

基于茎秆生物力学特性的油菜抗倒调控机制研究

李宝军¹, 任奕林^{1*}, 李猛¹, 陈佃贞¹, 欧阳家乐¹, 蒯婕², 周广生²

(1.华中农业大学工学院, 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;

2.华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070)

摘要:为了应用生物力学特性指标对茎秆抗倒性进行评价,进而指导油菜抗倒栽培,以华杂 62 和金油杂 158 为试验材料,基于不同栽培因素下油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度及抗倒性,分析了栽培因素对油菜茎秆力学特性指标的影响及其与抗倒性的相关性。结果表明:油菜抗倒性与茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度呈显著负相关;随着播期推迟,油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度分别减小 15.31%、29.16% 和 13.88%,倒伏指数增大 32.18%;随着播种密度增大,油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度均呈先增大后减小趋势,而倒伏指数先减小后增大;随着施氮量增加,油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度均逐渐减小,而倒伏指数逐渐增大,与施氮量 120 kg·hm⁻² 处理相比,在施氮量为 360 kg·hm⁻² 下,油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度分别减小 39.43%、19.40% 和 16.63%,倒伏指数增大 16.36%。因此,播期提前、适当增加播种密度、控制氮肥投入,有助于提高油菜茎秆的力学特性强度,从而增强油菜的抗倒伏能力。研究结果可为油菜抗倒栽培调控提供理论依据。

关键词:油菜;生物力学;倒伏;栽培因素

doi:10.13304/j.nykjdb.2020.0022

中图分类号:S565.4

文献标识码:A

文章编号:1008-0864(2020)12-0068-09

Regulation Mechanisms of Lodging Resistance in Rapeseed Based on Stems Biomechanical Properties

LI Baojun¹, REN Yilin^{1*}, LI Meng¹, CHEN Dianzhen¹, OUYANG Jiale¹,
Kuai Jie², ZHOU Guangsheng²

(1.Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract:In order to evaluate the lodging resistance of rapeseed stems with biomechanical methods, and provide guidance for anti-lodging cultivation of rape, Huaza 62 and Jinyouza 158 were used to investigate elastic modulus (EM), bending strength (BS), and shear strength (SS) and their lodging resistance under different cultivation factors, the influence of cultivation factors on the mechanical properties of rapeseed stem and its correlation with lodging resistance were analyzed. The results showed as follows: lodging resistance of rapeseed was negatively correlated with EM, BS, and SS; with the delay of sowing date, EM, BS and SS were reduced by 15.31%, 29.16% and 13.88%, respectively, while stem lodging resistant index (CLRI) was increased by 32.18%; EM, BS and SS were increased firstly and then decreased with the increase of sowing density, while CLRI was decreased first and then increased. With the nitrogen fertilizer rate increased, EM, BS and SS were gradually decline, while CLRI rising. EM, BS and SS of 360 kg·hm⁻² were reduced by 39.43%, 19.40% and 16.63%, respectively, compared to treatment of 120 kg·hm⁻², CLRI was increased by 16.36%. In conclusion, the mechanical strength characteristics and the lodging resistance of rapeseed could be enhanced with the delay of sowing date, the slight increase of sowing density and the

收稿日期:2020-01-08; 接受日期:2020-03-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1000900);中央高校基本科研业务费专项(2662020GXPY004)。

联系方式:李宝军 E-mail:L731618663@163.com; *通信作者 任奕林 E-mail:renyilin@mail.hzau.edu.cn

decrease of nitrogen fertilizer rate. This research provided a theoretical basis for rapeseed cultivation.

Key words: rapeseed; biomechanics; lodging resistance; cultivation factor

油菜是我国主要的油料作物之一,随着农业机械化水平的提高,油菜生产成本显著降低^[1-2]。机械化收获是油菜生产中的重要环节^[2],目前,油菜机械化收获的应用依然处于较低水平,倒伏导致油菜机械化收获时效率低是限制其推广的主要因素之一^[3-4]。另外,倒伏会造成油菜产量减少和出油率下降,降低生产效益,影响农户种植油菜的积极性^[5-6]。

油菜倒伏是由自身与外界因素共同作用的结果,茎秆力学性能强度不足是油菜倒伏的主要原因^[7-8]。茎秆的力学特性与其形态特征紧密相关^[9],适当提前播期、减少施氮量和密度,可有效增大作物茎秆的壁厚和充实度,进而提高茎秆的力学特性强度,增强作物的抗倒伏能力^[10-11]。目前,关于栽培因素对油菜倒伏的影响已有大量研究,随着播期推迟,油菜物质生产与转化能力降低,导致植株较弱^[12-13],多数研究认为播种密度越大,作物倒伏问题越严重^[14-17],对油菜而言,一定范围内,播种密度越大,抗倒能力越强^[18],施氮量越大,倒伏越严重^[19-21],然而关于栽培因素对油菜抗倒伏能力的影响机理及油菜抗倒栽培措施调控的相关研究尚不多见。

本研究通过对不同播期、播种密度及施氮量下的油菜茎秆进行力学特性指标及抗倒性进行分析,研究不同栽培因素对油菜茎秆力学特性及抗倒性的影响,旨在为油菜抗倒栽培措施的调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

油菜品种为华杂 62 与金油杂 158,由华中农业大学植物科学技术学院培育并提供。

肥料:尿素(含 N 46%),山西天泽煤化工集团股份有限公司;复合肥(N:P:K=15:15:15),湖北三宁化工股份有限公司;过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),湖北兴发化工集团股份有限公司;农业用硫酸钾(含 K₂O 51%),国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司。

1.2 试验仪器

TMS-Pro 质构仪,量程 0~1 000 N,美国 FTC 公司;酷贝 I-2000 电子秤,量程 0~500 g,精度 0.01 g,深圳市俊仁科技有限公司;数显游标卡尺,量程 0~150 mm,精度 0.01 mm,成都成量工具集团有限公司;卷尺及美工刀等。

1.3 试验处理

试验在华中农业大学试验基地(东经 114.367°、北纬 30.475°)进行,田间试验采用裂区试验设计,以两个品种为主区,3 个播期(S1、S2、S3)、3 个播种密度(D1、D2、D3)和 3 个施氮量(N1、N2、N3)为裂区,试验设计详见表 1。不同播期和播种密度试验处理小区的基肥均为 750 kg·hm⁻²复合肥,苗肥均为 150 kg·hm⁻²尿素;

表 1 不同栽培因素试验设计

Table 1 Schematic representation of experiment design

栽培因素 Cultivation factor	编号 Code	播种时间 Sowing date(mm/dd)	密度 Density/(10 ⁴ plant·hm ⁻²)	氮肥用量 Nitrogen application/(kg·hm ⁻²)
播期 Sowing date	S1	09/20	45	—
	S2	10/01	45	—
	S3	10/10	45	—
播种密度 Sowing density	D1	09/28	45	—
	D2	09/28	60	—
	D3	09/28	75	—
施氮量 Nitrogen application	N1	09/28	45	120
	N2	09/28	45	240
	N3	09/28	45	360

在不同施氮量试验处理小区内,基施磷钾肥一次性均为 $10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮肥的基追比为 5:3:2。小区面积为 20 m^2 ,每个处理 3 个重复,其他管理同常规。

在油菜盛花期(2019 年 3 月 23 日)进行田间取样,每个栽培模式内选取生长良好、茎秆通直、无病虫害与茎秆无明显缺陷、破损及开裂的 15 株油菜,将油菜植株的第一分支点以下至子叶节平均分为 4 段,从下至上依次标记为 1、2、3、4 段,截取第 2 段为试验样本。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 茎秆弯曲特性指标计算方法 弯曲试验开始前,利用数显游标卡尺测量试样的外径 r_1 、内径 r_2 和壁厚等,利用电子天平测定鲜重等基本参数。弯曲试验采用 3 点弯曲方法,试验时支座的标距为 60 mm ,质构仪的压头置于试样的中点位置,以 $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的加载速率对试样施加荷载,计算机自动记录试验数据,当油菜茎秆折断时试验完成。根据计算机输出的位移-载荷曲线,读取最大弯曲载荷,计算油菜茎秆的弹性模量(E)和弯曲强度(σ)^[22-23]。

$$E = P_{\max} L^3 / (48 I y) \quad (1)$$

$$\sigma = 8 P_{\max} L r_1 / \gamma \pi (r_1^4 - r_2^4) \quad (2)$$

式中, P_{\max} 为最大弯曲载荷, N; L 为标距, mm; y 为弯曲挠度, mm; r_1 和 r_2 分别为试样的内外径, mm; γ 为截面塑性发展系数,取 1.15; I 为截面对中性轴的惯性矩, mm^4 。

油菜茎秆截面类似圆形,中心为髓质组织,强度相比外部的厚壁组织可以忽略不计,因此惯性矩(I)按公式(3)计算。

$$I = \pi (r_1^4 - r_2^4) / 4 \quad (3)$$

1.4.2 茎秆剪切特性指标计算 茎秆剪切试验设备、试样制备、试验测量等同弯曲试验。试验仪安装剪切夹具,剪切试验中,剪切刀具置于每段试样的中心位置,以加载速率 $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 加载,试样切断后,根据计算机输出的位移-载荷曲线,读取最大剪切载荷,油菜茎秆的剪切强度按公式(4)计算^[24-25]。

$$\tau = P_{\max} / A \quad (4)$$

$$A = \pi (r_1^2 - r_2^2) / 4 \quad (5)$$

式中, P_{\max} 为最大剪切载荷, N; A 为茎秆试样切面的横截面积, mm^2 。

1.4.3 茎秆抗倒性指标 参照张喜娟等^[26]方法

测定不同栽培因素下油菜茎秆倒伏指数;采用 YYD-1 型茎秆强度测量仪(浙江托普仪器公司)测定试样的抗折力。

$$\text{倒伏指数} = (\text{株高} \times \text{地上部分鲜重}) / \text{抗折力}$$

1.5 数据统计与分析

采用 Microsoft Office Excel 2013、SPSS 21.0 软件进行数据统计和方差分析,单因素方差分析中 $P < 0.05$ 具有统计学意义,利用 Origin 8.6 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同栽培因素下油菜茎秆位移-载荷曲线变化规律

2.1.1 茎秆弯曲位移-载荷曲线变化 不同栽培因素下油菜茎秆弯曲试验的位移-载荷曲线变化规律如图 1 所示。结果表明,虽然不同栽培因素下油菜茎秆所能承受的最大弯曲载荷有明显差异,但其发生弯曲变化的变化规律基本相同。随着弯曲加载位移的增大,不同栽培因素下茎秆受力均呈线性增加,随着茎秆变形的逐渐增大,曲线斜率均逐渐减小,当载荷达到某一值时突然下降,曲线波动直至茎秆纤维组织弯折断裂,由于茎秆中的纤维组织存在一定的韧性,之后曲线出现承载能力回升的趋势。

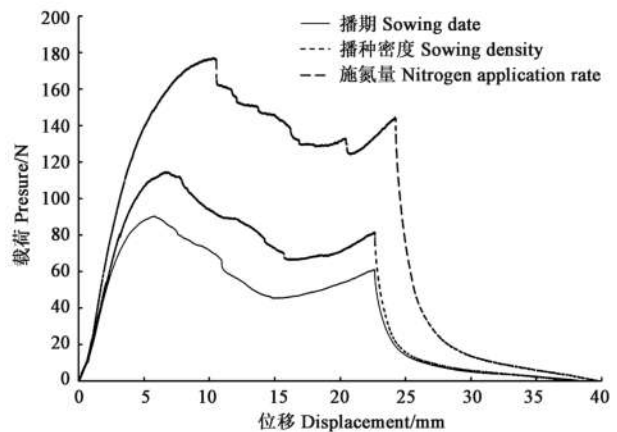


图 1 不同栽培因素下油菜茎秆弯曲位移-载荷曲线
Fig.1 Curve displacement and load of rape stalk under different cultivation factors

2.1.2 茎秆剪切位移-载荷曲线变化 不同栽培因素下油菜茎秆剪切试验的位移-载荷曲线变化规律如图 2 所示。结果表明,虽然不同栽培因素下茎秆最大剪切载荷存在一定差异,但油菜茎秆

剪切位移-载荷曲线变化的规律基本一致。随着剪切加载位移的增大,不同栽培因素下的茎秆受力刚开始均呈线性增大趋势,随着茎秆纤维组织逐渐被切断,应力曲线出现较多波动,当剪切载荷到达某一值后突然下降,之后曲线出现回升趋势,直至茎秆纤维组织全部被切断,茎秆失去承载能力。综上,播期、播种密度及施氮量对油菜茎秆弯曲和剪切载荷的大小造成一定影响,但对应力曲线变化的规律影响不显著。

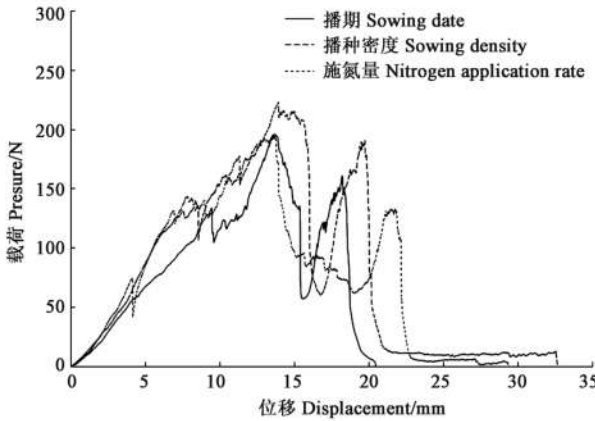


图 2 不同栽培因素下油菜茎秆剪切位移-载荷曲线
Fig.2 Shear displacement-load curve of rape stalk under different cultivation factors

2.2 油菜茎秆的力学特性与倒伏指数相关性分析

2.2.1 茎秆弹性模量与倒伏指数的相关性 为深入探究油菜茎秆的力学特性指标与倒伏指数的关系,对油菜茎秆的弹性模量与倒伏指数进行相关性分析,结果如图 3 所示。华杂 62 和金油杂 158 的线性拟合方程分别为 $y = -26.137x + 88.159$ 和 $y = -20.672x + 78.384$,其相关系数 (R^2) 分别为 0.837 5 和 0.859 4,油菜茎秆的弹性模量与倒伏指数呈线性负相关。

2.2.2 茎秆弯曲强度与倒伏指数的相关性 对油菜茎秆的弯曲强度与倒伏指数进行相关性分析,结果如图 4 所示。华杂 62 和金油杂 158 的线性拟合方程分别为 $y = -12.202x + 66.680$ 和 $y = -9.882x + 59.462$,其相关系数 (R^2) 分别为 0.870 9 和 0.847 7,油菜茎秆的弯曲强度与倒伏指数呈线性负相关。

2.2.3 茎秆剪切强度与倒伏指数的相关性 对油菜茎秆的剪切强度与倒伏指数进行相关性分析,结果如图 5 所示。华杂 62 和金油杂 158 的线

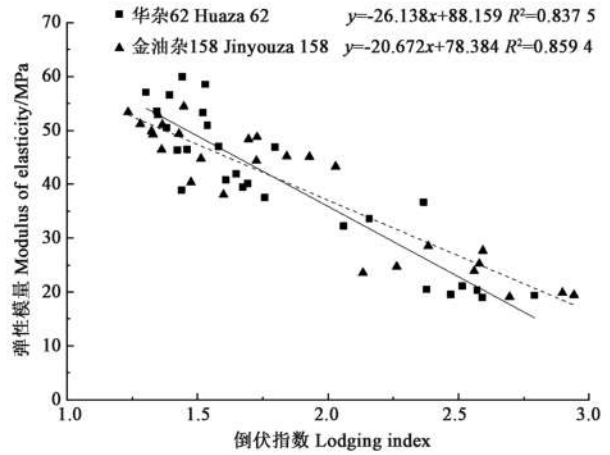


图 3 油菜茎秆弹性模量与倒伏指数的相关性
Fig.3 Correlation between stem elastic modulus and lodging index of rape stem

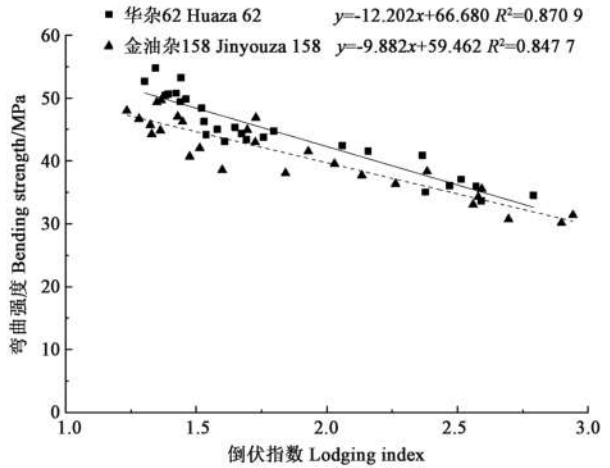


图 4 油菜茎秆弯曲强度与倒伏指数的相关性
Fig.4 Correlation between bending strength and lodging index of rape stem

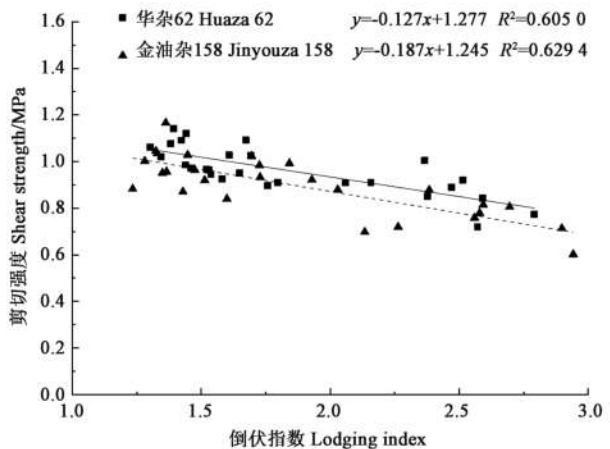


图 5 油菜茎秆剪切强度与倒伏指数的相关性
Fig.5 Correlation between stem shear strength and lodging index of rape stem

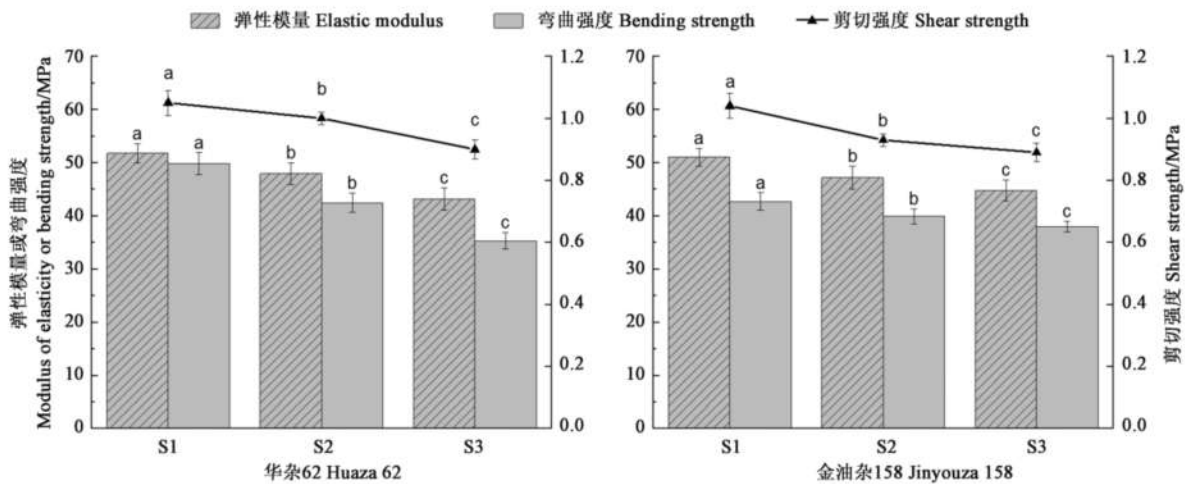
性拟合方程分别为 $y = -0.127x + 1.277$ 和 $y = -0.187x + 1.245$, 其相关系数 (R^2) 分别为 0.605 0 和 0.629 4, 油菜茎秆的剪切强度与倒伏指数呈线性负相关。综上, 油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度与倒伏指数有较高的相关性, 可用来表征油菜茎秆的抗倒伏特性。

2.3 栽培因素对油菜茎秆生物力学特性的影响

2.3.1 播期对油菜茎秆生物力学特性的影响

播期对华杂 62 和金油杂 158 油菜茎秆生物力学特性的影响如图 6 所示。播期对油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度的影响均显著

($P < 0.05$)。随着播期推迟, 华杂 62 和金油杂 158 油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度均逐渐减小。在播期 S3 时, 华杂 62 油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度相比 S1 分别减小 8.61、14.63、0.15 MPa; 金油杂 158 分别减小 7.27、4.70、0.14 MPa。在同一播期时, 两个品种的弹性模量大小差异不明显, 在播期 S2 之前, 华杂 62 的弯曲强度和剪切强度相比金油杂 158 较大, 在播期 S2 以后, 金油杂 158 的力学特性受播期影响逐渐减小。



注: 图中不同字母表示不同播期处理间差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the figure indicate significant difference at $P < 0.05$ level between different sowing date.

图 6 播期对油菜茎秆弹性模量、弯曲强度及剪切强度的影响

Fig.6 Effect of sowing date on elastic modulus, bending strength and shear strength of rape stem

2.3.2 播种密度对油菜茎秆生物力学特性的影响 播种密度对华杂 62 和金油杂 158 油菜茎秆生物力学特性的影响如图 7 所示。播种密度对油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切的强度影响均显著 ($P < 0.05$)。随着播种密度增大, 华杂 62 和金油杂 158 油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度均先增大后减小。在播种密度 D2 下, 华杂 62 油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度相比 D1 分别增大 3.63、3.36、0.04 MPa; 金油杂 158 分别增大 2.66、3.37、0.07 MPa。在同一播种密度下, 华杂 62 油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度均大于金油杂 158, 剪切强度无明显差异。

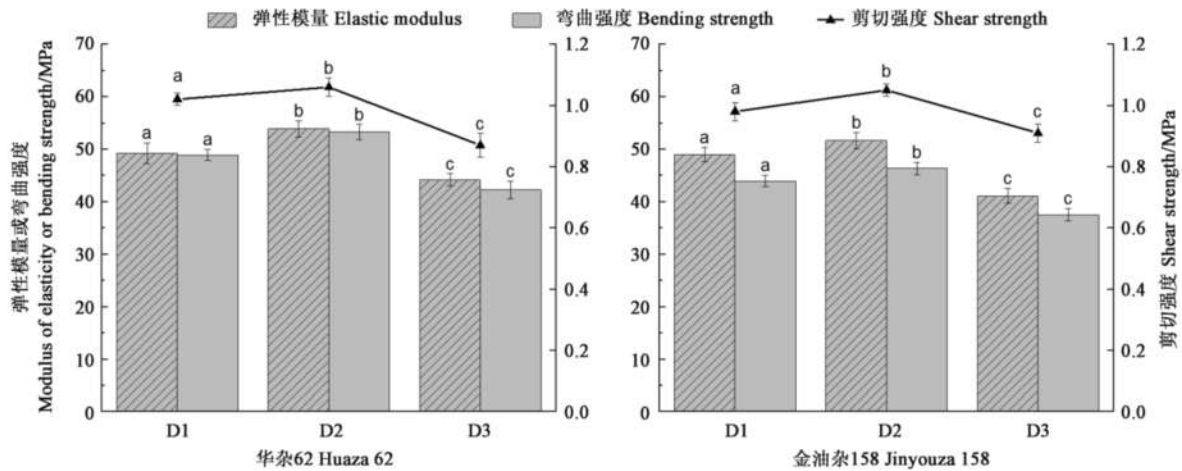
2.3.3 施氮量对油菜茎秆生物力学特性的影响

施氮量对华杂 62 和金油杂 158 油菜茎秆生物力学特性的影响如图 8 所示。施氮量对油菜茎

秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度的影响均显著 ($P < 0.05$)。随着施氮量增大, 华杂 62 和金油杂 158 油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度均逐渐减小。在施氮量 N3 下, 华杂 62 油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度、剪切强度相比 N1 分别减小 14.65、6.92、0.16 MPa; 金油杂 158 分别减小 10.95、8.49、0.11 MPa。在同一施氮量下, 华杂 62 油菜茎秆的弯曲强度、剪切强度均大于金油杂 158, 在施氮量 N1 和 N2 下, 华杂 62 的弹性模量明显大于金油杂 158, 在施氮量 N3 下, 两个品种油菜茎秆的弹性模量无明显差异。

2.4 栽培因素对油菜茎秆抗倒性的影响

栽培因素对华杂 62 和金油杂 158 油菜抗倒性的影响如表 2 所示。方差分析显示, 油菜茎秆的倒伏指数和倒伏角度随栽培因素变化的趋势较

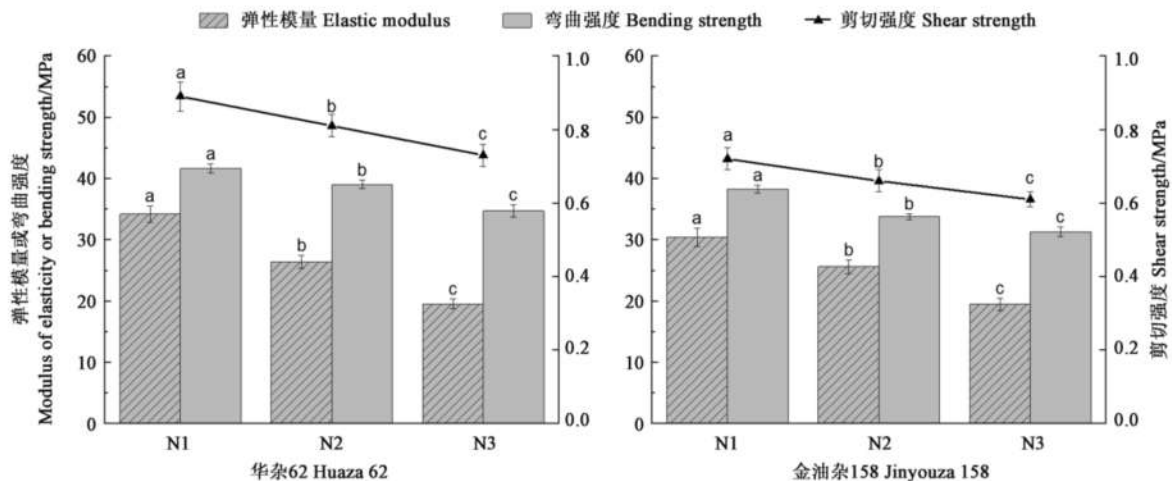


注:图中不同字母表示同一品种不同播期间差异具有统计学意义($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the figure indicate significant difference at $P < 0.05$ level between different sowing date.

图7 播种密度对油菜茎秆弹性模量、弯曲强度及剪切强度的影响

Fig.7 Effect of sowing density on elastic modulus, bending strength and shear strength of rape stem



注:图中不同字母表示同一品种不同播期间差异具有统计学意义($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the figure indicate significant difference at $P < 0.05$ level between different sowing date.

图8 施氮量对油菜茎秆弹性模量、弯曲强度及剪切强度的影响

Fig.8 Effect of nitrogen application on elastic modulus, bending strength and shear strength of rape stem

为一致,受栽培因素的影响均显著($P < 0.05$)。随着播期推迟,华杂62和金油杂158的倒伏指数和倒伏角度均呈增大的趋势,在播期S3时,华杂62与金油杂158油菜茎秆的倒伏指数相比S1分别增大23.91%、40.44%,倒伏角度分别增大52.45%、58.38%;随着播种密度增大,两个品种的倒伏指数和倒伏角度均呈先减小后增大趋势,在播种密度D2下,华杂62和金油杂158油菜茎秆的倒伏指数相比D1分别减小8.33%、16.23%,倒伏角度分别减小24.12%、33.06%;随着施氮量增

加,两个品种的倒伏指数和倒伏角度均呈逐渐增大趋势,在施氮量N3下,华杂62和金油杂158的倒伏指数相比N1分别增大10.96%、21.76%,倒伏角度分别增大39.88%、18.10%。

3 讨论

倒伏问题是影响作物产量的重要因素之一,作物抗倒性主要取决于茎秆的力学特性强度,即力学特性强度越大,作物的抗倒性越好^[8]。本研

表 2 栽培因素对油菜倒伏相关性状的影响

Table 2 Effects of different cultivation modes on lodging related characters of rapeseed

栽培因素 Cultivation factor	处理 Treatment	华杂 62 Huaza 62		金油杂 158 Jinyouza 158	
		倒伏指数 Lodging index	倒伏角度 Lodging angle/(°)	倒伏指数 Lodging index	倒伏角度 Lodging angle/(°)
播期 Sowing date	S1	1.38 c	14.3 b	1.36 c	18.5 c
	S2	1.53 b	19.2 a	1.74 b	26.4 b
	S3	1.71 a	21.8 a	1.91 a	29.3 a
播种密度 Sowing density	D1	1.44 b	19.9 b	1.54 b	24.5 a
	D2	1.32 a	15.1 c	1.29 c	16.4 b
	D3	1.59 c	24.9 a	1.89 a	30.3 a
施氮量 Nitrogen application	N1	2.28 b	33.1 b	2.39 c	46.4 b
	N2	2.41 a	40.6 a	2.58 b	51.3 a
	N3	2.53 a	46.3 a	2.91 a	54.8 a
播期 Sowing date		*	*	**	**
播种密度 Sowing density		**	*	**	*
施氮量 Nitrogen application		*	*	**	*

注:同列不同字母表示同一栽培因素在不同水平间差异在 $P<0.05$ 水平具有统计学意义; * 和 ** 分别表示差异在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平具有统计学意义。

Note: Different letters in the same column indicate that the same cultivation factor is statistically significant at $P<0.05$ level between different cultivation levels; * and ** indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

究结果表明,油菜茎秆的倒伏指数与各力学特性指标呈显著负相关($R^2>0.6$),即油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度越大,茎秆的抗倒伏能力越强,这与前人关于作物茎秆力学特性的研究结果类似。梁莉等^[9]研究发现,高粱、玉米、大豆及谷子等作物茎秆的力学特性指标均与其抗倒伏的形态性状呈负相关,李红波等^[27]和郭玉明等^[28]发现,小麦茎秆的弹性模量、抗弯刚度越大,抗倒伏能力越强。因此,本研究认为弹性模量、弯曲强度及剪切强度可用来表征油菜的抗倒伏特性。

茎秆的力学特性与其形态结构紧密相关^[9],合理的栽培措施可以改善油菜茎秆的形态结构,进而增强茎秆的力学特性强度,提高油菜的抗倒伏能力。本研究结果表明,随着播期推迟,油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度逐渐减小,油菜倒伏问题加重,这与前人关于播期对油菜^[29]、水稻^[30]、亚麻^[31]等抗倒性影响的研究结果基本一致。前人研究认为,播期推迟可能导致作物植株发育不良,茎秆的干物质积累量减少,抗倒伏能力降低。因此,在油菜生产中,适当将播期提前有助于提高茎秆的力学特性强度,从而增强油菜的抗倒伏能力。本研究结果表明,随着播种密度增大,油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度先

增大后减小,倒伏指数先减小后增大,这与前人的结果存在一定的差异。Kuai 等^[34]研究发现,随着播种密度增大,华杂 62 油菜茎秆的倒伏指数呈先减小后增大的趋势,而李小勇等^[17]发现,中双 11 的倒伏指数随着密度的增加而增大,华油杂 9 号的倒伏指数则随着密度的增加先增大后减小。本研究油菜品种为华杂 62 和金油杂 158,不同品种油菜的茎秆结构特性可能不同,进而导致各品种的抗倒性对密度的响应存在一定的差异。在低密度下,油菜个体间对光照、土壤养分等资源的竞争较小,油菜茎秆的粗度较大,抗倒能力较强;播种密度过大时,油菜个体间竞争加剧,茎秆的力学特性强度逐渐减小,抗倒伏能力逐渐降低。因此,生产中应根据油菜的品种特性选择适宜的播种密度,以增强油菜的抗倒伏性。本研究结果表明,随施氮量增加,油菜茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度均逐渐减小,倒伏指数逐渐增大,这与前人关于施氮量对油菜抗倒性的研究结果基本一致。左青松等^[21]、孙盈盈^[32]、蒯婕等^[33]均认为,随着施氮量的增加,油菜茎粗逐渐增大,但茎秆的充实度大大降低,这可能是导致油菜抗倒伏能力逐渐下降的主要原因之一。因此,在保证油菜产量的同时不宜过量施用氮肥,以免增大油菜倒伏发生的风险。

本研究从茎秆生物力学特性角度对油菜抗倒伏栽培调控机制进行了研究,为深入探究油菜的抗倒伏机理提供了数据参考,可为油菜高产抗倒栽培的调控提供科学依据。但本文仅采用了茎秆的弹性模量、弯曲强度及剪切强度 3 个指标进行表征,其他力学特性指标对倒伏能力的评价有待进一步探究。

参 考 文 献

- [1] 谢慧,谭太龙,罗晴,等.油菜产业发展现状及面临的机遇[J].作物研究,2018,32(5):431-436.
XIE H, TAN T L, LUO Q, *et al.*. Development status and opportunities of rape industry [J]. Crop Res., 2018, 32(5): 431-436.
- [2] 周广生,左青松,廖庆喜,等.我国油菜机械化生产现状、存在问题及对策[J].湖北农业科学,2013,52(9):2153-2157.
ZHOU G S, ZUO Q S, LIAO Q X, *et al.*. Mechanical production Status, existing problems and strategy discussion of rapeseed in China [J]. Hubei Agric. Sci., 2013, 52(9): 2153-2157.
- [3] PINTHUS M J. Lodging in wheat, barley, and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measures [J]. Adv. Agron., 1974, 25: 209-263.
- [4] 刘唐兴,官春云,梁勇.油菜倒伏研究进展[J].作物研究,2007(2):140-144.
LIU T X, GUAN C Y, LIANG Y. Research of rapeseed lodging [J]. Crop Res., 2007 (2): 140-144.
- [5] 周晓彬,肖数数,王莹莹,等.油菜倒伏问题研究进展[J].湖北农业科学,2011,50(20):4105-4108.
ZHOU X B, XIAO S S, WANG Y Y, *et al.*. Research progress of rapeseed lodging [J]. Hubei Agric. Sci., 2011, 50(20): 4105-4108.
- [6] 孙盈盈,刘婷婷,杨海燕,等.油菜茎秆特性与抗倒性及产量的关联研究[J].湖北农业科学,2014,53(20):4796-4801.
SUN Y Y, LIU T T, YANG H Y, *et al.*. The correlation between the growth characteristics of rapeseed stalk and its yield and the lodging resistance [J]. Hubei Agric. Sci., 2014, 53(20): 4796-4801.
- [7] 袁志华,冯宝萍,赵安庆,等.作物茎秆抗倒伏的力学分析及综合评价探讨[J].农业工程学报,2002,18(6):30-31.
YUAN Z H, FENG B P, ZHAO A Q, *et al.*. Dynamic analysis and comprehensive evaluation of crop-stem lodging resistance [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2002, 18(6): 30-31.
- [8] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.农作物茎秆的力学特性研究进展[J].农业机械学报,2007,38(7):172-176.
LIU Q T, QU Y G, QING S L, *et al.*. Study progress on mechanics properties of crop stalks [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Mach., 2007, 38(7): 172-176.
- [9] 梁莉,郭玉明.作物茎秆生物力学性质与形态特性相关性研究[J].农业工程学报,2008,24(7):1-6.
LIANG L, GUO Y M. Correlation study of biomechanical properties and morphological characteristics of crop stalks [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2008, 24(7): 1-6.
- [10] 李华英,代兴龙,张宇,等.播期对冬小麦产量和抗倒性能的影响[J].麦类作物学报,2015,35(3):357-363.
LI H Y, DAI X Y, ZHANG Y, *et al.*. Effect of sowing date on grain yield and lodging resistance of winter wheat [J]. J. Triticeae Crops, 2015, 35(3): 357-363.
- [11] 杨世民,谢力,郑顺林,等.氮肥水平和栽插密度对杂交稻茎秆理化特性与抗倒伏性的影响[J].作物学报,2009,35(1):93-103.
YANG S M, XIE L, ZHENG S L, *et al.*. Effects of nitrogen rate and transplanting density on physical and chemical characteristics and lodging resistance of clumps in hybrid rice [J]. Acta Agron. Sin., 2009, 35(1): 93-103.
- [12] SCOTT R K, OGUNREMI E A, IVINS J D, *et al.*. The effect of sowing date and season on growth and yield of oilseed rape (*Brassica napus*) [J]. J. Agric. Sci., 1973, 81(2): 277-285.
- [13] 廖桂平,官春云.不同播期对不同基因型油菜产量特性的影响[J].应用生态学报,2001,12(6):853-858.
LIAO G P, GUAN C Y. Effect of seeding date on yield characteristics of different rapeseed (*Brassica napus*) genotypes [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 12(6): 853-858.
- [14] 马竟,张春雷,李俊,等.种植密度对直播油菜结实期源库关系及产量的调节[J].中国油料作物学报,2009,31(2):180-184.
MA N, ZHANG C L, LI J, *et al.*. Regulation of planting density on source-sink relationship and yield at seed-set stage of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2009, 31(2): 180-184.
- [15] 勾玲,黄建军,张宾,等.群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响[J].作物学报,2007,33(10):1688-1695.
GOU L, HUANG J J, ZHANG B, *et al.*. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize [J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(10): 1688-1695.
- [16] SKUBISZ G. The effect of sowing density on the lodging and mechanical properties of rape stems [J]. Int. Agrophys., 1996, 10(4): 303-307.
- [17] 李小勇,周敏,王涛,等.种植密度对油菜机械收获关键性状的影响[J].作物学报,2018,44(02):278-287.
LI X Y, ZHOU M, WANG T, *et al.*. Effects of planting density on the mechanical harvesting characteristics of semi-winter rapeseed [J]. Acta Agron. Sin., 2018, 44(02): 278-287.
- [18] KUAI J, SUN Y Y, ZUO Q S, *et al.*. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing [J]. Sci. Rep., 2015, 5: 231-250.
- [19] 李静,闫金垚,胡文诗,等.氮钾配施对油菜产量及氮素利用的影响[J].作物学报,2019,45(6):941-948.
LI J, YAN J Y, HU W S, *et al.*. Effects of combined application of nitrogen and potassium on seed yield and nitrogen utilization of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Acta Agron. Sin., 2019, 45(6): 941-948.
- [20] RATHKE G W, CHRISTEN O, DIEPENBROCK W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter

- oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations [J]. *Field Crops Res.*, 2004, 94(2): 103-113.
- [21] 左青松, 蒯婕, 杨士芬, 等. 不同氮肥和密度对直播油菜冠层结构及群体特征的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(5): 758-765.
- ZUO Q S, KUAI J, YANG S F, *et al.*. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on canopy structure and population characteristics of rapeseed with direct seeding treatment [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2015, 41(5): 758-765.
- [22] 马征, 李耀明, 徐立章. 油菜茎秆弹性力学特性试验研究[J]. *农机化研究*, 2016, 38(5): 187-191.
- MA Z, LI Y M, XU L Z. Experimental research of elastic mechanics of rape stalks [J]. *J. Agric. Mech. Res.*, 2016, 38(5): 187-191.
- [23] 单辉祖. 材料力学(I) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 144-145, 169.
- SHAN H Z. *Mechanics of Materials (I)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 144-145, 169.
- [24] 李小城. 收获期小麦茎秆力学特性参数的试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 硕士学位论文, 2012.
- LI X C. Experimental research on the mechanical physical parameters of wheat stalks in harvesting period [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, Master Dissertation, 2012.
- [25] 吴明亮, 官春云, 汤楚宙, 等. 油菜茎秆切割力影响因素试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 141-144.
- WU M L, GUAN C Y, TANG C Z, *et al.*. Experiments on influencing factors of cutting force of rape stem [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.*, 2009, 25(6): 141-144.
- [26] 张喜娟, 李红娇, 李伟娟, 等. 北方直立穗型粳稻抗倒性的研究[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2305-2313.
- ZHANG X J, LI H J, LI W J. *et al.*. The lodging resistance of erect panicle japonica rice in northern China [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2009, 42(7): 2305-2313.
- [27] 李红波, 郭玉明, 陈维毅. 冬小麦茎秆的力学性质研究[J]. *太原理工大学学报*, 2006, 37(1): 31-34.
- LI H B, GUO Y M, CHEN W Y. A study of the mechanical properties of winter wheat stem [J]. *J. Taiyuan Univ. Technol.*, 2006, 37(1): 31-34.
- [28] 郭玉明, 袁红梅, 阴妍, 等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 14-18.
- GUO Y M, YUAN H M, YIN Y, *et al.*. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2007, 23(7): 14-18.
- [29] 胡敏, 李小坤, 王振, 等. 播期对油菜绿肥生物量及养分积累的影响[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(4): 657-660.
- HU M, LI X K, WANG Z, *et al.*. Effects of sowing date on biomass and nutrient accumulation of oilseed rape as green manure [J]. *Hubei Agric. Sci.*, 2017, 56(4): 657-660.
- [30] 雷小龙, 刘利, 刘波, 等. 杂交籼稻F优498机械化种植的茎秆理化性状与抗倒伏性[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(6): 612-620.
- LEI X L, LIU L, LIU B, *et al.*. Physical and chemical characteristics and lodging resistance of culm of indica hybrid rice F You 498 under mechanical planting [J]. *Chin. J. Rice Sci.*, 2014, 28(6): 612-620.
- [31] 张兴, 揭雨成, 邢虎成, 等. 洞庭湖区稻田冬播亚麻原茎与种子兼收抗倒伏高产栽培技术研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(15): 92-97.
- ZHANG X, JIE Y C, XING H C, *et al.*. Cultivation techniques of lodging resistance and high yield of stem and seed of winter flax in paddy field of Dongting Lake [J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2014, 30(15): 92-97.
- [32] 孙盈盈. 不同栽培措施对油菜产量及抗倒性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 硕士学位论文, 2016.
- SUN Y Y. Effect of different cultivation measures on rapeseed yield and lodging resistance [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, Master Dissertation, 2016.
- [33] 蒯婕, 左青松, 陈爱武, 等. 不同栽培模式对油菜产量和倒伏相关性状的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(6): 875-884.
- KUAI J, ZUO Q S, CHEN A W, *et al.*. Effects of different cultivation modes on canola yield and lodging related indices [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2017, 43(6): 875-884.
- [34] 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.) [J]. *Field Crops Res.*, 2016, 199: 89-98.

(责任编辑:温小杰)