

减源对密植夏玉米品种抗倒伏性能及产量的调控效应

肖金宝^{1,2},王海琦^{1,2},王佩^{1,2},杨胜飞^{1,2},刘铁宁^{1,2},韩清芳^{1,2},贾志宽^{1,2}

(1.西北农林科技大学农学院,中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100;

2.农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:于2019年和2020年采用二因素裂区试验设计,主区为不同耐密性高产品种:郑单958(紧凑型)和正大12(半紧凑型);副区为减源强度:在花前一周从上至下分别移除植株1片叶(D1)、2片叶(D2)、3片叶(D3)和4片叶(D4),以不做任何处理为对照(CK)。对乳熟期和蜡熟期的玉米植株形态、基部第3节间的穿刺强度、折断力及籽粒产量构成因素等指标进行分析,探究密植玉米植株抗倒伏性能及籽粒产量对叶源减少的响应。结果表明:乳熟期,D1、D2处理的株高、穗位高和穗位系数较CK分别显著降低1.03%、3.03%、2.29%、6.17%和1.32%、4.17%,茎粗和单位茎干物质质量较CK分别增加4.15%、33.94%和1.91%、5.72%。蜡熟期,D2处理时郑单958的穿刺强度和折断力较CK分别提高了26.51%和32.44%,正大12的穿刺强度和折断力较CK分别提高了55.28%和21.53%。灌浆期,郑单958和正大12的D2处理可溶性糖含量较CK分别增加2.91%和10.83%,木质素含量分别增加2.74%和6.90%,D3、D4处理的纤维素含量较CK分别降低1.17%和0.47%、11.57%和13.72%。D2处理的总倒伏率显著降低且产量最高,郑单958达11 203.90 kg·hm⁻²,正大12达11 742.34 kg·hm⁻²。可见,适度去除顶部1~2片叶可优化夏玉米株型,通过影响茎粗使节间、单位节间干物质质量得到更好地分配,从而提升抗倒伏性能,改善干物质向籽粒的分配进程,最终实现产量提高。

关键词:减源处理;夏玉米;密植;株型;抗倒伏;产量

中图分类号:S513;S35 **文献标志码:**A

Regulating effects of leaf source reduction on lodging resistance and yield of summer maize varieties in dense planting

XIAO Jinbao^{1,2}, WANG Haiqi^{1,2}, WANG Pei^{1,2}, YANG Shengfei^{1,2},

LIU Tiening^{1,2}, HAN Qingfang^{1,2}, JIA Zhikuan^{1,2}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage Science in Northwest Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A two-factor split-zone experiment was conducted in 2019 and 2020. The experiment involved different density-tolerance maize cultivars (main plot) and leaf source reduction intensity (sub plot). The two maize cultivars were Zhengdan 958 (compact) and Zhengda 12 (semi-compact). The leaf source reduction intensity including 1 leaf (D1), 2 leaves (D2), 3 leaves (D3) and 4 leaves (D4) of the plant were removed from top to bottom one week before flowering, and the treatment with no leaves removal was used as control (CK). The plant morphology, puncture strength and breaking force of the third internode at milk-ripe stage and waxy-ripe stage, grain yield components of maize were analyzed to explore the response of lodging resistance and grain yield to leaf source reduction. The results showed that the plant height, spike height, and spike coefficient were significantly lower by 1.03%、3.03%、2.29%、6.17% and 1.32%、4.17%, and the stem diameter and dry matter per stem length were in-

收稿日期:2021-10-20

修回日期:2022-06-24

基金项目:国家自然科学基金(31601256);中国博士后科学基金(2016M602869)

作者简介:肖金宝(1995-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,研究方向为旱区高效农作制度与作物栽培技术。E-mail:Shawjinbao@163.com

通信作者:刘铁宁(1987-),女,河北邢台人,副教授,主要从事玉米高产优质高效栽培理论与技术研究。E-mail:ltlove319@nwsauf.edu.cn

creased by 4.15%、33.94% and 1.91%、5.72% in D1 and D2 treatments compared to CK at lactation. At the waxy-ripe stage, the puncture strength and breaking force of Zhengdan 958 under the D2 treatment were 26.51% and 32.44% higher than CK, and that in Zhengda 12 were 55.28% and 21.53% higher. During the filling stage, the soluble sugars of Zhengdan 958 and Zhengda 12 increased by 2.91% and 10.83% respectively, and the lignin contents increased by 2.74% and 6.90% under the D2 treatment, compared with CK. The cellulose contents of the D3 and D4 treatments were decreased by 1.17% and 0.47%, 11.57% and 13.72% than CK, respectively. The total lodging rate of the D2 treatment was significantly decreased and the yield was the highest, Zhengdan 958 reached 11 203.90 kg · hm⁻², Zhengda 12 reached 11 742.34 kg · hm⁻². In summary, reducing leaf sources improved the lodging resistance of dense planting summer maize. There was leaf redundancy in the dense planting maize population. Therefore, moderate removal of the top 1~2 leaves optimized the plant architecture of summer maize, improved the lodging resistance by affecting stem diameter, allowing better distribution of dry matter, and finally increased the yield.

Keywords: leaf source reduction; summer maize; dense planting; plant traits; lodging resistance; yield

生产上,可依靠增加玉米种植密度、提高资源利用效率来实现产量的提升^[1-2]。适当增加密度可以协调群体和个体的关系,在生长周期内具有更高的光合效能和干物质积累量^[3]。绿色植物的光合作用越强,所需的叶面积系数就越大,最终果实获得的营养也相应增多。目前生产上常通过增大种植密度来实现光合作用面积的增加^[4]。但玉米群体过大时,玉米植株对单位空间内光、温、水、肥的竞争加剧,造成单株长势不良、茎秆纤细,生育后期玉米群体倒伏风险增大。玉米倒伏会破坏玉米良好的空间冠层结构,影响玉米群体光合作用和呼吸效率,造成营养物质运输不畅,严重影响产量。此外,现代农业对机械化的依赖,对密植玉米的抗倒伏性能有了更高的要求。因此,通过合理措施使玉米植株获得更好的抗倒伏能力,是生产上迫切需要解决的问题^[5]。

密植作物需要其自身有较好的冠层结构,玉米植株 90% 以上的干物质都源于其光合作用,过高的种植密度必然会使光能分配不均。王海琦、Liu 等^[6-7]发现,减少植株顶部冗余叶片后,可以优化密植夏玉米冠层给光分布状态,表明密植作物减源是提高产量的有效措施。前人研究得出株高、穗位高、基部节间长、茎粗等农艺性状和茎秆穿刺强度、压碎强度等力学指标均与倒伏有不同程度的相关关系,密度不同或因熟期不同对倒伏均有不同的影响;重心与株高高度相关,株高越高,植株冠层越大,重心越高,植株越容易倒伏^[8-9]。通过减源改善密植玉米抗倒性能尚鲜有研究,此处理对优化中部冠层结构、改善夏玉米抗倒伏性能的具体影响尚未可知。本试验通过人工控制叶源数量,探索减源对不同株型夏玉米植株性状及茎秆抗倒伏能力的影响机制,以期为本地区密植夏玉米高产抗倒研究提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究于 2019—2020 年在陕西杨凌进行。夏玉米生长季平均降水量为 407.6 mm,平均气温约为 23.8℃,高温和降雨多集中于夏季,属典型的旱作雨养农业区。土质为壤土,播前测得 0~20 cm 土层有机质含量为 14.11 g · kg⁻¹,全氮为 4.27 g · kg⁻¹,速效钾为 267.23 g · kg⁻¹,速效磷为 24.09 g · kg⁻¹,冬小麦为前茬作物。图 1 为夏玉米生长季主要气象因素。

1.2 试验设计

本研究采用二因素裂区试验,主因素为试验品种,选用两个玉米品种:紧凑型品种郑单 958,半紧凑型品种正大 12;副因素为减源处理,在开花前一周左右对两株型夏玉米从上至下分别移除植株 1 片叶(D1)、2 片叶(D2)、3 片叶(D3)和 4 片叶(D4),以不做任何处理为对照(CK)。共 10 个处理,3 次重复,种植密度设置为 8.25 万株 · hm⁻²。试验地施加纯氮 225 kg · hm⁻²,磷 120 kg · hm⁻²。氮肥基追比为 3:2,磷肥于播前一次性施入。两株型品种减源处理部位相同,处理植株均为小区(35 m²,处理间纵向排布,重复间横向排布)内的全部夏玉米,其他管理同大田。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 植株形态指标测定 分别于夏玉米的乳熟期、蜡熟期,各小区取 3 株有代表性的完整夏玉米植株,测定株高、穗位高、茎粗和节间长等茎秆形态特征。将测定干物质的样品于 100℃ 杀青 30 min 后置于 80℃ 烘干至恒重,称取干质量。相关计算公式如下:

$$\text{穗位系数} = \text{穗位高} / \text{株高};$$

$$\text{单位茎长干质量} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-1}) = \text{节间干物质质量} / \text{节间长度}^{[10]}。$$

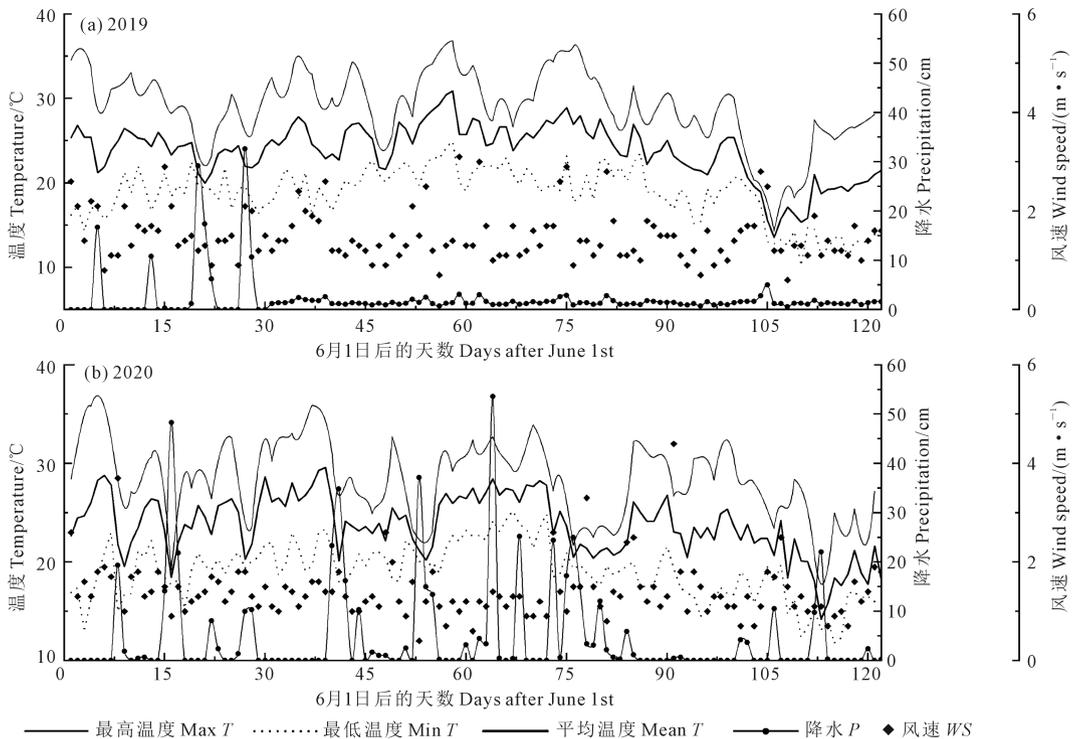


图 1 夏玉米生育期气象因素

Fig.1 Meteorological factors of summer maize growth period

1.3.2 节间穿刺强度和折断力测定 应用抗倒伏测定仪(YXD-1型,浙江杭州绿博仪器有限公司)测定茎秆硬皮穿刺强度及折断力,测定部位为地上部第3节间^[11]。

1.3.3 节间养分含量测定 硫酸蒽酮法测定可溶性糖和纤维素含量,72%硫酸酸解-滴定法测定木质素含量。

1.3.4 倒伏率测定 从夏玉米乳熟期至蜡熟期于田间多次观察统计倒伏情况。将玉米穗位叶以下茎节弯曲或折断统计为“茎折”,植株倾角大于45°而茎秆维持挺直的倒伏统计为“根倒”^[12-13]。相关计算公式如下:

茎折倒伏率(%) = 单位面积茎折植株数/单位面积总植株数×100

根倒倒伏率(%) = 单位面积根倒植株数/单位面积总植株数×100

总倒伏率(%) = 单位面积总倒伏植株数/单位面积总植株数×100

1.3.5 产量及产量构成因素测定 在夏玉米籽粒完熟期,对各处理测产小区中间3行玉米进行全株收获,应用均值法在有效穗数中选取10穗,待自然风干后进行室内考种^[10]。

1.4 数据整理与统计分析

应用 Microsoft excel 2010 整理试验所得数据,使用 SPSS 25 进行方差分析和多重比较(Duncan法),并用软件 Origin 18 进行制图。

2 结果与分析

2.1 减源对密植夏玉米群体形态的调控效应

由表1可知,减源处理改变了夏玉米植株高度、穗位高以及穗位系数。D2处理显著降低了夏玉米株高和穗位高。2019年乳熟期和蜡熟期,郑单958在D2、D3、D4处理下株高较CK均显著下降,降幅为1.43%~3.21%,D1和D2处理穗位高显著下降,降幅为2.92%~6.91%,D2处理穗位系数均最低,较CK显著下降0.02;正大12在处理后期株高均显著下降,降幅为1.43%~5.86%,D2处理下两时期穗位高分别显著下降6.51%和6.33%,穗位系数均有所降低,蜡熟期显著降低0.01。2020年D2处理两时期郑单958株高、穗位高和穗位系数均显著下降,平均为1.98%、6.94%和0.01;正大12仅蜡熟期穗位高和穗位系数显著降低4.80%和0.02。两年的结果表明减源降低了玉米株高、穗位高和穗位系数,且去除植株顶部2片叶时各指标降低最为显著。

表 1 不同株型夏玉米的植株性状

Table 1 Plant characters of different plant architectures of summer maize

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	乳熟期 Milky-ripe stage			蜡熟期 Waxy-ripe stage			
			株高/cm Plant height	穗位高/cm Ear height	穗位系数 Ear coefficient	株高/cm Plant height	穗位高/cm Ear height	穗位系数 Ear coefficient	
2019	郑单 958 Zhengdan 958	CK	256.33a	101.33b	0.40b	259.33a	102.67b	0.40b	
		D1	256.00a	96.60c	0.38c	258.00a	99.67c	0.39bc	
		D2	247.83c	94.33d	0.38c	252.33c	95.67d	0.38c	
		D3	252.67b	103.80a	0.41a	254.00b	104.00ab	0.41a	
		D4	249.27c	103.00ab	0.41a	251.00c	105.33a	0.42a	
	正大 12 Zhengda 12	CK	278.67a	125.33a	0.45c	280.67a	126.00a	0.45c	
		D1	273.00b	125.67a	0.46b	276.67b	127.67a	0.46b	
		D2	271.36b	117.17d	0.43c	273.00c	119.67b	0.44d	
		D3	268.00c	120.00c	0.45c	275.00bc	126.00a	0.46b	
		D4	262.33d	123.33b	0.47a	267.67d	126.67a	0.47a	
	2020	郑单 958 Zhengdan 958	CK	258.00b	101.36b	0.39b	261.37c	108.10ab	0.41a
			D1	258.50b	102.00b	0.39b	267.43b	105.67b	0.40a
D2			252.17c	96.33c	0.38c	256.90d	98.47c	0.38b	
D3			260.67ab	105.33a	0.40a	275.73a	110.97a	0.40a	
D4			263.33a	101.67b	0.39ab	269.27b	110.87a	0.41a	
正大 12 Zhengda 12		CK	275.33d	118.00bc	0.43ab	277.57c	125.10a	0.45a	
		D1	278.67bc	120.00ab	0.43a	281.93bc	124.13ab	0.44ab	
		D2	277.00cd	115.00c	0.42c	278.20c	119.10b	0.43bc	
		D3	288.67a	121.00ab	0.42c	289.70a	122.03ab	0.42c	
		D4	281.00b	122.67a	0.44a	285.53ab	123.03ab	0.43bc	

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Values followed by different lowercase letters in the column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 减源对密植夏玉米易倒伏节间性状的影响

2.2.1 不同减源处理对夏玉米茎秆节间长度的影响

由图 2 可得,减源处理对密植夏玉米基部第 3 节间长度整体影响较小,郑单 958 第 3 节间长度略低于正大 12,且在不同年际间相对稳定。2019 年, D1、D2、D3 处理后郑单 958 在乳熟期节间长度均显著下降,降幅分别为 4.01%、3.48%、3.66% ($P<0.05$),蜡熟期各处理均有所下降,仅 D2 处理与 CK 差异显著,降幅为 3.17% ($P<0.05$);正大 12 节间长度有所下降但整体差异不显著。2020 年,减源处理后郑单 958 乳熟期节间长度显著下降,降幅分别为 6.38%、3.99%、5.32%、7.71% ($P<0.05$),蜡熟期虽有所下降但差异不显著,正大 12 蜡熟期节间长度有所上升。与半紧凑型品种相比,减源处理对紧凑型品种的玉米节间长度改善更明显。

2.2.2 不同减源处理对夏玉米节间茎粗的影响

减源处理对乳熟期两株型品种夏玉米第 3 节间茎粗影响显著,且对紧凑型品种郑单 958 的调控效应略优于正大 12(图 3)。2019 年,郑单 958 D1、D2、D3 处理乳熟期和蜡熟期茎粗较 CK 均显著增加,平均增幅分别为 17.38%、17.93%、9.58% ($P<0.05$);正大 12 乳熟期 D3 处理和蜡熟期 D2 处理分别较对照增加 3.99% 和 3.24%。2020 年,郑单 958 乳熟期的

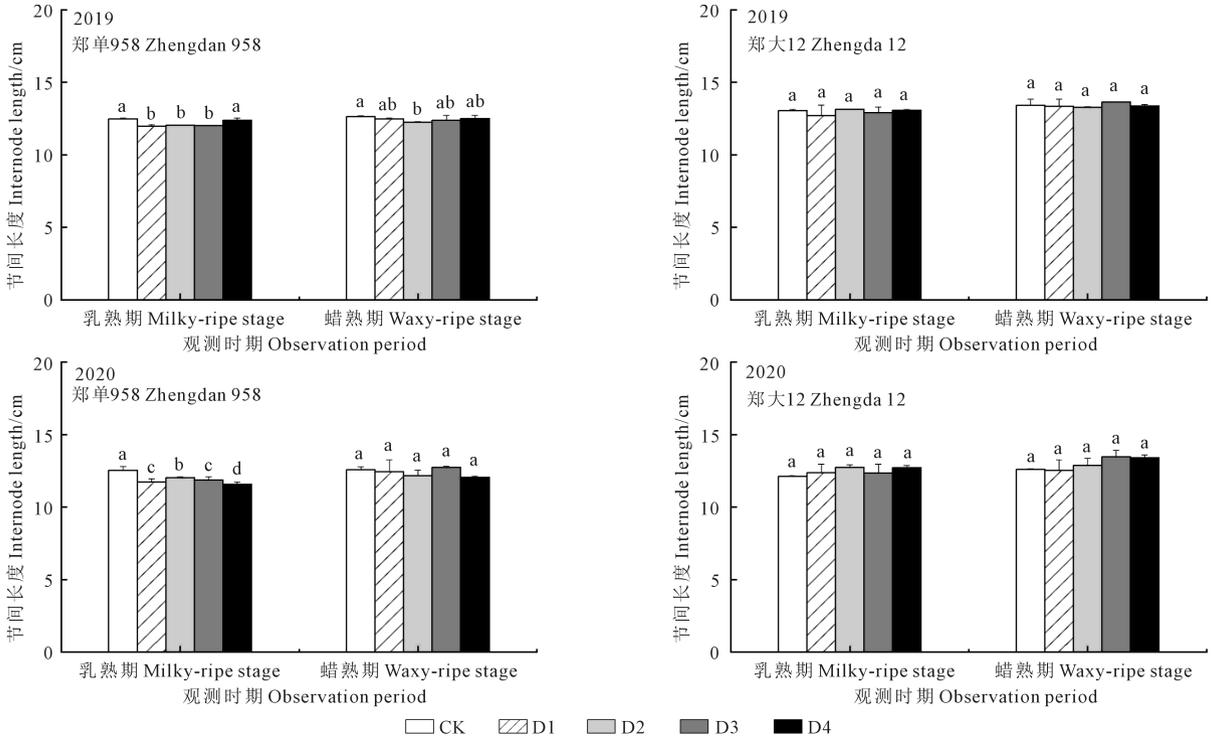
D2、D3 处理茎粗较 CK 分别显著增加 9.23% 和 9.61% ($P<0.05$),蜡熟期增加 8.08%、5.98%,但差异不显著;正大 12 各处理茎粗均有一定增加,增幅为 5.52%~10.51%,其中 D2、D3、D4 处理分别显著增加 10.51%、7.86% 和 9.27% ($P<0.05$)。综合比较 D2 处理茎粗增加明显,各处理平均增加 9.24%,表明移除植株顶端 2 片叶处理后玉米茎粗处于较优状态,茎粗在蜡熟期变化较小。

2.2.3 不同减源处理对夏玉米茎秆节间干物质量的影响

由图 4 可得,减源处理显著影响了蜡熟期两个株型夏玉米品种的茎秆第 3 节间干物质量,不同年际间变化趋势相同,郑单 958 的节间干物质量大于正大 12。2019 年郑单 958 蜡熟期 D2、D3、D4 处理节间干物质量均较 CK 显著增加,分别为 101.42%、43.54%、32.79% ($P<0.05$),D2 处理节间干物质量增加明显大于其他处理;正大 12 蜡熟期 D2 处理节间干物质量较 CK 显著增加了 29.31% ($P<0.05$)。2020 年,郑单 958 在乳熟期节间干物质量较 2019 年同期有所降低,D1、D2、D3 处理蜡熟期节间干物质量均显著增加,分别为 11.18%、34.31%、30.57% ($P<0.05$),正大 12 在两个时期各处理的节间干物质量均显著增加,平均增幅分别为 14.06% 和 26.23%,其中 D2 处理增幅最大,分别为 16.72% 和

54.87%。乳熟期节间干物质量增加小于蜡熟期，D2、D3 处理对蜡熟期节间干物质量影响较为明显，

随着生育时期的推进，减源处理对节间干物质量的影响越明显。



注：不同字母表示同一生育时期处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

Note: Different letters indicate significant differences among treatments in the same growth period at $P < 0.05$, the same below.

图 2 不同处理下的节间长

Fig.2 Internode length under different treatments

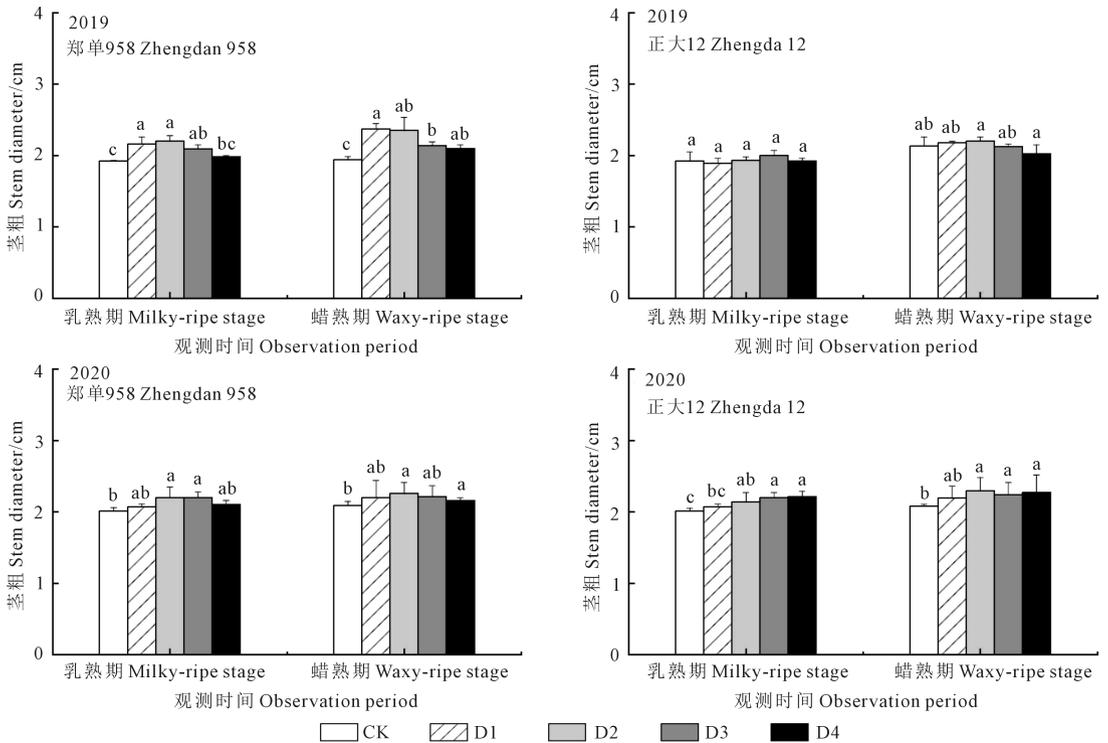


图 3 不同处理下的茎粗

Fig.3 Stem diameter under different treatments

2.2.4 不同减源处理对夏玉米茎秆单位节间干物质量的影响 减源对夏玉米茎秆第 3 节间单位节间干物质量影响如图 5 所示,在不同年份间趋势基本相似,D2 处理能够维持较高的单位节间干物质量。2019 年,D2、D3、D4 处理郑单 958 在蜡熟期单位节间干物质量分别较 CK 显著增加 107.97%、46.88%、34.30% ($P < 0.05$),正大 12 仅 D2 处理显著增加

30.57% ($P < 0.05$)。2020 年,郑单 958 和正大 12 蜡熟期单位节间干物质量均在 D2、D3 处理下显著增加,平均增幅分别为 33.77%和 48.51%,正大 12 在乳熟期各处理均有所增加,移除植株顶端 1~3 片叶平均增幅为 12.23%。减源影响玉米单位节间干物质量的主要时期为蜡熟期,以去除 2 片叶处理变化最为显著。

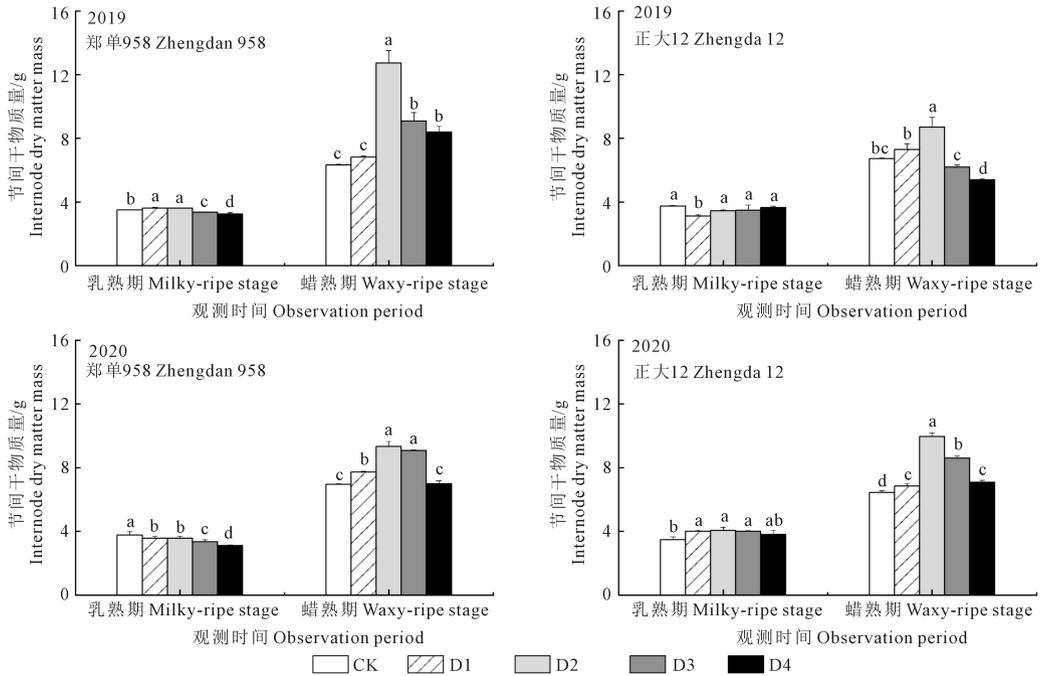


图 4 不同处理下的节间干物质量

Fig.4 Internode dry weight under different treatments

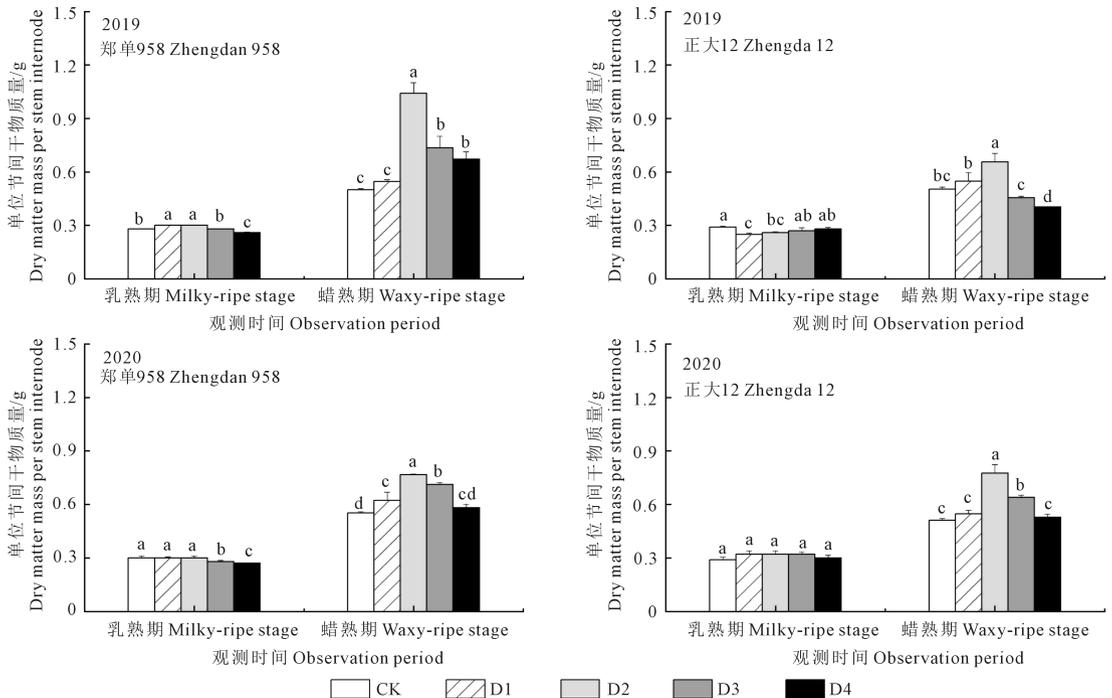


图 5 不同处理下的单位节间干物质量

Fig.5 Dry matter mass per stem internode under different treatments

2.3 减源对密植夏玉米茎秆节间力学特征的影响

2.3.1 对茎秆节间穿刺强度的影响 如图 6 所示, 减源处理显著影响玉米茎秆基部第 3 节间穿刺强度。不同处理均提高了不同株型玉米品种的穿刺强度, 去除 2 片叶处理影响较为显著。2019 年, 郑单 958 乳熟和蜡熟期 D1、D2、D3 穿刺强度分别较 CK 显著增加 12.15%~35.67% 和 3.47%~13.98% ($P < 0.05$); 正大 12 乳熟期和蜡熟期 D1、D2、D3 处理较 CK 显著提高, 以 D2 处理最高, 分别提高了 13.97% 和 56.98% ($P < 0.05$)。2020 年 D1、D2、D3 处理显著提高了郑单 958 乳熟期和正大 12 两个生育时期的穿刺强度, 各时期 D2 处理增幅均高于其他处理, 为 12.20%~31.52%。减源 1~3 片叶均显著增加了不同株型夏玉米的穿刺强度, D2 处理增幅较高, 郑单 958 茎秆穿刺强度时期间变化较小, 正大 12 乳熟期穿刺强度大于蜡熟期穿刺强度。

2.3.2 对茎秆节间折断力的影响 不同的减源处理对玉米茎秆第 3 节间折断力调控差异如图 7 所示, 两年变化规律相似, 均随减源数处理先增后减。郑单 958 茎秆折断力大于正大 12, 减源处理能提高茎秆折断力, 2019 年, 郑单 958 乳熟期和蜡熟期 D2 处理节间折断力较 CK 分别增加了 30.60% 和 32.44% ($P < 0.05$), D3 处理分别增加 22.09% 和 14.45% ($P < 0.05$); 正大 12 乳熟期和蜡熟期 D2 处理

较 CK 分别增加了 14.31% 和 21.53% ($P < 0.05$), 蜡熟期 D3 处理增加了 17.70% ($P < 0.05$)。2020 年, D1 处理节间折断力在郑单 958 乳熟期和正大 12 乳熟期和蜡熟期较 CK 分别增加 8.24%、4.26%、8.44% ($P < 0.05$), D2 处理两品种玉米乳熟期和蜡熟期分别增加 9.37% 和 21.08%、22.84% 和 36.51% ($P < 0.05$), D3 处理下郑单 958 乳熟期和正大 12 的两生育时期节间折断力平均增加 14.55% ($P < 0.05$)。可见去除植株顶部 1~3 片叶对于两品种玉米茎秆节间折断力提升较为显著, 去除 2 片叶调控效应更加明显。

2.4 减源对密植夏玉米节间养分含量的影响

减源对开花期至蜡熟期玉米节间的可溶性糖含量影响如图 8a 和图 8b 所示, 整体趋势为先上升后降低。各处理间可溶性糖含量在开花期 (AS) 差异较小, 灌浆期 (FS) 正大 12 的可溶性糖含量高于郑单 958, 郑单 958 和正大 12 的 D2 处理分别较 CK 提高 2.91% 和 10.83%, 可见减源对于半紧凑型夏玉米正大 12 基部节间可溶性糖含量调节作用较紧凑型玉米品种郑单 958 更为明显。减源处理对同期纤维素含量的影响如图 8c 和图 8d 所示, 整体呈现前期缓慢增加而后急剧下降的趋势, 乳熟期 (MS) 达到最大值。郑单 958 和正大 12 的 D2 处理分别较对照 CK 高出 5.63% 和 5.19%, D3、D4 处理较 CK 显著降低, 半紧凑型玉米正大 12 纤维素含量受减源处理的

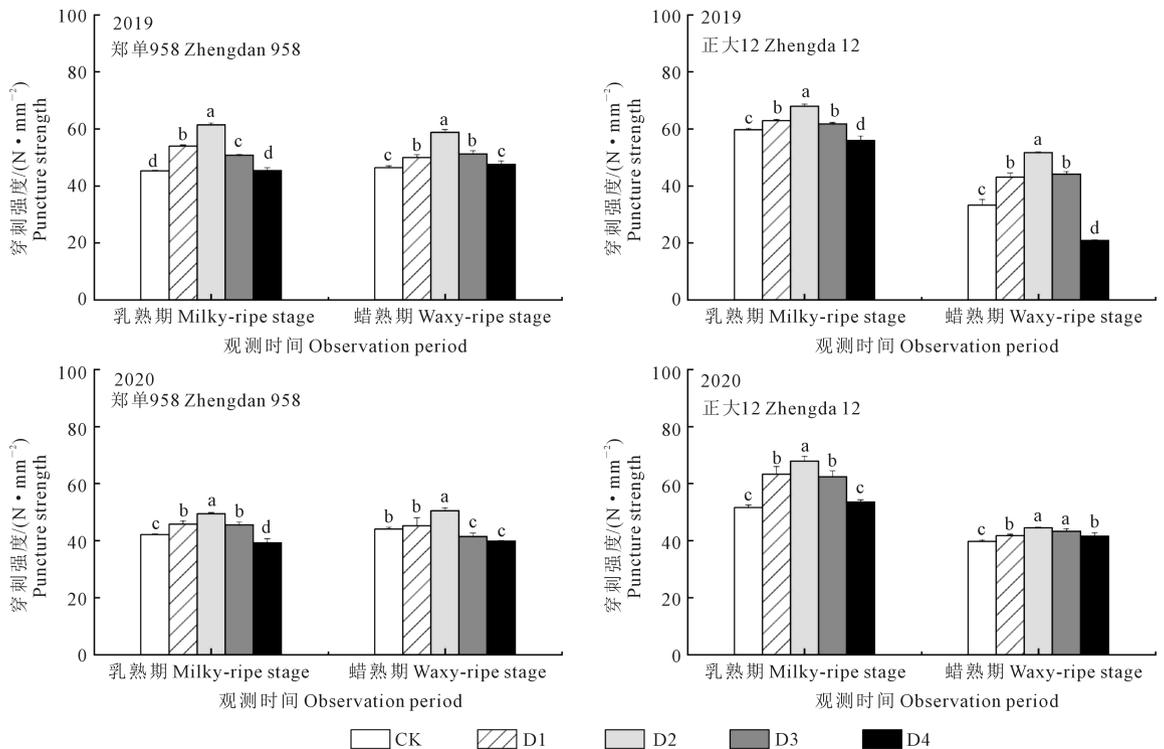


图 6 不同处理下的茎秆节间穿刺强度

Fig. 6 Puncture strength of stem internode under different treatments

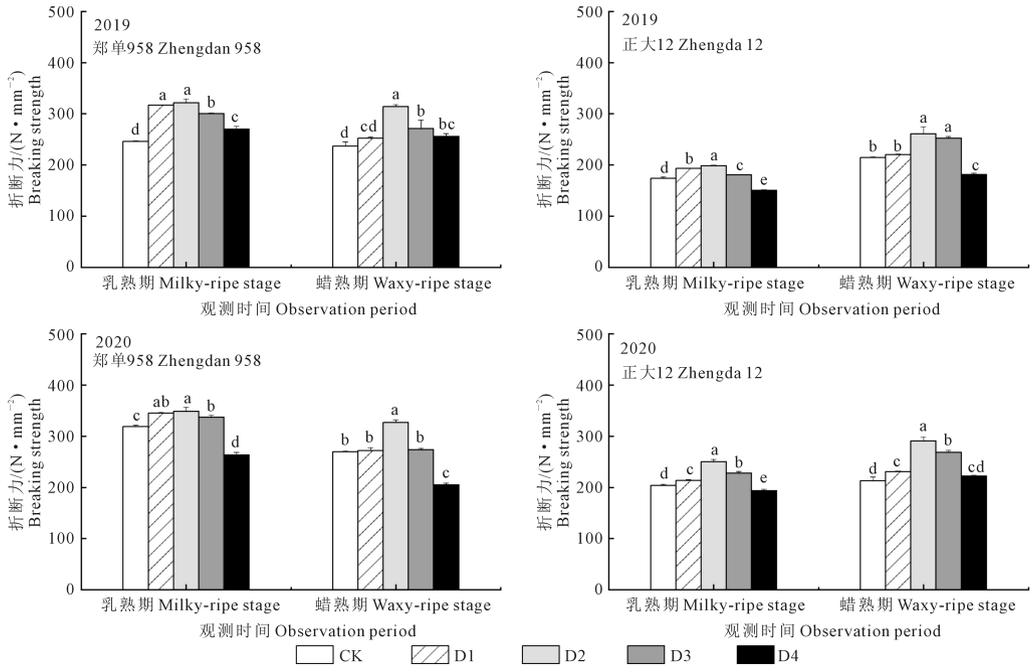
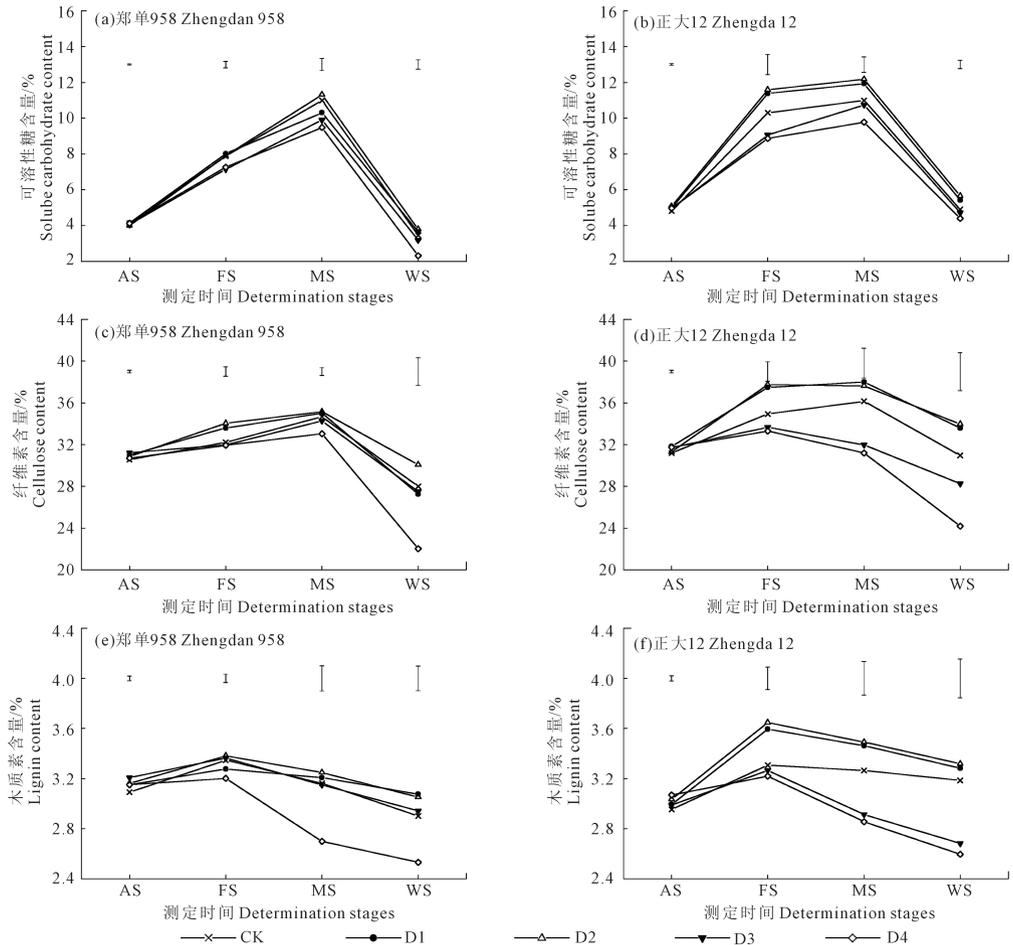


图 7 不同处理下的茎秆节间折断力

Fig.7 Breaking strength of stem internode under different treatments



注: AS: 开花期; FS: 灌浆期; MS: 乳熟期; WS: 蜡熟期。图中短线为 LSD 值 ($P=0.05, n=3$)。

Note: AS: Anthesis stage; FS: Filling stage; MS: Milky-ripe stage; WS: Waxy-ripe stage. The short bar represents the LSD value ($P=0.05, n=3$).

图 8 不同处理下的节间养分含量

Fig.8 Internode nutrient content under different treatments

调控效应较紧凑型玉米品种郑单 958 更为显著,郑单 958 的 D2 处理能够减缓灌浆后期节间纤维素的下降速度。木质素含量变化如图 8e 和图 8f 所示,于 FS 达到最大值。D2 处理后郑单 958 和正大 12 均于 MS 达到含量峰值,较 CK 分别高 1.04% 和 10.31% ($P < 0.05$)。去除植株 2 叶能够减缓灌浆后期木质素下降速度,但是,去除 4 叶则使得木质素含量急剧下降,郑单 958 和正大 12 D4 处理较 CK 分别降低 5.18% 和 4.17%。表明去除植株顶部 1~2 片叶促进了茎秆中纤维素和木质素含量的增加,去除 3~4 片叶则导致了可溶性糖减少,使得纤维素和木质素含量下降。

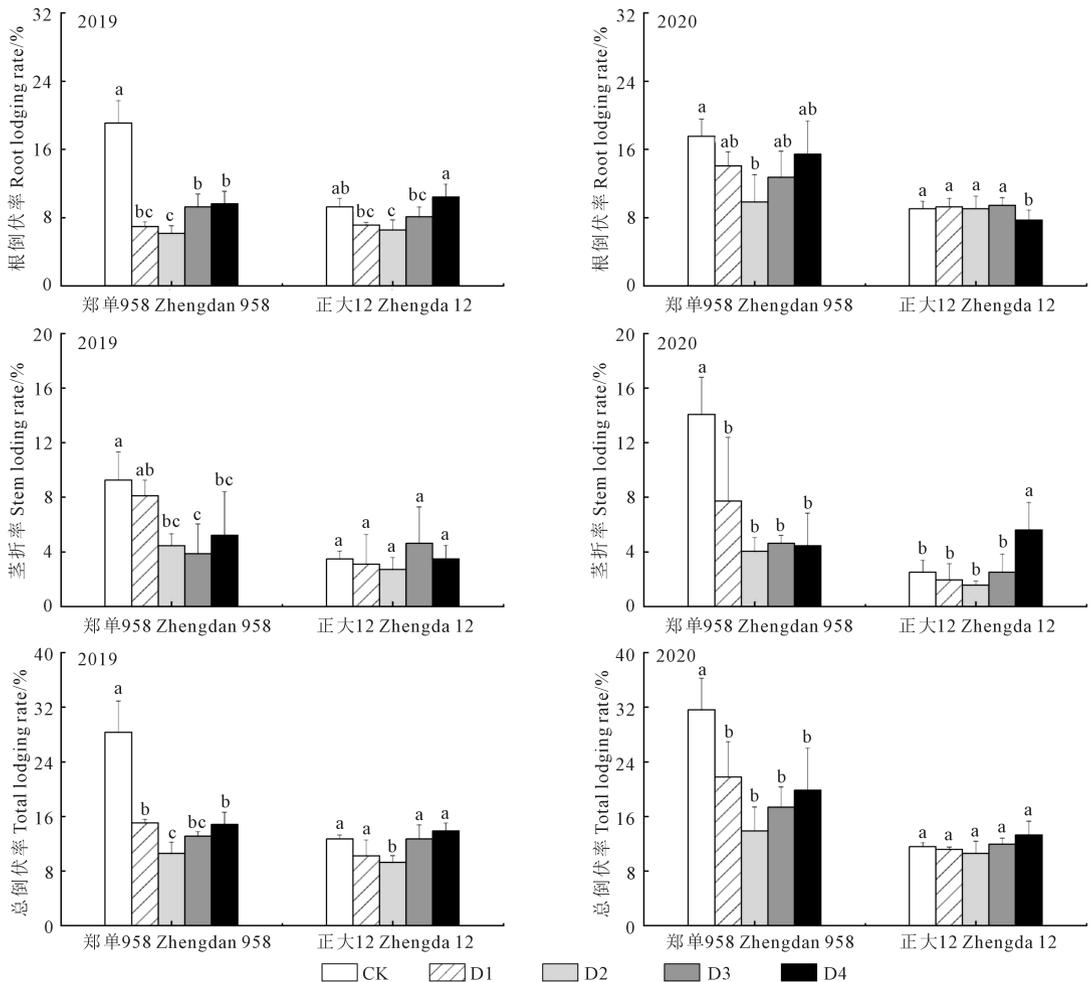
2.5 减源对密植夏玉米田间倒伏率的影响

所有的减源处理均降低了玉米的倒伏率(图 9)。减源对郑单 958 倒伏率的影响效应较正大 12 明显。D3、D4 处理两品种玉米均呈现了较高的倒伏率,D1、D2 处理显著降低了群体倒伏率。2019 年,郑单 958 总倒伏率 D1、D2 处理较 CK 分别减少了 46.93% ($P < 0.05$) 和 62.85% ($P < 0.05$),正大 12

较 CK 分别减少了 19.69% ($P < 0.05$) 和 27.27% ($P < 0.05$)。2020 年,D2 处理郑单 958 和正大 12 总倒伏率较 CK 分别降低 56.09% ($P < 0.05$) 和 8.33%。受试验地气象条件影响,夏玉米根倒率高于茎折率。综合根倒伏率、茎折率和总倒伏率适度去除 1~2 片叶可以显著降低植株倒伏率。

2.6 倒状因素与产量间的相关性分析

如表 2 所示,穿刺强度与茎粗、节间干物质量和单位茎长干物质量呈极显著正相关。茎秆折断力与节间长、穗位系数和倒伏率呈负相关。倒伏率与株高和穗位高呈负相关关系。折断力与单位节间干物质量表现为极显著正相关关系 ($0.808; P < 0.01$)。茎粗与倒伏率呈显著负相关 ($-0.462; P < 0.05$)。茎粗与产量呈显著正相关 ($0.540; P < 0.05$)。由此可见,密植种植模式下的茎粗、节间干物质量和单位节间干物质量对秸秆穿刺强度、折断力具有明显的正向影响,较低的穗位和较粗的节间是降低密植夏玉米倒伏率和实现产量提升的关键。



注:不同字母表示同品种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences among treatments of the same variety at $P < 0.05$.

图 9 不同处理下的夏玉米倒伏率

Fig.9 Lodging rate of summer corn under different treatments

表2 倒伏因素与产量之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between lodging factors and yield

指标 Index	穿刺强度 Puncture strength	折断力 Breaking strength	倒伏率 Lodging rate	产量 Grain yield
株高 Plant height	-0.207	0.094	-0.027	0.063
穗位高 Ear height	-0.296	-0.107	-0.229	0.367
穗位系数 Ear coefficient	-0.136	-0.194	-0.265	0.275
节间长 Internode length	-0.452*	-0.382	-0.339	0.017
茎粗 Stem diameter	0.483*	0.532*	-0.462*	0.540*
节间干物质量 Internode dry matter mass	0.685**	0.803**	-0.302	0.301
单位节间干物质量 Dry matter mass per stem internode	0.706**	0.808**	-0.232	0.275
穿刺强度 Puncture strength		0.746**	-0.038	0.218
折断力 Breaking strength			-0.005	0.380
倒伏率 Lodging rate				-0.316

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著, *表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

Note: ** : Significant differences at $P < 0.01$; * : Significant differences at $P < 0.05$.

2.7 减源对密植夏玉米产量及其构成因素的影响

如表3所示,综合两年产量情况,不同减源处理下两株型玉米产量及产量构成因素发生显著改变。两品种产量均在D2处理最高,郑单958的D2处理在2019年和2020年产量分别达 $11\ 000.67\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $11\ 407.12\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;正大12的D2处理分别达 $11\ 528.07\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $11\ 956.61\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。减源处理能够显著改变秃尖长,过度减源会增加果穗秃尖长,2020年的秃尖长度整体上小于2019年,且减源处理对郑单958秃尖长减少的调控效应优于正大12。2019年,郑单958 D1、D2处理分别较CK减少0.61 cm和0.76 cm;正大12 D1、D2处理较CK减少0.90 cm和0.69 cm。D2处理较CK相比能够显著增加行粒数和百粒重,进而实现增产。2019年,郑单958 D2处理百粒重较CK显著增加10.54% ($P < 0.05$);正大12 D2处理百粒重较CK增加6.15% ($P < 0.05$)。

表3 不同处理下的产量及产量构成

Table 3 Yield and yield traits under different treatments

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	穗长/cm Ear length	穗粗/cm Ear diameter	秃尖长 Bald tip length/cm	行粒数 Grain No. per row	穗粒数 Kernel No. per ear	百粒重/g 100-grain weight	产量 Yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2019	郑单 958 Zhengdan 958	CK	16.20ab	50.91a	2.09a	29.50b	425.00ab	27.22bc	9543.42bc
		D1	15.98ab	51.12a	1.48b	31.11a	457.27a	28.68ab	10818.80ab
		D2	16.75a	50.18a	1.33b	30.91a	442.55a	30.09a	11000.67a
		D3	15.47bc	48.64a	2.39a	27.78c	392.01b	26.65c	8619.72c
	正大 12 Zhengda 12	CK	16.70abc	50.09b	2.60b	28.11b	411.49a	28.78b	9766.38b
		D1	17.61a	51.74a	1.70c	30.09a	460.5a	30.20a	11478.54a
		D2	17.38ab	50.88ab	1.91c	29.24ab	457.36a	30.55a	11528.07a
		D3	16.50bc	52.03a	2.77b	27.51b	416.95a	29.88a	10280.50ab
2020	郑单 958 Zhengdan 958	CK	15.32a	49.53a	0.30b	30.34b	448.67abc	26.91c	9958.02b
		D1	15.90a	50.84a	0.22c	31.27a	479.75a	28.69b	11358.11a
		D2	15.87a	50.39a	0.27bc	31.76a	465.93ab	29.68a	11407.12a
		D3	15.58a	51.10a	0.39a	29.36c	424.97c	28.52b	9999.96b
	正大 12 Zhengda 12	D4	14.61b	50.55a	0.39a	29.67bc	437.74bc	26.99c	9746.70b
		CK	16.15bc	50.51abc	0.41ab	30.24cd	434.65bc	28.14b	10085.44b
		D1	16.88ab	51.63ab	0.28c	32.28a	457.80ab	30.45a	11500.04a
		D2	17.16a	52.56c	0.33bc	31.57ab	469.24a	30.88a	11956.61a
	正大 12 Zhengda 12	D3	16.06c	49.69bc	0.53a	30.89bc	456.28ab	26.89c	10113.70b
		D4	15.96c	49.05c	0.42ab	29.64d	419.40c	27.63bc	9557.95b

3 讨论

玉米的节间性状均与玉米田间倒伏率呈显著相关关系,适当降低株高是增强倒伏能力的有效措施^[12-13]。这与本研究结果一致,减源1~2片叶能够显著降低株高和穗位高从而获得较低的穗位系数,

穗位系数的降低改变了植株重心高度,使植株抗倒伏能力增强,相关分析也证实,株高和穗位高都与倒伏率显著负相关。研究发现,玉米植株作为一个整体,其果穗是影响整体倒伏性的一个确定因素,抗倒性与株型结构高度相关,紧凑型玉米植株具有较强抗倒伏能力,穗位高与倒伏能力呈现负相关

关系,数值越小越不易倒伏^[14-15],郑单 958 品种株型较为紧凑,减源处理较为积极促进了其抗倒伏能力提升,且随着减源处理后生育进程的推进,减源对株高、穗位高、穗位系数影响越显著。

抗倒伏能力的增加是玉米生产过程中重要问题之一,前人研究发现茎秆质量与玉米抗倒伏能力密切相关^[14]。本研究表明,移除顶部 1~2 片叶处理能够改变节间性状,减小节间长度,增加茎粗、促进节间干物质积累进而影响单位节间干物质质量,增强抗倒伏能力。夏玉米密植时存在茎秆节间直径变细、倒伏风险变大的问题,严重时可能影响生理成熟前籽粒的灌浆,从而影响产量^[16-17]。减源 1~2 片叶处理能够增加茎粗、节间干物质质量、单位茎长干物质质量,避免上述问题的产生。穿刺强度作为评价茎秆表皮抗穿透能力的重要指标,常用来衡量茎秆抗倒性,其与群体倒伏率呈显著负相关^[18-19]。茎秆穿刺强度的增加可极显著地降低玉米群体倒伏率,是玉米种植过程中提升抗倒伏能力的关键因素^[20-21]。试验中的相关分析结果表明穿刺强度、株高、折断力、穗位高和茎粗与倒伏率呈显著负相关,减源 1~3 片叶均显著增加了不同株型夏玉米的穿刺强度,折断力与之呈现相似变化规律。

玉米植株细胞壁降解时,纤维素、木质素等有机物分解会造成植株抗倒伏性能降低^[22]。纤维素、木质素是作物茎秆细胞壁的主要成分,他们的含量高低对维持茎秆机械强度具有明显的调节作用^[6]。本研究发现减源 1~2 片叶处理不仅能够减缓灌浆中后期的可溶性糖、纤维素和木质素的下降速度,更在部分时期增加了可溶性糖、纤维素和木质素的含量,使得植株茎秆节间的机械组织结构更加良好,两年的田间试验结果证实了这一结论。

气象条件和倒伏密切相关,有报道称,风速虽与倒伏具有高度的相关关系,但降雨较风速对玉米倒伏的影响更为明显,且倒伏往往发生于风雨协同的极端天气^[23],2020 年夏玉米种植季降雨量大于 2019 年同时期,其田间试验的倒伏率略高于 2019 年,试验中根倒率大于茎折率,这也与降雨过多导致气生根附近土壤强度降低有关。倒伏引起的茎秆养分运输受阻是制约产量的根本原因^[24],茎折会破坏输导系统,加大了籽粒灌浆受阻及运输不畅的问题,引起籽粒产量和质量的双重降低^[25-26]。试验中紧凑型品种郑单 958 的茎折率要大于半紧凑型品种正大 12,同时正大 12 的产量高于郑单 958。

产量的高低通常是由单位面积的有效穗数、穗粒数和单粒重共同决定^[27]。前人研究表明,夏玉米

产量与种植密度的关系呈现正态分布性变化,密植条件下,玉米光合能力下降、营养物质积累量降低,出现空秆,倒伏加重,导致有效果穗数量降低,籽粒产量随之下降^[28-29]。在本研究中,移除植株顶部 1~2 片叶处理能够保证密植条件下单株和群体的源库协调,显著增加夏玉米产量,且均在去除 2 片叶达到最高,对半紧凑型夏玉米正大 12 产量增幅大于紧凑型品种郑单 958。适度去除顶端 1~2 片叶,能够促进上部籽粒灌浆,减少秃尖长度,增加果穗穗长。通过去除冗余叶片,优化了资源分配,促进茎秆中可溶性糖含量等指标的提高,增加产量。通过分析两株型夏玉米品种在不同减源强度下的产量及其构成因素的差异可知,半紧凑型品种正大 12 穗粒数和百粒重明显高于紧凑型品种郑单 958,这与品种特性和减源处理有关,减源处理改善了半紧凑型品种的通风受光条件,影响了其节间干物质积累。Smith 等^[30]研究认为茎秆抗倒性能与产量呈正相关关系,本文研究结果表现为产量与倒伏率呈现负相关关系,这与前人研究结果一致。2020 年产量略高于 2019 年,这也与 2020 年降水较多引起的环境因素变化有关。

4 结 论

1) 减少顶端 1~2 片叶可以降低密植条件下夏玉米株高、穗位高、穗位系数,增加基部节间茎粗、节间干物质质量和单位节间干物质质量,显著增强基部节间茎秆穿刺强度和茎秆折断力,提高玉米抗倒伏能力,最终实现产量的提升。

2) 与半紧凑型品种相比,减源对倒伏率较高的紧凑型品种改善效果更明显。

3) 减少顶端两片叶能够显著提高紧凑型 and 半紧凑型夏玉米的抗倒伏能力,可作为夏玉米密植条件下提升抗倒伏能力、增加产量的有效措施之一。

参 考 文 献:

- [1] TOKATLIDIS I S, KOUTROUBAS S D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability[J]. Field Crops Research, 2004, 88(2/3): 103-114.
- [2] 冯海娟,张善平,马存金,等.种植密度对夏玉米茎秆维管束结构及茎流特性的影响[J].作物学报,2014,40(8):1435-1442.
FENG H J, ZHANG S P, MA C J, et al. Effect of plant density on microstructure of stalk vascular bundle of summer maize (*Zea mays* L.) and its characteristics of sap flow[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1435-1442.
- [3] 张俊,臧秀旺,郝西,等.不同密植方式对夏直播花生叶片功能及产量的影响[J].中国油料作物学报,2021,43(4):656-663.
ZHANG J, ZANG X W, HAO X, et al. Effects of different dense

- planting methods on leaf function and yield of summer-sowing peanut [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2021, 43(4): 656-663.
- [4] 周波. 玉米种植密度对产量和品质的影响[J]. 南方农业, 2021, 15(15): 19-20.
- ZHOU B. Effect of planting density on yield and quality of maize[J]. South China Agriculture, 2021, 15(15): 19-20.
- [5] 王军, 祝庆, 李洪涛, 等. 粮饲兼用型玉米品种苏玉45灌浆特性及抗倒伏能力分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(22): 98-103.
- WANG J, ZHU Q, LI H T, et al. Analysis of grain filling characteristics and lodging resistance of maize cultivar Suyu 45[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(22): 98-103.
- [6] 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[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.
- WANG H Q. Regulation mechanism of reduced source on quality characters and lodging resistance of densely planted summer maize stalks [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2020.
- [7] LIU T N, GU L M, DONG S T, et al. Optimum leaf removal increases canopy apparent photosynthesis, ¹³C-photosynthate distribution and grain yield of maize crops grown at high density[J]. Field Crops Research, 2015, 170: 32-39.
- [8] 彭旭辉. 甘蓝型油菜抗倒伏指标的选取及其QTL定位[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- PENG X H. The selection of lodging indicators and mapping QTL for lodging in *Brassica napus* L. [D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [9] 方新玲, 李辉, 魏家萍, 等. 白菜型冬油菜抗倒伏性评价及其与株型性状的相关分析[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 1-10, 28.
- FANG X L, LI H, WEI J P, et al. Evaluation of lodging resistance and correlation analysis with plant architecture in winter rapeseed[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 1-10, 28.
- [10] 张翼飞, 于崧, 杨克军, 等. 不同氮钾配比对玉米茎秆形态力学特性及籽粒产量的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1741-1750.
- ZHANG Y F, YU S, YANG K J, et al. Effects of nitrogen/potassium ratios on stem morphological and mechanical characteristics and grain yield of maize [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1741-1750.
- [11] 任佰朝, 李利利, 董树亭, 等. 种植密度对不同株高夏玉米品种茎秆性状与抗倒伏能力的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(12): 1864-1872.
- REN B C, LI L L, DONG S T, et al. Effects of plant density on stem traits and lodging resistance of summer maize hybrids with different plant heights[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(12): 1864-1872.
- [12] 薛军, 王克如, 谢瑞芝, 等. 玉米生长后期倒伏研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1845-1854.
- XUE J, WANG K R, XIE R Z, et al. Research progress of maize lodging during late stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1845-1854.
- [13] 宋朝玉, 张继余, 张清霞, 等. 玉米倒伏的类型、原因及预防、治理措施[J]. 作物杂志, 2006(1): 36-38.
- SONG C Y, ZHANG J Y, ZHANG Q X, et al. Types, causes, prevention and control measures of corn lodging[J]. Crops, 2006(1): 36-38.
- [14] 王亮, 丰光, 李妍妍, 等. 玉米倒伏与植株农艺性状和病虫害发生关系的研究[J]. 作物杂志, 2016, (2): 83-88.
- WANG L, FENG G, LI Y Y, et al. Relationship between maize lodging resistance and agronomic traits, plant diseases, and insect pests [J]. Crops, 2016, (2): 83-88.
- [15] JIAO Y, GRANT C A, BAILEY L D. Growth and nutrient response of flax and durum wheat to phosphorus and zinc fertilizers[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2007, 87(3): 461-470.
- [16] 陈新军, 戚存扣, 浦惠明, 等. 甘蓝型油菜抗倒性评价及抗倒性与株型结构的关系[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1): 54-57, 62.
- CHEN X J, QI C K, PU H M, et al. Evaluation of lodging resistance in rapeseed (*Brassica napus* L.) and relationship between plant architecture and lodging resistance[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(1): 54-57, 62.
- [17] 李树岩, 马玮, 彭记永, 等. 大喇叭口及灌浆期倒伏对夏玉米产量损失的研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3952-3964.
- LI S Y, MA W, PENG J Y, et al. Study on yield loss of summer maize due to lodging at the big flare stage and grain filling stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(19): 3952-3964.
- [18] 邓妍, 王创云, 赵丽, 等. 群体密度对玉米茎秆性状、土壤水分的影响及其与产量、倒伏率的关系[J]. 华北农学报, 2017, 32(5): 216-223.
- DENG Y, WANG C Y, ZHAO L, et al. Effects of population density on the stem traits and Soil moisture in maize and their correlation with yield and lodging rate[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(5): 216-223.
- [19] 勾玲, 黄建军, 孙锐, 等. 玉米不同耐密植品种茎秆穿刺强度的变化特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 156-162.
- GOU L, HUANG J J, SUN R, et al. Variation characteristic of stalk penetration strength of maize with different density-tolerance varieties [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(11): 156-162.
- [20] MARTIN S A, DARRAH L L, HIBBARD B E. Divergent selection for rind penetrometer resistance and its effects on European corn borer damage and stalk traits in corn [J]. Crop Science, 2004, 44(3): 711-717.
- [21] 丰光, 刘志芳, 吴宇锦, 等. 玉米抗倒性与茎秆穿刺力和拉力关系的初步研究[J]. 玉米科学, 2010, 18(6): 19-23.
- FENG G, LIU Z F, WU Y J, et al. Primary study on correlation between corn variety lodging resistances and its stem puncture-pull strength[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(6): 19-23.
- [22] 袁志华, 李云东, 陈合顺. 玉米茎秆的力学模型及抗倒伏分析[J]. 玉米科学, 2002, 10(3): 74-75.
- YUAN Z H, LI Y D, CHEN H S. Dynamic model and lodging resistance analysis of maize stem[J]. Journal of Maize Sciences, 2002, 10(3): 74-75.
- [23] 丰光, 刘志芳, 李妍妍, 等. 玉米茎秆耐穿刺强度的倒伏遗传研究[J]. 作物学报, 2009, 35(11): 2133-2138.
- FENG G, LIU Z F, LI Y Y, et al. Genetics of lodging in tolerance to maize stem puncture[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(11): 2133-2138.