

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.44032

## 高密度直播油菜不同类型叶片功能探究

黄肖玉<sup>1</sup> 娄洪祥<sup>1</sup> 邵东李<sup>1</sup> 张哲<sup>2</sup> 蒋博<sup>3</sup> 肖雅丹<sup>1</sup> 常影<sup>1</sup>  
郭安达<sup>1</sup> 赵杰<sup>1</sup> 徐正华<sup>1</sup> 王晶<sup>1</sup> 汪波<sup>1</sup> 蒯婕<sup>1,\*</sup> 周广生<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 华中农业大学植物科学技术学院 / 农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 湖北武汉 430070; <sup>2</sup> 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; <sup>3</sup> 湖北省油菜办公室, 湖北武汉 430070

**摘要:** 合理密植是确保油菜产量和效益的核心, 但过度密植则加重倒伏, 难以实现密植再高产。叶片是油菜干物质累积的重要光合器官, 但高密度条件下, 不同类型叶片对油菜产量及抗倒性的影响尚不明确。本试验以中双 11 号为材料, 设置 2 个种植密度(D3:  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$ 、D5:  $7.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$ )、4 个剪叶处理(CK: 不剪叶、LP: 剪去一半长柄叶、SP: 剪去一半短柄叶、SL: 剪去一半无柄叶), 探究油菜 3 种不同类型的叶片对高密度直播油菜产量及抗倒性的影响, 为协调高密度油菜源库关系、高产和倒伏矛盾提供理论依据。结果表明: 同一密度下, 油菜 3 种不同类型叶片占比均为短柄叶>长柄叶>无柄叶, 当密度由 D3 增加至 D5, 短柄叶减少约 2 片, 占比由 50.6%下降至 46.7%。2 个密度下, 剪叶均降低单株角果数, 导致单株产量和实收产量的降低, 且以 SP 处理对产量的影响最大。随着密度增加, SP 处理下, 单株产量下降幅度由 19.61%增加至 37.67%, 实收产量下降幅度由 13.65%增加至 22.03%。不同剪叶处理, 倒伏指数均增加, 且 SP 处理显著增加了上部和下部的倒伏指数, 与其他处理相比抗倒性最弱。此外, 单株根系表面积、体积随着密度增加而下降, LP、SP 处理下根系表面积和体积均显著下降, 以 LP 处理影响最大。基于相关性分析结果, 在 D3 密度下, 剪去短柄叶减少了单株角果数, D5 密度下, 剪去短柄叶减少了单株角果数和每角果粒数, 使产量显著下降、抗倒性下降; 剪去长柄叶导致根系表面积、体积显著下降, 不利于产量形成。

**关键词:** 高密度; 长柄叶; 短柄叶; 根系; 产量; 抗倒性

## Exploring the functions of different leaf types of directly-sown rapeseed under high density

HUANG Xiao-Yu<sup>1</sup>, LOU Hong-Xiang<sup>1</sup>, SHAO Dong-Li<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>2</sup>, JIANG Bo<sup>3</sup>, XIAO Ya-Dan<sup>1</sup>,  
CHANG Ying<sup>1</sup>, GUO An-Da<sup>1</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>, XU Zheng-Hua<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, KUAI Jie<sup>1,\*</sup>, and  
ZHOU Guang-Sheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, Hubei, China; <sup>2</sup> National Agricultural Technical Extension and Service Center, Beijing 100125, China; <sup>3</sup> Hubei Province Oilseed Rape Office, Wuhan 430070, Hubei, China

**Abstract:** Optimal planting density is a core technology for ensuring rapeseed yield and production efficiency. However, excessive planting density can worsen lodging of rapeseed and make it challenging to achieve high yields. Leaves play a vital role in photosynthesis and dry matter accumulation in rapeseed, but the effects of different leaf types on yield and lodging resistance under high-density conditions remains unclear. In this study, we selected Zhongshuang 11 and implemented two planting densities

本研究由国家重点研发计划项目(2021YFD1600500), 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-12), 湖北省产业技术体系和湖北省重点研发计划项目(2023BBB028)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1600500), the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-12), the Earmarked Fund of Hubei Province of China, and the Key Research and Development Program of Hubei Province of China (2023BBB028).

\* 通信作者(Corresponding author): 蒯婕, E-mail: kuaijie@mail.hzau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: hxy08033121@163.com

Received (收稿日期): 2024-02-23; Accepted (接受日期): 2024-05-21; Published online (网络出版日期): 2024-06-04.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20240604.0931.006>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

(D3:  $4.5 \times 10^5$  plants  $\text{hm}^{-2}$ , D5:  $7.5 \times 10^5$  plants  $\text{hm}^{-2}$ ) and four-leaf pruning treatments (CK: no leaf pruning, LP: pruning half of the long-petiole leaves, SP: pruning half of the short-petiole leaves, SL: pruning half of the sessile leaves). We aimed to investigate the effects of these three leaf types on the yield and lodging resistance of directly-sown rapeseed under high density, providing a theoretical basis for managing the source-sink relationship, high-density rapeseed cultivation, and the lodging challenge. The results showed that, at the same density, the proportions of short-petiole leaf > long-petiole leaf > sessile leaf. When the density increased from D3 to D5, about 2 short-petiole leaves were reduced, resulted in a decrease in proportion from 50.6% to 46.7%. Leaf pruning at both densities lead to a reduction in siliques per plant, consequently decreasing the yield per plant and actual yield. Among the pruning treatments, SP had the greatest impact on yield. As density increased, the effect of SP on yield per plant increased from 19.61% to 37.67%, and the effect on actual yield increased from 13.65% to 22.03%. The lodging index increased under different leaf pruning treatments, with SP treatment significantly increasing the lodging index in both the upper and lower parts of the plant, indicating weaker lodging resistance. In addition, the root surface area and volume per plant decreased with increasing density, particularly under LP and SP treatments. Correlation analysis revealed that, under D3 density, pruning short-petiole leaves reduced the number of siliques per plant. Under D5 density, pruning short-petiole leaves and long-petiole leaves resulted in reduced siliques per plant and seed per silique, significantly decreasing both yield and lodging resistance. Pruning long-petiole leaves led to a significant decrease in root surface area and volume, which was unfavorable for yield formation.

**Keywords:** high density; long-petiole leaf; short-petiole leaf; root system; yield; lodging resistance

油菜是世界主要油料作物, 也是我国第一大油料作物, 其种植面积占油料作物面积的 55.2% (2023 统计年鉴)。2021 年我国国产油料榨油量为 1234.8 万吨, 占全国食用油消费总量的 29%, 是我国重要的食用油来源<sup>[1]</sup>。但我国油菜种植面积已趋于稳定, 总产量增长速度较慢, 提高油菜单产水平是增加油菜总产的必要途径<sup>[2-3]</sup>。合理密植是提高直播油菜产量和生产效益, 缩小与发达国家差距的一项核心技术<sup>[1,4-5]</sup>。当前, 生产中直播油菜的密度大多为  $1.5 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$ , 将密度增加至  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  左右, 具有明显的“以密增产、以密省肥、以密适机、以密控草、以密补迟”的“五密效应”, 以“五密”栽培理论为核心的直播油菜优质丰产轻简高效栽培技术正在全国油菜主产区大面积推广应用<sup>[1]</sup>, 但在此基础上, 进一步增加种植密度, 油菜茎秆抗折力降低, 倒伏指数增大<sup>[3,6-7]</sup>, 导致产量下降, 密植再高产难以实现。

油菜一生中形成 3 种类型叶片, 分别为长柄叶、短柄叶和无柄叶。油菜开花前, 叶片为主要光合器官, 为油菜后期生长发育提供大量碳水化合物; 开花后至角果期, 叶片开始大量凋落, 叶面积逐渐下降, 光合器官逐渐由叶片转变为角果, 此时的角果既为源器官也是库器官。前人针对低密度的移栽模式进行了不同类型叶片功能的研究。结果表明, 去除叶片越多, 其生物产量与经济产量下降越大, 去除短柄叶对产量影响最大<sup>[8-11]</sup>, 但也有研究表明去除长柄叶对产量影响较大<sup>[10]</sup>, 去除叶片的时间早, 其平均株高、二次有效分枝数、单株角果数和单株产量减少越多<sup>[11]</sup>。单株叶面积、角果数及角果表面积是影响籽粒产量关键因子<sup>[12]</sup>。较多研究通过对花期进行摘

叶或遮光处理来探究叶片或角果的光合产物的运输与分配, 表明花期之后, 叶片中光合产物向籽粒中分配量较少, 主要是通过影响植株、角果和籽粒的正常生长发育而间接影响产量, 角果光合产物是籽粒产量的主要来源<sup>[11,13-15]</sup>。叶片生长和功能受密度影响明显。密度增加, 作物单株叶片数、叶面积下降<sup>[16-17]</sup>, 群体光能利用率低, 群体生物量积累能力降低, 产量随之降低<sup>[18-19]</sup>。合理密植, 可有效促进叶面积持续时间的增加, 有利于成熟期干物质和籽粒产量的增加<sup>[20]</sup>。

综上, 多数研究认为传统低密度育苗栽培模式下, 长柄叶是壮苗的基础, 能够促进早期根系生长, 为地上部分提供充足的水分和矿物质, 短柄叶则促进根系及地上部生长, 而无柄叶促进分枝和角果生长<sup>[21]</sup>。目前, 针对高密直播油菜模式下, 不同类型叶片功能尚未见报道。因此, 本研究在高密度直播模式下, 对油菜 3 种类型叶片进行摘叶处理, 考察相关农艺指标及表型性状, 明确不同类型叶片对高密度直播油菜根系、茎秆抗倒性和产量的影响, 为协调直播油菜源库关系、高产和倒伏矛盾, 实现密植再高产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2021—2023 年在华中农业大学试验基地 ( $31^\circ\text{N}$ ,  $114^\circ\text{E}$ ) 进行。试验材料为中双 11 号, 该品种为半冬性甘蓝型常规油菜品种, 全生育期平均 233.5 d。2021—2022 年土壤有机质为 1.42%、全氮为  $0.90 \text{ g kg}^{-1}$ 、碱解氮为  $78.24 \text{ mg kg}^{-1}$ 、速效磷为  $23.12 \text{ mg kg}^{-1}$ 、速效钾为  $174.27 \text{ mg kg}^{-1}$ 、pH 6.06;

2022—2023 年土壤含有机质 1.22%、全氮 0.88 g kg<sup>-1</sup>、碱解氮 58.59 mg kg<sup>-1</sup>、速效磷 22.56 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾 163.41 mg kg<sup>-1</sup>、pH 6.02。

## 1.2 试验设计

采用双因素裂区设计,以密度  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  (D3)、 $7.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  (D5)为主区,剪叶处理为副区,小区面积为 14 m<sup>2</sup> (2 m×7 m),行距为 25 cm,共 24 个小区。第 1 季试验于 2021 年 10 月 5 日直播,2022 年 5 月 6 日收产;第 2 季试验于 2022 年 9 月 30 日直播,2023 年 4 月 28 日收产。各处理施肥量纯氮 225 kg  $\text{hm}^{-2}$  (尿素 489 kg  $\text{hm}^{-2}$ )、纯磷 90 kg  $\text{hm}^{-2}$  (过磷酸钙 750 kg  $\text{hm}^{-2}$ )、纯钾 90 kg  $\text{hm}^{-2}$  (氯化钾 150 kg  $\text{hm}^{-2}$ )、硼肥 7.5 kg  $\text{hm}^{-2}$  均作为基肥一次施入。

摘叶处理: (1) 长柄叶处理(LP), 去除 1/2 长柄叶,

从第一片长柄叶开始, 间隔一片叶子去除一片叶子, 直至第一片短柄叶生长; (2) 短柄叶处理(SP), 去除 1/2 的短柄叶, 从第一片短柄叶生长开始(苗后期开始), 间隔一片叶子去除一片叶子, 至第一片无柄叶长出; (3) 无柄叶处理(SL), 同长柄叶与短柄叶处理相似, 去除 1/2 的无柄叶, 从第一片无柄叶开始(蕾薹期至初花期间), 间隔一片叶子去除一片叶子, 直至无柄叶数量不再增加。(4) 不去除叶片为对照(CK)。

3 种类型叶片分类标准如下: 长柄叶为叶柄明显, 叶柄基部无叶翅; 短柄叶为叶柄基部两侧有明显叶翅; 无柄叶为叶身两侧下方延伸呈耳状, 呈现半抱茎或全抱茎(图 1-a)。从苗期开始, 在田间每个小区连续标记 10 株, 在关键生育时期进行叶片数的调查, 直至无新生叶片长出。



图 1 油菜不同类型叶片示意图(a)和不同类型叶片剪叶处理示意图(b)

Fig. 1 Schematic diagram of different leaf types (a) and leaf pruning treatments (b) of rapeseed

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及产量构成 角果成熟期，将油菜连根拔起，保留较完整根系，连续取样 8 株，将根系洗干净，考察单株角果数，按器官将油菜分装、晒干，称重测定单株产量。当全田 75%角果变成褐色时，收获小区产量，调查成株率。千粒重由自动考种分析仪(SC-G 型，杭州万深检测科技有限公司，中国杭州)进行测定。每角果粒数由千粒重、单株角果数及单株产量计算得到。

1.3.2 抗折力与倒伏指数 角果成熟期，连续取样 8 株，测量第一有效分枝高度，剪去缩茎段，在第一有效分枝点处剪断，将茎秆分为上下 2 段，采用茎秆强度测定仪(YYD-1，浙江托普仪器有限公司)测定茎秆两段中间部位的抗折力。测定植株鲜重，用于倒伏指数计算。计算公式为：倒伏指数( $\text{cm g g}^{-1}$ )=高度(cm)×鲜重(g)/抗折力(g)。此处高度与鲜重为测定茎段至植株顶部对应高度与鲜重，抗折力为该段中间处抗折力<sup>[3]</sup>。

1.3.3 根系形态 在油菜生长关键生育时期(苗期、薹期、花期)，每个小区连续取样 5 株，以 5

株植株为中心，取样深度约 30 cm。将挖出的根土混合物装入 40 目网袋中，用低水压的清水小心冲洗并挑出样品的根系，保留好编号，洗净后使用根系扫描仪(Epson Expression 1640XL, Epson America, Inc., 美国; with a resolution of 600 dpi.)进行扫描，并通过根系分析系统(Win RHIZO, Regent Instrument Inc., 加拿大)分析单株根系的根体积与根表面积。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理，SPSS 18.0 软件统计分析，最小显著法(LSD)检验试验数据的差异显著性水平( $P < 0.05$ )，采用 OriginPro 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 剪叶对叶片数量的影响

密度增加，主茎长柄叶与无柄叶占主茎总叶片数的比例增加，短柄叶比例下降(表 1)。D3 密度下，主茎长柄叶、短柄叶和无柄叶分别占主茎总叶数的 27.6%、50.6%和 21.6%; D5 密度下，主茎长柄叶、短柄叶和无柄叶分别占主茎总叶数的 30.9%、46.7%和 22.5%。剪

表 1 油菜不同类型叶片剪叶数及叶片数的变化  
Table 1 Changes in the number of pruned leaves and the number of leaves of rapeseed

| 年份<br>Year | 密度<br>Density | 处理<br>Treatment | 长柄叶<br>Long-petiole<br>leaf | 短柄叶<br>Short-petiole<br>leaf | 无柄叶<br>Sessile<br>leaf | 总叶数<br>Total number of<br>leaves | 剪叶数<br>Number of<br>pruned leaves |
|------------|---------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 2021–2022  | D3            | CK              | 7.9                         | 14.8                         | 7.2                    | 29.1                             | —                                 |
|            |               | LP              | 3.3                         | 14.8                         | 6.7                    | 25.1                             | 4.0                               |
|            |               | SP              | 8.0                         | 8.0                          | 7.1                    | 21.5                             | 7.6                               |
|            |               | SL              | 7.8                         | 14.7                         | 3.6                    | 26.0                             | 3.0                               |
|            | D5            | CK              | 8.1                         | 12.6                         | 6.7                    | 28.8                             | —                                 |
|            |               | LP              | 4.1                         | 12.6                         | 6.9                    | 23.5                             | 4.0                               |
|            |               | SP              | 8.0                         | 7.1                          | 6.5                    | 21.7                             | 6.7                               |
|            |               | SL              | 7.9                         | 12.5                         | 3.6                    | 26.3                             | 3.2                               |
| 2022–2023  | D3            | CK              | 9.1                         | 16.4                         | 6.2                    | 31.7                             | —                                 |
|            |               | LP              | 4.5                         | 15.7                         | 6.2                    | 26.5                             | 4.7                               |
|            |               | SP              | 8.4                         | 10.0                         | 5.8                    | 24.2                             | 9.1                               |
|            |               | SL              | 9.2                         | 16.1                         | 3.0                    | 28.3                             | 2.8                               |
|            | D5            | CK              | 9.7                         | 14.3                         | 6.2                    | 30.2                             | —                                 |
|            |               | LP              | 4.8                         | 14.2                         | 6.2                    | 25.1                             | 5.1                               |
|            |               | SP              | 9.9                         | 6.9                          | 6.4                    | 23.2                             | 7.8                               |
|            |               | SL              | 9.6                         | 14.3                         | 3.6                    | 27.6                             | 2.7                               |

D3 和 D5 分别表示种植密度为  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  和  $7.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$ ; CK、LP、SP、SL 分别表示为不进行剪叶处理(对照)、剪去一半长柄叶处理、剪去一半短柄叶处理、剪去一半无柄叶处理。

D3 and D5 represent planting densities of  $4.5 \times 10^5$  plants  $\text{hm}^{-2}$  and  $7.5 \times 10^5$  plants  $\text{hm}^{-2}$ , respectively. CK, LP, SP, and SL represent no leaf pruning (control), pruning half of the long-petiole leaves, pruning half of the short-petiole leaves, and pruning half of the sessile leaves, respectively.

叶后, 相对应叶片比例下降, 另外 2 种叶片比例增加。在 2 个密度下, LP 处理后, 主茎长柄叶比例下降至 15.2%和 17.7%, 短柄叶和无柄叶比例增加至 59.6%和 56.1%、25.3%和 26.2%; SP 处理后, 主茎短柄叶比例下降至 29.3%和 31.3%, 长柄叶和无柄叶比例增加至 34.7%和 39.9%、36.0%和 28.9%; SL 处理后, 主茎无柄

叶比例下降至 12.2%和 14.1%, 长柄叶和短柄叶比例增加至 31.2%和 33.9%、56.6%和 52.1%。

2.2 剪叶对油菜产量的影响

2.2.1 产量及产量构成 密度增加和剪叶处理降低了油菜单株角果数和单株产量(图 2 和表 2)。D3 密度下, 与对照(CK)相比, 剪叶处理显著降低了油

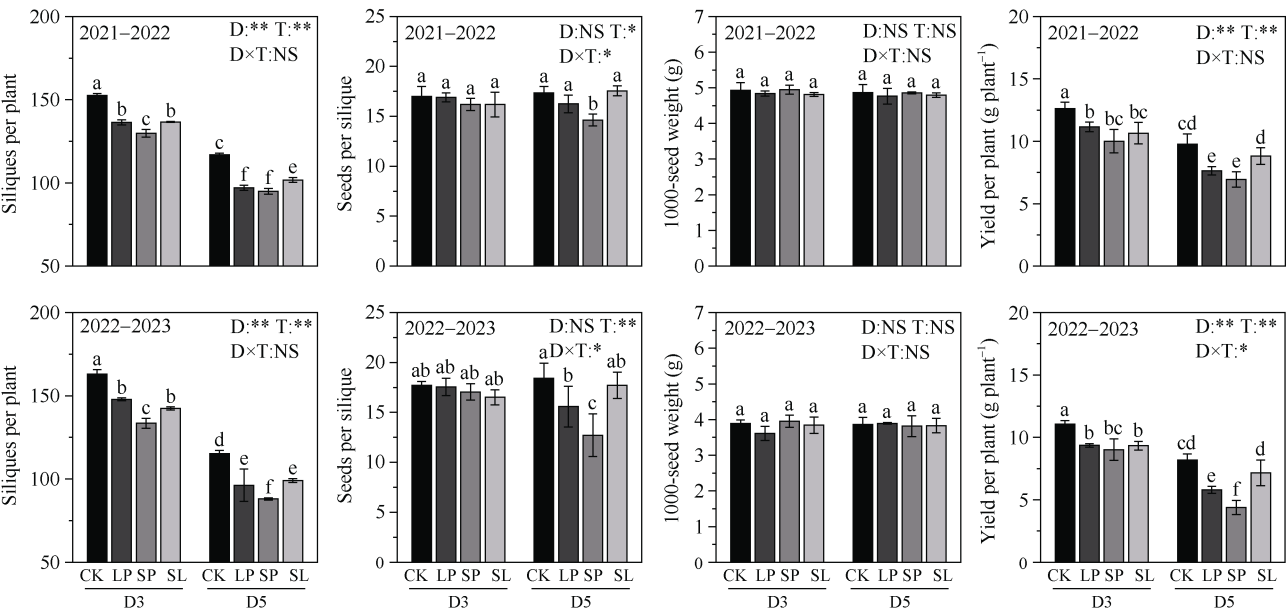


图 2 不同剪叶处理对油菜产量及产量构成因素的影响

Fig. 2 Effects of different leaf pruning treatments on yield and yield component of rapeseed

缩写及处理同表 1。图上不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平差异显著; \*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著, NS 表示差异不显著。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments at the 0.05 probability level. \* and \*\* represent differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, while NS indicates non-significant differences.

表 2 不同处理对油菜产量及产量构成的贡献率

Table 2 Contribution of different leaf types to yield and yield components (%)

| 年份<br>Year | 密度<br>Density | 处理<br>Treatment | 成株率<br>Survival<br>rate | 单株角果数<br>Siliques per<br>plant | 每角果粒数<br>Seeds per<br>silique | 单株产量<br>Yield per<br>plant | 实收产量<br>Actual<br>yield | 群体角果数<br>Group silique<br>number |
|------------|---------------|-----------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 2021-2022  | D3            | LP              | -3.91                   | -10.60                         | -0.53                         | -11.50                     | -0.46                   | -14.11                           |
|            |               | SP              | -6.25                   | -14.86                         | -4.71                         | -20.68                     | -11.21                  | -18.18                           |
|            |               | SL              | -2.08                   | -10.23                         | -4.77                         | -15.69                     | -11.00                  | -11.09                           |
|            | D5            | LP              | 11.76                   | -16.97                         | -6.29                         | -21.73                     | -15.02                  | -9.22                            |
|            |               | SP              | 9.84                    | -18.78                         | -15.63                        | -28.95                     | -16.11                  | -12.73                           |
|            |               | SL              | -1.01                   | -12.92                         | 1.21                          | -9.70                      | -12.16                  | -15.62                           |
| 2022-2023  | D3            | LP              | -1.04                   | -9.29                          | -0.85                         | -15.37                     | -15.08                  | -10.20                           |
|            |               | SP              | -1.57                   | -18.09                         | -3.78                         | -18.53                     | -16.08                  | -19.34                           |
|            |               | SL              | -0.69                   | -12.64                         | -6.78                         | -15.55                     | -13.54                  | -13.22                           |
|            | D5            | LP              | 11.09                   | -16.43                         | -15.42                        | -29.28                     | -16.06                  | -7.17                            |
|            |               | SP              | 8.99                    | -23.52                         | -31.00                        | -46.38                     | -27.95                  | -16.64                           |
|            |               | SL              | 2.59                    | -13.94                         | -3.85                         | -12.55                     | -4.57                   | -11.68                           |

缩写及处理同表 1。贡献率(%) = (处理-对照)/对照 × 100。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Table 1. Contribution (%) = (treatment-control)/control × 100.

菜单株角果数、单株产量, 剪去短柄叶(SP)处理下降幅度最大, 2021—2022 年分别降低了 14.86%、20.68%; 2022—2023 年分别降低了 18.09%、18.53%。剪叶处理对每角果粒数、千粒重的影响不显著。D5 密度下, 与对照(CK)相比, 剪叶后, 油菜单株角果数、每角果粒数、单株产量显著下降, 剪去短柄叶(SP)处理下降幅度最大, 2021—2022 年分别降低了 18.78%、15.63%和 28.95%; 2022—2023 年分别降低了 23.52%、31.00%和 46.38%。

2.2.2 成株率和实收产量 D3 密度下, 与对照(CK)相比, 剪叶处理显著降低了油菜群体角果数和实收产量(图 3 和表 2)。剪去短柄叶(SP)处理下油菜

群体角果数和实收产量下降幅度最大, 2021—2022 年分别降低了 18.18%和 11.21%; 2022—2023 年分别降低了 19.34%和 16.08%。D5 密度下, 与对照(CK)相比, 剪叶后, 油菜群体角果数和实收产量显著下降, 而成株率增加。剪去短柄叶(SP)处理下油菜实收产量下降幅度最大, 2021—2022 年降低了 16.11%; 2022—2023 年降低了 27.95%。而群体角果数在 2021—2022 年剪去无柄叶(SL)处理下, 下降幅度最大, 2022—2023 年在剪去短柄叶(SP)处理下, 下降幅度最大。剪去长柄叶(LP)处理下的成株率最大, 较 CK 相比, 2021—2022 年增加了 11.76%, 2022—2023 年增加了 11.09%, 剪去短柄叶(SP)处理次之。

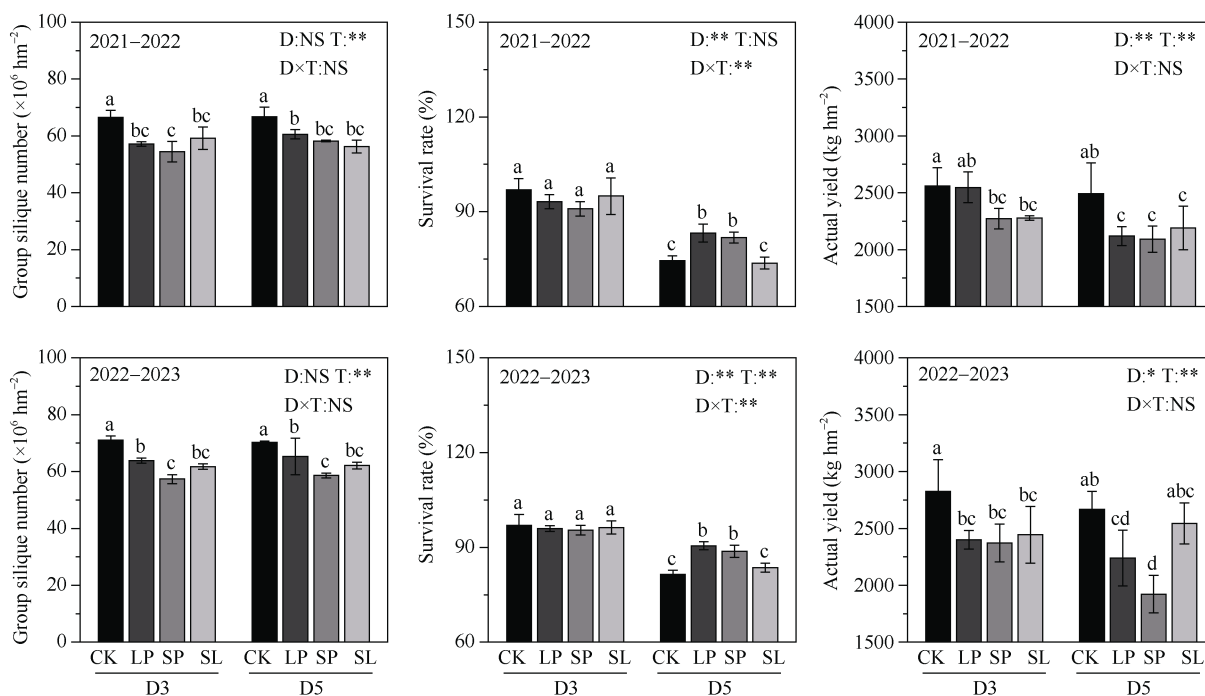


图 3 不同剪叶处理对油菜群体产量及相关指标的影响

Fig. 3 Effects of different leaf pruning treatments on population yield and related indexes of rapeseed

缩写及处理同表 1。图上不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平差异显著; \* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著, NS 表示差异不显著。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments at the 0.05 probability level; \* and \*\* represent differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, while NS indicates non-significant differences.

### 2.3 对油菜倒伏的影响

密度增加和剪叶处理显著降低了油菜茎秆的抗折力(图 4 和表 3)。2 年试验结果表明: D3 密度下, 上部抗折力和下部抗折力均在剪去短柄叶(SP)处理下显著下降。密度增加, 油菜倒伏指数略有降低, 不同剪叶处理下, 倒伏指数增加在 D3 和 D5 密度下, 剪去短柄叶(SP)处理下显著增加了上部和下部的倒伏

指数, 抗倒性最弱, 较 CK 相比, D3 密度下, SP 处理下, 上部和下部倒伏指数在 2021—2022 年分别增加了 31.66%、31.43%, 在 2022—2023 年则分别增加了 11.90%、7.57%。D5 密度下, SP 处理下, 上部和下部倒伏指数在 2021—2022 年分别增加了 22.63%、27.60%, 在 2022—2023 年则分别增加了 24.50%、12.78%。

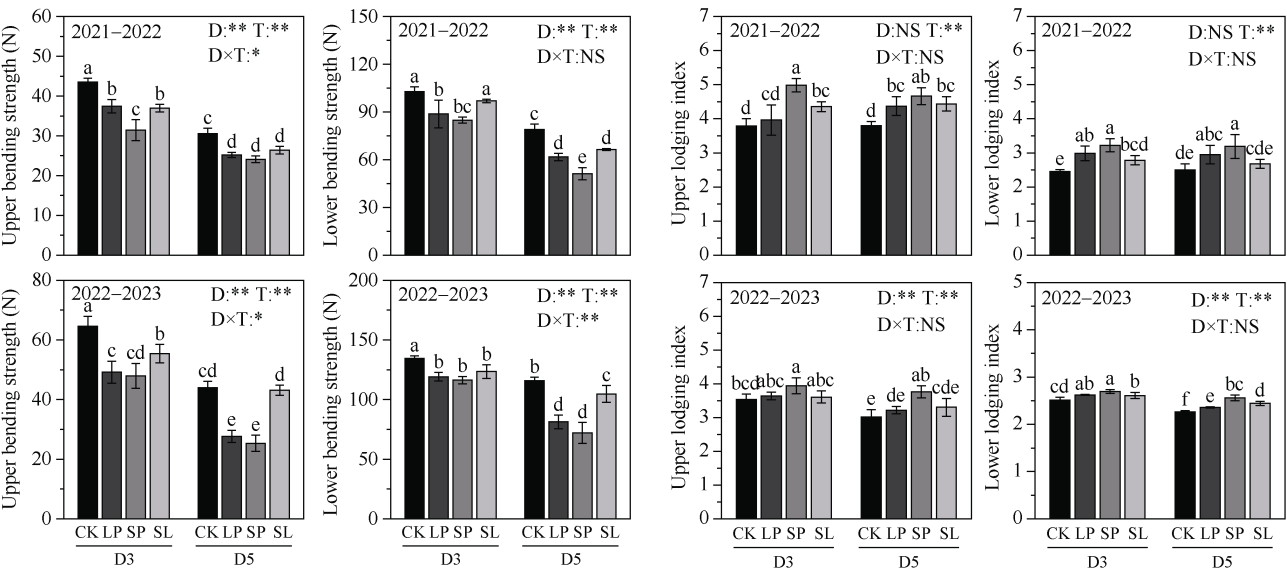


图 4 不同剪叶处理对油菜抗折力和倒伏指数的影响  
**Fig. 4 Effects of different leaf pruning treatments on bending strength and lodging index of rapeseed**  
缩写及处理同表 1。图上不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平差异显著; \*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著, NS 表示差异不显著。  
Abbreviations and treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments at the 0.05 probability level. \* and \*\* indicate differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, while NS indicate non-significant differences.

表 3 不同类型叶片对油菜倒伏指数的贡献率  
**Table 3 Contribution of lodging index of rapeseed under different leaf pruning treatments (%)**

| 密度<br>Density | 处理<br>Treatment | 上部倒伏指数 Upper lodging index |           | 下部倒伏指数 Lower lodging index |           |
|---------------|-----------------|----------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
|               |                 | 2021-2022                  | 2022-2023 | 2021-2022                  | 2022-2023 |
| D3            | LP              | 4.49                       | 3.12      | 21.63                      | 4.38      |
|               | SP              | 31.66                      | 11.90     | 31.43                      | 7.57      |
|               | SL              | 15.04                      | 2.27      | 13.88                      | 3.98      |
| D5            | LP              | 15.00                      | 6.62      | 18.00                      | 3.96      |
|               | SP              | 22.63                      | 24.50     | 27.60                      | 12.78     |
|               | SL              | 16.84                      | 9.60      | 7.20                       | 7.49      |

缩写及处理同表 1。贡献率(%) = (处理-对照)/对照 × 100。  
Abbreviations and treatments are the same as those given in Table 1. Contribution (%) = (treatment-control)/control × 100.

2.4 根系形态

苗期到薹期, 油菜根系生长加快, 薹期根表面积与根体积达最大值(图 5)。密度增加, 单株根系表面积、体积下降; 剪去长柄叶、短柄叶根系表面积和体积均显著下降, 且以长柄叶影响最大。在 D3 密度下, LP 处理显著降低了花期根表面积和根体积, 2021—2022 年分别降低了 26.21%和 43.80%; 2022—2023 年分别降低了 21.45%和 49.95%。在 D5 密度下, LP 处理降低了花期根表面积和根体积, 较

CK 相比, 2021—2022 年分别降低了 21.69%和 22.79%; 2022—2023 年分别降低了 33.16%和 31.50%。

2.5 油菜单株产量及相关指标间的相关性

由图 6 可知, 在 D3 密度下, 短柄叶与单株角果数呈显著正相关关系, 与单株产量相关性不显著; 在 D5 密度下, 短柄叶与单株角果数、每角果粒数和单株产量均显著正相关; 而长柄叶与单株根表面积、根体积相关性最大。

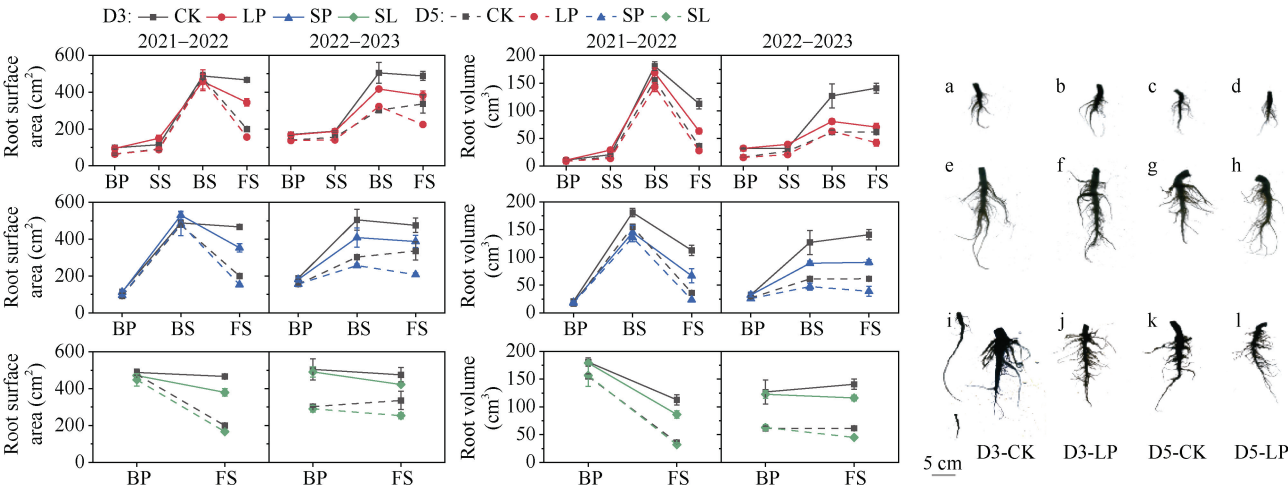


图 5 不同剪叶处理对油菜根系形态的影响

**Fig. 5 Effects of different leaf pruning treatments on root phenotype of rapeseed**

缩写及处理同表 1。BP、SS、BS、FS 分别表示处理前、苗期、薹薹期、花期；a-d 为苗期 D3 和 D5 密度下，对照与剪长柄叶(LP)处理，e-h 为薹薹期 D3 和 D5 密度下，对照与剪长柄叶(LP)处理，i-l 为花期 D3 和 D5 密度下，对照与剪长柄叶(LP)处理。Abbreviations and treatments are the same as those given in Table 1. BP, SS, BS and FS indicated pre-treatment, seeding stage, bolting stage, flowering stage, respectively; a-d was the control and pruned long-petiole leaves (LP) under D3 and D5 densities at seeding stage, e-h was the control and pruned long-petiole leaves (LP) under D3 and D5 densities at bolting stage, and i-l was the control and pruned long-petiole leaves (LP) under D3 and D5 densities at flowering stage.

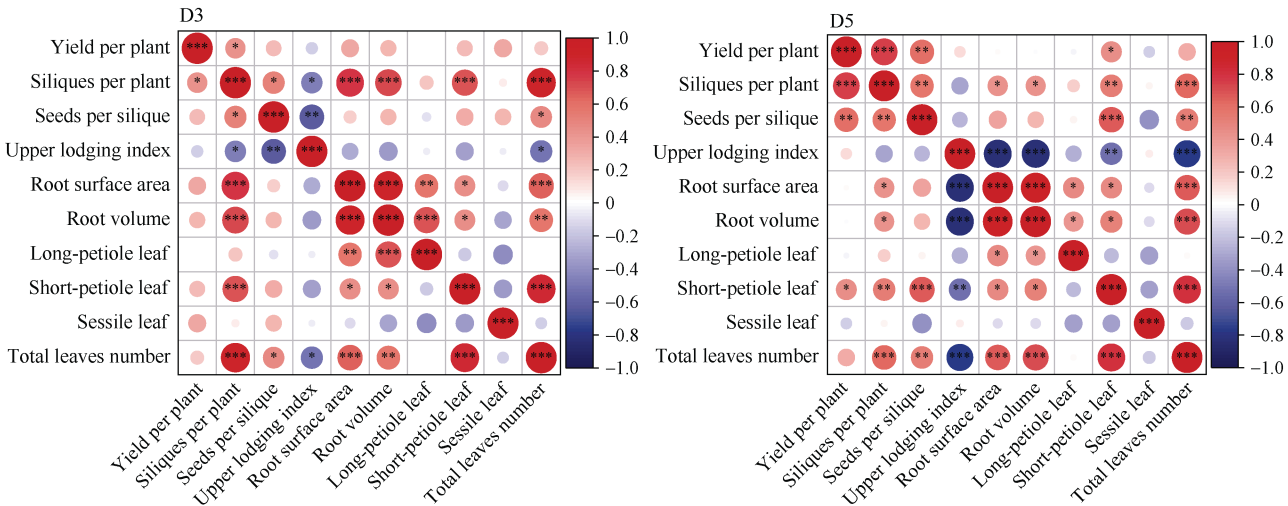


图 6 不同剪叶处理对油菜单株产量及相关指标间的相关性

**Fig. 6 Correlation between different leaf types and yield related indexes of rapeseed**

缩写及处理同表 1。\*、\*\*和\*\*\*分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 概率水平相关性显著。Abbreviations and treatments are the same as those given in Table 1. \*, \*\*, and \*\*\* represent significant correlations at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

### 3 讨论

油菜的光合器官由叶、茎、角果组成，但茎的光合面积较小，叶片和角果成为主要光合器官，但其作用时期存在差异<sup>[22]</sup>。开花前，叶片是主要的光合器官，为油菜后期生长发育提供大量碳水化合物；开花后至角果期，叶片开始大量凋落，叶面积逐渐下降，光合器官逐渐由叶片转变为角果，此时的角果既为源器官也是库器官。终花后

25 d，角果皮光合作用产生的干物质开始主要向籽粒中运输，而叶片前期贮藏的干物质向籽粒中的运输是对角果皮光合产物的补充，影响产量<sup>[23]</sup>。前人通过对低密度及移栽模式种植的油菜花期进行摘叶或遮光处理来探究叶片的光合产物的运输与分配，表明花期后，叶片中光合产物向籽粒中分配量较少，通过影响植株、角果和籽粒生长而间接影响产量，而角果光合产物是籽粒产量的主要来源<sup>[11,13-15]</sup>。

油菜一生中有 3 种类型叶片, 出苗后首先在缩茎段长出长柄叶, 随后在伸长茎段长出短柄叶, 最后在薹茎段长出无柄叶。叶的形态、数量和空间分布决定作物的株型结构, 优化植株叶片数目可以优化群体结构, 提高光合效率, 优化干物质分配比例, 从而提高作物产量<sup>[24-25]</sup>。可见, 基于油菜不同类型叶片形成时期和形态差异, 推测这 3 种类型叶片在不同生育时期发挥不同的功能。但目前关于高密度直播油菜叶片功能相关研究鲜有报道。2000 年左右, 前人在移栽油菜或  $1.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  左右低密度下开展了叶片与产量关系的研究, 结果表明: 各类叶对产量的作用顺序为: 无柄叶>短柄叶>分枝叶>长柄叶<sup>[26]</sup>。通过去叶试验发现, 去除叶片越多, 生物产量与经济产量下降越大, 有人认为去除长柄叶对产量影响较大<sup>[8]</sup>, 但也有人认为去除短柄叶影响大于长柄叶<sup>[7,27]</sup>。油菜植株进入生殖生长阶段后, 由于叶片衰老速率的增加, 叶片光合速率及叶片光合面积均表现为快速下降趋势, 此时短柄叶作为油菜薹期及花期接触光源的重要组成部分, 对油菜角果生长以及产量构成具有不可替代的作用<sup>[28]</sup>, 特别是短柄叶衰老中后期的光合速率与产量呈现显著正相关<sup>[29]</sup>。本研究结果表明, 油菜 3 种不同类型叶片占比为短柄叶>长柄叶>无柄叶; 密度由  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  增加至  $7.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$ , 减少了短柄叶约 2 片, 占比由 50.6% 下降至 46.7%。在  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  密度下, 剪叶降低单株角果数, 进而导致单株产量和实收产量的降低; 在  $7.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  密度下, 剪叶后成株率增加, 但单株角果数减少, 同样导致单株产量和实收产量下降。直播条件下, 在  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  和  $7.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  2 个密度下, 均以 SP 对单株产量和实收产量的影响最大。随着密度增加, SP 处理下单株产量下降幅度由 19.61% 增加至 37.67%, 实收产量下降幅度由 13.65% 增加至 22.03%; 而 LP 处理下单株产量的下降幅度随着密度增加从 13.44% 增加至 25.51%, 实收产量的下降幅度由 7.77% 增加值 15.54%。其他研究也表明: 密度增加, 作物单株叶片数、叶面积逐渐下降<sup>[16-17]</sup>, 基部叶片接受的光辐射量降低, 下部叶片衰老加速<sup>[30-32]</sup>, 光合能力随之下降<sup>[33-35]</sup>, 可推测高密度直播油菜基部叶片(长柄叶)对产量的贡献小于短柄叶。在  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  密度下, 长柄叶、短柄叶和无柄叶与单株产量、每角果粒数间相关不显著, 而短柄叶与单株角果数呈显著正相关关系; 随着密度增加至  $7.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$ , 仅

有短柄叶与单株产量、单株角果数和每角果粒数具有显著正相关关系, 但与单株角果数相关性强度下降(图 6)。

合理的株型结构可增强植株的抗倒性<sup>[36-38]</sup>, 而改善油菜株型的关键在于分枝数、分枝角度、株高<sup>[39-40]</sup>。叶片通过影响植株茎秆长度, 从而间接影响植株的倒伏。适度的去除植株冗余的叶片, 能够改善密植植株冠层光分布, 优化茎秆质量性状, 降低植株倒伏的能力<sup>[41]</sup>。提高密度增加了种间竞争, 导致主茎变细, 分枝减少, 单株产量下降<sup>[19,42]</sup>。本研究结果表明: 密度增加, 油菜倒伏指数略有降低; 不同剪叶处理下, 倒伏指数增加。较 CK 相比, SP 处理对倒伏指数的影响随密度的增加由 21.78% 增加至 23.57%, 比 LP 处理增加 17.97% 和 12.76%。D3 密度下短柄叶与倒伏指数相关性较大, 密度增加至 D5, 长柄叶与短柄叶均与倒伏指数呈现负相关, 但以短柄叶对倒伏指数的影响最大, 剪去短柄叶后抗倒性最弱(图 6)。

作物根系与地上部是一个有机整体, 通过维管束进行营养物质和信息物质的交换。根系生长良好, 提高了作物对水分的养分吸收, 有利于地上部和产量的形成<sup>[43-44]</sup>。地上部分叶片通过光合作用形成的蔗糖, 一方面是地上部生长能量来源<sup>[45-46]</sup>, 另一方面可以作为一种信号物质影响根系发育<sup>[47]</sup>。刘胜群等<sup>[48]</sup>指出根系中干物质的积累与地上部绿叶面积具有密切关系。本研究中, 密度增加, 单株根系表面积、体积下降; 剪去长柄叶、短柄叶后, 根系表面积和体积均显著下降, 且 D3、D5 密度下长柄叶与根表面积与根体积的相关性均较大, 因此 2 个密度下长柄叶对根系影响最大(图 6)。油菜生长前期, 是根系生长的旺盛时期, 光合器官中以长柄叶面积最大, 减去长柄叶, 光合面积显著下降, 减少了光合产物向地下部的转运, 阻碍了根系的形成与伸长。前人结果表明, 长柄叶能促进早期根系生长, 为地上部提供水分和矿物质, 是壮苗的基础, 短柄叶则起到了向下促进根系生长, 向上促进花的发育, 而无柄叶主要作用于上部分枝和角果生长<sup>[10]</sup>。本研究中剪去无柄叶后对油菜根系、茎秆倒伏和产量的影响较小, 可能原因是栽培条件, 如移栽和直播、高密度和低密度等的差异引起。与移栽方式相比, 直播方式生育期缩短, 单株叶面积减少, 无柄叶在 3 种类型叶片中叶面积最小, 高密度直播条件下其功能则进一步减小。

## 4 结论

本试验条件下, 在 高密度直播栽培模式下, 密度由  $4.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$  增加至  $7.5 \times 10^5$  株  $\text{hm}^{-2}$ , 3 种不同类型叶片比例发生变化, 对油菜产量及抗倒性影响各不相同。在 2 个密度下, 剪去短柄叶(SP)使产量显著降低, 增加倒伏指数, 抗倒性下降。在 D3 密度下, 短柄叶通过影响单株角果数影响单株产量; 而在 D5 密度下, 短柄叶则同时影响单株角果数、每角果粒数和单株产量。随着密度增加, SP 处理下, 单株产量下降幅度由 19.61% 增加至 37.67%, 实收产量下降幅度由 13.65% 增加至 22.03%, 倒伏指数增幅由 21.78% 增加至 23.57%。D3、D5 密度下长柄叶与根表面积、根体积的相关性最大。剪去长柄叶(LP)导致根系表面积、体积显著下降, 不利于产量形成。无柄叶在 3 种类型叶片中叶面积最小, 高密度直播条件下其功能进一步减小。

## References

- [1] 蒯婕, 王积军, 左青松, 陈红琳, 高建芹, 汪波, 周广生, 傅廷栋. 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: 4625–4632.  
Kuai J, Wang J J, Zuo Q S, Chen H L, Gao J Q, Wang B, Zhou G S, Fu T D. Effects and mechanism of higher plant density on directly-sown rapeseed in the Yangtze River Basin of China. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 4625–4632 (in Chinese with English abstract).
- [2] 姬建利. 密度和行距配置影响油菜产量和倒伏的机理研究. 华中农业大学硕士学位论文, 湖北武汉, 2019.  
Ji J L. Mechanism of Density and Row Spacing Affecting Rapeseed Yield and Lodging. MS Thesis of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [3] 袁圆, 汪波, 周广生, 刘芳, 黄俊生, 蒯婕. 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: 1613–1626.  
Yuan Y, Wang B, Zhou G S, Liu F, Huang J S, Kuai J. Effects of different sowing dates and planting densities on the yield and stem lodging resistance of rapeseed. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 1613–1626 (in Chinese with English abstract).
- [4] Khan S, Anwar S, Kuai J, Noman A, Shahid M, Din M, Ali A, Zhou G S. Alteration in yield and oil quality traits of winter rapeseed by lodging at different planting density and nitrogen rates. *Sci Rep*, 2018, 8: 634.
- [5] Kuai J, Sun Y Y, Zuo Q S, Huang H D, Liao Q X, Wu C Y, Lu J W, Wu J S, Zhou G S. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing. *Sci Rep*, 2015, 5: 18835.
- [6] 陈松林. 长江流域冬油菜适宜密植关键株型指标及参数研究. 华中农业大学硕士学位论文, 湖北武汉, 2020.  
Chen S L. Study on Key Plant Type Indexes and Parameters of Winter Rape Suitable for Close Planting in Yangtze River Basin. MS Thesis of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李宏志, 卓从丽, 廖斌, 陈红, 邹康平, 何帮华, 卓国华, 黎芳. 种植密度对不同株型春玉米品种源库关系及产量的影响. 湖南农业科学, 2019, (11): 25–27.  
Li H Z, Zhuo C L, Liao B, Chen H, Zou K P, He B H, Zhuo G H, Li F. Effects of planting density on source sink relationship and yield of different plant types of spring maize. *Hunan Agric Sci*, 2019, (11): 25–27 (in Chinese with English abstract).
- [8] 胡立勇, 单文燕, 王维金. 油菜结实特性与库源关系的研究. 中国油料作物学报, 2002, 24(2): 37–42.  
Hu L Y, Shan W Y, Wang W J. Characteristics of seed set and source-sink relation of *Brassica napus*. *Chin J Oil Crop Sci*, 2002, 24(2): 37–42 (in Chinese with English abstract).
- [9] 廉博, 张胜, 张彩彪. 剪叶对春油菜源库关系的影响. 内蒙古农业科技, 2012, (3): 24–27.  
Lian B, Zhang S, Zhang C B. Effect of leaf-cutting on spring rape source-sink relationship. *Inner Mongolia Agric Sci Technol*, 2012, (3): 24–27 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王瑛. 双低春油菜源库关系的研究. 内蒙古农业大学硕士学位论文, 内蒙古呼和浩特, 2006.  
Wang Y. Study on the Relationship between Source and Sink of Double-low Spring Rape. MS Thesis of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia, China, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [11] 陈婷. 油菜叶片和角果光合对其籽粒产量及品质的影响. 西北农林科技大学硕士学位论文, 陕西杨凌, 2016.  
Chen T. Influence of Leaf and Silique Photosynthesis on Seeds Yield and Seed Soil Quality of Oilseed Rape. MS Thesis of Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王春丽, 王周礼, 陈婷, 杨建利, 陈文杰, 穆建新, 田建华, 赵小光. 甘蓝型油菜生殖生长期叶片和角果光合与产量关系的研究. 西北植物学报, 2016, 36: 1417–1426.  
Wang C L, Wang Z L, Chen T, Yang J L, Chen W J, Mu J X, Tian J H, Zhao X G. Relationship between yield and photosynthesis of leaf and silique of different *Brassica napus* L. varieties during relationship period. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2016, 36: 1417–1426 (in Chinese with English abstract).
- [13] 冷锁虎, 朱耕如, 邓秀兰. 油菜籽粒干物质来源的研究. 作物学报, 1992, 18: 250–257.  
Leng S H, Zhu G R, Deng X L. Studies on the sources of the dry matter in the seed of rapeseed. *Acta Agron Sin*, 1992, 18: 250–257 (in Chinese with English abstract).
- [14] Iglesias F M, Miralles J. Changes in seed weight in response to different sources: sink ratio in oilseed rape. *Int J Agric Res Innov Technol*, 2014, 4: 44–52.
- [15] Zhang H P, Flottmann S. Source-sink manipulations indicate seed yield in canola is limited by source availability. *Eur J Agron*, 2018, 96: 70–76.
- [16] 郎有忠, 王美娥, 吕川根, 张祖建, 朱庆森. 水稻叶片形态、群体结构和产量对种植密度的响应. 江苏农业学报, 2012, 28(1): 7–11.  
Lang Y Z, Wang M E, Lyu C G, Zhang Z J, Zhu Q S. Response of leaf morphology, population structure and yield to planting density in rice. *Jiangsu J Agric Sci*, 2012, 28(1): 7–11 (in Chinese with English abstract).

- with English abstract).
- [17] 周萍, 崔岭, 王海燕, 钱素菊, 崔亚坤, 陈艳萍, 袁建华. 大豆玉米带状复种模式下种植密度对玉米植株生长和产量的影响. 中国农学通报, 2023, 39(14): 1–5.  
Zhou P, Cui L, Wang H Y, Qian S J, Cui Y K, Chen Y P, Yuan J H. Effects of planting density on plant growth and yield of maize in maize-soybean strip intercropping system. *Chin Agric Sci Bull*, 2023, 39(14): 1–5 (in Chinese with English abstract).
  - [18] 王锐. 油菜群体冠层结构特性及光能利用率的研究. 华中农业大学博士学位论文, 湖北武汉, 2015.  
Wang R. The Study on Characteristics of the Canopy Structure and Radiation Use Efficiency for Canola Plant Population. PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2015 (in Chinese with English abstract).
  - [19] Edwards J, Hertel K. Canola Growth & Development. Australia: Department of Primary Industries State of New South Wales, 2011. pp 39–54.
  - [20] Li Y Y, Ming B, Fan P P, Liu Y, Wang K R, Hou P, Xue J, Li S K, Xie R Z. Quantifying contributions of leaf area and longevity to leaf area duration under increased planting density and nitrogen input regimens during maize yield improvement. *Field Crops Res*, 2022, 283: 108551.
  - [21] 傅寿仲. 油菜的光合作用和产量形成. 江苏农业科学, 1980, (6): 37–45.  
Fu S Z. Photosynthesis and yield formation of rapeseed. *Jiangsu Agric Sci*, 1980, (6): 37–45 (in Chinese).
  - [22] 刘后利, 实用油菜栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. pp 212–555.  
Liu H L. Practical Cultivation of Rapeseed. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1987. pp 212–555 (in Chinese).
  - [23] 龚宏伟, 张振兰. 甘蓝型杂交油菜角果的源库特性研究. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2011, 32(4): 51–54.  
Gong H W, Zhang Z L. Characteristics of source-sink of pods in hybrid *Brassica napus* L. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci Edn)*, 2011, 32(4): 51–54 (in Chinese with English abstract).
  - [24] 崔晓峰, 黄海. 叶发育的遗传调控机理研究进展. 植物生理学报, 2011, 47: 631–640.  
Cui X F, Huang H. Recent progress in genetic control of leaf development. *Plant Physiol J*, 2011, 47: 631–640 (in Chinese with English abstract).
  - [25] 李丹. 玉米叶片数遗传结构的解析及目标 QTL 的克隆. 中国农业大学博士学位论文, 北京, 2015.  
Li D. Analysis of Genetic structure of Maize Leaf Number and Target QTL Cloning. PhD Dissertation of China Agricultural University, Beijing, China, 2015 (in Chinese with English abstract).
  - [26] 张宇文, 张玉俊, 王可珍, 郭亚茹, 赵志忠. 甘蓝型油菜生育后期叶片对产量的影响. 中国油料作物学报, 1996, 18(1): 89–90.  
Zhang Y W, Zhang Y J, Wang K Z, Guo Y R, Zhao Z Z. Leaves effect on yield of rape (*Brassica napus*) in late development phase. *Chin J Oil Crop Sci*, 1996, 18(1): 89–90 (in Chinese with English abstract).
  - [27] 胡宝成, 李强生, 赵仁渠, 陈凤祥. 花期去叶对甘蓝型杂交油菜经济性状和品质性状的影响. 安徽农业科学, 1991, 19(3): 235–238.  
Hu B C, Li Q S, Zhao R Q, Chen F X. Effect of removing leaves on economy & quality properties of hybrid *B. napus* at the flowering stage. *J Anhui Agric Sci*, 1991, 19(3): 235–238 (in Chinese with English abstract).
  - [28] 龚月桦, 高俊凤. 高等植物光合同化物的运输与分配. 西北植物学报, 1999, 19: 564–570.  
Gong Y H, Gao J F. Transport and partitioning of photo assimilate in higher plant. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 1999, 19: 564–570 (in Chinese with English abstract).
  - [29] 李俊, 张春雷, 赵懿, 马霓, 余利平. 油菜短柄叶光合衰退及其对产量的影响. 中国油料作物学报, 2011, 33: 464–469.  
Li J, Zhang C L, Zhao Y, Ma N, Yu L P. Short-stalk leaf photosynthesis declining and its effect on rapeseed yield. *Chin J Oil Crop Sci*, 2011, 33: 464–469 (in Chinese with English abstract).
  - [30] 陈传永, 侯海鹏, 李强, 朱平, 张振勇, 董志强, 赵明. 种植密度对不同玉米品种叶片光合特性与碳、氮变化的影响. 作物学报, 2010, 36: 871–878.  
Chen C Y, Hou H P, Li Q, Zhu P, Zhang Z Y, Dong Z Q, Zhao M. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and changes of carbon and nitrogen in leaf of different corn hybrids. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 871–878 (in Chinese with English abstract).
  - [31] 耿广涛, 宋桂成, 董文庆, 江晨亮, 许晓明, 唐灿明. 种植密度对不同叶位玉米叶片光合特性的影响. 核农学报, 2015, 29: 1589–1595.  
Geng G T, Song G C, Dong W Q, Jiang C L, Xu X M, Tang C M. Effect of different plant density on leaves photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) at different leaves position. *J Nucl Agric Sci*, 2015, 29: 1589–1595 (in Chinese with English abstract).
  - [32] 吴含玉, 张雅君, 张旺锋, 王克如, 李少昆, 姜闯道. 田间密植诱导抽穗期玉米叶片衰老时的光合作用机制. 作物学报, 2019, 45: 248–255.  
Wu H Y, Zhang Y J, Zhang W F, Wang K R, Li S K, Jiang C D. Photosynthetic characteristics of senescent leaf induced by high planting density of maize at heading stage in the field. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 248–255 (in Chinese with English abstract).
  - [33] 田永超, 曹卫星, 王绍华, 朱艳. 不同水、氮条件下水稻不同叶位水、氮含量及光合速率的变化特征. 作物学报, 2004, 30: 1129–1134.  
Tian Y C, Cao W X, Wang S H, Zhu Y. Variation of water and nitrogen contents & photosynthesis at different position leaves of rice under different soil water and nitrogen conditions. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 1129–1134 (in Chinese with English abstract).
  - [34] 张雪松, 申双和, 宋洁, 周晓冬, 李永秀. 棉花冠层阴阳叶空间分布的日变化及其对光合作用的影响. 大气科学学报, 2010, 33: 180–185.  
Zhang X S, Shen S H, Song J, Zhou X D, Li Y X. Evaluation of daily gross canopy photosynthesis in a cotton field with a two-leaf-multilayer model. *Trans Atmosph Sci*, 2010, 33: 180–185 (in Chinese with English abstract).
  - [35] Chen S G, Shao B Y, Impens I, Ceulemans R. Effects of plant canopy structure on light interception and photosynthesis. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1994, 52: 115–123.
  - [36] 陈新军, 戚存扣, 浦惠明, 张洁夫, 高建芹, 傅寿仲. 甘蓝型油菜抗倒性评价及抗倒性与株型结构的关系. 中国油料作物学报, 2007, 29: 54–57.  
Chen X J, Qi C K, Pu H M, Zhang J F, Gao J Q, Fu S Z.

- Evaluation of lodging resistance in rapeseed (*Brassica napus* L.) and relationship between plant architecture and lodging resistance. *Chin J Oil Crop Sci*, 2007, 29: 54–57 (in Chinese with English abstract).
- [37] 马霓, 李玲, 徐军, 李俊, 余利平, 李光明, 张春雷. 甘蓝型油菜抗倒伏性及农艺性状研究. 作物杂志, 2010, (6): 36–41.  
Ma N, Li L, Xu J, Li J, Yu L P, Li G M, Zhang C L. Researches on the lodging resistance and agronomic traits of winter rape (*Brassica napus* L.). *Crops*, 2010, (6): 36–41 (in Chinese with English abstract).
- [38] 王学芳, 郑磊, 张智, 张耀文, 田建华. 甘蓝型油菜抗倒性及其与株型结构的关系研究. 江西农业学报, 2016, 28(9): 9–13.  
Wang X F, Zheng L, Zhang Z, Zhang Y W, Tian J H. Research on relationship between lodging resistance and plant architecture of *Brassica napus*. *Acta Agric Jiangxi*, 2016, 28(9): 9–13 (in Chinese with English abstract).
- [39] 郭娜. 甘蓝型油菜株型和产量性状评价及全基因组关联分析. 西北农林科技大学硕士学位论文, 陕西杨凌, 2020.  
Guo N. Comprehensive Evaluation and Genome-wide Association Study of Major Plant-type and Yield Traits in *Brassica napus* L. MS Thesis of Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [40] 郭娜, 左凯峰, 张森, 张冰冰, 秦梦凡, 马宁, 刘翔, 李青青, 黄镇, 徐爱遐. 甘蓝型油菜主要株型和产量性状的综合分析. 西北农业学报, 2020, 29: 898–906.  
Guo N, Zuo K F, Zhang M, Zhang B B, Qin M F, Ma N, Liu X, Li Q Q, Huang Z, Xu A X. Comprehensive analysis of major plant-type and yield traits in *Brassica napus* L. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2020, 29: 898–906 (in Chinese with English abstract).
- [41] 王海琦. 减源对密植夏玉米茎秆性状与抗倒伏性能的调控机制研究. 西北农林科技大学硕士学位论文, 陕西杨凌, 2020.  
Wang H Q. Regulation Mechanism of Reduced Source on Quality Characters and Lodging Resistance of Densely Planted Summer Maize Stalks. MS Thesis of Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [42] 王学芳, 田建华, 董育红, 关周博, 杨丽. 不同密度紧凑型油菜的源库特征及与收获指数的相关研究. 中国农学通报, 2020, 36(18): 33–38.  
Wang X F, Tian J H, Dong Y H, Guan Z B, Yang L. Compact rapeseed under different densities: sink-source characteristics and their correlation with harvest index. *Chin Agric Sci Bull*, 2020, 36(18): 33–38 (in Chinese with English abstract).
- [43] Wu W, Duncan R W, Ma B L. Quantification of canola root morphological traits under heat and drought stresses with electrical measurements. *Plant Soil*, 2017, 415: 229–244.
- [44] Wu W, Ma B L, Whalen J K. Enhancing rapeseed tolerance to heat and drought stresses in a changing climate: perspectives for stress adaptation from root system architecture. *Adv Agron*, 2018, 151: 87–157.
- [45] Rolland F, Baena-Gonzalez E, Sheen J. Sugar sensing and signaling in plants: conserved and novel mechanisms. *Annu Rev Plant Biol*, 2006, 57: 675–709.
- [46] Wind J, Smeekens S, Hanson J. Sucrose: metabolite and signaling molecule. *Phytochemistry*, 2010, 71: 1610–1614.
- [47] Kircher S, Schopfer P. Photosynthetic sucrose acts as cotyledon-derived long-distance signal to control root growth during early seedling development in *Arabidopsis*. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 11217–11221.
- [48] 刘胜群, 宋凤斌, 王燕. 玉米根系性状与地上部性状的相关性研究. 吉林农业大学学报, 2007, 29: 1–6.  
Liu S Q, Song F B, Wang Y. Correlations between characters of roots and those of aerial parts of maize varieties. *J Jilin Agric Univ*, 2007, 29: 1–6 (in Chinese with English abstract).