

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04253

种植密度对油菜正反交组合产量与倒伏相关性状的影响

娄洪祥¹ 姬建利¹ 蒯 婕¹ 汪 波¹ 徐 亮² 李 真¹ 刘 芳³
黄 威⁴ 刘暑艳⁵ 尹羽丰⁶ 王 晶^{1,*} 周广生¹

¹ 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; ² 青海省农林科学院, 青海西宁 810016; ³ 全国农技推广中心油料处, 北京 100125; ⁴ 黄冈市农业科学院, 湖北黄冈 438000; ⁵ 荆州农业科学院, 湖北荆州 434000; ⁶ 襄阳市农业科学院, 湖北襄阳 441057

摘 要: 高产抗倒不协调是油菜生产中最主要的矛盾, 严重制约着油菜生产效益的进一步提高。在高密度、机械化生产模式下, 这种矛盾尤为突出。受母系遗传的影响, 杂交油菜的正、反交组合在产量与倒伏相关性状上常表现出明显差异, 但种植密度对不同杂交组合这些关键性状的影响尚不明确。本研究针对浙油 50、华航 901 及其正交(华航 901×浙油 50)与反交(浙油 50×华航 901)组合设置 5 个种植密度, 考察其产量及倒伏相关性状并计算其杂种优势, 研究种植密度对亲本及正、反交组合产量与倒伏相关性状的影响, 为当前高密度直播生产模式下杂交油菜亲本的选配提供依据。结果表明, 随种植密度增加, 亲本及正、反交组合的实际产量和经济系数均呈先增后降的趋势, 且无论正、反交组合, 其实际产量的动态变化规律均与父本更为接近; 倒伏指数在两点随种植密度的变化规律不同, 但无论正、反交组合, 其倒伏指数的动态变化规律均与母本相一致。在西宁试点, 杂交组合产量均具有明显的平均杂种优势, 且正交组合比反交组合具有更大的杂种优势; 正交组合具有一定的抗倒性杂种优势, 但是反交组合无抗倒性杂种优势。综上所述, 高密度直播生产模式下, 杂交油菜亲本选配推荐方案以高产品种为父本, 抗倒性强的品种为母本进行组配, 可以获得高产、抗倒性强且更适宜密植的杂交油菜品种。

关键词: 油菜; 正反交组合; 种植密度; 产量; 倒伏

Effects of planting density on yield and lodging related characters of reciprocal hybrids in *Brassica napus* L.

LOU Hong-Xiang¹, JI Jian-Li¹, KUAI Jie¹, WANG Bo¹, XU Liang², LI Zhen¹, LIU Fang³, HUANG Wei⁴, LIU Shu-Yan⁵, YIN Yu-Feng⁶, WANG Jing^{1,*}, and ZHOU Guang-Sheng¹

¹ 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; ² Qinghai Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Xining 810016, Qinghai, China; ³ National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100125, China; ⁴ Huanggang Academy of Agriculture Science, Huanggang 438000, Hubei, China; ⁵ Jingzhou Academy of Agriculture Science, Jingzhou 434000, Hubei, China; ⁶ Xiangyang Academy of Agriculture Science, Xiangyang 441057, Hubei, China

Abstract: High yield and lodging resistance are two goals in rapeseed production that are hard to reconcile, which restrict severely the further improvement of economic performance. This contradiction is particularly prominent in the high-density and mechanize farming mode. Due to maternal inheritance, there are obvious differences in yield and lodging resistance related traits among reciprocal hybrids, but the effects of planting density on these key traits are not clear. Here, Huahang 901 and Zheyou 50, which are conventional rapeseed varieties and their reciprocal hybrids, were planted with gradient density. The yield and lodging related traits were measured and the heterosis of each trait was calculated. In order to provide the basis for the selection of parents under the high-density and direct seeding farming mode, the effects of planting density on yield and lodging related traits of

本研究由国家重点研发计划项目“大田经济作物优质丰产的生理基础与调控”(2018YFD1000900)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China “Physiological Basis and Agronomic Management for High-quality and High-yield of Field Cash Crops” (2018YFD1000900).

* 通信作者(Corresponding author): 王晶, E-mail: wangjing@mail.hzau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: davidlou@webmail.hzau.edu.cn

Received (收稿日期): 2020-11-23; Accepted (接受日期): 2021-01-21; Published online (网络出版日期): 2021-02-19.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20210219.1616.013.html>

parents and reciprocal hybrids were investigated. The results showed that the actual yield and economic coefficient of two parents and their reciprocal hybrids were first increased and then decreased with the increase of the planting density. Interesting, the dynamic change pattern and the values of both traits of reciprocal hybrids under gradient density were well consistent with those of paternal parent. The variation of lodging index with increased density at two sites was different, but the values and the dynamic change patterns of reciprocal hybrids were consistent with that of the maternal parent. In 2017 in Xining, the actual yield of reciprocal hybrids had obvious heterosis and Huahang 901×Zheyu 50 showed higher heterosis than that of Zheyu 50×Huahang 901. Meanwhile, the Huahang 901×Zheyu 50 had greater heterosis of lodging resistances, but there was no such heterosis in Zheyu 50×Huahang 901. In conclusion, to obtain hybrids rapeseed varieties with high yield lodging resistance and dense planting under the high-density and direct seeding farming mode, it was better to select those varieties with high-yield as paternal parents and those varieties with strong lodging resistance as maternal parents.

Keywords: rapeseed; reciprocal hybrids; planting density; yield; lodging

油菜(*Brassica napus* L., AACC, $2n=38$)是世界四大油料作物之一, 广泛种植于加拿大、中国、印度、澳大利亚和法国等国家, 近10年来全球种植面积已超过3500万公顷^[1]。我国是世界上第二大油菜生产国, 仅次于加拿大, 常年种植面积超过650万公顷, 约占全球油菜种植面积的20%^[2]。油菜是我国食用植物油市场的第一大油源, 常年供应的菜籽油占国产植物油的47%左右^[3]。近年来, 虽然在新品种选育、生产和加工等方面稳步发展, 但与其他大田作物一样, 油菜产业同样面临着产量低、种植密度低、机械化程度较低、肥料施用高和人工成本较高的“三低两高”等瓶颈问题, 导致其增长乏力^[4-5]。众所周知, 自第一次“绿色革命”至今, 世界三大粮食作物——水稻、玉米和小麦的株型不断矮化且种植密度不断提高, 密植已成为提高作物产量的重要栽培措施之一^[6-11]。自20世纪90年代至今, 育种家们也在不断寻找油菜矮秆突变体并鉴定了一些控制油菜矮秆的基因位点, 为油菜“矮化革命”奠定基础^[12]。另一方面, 栽培学家们不断优化油菜种植密度和其他措施以协调油菜密植、高产与抗倒之间的矛盾^[13-14]。研究表明, 在我国长江流域地区合理密植可以改变油菜的个体-群体关系, 平衡个体发育与群体竞争, 提高油菜光能利用率, 从而提高产量并保持抗倒特性^[15-16]。高密度种植可能是未来油菜高产栽培的常规措施, 也是目前油菜栽培研究的热点^[17-18], 但是大幅增加种植密度后, 油菜倒伏风险显著增加, 因此培育并筛选高产、抗倒且耐密的油菜品种迫在眉睫^[19-20]。

由于杂种优势的存在, 作物杂交品种较常规品种通常具有高产、稳产、抗逆等特性^[21]。油菜具有很强的杂种优势, 目前我国油菜生产上主要使用的品种为杂交品种, 占油菜种植总面积的70%以上, 且推广面积逐年增加, 并逐渐延伸至饲用油菜和生物能源油菜等领域^[22-24]。杂交油菜品种不论在籽粒

大小和粒重等产量性状方面, 还是在株高和分枝数等株型性状上均表现出较强的杂种优势^[12,25]。值得注意的是, 作物的杂种优势也受种植密度的影响, 不同种植密度下杂种优势潜力存在显著差异^[26-28]。另外, 在杂交品种选育过程中, 选择配合力强的亲本非常重要, 同时在不同栽培措施下正、反交组合之间的产量与倒伏相关性状差异研究不容忽视^[29-31]。已有研究表明, 正、反交组合在植物光合作用和内源激素调控上存在一定差异, 从而影响了正、反交组合杂交油菜的产量与品质^[32-33]; 在一定程度上, 油菜的籽粒大小和籽粒重量等产量性状和含油量均存在母系遗传特征^[25,34-36]。因此, 在油菜育种工作中应充分考虑各性状的遗传规律, 选配适宜的父母本材料以获得高产、高油且抗倒的优质油菜杂交品种。例如, 在配制油菜的高光效杂交组合时应尽量选用高值亲本做母本, 利用杂种优势来提高杂种 F_1 代的光合相关性状^[32]。

综上, 前人关于种植密度对于正、反交油菜组合产量和倒伏相关性状的相关研究较少。本研究通过分析不同种植密度下油菜正、反交组合的产量和倒伏相关性状的变化趋势及其杂种优势, 研究油菜高产、抗倒、耐密植理论和杂交油菜父母本选配规律以适应机械化生产, 旨在为油菜杂交种亲本选配以及杂种优势利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验分别于2016—2017年在湖北武汉及2017年在青海西宁2个试验点进行, 以2个常规油菜品种浙油50和华航901及其正反交后代为研究对象。浙油50为高产、高含油量品种, 华航901为抗倒性较强的品种。以华航901×浙油50为正交组合, 浙油50×华航901为反交组合, 通过人工去雄、授粉获得 F_1 代杂交种。2016—2017年武汉试验点播期为2016

年 9 月 29 日, 收获期为 2017 年 5 月 1 日。2017 年西宁试验点的播期为 2017 年 4 月 5 日, 收获期为 2017 年 8 月 10 日。

1.2 试验设计

采用完全随机区组试验设计, 2 个油菜亲本及其正反交 F_1 杂种均设置了 5 个不同的种植密度, 分别为 15 万株 hm^{-2} (D1)、30 万株 hm^{-2} (D2)、45 万株 hm^{-2} (D3)、60 万株 hm^{-2} (D4)、75 万株 hm^{-2} (D5), 各处理均设 3 个重复, 每个重复厢宽 2 m, 沟宽 0.2 m, 行距 0.25 m, 小区面积 20 m^2 。2016—2017 年武汉试验点的原始土壤含全氮 0.9 g kg^{-1} 、碱解氮 24.27 mg kg^{-1} 、速效磷 14.08 mg kg^{-1} 、速效钾 127.96 mg kg^{-1} 、有机质 15.77 g kg^{-1} ; 2017 年西宁试验点的原始土壤含全氮 2.23 g kg^{-1} 、碱解氮 41.34 mg kg^{-1} 、速效磷 170.25 mg kg^{-1} 、速效钾 374.51 mg kg^{-1} 、有机质 36.71 g kg^{-1} 。各个小区施肥用量一致, 整地时施用 750 kg hm^{-2} 复合肥(N P_2O_5 K_2O =15% 15% 15%)和 7.5 kg hm^{-2} 硼肥作基肥, 苗期施用 225 kg hm^{-2} 尿素(含氮量为 46%)作苗肥, 薹期施用 150 kg hm^{-2} 尿素作薹肥。出苗后间苗, 在四至五叶期根据种植密度定苗。两点试验其他田间管理均同常规。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 产量与产量构成因子 在油菜角果成熟期, 每小区连续取样 10 株, 考察单株角果数、每角果粒数、千粒重和单株产量, 以小区实收记实际产量。

经济系数(harvest index, %) = 实际籽粒产量(g)/实际生物量(g)×100。此处实际籽粒产量为各小区实际收获油菜籽粒产量, 实际生物量为各小区实际收获总生物量。

1.3.2 倒伏相关指标 在油菜角果成熟期, 每小区连续取样 10 株, 考察株高、有效分枝高度、根颈粗和地上部鲜重和根鲜重等基本性状, 去除缩颈段后, 将有效分枝以下平均分成 4 段(从基部往上依次标注为 1、2、3 和 4 段), 采用 YYD-1 茎秆强度测定仪(浙江杭州托普仪器有限公司)测定其抗折力。

倒伏指数(lodging index, cm g g^{-1}) = 高度(cm)×地上部鲜重(g)/抗折力(g)。此处高度与地上部鲜重为对应茎段至植株顶端的高度与鲜重, 抗折力为该段中部 10 cm 处抗折力。

1.3.3 杂种优势指数 杂种优势(heterosis)是指油菜杂种第 1 代(F_1) 在株型、产量及抗倒性方面均比亲本优越的现象。以上产量与倒伏相关性状均可计

算其杂种优势。

油菜杂种优势相关指标计算公式: 杂种优势指数(heterosis index, %) = $F_1/\text{MP} \times 100$, $\text{MP} = (\text{P}_1 + \text{P}_2)/2$ 。式中, F_1 为杂交种, P_1 、 P_2 分别为父本和母本, MP 为亲本平均值。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2018 记录与整理数据, 利用 IBM SPSS 25.0 进行数据统计分析, 使用 Origin 2018 进行数据可视化和绘图。采用 LSD 法(Least Significant Difference, 最小显著性差异法)进行 F 检验来比较处理间差异显著性, 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 种植密度对产量性状的影响

2.1.1 产量与产量构成因子 在两点试验中, 随种植密度的增加, 单株角果数和每角果粒数均呈下降趋势, 但下降幅度变化由快向缓, 且各品种变化趋势一致。在武汉试点, 同一密度下正交组合(华航 901×浙油 50)的单株角果数最多, 显著多于反交组合(浙油 50×华航 901) ($P < 0.05$) (图 1-A, B); 在西宁试点, 正交组合的平均每角果粒数显著多于反交组合($P < 0.05$) (图 1-C, D)。另外, 千粒重在两点试验中随密度变化规律不明显(图 1-E, F)。正、反交组合及其父、母本的实际产量随种植密度增加均呈现先上升后下降的趋势, 但是不同材料最高产量对应的种植密度存在差异。武汉试点条件下, 浙油 50、华航 901 及正交组合的最大实际产量均出现在 D3 密度下, 分别为 3082.7、2717.9 和 3182.3 kg hm^{-2} , 而反交组合则出现在 D4 密度下, 为 3055.2 kg hm^{-2} 。西宁试点条件下, 浙油 50 及正交组合最大实际产量均出现在 D3 密度处, 分别达到 4138.6 kg hm^{-2} 和 4573.7 kg hm^{-2} , 而华航 901 及反交组合最大实际产量均出现在 D4 密度下, 分别为 3963.1 kg hm^{-2} 和 4422.8 kg hm^{-2} 。无论正、反交, 杂交组合实际产量随密度变化的趋势均与父本相一致, 尽管在武汉试点反交组合规律不如正交组合明显(图 2-A, B)。

随种植密度增加, 生物产量与经济系数均呈先增加后降低的趋势, 且各品种两点试验变化趋势一致(图 2-C~F)。以武汉试点为例, 正交组合的经济系数在 D3 密度时最高(28.07%); 而反交组合在 D4 密度时达到最大值(24.75%)。另外, 从正、反交组合及其父、母本的比较分析可知, 在实际产量和生物产量方面, 正交组合与其父本浙油 50 的具体数值及动

态变化规律一致; 而在西宁试点反交组合也与其父本华航 901 的变化规律更为接近。在经济系数方面, 两点试验中正交组合和其母本华航 901 的各密度下平均经济系数分别高于反交组合和其母本浙油 50。

在各密度下, 虽然浙油 50 的平均生物量和平均实产均大于华航 901, 但浙油 50 的生物量与华航 901 相对增幅比大于实产的相对增幅比, 所以华航 901 的平均经济系数大于浙油 50。正、反交组合规律亦是

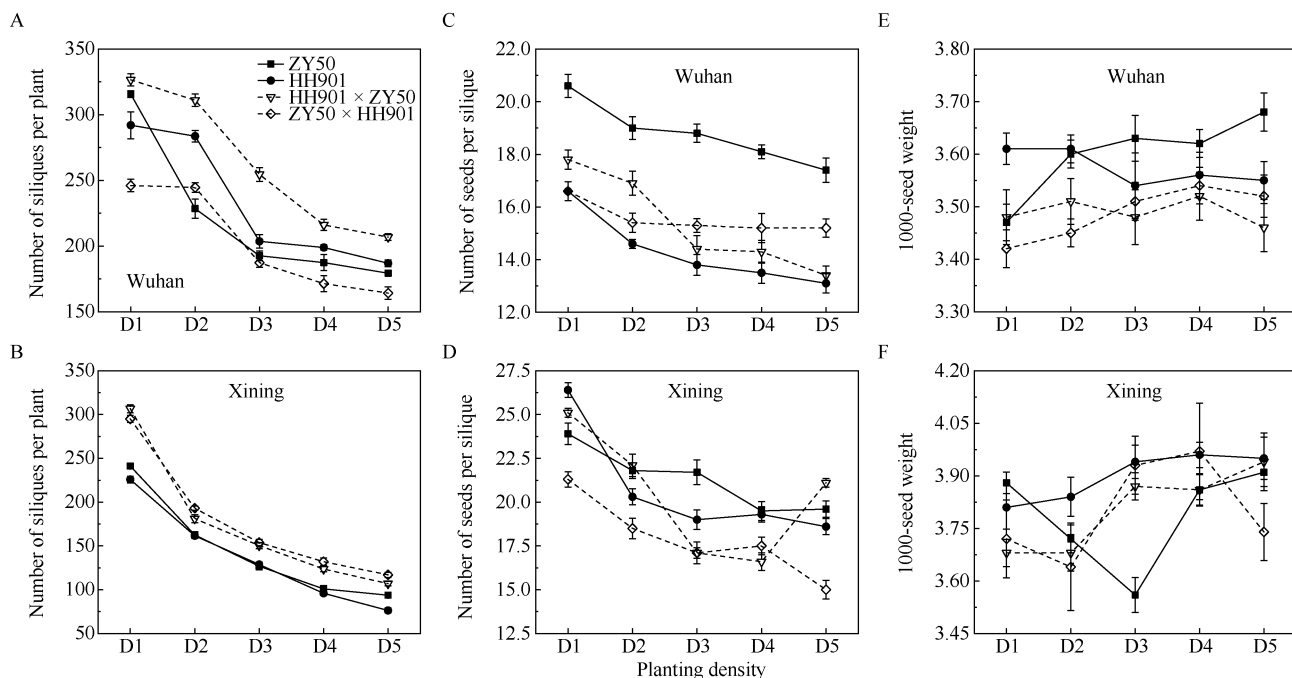


图 1 种植密度对油菜产量构成因子的影响(2017)

Fig. 1 Effects of planting densities on yield components in rapeseed in 2017

D1、D2、D3、D4 和 D5 分别表示种植密度为 1.5×10^5 、 3.0×10^5 、 4.5×10^5 、 6.0×10^5 和 7.5×10^5 株 hm^{-2} 。ZY50、HH901、HH901×ZY50 和 ZY50×HH901 分别代表浙油 50、华航 901、华航 901×浙油 50 和浙油 50×华航 901。D1, D2, D3, D4, and D5 indicate the planting densities of 1.5×10^5 , 3.0×10^5 , 4.5×10^5 , 6.0×10^5 , and 7.5×10^5 plants hm^{-2} , respectively. Zheyou 50, Huahang 901, Huahang 901×Zheyou 50, and Zheyou 50×Huahang 901 are two parents and their reciprocal hybrids, respectively.

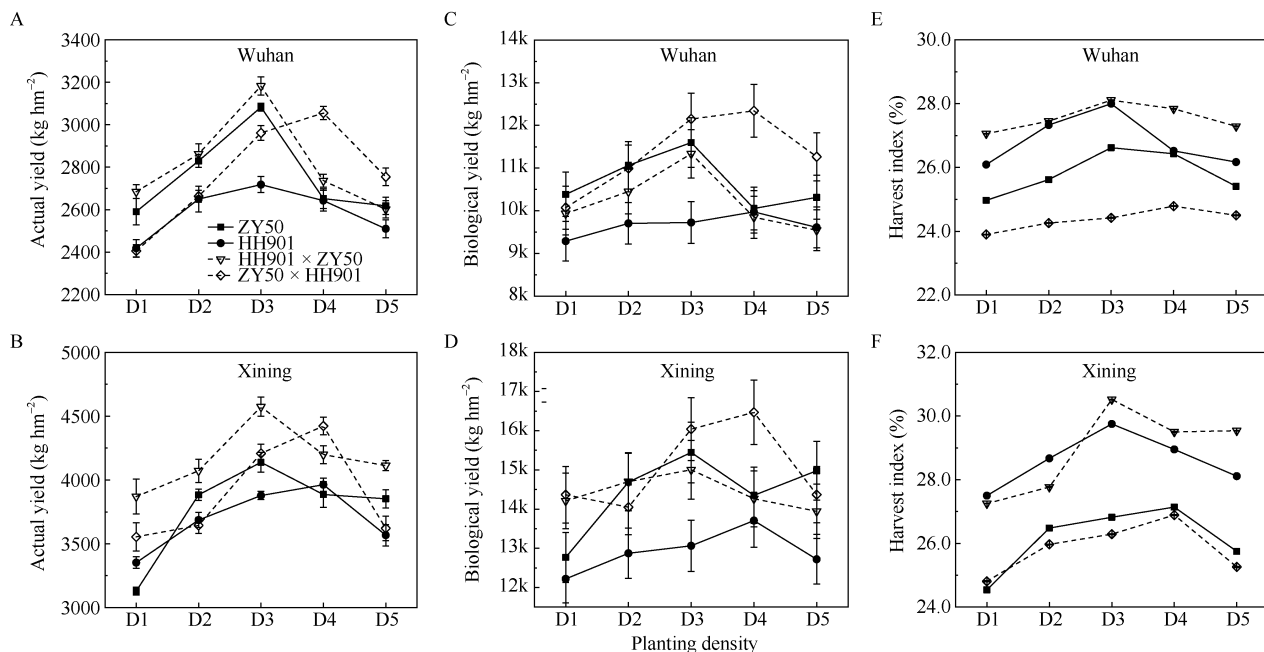


图 2 种植密度对油菜产量相关性状的影响(2017)

Fig. 2 Effects of planting densities on yield related traits in rapeseed in 2017

缩写和处理同图 1。Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 1.

如此, 所以正交组合的平均经济系数大于反交组合(图 2-E, F)。方差分析表明, 除单株角果数受品种与密度互作影响不显著外($P>0.05$), 年份(点)、品种和密度对产量及产量构成因子的影响均达极显著水平($P<0.01$), 且它们的互作影响也达显著水平($P<0.05$) (附表 1)。

2.1.2 正、反交组合产量性状的杂种优势 分析发现, 千粒重与每角果粒数在正反交组合中均没有表现出明显的杂种优势现象(数据略)。在武汉试点, 正交组合(华航 901×浙油 50)单株角果数的杂种优势指数显著高于反交组合(浙油 50×华航 901) ($P<0.05$), 正交组合的平均杂种优势指数达到 116.8%, 而反交组合(90.2%)低于 100%, 无杂种优势。另外, 在 D3

密度下正交组合的杂种优势指数达到最高(128.5%) (图 3-A)。正交组合单株角果数表现出更强的杂种优势可能与其与母本华航 901 在不同密度条件下相比父本具有更多的单株角果数有关, 因为从具体数值与动态变化规律上看, 在 D1 密度下尽管浙油 50 比华航 901 有更多的单株角果数, 但随密度增加而急剧下降, 在 D2 及更高密度下, 华航 901 在武汉试点则具有更多的单株角果数, 在西宁试点也与浙油 50 相当(图 1-A, B)。在西宁试点, 正、反交组合均表现出较强的杂种优势, 且在低密度下正交组合杂种优势高于反交组合, 而在高密度下反交组合杂种优势高于正交组合(图 3-B)。

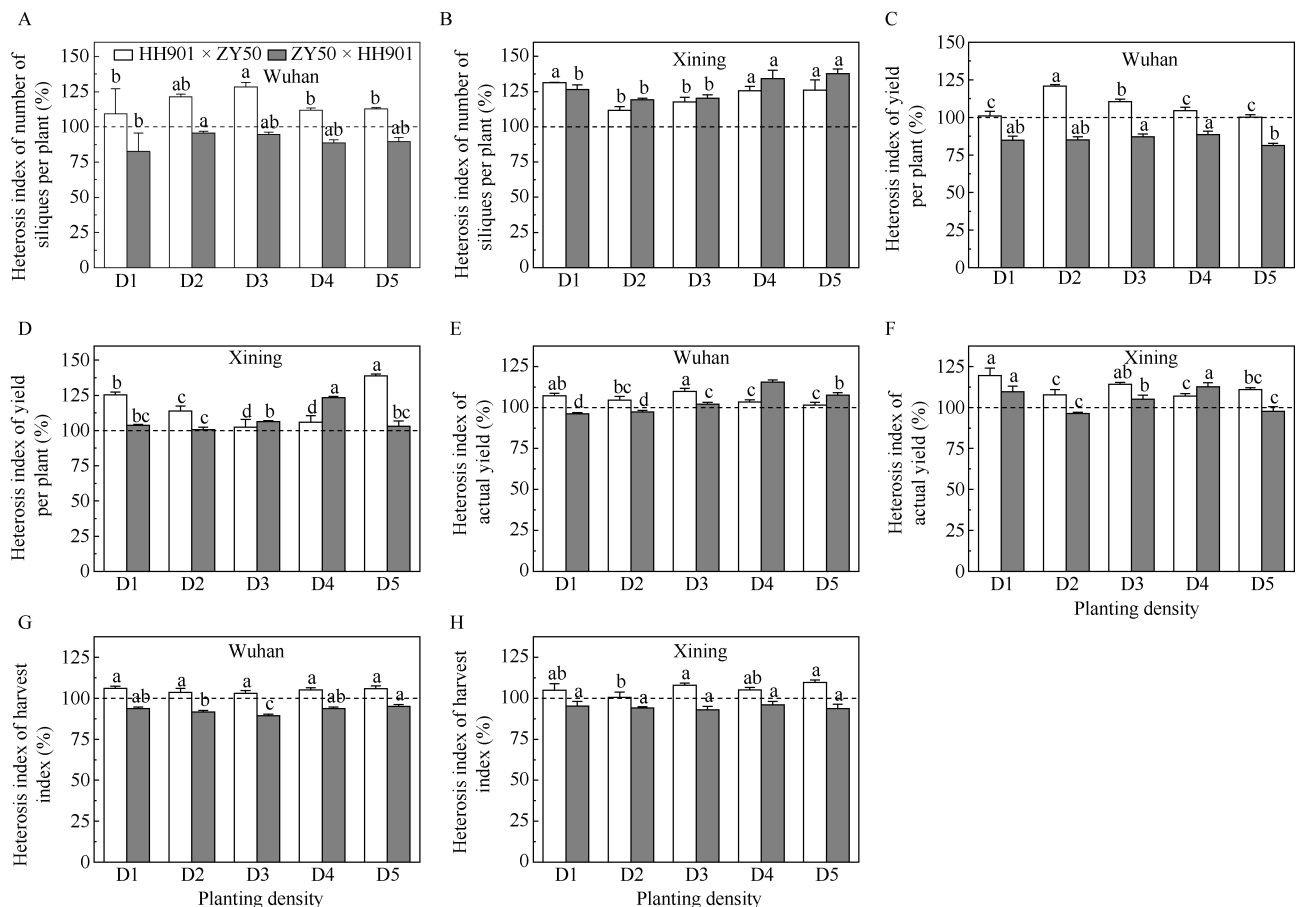


图 3 种植密度对正、反交组合产量杂种优势指数的影响(2017)

Fig. 3 Effects of planting densities on yield heterosis index of reciprocal hybrids in 2017

缩写和处理同图 1。不同小写字母表示相同品种密度间差异达显著水平($P < 0.05$)。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 1. Values followed by different lowercase letters are significantly different among different densities in the same variety at $P < 0.05$.

在单株产量方面, 正交组合的平均杂种优势指数显著高于反交组合($P<0.05$)。以武汉试点为例, 正交组合的平均杂种优势指数达到 107.3%, 而反交组合为 85.3%, 无杂种优势。另外, 在 D2 密度下, 正

交组合单株产量的杂种优势指数达到最高(120.8%)。与此同时, 在两点试验中, 正交组合在 D1、D2 密度时表现出较高的杂种优势, 而反交组合在 D4 密度时最高。但是, 在武汉试点时反交组合并

无明显的单株产量杂种优势, 仅在西宁试点时 D3、D4 密度下表现出一定的杂种优势(图 3-C、D)。在实际产量方面, 正交组合的平均杂种优势指数显著高于反交组合($P<0.05$)。以西宁试点为例, 正交组合的平均杂种优势指数达到 111.8%, 而反交组合为 99.4%, 无杂种优势。另外, 在武汉试点正交组合的实际产量杂种优势指数随密度的增加呈先上升后下降的趋势, 在 D3 密度时最高, 而在两试验点中反交组合最高杂种优势指数均处于 D4 密度下(图 3-E、F)。

在两点试验中, 正交组合经济系数的杂种优势指数显著高于反交组合($P<0.05$)。正交组合各密度下的平均杂种优势指数分别达到 104.7.7% (武汉试点) 和 105.7% (西宁试点), 而反交组合分别为 92.7% 和 94.4%, 无杂种优势。与其他产量性状相比, 两亲本在经济系数方面展现出较高的稳定性, 但是正交组合具有较强的杂种优势, 而反交组合经济系数显著低于正交组合($P<0.05$), 也低于中亲值, 无杂种优势。反交组合的经济系数比正交组合低, 可能由其生物产量大、籽粒产量低所致(图 3-G、H)。

2.2 种植密度对倒伏相关性状的影响

2.2.1 主要农艺性状

随种植密度增加, 株高、根颈粗、地上部鲜重和根鲜重均呈减小趋势, 在 D5 密度时达到最小值, 各品种两点试验变化趋势一致(图 4-A、B, E~J); 有效分枝高度随密度的增加而先增后降, 各品种两点试验变化趋势一致(图 4-C、D)。比较发现, 在同一密度下正交组合(华航 901×浙油 50)的根颈粗和根鲜重在两品种中最大, 而华航 901 的株高和地上部生物量低于浙油 50。正交组合的株高略低于反交组合(浙油 50×华航 901), 而其地上部鲜重在 D1、D2 密度下高于反交组合, 随密度增加至 D3 以上时逐渐低于反交组合(图 4-A~J)。方差分析表明, 两点试验的品种和密度对油菜成熟期各农艺性状的影响均达极显著水平($P<0.01$), 且它们的交互影响也达极显著水平(附表 2 和附表 3)。

2.2.2 倒伏相关性状

茎秆抗折力随种植密度的增加呈下降趋势, 在 D5 密度时达到最小值, 各品种两点变化规律一致。比较发现, 在同一密度下浙油 50 平均抗折力大于华航 901, 而反交组合(浙油 50×华航 901)大于正交组合(华航 901×浙油 50), 只有在

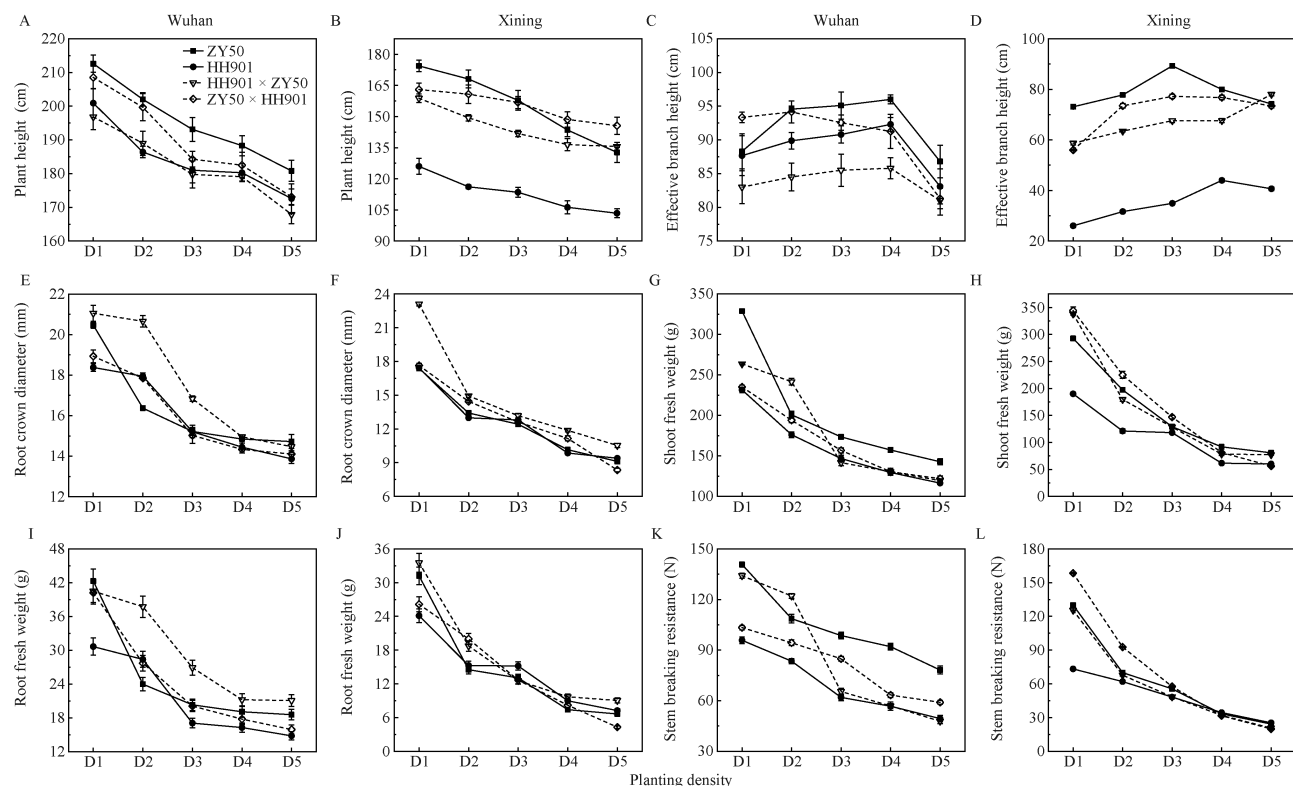


图4 种植密度对油菜成熟期主要农艺性状的影响(2017)

Fig. 4 Effects of planting densities on main agronomic traits at maturity stage in rapeseed in 2017
缩写和处理同图1。Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 1.

武汉试点时正交组合在 D1、D2 密度下大于反交组合(图 4-K, L)。由图 5-A 和 B 可知, 两点试验的平均倒伏指数随密度的变化规律不同。在武汉试点, 随密度的增加各品种倒伏指数呈下降趋势; 在西宁试点, 随密度增加各品种倒伏指数呈先降后增, 在 D5 密度时倒伏指数达最大。比较分析发现, 父、母本及正、反交组合在两点试验中表现出不同规律。在武汉试点, 倒伏指数表现出华航 901>正交组合>浙油 50>反交组合的特点, 而在西宁试点则表现出华航 901<正交组合<浙油 50<反交组合的趋势。可以看出, 正交组合倒伏指数在武汉与其母本华航 901 相近, 且远高于其父本浙油 50 与反交组合, 抗倒性较差。相反, 在西宁试点, 华航 901 与正交组合的倒伏指数则远低于浙油 50 与反交组合, 表现出较好的抗倒性。综合两点试验, 杂种组合的倒伏指数随密度的变规律与母本相一致(图 5-A, B)。方差分析表明, 年份(点)、品种和密度对油菜各段倒伏指数的影响均达极显著水平($P<0.01$), 且它们的两两互作与三者互作影响也达极显著水平(附表 4)。

茎秆节间最大倒伏指数可以衡量油菜在各密度下的倒伏风险。两点试验的最大倒伏指数表现出不同的规律, 但同样地, 无论正交还是反交组合均与母本相一致(图 5-C, D)。通过分析有效分枝以下 4

段的平均倒伏指数可知, 从第 1 段至第 4 段倒伏指数呈先上升后下降的趋势, 两点试验一致。例如在西宁试点时, 父、母本及杂交组合在 D4、D5 高密度种植时, 第 2~3 段比第 1、4 段的倒伏指数更大。因此, 油菜茎秆中段为易倒伏部位, 存在倒伏风险较高(图 5-E, F)。

2.2.3 正、反交组合倒伏相关性状的杂种优势

油菜倒伏数越高越易倒伏, 因此当倒伏指数的杂种优势指数低于 100% 时, 说明杂交组合的平均倒伏指数低于中亲值, 在抗倒性上具有杂种优势。随种植密度增加, 父、母本及杂交组合地上部鲜重与抗折力的杂种优势指数呈降低趋势, 各品种两点试验变化趋势一致(图 6-A~D)。而倒伏指数的杂种优势指数随密度变化规律不明显。在武汉试点, 正交组合高于反交组合 13.0%; 而在西宁试点, 反交组合高于正交组合 36.8%。因此, 在武汉试点, 反交组合相较于正交组合拥有更好的抗倒性; 而在西宁试点, 正交组合则拥有较好的抗倒性(图 6-E, F)。通过分析 4 段倒伏性状的杂种优势指数可知, 在同一密度下从第 1 段至第 4 段抗折力杂种优势指数呈上升趋势, 两点试验一致。另外, 在西宁试点时第 1 段至第 4 段倒伏指数杂种优势指数呈下降趋势, 而在武汉试点其变化趋势不明显(附表 5)。

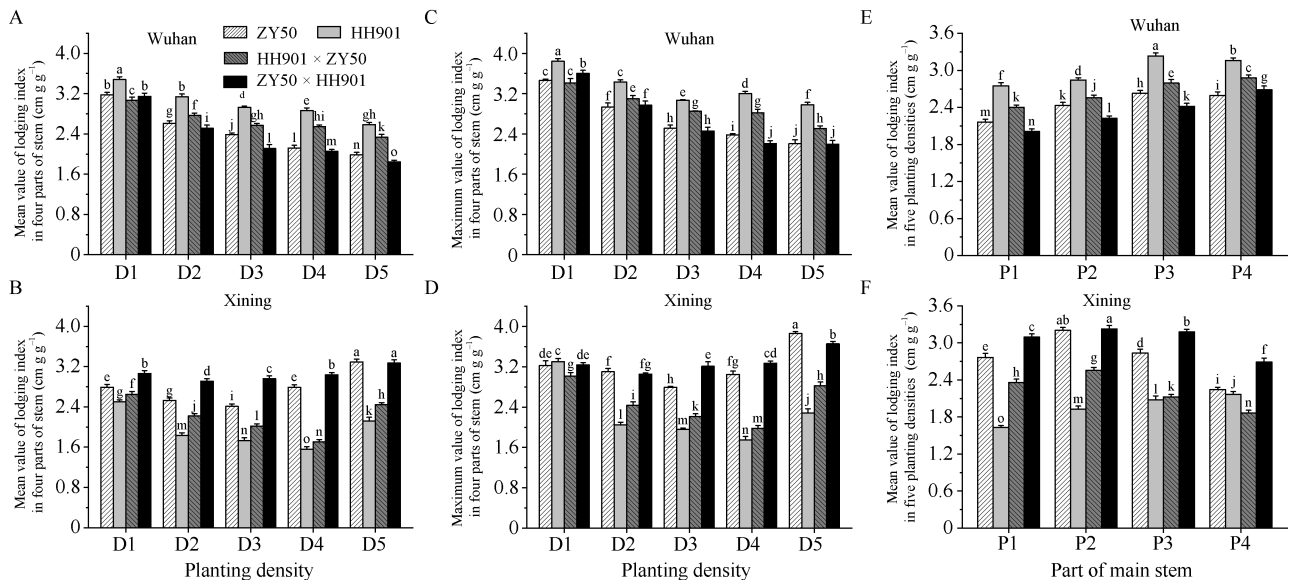


图 5 种植密度对油菜茎秆倒伏指数的影响(2017)

Fig. 5 Effects of planting densities on lodging index of stem in rapeseed in 2017

P1、P2、P3 和 P4 分别表示除去缩颈段后将主茎平均分为 4 段, 从地面往上第 1、2、3、4 段。图中不同字母表示各处理差异达显著水平($P<0.05$)。其他缩写和处理同图 1。

P1, P2, P3, and P4 indicate the first, second, third and fourth part from bottom to the top of the main stem. Values followed by different letters are significantly different among different treatments at $P<0.05$. Other abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 1.

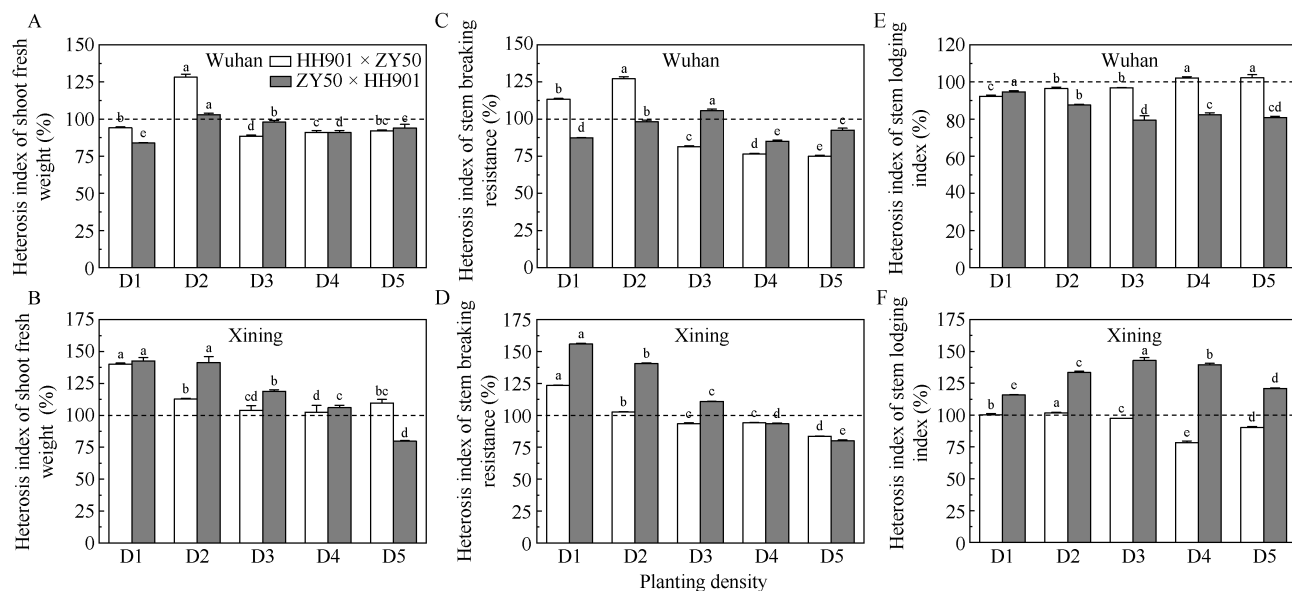


图 6 种植密度对正、反交组合倒伏相关杂种优势指数的影响(2017)

Fig. 6 Effects of planting densities on lodging heterosis index of reciprocal combinations in 2017

缩写和处理同图 1。不同小写字母表示相同品种密度间差异达显著水平($P < 0.05$)。

Abbreviations and treatments are the same as those given in Fig. 1. Values followed by different letters are significantly different among different densities in the same variety at $P < 0.05$.

2.3 双亲及正反杂交后代最佳种植密度的拟合分析

在两点试验中, 采用多项式曲线拟合分析各品种实际产量与密度之间的联系, 获得了各品种最高产量下的合理密度范围。通过拟合分析得出, 浙油 50 与华航 901 获得高产的合理密度范围分别为 44.0~52.3 万株 hm^{-2} 与 47.1~49.7 万株 hm^{-2} , 而正交组合(华航 901×浙油 50)与反交组合(浙油 50×华航 901)的高产密度范围则分别为 42.8~49.4 万株 hm^{-2} 与 49.5~53.7 万株 hm^{-2} , 预测在西宁试点正、反交组合在最适密度下获得的最高产量, 分别为 4381.7 kg hm^{-2} 和 4208.1 kg hm^{-2} 。在合理种植密度范围近似的情况下, 杂交油菜具有更高的产量, 所以杂交组合后代比双亲更耐密植(图 7-A, B)。在倒伏相关性状方面, 两点间变化规律不同, 在武汉试点时倒伏指数随密度增加而显著降低($P < 0.05$), 而在西宁试点则呈现出先增后降的趋势。拟合分析发现, 由于各品种两点的倒伏指数差异较大, 所以以西宁试点(正交组合与母本华航 901 倒伏指数较低)为标准。分析结果表明, 正交组合与反交组合最小倒伏指数的合理密度分别为 49.9 万株 hm^{-2} 与 32.3 万株 hm^{-2} , 倒伏指数分别为 1.86 cm g g^{-1} 和 2.97 cm g g^{-1} , 而浙油 50 与华航 901 分别为 41.2 万株 hm^{-2} 与 47.0 万株 hm^{-2} , 倒伏指数分别为 2.38 cm g g^{-1} 和 1.69 cm g g^{-1}

(图 7-C, D)。说明, 浙油 50、华航 901 和正交组合(华航 901×浙油 50)可以通过优化密度良好地协调产量与倒伏的矛盾, 合理密度范围分别为 41.2~52.3 万株 hm^{-2} 、47.0~49.7 万株 hm^{-2} 和 42.8~49.9 万株 hm^{-2} 。然而, 反交组合在抗倒伏和产量的合理密度范围差异极大, 并不能很好地通过优化种植密度来缓解高产与抗倒之间的矛盾。

3 讨论

3.1 合理密植协调油菜高产与抗倒性

种植密度是一种重要的栽培措施, 影响着油菜全生育时期的群体结构与光能利用效率, 通过改变油菜的源库流平衡最终影响籽粒产量^[37]。种植密度影响油菜各农艺性状的表现, 包括株高、分枝高度和分枝角度等株型性状, 单株角果数、每角果粒数和籽粒重等产量构成因子, 还包括茎粗、茎秆抗折力等倒伏相关性状。在单株产量随密度增加而降低的情况下, 群体产量的变化规律显得尤为重要, 也可作为衡量一个油菜品种是否适宜密植的关键指标。优化油菜种植密度可以适当地调节个体生长与群体竞争之间的矛盾, 从而优化高产与抗倒之间的矛盾^[15]。然而, 前人研究多集中于常规品种或生产上推广的杂交品种, 关于种植密度协调正、反交组合的高产与抗倒的研究鲜有报道。

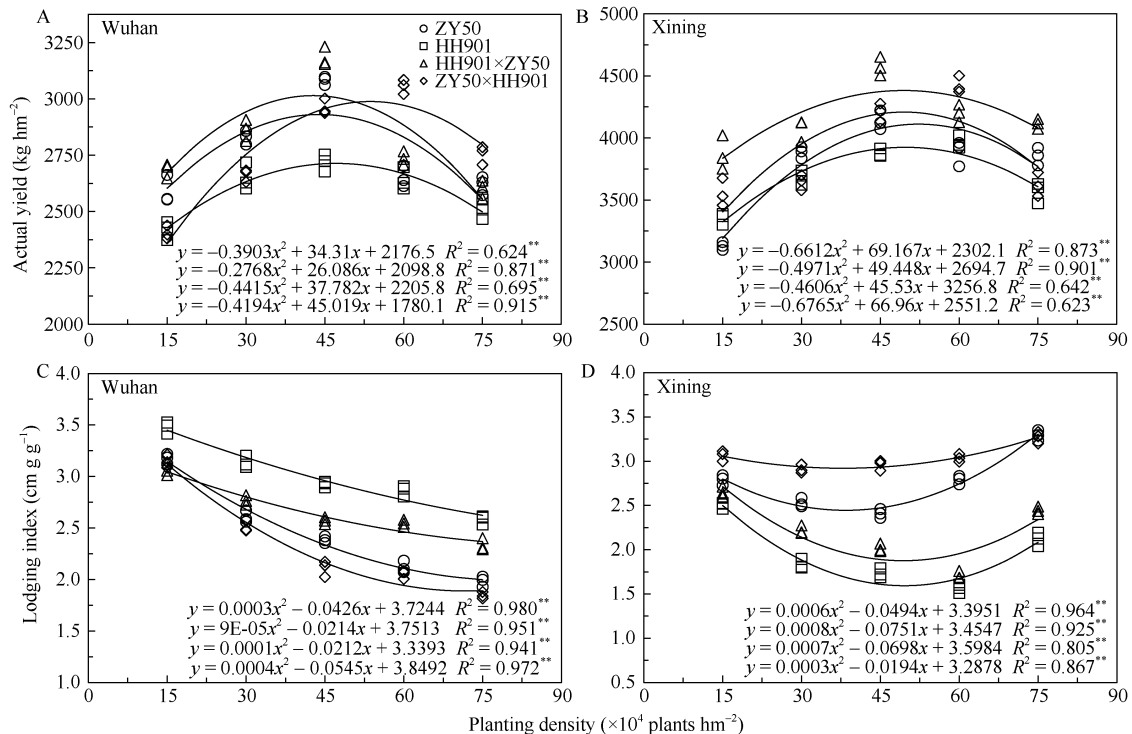


图 7 种植密度与实际产量和倒伏指数的拟合曲线(2017)

Fig. 7 Fitting curve of planting density with actual yield and lodging index in 2017

缩写同图 1. **表示 1% 显著水平。

Abbreviations are the same as those given in Fig. 1. ** Significant at the 1% probability level.

在本研究中, 随种植密度增加, 单株角果数、每角果粒数与单株产量逐渐降低, 而千粒重变化规律不明显。虽然单株产量随密度增加而显著降低, 但是实际产量随密度增加则表现出先增加后降低的趋势。综合分析实产和密度之间的关系发现, 各品种获得高产的合理密度范围多集中在 40~50 万株 hm^{-2} 之间, 而杂交油菜较亲本具有更高的产量。因此, 我们推测本研究中正、反交组合比双亲具有更好的耐密性, 在合理密植条件下正交组合(华航 901×浙油 50)优于反交组合(浙油 50×华航 901)的产量表现。在抗倒性方面, 随密度的增加在西宁试点各品种的倒伏指数表现出先下降后上升的趋势, 而在武汉试点呈降低趋势, 在高密度下降幅变缓。倒伏指数受环境因素影响较大, 所以两点试验具体数值和变化规律差异较大。正交组合(华航 901×浙油 50)的最小倒伏指数的合理密度在其高产密度范围附近, 可通过合理密植获得高产与抗倒的平衡。然而, 反交组合(浙油 50×华航 901)在抗倒和高产的合理密度范围差异较大, 并不能通过优化种植密度来缓解高产与抗倒之间的矛盾。

3.2 正、反交油菜的杂种优势表现

在油菜杂交选育过程中, 性状多数受基因组中

核基因的控制, 目标性状遗传差异较大的亲本配对通常会获得杂种优势。前人研究发现, 无论正反交, 杂交油菜籽粒的千粒重和大小均表现出显著的超亲优势, 在杂交育种中可通过合理养分分配来提高粒重达到增产效果^[38]。在本研究中, 我们以杂种优势指数作为衡量杂种优势的重要指标, 考察了包括产量和倒伏相关等多个油菜重要生产性状, 全面对比了浙油 50 与华航 901 两亲本和正、反交组合后代的杂种优势表现。在产量方面, 正交组合(华航 901×浙油 50)的单株产量与实际产量均表现出优于中亲值的杂种优势, 而反交组合(浙油 50×华航 901)平均杂种优势指数低于 100%, 无杂种优势。另外, 在两点试验中, 正交组合的经济系数杂种优势显著高于反交组合, 且反交组合无杂种优势, 且各密度水平下规律一致。由此可知, 正交组合相较于反交组合表现出更为优秀的产量杂种优势。在抗倒伏方面, 可能由于生长环境的差异, 试验各品种油菜倒伏指数在年际间产生较大差异, 从而正、反交组合倒伏指数杂种优势大小也在两点间各不相同。在武汉试点, 正、反交组合皆表现出杂种优势, 且反交组合更高; 而在西宁试点, 正交组合拥有较高的杂种优势, 而反交组合并不保持杂种优势。

3.3 杂交油菜的遗传效应与亲本选配

前人研究表明, 粒重受油菜母本基因型的控制, 可能的原因是在角果发育时期, 角果作为源在光合作用和干物质转运方面发挥着重要作用, 向作为库的种子运输有机质^[25]。近年来, 研究人员也发现含油量具有母体遗传特征, 这与角果皮的光合作用及细胞质效应紧密相关^[34,36]。本研究中, 在产量构成因子方面, 父、母本及正、反交组合的单株角果数与每角果粒数均随密度增加而显著降低, 且无论正反交, 杂种后代均与母本更为接近, 反映出一定的母体效应; 而千粒重的变化缺乏规律; 相应地, 单株产量随密度增加而降低。然而, 在两点试验中实际产量则随密度增加呈现出先增后降的趋势, 且不论正反交, 其变化规律均与父本相一致, 这显然不符合母体遗传的特征, 反映出实际产量随种植密度变化的复杂性, 具体原因尚需要进一步研究。王瑞等^[39]的研究也表明, 甘蓝型黄籽油菜产量性状的遗传主要由加性效应和显性效应共同控制, 母体效应影响较小。但是在抗倒性方面, 尽管不同试验点间规律存在差异, 但是不论正反交, 其倒伏指数动态变化规律均与母本相一致(图 5-A~D)。因此, 我们认为在油菜生产中可以选含油量高、抗倒品种作为母本, 高产品种作父本选配杂交组合, 以选育并获得高产、抗倒且耐密的优质杂交油菜品种。当然, 我们也注意到, 由于研究材料或者考察指标的不同, 倒伏性状的遗传规律可能不同。例如, 以单株抗压力反映的倒伏性状的遗传分析表明, 不同组合正反交 F_1 差异不显著, 未见明显的细胞质效应^[40]。

4 结论

在本试验中, 浙油 50、华航 901 和其正、反交组合的单株角果数、每角果粒数和单株产量随种植密度增加呈降低趋势, 而实际产量呈先增后降的趋势。正交组合(华航 901×浙油 50)的实际产量和经济系数显著高于反交组合(浙油 50×华航 901)。拟合分析发现, 正交组合的合理密度范围为 42.8~49.9 万株 hm^{-2} , 在此密度下可以良好地协调产量与倒伏之间的矛盾。在相同密度下, 正交组合比反交组合有更大的实产杂种优势, 而在倒伏性状方面正交组合与其母本华航 901 随密度变化规律相似。因此, 为了实现油菜高效生产, 可选择高产品种为父本, 含油量高、抗倒性强的品种为母本进行杂交组合, 以此作为杂交油菜的亲本选配原则。需要指出的是, 由

于类似研究在油菜中还鲜有报道, 且本研究相关结果也仅基于两个油菜品种间的正反交获得, 不能排除不同亲本的差异对正交和反交效应的影响。因此, 相关结论推广到其他品种时还需要设计更多的正反交试验加以验证。

References

- [1] 刘成, 黄杰, 冷博峰, 冯中朝, 李俊鹏. 我国油菜产业现状、发展困境及建议. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 203–210.
Liu C, Huang J, Leng B F, Feng Z C, Li J P. Current situation, development difficulties and suggestions of Chinese rape industry. *J China Agric Univ*, 2017, 22(12): 203–210 (in Chinese with English abstract).
- [2] Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. FAO Statistical Databases in 2018. [2020-09-20]. <http://www.fao.org>.
- [3] 刘成, 冯中朝, 肖唐华, 马晓敏, 周广生, 黄凤洪, 李加纳, 王汉中. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策. 中国油料作物学报, 2019, 41: 485–489.
Liu C, Feng Z C, Xiao T H, Ma X M, Zhou G S, Huang F H, Li J N, Wang H Z. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 485–489 (in Chinese with English abstract).
- [4] 熊秋芳, 文静, 李兴华, 沈金雄. 中国油菜科技创新与产业发展. 中国农业科技导报, 2014, 16(3): 14–22.
Xiong Q F, Wen J, Li X H, Shen J X. Technological innovation and industrial development of rapeseed in China. *J Agric Sci Technol*, 2014, 16(3): 14–22 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李小勇, 周敏, 王涛, 张兰, 周广生, 蒯婕. 种植密度对油菜机械收获关键性状的影响. 作物学报, 2018, 44: 278–287.
Li X Y, Zhou M, Wang T, Zhang L, Zhou G S, Kuai J. Effects of planting density on the mechanical harvesting characteristics of semi-winter rapeseed. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 278–287 (in Chinese with English abstract).
- [6] 安伟, 樊智翔, 郭玉宏, 米小红, 徐澜. 玉米品种的增产潜力与改良方向. 山西农业大学学报, 2003, 23: 386–388.
An W, Fan Z X, Guo Y H, Mi X H, Xu L. Utilization and quality improvement of high starch maize. *J Shanxi Agric Univ*, 2003, 23: 386–388 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李豪圣, 宋健民, 刘爱峰, 程敦公, 王西芝, 杜长林, 赵振东, 刘建军. 播期和种植密度对超高产小麦‘济麦 22’产量及其构成因素的影响. 中国农学通报, 2011, 27(5): 243–248.
Li H S, Song J M, Liu A F, Cheng D G, Wang X Z, Du C L, Zhao Z D, Liu J J. Effect of sowing time and planting density on yield and components of ‘Jimai 22’ with super-high yield. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, 27(5): 243–248 (in Chinese with English abstract).
- [8] 刘浩, 王加峰, 孙大元, 郭涛, 刘永柱, 王慧, 陈志强. 水稻矮秆基因研究进展. 广东农业科学, 2013, 40(22): 139–144.
Liu H, Wang J F, Sun D Y, Guo T, Liu Y Z, Wang H, Chen Z Q. Research progress of dwarf genes in rice. *Guangdong Agric Sci*, 2013, 40(22): 139–144 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王成瑗, 王伯伦, 张文香, 赵磊, 赵秀哲, 高连文. 栽培密度对水稻产量及品质的影响. 沈阳农业大学学报, 2004, 35: 318–322.

- Wang C A, Wang B L, Zhang W X, Zhao L, Zhao X Z, Gao L W. Effect of planting density on grain yield and quality of rice. *J Shenyang Agric Univ*, 2004, 35: 318–322 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨国虎, 李新, 王承莲, 罗湘宁. 种植密度影响玉米产量及部分产量相关性状的研究. *西北农业学报*, 2006, 15(5): 57–60.
Yang G H, Li X, Wang C L, Luo X N. Study on effects of plant densities on the yield and the related characters of maize hybrids. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2006, 15(5): 57–60 (in Chinese with English abstract).
- [11] 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: 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. *J Plant Nutr Fert*, 2010, 16: 274–281 (in Chinese with English abstract).
- [12] Li H T, Li J J, Song J R, Zhao B, Guo C C, Wang B, Zhang Q H, Wang J, King G J, Liu K D. An auxin signaling gene *BnaA3.LAA7* contributes to improved plant architecture and yield heterosis in rapeseed. *New Phytol*, 2019, 222: 837–851.
- [13] Ma N, Yuan J Z, Li M, Li J, Zhang L Y, Liu L X, Naeem M S, Zhang C L. Ideotype population exploration: growth, photosynthesis, and yield components at different planting densities in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *PLoS One*, 2014, 9: e114232.
- [14] Kuai J, Sun Y Y, Zhou M, Zhang P P, Zuo Q S, Wu J S, Zhou G S. The effect of nitrogen application and planting density on the radiation use efficiency and the stem lignin metabolism in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Field Crops Res*, 2016, 199: 89–98.
- [15] 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).
- [16] 赵永国, 程勇, 陆光远, 徐劲松, 付桂萍, 邹锡玲, 乔醒, 刘清云, 张学昆. 密植条件下国审冬油菜品种主要性状特点与差异. *中国油料作物学报*, 2015, 37: 285–290.
Zhao Y G, Cheng Y, Lu G Y, Xu J S, Fu G P, Zou X L, Qiao X, Liu Q Y, Zhang X K. Characteristics and variation of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars under high density. *Chin J Oil Crop Sci*, 2015, 37: 285–290 (in Chinese with English abstract).
- [17] 宋稀, 刘凤兰, 郑普英, 张学昆, 陆光远, 付桂萍, 程勇. 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: 1800–1806.
Song X, Liu F L, Zheng P Y, Zhang X K, Lu G Y, Fu G P, Cheng Y. Correlation analysis between agronomic traits and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) for high-density planting. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 1800–1806 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王寅, 鲁剑巍. 中国冬油菜栽培方式变迁与相应的养分管理策略. *中国农业科学*, 2015, 48: 2952–2966.
Wang Y, Lu J W. The transitional cultivation patterns of winter oilseed rape in China and the corresponding nutrient management strategies. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 2952–2966 (in Chinese with English abstract).
- [19] Diepenbrock W. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Field Crops Res*, 2000, 67: 35–49.
- [20] Hu Q, Hua W, Yin Y, Zhang X, Liu L, Shi J, Zhao Y, Qin L, Chen C, Wang H Z. Rapeseed research and production in China. *Crop J*, 2017, 5: 127–135.
- [21] Huang X H, Yang S H, Gong J Y, Zhao Q, Feng Q, Zhan Q L, Zhao Y, Li W J, Cheng B Y, Xia J H, Chen N, Huang T, Zhang L, Fan D L, Chen J Y, Zhou C C, Lu Y Q, Weng Q J, Han B. Genomic architecture of heterosis for yield traits in rice. *Nature*, 2016, 537: 629–633.
- [22] 傅廷栋. 中国油菜生产和品种改良的现状与前景. *安徽农学通报*, 2000, 6(1): 3–10.
Fu T D. Current status and prospects of rape production and variety improvement in China. *Anhui Agric Sci Bull*, 2000, 6(1): 3–10 (in Chinese with English abstract).
- [23] 乌兰, 马伟杰, 义如格勒图, 崔仲楠, 鲁兴华. 油菜秸秆饲用价值分析及其开发利用. *内蒙古草业*, 2007, 19(1): 41–42.
Wu L, Ma W J, Yi R G L T, Cui Z N, Lu X H. Feeding value analysis and development and utilization of rapeseed straw. *Inner Mongolia Pratac*, 2007, 19(1): 41–42 (in Chinese with English abstract).
- [24] 左旭. 我国农业废弃物新型能源化开发利用研究. 中国农业科学院博士学位论文, 北京, 2015.
Zuo X. A Research on the Development and Utilization of the Agricultural Residues as New Sources Energy in China. PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [25] Li N, Song O J, Peng W, Zhan J P, Shi J Q, Wang X F, Liu G H, Wang H Z. Maternal control of seed weight in rapeseed (*Brassica napus* L.): the causal link between the size of pod (mother, source) and seed (offspring, sink). *Plant Biotechnol J*, 2019, 17: 736–749.
- [26] Guo M, Rupe M A, Dieter J A, Zou J J, Spielbauer D, Duncan K E, Howard R J, Hou Z L, Simmons C R. Cell number regulator1 affects plant and organ size in maize: implications for crop yield enhancement and heterosis. *Plant Cell*, 2010, 22: 1057–1073.
- [27] Ma J, Zhang D F, Cao Y Y, Wang L F, Li J J, Lubberstedt T, Wang T Y, Li Y, Li H Y. Heterosis-related genes under different planting densities in maize. *J Exp Bot*, 2018, 69: 5077–5087.
- [28] Qian C R, Yu Y, Gong X J, Jiang Y B, Zhao Y, Yang Z L, Hao Y B, Li L, Song Z W, Zhang W J. Response of grain yield to plant density and nitrogen rate in spring maize hybrids released from 1970 to 2010 in Northeast China. *Crop J*, 2016, 4: 459–467.
- [29] 沈金雄, 傅廷栋, 杨光圣, 马朝芝, 涂金星. 甘蓝型油菜杂种优势及产量性状的遗传改良. *中国油料作物学报*, 2005, 27(1): 5–9.
Shen J X, Fu T D, Yang G S, Ma C Z, Tu J X. Analysis of heterosis reveals genetic improvement for yield traits in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Chin J Oil Crop Sci*, 2005, 27(1): 5–9 (in Chinese with English abstract).
- [30] 刘绚霞, 董振生, 刘创社, 董军刚, 李红兵. 甘蓝型优质杂交油菜主要农艺性状配合力与遗传力研究. *中国油料作物学报*, 2001, 23(3): 2–5.
Liu X X, Dong Z S, Liu C S, Dong J G, Li H B. Combining

- ability and genetic ability of main agronomy characters in double-low rapeseed (*Brassica napus* L.). *Chin J Oil Crop Sci*, 2001, 23(3): 2–5 (in Chinese with English abstract).
- [31] 王天宇, 祝云芳, 陈华璋, 陈泽辉. 玉米正反交杂交种 F_1 主要性状的差异性分析. *玉米科学*, 2007, 15(4): 52–55.
Wang T Y, Zhu Y F, Chen H Z, Chen Z H. Study on Differences of main characters between maize hybrids and reciprocal crosses. *J Maize Sci*, 2007, 15(4): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- [32] 张耀文, 赵小光, 田建华, 王辉, 王学芳, 李殿荣, 侯君利, 关周博, 韦世豪. 甘蓝型油菜正反交组合叶片净光合速率和叶绿素含量的比较. *华北农学报*, 2015, 30(5): 135–140.
Zhang Y W, Zhao X G, Tian J H, Wang H, Wang X F, Li D R, Hou J L, Guan Z B, Wei S H. Comparison of net photosynthetic rate and chlorophyll content of *Brassica napus* between orthogonal and reciprocal combinations. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2015, 30(5): 135–140 (in Chinese with English abstract).
- [33] Magrath R, Mithen R. Maternal effects on the expression of individual aliphatic glucosinolates in seeds and seedlings of *Brassica napus*. *Plant Breed*, 1993, 111: 249–252.
- [34] Hua W, Li R J, Zhan G M, Liu J, Li J, Wang X F, Liu G H, Wang H Z. Maternal control of seed oil content in *Brassica napus*: the role of silique wall photosynthesis. *Plant J*, 2012, 69: 432–444.
- [35] Li N, Peng W, Shi J Q, Wang X F, Liu G H, Wang H Z. The natural variation of seed weight is mainly controlled by maternal genotype in rapeseed (*Brassica napus* L.). *PLoS One*, 2015, 10: e0125360.
- [36] Liu J, Hao W J, Liu J, Fan S H, Zhao W, Deng L B, Wang X F, Hu Z Y, Hua W, Wang H Z. A novel chimeric mitochondrial gene confers cytoplasmic effects on seed oil content in polyploid rapeseed (*Brassica napus*). *Mol Plant*, 2019, 12: 582–596.
- [37] 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).
- [38] 孙超, 汪骞, 唐伟杰, 李丽萍, 夏张婷, 赵海洋, 韩月鑫, 林良斌. 受母性影响的油菜种子性状研究. *种子*, 2018, 37(5): 9–12.
Sun C, Wang Q, Tang W J, Li L P, Xia Z T, Zhao H Y, Han Y X, Lin L B. Study on the characters of seed in *Brassica napus* affected by maternale effects. *Seed*, 2018, 37(5): 9–12 (in Chinese with English abstract).
- [39] 王瑞, 李加纳, 唐章林, 谌利, 张学昆. 甘蓝型黄籽油菜产量性状的遗传分析. *中国农学通报*. 2004, 20(5): 37–38.
Wang R, Li J N, Tang Z L, Chen L, Zhang X K. Genetic analysis for yield characters in yellow-seeded rapeseed lines (*Brassica napus* L.). *Chin Agric Sci Bull*. 2004, 20(5): 37–38 (in Chinese with English abstract).
- [40] 顾慧, 戚存扣. 甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)抗倒性状的主基因+多基因遗传分析. *作物学报*, 2008, 34: 376–381.
Gu H, Qi C K. Genetic analysis of lodging resistance with mixed model of major gene plus polygene in *Brassica napus* L. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 376–381 (in Chinese with English abstract).

附表1 种植密度对油菜产量与产量构成因子的影响

Table S1 Effects of planting densities on yield and yield components in rapeseed

年份(点) Year (site)	品种 Variety	密度 Density	单株角果数 Number of siliques per plant	每角果粒数 Number of seeds per silique	千粒重 1000-seed weight (g)	单株产量 Yield per plant (g)	实际产量 Actual yield (kg hm ⁻²)	生物产量 Biological yield (kg hm ⁻²)	经济系数 Economic coefficient (%)
2017 武汉	浙油 50	D1	315.6 ab	20.6 a	3.47 hij	22.56 a	2590.5 j	10384.4 fg	24.97 jkl
2017 Wuhan	Zheyou 50	D2	228.5 efg	19.0 b	3.60 bcde	15.63 e	2829.5 d	11064.8 e	25.62 hij
		D3	192.6 ghij	18.8 b	3.63 ab	13.14 g	3082.7 b	11597.3 c	26.62 efg
		D4	187.4 hij	18.1 c	3.62 abc	11.28 h	2651.9 ghij	10054.4 h	26.43 fg
		D5	179.3 hij	17.4 de	3.68 a	10.48 ij	2618.1 hij	10314.7 g	25.41 ijk
		D1	292.0 abc	16.6 f	3.61 bcd	17.50 d	2418.2 l	9288.5 m	26.09 ghi
	华航 901	D2	283.6 bcd	14.6 hi	3.61 bcd	14.92 f	2649.8 ghij	9704.5 k	27.33 bcd
		D3	203.6 ghi	13.8 jk	3.54 efg	9.95 jk	2717.9 efg	9725.6 k	28.00 ab
		D4	198.9 ghij	13.5 kl	3.56 cdef	9.56 kl	2642.4 hij	9974.3 i	26.52 fg
		D5	186.9 hij	13.1 l	3.55 def	8.69 m	2509.8 k	9611.2 l	26.17 gh
		D1	326.5 a	17.8 cd	3.48 ghij	20.22 b	2684.7 fgh	9933.1 i	27.06 def
	×浙油 50	D2	311.0 ab	16.9 ef	3.51 fghi	18.45 c	2862.3 d	10449.1 f	27.45 abcd
		D3	254.5 cde	14.4 ij	3.48 ghij	12.75 g	3182.3 a	11336.5 d	28.11 a
		D4	216.1 efgh	14.3 ij	3.52 fgh	10.88 hi	2736.2 ef	9849.7 j	27.84 abc
		D5	206.8 fghi	13.4 kl	3.46 hij	9.59 kl	2601.5 ij	9542.8 l	27.29 cde
		D1	246.1 de	16.6 f	3.42 j	16.97 d	2405.3 l	10075.0 h	23.90 n

(续附表 1)

年份(点) Year (site)	品种 Variety	密度 Density	单株角果数 Number of siliques per plant	每角果粒数 Number of seeds per silique	千粒重 1000-seed weight (g)	单株产量 Yield per plant (g)	实际产量 Actual yield (kg hm ⁻²)	生物产量 Biological yield (kg hm ⁻²)	经济系数 Economic coefficient (%)
	华航 901	D2	244.6 ef	15.4 g	3.45 ij	13.00 g	2663.1 ghi	10993.1 e	24.26 mn
	Zheyu 50×	D3	187.3 hij	15.3 g	3.51 fg	10.06 jk	2961.2 c	12150.1 b	24.42 lmn
	Huahang 901	D4	171.4 ij	15.2 gh	3.54 efg	9.22 lm	3055.2 b	12342.0 a	24.79 klm
		D5	164.2 j	15.2 gh	3.52 fgh	7.79 n	2754.5 e	11266.8 d	24.50 lmn
2017 西宁	浙油 50	D1	241.2 c	23.9 c	3.88 abc	22.39 c	3129.4 j	12767.8 n	24.54 m
2017 Xining	Zheyu 50	D2	162.6 g	21.8 de	3.72 ef	13.20 e	3884.0 f	14689.3 e	26.48 hijk
		D3	126.8 ij	21.7 de	3.56 g	9.79 h	4138.6 cd	15445.8 c	26.82 ghij
		D4	100.9 m	19.5 gh	3.86 abc	7.59 jk	3886.1 f	14351.0 fg	27.14 fghi
		D5	93.7 n	19.6 gh	3.91 abc	7.18 l	3852.9 f	14978.6 d	25.75 kl
	华航 901	D1	225.8 d	26.4 a	3.81 cde	22.72 c	3352.7 i	12218.5 o	27.50 efg
		D2	161.6 g	20.3 fg	3.84 bcd	12.61 f	3686.3 g	12872.5 m	28.67 cd
		D3	128.8 ij	19.0 hi	3.94 ab	9.65 h	3878.6 f	13063.0 l	29.75 ab
		D4	95.9 mn	19.3 hi	3.96 a	7.34 kl	3963.1 ef	13707.7 k	28.95 bcd
		D5	76.3 o	18.6 i	3.95 ab	5.61 n	3567.7 gh	12720.1 n	28.11 de
	×浙油 50	D1	306.6 a	25.1 b	3.68 fg	28.28 a	3870.6 f	14209.0 h	27.25 efgh
		D2	181.1 f	22.1 d	3.68 f	14.70 d	4072.4 de	14701.0 e	27.77 ef
		D3	150.4 h	17.1 jk	3.87 abc	9.93 h	4573.7 a	15004.7 d	30.52 a
		D4	123.6 j	16.6 k	3.86 abc	7.90 j	4198.8 cd	14264.2 gh	29.50 bc
		D5	107.0 l	21.1 ef	3.94 ab	8.88 i	4113.3 cd	13944.5 j	29.54 bc
	浙油 50×	D1	295.0 b	21.3 de	3.72 ef	23.38 b	3554.7 h	14365.2 f	24.81 m
		D2	193.0 e	18.5 i	3.64 fg	12.98 e	3644.0 gh	14049.1 i	25.97 jkl
		D3	153.8 h	17.1 jk	3.93 ab	10.33 g	4208.0 c	16039.6 b	26.29 ijk
		D4	132.0 i	17.5 j	3.97 a	9.20 i	4422.8 b	16470.1 a	26.89 fghi
		D5	117.0 k	15.0 l	3.74 def	6.58 m	3621.3 gh	14371.2 f	25.26 lm

方差分析 Variance analyses

年份(点) Year & Site (YS)	**	**	**	**	**	**	**	**
品种 Variety (V)	**	**	**	**	**	**	**	**
密度 Density (D)	**	**	**	**	**	**	**	**
YS×V	**	**	**	**	**	**	**	**
YS×D	**	**	**	**	**	**	**	**
V×D	NS	**	**	**	**	**	**	**
YS×V×D	**	**	**	**	**	**	**	*

D1、D2、D3、D4 和 D5 分别表示种植密度为 1.5×10^5 、 3.0×10^5 、 4.5×10^5 、 6.0×10^5 和 7.5×10^5 株 hm^{-2} 。不同小写字母表示同一年份同一品种不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)；*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著差异，NS 表示差异不显著。

D1, D2, D3, D4, and D5 indicate the planting densities of 1.5×10^5 , 3.0×10^5 , 4.5×10^5 , 6.0×10^5 , and 7.5×10^5 plants hm^{-2} , respectively. Values followed by different lowercase letters are significantly different in the same year and the same variety among different treatments at the 0.05 probability level; * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels; NS: not significant difference.

附表 2 种植密度对油菜成熟期主要农艺性状的影响(2017 年, 武汉)

Table S2 Effects of planting densities on main agronomic traits of rapeseed at maturity (2017, Wuhan)

品种 Variety	密度 Density	株高 Plant height (cm)	一次分枝高度 Primary branch height (cm)	分枝数 Branch number	根颈粗 Root crown diameter (mm)	地上部鲜重 Shoot fresh weight (g)	根鲜重 Root fresh weight (g)	茎秆抗折力 Stem breaking resistance (N)
浙油 50	D1	212.6 a	88.3 gh	7.9 c	20.47 b	328.92 a	42.30 a	140.78 a
Zheyou 50	D2	202.0 c	94.6 abc	6.2 h	16.37 g	200.80 f	23.98 g	108.65 c
	D3	193.1 e	95.1 ab	6.1 i	15.22 h	173.52 h	20.31 i	98.64 cd
	D4	188.3 f	96.0 a	5.6 k	14.85 ij	157.29 i	19.08 j	92.02 de
	D5	180.8 ij	86.8 hij	5.4 l	14.72 j	142.82 k	18.56 j	78.18 fg
华航 901	D1	200.9 c	87.7 ghi	8.0 b	18.38 d	231.58 e	30.66 d	95.80 cde
Huahang	D2	186.4 fg	89.9 fg	6.5 f	17.94 e	176.17 h	28.38 e	83.44 ef
901	D3	181.0 hij	90.8 ef	6.3 g	15.21 h	146.77 j	17.06 k	61.94 hi
	D4	180.3 ij	92.3 cde	6.1 i	14.45 k	129.48 l	16.28 l	56.74 hij
	D5	172.6 k	83.1 kl	5.8 j	13.87 m	116.39 n	14.81 m	49.40 ij
华航 901	D1	196.8 d	83.0 kl	8.1 a	21.05 a	263.66 b	40.51 b	134.12 ab
×浙油 50	D2	189.0 f	84.5 jk	7.7 d	20.65 b	241.60 c	37.74 c	122.09 b
Huahang 901	D3	179.8 ij	85.5 ij	6.6 e	16.84 f	141.65 k	26.91 f	65.41 gh
×Zheyou 50	D4	179.1 j	85.8 ij	6.3 g	14.96 ij	130.50 l	21.22 h	56.91 hij
	D5	167.9 l	81.0 l	5.2 n	14.47 k	119.43 mn	21.08 h	47.83 j
浙油 50×	D1	208.5 b	93.3 bcd	6.5 f	18.93 c	235.16 d	40.20 b	103.34 cd
华航 901	D2	199.7 cd	94.1 abc	5.8 j	17.85 e	194.07 g	27.71 e	94.33 de
Zheyou 50×	D3	184.3 gh	92.6 cde	5.3 m	15.03 hi	156.82 i	20.09 i	84.87 ef
Huahang 901	D4	182.5 hi	91.3 def	5.1 o	14.33 k	130.48 l	17.77 k	63.30 h
	D5	173.1 k	81.3 l	4.6 p	14.11 l	121.91 m	15.92 l	59.04 hij

方差分析 Variance analyses

品种 Variety (V)	**	**	**	**	**	**	**	**
密度 Density (D)	**	**	**	**	**	**	**	**
V×D	**	**	**	**	**	**	**	**

D1、D2、D3、D4 和 D5 分别表示种植密度为 1.5×10^5 、 3.0×10^5 、 4.5×10^5 、 6.0×10^5 和 7.5×10^5 株 hm^{-2} 。同列不同小写字母表示同一品种不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$)；*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著差异，NS 表示差异不显著。

D1, D2, D3, D4, and D5 indicate the planting densities of 1.5×10^5 , 3.0×10^5 , 4.5×10^5 , 6.0×10^5 , and 7.5×10^5 plants hm^{-2} , respectively. Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different in the same variety among different treatments at the 0.05 probability level; * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels; NS: not significant difference.

附表 3 种植密度对油菜成熟期主要农艺性状的影响(2017 年, 西宁)

Table S3 Effects of planting densities on main agronomic traits of rapeseed at maturity (2017, Xining)

品种 Variety	密度 Density	株高 Plant height (cm)	一次分枝高度 Primary branch height (cm)	分枝数 Branch number	根颈粗 Root crown di- ameter (mm)	地上部鲜重 Shoot fresh weight (g)	根鲜重 Root fresh weight (g)	茎秆抗折力 Stem breaking resistance (N)
浙油 50	D1	174.4 a	73.1 g	5.9 e	17.38 c	292.65 c	31.21 b	130.01 b
Zheyou 50	D2	168.1 b	77.8 cd	5.2 i	13.41 f	197.37 e	14.51 h	69.91 de
	D3	157.8 de	89.3 a	4.7 k	12.42 k	129.09 i	13.06 i	55.57 ef
	D4	143.5 hi	79.9 b	4.1 m	10.15 o	91.74 k	7.40 m	33.31 h
	D5	132.7 k	74.2 f	4.0 o	9.11 r	80.72 l	6.65 n	24.21 h
华航 901	D1	126.0 l	26.1 p	7.0 c	17.44 c	190.02 f	24.12 d	73.22 d
Huahang	D2	116.2 m	31.7 o	6.0 d	12.99 h	121.17 j	15.26 g	62.01 def
901	D3	113.5 m	34.9 n	5.5 g	12.80 i	118.13 j	15.17 gh	48.22 fg
	D4	106.3 n	44.0 l	4.1 n	9.86 p	61.55 m	8.99 k	34.43 gh
	D5	103.4 n	40.7 m	4.0 no	9.39 q	60.03 mn	7.24 mn	25.30 h

(续附表 3)

品种 Variety	密度 Density	株高 Plant height (cm)	一次分枝高度 Primary branch height (cm)	分枝数 Branch number	根颈粗 Root crown di- ameter (mm)	地上部鲜重 Shoot fresh weight (g)	根鲜重 Root fresh weight (g)	茎秆抗折力 Stem breaking resistance (N)
华航 901	D1	158.8 de	58.7 j	7.5 b	23.11 a	337.99 b	33.53 a	125.40 b
×浙油 50	D2	149.4 f	63.5 i	5.8 f	14.93 d	179.60 g	18.73 f	67.68 de
Huahang 901	D3	141.8 i	67.6 h	5.0 j	13.18 g	128.38 i	12.57 i	48.46 fg
×Zheyu 50	D4	136.5 j	67.6 h	4.5 l	11.87 l	78.40 l	9.70 j	31.86 h
	D5	135.6 jk	78.0 c	4.5 l	10.53 n	77.11 l	9.04 jk	20.69 h
浙油 50×	D1	163.0 c	56.0 k	7.6 a	17.64 b	344.22 a	26.15 c	158.41 a
华航 901	D2	160.8 cd	73.5 g	5.9 e	14.45 e	225.05 d	19.98 e	92.68 c
Zheyu 50×	D3	156.8 e	77.2 de	5.4 h	12.61 j	146.89 h	12.66 i	57.56 ef
Huahang 901	D4	148.6 fg	76.8 e	3.6 p	11.16 m	81.25 l	8.19 l	31.64 h
	D5	145.6 gh	73.4 g	3.2 q	8.34 s	56.11 n	4.29 o	19.84 h

方差分析 Variance analyses

品种 Variety (V)	**	**	**	**	**	**	**	**
密度 Density (D)	**	**	**	**	**	**	**	**
V×D	**	**	**	**	**	**	**	**

D1、D2、D3、D4 和 D5 分别表示种植密度为 1.5×10^5 、 3.0×10^5 、 4.5×10^5 、 6.0×10^5 和 7.5×10^5 株 hm^{-2} 。同列不同小写字母表示同一品种不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$)；*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著差异，NS 表示差异不显著。

D1, D2, D3, D4 and D5 indicate the planting densities of 1.5×10^5 , 3.0×10^5 , 4.5×10^5 , 6.0×10^5 , and 7.5×10^5 plants hm^{-2} , respectively. Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different in the same variety among different treatments at the 0.05 probability level; * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels; NS: not significant difference.

附表 4 种植密度对油菜茎秆不同部位倒伏指数的影响

Table S4 Effects of planting densities on lodging index at different parts of rapeseed stem

年份(点) Year (site)	品种 Variety	密度 Density	第 1 段 Part one (cm g g ⁻¹)	第 2 段 Part two (cm g g ⁻¹)	第 3 段 Part three (cm g g ⁻¹)	第 4 段 Part four (cm g g ⁻¹)	4 段平均值 Average of four parts (cm g g ⁻¹)
2017 武汉	浙油 50	D1	2.81 c	3.20 b	3.46 b	3.23 d	3.17 b
2017 Wuhan	Zheyu 50	D2	2.31 h	2.49 f	2.69 h	2.93 g	2.61 g
		D3	2.29 hi	2.32 h	2.42 j	2.51 ij	2.39 j
		D4	1.79 k	2.19 i	2.38 j	2.12 l	2.12 l
		D5	1.61 l	1.96 k	2.19 k	2.17 kl	1.98 n
	华航 901	D1	3.07 a	3.29 a	3.71 a	3.84 a	3.48 a
	Huahang 901	D2	2.88 b	3.02 c	3.21 cd	3.43 c	3.14 b
		D3	2.82 c	2.80 d	3.07 e	3.02 f	2.93 d
		D4	2.59 e	2.66 e	3.20 d	3.00 f	2.86 e
		D5	2.38 g	2.45 fg	2.98 f	2.52 ij	2.58 gh
	华航 901	D1	2.70 d	2.98 c	3.19 d	3.41 c	3.07 c
	×浙油 50	D2	2.45 f	2.69 e	2.83 g	3.10 e	2.77 f
	Huahang 901	D3	2.38 g	2.42 g	2.63 h	2.85 h	2.57 gh
	×Zheyu 50	D4	2.35 gh	2.45 fg	2.82 g	2.55 i	2.54 hi
		D5	2.12 j	2.24 i	2.50 i	2.47 j	2.33 k
	浙油 50×	D1	2.69 d	3.02 c	3.27 c	3.60 b	3.15 b
	华航 901	D2	2.24 i	2.33 h	2.52 i	2.97 fg	2.51 i
	Zheyu 50×	D3	1.83 k	1.96 k	2.19 k	2.46 j	2.11 l
	Huahang 901	D4	1.78 k	2.05 j	2.17 k	2.21 k	2.05 m

(续附表 4)

年份(点) Year (site)	品种 Variety	密度 Density	第 1 段 Part one (cm g g ⁻¹)	第 2 段 Part two (cm g g ⁻¹)	第 3 段 Part three (cm g g ⁻¹)	第 4 段 Part four (cm g g ⁻¹)	4 段平均值 Average of four parts (cm g g ⁻¹)
		D5	1.51 m	1.74 l	1.93 l	2.20 k	1.84 o
2017 西宁	浙油 50	D1	2.86 e	3.23 c	2.71 f	2.36 f	2.79 e
2017 Xining	Zheyou 50	D2	2.15 i	3.10 ef	2.59 g	2.28 h	2.53 g
		D3	2.56 g	2.79 h	2.45 h	1.84 l	2.41 i
		D4	2.83 e	3.04 fg	3.02 d	2.28 gh	2.79 e
		D5	3.42 b	3.86 a	3.42 a	2.47 e	3.29 a
	华航 901	D1	1.77 k	2.12 k	2.83 e	3.30 a	2.50 g
	Huahang 901	D2	1.62 l	1.81 m	1.86 j	2.05 j	1.83 m
		D3	1.39 m	1.74 n	1.85 j	1.96 k	1.73 n
		D4	1.43 m	1.67 n	1.75 k	1.40 m	1.56 o
		D5	1.95 j	2.28 j	2.11 i	2.13 i	2.12 k
	华航 901	D1	2.62 g	3.02 g	2.63 g	2.34 fg	2.65 f
	×浙油 50	D2	2.40 h	2.42 i	2.10 i	1.96 k	2.22 j
	Huahang 901	D3	2.18 i	2.17 k	1.91 j	1.81 l	2.02 l
	×Zheyou 50	D4	1.91 j	1.96 l	1.53 l	1.42 m	1.71 n
		D5	2.70 f	2.82 h	2.46 h	1.79 l	2.44 h
	浙油 50×	D1	3.01 d	3.15 de	3.24 c	2.86 b	3.06 b
	华航 901	D2	2.72 f	3.03 g	3.03 d	2.86 b	2.91 d
	Zheyou 50×	D3	2.88 e	3.21 cd	3.02 d	2.72 c	2.96 c
	Huahang 901	D4	3.20 c	3.26 c	3.25 c	2.43 e	3.04 b
		D5	3.66 a	3.49 b	3.35 b	2.58 d	3.27 a

方差分析 Variance analyses

年份(点) Year & Site (YS)	**	**	**	**	**
品种 Variety (V)	**	**	**	**	**
密度 Density (D)	**	**	**	**	**
YS×V	**	**	**	**	**
YS×D	**	**	**	**	**
V×D	**	**	**	**	**
YS×V×D	**	**	**	**	**

D1、D2、D3、D4 和 D5 分别表示种植密度为 1.5×10^5 、 3.0×10^5 、 4.5×10^5 、 6.0×10^5 和 7.5×10^5 株 hm^{-2} ；第 1 段、第 2 段、第 3 段和第 4 段分别表示除去缩颈段后将主茎平均分为 4 段，从地面往上 1、2、3、4 段。不同小写字母表示同一年份同一品种不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)；*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著差异，NS 表示差异不显著。

D1, D2, D3, D4 and D5 indicate the planting densities of 1.5×10^5 , 3.0×10^5 , 4.5×10^5 , 6.0×10^5 , and 7.5×10^5 plants hm^{-2} , respectively; Part One, Part Two, Part Three, and Part Four indicate the first, second, third and fourth part from bottom to the top when averaged the main stem. Values followed by different lowercase letters are significantly different in the same year and the same variety among different treatments at the 0.05 probability level; * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels; NS: not significant difference.

附表 5 种植密度对正反交组合倒伏杂种优势指数的影响

Table S5 Effects of planting densities on lodging heterosis index of reciprocal combinations

年份(点) Year (site)	品种 Variety	密度 Density	株高 Plant height (%)	地上部鲜重 Shoot fresh weight (%)	倒伏指数 Lodging index (%)				
					第 1 段 Part one	第 2 段 Part two	第 3 段 Part three	第 4 段 Part four	平均值 Average
2017 武汉	华航 901	D1	95.19 f	94.08 d	91.76 b	91.84 d	88.90 c	96.44 cd	92.24 d
2017 Wuhan	×浙油 50	D2	97.32 cde	128.20 a	94.38 b	97.66 bc	95.94 b	97.54 c	96.44 bc
	Huahang 901	D3	96.12 ef	88.44 f	93.15 b	94.67 cd	95.98 b	103.13 ab	96.84 b
	×Zheyu 50	D4	97.20 de	91.00 e	107.24 a	101.25 ab	101.04 a	99.77 bc	102.12 a
		D5	95.03 f	92.15 de	106.48 a	101.57 a	96.56 b	105.41 a	102.20 a
		AVG	96.17	98.77	98.60	97.40	95.69	100.46	97.97
	浙油 50×	D1	100.86 b	83.91 g	91.43 b	93.26 d	91.24 c	101.82 b	94.58 c
	华航 901	D2	102.82 a	102.97 b	86.24 c	84.69 e	85.22 d	93.39 d	87.58 e
	Zheyu 50×	D3	98.53 cd	97.92 c	71.66 f	76.77 f	79.96 e	88.85 e	79.50 g
	Huahang 901	D4	99.03 c	91.02 e	81.42 d	84.41 e	77.91 e	86.20 e	82.38 f
		D5	97.98 cd	94.07 d	75.46 e	79.09 f	74.77 f	93.70 d	80.81 fg
		AVG	99.84	93.98	81.24	83.64	81.82	92.79	84.97
2017 西宁	华航 901	D1	105.74 ef	140.05 a	113.01 e	112.93 d	94.91 e	82.70 g	100.14 f
2017 Xining	×浙油 50	D2	105.13 f	112.76 c	127.33 d	98.41 e	94.59 e	90.71 f	101.76 f
	Huahang 901	D3	104.55 f	103.91 e	110.25 e	96.01 e	89.06 f	95.17 e	97.41 g
	×Zheyu 50	D4	109.30 d	102.38 e	89.68 g	83.36 g	64.42 g	77.39 h	78.44 i
		D5	114.91 c	109.62 cd	100.62 f	91.86 f	88.70 f	78.03 h	90.29 h
		AVG	107.93	113.75	108.18	96.51	86.34	84.80	93.61
	浙油 50×	D1	108.52 de	142.63 a	130.16 d	117.86 c	116.90 d	100.89 d	115.75 e
	华航 901	D2	113.16 c	141.32 a	144.54 b	123.31 b	136.30 b	132.32 b	133.43 c
	Zheyu 50×	D3	115.59 c	118.84 b	146.17 ab	141.80 a	140.66 a	143.17 a	142.85 a
	Huahang 901	D4	118.97 b	106.03 de	150.48 a	138.49 a	136.59 b	132.07 b	139.54 b
		D5	123.35 a	79.73 f	136.22 c	113.59 d	121.00 c	112.33 c	120.82 d
		AVG	115.92	117.71	141.52	127.01	130.29	124.16	130.48

D1、D2、D3、D4 和 D5 分别表示种植密度为 1.5×10^5 、 3.0×10^5 、 4.5×10^5 、 6.0×10^5 和 7.5×10^5 株 hm^{-2} ；第 1 段、第 2 段、第 3 段和第 4 段分别表示除去缩颈段后将主茎平均分为 4 段，从地面往上 1、2、3、4 段。不同小写字母表示同一年份同一品种不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

D1, D2, D3, D4, and D5 indicate the planting densities of 1.5×10^5 , 3.0×10^5 , 4.5×10^5 , 6.0×10^5 , and 7.5×10^5 plants hm^{-2} , respectively; Part one, Part two, Part three and Part four indicate the first, second, third, and fourth part from bottom to the top when averaged the main stem. Values followed by different lowercase letters are significantly different in the same year and the same variety among different treatments at the 0.05 probability level.