

抗倒伏甘蓝型油菜茎秆强度分析与应用研究

田正书¹ 洪才英^{1,2} 张玉松¹ 罗延青¹ 符明联¹ 李劲峰¹

(¹ 云南省农业科学院经济作物研究所/云南省草本油料作物遗传改良重点实验室, 650205, 云南昆明;

² 云南大学农学院, 650504, 云南昆明)

摘要 以抗倒伏油菜 ZS11 和抗倒伏能力较弱的短生育期油菜种质为材料, 研究不同材料间倒伏程度与茎秆强度相关性状差异, 分析高强度茎秆形成的可能原因。结果表明, 22 份短生育期核心种质材料倒伏程度差异显著; 其中, 18XS172 倒伏程度值最小, 抗倒伏能力最好, 但仍显著低于 ZS11。18XS172 茎秆穿刺强度和茎秆纤维素含量从终花期开始显著低于 ZS11。与 18XS172 相比, ZS11 的纤维素含量从蕾薹期到终花期持续增长, 到终花期达到峰值且增长速率明显高于 18XS172, 推测 ZS11 茎秆纤维素含量有一个快速且长时间的积累期, 可能是导致 ZS11 茎秆纤维素含量在终花期后显著高于 18XS172 的内在原因。同时, 创制并筛选出 24TS624-3 和 24TS496-3 共 2 份优异种质材料, 实现了短生育期、高茎秆强度与高含油量的协同, 可直接作为亲本运用到短生育期油菜抗倒伏改良中。

关键词 甘蓝型油菜; 茎秆强度; 纤维素含量; 木质素含量; 种质创制

油菜是我国最重要的油料作物之一, 也是最重要的食用植物油来源, 我国油菜籽产油量占国产油料作物总产油量的 50.9%, 但当前国产植物油整体自给率仅为 30.2%^[1], 急需通过“扩面积、提单产、增效益”等举措保障食用油供给安全。云南省是我国短生育期油菜优势产区, 但目前油菜生产普遍存在植株生物量小、后期容易发生倒伏等问题, 且抗倒伏的短生育期种质及品种缺乏, 急需创制短生育期、抗倒伏种质材料, 同时改良或培育抗倒伏品种以改善生产困境, 提高茎秆机械强度是增加油菜抗倒伏能力的有效手段。

茎秆倒伏作为油菜倒伏的主要类型, 不仅会改变冠层结构, 还会影响叶片光合效率^[2-3]。此外, 茎折断后可能会阻碍营养物质向油菜籽粒转移, 影响油成分积累^[4-5]。研究^[6-7]表明, 油菜在开花期倒伏会使产量降低 30.7%~67.3%, 籽粒含油量降低 4.0%。一方面, 茎秆机械强度与茎秆倒伏密切相关。高茎秆机械强度材料往往表现出较强的抗倒伏能力, 同时具有优异的维管组织和机械组织结构以及细胞壁组分。与易倒伏油菜相比, 抗倒伏油菜具有较多的厚壁组织和厚角组织、较高的木质部/横切面比例以及排列紧密的维管束^[8]。另一方面, 抗倒

伏性强的油菜品种木质素含量高于抗倒伏性一般和较弱的品种^[9]。单位茎秆的木质素含量与倒伏率呈显著负相关, 与抗倒伏指数^[10-11]和茎秆强度均呈显著正相关^[12-13]。与低茎秆机械强度油菜相比, 高茎秆机械强度油菜具有较高的木质素含量, 维管束的木质化程度也更高^[14]。水稻中, 许多脆秆突变体次生细胞壁中的纤维素含量明显降低, 同时机械强度也相应降低^[15-18]。在玉米中, 机械强度主要调控基因 *stiff1* 的下调导致纤维素和木质素含量同时上调, 从而增强茎秆强度^[19]。研究^[20]表明, 油菜茎秆抗倒伏性与维管束长度/髓腔外组织宽度、纤维素含量、弯曲应力和 10 cm 茎段单位抗折断力呈正相关, 而与维管束外组织宽度、脂蜡质含量和半纤维素含量呈负相关; 其中, 高纤维素含量的成熟茎秆是油菜抗茎倒伏的直接标志, 木质素含量是油菜抗茎秆倒伏的必要条件。

云南省短生育期油菜种质中抗倒伏种质缺乏。18XS172 是近年来云南省自主创制的生育期适中且高每角粒数的种质材料。中双 11 号 (ZS11) 是优异的抗倒伏常规油菜品种, 其稳定性和广适性强。通过比较 18XS172 与 ZS11 在倒伏程度、茎秆强度、纤维素和木质素含量等方面的差异, 分析其

作者简介: 田正书, 主要从事油菜种质资源创制及遗传育种研究, E-mail: ZS_tian2017@163.com; 洪才英为共同第一作者, 主要从事油菜茎秆强度 QTL 定位研究, E-mail: 2321978608@qq.com

李劲峰为通信作者, 主要从事油菜遗传育种研究, E-mail: jinfengli2005@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YDF1201400); 国家自然科学基金 (32460495); 云南省农业联合专项 (202401 BD070001-083); 优势特色作物品种提升及转化利用专项

收稿日期: 2025-08-05; 修回日期: 2025-09-29; 网络出版日期: 2026-02-11

抗倒伏能力差异的原因。同时,因 18XS172 在短生育期种质中抗倒伏最优且产量优势显著,但与 ZS11 存在差距,故选择两者杂交,旨在聚合短生育期、高产与高茎秆强度性状,创制抗倒伏优异新种质。本研究通过分析云南省核心种质与高茎秆强度材料之间抗倒伏差异产生的原因,并对现有核心种质进行高茎秆强度化,创制短生育期且抗倒伏的新种质,将有力推动云南省短生育期油菜抗倒伏育种进程。

1 材料与方法

1.1 试验材料

22 份短生育期核心油菜种质材料为云南省农业科学院经济作物研究所创制,包括 16C、L235C、338C、E07C、L169C、147C、384C、64C 和 Z12C (恢复系材料); 098B、113B、167B、Z12B、26B 和 91B (保持系材料); FL329、FL312、FL322、FL330、FL307、23JD023-8 和 18XS172 (纯系材料)。ZS11 是由中国农业科学院油料作物研究所提供的常规油菜品种。

1.2 试验方法

于 2023 年 10 月-2025 年 5 月在云南省农业科学院经济作物研究所寻甸育种基地开展田间试验。播种期分别为 2023 年 10 月 15 日和 2024 年 10 月 18 日; 2023-2024 年测定不同时期茎秆强度,并取样进行纤维素和木质素含量分析; 2024-2025 年度测定产量及品质相关性状。小区面积 2.625 m² (1.75 m×1.50 m), 行距 0.35 m, 每小区 5 行, 每个材料 3 次重复, 种植密度为 27.0 万株/hm²。四周设 3 行保护行, 收获计产不除边行。施肥量分别是尿素 (N, 46%) 450 kg/hm²、普钙 (P₂O₅, ≥12%) 300 kg/hm²、硫酸钾 (K₂O, 51%) 150 kg/hm² 和硼肥 30 kg/hm²。氮肥 20%、磷肥 50%、钾肥 50% 和全部硼肥作为底肥施用; 氮肥 50% 作为苗肥施用; 氮肥 30%、磷肥 50%、钾肥 50% 作为薹花肥施用。苗期和薹薹期各灌水 1 次, 花期和成熟期视实际情况灌水 3~4 次, 方式为漫灌。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 倒伏程度及相关农艺性状 参照乔春贵^[21]和田保明等^[22]的方法测定倒伏程度。根据主茎与地面的夹角将倒伏程度分为 1 (80°~90°, 直立)、2 (45°~80°)、3 (30°~45°)、4 (0°~30°) 和 5 级 (0°, 完全倒伏且包括匍匐和折断)。倒伏程度越

低, 抗倒伏能力越强。每个材料于成熟期随机选取 20 株进行调查, 以加权平均值表示倒伏程度。

成熟时, 每小区随机取 5 株进行考种, 按照常规方法分析生育期、株高、每角粒数和千粒重等产量相关农艺性状; 收获时, 对每个小区进行实收记产。利用 FOSS 近红外分析仪测定含油量。

1.3.2 茎秆穿刺强度及纤维素/木质素含量 参照 Tian 等^[14]的方法测定油菜茎秆穿刺强度 (rind penetrometer resistance, RPR)。在苗期 (5 叶期)、薹薹期 (抽薹现薹后, 薹高 20~30 cm)、初花期 (小区 25% 植株开第一朵花, 选取开花的植株测定)、终花期 (小区 75% 的植株花凋谢, 选取刚开完最后一朵花的植株测定) 和角果期 (终花后 20 d 取样) 从每个株系中随机选取 6 株, 采用 YYD-1 型茎秆强度测试仪 (浙江托普云农科技股份有限公司) 测量茎秆第 6 节间的穿刺强度。

每个材料选取 3 株, 3 次重复; 取样时期与茎秆穿刺强度测定时期一致, 主要参照相关标准^[23-24]测定纤维素和木质素含量。不同生育时期茎秆纤维素和木质素含量的增长速率计算公式为: 增长速率=(增长后的值-增长前的值)/2 个生育时期的间隔时间。

1.3.3 优异种质材料创制及筛选 于 2020 年在中国农业科学院油料作物研究所武昌试验基地以 ZS11 为母本、18XS172 为父本进行杂交; 后续在云南省农业科学院经济作物研究所寻甸育种基地进行连续多代自交, 直至 2024 年获得稳定的 F_{2:5} 代株系。其中, 于 F_{2:3} 代测定各植株的茎秆穿刺强度并联合籽粒品质分析初步筛选出高茎秆穿刺强度及高含油量材料, 再将这些材料进行连续自交, 每代结合茎秆穿刺强度及品质分析测定进行同步筛选直至性状稳定。

1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 进行数据处理及方差分析, 采用 *t* 检验进行显著性分析, 采用 Excel 2019 制表, 使用 GraphPad Prism 8 软件进行图表绘制。

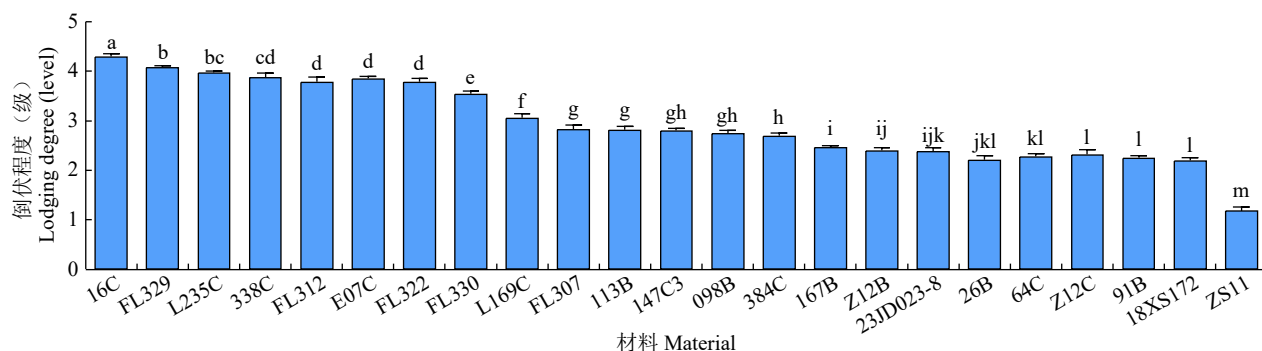
2 结果与分析

2.1 不同短生育期核心种质材料倒伏程度分析

将 22 份甘蓝型油菜核心种质与 ZS11 进行比较 (图 1), 发现 22 份材料间倒伏程度差异显著且均显著高于 ZS11, 其中, 16C 抗倒伏能力最差; 18XS172 抗倒伏能力最好; 26B、64C、Z12C 和 91B

抗倒伏能力仅次于 18XS172。由此看来，22 份优异种质材料存在一定抗倒伏能力，但是与 ZS11 相比，

这些材料的抗倒伏能力还存在明显缺陷，需要进行改良。



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著，下同。

Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level, the same below.

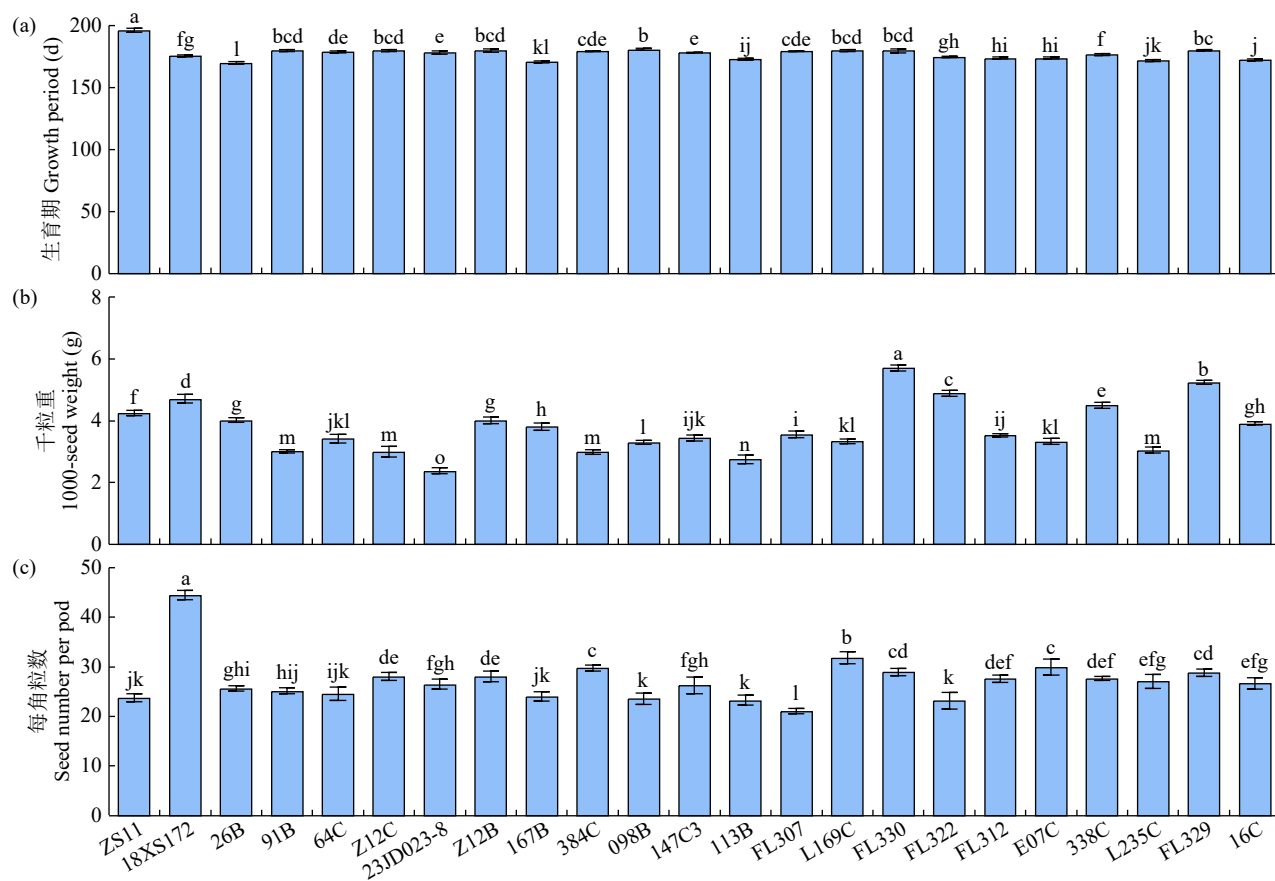
图 1 不同材料倒伏程度比较分析

Fig.1 Comparison of the lodging degree of different materials

2.2 不同种质材料茎秆穿刺强度和产量构成因素比较分析

进一步比较 22 份材料与 ZS11 产量相关农艺性状。如图 2 所示，22 份种质材料生育期、千粒重、每角粒数、单株角果数、含油量和单株产量差异显著。其中，ZS11 生育期最长，其次是 098B，26B 最短；FL330 千粒重最高，超过 5.5 g，23JD023-8

最低，低于 3.0 g；18XS172 每角粒数最多，超过 40 粒，FL307 最少；FL312 单株角果数最多，L235C 和 Z12C 最少；23JD023-8 含油量最高，18XS172 最低；18XS172 单株产量最高，384C 最低。此外，26B 和 18XS172 等抗倒伏能力较好的材料与 ZS11 相比，每角粒数、千粒重和单株产量等产量性状优势明显。综合比较 18XS172 和 26B 的倒伏程度、



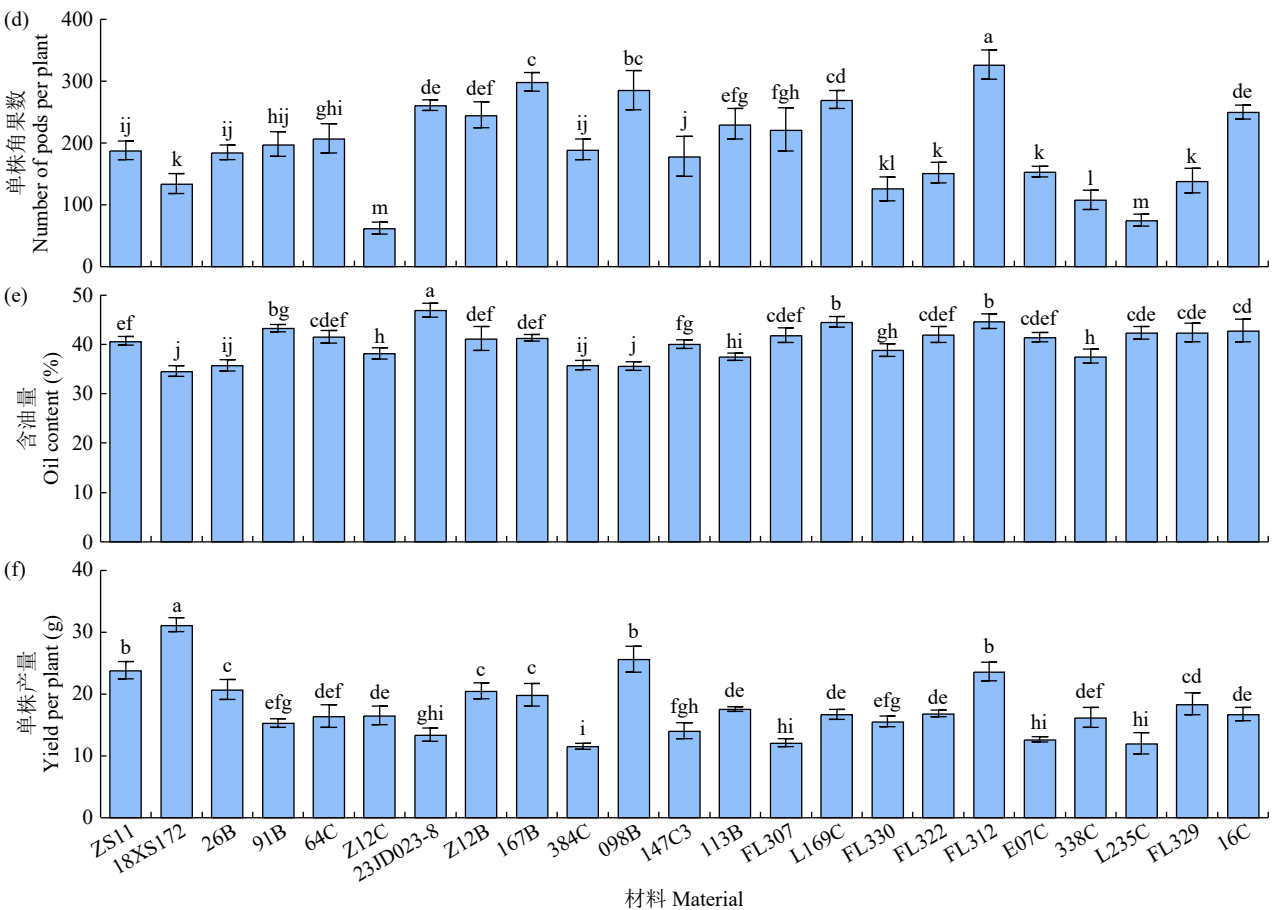


图 2 不同核心种质材料与 ZS11 农艺性状的比较分析
Fig.2 Comparison of agronomic traits among different core germplasm materials and ZS11

千粒重和单株产量等性状，最终筛选 18XS172 与 ZS11 进行茎秆穿刺强度、纤维素/木质素含量等性状比较。

18XS172 是通过小孢子培养技术创制的高产种质材料。本研究对 ZS11 和 18XS172 的 5 个生育时期 RPR 进行了分析（图 3），发现苗期、蕾薹期和初花期 ZS11 和 18XS172 的 RPR 不显著，终花期和青角期差异极显著，说明两者 RPR 的差异主要在生育后期，推测两者抗倒伏能力差异也可能主要在生育后期。而且 ZS11 的千粒重、单株产量和每角粒数显著低于 18XS172（图 2），虽然 ZS11 具有优异的 RPR 和抗倒伏能力，但是 18XS172 在产量上有很大优势，利用 ZS11 高茎秆穿刺强度特性对核心种质材料进行抗倒伏改良同时保留高产特性的可行性较高。

2.3 不同时期 ZS11 和 18XS172 的茎秆纤维素和木质素含量分析

前人^[12-13,18]报道发现 RPR 与茎秆木质素和纤维素含量呈显著正相关。本研究对不同时期 ZS11

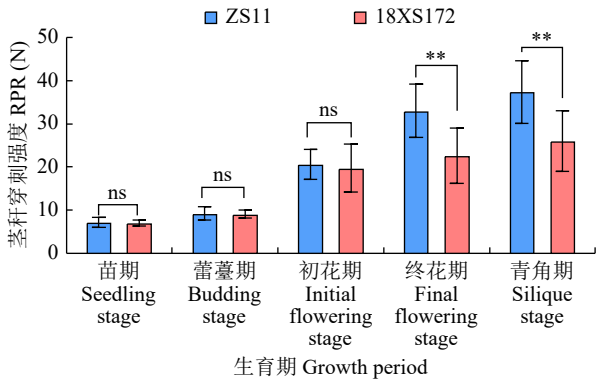


图 3 不同时期 ZS11 和 18XS172 的 RPR 比较
Fig.3 RPR comparison of ZS11 and 18XS172 at different stages

和 18XS172 的茎秆纤维素和木质素含量进行分析。如图 4 所示，除苗期外，其他各时期 ZS11 茎秆木质素含量均高于 18XS172，但未达到显著水平；而 ZS11 各时期的纤维素含量均高于 18XS172，但只有终花期和青角期差异达极显著水平，与 RPR 结

果一致，推测纤维素含量可能是导致两者茎秆强度差异的主要原因之一。

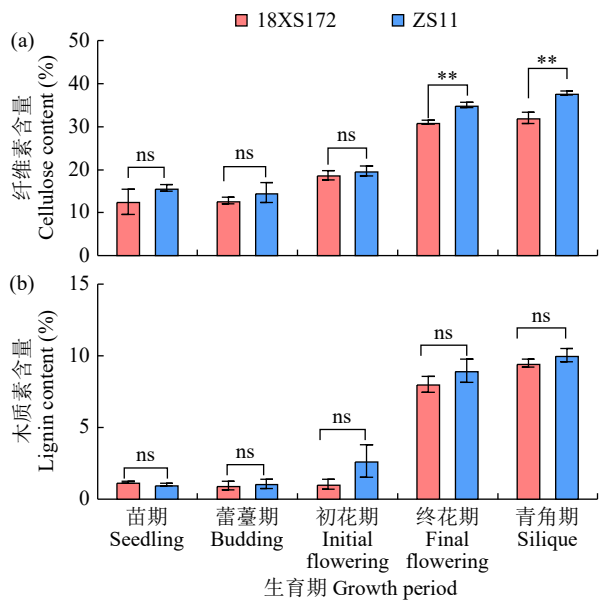


图 4 不同时期 ZS11 和 18XS172 的茎秆纤维素和木质素含量比较
Fig.4 Comparison of stem cellulose and lignin content of ZS11 and 18XS172 at different stages

通过比较各时期茎秆纤维素和木质素含量增长速率发现，18XS172 从蕾薹期到初花期纤维素含量增长较快，到终花期趋于平缓；ZS11 从蕾薹期到终花期纤维素含量持续增加，且初花期到终花期有一个快速增长的过程，并在终花期超过 18XS172（图 5）。ZS11 和 18XS172 的纤维素和木质素含量增长速率均在终花期达到峰值，随后开始下降。18XS172 木质素含量前期增速缓慢，从初花期到终花期快速增加并超过 ZS11；但是 ZS11 从苗期开始持续增加，并且从蕾薹期到终花期一直保持高速增长；ZS11 纤维素和木质素含量快速增长的持续时间高于 18XS172。由此看来，ZS11 茎秆纤维素含量有一个快速且长时间的积累期，并且保持较高的纤维素增长效率，这可能是导致 ZS11 茎秆纤维素含量在终花期后高于 18XS172 的内在原因。

2.4 不同时期 ZS11 和 18XS172 不同部位纤维素、木质素含量相关性分析及叶片和叶柄纤维素、木质素含量比较

为探索是否可以在早期通过测量其他部位的纤维素或木质素含量间接反映 RPR，缩短研究周期，本研究对各时期叶片和叶柄的纤维素和木质素含量进行了分析，青角期由于叶片基本脱落，因此只有茎秆的数据。相关性分析结果（图 6）显示，

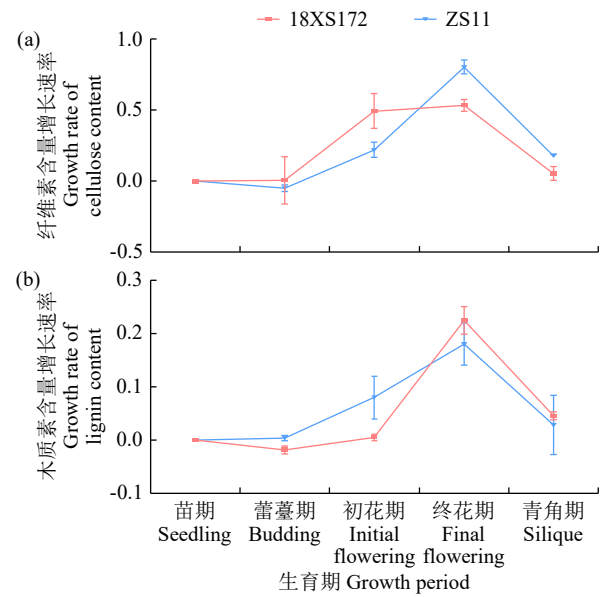


图 5 不同时期 ZS11 和 18XS172 的茎秆纤维素和木质素含量增长速率比较
Fig.5 Comparison of growth rate of stem cellulose and lignin contents of ZS11 and 18XS172 at different stages

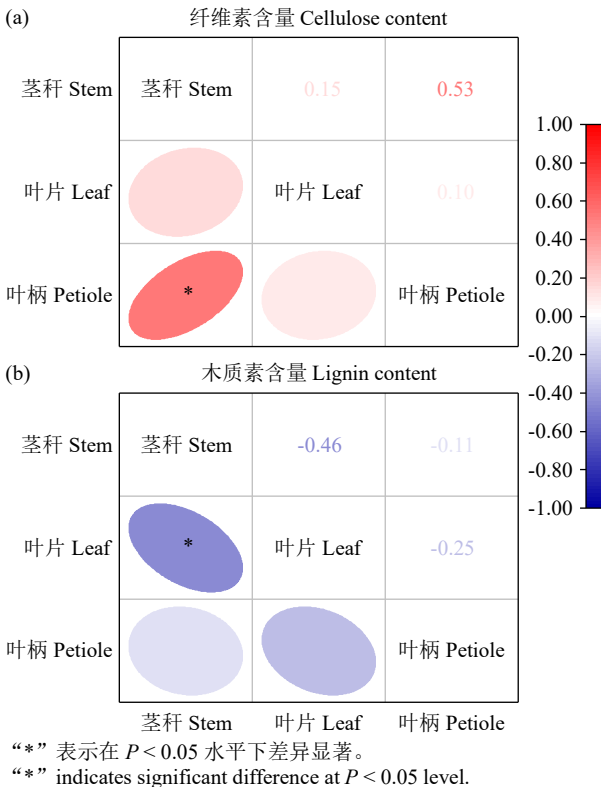


图 6 不同部位纤维素和木质素含量相关性分析
Fig.6 Correlation analysis of cellulose and lignin content in different parts

18XS172 和 ZS11 整体的茎秆与叶柄纤维素含量显著正相关 ($P=0.53$)；茎秆与叶片木质素含量显著负相关 ($P=-0.46$)。分别比较各时期 18XS172 和 ZS11 叶片和叶柄纤维素和木质素含量（图 7）发

现, 18XS172 叶片纤维素含量在苗期、蕾薹期和终花期高于 ZS11, 在初花期低于 ZS11; 而叶柄纤维素含量除苗期高于 ZS11 外, 其他时期均低于 ZS11, 但均未达到显著水平, 而且叶片和叶柄纤维素含量变化规律与各时期茎秆纤维素的变化规律不一致。18XS172 叶片木质素含量在苗期和终花期高于 ZS11, 在蕾薹期和初花期低于 ZS11; 而叶柄木质素含量除蕾薹期高于 ZS11 外其他时期均低于

ZS11, 但均未达到显著水平, 且叶片和叶柄木质素含量变化规律同样与各时期茎秆纤维素的变化规律不一致。因此, 18XS172 和 ZS11 除初花期叶柄的纤维素含量差异显著外, 其他各时期叶片和叶柄纤维素和木质素含量差异均不显著, 且与茎秆纤维素和木质素变化没有一致的规律, 无法作为间接评价指标缩短研究周期, 还需要进一步挖掘其他早期可替代的指标。

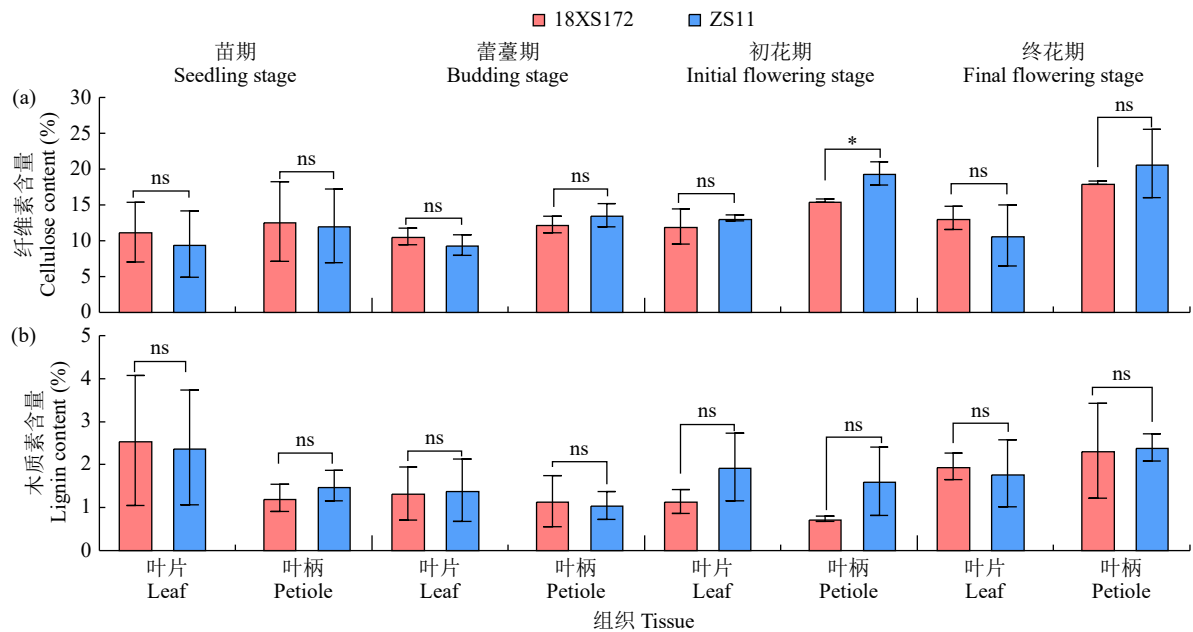


图 7 不同时期 ZS11 和 18XS172 的叶片和叶柄纤维素和木质素含量比较分析
Fig.7 Comparison of cellulose and lignin contents of leaves and petioles in ZS11 and 18XS172 at different stages

2.5 优异种质材料创制及筛选

以 ZS11 为母本、18XS172 为父本进行杂交获得 F₁ 代, 再连续自交获得 F_{2:3} 代共 129 个株系, 测定各株系青角期茎秆穿刺强度。联合收获的各单株 F_{2:4} 代籽粒品质分析结果, 筛选出 2 份含油量>

45%, 且茎秆穿刺强度≥亲本 ZS11 的种质材料。这 2 份材料再通过自交于 2024 年获得 F_{2:5} 代, 同样结合茎秆穿刺强度及籽粒品质分析筛选出 6 份材料并开展相关农艺性状分析。如表 1 所示, 生育期、株高和千粒重等性状已经趋于稳定。各材料生

表 1 创制的高茎秆强度新种质材料相关农艺性状分析
Table 1 Analysis of agronomic traits associated with new germplasm materials created for high stem strength

编号 Number	生育期 Growth period (d)	株高 Plant height (cm)	千粒重 1000-seed weight (g)	每角粒数 Seed number per pod	产量 Yield (kg/hm ²)	含油量 Oil content (%)	茎秆穿刺强度 RPR (N)
24TS496-1	179	158.67	4.19	33.40	5748.30	44.41	36.80
24TS496-2	180	158.41	4.05	33.90	5435.10	43.62	37.50
24TS496-3	177	160.54	3.98	34.30	5524.20	45.64	37.70
24TS624-1	182	158.33	4.53	34.10	6004.80	45.36	43.20
24TS624-2	183	159.47	4.65	33.70	6355.80	45.83	42.10
24TS624-3	180	161.20	4.34	34.80	6690.60	46.25	41.40
ZS11	196.5±1.30**	170.00±0.84**	4.25±0.07**	23.80±0.68**	6450.30±307.80**	40.73±0.77**	37.41±6.96**
18XS172	179.0±0.63	156.33±1.66	4.71±0.12	44.50±0.81	8424.00±248.40	34.65±0.99	26.01±6.78

“**” 表示在 $P < 0.01$ 水平下差异极显著。
“***” indicates extremely significant difference at $P < 0.01$ level.

育期在 177~183 d, 极显著短于 ZS11; 含油量在 44.41%~46.25%, 优于 ZS11; RPR 在 36.80~43.20 N, 与 ZS11 的相当或略高于 ZS11; 由千粒重、每角粒数、产量及含油量来看, 24TS624 的产量要优于 24TS496。其中, 24TS496-3 和 24TS624-3 聚合了短生育期、高茎秆穿刺强度及高含油量等性状, 可以作为新的抗倒伏亲本在育种中进行运用。

3 讨论

3.1 甘蓝型油菜不同部位茎秆穿刺强度及纤维素、木质素含量比较

倒伏影响油菜产量和品质, 增加机械化收获难度。茎秆是植株地上部重要的支撑器官, 增加其机械强度可以有效增加植株抗倒伏能力。本研究通过比较产量和抗倒伏能力差异显著的 2 个材料的茎秆穿刺强度、茎秆木质素和纤维素含量等性状, 发现不同材料间茎秆穿刺强度差异显著, 茎秆纤维素含量从终花期开始差异显著, 推测茎秆机械强度差异是其抗倒伏能力差异的主要原因之一, 并且茎秆机械强度与茎秆纤维素含量密切相关。但是目前机械强度性状测定方法如茎秆穿刺强度、茎秆弯曲应力和茎秆抗折力等主要集中在生育后期^[25-27], 无法在早期结合基因型进行子代测验从而对主效位点进行精细定位。为缩短研究周期、加快其分子生物学机制解析进程, 探索在早期通过其他性状间接反映茎秆机械强度是当前研究重点。基于此, 本研究分析了不同时期叶片和叶柄的纤维素和木质素含量, 并与茎秆不同时期纤维素和木质素含量进行了比较, 发现整体的茎秆纤维素含量与叶柄纤维素含量显著正相关; 茎秆木质素含量与叶片木质素含量显著负相关, 但是各个时期叶片、叶柄纤维素和木质素含量没有明显的变化规律且与茎秆的变化不一致。因此, 不能在早期通过叶片、叶柄纤维素和木质素含量变化间接反映茎秆纤维素和木质素含量及茎秆机械强度来缩短主效位点精细定位周期, 还需探索其他的方法。

3.2 茎秆纤维素和木质素含量增长速率对茎秆强度的影响

作物茎秆强度改变一般伴随有细胞壁组分变化, 纤维素和木质素是主要的细胞壁组分。细胞壁组分(木质纤维素)可以增强植物细胞和组织的机械强度, 从而提高植株的抗倒伏能力^[25,28]及抗病虫

害的能力^[29]。在油菜中也有类似的报道^[30], 如油菜茎秆纤维素含量越高, 抗折力越大, 其抗倒伏能力越强。本研究发现, 茎秆纤维素含量可能是 18XS172 与 ZS11 茎秆强度差异显著的主要原因之一。两者纤维素含量前期差异不显著, 至终花期才差异显著, 推测是否是 ZS11 后期有一个快速木质化的过程, 通过比较两者茎秆纤维素含量的增长速率, 发现两者在终花期均有一个增长高峰, 且在这个时期 ZS11 的增长速率高于 18XS172; 同时, 从蕾薹期到终花期 ZS11 茎秆纤维素含量存在持续增长现象, 而 18XS172 从初花期开始其增长趋于平缓, 推测 ZS11 茎秆纤维素较长的持续增长期形成了较高的纤维素含量, 最终形成了较高的茎秆强度, 具备优异的抗倒伏能力。针对玉米的研究^[31]表明, 快速生长持续期对玉米机械强度更重要, 其贡献率大于其他生长参数, 尤其是干物质和结构性碳水化合物的快速积累持续期长短; 且拔节后 26~29 d 是调控生长最佳时期。但是, 油菜为双子叶植物, 纤维素合成途径及调控基因可能与禾本科的玉米存在一定差异, 并且此前油菜中还未见类似报道, 因此在油菜中是否也存在类似的规律, 还需要进一步证明。

木质素作为细胞壁重要的组分之一, 在作物茎秆强度、抗倒伏能力调控方面影响显著。研究^[25,32]表明, 茎秆木质素含量与茎秆机械性能及抗倒伏能力呈显著正相关; 在抗倒伏品种选育过程中, 茎秆硬度高、木质素与纤维素含量较高的材料抗倒伏能力更好^[33]。但是木质素对油菜抗倒伏能力的贡献受品种影响较大。相对于不抗倒伏品种而言, 抗倒伏油菜品种木质素含量较高, 并且木质素合成相关的酶活性也较高^[32]。何红琼^[34]研究发现, 茎秆穿刺强度和抗折强度呈极显著正相关, 与茎粗、纤维素含量和木质素含量却存在负相关性, 但未达显著水平。张云明等^[35]研究发现, 抗倒伏油菜灌浆后期肉桂醇脱氢酶、过氧化物酶(木质素合成关键酶)和 β -1, 3-葡聚糖酶、蔗糖合成酶(纤维素合成关键酶)的活性显著高于倒伏油菜品种, 推测油菜茎秆纤维素和木质素的累积特性可能是影响油菜茎秆抗倒的原因之一。师恭曜^[20]研究发现, 油菜的抗倒伏率与茎秆单位抗折力和弯曲应力呈显著正相关; 抗倒伏油菜的茎秆木质素含量仅在花期显著高于易倒伏品种, 茎秆纤维素含量在终花期才开始显著高于

易倒伏品种。本研究发现 2 个亲本茎秆的纤维素含量从终花期开始显著, 这与师恭曜^[20]的研究结果一致。抗倒伏油菜 ZS11 茎秆木质素含量从蕾薹期开始高于低茎秆强度材料 18XS172, 但是差异不显著。由前人研究结果来看纤维素和木质素对茎秆强度的贡献受品种影响较大, 一方面, ZS11 和 18XS172 纤维素的贡献可能高于木质素; 另一方面, 木质素对茎秆强度的贡献可能不仅仅体现在含量上, 木质素沉积效率和部位的差异以及木质部、韧皮纤维等的木质化程度差异是否弥补了木质素含量差异还需要进一步分析。

3.3 不同生育期对茎秆抗倒伏性状的影响

在实际生产中, 播种期对油菜品种的抗倒伏性状影响较大。如迟播条件下, 随种植密度增加, 油菜单株产量、倒伏指数、茎秆木质素及纤维素含量等均显著下降, 群体产量及抗倒性增强, 木质素含量与茎秆抗倒伏能力显著正相关^[36]。对于短生育期油菜而言, 适当推迟播期可以增加油菜产量, 但是继续推迟播期会导致产量显著降低^[37]。综上所述, 目前的研究主要集中在播种期对油菜产量相关因素的影响, 以及短生育期油菜产量性状方面, 从不同生育期入手研究抗倒伏相关性状的文献报道较少, 后续可针对这一方向开展相关研究。

4 结论

18XS172 和 26B 等材料抗倒伏能力较高但与 ZS11 还存在显著差异, 需继续改良。ZS11 茎秆穿刺强度从终花期开始显著高于 18XS172, 茎秆纤维素含量表现类似的规律, 推测是两者差异的主要原因之一; 并且 ZS11 的纤维素积累存在一个快速且长期的持续增长期, 可能是其茎秆纤维素含量甚至茎秆强度优于 18XS172 的内在原因。通过杂交/自交结合品质和产量分析等创制了 2 份优异的抗倒伏种质材料 (24TS624-3 和 24TS496-3)。24TS624-3 和 24TS496-3 在保持短生育期 (177~180 d) 的同时, 茎秆穿刺强度与 ZS11 相当或高于 ZS11, 含油量高于 ZS11, 实现了短生育期、高茎秆穿刺强度与高含油量的协同, 可直接作为核心亲本进行不育系和恢复系转育, 配制优异杂交组合。

参考文献

- [1] 冯海棠, 王汉中. 新形势下的我国食用植物油供给安全对策. 中国油料作物学报, 2024, 46(2): 221-227.
- [2] Kuai J, Sun Y Y, Zhou M, et al. 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 Research, 2016, 199: 89-98.
- [3] Weng F, Zhang W J, Wu X R, et al. Impact of low-temperature, overcast and rainy weather during the reproductive growth stage on lodging resistance of rice. Scientific Report, 2017, 7(4): 46596.
- [4] Armstrong E, Nicol H. Reducing height and lodging in rapeseed with growth regulators. Australian Journal Experimental Agriculture, 1991, 31(2): 245-250.
- [5] Berry P M, Sprink J H. Understanding the effect of a triazole with anti-gibberellin activity on the growth and yield of oilseed rape (*Brassica napus*). Journal of Agricultural Science, 2009, 147(3): 273-285.
- [6] 任高峰, 吴宇平, 李海平. 不同时期倒伏对油菜经济性状及产量的影响. 作物研究, 2019, 33(4): 271-273.
- [7] Kendall S L, Holmes H, White C A, et al. Quantifying lodging-induced yield losses in oilseed rape. Field Crops Research, 2017, 211: 106-13.
- [8] 李尧臣, 顾慧, 戚存扣. 抗倒伏甘蓝型油菜 (*Brassica napus* L.) 根和茎解剖学结构分析. 江苏农业学报, 2011, 27(1): 36-44.
- [9] 黄杰恒. 干旱胁迫下油菜抗倒伏相关性状动态变化及木质素关键基因表达特性分析. 重庆: 西南大学, 2013.
- [10] Berry P M, Sterling M, Spink J H, et al. Understanding and reducing lodging in cereals. Advances in Agronomy, 2004, 84(4): 217-269.
- [11] 汪灿, 阮仁武, 袁晓辉, 等. 荞麦茎秆解剖结构和木质素代谢及其与抗倒性的关系. 作物学报, 2014, 40(10): 1846-1856.
- [12] Kong E Y, Liu D C, Guo X L, et al. Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat. The Crop Journal, 2013, 1(1): 43-49.
- [13] Peng D L, Chen X G, Yin Y P, et al. Lodging resistance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): lignin accumulation and its related enzymes activities due to the application of paclobutrazol or gibberellin acid. Field Crops Research, 2014, 157: 1-7.
- [14] Tian Z S, Wang X F, Dun X L, et al. Integrating biochemical and anatomical characterizations with transcriptome analysis to dissect superior stem strength of ZS11 (*Brassica napus*). Frontiers in Plant Science, 2023, 14(5): 11448924.
- [15] Li Y H, Qian Q, Zhou Y H, et al. BRITTLE CULM1, which encodes a COBRA-like protein, affects the mechanical properties of rice plants. The Plant Cell, 2003, 15(9): 2020-2031.
- [16] Yan C J, Yan S, Zeng X H, et al. Fine mapping and isolation of *Bc7(t)*, allelic to *OsCesA4*. Journal of Genetics and Genomics, 2007, 34(11): 1019-1027.
- [17] Kotake T, Aohara T, Hirano K, et al. Rice *Brittle culm 6* encodes a dominant-negative form of CesA protein that perturbs cellulose synthesis in secondary cell walls. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(6): 2053-2062.
- [18] Sato-Izawak K, Nakamura S I, Matsumoto T. Mutation of rice *bcl* gene affects internode elongation and induces delayed cell wall deposition in developing internodes. Plant Signaling Behavior, 2020, 15(5): 1749786.
- [19] Zhang Z H, Zhang X, Lin Z L, et al. A large transposon insertion in the *stiff1* promoter increases stalk strength in maize. The Plant Cell, 2020, 32(1): 152-165.
- [20] 师恭曜. 甘蓝型油菜茎秆抗倒伏性构成因素的鉴定与评价. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [21] 乔春贵. 作物抗倒伏性的综合指标—倒伏指数. 吉林农业大学学报, 1988(1): 7-10, 100-101.

- [22] 田保明, 杨光圣. 农作物倒伏及其评价方法. 中国农学通报, 2005(7): 111-114.
- [23] 国家标准委. 饲料中酸性洗涤木质素 (ADL) 的测定: GB/T 20805-2006. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [24] 农业农村部. 饲料中酸性洗涤纤维的测定: NY/T 1459-2022. 北京: 中国农业出版社, 2022.
- [25] Wei L J, Jian H J, Lu K, et al. Genetic and transcriptomic analyses of lignin- and lodging-related traits in *Brassica napus*. Theoretical and Applied Genetics, 2017, 130(9): 1961-1973.
- [26] Seegmiller W H, Graves J, Robertson D J. A novel rind puncture technique to measure rind thickness and diameter in plant stalks. Plant Methods, 2020, 16(1): 1-8.
- [27] Hou X W, Cheng S A, Wang S K, et al. Characterization and fine mapping of *qRPR1-3* and *qRPR3-1*, two major QTLs for rind penetrometer resistance in maize. Frontiers in Plant Science, 2022, 13(7): 944539.
- [28] 李洪戈. 甘蓝型油菜分枝角度和茎秆倒伏性状的遗传基础解析. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [29] 刘欣婷, 王娟, 侯献飞, 等. 木质素及其合成基因在作物抗倒伏中的功能及其研究进展. 分子植物育种, 2019, 17(2): 655-662.
- [30] 吴莲蓉. 油菜茎秆生化成分和倒伏相关性研究. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [31] Zhan X X, Kong F L, Liu Q L, et al. Maize basal internode development significantly affects stalk lodging resistance. Field Crops Research, 2022, 286: 108611.
- [32] 李扬, 顾慧, 戚存扣. 甘蓝型油菜 (*Brassica napus* L.) RIL 群体抗倒伏及其相关性状的 QTL 分析. 中国油料作物学报, 2014, 36(1): 10-17.
- [33] 宋波. 甘蓝型油菜新品种陕油 28 抗倒伏性研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [34] 何红琼. 甘蓝型油菜茎秆强度相关性状的杂种优势、配合力和相关性分析. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [35] 张云明, 田保明, 师恭曜, 等. 油菜茎秆几种发育相关酶的活性对茎秆抗倒伏性的影响. 中国农学通报, 2011, 27(18): 135-138.
- [36] 巩若琳, 宋波, 杨志叶, 等. 迟播和密度对不同油菜品种抗倒伏及产量的影响. 作物学报, 2023, 49(10): 2777-2792.
- [37] 郑楠. 播种期对短生育期油菜品种生长发育、产量及品质的影响研究. 重庆: 重庆三峡学院, 2025.

Analysis and Application of Stem Strength in Lodging-Resistant Rapeseed (*Brassica napus* L.)

Tian Zhengshu¹, Hong Caiying^{1,2}, Zhang Yusong¹, Luo Yanqing¹, Fu Minglian¹, Li Jinfeng¹

(¹Industrial Crops Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences/Yunnan Key Laboratory of Genetic Improvement of Herbal Oil Crops, Kunming 650205, Yunnan, China;

²College of Agriculture, Yunnan University, Kunming 650504, Yunnan, China)

Abstract Using the lodging resistant rapeseed ZS11 and short-growth-duration rapeseed germplasm with weak lodging resistance as materials, this study investigated differences in lodging degree and stem strength-related traits among different materials and analyzed the possible reasons for the formation of high stem strength. The results showed that there were significant differences in the lodging degree among 22 core germplasm materials with short-growth-duration. Among them, 18XS172 had the lowest lodging degree and the best lodging resistance, but it was still significantly lower than ZS11. The stem puncture strength and stem cellulose content of 18XS172 were significantly lower than those of ZS11 from the final flowering stage onward. Compared with 18XS172, the cellulose content of ZS11 increased continuously from the budding stage to the final flowering stage, reaching a peak at the final flowering stage with a significantly higher accumulation rate. These results suggest that ZS11 has a rapid and prolonged period of cellulose accumulation, which may be the primary reason for its superior stem strength and lodging resistance. Furthermore, two excellent germplasm materials, 24TS624-3 and 24TS496-3, were developed and identified. These materials combine a short growth duration, high stem strength, and high oil content. They can be directly used as parental materials in breeding programs aimed at improving lodging resistance in short-growth-duration rapeseed.

Key words *Brassica napus* L.; Stem strength; Cellulose content; Lignin content; Germplasm development