

氮肥和播种量配置对无人机飞播油菜产量形成的影响

杨泽鹏 万柯均 郑盛华 敖玉琴 马明坤 万学
李珊珊 宋昕 王昌桃 陈尚洪 刘定辉 陈红琳

(四川省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部西南山地农业环境重点实验室, 610066, 四川成都)

摘要 分析无人机飞播油菜不同氮肥水平和播种量下群体生长发育、产量形成和氮素利用等方面的差异以及氮肥和播种量协同增产机制, 确定四川丘陵区稻茬飞播油菜适宜的施氮量和播种量, 为提升四川丘陵区迟播油菜产量潜力和油菜高产高效栽培提供理论依据。2020-2021年度在四川省绵阳市安州区开展大田试验, 以不施氮、播种量 3.5 kg/hm² (N₀S_{3.5}) 为对照, 设置 2 个纯氮水平处理 135 (N₁₃₅)、180 kg/hm² (N₁₈₀) 和 2 个无人机播种量处理 3.0 (S_{3.0})、4.5 kg/hm² (S_{4.5})。结果表明, 等氮量或等播量条件下, 无人机飞播油菜籽产量随播种量的增加或氮肥施用量的增加均呈增加趋势。在施氮量 180 kg/hm²、播种量 4.5 kg/hm² 时产量达到最高, 为 3143.05 kg/hm², 分别较 N₁₃₅S_{3.0}、N₁₃₅S_{4.5} 和 N₀S_{3.0} 处理显著增产 16.50%、14.93% 和 69.86% ($P < 0.05$), 较 N₁₈₀S_{3.0} 处理增产 13.7%, 其氮肥表观利用率和氮肥农学率达到最大。高氮条件下合理增加播种量能够显著提高油菜生育期内的群体绿叶数和 LAI, 有效促进油菜群体分枝数、角果数、干物质积累速率的提高, 延长干物质积累时间, 增加干物质和氮素总量, 实现油菜高产群体构建和产量和氮肥利用率的协同提高。因此, 四川丘陵区无人机飞播生产上宜采用施氮量 180 kg/hm² 和播种量 4.5 kg/hm² 的配置。

关键词 油菜; 无人机飞播; 施氮量; 播种量; 产量构成因素; 氮肥利用

油菜是我国食用油的主要来源, 提升油菜产量对保证国家食用油安全具有重要意义^[1-2]。多年来, 四川稻油生产进入了“双迟模式”, 水稻、油菜的茬口衔接矛盾日益突出。受常年“华西秋雨”的影响, 土壤黏重易涝, 大型地面播种机械难以行走, 主要靠人工撒播、移栽或小型播种机作业, 而劳动力紧张、机械化不足常导致油菜播种环节推迟, 成为制约当地稻油周年产量提升的关键问题^[3-4]。无人机体型小, 操控灵活, 可以实现航迹规划和自动导航飞行, 能在地面机械难以进入的场所进行作业, 运用无人机在丘陵区开展油菜飞播作业, 具有高通过性、高稳定性和高作业效率等多种优势, 对缓解油菜迟直播问题具有重要应用价值^[5]。

构建合理的群体结构是提高资源利用效率和作物生产潜力的关键^[6]。播种方式和播种量影响油菜的生长发育, 进而影响油菜光合利用、生物量以及群体结构, 这三者是油菜产量形成和高效群

体构建的重要因素。前人^[7]对油菜直播的研究结果表明, 播种量偏低使得油菜出苗密度低, 个体优势明显, 但群体发展受限; 密度增加使群体叶面积指数增加, 同时油菜结角层离地高度增加, 结角层厚度降低, 有利于机械化收获。但播种量高容易导致出苗密度过高, 下层叶片受光少, 光合能力减弱, 造成减产^[8-10]。合理施肥具有提高油菜生物量、分枝数、角果数、籽粒产量与收获指数等方面的作用^[8-9, 11-13]。因此, 合理密度下的适宜氮素管理有利于作物利用自身系统调节光合作用, 维持光合参数以及光系统酶的调节功能, 从而增强作物群体对高密的容纳能力^[14]。

丘陵地区油菜生产对无人机播种的需求日益明显, 而适应无人机飞播油菜的播种量和施肥量研究较少, 且油菜因飞播装置不与地面土壤产生接触, 无法完成地面机具开沟、覆土, 籽粒落入土壤颗粒间隙, 播种质量、出苗密度及养分需求与地面机具的播种方式截然不同, 无法用地面机

作者简介: 杨泽鹏, 主要从事作物养分资源管理与绿色种植技术研究, E-mail: zepengyang@126.com

陈红琳为通信作者, 主要从事油菜高产栽培生理生化研究, E-mail: chenhl0107@163.com

基金项目: 2024 年农业重大技术协同推广计划; 国家现代农业产业技术体系四川油菜创新团队项目 (scxctd-2023-03); 国家重点研发计划 (2018YFD0200903)

收稿日期: 2024-03-16; 修回日期: 2024-04-10; 网络出版日期: 2024-09-25

具的适宜播种量指导无人机飞播播种量^[15-16]。目前在油菜飞播技术研究中,前人对江汉平原谷林套种飞播^[3,7,10,17-19]、稻草还田免耕飞播^[16,20-21]的参数开展了相关研究,而对四川区域飞播油菜播种量和施肥量的研究鲜见。本研究在化肥减量增效的背景下,在常规施氮(180 kg/hm²)减量 25% 前提下增设施氮量 135 kg/hm²,与农户习惯人工直播(3.0 kg/hm²)的基础上增加 50% 增设播种量 4.5 kg/hm²,系统分析播种量与施肥量对飞播油菜产量和氮素利用的影响,为飞播技术的集成应用和优化四川丘陵区油菜高产高效栽培技术体系提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2020–2021 年在四川省绵阳市安州区秀水镇龙泉村进行,该地位于四川盆地西北部,属中亚热带湿润季风气候区,干湿季节分明。全年气候温和,雨量充沛,日照较足,无霜期长,年均气温 16.3 °C,年均降水量为 1261 mm,年均日照为 1058.7 h,年均蒸发量 1084.26 mm。2020 年 10 月–2021 年 6 月的日均温及降水量等气象信息见图 1。试验田前茬作物为水稻,试验地 0~20 cm 土壤耕层理化性质:pH 5.5、有机质

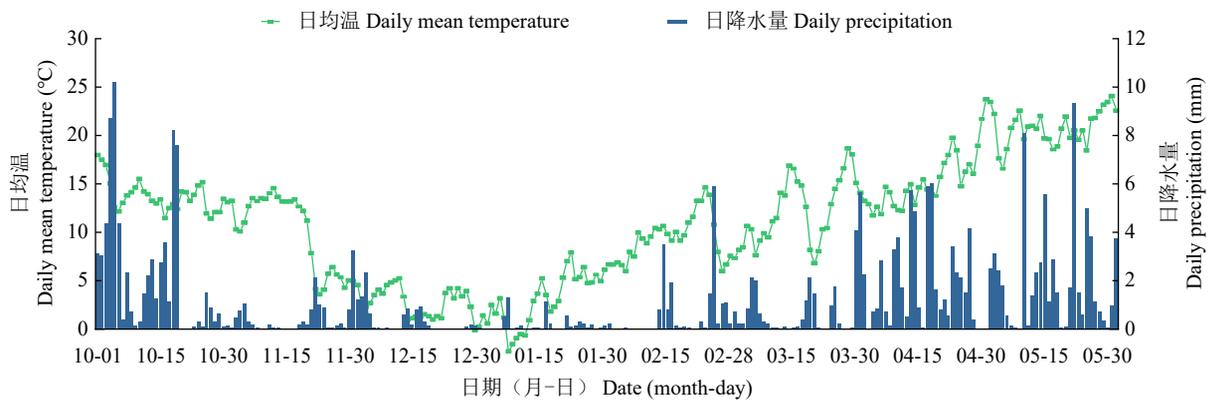


图 1 试验点 2020 年 10 月–2021 年 6 月油菜生育期日均温和日降水量
Fig.1 Daily mean temperature and daily rainfall during the reproductive period of rapeseed at the test site from October 2020 to June 2021

43.04 g/kg、全氮 2.20 g/kg、速效磷 11.16 mg/kg、速效钾 69.25 mg/kg。

1.2 试验设计

供试油菜品种为‘德新油 88’,由四川同路农业科技有限责任公司提供。试验以不施氮 0 kg/hm²、播种量 3.5 kg/hm² (N₀S_{3.5}) 为对照,设置 2 个纯氮水平处理 135 (N₁₃₅)、180 kg/hm² (N₁₈₀) 和 2 个播种量处理 3.0 (S_{3.0})、4.5 kg/hm² (S_{4.5})。各小区磷肥 (P₂O₅)、钾肥 (K₂O) 统一用量 90 kg/hm²。为保证飞播效果,采用大区无重复试验,共 5 个大区,每个大区面积 300 m²,取样时将每个大区平均划分为 3 小块,即 3 个重复。供试肥料中氮肥为尿素(含 N 46%)、磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),氮、磷、钾肥全部一次性基施。拖拉机旋耕后油菜于 2020 年 10 月 18 日采用极飞 P20 无人机飞播,2021 年 5 月 4 日收割、5 月 10 日脱粒。其他管理

措施与大田管理一致(表 1)。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design kg/hm²

| 处理 Treatment | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | 播种量 Seeding rate |
|-----------------------------------|-----|-------------------------------|------------------|------------------|
| N ₀ S _{3.0} | 0 | 90 | 90 | 3.0 |
| N ₁₈₀ S _{3.0} | 180 | 90 | 90 | 3.0 |
| N ₁₈₀ S _{4.5} | 180 | 90 | 90 | 4.5 |
| N ₁₃₅ S _{3.0} | 135 | 90 | 90 | 3.0 |
| N ₁₃₅ S _{4.5} | 135 | 90 | 90 | 4.5 |

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品采集与分析 采用多点采样法采集耕层(0~20 cm)土壤,按照鲍士旦《土壤农化分析》^[22]测定土壤 pH、有机质、全氮、速效磷和速效钾等指标。

1.3.2 植株密度 分别于苗期(65 d)、薹期(124 d)、盛花期(137 d)和成熟期(198 d)调查 5 个大区,每个大区选取 1 m² 样方,调查植株

密度。

1.3.3 生长发育动态指标 分别于苗期、蕾薹期和盛花期选取大区内各小区植株 9 株，记录绿叶数，并量取每株所有绿叶的长和宽，计算单株叶面积指数 (LAI)。

1.3.4 产量及其构成因素 油菜成熟后，在 5 个大区各小区选取长势均匀的代表性植株 9 株进行调查，包括有效分枝数、单株角果数、每角粒数和千粒重等性状指标。收获时油菜籽实收实打，现场测定水分，产量以 9% 的含水量进行折算^[7]。

1.3.5 干物质积累量和养分含量 结合生长发育动态指标和产量及其构成因素指标取样，将植株按时期分为根、叶、花、茎枝、角果壳和籽粒等部分，将相同部位混合成一个样品，烘干后称取干物质重，磨细、过筛后用于氮、磷、钾养分含量测定^[17,23]。

1.3.6 干物质积累过程拟合 以油菜飞播后的天数为自变量，分别以播种后 0、65、124、137 和 198 d 干物质积累量为因变量，用 Logistic 方程对干物质进行拟合^[24]。

1.4 数据处理

相关参数计算公式如下：

$$0.75 \text{ 单叶叶面积 (cm}^2\text{)} = \text{长 (cm)} \times \text{宽 (cm)} \times \text{0.75} \quad (1)$$

$$\text{叶面积指数 (LAI)} = \text{单株叶面积 (cm}^2\text{)} \times \text{单位土地面积内株数/单位土地面积 (m}^2\text{)} \quad (2)$$

$$\text{干物质积累量 (kg/hm}^2\text{)} = \text{密度 (株/hm}^2\text{)} \times$$

$$\text{单株干物质积累量 (g)/1000} \quad (3)$$

$$\text{氮积累量 (kg/hm}^2\text{)} = \text{籽粒氮含量} \times \text{籽粒干物质量} + \text{角果壳氮含量} \times \text{角果壳干物质量} + \text{茎秆氮含量} \times \text{茎秆干物质量} \quad (4)$$

$$\text{氮肥农学利用率 (kg/kg)} = (\text{施氮区籽粒产量} - \text{无氮区籽粒产量}) / \text{施氮量} \quad (5)$$

$$\text{氮肥表观利用率 (kg/kg)} = (\text{施氮区氮素积累量} - \text{无氮区氮素积累量}) / \text{施氮量} \quad (6)$$

使用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件进行描述性统计分析，以评估每个参数的平均值和标准差，使用 Duncan 新复极差法分析不同处理间差异显著性。使用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 氮肥和播种量对飞播油菜成熟期产量及其构成因素的影响

由表 2 可知，N₁₈₀S_{4.5} 处理油菜产量最高，分别较 N₁₃₅S_{3.0}、N₁₃₅S_{4.5} 和 N₀S_{3.0} 处理显著增产 16.50%、14.93% 和 69.86%，较 N₁₈₀S_{3.0} 处理增产 13.68%。N₁₃₅S_{3.0}、N₁₃₅S_{4.5} 和 N₁₈₀S_{3.0} 处理间产量差异均不显著。等氮量 (N₁₈₀) 条件下，随播种量的增加，油菜群体分枝数、角果数和产量均呈上升趋势；高氮条件下，N₁₈₀S_{4.5} 分枝数较 N₁₈₀S_{3.0} 处理显著增加 37.23%。等播量条件下，随施氮量的增加，群体角果数和产量呈上升趋势；高播量条件下 N₁₈₀S_{4.5} 较 N₁₃₅S_{4.5} 处理的群体分枝数、角果数分别显著上升了 29.30%、28.25%。

表 2 油菜成熟期产量及其产量构成因素的影响

Table 2 Effects of yield and its components of rapeseed at maturity stage

| 处理 Treatment | 分枝数 Number of branches (/m ²) | 角果数 Number of siliques (/m ²) | 每角粒数 Number of seeds per silique | 千粒重 1000-seed weight (g) | 产量 Yield (kg/hm ²) |
|-----------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| N ₀ S _{3.0} | 45.00c | 1421.25c | 17.52b | 4.31a | 1627.70c |
| N ₁₈₀ S _{3.0} | 235.83b | 5789.06ab | 21.16a | 4.27a | 2764.80ab |
| N ₁₈₀ S _{4.5} | 323.63a | 6504.86a | 21.40a | 4.29a | 3143.05a |
| N ₁₃₅ S _{3.0} | 259.99ab | 4865.00b | 21.16a | 4.29a | 2697.95b |
| N ₁₃₅ S _{4.5} | 250.30b | 5072.18b | 20.94a | 4.28a | 2734.78b |

同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著，下同。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments at 0.05 level, the same below.

2.2 氮肥和播种量对飞播油菜群体绿叶数和叶面积指数动态特征的影响

图 2 结果表明，随着油菜从苗期、蕾薹期直到花期生育进程的推进，植株群体绿叶数和 LAI

整体呈上升趋势。其中高氮高播量 N₁₈₀S_{4.5} 处理在油菜蕾薹期和盛花期的绿叶数与 LAI 均最高，N₀S_{3.0} 最低。等氮量条件下，不同时期油菜群体绿叶数、LAI 随播种量的增加而增加，其中 N₁₈₀S_{4.5}

处理在苗期、蕾薹期、盛花期分别较 $N_{180}S_{3.0}$ 处理增加了 12.61%~48.69%和 5.59%~40.01%；等播量条件下，氮肥增加对油菜群体绿叶数和 LAI 的提

升效果明显， $N_{180}S_{4.5}$ 处理在薹期、盛花期分别较 $N_{135}S_{4.5}$ 处理增加了 14.34%~36.95%和 29.78%~62.85%。

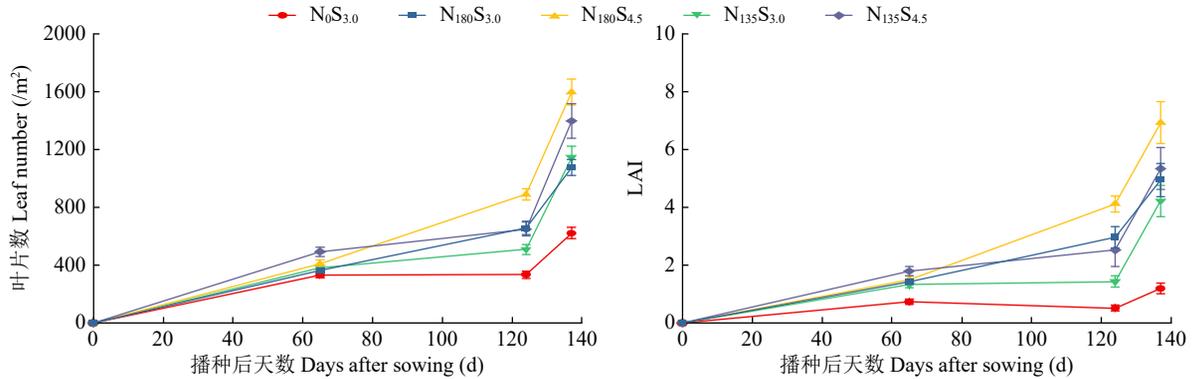


图 2 油菜群体绿叶数和叶面积指数的动态特征

Fig.2 Dynamic characteristics of the number of green leaves and leaf area index in rapeseed populations

2.3 氮肥和播种量对飞播油菜群体干物质积累特征的影响

2.3.1 油菜干物质积累的动态特征 由图 3 可知，随生育进程的推进，油菜群体干物质积累量变化

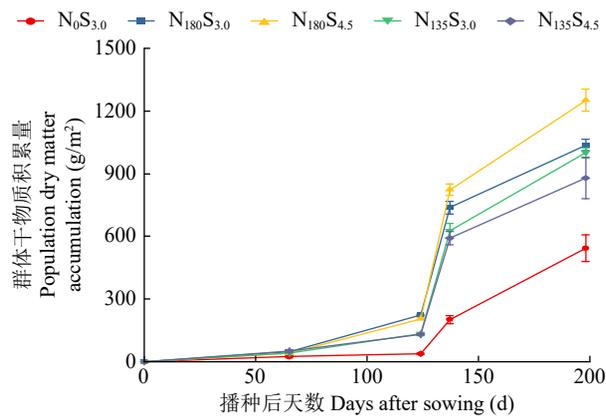


图 3 油菜群体干物质积累的动态特征

Fig.3 Dynamic characteristics of dry matter accumulation in rapeseed populations

趋势呈 S 型曲线，氮肥施用量和播种量影响油菜群体干物质积累量。成熟期，施氮处理群体干物质积累量表现为 $N_{180}S_{4.5} > N_{180}S_{3.0} > N_{135}S_{3.0} > N_{135}S_{4.5}$ ，分别较 $N_0S_{3.0}$ 处理提高了 130.45%、91.02%、84.24%和 79.44%。等氮量条件下，成熟期 $N_{180}S_{4.5}$ 的群体干物质积累量较 $N_{180}S_{3.0}$ 处理提高 20.64% ($P < 0.05$)， $N_{135}S_{3.0}$ 和 $N_{135}S_{4.5}$ 处理差异不明显；等播量条件下，增加施氮量使油菜群体干物质积累量呈明显上升趋势，成熟期 $N_{180}S_{4.5}$ 处理的群体干物质积累量较 $N_{135}S_{4.5}$ 处理显著提高 28.43% ($P < 0.05$)， $N_{180}S_{3.0}$ 和 $N_{135}S_{3.0}$ 处理差异不明显。

2.3.2 油菜干物质动态特征值 通过 Logistic 回归方程计算油菜干物质积累动态特征值。由表 3 可知，油菜干物质最大积累量以 $N_{180}S_{4.5}$ 处理较高，且最大积累速率为 $1.65 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，较 $N_0S_{3.0}$ 提

表 3 油菜群体干物质积累动态特征值

Table 3 Dynamic characteristic value of dry matter accumulation of rapeseed populations

| 处理 Treatment | W_{\max} (g/m^2) | V_{\max} [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$] | T_{\max} (d) | T1 (d) | T2 (d) | T (d) | 回归方程 Regression equation | 决定系数 Coefficient of determination (R^2) |
|------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|----------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| $N_0S_{3.0}$ | 543.39 | 0.62 | 140.23 | 132.05 | 148.41 | 16.36 | $y=543.39/(1+6.42E+09e^{-0.1610x})$ | 0.99451 |
| $N_{180}S_{3.0}$ | 1037.88 | 1.33 | 131.66 | 123.85 | 139.48 | 15.63 | $y=1037.88/(1+4.33E+09e^{-0.1685x})$ | 0.99472 |
| $N_{180}S_{4.5}$ | 1252.12 | 1.65 | 133.28 | 125.77 | 140.78 | 15.01 | $y=1252.12/(1+1.43E+10e^{-0.1754x})$ | 0.99709 |
| $N_{135}S_{3.0}$ | 1001.05 | 1.38 | 134.16 | 127.02 | 141.30 | 14.28 | $y=1001.05/(1+5.63E+10e^{-0.1845x})$ | 0.99525 |
| $N_{135}S_{4.5}$ | 974.95 | 1.28 | 134.54 | 127.10 | 141.98 | 14.88 | $y=974.95/(1+2.21E+10e^{-0.1770x})$ | 0.99253 |

W_{\max} : 最大积累量; V_{\max} : 最大积累速率; T_{\max} : 最大积累速率出现时间; T1: 快速积累期起始时期; T2: 快速积累期终止时期; T: 快速积累持续期。

W_{\max} : maximum accumulation; V_{\max} : maximum accumulation rate; T_{\max} : time of maximum accumulation rate; T1: onset of the rapid accumulation period; T2: end of the rapid accumulation period; T: duration of rapid accumulation.

高了 166.13%。等氮量条件下，播种量增加，干物质最大积累时期、快速积累期 T1 和 T2 均有延后趋势；等播量条件下，施氮量增加，干物质最大积累时期、快速积累期 T1 和 T2 亦有延后趋势，且快速积累持续期（T）有延长趋势。播种量为 4.5 kg/hm² 时增加施氮量，干物质最大积累速率加快，持续时间增加。

2.4 氮肥和播种量对飞播油菜氮吸收利用的影响

2.4.1 油菜氮素累积及分配的变化特征 由表 4 可知，施氮量和播种量对油菜群体氮素累积吸收

分配有显著影响。N₁₈₀S_{4.5} 处理的群体氮素积累量最高，分别较 N₁₃₅S_{3.0} 和 N₁₃₅S_{4.5} 处理显著增加 30.82% 和 14.85%，较 N₁₈₀S_{3.0} 处理增加 5.38%。等氮量条件下，播种量增加对油菜成熟期群体氮素积累量有提升作用，但差异不显著；等播量条件下，施氮量增加显著提高了油菜群体氮素积累量，N₁₈₀S_{4.5} 较 N₁₃₅S_{4.5} 处理显著增加 24.14%，N₁₈₀S_{3.0} 较 N₁₃₅S_{3.0} 处理显著增加 21.03%。从氮素分配比例来看，籽粒氮素的分配比例随施氮量的增加均呈下降趋势。

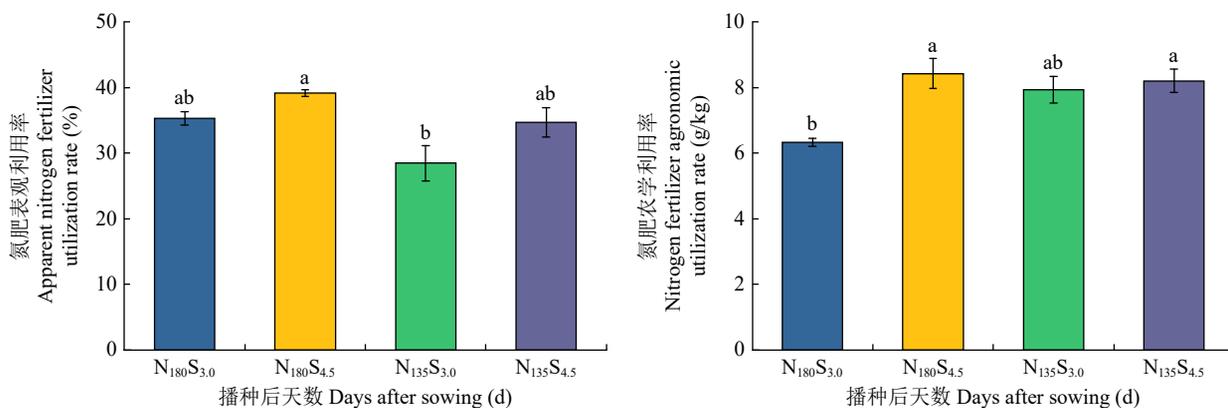
表 4 油菜成熟期群体氮素累积及分配特征

Table 4 Characteristics of nitrogen accumulation and partitioning of rapeseed populations at maturity stage

| 处理 Treatment | 氮素积累 Nitrogen accumulation (kg/hm ²) | | | | 氮素分配比例 Nitrogen distribution ratio (%) | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|--------------|------------|----------------------------------------|--------------|------------|
| | 整株 Whole plant | 茎枝 Stem and branch | 角果壳 Shell | 籽粒 Seed | 茎枝 Stem and branch | 角果壳 Shell | 籽粒 Seed |
| N ₀ S _{3.0} | 65.64d | 7.74c | 7.50c | 50.40b | 11.86a | 11.23ab | 76.91a |
| N ₁₈₀ S _{3.0} | 129.17ab | 23.28a | 15.31ab | 90.57a | 18.00a | 11.85ab | 70.16b |
| N ₁₈₀ S _{4.5} | 136.12a | 20.60a | 17.82a | 97.69a | 15.12a | 13.10a | 71.77ab |
| N ₁₃₅ S _{3.0} | 104.05c | 13.58bc | 11.05bc | 79.42a | 13.01a | 10.55ab | 76.44a |
| N ₁₃₅ S _{4.5} | 112.47bc | 18.72ab | 10.92bc | 82.83a | 17.10a | 9.62b | 73.28ab |

2.4.2 油菜氮肥利用率变化特征 由图 4 可知，N₁₈₀S_{4.5} 处理的氮肥表观利用率最高，分别较 N₁₈₀S_{3.0}、N₁₃₅S_{3.0} 和 N₁₃₅S_{4.5} 处理增加 10.96%、37.60% 和 12.85%，与 N₁₃₅S_{3.0} 差异显著。等氮量条件下，随播种量的增加，油菜氮肥表观利用率

和农学利用率逐渐增加，其中 N₁₈₀S_{4.5} 处理的氮肥农学利用率最高，分别较 N₁₈₀S_{3.0}、N₁₃₅S_{3.0} 和 N₁₃₅S_{4.5} 处理增加 33.25%、6.14% 和 2.60%，与 N₁₈₀S_{3.0} 处理差异显著；等播量条件下，油菜氮肥表观利用率和氮肥农学利用率随施氮量增加均呈



不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著。
Different lowercase letters indicate significant differences between different treatment at 0.05 level.

图 4 油菜氮肥利用率

Fig.4 Nitrogen fertilizer utilization in rapeseed

增加趋势，但差异不显著。

3 讨论

作物高产取决于适宜的种植密度和优良的单

株生产力，适宜的施氮量是进一步提高作物产量的关键措施^[25]。油菜是需氮较多的作物，油菜的高产需以较多的氮素供应为保证^[26-27]。氮肥和密度配置通过调节油菜生长环境改变油菜的株型和冠

层分布, 从而影响油菜对光的截获与吸收^[10,12,28]。探明作物生育期内 LAI 的动态变化对揭示作物产量形成和掌握高产群体调控指标尤为重要。油菜群体冠层结构是否合理很大程度上取决于株间光照状况, 而 LAI 是影响株间光照水平的最大因子。本研究发现, N₁₈₀S_{4.5} 处理飞播油菜在苗期到盛花期具有较高的绿叶数和 LAI。适当增施氮肥能提高油菜前期的光合生产能力, 从而在后期获得更高的有效分枝数和角果数, 良好的群体结构能协调植株源流库关系, 畅通同化物的运输, 从而有较快的干物质积累速率^[29-31]。在高施氮量条件下, 适度增加播种量 (从 3.0 kg/hm² 增加到 4.5 kg/hm²) 进一步提高油菜植株源的供应和潜在的库容, 并显著提高油菜干物质积累速率和延长干物质积累时间, 使得油菜群体在生长后期仍能维持较高的光合和物质生产能力, 为油菜稳产高产创造条件^[31-32]。

油菜产量形成是由单位面积角果数、每角粒数和千粒重 3 个因素共同决定, 其中影响最大的是单位面积角果数^[32-33]。本研究表明, 施氮量和播种量对油菜产量及其构成因素有明显的调控作用, 且高氮量、高播量是通过提高群体有效角果数来实现增产的。在高密度种植下, 油菜个体和群体的竞争增大, 只有保证单位面积上有足够的有效角果数并减少千粒重和每角粒数的下降幅度, 才算协调好产量构成要素关系, 使飞播油菜形成合理的群体结构, 从而获得高产^[12]。吴永成等^[11]研究得出, 增施氮肥能增加直播油菜株高、一次分枝数和单株角果数; 随着施氮量增加, 单位面积角果数、籽粒产量明显提高, 且较高的种植密度 (300 000~450 000 株/hm²) 可以明显增加直播油菜的籽粒产量。曾宇等^[29]研究得出, 增加施氮量能促进个体发育及增加单株分枝数与角果数, 进而增加产量; 而增加密度则可以增加群体主茎数与分枝数, 从而提高产量与品质。高密度下, 单株产量因单株荚数减少而降低, 但群体产量提高^[8,30,34]。本研究结果与以上研究相近。本研究还发现, N₁₃₅S_{4.5} 和 N₁₈₀S_{3.0} 处理间产量差异不显著, 这是由于合理增密弥补了因减施氮肥引起的群体角果数减少, 能有效调节作物的冠层结构, 提高作物对光、温、养分的利用率, 协调源

流库关系, 从而充分发挥作物的增产潜力。适当提高密度, 可以达到“以密减氮”的效果^[20,35]。

氮肥利用率是评价氮肥施用后被吸收利用的关键指标^[36]。前人^[9-10,34,37-39]关于适播条件下施氮量、施氮方式和氮肥品种等对油菜氮素吸收及氮肥利用率的影响展开了研究。随着施氮量的增加, 油菜成熟期氮素积累总量增加, 但转移到籽粒中的氮素降低。蒯婕等^[40]研究认为, 高密度种植 (450 000~600 000 株/hm²) 比低密度种植 (150 000~300 000 株/hm²) 节约 22.9%~30.6% 的氮肥用量, 同时氮肥利用率显著增加, “以密省肥”效果显著。这与本研究中 N₁₈₀S_{4.5} 处理中氮素表观利用率最高的结果一致。

已有研究^[11,26,30,40]表明, 在一定范围内增施氮磷肥和提高种植密度有助于油菜产量的提高, 但超过一定限度后, 增施肥料和提高种植密度反而导致减产。本研究结果发现, 籽粒产量随施氮量、播种量的增大而增加, 且高氮量投入和高播量配置 (N₁₈₀S_{4.5}) 能较大幅度提高籽粒产量, 这与王翠翠等^[20]和付三雄等^[26]研究结果相近。这可能由于合理的氮、磷肥施用量和适宜的种植密度因具体环境条件和品种特性而异, 今后, 将系统开展四川不同生态区域施氮量和飞播播种量的田间试验, 为四川丘陵区油菜高产高效栽培提供理论和技术支撑。

另外, 生产上播期推迟的油菜播种后出苗率降低, 田间杂草增加, 杂草与植株之间产生肥料竞争, 生长发育后期易出现倒伏, 对此可增加肥料施用量, 以起到“以苗压草”的增收效果^[41]。综上, 生产上在选用耐密植、抗倒性强的品种基础上, 应重视氮肥与密度配置, 以肥促长, 以密省肥。

4 结论

籽粒产量随施氮量、播种量的增大而增加, 且高氮量投入和高播量结合能较大幅度提高籽粒产量。同时, 合理密植条件下适当增加施氮量能够显著改善油菜生育期内的生长特性, 有效促进油菜群体分枝数和角果数的提高, 并提高油菜干物质积累速率和延长干物质积累期, 增加干物质和氮素总量, 最终提高产量和氮肥利用率。四

川丘陵区无人机油菜飞播生产上宜采用施氮量 180 kg/hm² 和播种量 4.5 kg/hm² 的配置。

参考文献

- [1] 胡文诗, 李银水, 赵曼利, 等. 不同含油量油菜品种的养分吸收积累与利用效率特征. 中国农业科学, 2023, 56(24): 4895-4905.
- [2] Li X Y, Zuo Q S, Chang H B, et al. Higher density planting benefits mechanical harvesting of rapeseed in the Yangtze River Basin of China. *Field Crops Research*, 2018, 218: 97-105.
- [3] 郑伟, 叶川, 肖国滨, 等. 油-稻共生期对谷林套播油菜苗期性状及产量形成的影响. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4254-4263.
- [4] 郭翔, 赵金鹏, 王茹琳, 等. 四川盆地油菜播期涝渍害时空特征及危险性. 生态学杂志, 2022, 41(7): 1406-1413.
- [5] 张青松, 张恺, 廖庆喜, 等. 油菜无人机飞播装置设计与试验. 农业工程学报, 2020, 36(14): 138-147.
- [6] 王建国, 耿耘, 杨佃卿, 等. 单粒精播对中、高产旱地花生群体质量及养分利用的影响. 作物学报, 2022, 48(11): 2866-2878.
- [7] 蒯婕, 杜雪竹, 胡曼, 等. 共生期与种植密度对棉田套播油菜生长及产量的影响. 作物学报, 2016, 42(4): 591-599.
- [8] 宋稀, 刘凤兰, 郑普英, 等. 高密度种植专用油菜重要农艺性状与产量的关系分析. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1800-1806.
- [9] 田效琴, 李卓, 刘永红. 施氮量和播种密度对不同熟期油菜干物质质量和产量的影响. 核农学报, 2019, 33(4): 798-807.
- [10] 刘翠莲, 刘雪基, 蔡建华, 等. 播期、播量对稻田套播油菜产量及产量结构的影响. 江苏农业科学, 2011, 39(4): 81-82.
- [11] 吴永成, 陈天才, 彭海浪, 等. 施氮量和种植密度对迟直播油菜产量、品质及氮肥利用率的影响. 西南农业学报, 2012, 25(4): 1320-1325.
- [12] 左青松, 蒯婕, 杨士芬, 等. 不同氮肥和密度对直播油菜冠层结构及群体特征的影响. 作物学报, 2015, 41(5): 758-765.
- [13] Begna S H, Angadi S V. Effects of planting date on winter canola growth and yield in the southwestern U.S.. *American Journal of Plant Sciences*, 2016, 7(1): 201-217.
- [14] 王玲. 油菜光合面积指数消长变化及高产群体指标研究. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [15] 黄小毛, 徐胡伟, 张顺, 等. 油菜成条飞播装置设计与试验. 农业工程学报, 2020, 36(5): 78-87.
- [16] 孟孜贞, 王崇铭, 鲁明星, 等. 免耕飞播条件下稻田油菜长效专用配方肥适宜用量研究. 中国土壤与肥料, 2023(12): 151-157.
- [17] 裴霄敏, 邹家龙, 肖依波, 等. 谷林套种飞播对冬油菜生长和养分吸收及经济效益的影响. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(6): 68-74.
- [18] 郑伟, 肖国滨, 肖小军, 等. 稻茬高度对谷林套播油菜生长发育及产量形成的影响. 中国农业科学, 2017, 50(4): 648-656.
- [19] 周玮峰, 鲁剑巍, 程应德, 等. 油菜谷林飞播秸秆全量还田种植模式技术要点. 中国农技推广, 2019, 35(增1): 46-48.
- [20] 王翠翠, 陈爱武, 王积军, 等. 湖北双季稻区免耕直播油菜生长及产量形成. 作物学报, 2011, 37(4): 694-702.
- [21] 田贵生, 周志华, 程应德, 等. 鄂东晚收稻田油菜两种飞播种植模式的产量及效益比较. 中国农学通报, 2022, 38(18): 57-61.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 白非, 白桂萍, 王春云, 等. 翻耕深度对遮阴油菜根系生长和养分吸收利用的影响. 中国农业科学, 2022, 55(14): 2726-2739.
- [24] 乔嘉, 朱金城, 赵姣, 等. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 32-38.
- [25] 韦金贵, 郭瑶, 柴强, 等. 水氮减量密植玉米的产量及产量构成. 作物学报, 2023, 49(7): 1919-1929.
- [26] 付三雄, 周晓婴, 张维, 等. 种植密度和施氮量对油菜产量、品质及机收性状的影响. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 548-556.
- [27] 王锐, 吴位仙, 郑卫东, 等. 氮素水平与品种对直播冬油菜农艺性状、产量及其构成因子的影响. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 77-81.
- [28] 袁嘉琦, 刘艳阳, 许轲, 等. 氮密处理提高迟播栽秧资源利用和产量. 作物学报, 2022, 48(3): 667-681.
- [29] 曾宇, 雷雅丽, 李京, 等. 氮磷钾用量与种植密度对油菜产量和品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 146-153.
- [30] 王杰, 周雨, 黄晓芳, 等. 不同播期、密度与施氮水平对直播油菜生长及产量的影响. 作物研究, 2021, 35(4): 330-335.
- [31] 余新颖, 王春云, 李大双, 等. 高产油菜品种稳产性形成机制. 作物学报, 2023, 49(6): 1601-1615.
- [32] Kuai J, Li X Y, Yang Y, et al. Effects of paclobutrazol on biomass production in relation to resistance to lodging and pod shattering in *Brassica napus* L.. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(11): 2470-2481.
- [33] 刘秋霞, 任涛, 张萌, 等. 秸秆还田与氮磷钾化肥配施对直播冬油菜产量及其构成因子的影响. 中国土壤与肥料, 2016(6): 68-73.
- [34] 袁圆, 汪波, 周广生, 等. 播期和种植密度对油菜产量和茎秆抗倒性的影响. 中国农业科学, 2021, 54(8): 1613-1626.
- [35] 王芳东, 吕伟生, 符明金, 等. 密植减氮对三熟区不同肥力红壤稻田作物产量和耕层氮素的影响. 水土保持学报, 2020, 34(5): 285-291.
- [36] 杨秉庚, 蔡思源, 刘宇娟, 等. 土壤供保氮能力决定稻田氮肥增产效果和利用率. 土壤学报, 2023, 60(1): 212-223.
- [37] 吕伟生, 肖富良, 张绍文, 等. 种肥播施方式对红壤旱地油菜产量及肥料利用率的影响. 作物学报, 2020, 46(11): 1790-1800.
- [38] 严红梅, 段秋宇, 李虹桥, 等. 密度对甘蓝型矮秆油菜干物质及氮素积累分配的影响. 华北农学报, 2021, 36(增1): 143-148.
- [39] 巢成生, 王玉乾, 沈欣杰, 等. 甘蓝型油菜苗期氮高效吸收转运特征研究. 中国农业科学, 2022, 55(6): 1172-1188.
- [40] 蒯婕, 王积军, 左青松, 等. 长江流域直播油菜密植效应及其机理研究进展. 中国农业科学, 2018, 51(24): 4625-4632.
- [41] 盛倩男, 余小红, 周雄, 等. 油菜与杂草生物量和养分竞争对氮磷钾肥用量的响应. 中国农业科学, 2023, 56(3): 481-489.

Effects of Nitrogen Fertilizer and Seeding Amount Configuration on Yield Formation of Rapeseed by Aerial Seeding

Yang Zepeng, Wan Kejun, Zheng Shenghua, Ao Yuqin, Ma Mingkun, Wan Xue, Li Shanshan, Song Xin, Wang Changtao, Chen Shanghong, Liu Dinghui, Chen Honglin

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Southwest Mountain Agricultural Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610066, Sichuan, China)

Abstract In order to determine the appropriate rate of nitrogen application and sowing rate for rice stubble sown rapeseed in hilly area of Sichuan, as well as to provide a theoretical basis to enhance the yield potential of late sown rapeseed in the hilly area of Sichuan and the high-yield and high-efficiency cultivation of rapeseed. We did this by analyzing the differences in population growth and development, yield formation, and nitrogen utilization under various nitrogen fertilizer levels and sowing rates of rapeseed sown by unmanned aerial vehicles (UAVs). During 2020-2021, a field trial was conducted in Anzhou district, Mianyang city, Sichuan Province. No N application and sowing rate of 3.5 kg/ha ($N_0S_{3.5}$) were used as the control, and two treatments with pure N levels: 135 kg/ha (N_{135}) and 180 kg/ha (N_{180}), and two treatments with unmanned aerial seeding: 3.0 kg/ha ($S_{3.0}$) and 4.5 kg/ha ($S_{4.5}$) were set. The results showed that the rapeseed yield increased with the increase of sowing amount or nitrogen application amount under the condition of equal nitrogen amount or equal sowing amount. The highest yield of 3143.05 kg/ha was attained at 180 kg/ha N application and 4.5 kg/ha sowing rate, which was significantly increased by 16.50%, 14.93% and 69.86% ($P < 0.05$) over $N_{135}S_{3.0}$, $N_{135}S_{4.5}$ and $N_0S_{3.0}$ treatment, respectively, and by 13.7% over $N_{180}S_{3.0}$ treatment. Nitrogen fertiliser apparent utilisation and nitrogen fertiliser agronomic rate reached the maximum. Under the condition of high nitrogen, reasonable increase of seeding amount can significantly improve the population green leaf number and LAI during the growth period of rape, effectively promote the increase of branch number, cornering number and dry matter accumulation rate of rape population, prolong the dry matter accumulation time, increase the total dry matter and nitrogen, and realize the construction of high-yield rape population and the synergic improvement of yield and nitrogen utilization rate. Therefore, 180 kg/ha nitrogen fertilizer and 4.5 kg/ha nitrogen fertilizer and sowing amount should be used in the production of UAV flying sowing in Sichuan hilly area.

Key words Rapeseed; Unmanned aerial seeding; Nitrogen application rate; Seeding rate; Yield components; Nitrogen fertilizer utilization