef
	D ₂	5.62 gh	27.77 b	10.81 ab	1.92 ef	4.74 i	1.83 cdefg
	D ₃	6.97 d	24.48 d	10.00 bcd	2.30 cd	4.05 kl	1.77 efgh
	D ₄	7.40 bc	21.67 f	8.78 ef	2.44 bc	3.64 l	1.64 hij
	D ₅	8.05 a	18.45 g	7.68 hi	2.62 a	3.10 m	1.51 j
	均值 Mean	6.39	24.85	9.77	2.12	4.21	1.73
方差分析 Variance analysis	N	**	*	**	**	**	**
	D	**	**	**	**	**	**
	N×D	*	**	**	ns	**	**

阶段群体生长率以 N₄D₁、N₄D₂ 高氮处理最高, N₃D₂ 处理也能达到相应较高水平。净同化率方面, 播种至拔节期表现为随施氮量增加而增加。随直播密度增加, 机直播稻生育前期群体生长率呈上升趋势, 生育中期呈下降趋势。生育后期直播稻群体生长率在 N₁、N₂、N₃ 水平下随直播密度增加先增后降, 在 N₄ 水平下随直播密度增加呈下降趋势。

3 讨论

3.1 不同施氮量和直播密度下机直播稻产量及其构成

穗数、每穗颖花数、结实率和千粒重是产量构成四因素, 前人较为一致地认为在稳定结实率和千粒重的基础上, 提高群体颖花量(穗数×每穗颖花数)

是水稻增产的关键^[1,18-19], 即稳充实, 扩库容。有关施氮量对水稻产量及其构成的影响, 前人普遍认为随氮肥用量增加, 产量先增后降, 结实率和千粒重略有降低。而有关穗数和每穗颖花数对施氮量的响应, 郭保卫等^[20]研究表明, 在 0~405.0 kg/hm² 氮肥水平内随施氮量增加穗数显著增加, 每穗颖花数先增后降。魏海燕等^[21]认为在 0~337.5 kg/hm² 氮肥水平范围内, 随施氮量提高穗数先增后降, 每穗颖花数增加。本研究中, 施氮量在 0~300 kg/hm² 范围内机直播稻产量随施氮量增加而增加, 氮肥对结实率和千粒重的影响较小, 增施氮肥使穗数和每穗颖花数协同增加而提高群体颖花量是水稻增产的主要原因。关于水稻产量及其构成对栽培密度响应研究方面, 前人研究表明随密度增加产量先增后降, 每穗颖花数和结实率降低, 千粒重变化较小^[10,22]。氮

肥和密度显著影响水稻穗数,增氮通过促进分蘖发生提高有效穗,增密通过提高群体起点增加有效穗数,而穗数的增加又制约着每穗颖花数提高^[23]。本研究条件下,随直播密度增加直播稻有效穗数呈增加趋势,每穗颖花数呈下降趋势,在各施氮量下达到最高产的直播密度不一。低氮低密条件下基本苗少且分蘖能力弱,导致最终穗数不足,产量下降;高氮条件下,水稻分蘖旺盛,密度过高往往导致田间荫蔽、群体质量差,个体弱,易诱发病虫害和倒伏发生,致使产量下降。因此,适宜的施氮量配套合理的直播密度,能充分协调稻株穗粒结构矛盾,满足个体发育与群体生长需求,充分利用养分以及光、温、土、气等生态因子从而实现增产^[24]。林洪鑫等^[25]研究认为,氮肥用量是生产中水稻高产获得的基本保证,增密减氮获取超高产的可行性较小,而在高氮条件下适当降密可以达到超高产的目的。本研究中,机直播稻在 300 kg/hm^2 的高氮水平下易取得高产,配合 $90\times 10^4/\text{hm}^2\sim 180\times 10^4/\text{hm}^2$ 低直播密度可进一步提高水稻产量。当前,我国农业生产面临资源短缺、生产成本高和面源污染重等问题,在农业绿色发展新形势下,周江明^[26]提出密植减氮能促进水稻稳定高效生产,是值得推广的水稻栽培技术。因此,直播稻生产不能仅从高产目标出发,还应从绿色生产和节本增效的角度综合考虑。本研究中,适当减氮至 225 kg/hm^2 (与常规高施氮量 300 kg/hm^2 相比减氮25%),配套 $180\times 10^4/\text{hm}^2$ 的直播密度,产量仍能达到 9 t/hm^2 左右的较高水平,适当降低施氮量减少了化肥污染,用较低的氮肥投入成本弥补了产值的缺失,仍能保持较高的经济效益,具有良好的推广前景。

3.2 不同施氮量和直播密度下机直播稻光合物质生产

叶面积指数能够较好地反映作物群体大小,足够的叶面积是水稻产量的保证,较大的LAI有利于抽穗前的物质生产和抽穗后光合势的提高^[27]。水稻产量源自光合物质生产,程建平^[28]认为群体和个体的恰当结合点有助于水稻群体获得较强的光合能力,合理的直播密度能够调节水稻群体结构,高效利用光能,充分发挥土壤生产潜力,缓解个体发育和群体生长的矛盾,进而获得高产。本研究表明,增施氮肥能够增加机直播稻LAI、光合势,在不同氮肥条件下采用适宜直播密度能够使机直播稻群体在生育中后期获得较大的LAI,增加抽穗后光合势。氮密互作条件下,生育中后期LAI和光合势 N_4D_1 、 N_4D_2 、 N_4D_3 等高氮处理最高, N_3D_2 处理也

能达到较高水平,说明高施氮量是机直播稻高光效群体建成的保证,适当减氮增密协调改善水稻群体结构也可以达到较高水平。水稻产量很大程度上取决于物质生产量,氮肥和密度二因子是水稻高产最为重要的两大栽培措施^[29]。邓安凤等^[30]研究表明直播稻抽穗至成熟期总干物质积累量随施氮量的增加而提高,朱聪聪、龙旭等^[31-32]研究表明水稻群体干物质积累量随密度增加而增加。本研究中,生育前期由于群体起点差异水稻群体干物质随直播密度增加而增加,但生育中后期在不同氮肥水平下呈现不同表现,这可能是由于不同氮肥施用量导致水稻中后期群体内部竞争变化所致。氮密互作条件下,机直播稻生育前期干物质均以高氮高密组合最高,最终干物质质量最高的是 N_4D_1 、 N_4D_2 、 N_4D_3 等高氮低密组合,适当减氮增密的 N_3D_2 也能达到较高水平,说明要实现机直播稻总干物质质量的提高不能盲目依靠增氮增密,高氮是高物质积累量的保证,配合较低密度可以协调好全生育期的群体结构,维持中期物质生产,增加生育后期物质生产,最终达到群体指标最优。凌启鸿等^[33]研究发现抽穗至成熟期的干物质积累量是衡量水稻群体质量的核心指标,与产量呈极显著正相关,邹应斌等^[34]研究指出各关键生育阶段物质积累量合理、积累比例协调是水稻高产的前提,胡雅杰等^[35]研究表明生育后期群体生长率和净同化率高有利于水稻高产形成。本研究结果与前人观点基本一致,成熟期高的干物质质量以及抽穗至成熟期的高物质积累量和积累比例是直播稻高产的基础,依据相应氮肥水平选用适宜直播密度能增加直播稻抽穗至成熟期的干物质积累以及提高生育后期的群体生长率和净同化率,有利于水稻高产。

4 结论

目前,劳动力的日益短缺以及生产成本的提高使得水稻直播栽培在长江中下游稻区不推广且有较大种植面积。本研究中水稻产量随施氮量增加而上升, 0 、 150 、 225 、 300 kg/hm^2 氮肥水平下机直播稻分别配套 360×10^4 、 270×10^4 、 180×10^4 、 $90\times 10^4/\text{hm}^2$ 直播密度易获得高产。本研究认为高氮低密以及适当减氮增密能够促进机直播稻光合物质生产、协调穗粒产量结构从而获得高产。若以高产为目标,机直播稻推荐采用 300 kg/hm^2 施氮量配合 $90\times 10^4\sim 180\times 10^4/\text{hm}^2$ 直播密度,但从稻田绿色生产和节本增效的角度综合考虑, 225 kg/hm^2 施氮量

配套 $180 \times 10^4/\text{hm}^2$ 直播密度具有较好的推广前景。

参考文献:

- [1] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1336-1345.
Yang J C, Du Y, Wu C F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39(7): 1336-1345. (in Chinese with English abstract)
- [2] 卢百关, 秦德荣, 樊继伟, 方兆伟, 李健, 刘辉, 迟铭, 徐大勇. 江苏省直播稻生产现状、趋势及存在问题探讨. *中国稻米*, 2009(2): 45-47.
Lu B G, Qin D R, Fan J W, Fang Z W, Li J, Liu H, Chi M, Xu D Y. Present situation, tendency and problems of direct seeding rice production in Jiangsu Province. *China Rice*, 2009(2): 45-47. (in Chinese with English abstract)
- [3] 金千瑜, 欧阳由男, 陆永良, 徐一成. 我国南方直播稻若干问题及其技术对策研究. *中国农学通报*, 2001, 17(5): 44-48.
Jin Q Y, Ou-Yang Y N, Lu Y L, Xu Y C. Some problems and technical measures of direct seeding rice in South China. *Chin Agric Sci Bull*, 2001, 17(5): 44-48. (in Chinese)
- [4] 张洪程. 直播稻种植科学问题研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009: 1-15.
Zhang H C. Study of Scientific Problems in Direct-Seeding Rice Cultivation. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009: 1-15. (in Chinese)
- [5] 吴文革, 陈焯, 钱银飞, 王小军, 吴一梅. 水稻直播栽培的发展概况与研究进展. *中国农业科技导报*, 2006, 8(4): 32-36.
Wu W G, Chen Y, Qian Y F, Wang X J, Wu Y M. The current status and progresses of the research on direct seeding rice. *Rev Chin Agric Sci Technol*, 2006, 8(4): 32-36. (in Chinese with English abstract)
- [6] 何喜玲, 王俊. 水稻机械直播技术综述. *中国农机化*, 2003(1): 23-25.
He X L, Wang J. The technique of paddy direct seeding. *Chin Agric Mech*, 2003(1): 23-25. (in Chinese with English abstract)
- [7] 胡小荡, 胡雅杰. 水稻轻简栽培研究进展. *杂交水稻*, 2013, 28(5): 1-5.
Hu X D, Hu Y J. Research progress on simplified cultivation technology for rice. *Hybrid Rice*, 2013, 28(5): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [8] Liu H Y, Hussain S, Zheng M M, Peng S B, Huang J L, Cui K H, Nie L X. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China. *Agron Sustain Dev*, 2015, 35(1): 285-294.
- [9] 郭九信, 孔亚丽, 谢凯柳, 李东海, 冯绪猛, 凌宁, 王敏, 郭世伟. 养分管理对直播稻产量和氮肥利用率的影响. *作物学报*, 2016, 42(7): 1016-1025.
Guo J X, Kong Y L, Xie K L, Li D H, Feng X M, Ling N, Wang M, Guo S W. Effects of nutrient management on yield and nitrogen use efficiency of direct seeding rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(7): 1016-1025. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈海飞, 冯洋, 蔡红梅, 徐芳森, 周卫, 刘芳, 庞再明, 李登荣. 氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1319-1328.
Chen H F, Feng Y, Cai H M, Xu F S, Zhou W, Liu F, Pang Z M, Li D R. Effect of the interaction of nitrogen and transplanting density on the rice population structure and grain yield in low-yield paddy fields. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20(6): 1319-1328. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈露, 张伟杨, 王志琴, 张耗, 刘立军, 杨建昌. 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.
Chen L, Zhang W Y, Wang Z Q, Zhang H, Liu L J, Yang J C. Effects of nitrogen application rate on grain yield and population quality of mid-season japonica rice cultivars at different decades in Jiangsu Province. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(8): 1412-1423. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张祖建, 谢成林, 谢仁康, 郎有忠, 杨岚, 张菊芳, 朱庆森. 苏中地区直播稻的群体生产力及氮肥运筹的效应. *作物学报*, 2011, 37(4): 677-685.
Zhang Z J, Xie C L, Xie R K, Lang Y Z, Yang L, Zhang J F, Zhu Q S. Population production capacity of direct-seeding rice in Central Jiangsu Region and effects of nitrogen application. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(4): 677-685. (in Chinese with English abstract)
- [13] Hassan G, Qureshi M, Shah N H, Awan I. Performance of six rice cultivars under direct wet seeded conditions of Dera Ismail Khan. *Pak J Biol Sci*, 1999, 2(4): 1504-1506.
- [14] 霍中洋, 姚义, 张洪程, 夏炎, 倪晓诚, 戴其根, 许轲, 魏海燕. 播期对直播稻光合物质生产特征的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(13): 2592-2606.
Huo Z Y, Yao Y, Zhang H C, Xia Y, Ni X C, Dai Q G, Xu K, Wei H Y. Effect of sowing date on characteristics of photosynthesis and matter production of direct seeding rice. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(13): 2592-2606. (in Chinese with English abstract)
- [15] 曾山, 黄忠林, 王在满, 罗锡文, 唐湘如. 不同密度对精量穴直播稻产量的影响. *华中农业大学学报*, 2014, 33(3): 12-18.
Zeng S, Huang Z L, Wang Z M, Luo X W, Tang X R. Effects of different planting density on grain yield of precision hill-drop drilling rice. *J Huazhong Agric Univ*, 2014, 33(3): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- [16] Suriyakup P, Polthanee A, Pannangpetch K, Katawatin R, Jean-Claude M. Mungbean (*Vigna radiata* L.) residue and nitrogen rate affected growth and yield of direct seeded rice (*Oryza sativa* L.) in rainfed riceland. *Asian J Plant Sci*, 2007, 1(1): 25-29.

- [17] 范平珊, 罗昊文, 段美洋, 黄穗华, 孔雷蕾, 钟卓君, 莫钊文, 潘圣刚. 浅水灌溉对直播稻秧苗形态特征和生理特性的影响. *华北农学报*, 2017, 32(5): 185-191.
Fan P S, Luo H W, Duan M Y, Hang S H, Kong L L, Zhong Z J, Mo Z W, Pan S G. Effects of shallow water irrigation on morphological and physiological characteristics of direct Seeding rice seedling. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2017, 32(5): 185-191. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 高辉, 魏海燕, 端木银熙, 孙菊英, 赵品恒, 沙安勤, 周有炎, 李德剑, 肖跃成, 王宝金, 吴爱国. 粳型杂交水稻超高产形成规律与栽培途径的探讨. *杂交水稻*, 2010, 25(Suppl1): 346-353.
Zhang H C, Wu G C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Wei H Y, Duan-Mu Y X, Sun J Y, Zhao P H, Shao A Q, Zhou Y Y, Li D J, Xiao Y C, Wang B J, Wu A G. Formulation of and cultural approach to super-high yielding in japonica hybrid rice. *Hybrid Rice*, 2010, 25(Suppl1): 346-353. (in Chinese with English abstract)
- [19] 吴桂成, 张洪程, 钱银飞, 李德剑, 周有炎, 徐军, 吴文革, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 高辉, 徐宗进, 钱宗华, 孙菊英, 赵品恒. 粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 266-276.
Wu G C, Zhang H C, Qian Y F, Li D J, Zhou Y Y, Xu J, Wu W G, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Xu Z J, Qian Z H, Sun J Y, Zhao P H. Rule of grain yield components from high yield to super high yield and the characters of super-high yielding Japonica super rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(2): 266-276. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郭保卫, 胡雅杰, 钱海军, 曹伟伟, 邢志鹏, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 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.
Guo B W, Hu Y J, Qian H J, Cao W W, Xing Z P, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. Optimal nitrogen rate improves grain yield and population quality of mechanical transplanted rice Nanjing 9108 under straw manuring. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29(5): 511-518. (in Chinese with English abstract)
- [21] 魏海燕, 王亚江, 孟天瑶, 葛梦婕, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 机插超级粳稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 488-496.
Wei H Y, Wang Y J, Meng T Y, Ge M J, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Response of yield, quality and nitrogen use efficiency to nitrogen fertilizer from mechanical transplanting super japonica rice. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(2): 488-496. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 顾春梅, 那永光, 解保胜. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 159-169.
Zhao L M, Li M, Zheng D F, Gu C M, Na Y G, Xie B S. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, 31(6): 159-169. (in Chinese with English abstract)
- [23] 邓中华, 明日, 李小坤, 郑磊, 徐维明, 杨运清, 任涛, 丛日环, 鲁剑巍. 不同密度和氮肥用量对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响. *土壤*, 2015, 47(1): 20-25.
Deng Z H, Ming R, Li X K, Zheng L, Xu W M, Yang Y Q, Ren T, Cong R H, Lu J W. Effects of nitrogen application rate and planting density on grain yields, yield components and nitrogen use efficiencies of rice. *Soil*, 2015, 47(1): 20-25. (in Chinese with English abstract)
- [24] 苏祖芳, 霍中洋. 水稻合理密植研究进展. *耕作与栽培*, 2006(5): 6-9.
Su Z F, Huo Z Y. Progress for research in rational close planting in rice. *Cult Plant*, 2006(5): 6-9. (in Chinese)
- [25] 林洪鑫, 潘晓华, 石庆华, 彭春瑞, 吴建富. 施氮量与栽插密度对超级早稻中早22产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 22-28.
Lin H X, Pan X H, Shi Q H, Peng C R, Wu J F. Effects of nitrogen fertilization and planting density on yield of super early rice Zhongzao 22. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17(1): 22-28. (in Chinese with English abstract)
- [26] 周江明, 赵琳, 董越勇, 徐进, 边武英, 毛杨仓, 章秀福. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 274-281.
Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y, Xu J, Bian W Y, Mao Y C, Zhang X F. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16(2): 274-281. (in Chinese with English abstract)
- [27] 苏祖芳, 郭宏文, 李永丰, 张洪程, 张海泉. 水稻群体叶面积动态类型的研究. *中国农业科学*, 1994(4): 23-30.
Su Z F, Guo H W, Li Y F, Zhang H C, Zhang H Q. Study on dynamic types of leaf area in rice population. *Sci Agric Sin*, 1994(4): 23-30. (in Chinese with English abstract)
- [28] 程建平, 赵锋, 曾山, 陈旭阳, 王乐云, 吴金元, 徐双前, 游爱兵, 张旅峰. 机械旱直播密度对水稻群体光合和产量形成的影响. *湖北农业科学*, 2012, 51(23): 5275-5278.
Cheng J P, Zhao F, Zeng S, Chen X Y, Wang L Y, Wu J Y, Xu S Q, You A B, Zhang L F. Effect of mechanical dry direct sowing seeding density on photosynthesis and yield formation of rice population. *Hubei Agric Sci*, 2012, 51(23): 5275-5278. (in Chinese with English abstract)
- [29] 龙文飞, 傅志强, 钟娟, 苏姗, 李康丽. 节水灌溉条件下氮密互作对双季晚稻丰源优299物质生产特性的影响. *华北农学报*, 2017, 32(2): 185-193.

- Long W F, Fu Z Q, Zhong J, Su S, Li K L. Effects of nitrogen application and planting density on late rice Fengyuanyou 299 material production characteristics under the condition of water saving irrigation. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2017, 32(2): 185-193. (in Chinese with English abstract)
- [30] 邓安凤, 杨从党, 陈清华, 施云, 陈跃楷, 李丛英, 徐世林, 毛桂祥, 李贵勇, 夏琼梅, 朱海平. 不同施肥方式对不同密度下直播稻的产量及群体光合物质生产的影响. *中国稻米*, 2017, 23(4): 123-129.
- Deng A F, Yang C D, Chen Q H, Shi Y, Chen Y K, Li C Y, Xu S L, Mao G X, Li G Y, Xia Q M, Zhu H P. Effects of different fertilization methods on yield and photosynthetic material production of direct seeding rice at different densities. *China Rice*, 2017, 23(4): 123-129. (in Chinese with English abstract)
- [31] 朱聪聪, 张洪程, 郭保卫, 曹利强, 江峰, 葛梦婕, 花劲, 宋云生, 周兴涛, 霍中洋, 许轲, 戴其根, 魏海燕, 朱大伟. 钵苗机插密度对不同类型水稻产量及光合物质生产特性的影响. *作物学报*, 2014, 40(1): 122-133.
- Zhu C C, Zhang H C, Guo B W, Cao L Q, Jiang F, Ge M J, Hua J, Song Y S, Zhou X T, Huo Z Y, Xu K, Dai Q G, Wei H Y, Zhu D W. Effect of planting density on yield and photosynthate production characteristics in different types of rice with bowl mechanical-transplanting method. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(1): 122-133. (in Chinese with English abstract)
- [32] 龙旭, 汪仁全, 孙永健, 马均. 不同施氮量下三角形强化栽培水稻群体发育与产量形成特征. *中国水稻科学*, 2010, 24(2): 162-168.
- Long X, Wang R Q, Sun Y J, Ma J. Characteristics of population development and yield formation of rice under triangle-planted system of rice intensification at different nitrogen application amounts. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24(2): 162-168.
- [33] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学出版社, 2000: 42-216.
- Ling Q H. *Crop Population Quality*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000: 42-216. (in Chinese)
- [34] 邹应斌, 黄见良, 屠乃美, 李合松, 黄升平, 张杨珠. “旺壮重”栽培对双季杂交稻产量形成及生理特性的影响. *作物学报*, 2001, 27(3): 343-350.
- Zou Y B, Huang J L, Tu N M, Li H S, Huang S P, Zhang Y Z. Effects of the VSW cultural method on yield formation and physiological characteristics in double cropping hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2001, 27(3): 343-350. (in Chinese with English abstract)
- [35] 胡雅杰, 邢志鹏, 龚金龙, 刘国涛, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 沙安勤, 周有炎, 罗学超, 刘国林. 钵苗机插水稻群体动态特征及高产形成机制的探讨. *中国农业科学*, 2014, 47(5): 865-879.
- Hu Y J, Xing Z P, Gong J L, Liu G T, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W, Sha A Q, Zhou Y Y, Luo X C, Liu G L. Study on population characteristics and formation mechanisms for high yield of pot-seedling mechanical transplanting rice. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(5): 865-879. (in Chinese with English abstract)