

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.034

引用格式:郭鹏辉,再吐尼古丽·库尔班,高金兰,等.不同株行配置对饲用甜高粱抗倒伏性能的影响[J].草地学报,2026,34(9):3505—3516

GUO Peng-hui, KURBAN ZaiTuniGulir, GAO Jin-lan, et al. Effects of Different Row-Plant Spacing Configurations on Lodging Resistance of Forage Sorghum[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3505—3516

不同株行配置对饲用甜高粱抗倒伏性能的影响

郭鹏辉¹, 再吐尼古丽·库尔班², 高金兰¹, 余 亿¹, 努尔艾拉·萨依木¹,
高 旺¹, 伊斯拉依·达吾提^{1*}

(1. 新疆农业大学草业学院/西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆维吾尔自治区农业科学院作物研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要:为优化新疆喀什地区饲用甜高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)抗倒伏栽培方案,本研究以品种‘惊喜’为材料,采用裂区设计,设置2种株距(Z_1 :10 cm, Z_2 :20 cm)与6种行距处理(等行距:30, 40, 50 cm, 宽窄行:20+40, 30+50, 40+60 cm)共构成12种株行配置。测定两茬农艺性状、茎秆化学组成、茎秆机械强度及倒伏率。结果表明,株行配置显著影响甜高粱抗倒伏相关性状。在两茬处理中,等行距(50 cm)和宽窄行(40+60 cm)处理田间倒伏率较低;其中等行距50 cm(H_5)处理机械强度最高、纤维组分积累最优。相关性分析表明,第一茬抗倒伏主要依赖茎粗、壁厚与机械强度协同增强,第二茬则依靠纤维组分(ADF、NDF、木质素)积累。综合两茬评价得出:等行距 H_5 配置,无论是搭配 Z_1 还是 Z_2 株距,均可显著提升抗倒伏性能,是该试验条件下最优模式。本研究结果为干旱区饲用甜高粱抗倒栽培提供了具体的技术方案与理论依据。

关键词:饲用甜高粱;株行配置;抗倒伏性能;茎秆力学特性;纤维组分

中图分类号:S544.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3505-12

Effects of Different Row-Plant Spacing Configurations on Lodging Resistance of Forage Sorghum

GUO Peng-hui¹, KURBAN ZaiTuniGulir², GAO Jin-lan¹, GAO Wang¹, YU Yi¹, SAYIMU Nueraila¹,
GAO Wang^{1*}, Yisilayi·DAWUTI^{1*}

(1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University / Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology in the Western Arid Desert Region, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Crop Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: To optimize the lodging-resistant cultivation scheme for forage sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench cv. ‘Jingxi’) in Kashi, Xinjiang, a split-plot design was used with two plant spacings (Z_1 : 10 cm, Z_2 : 20 cm) and six row spacing configurations (equal row spacing: 30, 40, 50 cm; wide-narrow row spacing: 20+40, 30+50, 40+60 cm), resulting in 12 plant-row configuration treatments. Agronomic traits, stem chemical composition, stem mechanical strength, and field lodging rate were measured over two harvests. The results showed that plant-row configuration significantly affected lodging-related traits. Across both harvests, equal row spacing of 50 cm and wide-narrow row spacing of 40+60 cm exhibited lower lodging rates. Among these, the equal row spacing of 50 cm (H_5) treatment produced the highest stem mechanical strength and the best accumulation of fiber components. Correlation analysis revealed fundamentally different lodging resistance mechanisms between the two stubbles: lodging resistance in the first stubble depended on the syner-

收稿日期:2026-01-26;修回日期:2026-03-23

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发项目“新疆特色杂粮绿色高产轻简化栽培技术研究与示范”(2025B02016-2);2026年自治区高校基本科研业务费科研项目“同/异型乳酸菌调控甜高粱青贮有氧稳定性的机制研究”(XJEDU2026J054)资助

作者简介:郭鹏辉(2000-),男,汉族,山西翼城人,硕士研究生,主要从事草产品加工与功能饲料开发研究,E-mail:19239990735@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:345589395@qq.com

gistic enhancement of stem diameter, wall thickness, and mechanical strength, whereas that in the second stubble relied on the accumulation of stem fiber components (acid detergent fiber, neutral detergent fiber, lignin) to maintain strength. Comprehensive evaluation of both stubbles indicated that the H5 configuration (equal row spacing of 50 cm), whether combined with Z_1 or Z_2 plant spacing, significantly improved the overall lodging resistance of 'Jingxi' and was the optimal pattern under the experimental conditions. These findings provide a specific technical scheme and theoretical basis for lodging-resistant cultivation of forage sweet sorghum in arid regions.

Key words: Forage sorghum; Row-plant spacing configuration; Lodging resistance; Stem mechanical characteristics; Fiber components

在现代畜牧业发展中,优质饲料的稳定供应至关重要。甜高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench), 又称饲用高粱,是一种一年生禾本科高粱属草本植物,具有茎秆粗壮、抗逆性强、适应性广且产量高等特点^[1]。然而,在实际生产中,倒伏问题成为制约甜高粱产量和经济效益的关键因素^[2]。研究表明,茎秆的抗倒伏能力随茎秆直径和茎皮厚度的增加而增强,而节间长度和株高的增加则会降低植株的抗倒伏能力,合理的株行距配置可有效提高作物生产能力^[3]。近年来,国内外关于茎秆特征与抗倒性关系的研究主要集中在小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)等粮食作物上^[4-6],而在高粱属作物中的报道相对较少,针对其茎秆抗倒伏性能的系统性研究仍显不足;少量涉及甜高粱抗倒伏的研究主要从茎秆形态学指标(如株高、茎粗、壁厚、节间长度等)入手,探讨其与倒伏指数的相关性^[7],或通过全基因组关联分析挖掘抗倒伏相关基因位点^[8],但从栽培措施角度,尤其是株行距配置对饲用甜高粱茎秆机械强度、木质素积累及抗倒伏能力的调控机制研究尚不深入^[9]。倒伏不仅降低甜高粱的生物产量和籽粒产量,还严重影响机械化收获效率及饲用品质,在新疆等甜高粱主产区,种植模式多样,株行距配置因品种、播种方式及收获目标而异,但目前缺乏针对抗倒伏性能优化的株行距组合筛选;已有研究表明,合理的株行距配置能够改善冠层光分布、优化群体结构、增强茎秆基部节间机械强度,从而有效降低倒伏风险^[10],但这些结论多源于谷子、水稻等作物,其在饲用甜高粱上的适用性尚需验证。

倒伏受品种特性、环境条件和栽培措施共同影响^[11]。在栽培措施中,株行配置直接决定群体结构和个体发育空间,进而影响茎秆的形态建成与力学性能。合理的株行配置能优化田间通风透光条件,协调个体与群体关系,为培育抗倒伏植株创造有利环境^[12]。然而,关于株行配置如何通过影响饲用甜

高粱茎秆的物理特性与化学组成来调控其抗倒伏性能,尤其是对不同生长茬次的差异化影响机制,目前尚缺乏系统研究。

本研究以新疆喀什地区种植的饲用甜高粱品种‘惊喜’为材料,通过设置不同株距与行距配置的田间试验,系统分析各处理对茎秆形态、力学特性、纤维组分及田间倒伏率的相应。旨在阐明株行配置对饲用甜高粱抗倒伏性能的影响,筛选适宜当地生态条件的最佳株行距配置模式,并揭示其调控抗倒伏能力的关键途径。研究结果可为干旱区饲用甜高粱抗倒伏高产栽培提供理论依据,并为实际生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于新疆喀什地区麦盖提县杂孜库勒乡17村,麦盖提县隶属新疆维吾尔自治区喀什地区,位于新疆西南部、喀什地区东部、塔克拉玛干沙漠西南边缘。地处 $77^{\circ}28'\sim 79^{\circ}05'$ E, $38^{\circ}25'\sim 39^{\circ}22'$ N之间。属于典型的干旱大陆性气候,全年热量丰富,日照充足,气温年变幅和昼夜温差大,年平均气温 11.8°C ,无霜期达到214天,年平均降水量42.3 mm,平均蒸发量2349 mm。年平均日照2806.3 h,年平均风速 $1.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。试验区土层深厚,多系沙壤土,土壤次生盐渍化较重,有机质少、氮少、磷少、钾多。

1.2 试验材料

本研究选用的饲用高粱品种为‘惊喜’,来源于郑州华丰草业科技有限公司。

1.3 试验设计

试验采用双因素裂区试验设计,主区处理为播种株距,设两个水平;副区处理为行距,采用等行距与宽窄行两种模式,各设3个水平。不同株行距组

合共形成 6 种密度处理,具体配置见表 1。主、副区均随机排列,共 12 种处理组合,重复 3 次,共 36 个小区。试验于 2024 年 4 月 6 日播种,每个小区播种 10 行,播种方式为人工穴播,每穴播种 2~3 颗,播前深耕 20 cm,播种深度为 3~4 cm,犁地前撒施磷酸二铵

300 kg·hm⁻²作基肥,各品种采用相同的田间管理,2 次中耕及人工杂草处理。灌溉方式采用地表滴灌。每个小区种植 6 行,行长 5 m,区组间留 1 m 宽的观察道,试验田四周留 1 m 宽的保护区。于 2024 年 8 月 1 日收获第 1 茬,10 月 15 日收获第 2 茬。

表 1 不同株行距配置与试验处理

Table 1 Experimental treatments under different row spacing configurations

序号 No	处理名称 Treatment name	株距 Plant spacing/cm	行距 Row spacing/cm	等行距/宽窄行 Uniform Row Spacing/Wide-Narrow Row Spacing	种植密度 Planting density/ (株·hm ⁻²)
1	Z ₁ H ₁	Z ₁ (10 cm)	H ₁ :30—30	等行距	M ₁
2	Z ₁ H ₂		H ₂ :20—40	宽窄行	(333495)
3	Z ₁ H ₃		H ₃ :40—40	等行距	M ₂
4	Z ₁ H ₄		H ₄ :30—50	宽窄行	(250125)
5	Z ₁ H ₅		H ₅ :50—50	等行距	M ₃
6	Z ₁ H ₆		H ₆ :40—60	宽窄行	(200100)
7	Z ₂ H ₁	Z ₂ (20 cm)	H ₁ :30—30	等行距	M ₄
8	Z ₂ H ₂		H ₂ :20—40	宽窄行	(166740)
9	Z ₂ H ₃		H ₃ :40—40	等行距	M ₅
10	Z ₂ H ₄		H ₄ :30—50	宽窄行	(125055)
11	Z ₂ H ₅		H ₅ :50—50	等行距	M ₆
12	Z ₂ H ₆		H ₆ :40—60	宽窄行	(100050)

1.4 测定内容与方法

1.4.1 农艺性状 在抽穗前期进行农艺性状的测定。每个小区内选取十株(包括分蘖),记录其株高、茎粗;采集第 2 节间茎秆,记录节间长度、茎粗、壁厚。

1.4.2 茎秆机械强度测定 使用浙江托普 YYD-1 茎秆强度测定仪测定茎秆机械强度,采集高粱第二节间整节,按照仪器标准使用方法进行加载测试,测定第二节间中部机械强度,记录相关力学数据。

1.4.3 纤维成分含量测定 取适量饲用甜高粱茎秆样品,粉碎过筛。采用范氏洗涤纤维分析法测定 NDF 和 ADF 含量。将经 ADF 处理后的残渣用酸水解,采用木质素硫酸测定法将经 ADF 处理后的残渣用酸水解,通过酸水解分离木质素并进行定量分析,对酸水解后的残渣高温灰化,差值法计算木质素含量^[13-15]。

1.4.4 田间倒伏情况 在甜高粱抽穗期统计各小区内倒伏植株数和总株数,用于计算倒伏率(%),计算公式如下:

倒伏率(%)=(倒伏株数/总株数)×100% (1)

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 2019 进行初步整理,使用 SPSS 22.0 统计软件进行方差分析和多重比较,使用 Origin 2021 软件绘制相关性热图,以 P<0.05 作为差异显著的标准。

2 结果与分析

2.1 株行距配置对倒伏率与茎秆抗折力的影响

2.1.1 株行距配置对倒伏率的影响 田间倒伏率是评价饲用甜高粱抗倒伏性能的最终指标^[16]。表 1 数据表明,株距、行距及其交互作用对倒伏率的影响均达显著水平(P<0.05)。

第 2 茬倒伏率显著高于第 1 茬,第 2 茬倒伏率介于 11.0%~38.7% 之间,而第 1 茬介于 3.0%~15.3% 之间(图 1)。在两茬中,倒伏率均随行距增大呈降低趋势。第 1 茬中,Z₁H₅(等行距 50 cm)和 Z₁H₆(宽窄行 40+60 cm)处理的倒伏率分别为 3.7% 和 3.0%,显著低于 Z₁H₁(等行距 30 cm)处理的 15.3%(P<0.05);第 2 茬中,Z₁H₅和 Z₁H₆处理的倒伏率分别为 15.7% 和 11.0%,显著低于 Z₁H₁处理的 32.0%(P<0.05)。其中宽行距(H₅,H₆)处理的倒伏率显著低于窄行距(H₁,H₂)处理(P<0.05),且 Z₁处理的倒伏率显著低于 Z₂处理(P<0.05)。

2.1.2 株行配置对茎秆机械强度的影响 茎秆机械强度是衡量植株抗倒伏能力的关键力学指标^[16]。如表 3 所示,株距(Z)、行距(H)及其交互作用(Z×H)对两茬甜高粱茎秆机械强度均具有显著(P<0.05),表明株行配置是调控茎秆力学性能的重要途径。

表2 不同株行配置下饲用甜高粱两茬倒伏率方差分析

Table 2 Analysis of variance (ANOVA) for lodging rate of forage sorghum across two cuttings under different row spacing configurations

项目 Project		倒伏率 Lodging rate			
变异来源 Source of variation	自由度 Degrees of freedom	第1茬 The first cut		第2茬 The second cut	
		F值	P值	F值	P值
Z	1	25.91	*	89.47	*
H	5	16.36	*	32.35	*
Z×H	5	2.44	*	3.12	*

注:表中Z、H分别表示种植株距与种植行距,Z×H表示二者交互作用,F为方差分析F值,S为方差分析显著性,其中NS、*分别表示 $P>0.05$ 、 $P<0.05$,下同

Note: Z and H represent planting spacing and row spacing, respectively, and Z×H denotes their interaction. F is the F-value from ANOVA, and S indicates significance. NS and * indicate $P>0.05$ and $P<0.05$, respectively. The same notations are used in the following tables

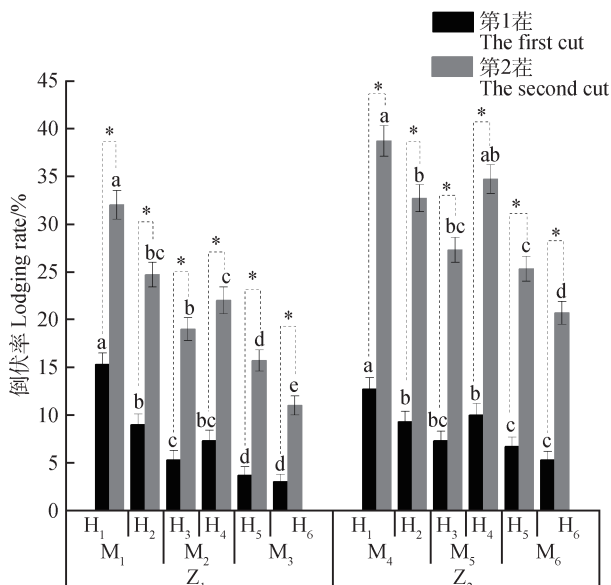


图1 不同株行配置对两茬饲用甜高粱倒伏率的影响

Fig. 1 Effects of different row spacing configurations on the lodging rate of forage sorghum in two harvests

注:图中不同小写字母表示相同茬次不同试验处理下差异显著($P<0.05$),*表示相同处理下两茬之间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences among different experimental treatments within the same cut ($P<0.05$). * indicates significant differences between the two cuts under the same treatment ($P<0.05$). The same as below

由图2所示,两茬茎秆机械强度对株行距的响应存在差异。第1茬机械强度介于149.43~241.60 N之间,第2茬介于136.50~269.06 N之间。第1茬中,机械强度随行距增大呈增强趋势。在 Z_1 株距条件下, Z_1H_5 处理机械强度最高,为241.60 N,显著高于 Z_1H_1 处理的149.43 N ($P<$

0.05);在 Z_2 株距条件下, Z_2H_3 、 Z_2H_4 和 Z_2H_2 处理机械强度分别为240.48 N, 231.65 N和230.35 N,均显著高于 Z_2H_1 处理的159.55 N ($P<0.05$)。

第2茬中, Z_1H_5 处理机械强度最高,为269.06 N,显著高于其他 Z_1 处理 ($P<0.05$); Z_2H_5 处理机械强度为229.62 N,显著高于 Z_2H_4 处理的136.50 N ($P<0.05$)。值得注意的是, Z_2H_4 (宽窄行30+50 cm)处理机械强度仅为136.50 N,为第2茬最低值。

在两茬比较中, Z_1H_5 处理机械强度均处于较高水平(第1茬241.60 N,第2茬269.06 N), Z_2H_5 处理也表现出较好的稳定性(第1茬230.83 N,第2茬229.62 N),表明等行距50 cm(H_5)配置在两种株距和两茬中均能产生较高的茎秆机械强度,是提升抗倒伏能力的可靠行距选择。

表3 不同株行配置下两茬饲用甜高粱机械强度方差分析

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for mechanical strength of forage sorghum across two cuttings under different row spacing configurations

项目 Project		机械强度 Mechanical strength			
变异来源 Source of variation	自由度 Degrees of freedom	第1茬 The first cut		第2茬 The second cut	
		F值	P值	F值	P值
Z	1	73.45	*	4.61	*
H	5	39.57	*	6.72	*
Z×H	5	12.14	*	7.11	*

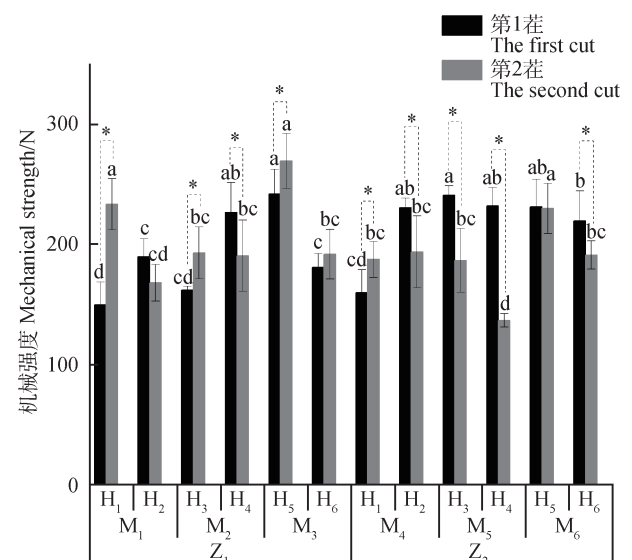


图2 不同株行配置对两茬饲用甜高粱茎秆机械强度的影响

Fig. 2 Effects of different row spacing configurations on the stem mechanical strength of forage sorghum in two harvests

2.2 株行配置对茎秆农艺性状的影响

第1茬饲用高粱茎秆形态主要受株距(Z)与行距(H)的显著影响($P<0.05$),而两者的交互作用

(Z×H)在第一茬中不显著(表4)。第2茬交互作用表现出显著的影响($P<0.05$)。这种差异反映了饲用高粱在不同生长阶段对种植密度和空间配置的响应机制有所不同,同时也提示在实际种植中,应根据目标密度提前合理配置株行距,以优化群体结构,提升植株抗倒伏能力。

2.2.1 株高 第1茬株高整体显著高于第2茬($P<0.05$)。在第1茬中,同一株距条件下,株高随行距增大呈增加趋势(图3)。其中,两种株距处理下,宽行距处理Z₂H₅和Z₂H₆的株高显著高于窄行距处理($P<0.05$),分别为273.7 cm和270 cm。但在第2茬,这一规律不明显。

2.2.2 分蘖数 第2茬分蘖数显著高于第1茬($P<0.05$)。整体上,随着种植密度的减少,分蘖数呈增加的趋势,这种规律尤其在同株距条件下,随着行距变宽更加明显(图3)。第1茬中,Z₂H₆处理分蘖数最高,为4.67个,显著高于Z₁H₁处理的3.17个($P<0.05$);第2茬中,Z₂H₆处理分蘖数最高,为5.40个,显著高于Z₁H₁处理的4.38个($P<0.05$)。

2.2.3 第2节间茎粗 第2茬茎粗整体显著高于第一茬($P<0.05$)。第1茬中,相同株距条件下,窄行距处理的茎粗均低于宽行距处理(图3)。Z₁株距下,Z₁H₁处理茎粗为15.17 mm显著低于Z₁H₅处理的16.57 mm($P<0.05$);Z₂株距下,Z₂H₁处理茎粗为14.47 mm,显著低于Z₂H₃处理的16.83 mm($P<0.05$)。第2茬中,茎粗主要受行距配置的影响。在

相同密度下,等行距处理茎粗均高于宽窄行处理,Z₂H₃处理茎粗为16.62 mm,显著高于Z₂H₄处理的15.96 mm($P<0.05$)。

2.2.4 节间长 第1茬第2节间长度介于14.72~20.02 cm之间,第2茬介于19.17~24.65 cm之间,第2茬整体高于第1茬(图3)。可能是由于刈割后个体间竞争降低,生长更加迅速。

第1茬中,株距对节间长度的影响较小,受行距和密度互作的影响较大。Z₁H₁与Z₂H₁处理下节间长分别达到18.53 cm和20.02 cm,均处于较高水平,表明在同等株距条件下,较小的行距处理更有利于节间长的增加。随着密度的降低,节间长呈现下降趋势,Z₂H₃处理下节间长达到最小值14.72 cm。第1茬中,Z₁条件下宽窄行配置节间长明显低于等行距节间长,说明小株距条件下,宽窄行配置在控制节间过度伸长方面具有优势。第2茬中,Z₂株距条件下,随着密度降低两种行距配置节间长均呈现降低趋势。

2.2.5 壁厚 第2茬的茎秆第2节间壁厚普遍高于第1茬,第1茬壁厚介于0.49~0.59 mm之间,第2茬介于0.54~0.65 mm之间(图3)。

随密度的降低,壁厚呈变厚的趋势。第1茬中,Z₂H₂处理壁厚最大,为0.59 mm,显著高于Z₁H₂处理的0.49 mm($P<0.05$);第2茬中,Z₂H₁处理壁厚最大,为0.65 mm,显著高于Z₁H₂处理的0.55 mm($P<0.05$)。

表4 不同株行配置下两茬饲用甜高粱茎秆特性方差分析

Table 4 Analysis of variance (ANOVA) for stem characteristics of forage sorghum across two cuttings under different row spacing configurations

变异来源 Source of variation	第1茬 The first cut						第2茬 The second cut			
	株高 Plant height	分蘖 Tiller	茎粗 Stem diameter	节间长 Internode length	壁厚 Wall thickness	株高 Plant height	分蘖 Tiller	茎粗 Stem diameter	节间长 Internode length	壁厚 Wall thickness
Z	45.32	6	NS	12.44	7.21	62.15	8.45	5.88	8.91	6.34
H	18.67	5.69	5.33	4.22	3.15	28.45	7.63	9.12	15.67	7.23
Z×H	3.45	0.71	NS	NS	NS	4.12	1.01	3.45	3.12	2.88
Z	*	*	NS	**	*	*	*	*	*	*
H	*	*	*	**	*	**	**	**	**	**
Z×H	*	NS	NS	NS	NS	**	NS	*	*	*

注:表中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),比较方向为纵向比较,即在同一种植方式下,对不同种植品种与收获茬次之间农艺性状指标进行数据比较,表中Z、H分别表示种植株距与种植行距,Z×H表示二者交互作用,F为方差分析F值,S为方差分析显著性,其中NS,*,**分别表示 $P>0.05$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。下同

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences ($P<0.05$), with comparisons conducted vertically. Specifically, agronomic traits were compared among different varieties and harvest times under the same planting pattern. Z and H represent planting spacing and row spacing, respectively, and Z×H denotes their interaction. F is the F-value from ANOVA, and S indicates significance. NS, *, and ** denote $P>0.05$, $P<0.05$, and $P<0.01$, respectively. The same as below

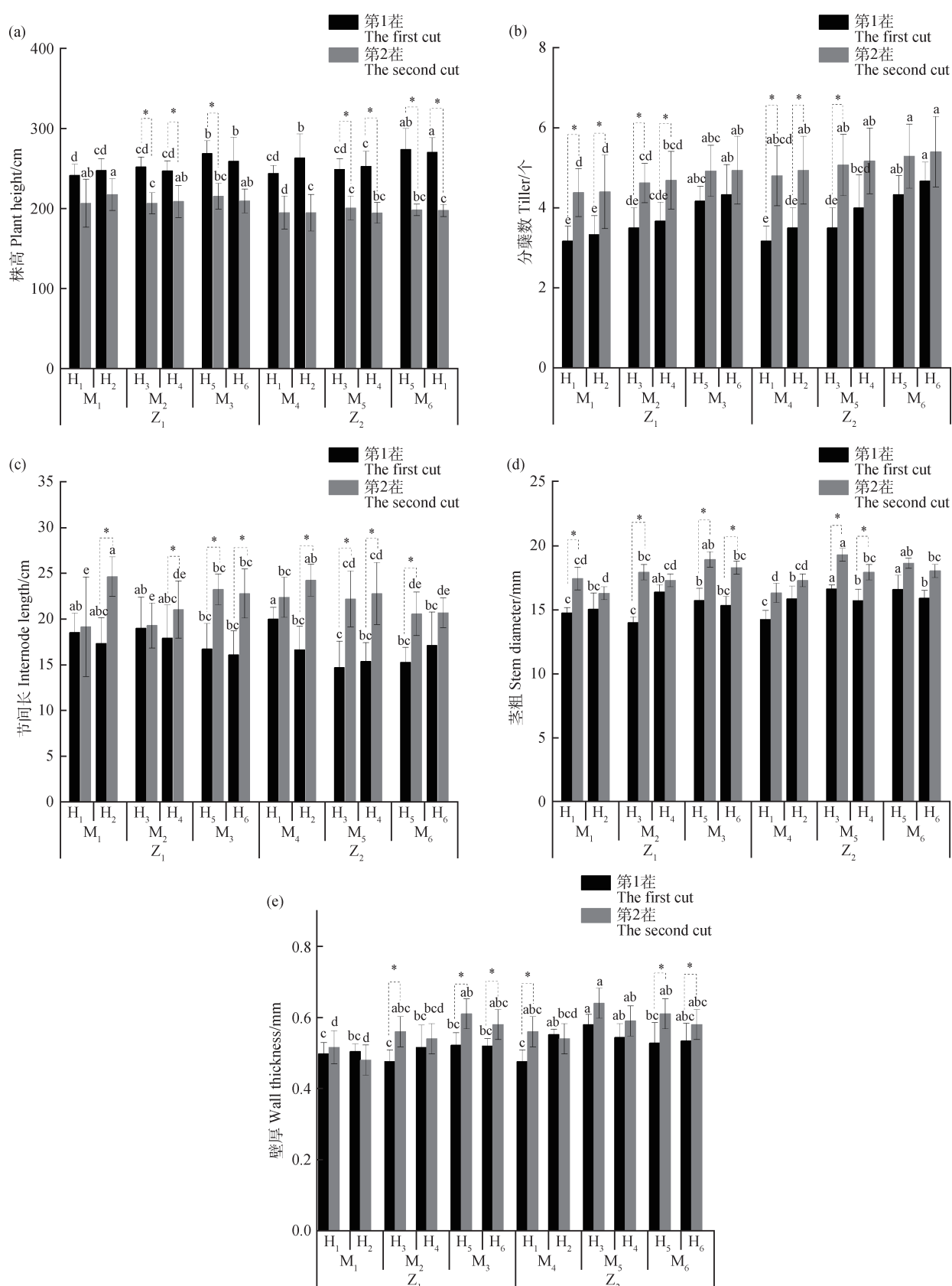


图 3 不同株行配置对两茬饲用甜高粱茎秆形态的影响

Fig. 3 Effects of different row spacing configurations on the stem morphology of forage sorghum in two harvests

注: (a) 不同处理下高粱株高 (b) 不同处理下高粱分蘖 (c) 不同处理下高粱第2节间长 (d) 不同处理下高粱第2节间粗 (e) 不同处理下高粱第2节壁厚

Note: (a) Plant height of sorghum under different treatments (b) Tillering of sorghum under different treatments (c) Length of the 2nd internode of sorghum under different treatments (d) Diameter of the 2nd internode of sorghum under different treatments (e) Wall thickness of the 2nd internode of sorghum under different treatments

2.3 株行配置对高粱第 2 节间茎秆组分的影响

第 1 茬中第 2 节间茎秆纤维组分主要受行距(H)的显著影响($P<0.05$),而两者的交互作用($Z\times H$)在第 1 茬中不显著。第二茬交互作用表现出显著的影响($P<0.05$)。第 1 茬茎秆纤维品质主要受行距配置影响;而进入第 2 茬,株距的作用凸显,且与行距产生显著的交互作用(表 5)。这表明再生栽培的管理策略应有别于首茬,需更加重视株行距的协同优化。

第 2 茬的 NDF、ADF 及木质素含量普遍高于第 1 茬,这可能是由于第 2 茬生长时,植株将更多产物偏向结构性碳水化合物的合成与积累分配。两茬数据显示,在相同株距下,随着行距变宽,NDF、ADF 和

木质素含量呈现升高趋势, Z_1H_5 与 Z_2H_5 处理下均显著高于 Z_2H_1 与 Z_1H_1 处理(图 4)。在两茬试验中,等行距处理在 NDF、ADF 和木质素,含量方面总体优于宽窄行处理。除了个别密度下没有达到显著差异外,相同密度下,等行距处理的 NDF、ADF 和木质素显著高于同密度下宽窄行处理($P<0.05$)。

综上,采用较宽行距(H_5)处理是促进饲用甜高粱茎秆纤维组分积累的有效农艺措施。这一效应在第 1 茬中主要由行距单独驱动,在第 2 茬中则需与大株距(Z_2)配合,通过 $Z\times H$ 互作实现更优调控。纤维组分的增加虽可能与饲用品质存在权衡,但直接增强了茎秆的机械强度和刚性,是构成抗倒伏能力的重要化学基础。

表 5 饲用高粱第 2 节间茎秆纤维组分方差分析

Table 5 Analysis of variance (ANOVA) for stem fiber components of the 2nd internode in forage sorghum

茬次 Harvest cuts	项目 Project		中性洗涤纤维 NDF		酸性洗涤纤维 ADF		木质素 Lignin	
第 1 茬 The first cut	变异来源	自由度 df	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
	Z	1	3.28	ns	2.15	ns	8.94	**
	H	5	12.45	**	5.67	**	7.33	**
	$Z\times H$	5	1.89	ns	1.42	ns	2.01	ns
第 2 茬 The second cut	变异来源	自由度 df	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
	Z	1	4.12	*	3.88	*	10.25	**
	H	5	15.67	**	8.33	**	9.47	**
	$Z\times H$	5	2.45	*	2.11	ns	2.34	*

2.4 抗倒伏指标相关性分析

本研究通过对第 1 茬与第 2 茬植株的倒伏率与农艺性状、茎秆结构和化学组分进行相关性分析,发现两茬间抗倒伏机制存在明显差异(图 5)。

第 1 茬倒伏率与木质素含量呈负相关($r=-0.413$),但未达显著水平;与节间长呈正相关($r=0.536$, $P=0.072$),接近显著水平。株高、茎粗、壁厚、机械强度等茎秆结构性状与倒伏率呈负相关,表明茎秆越粗壮、机械强度越高,植株抗倒伏能力越强。同时,茎粗、壁厚和机械强度之间呈显著正相关($r>0.83$, $P<0.05$),表明第 1 茬抗倒伏能力主要依赖于茎秆的物理结构强度。

第 2 茬植株的倒伏率与株高呈显著负相关($r=-0.871$, $P<0.05$),与茎粗($r=-0.543$, $P=0.068$)、壁厚($r=-0.187$)、机械强度($r=-0.372$)等茎秆结构性状呈负相关但未达显著水平,而与木质素($r=-0.302$)、ADF($r=0.097$)相关性较弱。同时,第 2 茬茎秆的机械强度与 ADF($r=0.681$, $P<0.05$)及 NDF($r=0.667$, $P<0.05$)呈显著正相关,而与茎粗($r=0.248$)、壁厚($r=0.273$)等结构性状

的相关性明显低于第 1 茬,说明第 2 茬植株的机械强度更多依赖于纤维成分(ADF 和 NDF)的累积,而非单纯的茎秆物理结构。此外,两茬中 ADF 与 NDF 均保持稳定的强正相关($r=0.67$),表明纤维组分间关系受茬次影响较小,具有较好的一致性。

2.5 综合隶属函数分析

采用模糊数学的隶属函数法,分别对两茬下 12 种株行配置的形态特性、茎秆特性进行综合评价,将各处理的形态特性、茎秆特性的隶属函数值进行计算。其中倒伏率、木质素及 ADF 为反向隶属函数,其他指标均为正向隶属函数。综合隶属函数值(D)越大说明该品种的综合价值越高,综合生产性能越好,并对不同处理的综合隶属函数值(D)进行排序。计算结果如表 6、表 7 所列,综合评价下等行距 H_5 处理在第 1 茬中 Z_2 株距条件下抗倒伏性能最佳,综合评价得分为 6.242。同时在 Z_1 条件下也有较高的抗倒伏性,综合得分达到了 6.001。在第 2 茬中, H_5 行距处理在 Z_1 和 Z_2 株距条件下均有较好的抗倒伏性,评分分别为 7.806,

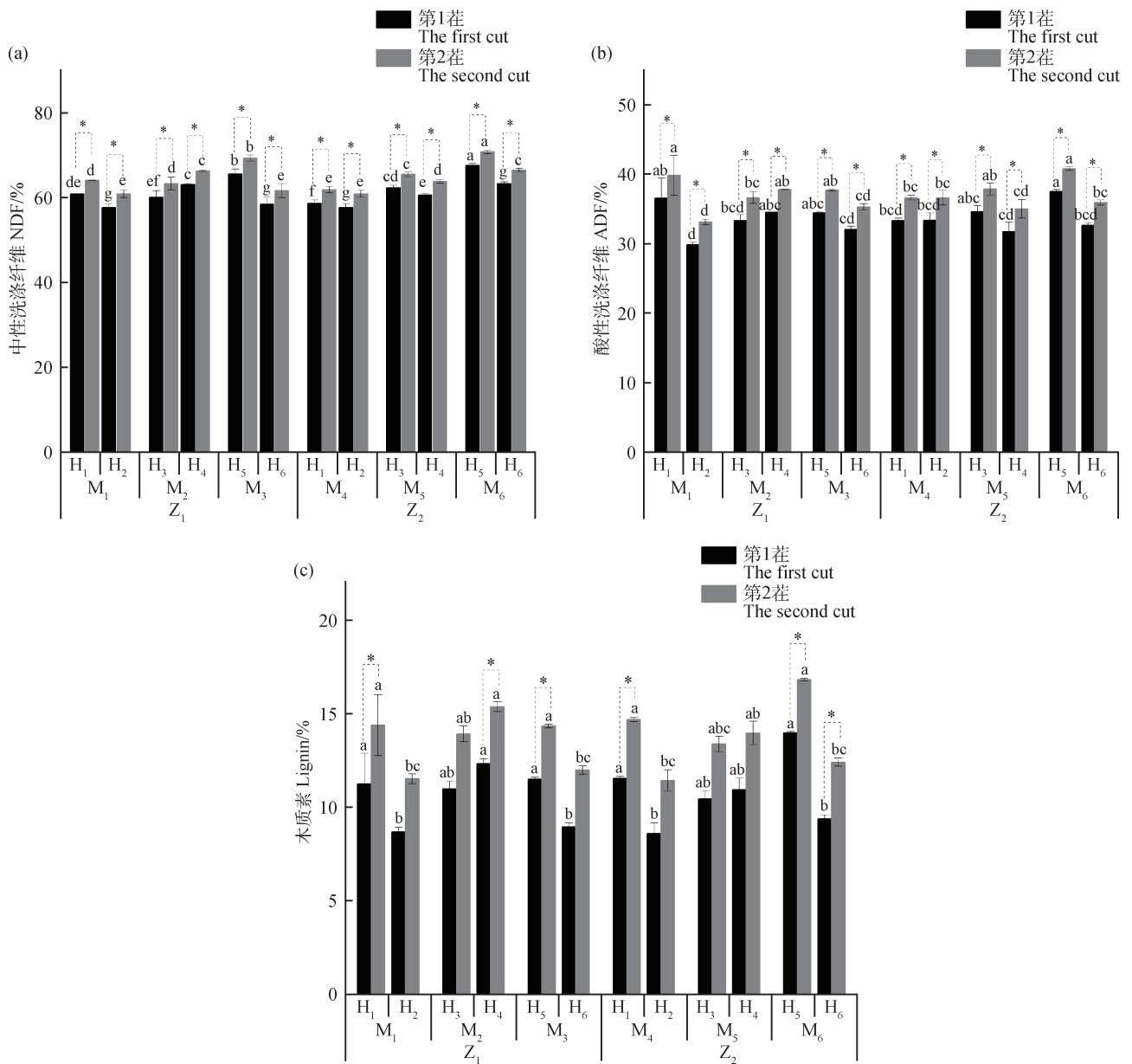


图 4 不同株行配置对第2节茎秆组分的影响

Fig. 4 Effects of different plant and row spacing arrangements on stem components of the 2nd internode

注:(a) 株行配置对高粱第2节间 NDF 的影响;(b) 株行配置对高粱第2节间 ADF 的影响;(c) 株行配置对高粱第2节间木质素的影响

Note:(a) Effects of plant and row spacing arrangement on NDF in the 2nd internode of sorghum (b) Effects of plant and row spacing arrangement on ADF in the 2nd internode of sorghum (c) Effects of plant and row spacing arrangement on lignin in the 2nd internode of sorghum

6.281。综合两茬评价结果可以得出:等行距 H₅ 配置,无论是搭配 Z₁ 还是 Z₂ 株距,均能显著提升饲用高粱的抗倒伏综合性能,是该试验条件下最优的株行配置模式。其抗倒伏优势主要来源于该配

置能更好地协调植株形态与茎秆力学结构,即在保持相对合理株高的同时,显著促进茎粗、壁厚及机械强度的发育,并有效抑制 ADF 等不利纤维组分的过度积累。

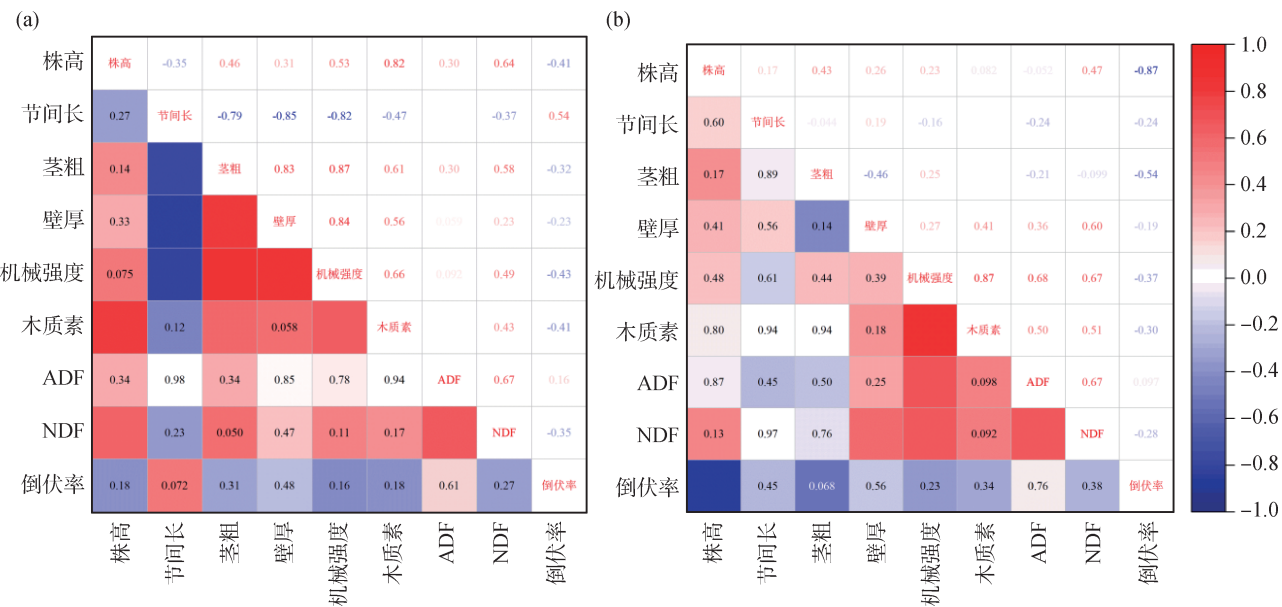


图 5 不同株行配置对两茬饲用甜高粱抗倒伏指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of lodging resistance traits of forage sorghum in two harvests as affected by different row spacing configurations

注:(a) 第 1 茬相关性分析;(b) 第 2 茬相关性分析

Note:(a) Correlation analysis for the first cut(b) Correlation analysis for the second cut

表 6 不同株行配置下两茬饲用甜高粱第 1 茬综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of the first cutting of forage sorghum under different row spacing configurations (Two cuttings)

处理	株高	节间长	茎粗	壁厚	机械强度	木质素	ADF	NDF	倒伏率	综合评价
1	0.000	0.695	0.282	0.212	0.000	0.000	0.127	0.323	0.000	1.639
2	0.121	0.430	0.397	0.269	0.416	0.477	1.000	0.000	0.512	3.621
3	0.185	0.601	0.000	0.000	0.218	0.603	0.545	0.247	0.813	3.213
4	0.034	0.445	0.908	0.385	0.755	0.806	0.388	0.551	0.650	4.923
5	0.611	0.299	0.656	0.442	0.907	0.886	0.402	0.854	0.943	6.001
6	0.235	0.277	0.504	0.423	0.375	0.993	0.714	0.081	1.000	4.602
7	0.235	1.000	0.092	0.000	0.087	0.403	0.546	0.101	0.211	2.675
8	0.473	0.371	0.702	0.731	0.926	0.449	0.544	0.005	0.488	4.690
9	0.222	0.000	1.000	1.000	1.000	0.620	0.381	0.470	0.650	5.344
10	0.298	0.193	0.649	0.654	0.895	0.825	0.753	0.298	0.431	4.996
11	1.000	0.212	0.985	0.500	0.899	0.948	0.000	1.000	0.699	6.242
12	0.749	0.399	0.725	0.558	0.701	1.000	0.635	0.571	0.813	6.150

表 7 不同株行配置下两茬饲用甜高粱第 2 茬综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of the second harvest of forage sorghum (two cuttings in total) under different row spacing configurations

处理	株高	节间长	茎粗	壁厚	机械强度	木质素	ADF	NDF	倒伏率	综合评价
1	0.450	0.000	0.282	0.225	0.621	0.000	0.127	0.323	0.242	2.271
2	0.643	0.690	0.397	0.000	0.246	0.534	1.000	0.000	0.505	4.016
3	0.749	0.860	0.000	0.500	0.434	0.660	0.545	0.247	0.711	4.706
4	0.825	1.000	0.908	0.375	0.413	0.849	0.388	0.551	0.603	5.912
5	0.912	0.720	0.656	0.813	1.000	0.899	0.402	0.854	0.830	7.086
6	1.000	0.480	0.504	0.625	0.419	1.000	0.714	0.081	1.000	5.823
7	0.000	0.450	0.092	0.500	0.383	0.475	0.546	0.101	0.000	2.546
8	0.316	0.720	0.702	0.375	0.429	0.483	0.544	0.005	0.217	3.792
9	0.550	0.930	1.000	1.000	0.378	0.648	0.381	0.470	0.412	5.768
10	0.667	0.580	0.649	0.688	0.000	0.856	0.753	0.298	0.144	4.634
11	0.784	0.440	0.985	0.813	0.817	0.960	0.000	1.000	0.484	6.281
12	0.901	0.370	0.725	0.625	0.411	0.958	0.635	0.571	0.650	5.846

3 讨论

3.1 株行配置对甜高粱茎秆形态的影响

本研究表明,株距与行距对饲用甜高粱的株高、分蘖数、茎粗、节间长度及壁厚等形态指标均具有显著调控作用,且两茬间的响应机制存在明显差异,这与周钊恩等^[17-18]在水稻上的研究结论一致。

第1茬中,株高随行距增大呈增加趋势,宽行距处理(H_5 、 H_6)株高显著高于窄行距处理,说明行距扩大缓解了植株间竞争,有利于主茎伸长。第2茬株高整体低于第1茬(图3a),可能与生育期缩短(第2茬80天vs第1茬120天)及分蘖数显著增加(图3b)导致光合产物分配格局改变有关。分蘖数方面,第2茬显著高于第1茬,且随密度降低、行距变宽呈增加趋势, Z_1H_5 、 Z_2H_6 处理分蘖数显著高于 Z_1H_1 处理($P<0.05$),表明宽行距与大株距有利于分蘖发生,与聂荫恩等^[19]在谷子上的研究结果一致。

茎粗与壁厚是茎秆机械强度的关键形态基础。第2茬茎粗与壁厚整体显著高于第1茬($P<0.05$),可能与第1茬根系保留、再生期资源竞争减弱有关。稀植(Z_2)条件下茎粗与壁厚显著优于密植(Z_1),等行距处理在茎粗与壁厚方面表现优于宽窄行处理,尤其在第2茬中,等行距 H_3 、 H_5 处理茎粗显著高于同密度宽窄行处理($P<0.05$),反映出均匀行距有利于茎秆全方位发育,与李锥等^[20-21]在小麦上的研究结论一致。节间长度方面,宽行距处理节间较短,有助于茎秆重心下移,增强抗倒伏能力。综上,等行距、适度宽行(H_5 、 H_6)结合适中株距(Z_2)的配置,是构建抗倒伏理想株型的有效农艺途径。

行距配置方面,等行距处理在茎粗和壁厚方面表现较好,而宽窄行处理在株高方面表现突出。这可能与不同行距下的光照分布有关:等行距条件下光照分布相对均匀,有利于茎秆全方位发育;宽窄行条件下窄行间竞争加剧,促进植株纵向生长。

3.2 株行配置对茎秆力学性能的调控机制

茎秆机械强度是评价作物抗倒伏能力的关键力学指标。本研究发现,株行配置对两茬饲用甜高粱的茎秆机械强度均具有显著影响($P<0.05$),且调控机制在两茬间存在差异,与刘晓东等^[22]对甜高粱弯曲力学特性的研究结果相呼应。

第1茬,茎秆机械强度受行距配置的影响比较显著。 Z_1 株距条件下,茎秆强度随行距的增大呈增

强趋势,但在 Z_2 株距条件下各处理间差异不显著,这表明株距和行距都会影响茎秆机械强度。第2茬,在 Z_1 株距条件下,各处理的茎秆机械强度受株距影响较小,而不同行距间差异较大,主要原因可能是第2茬分蘖数增多,株距优势减小。

第1茬中,同株距下,等行距和宽窄行处理的茎秆机械强度分别随行距的增加呈增强的趋势。 Z_1H_5 处理机械强度显著高于 Z_1H_1 处理($P<0.05$)。这可能是由于稀植条件下植株间竞争减弱,有利于茎秆结构性物质沉积,从而增强茎秆刚性。第2茬中,机械强度受株距影响较小,行距差异成为主导因素(图2)。等行距 H_5 配置在2茬中均表现出较高的机械强度,是提升抗倒伏能力的可靠行距选择。

相关性分析进一步揭示了力学性能的调控机制(图5)。第1茬机械强度与茎粗($r=0.78$)、壁厚($r=0.72$)呈显著正相关,表明抗倒伏能力主要依赖茎秆物理结构强度;第2茬机械强度则与ADF($r=0.68$)、NDF($r=0.67$)呈显著正相关,与茎粗、壁厚相关性减弱,说明再生植株力学性能更多依赖纤维组分的化学支撑。这一差异反映了植株在不同生长阶段的适应性策略,与赵夕冉等^[24]在小麦上的研究结论一致。宽窄行配置在密植条件下亦能维持较高机械强度,可能与改善冠层微环境有关,可作为高密度种植区的备选方案。

茎秆抗折力是评价抗倒伏能力的关键力学指标。本研究中 Z_2H_5 处理表现出最高的机械强度,这与刘晓东等对甜高粱弯曲力学特性的研究结果相呼应。合理的株行配置通过优化群体通风透光条件,促进木质素与纤维素在茎秆中的沉积,从而提升茎秆的刚性^[23]。本研究发现,宽窄行配置在改善田间微环境方面具有优势,尤其在密植条件下可显著降低倒伏率,这与赵夕冉等^[24]在小麦上的研究结论一致。此外,茎秆抗折力与株高呈显著负相关,与茎粗、壁厚及木质素含量呈显著正相关,进一步证实了茎秆形态与化学组成共同决定其抗倒伏能力的理论^[25]。

3.3 株行配置对纤维组分积累的影响及其与抗倒伏性的关联

茎秆纤维组分是构成细胞壁的主要物质,直接影响茎秆机械支撑能力^[26]。本研究表明,株行配置对两茬饲用甜高粱的NDF、ADF及木质素积累均具有显著调控作用,且影响机制存在茬次差异,与牛皓^[27]在饲草高粱上的研究结果一致。本研究中,

Z₂H₅处理的木质素含量最高且倒伏率处于较低水平,这与杨斌在甜高粱抗倒伏性状研究中发现密度调控木质素合成基因表达的结果一致。

第1茬中,纤维组分主要受行距显著影响($P<0.05$),株距效应不显著(表5),说明首茬纤维积累更依赖于群体光照条件与行间通风;第2茬中,株距与行距交互作用显著($P<0.05$),表明再生期纤维合成对株行配置的协同调控更加敏感。宽行距(H₅、H₆)处理在两茬中均显著提高了纤维组分含量,Z₁H₅与Z₂H₅处理下纤维组分显著高于Z₂H₁与Z₁H₁处理($P<0.05$),说明宽行距有利于茎秆纤维积累。等行距处理在纤维组分积累方面总体优于宽窄行处理,相同密度下等行距处理的NDF、ADF和木质素显著高于宽窄行处理($P<0.05$)。

第1茬抗倒伏性能与木质素含量呈正相关($r=0.840$, $P<0.05$),说明木质素含量越高,茎秆抗倒伏性能越强,与倪军等人^[28-29]在小麦上的研究结论一致。第2茬中,机械强度与ADF、NDF呈显著正相关,而与木质素相关性减弱,表明再生期纤维组分对力学性的贡献更依赖纤维素与半纤维素的协同作用。

综合来看,Z₂H₅配置(株距20 cm+等行距50 cm)在抗折力、倒伏率及茎秆形态等方面表现最优,适宜在南疆及类似气候条件的地区推广。该配置既保证了适宜的群体密度(100 050株·hm⁻²),又为个体生长提供了充足空间,有利于形成“矮壮抗倒”的群体结构^[30]。这与任梁等^[31]在高粱上的研究结论相似,即通过栽培措施优化群体结构是提升抗倒伏能力的有效途径。此外,宽窄行配置在密植条件下亦表现出良好的抗倒潜力,尤其在改善通风透光、缓解植株竞争方面具有优势,可作为高密度种植区的备选方案。

4 结论

株行配置显著影响饲用甜高粱的农艺性状、茎秆力学特性、纤维组分含量和抗倒伏性。株行距影响第1茬与第2茬饲用甜高粱抗倒伏率的方式不一致。第1茬抗倒伏能力主要依赖于茎秆的物理结构强度;第2茬植株则更多依赖于纤维成分(ADF, NDF)的累积。

综合两茬表现,株距20 cm(Z₂)配合等行距50 cm(H₅)为最优配置。Z₂H₅处理在两茬综合评价中分别达到6.242,6.281;等行距H₅是促进茎秆纤维组分(ADF, NDF, 木质素)积累的有效措施;第1茬中行距效应主导,第2茬中则需与大株距(Z₂)互

作实现协同增效。综上,建议在新疆喀什地区饲用甜高粱生产中采用株距20 cm(Z₂)等行距50 cm(Z₂H₅)的配置方式,以实现抗倒伏的生产目标。本研究结果为干旱地区饲用甜高粱的抗倒伏栽培提供了技术参考,但不同品种、不同生态区的适应性仍需进一步验证。未来研究可结合分子生物学手段,深入解析株行配置影响茎秆发育的生理机制和分子基础。

参考文献

- [1] 阿衣江·卡克尔曼,玛丽亚木·买买提,许坤,等. 甜高粱饲用价值及利用[J]. 黑龙江动物繁殖,2025,33(6):71-73
AYIJANG KAKEERMAN, MALIYAMU MAIMAITI, XU K, et al. Feeding value and utilization of sweet sorghum[J]. Heilongjiang Journal of Animal Reproduction, 2025, 33(6): 71-73
- [2] 杨斌. 甜高粱抗倒伏相关性状全基因组关联分析[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2022:1-3
YANG B. Genome-wide association analysis of lodging resistance related traits in sweet sorghum[D]. Ala'er: Tarim University, 2022: 1-3
- [3] 李源,赵海明,游永亮,等. 饲草高粱茎秆特征与抗倒性关系分析[J]. 草地学报,2020,28(6):1798-1804
LI Y, ZHAO H M, YOU Y L, et al. Analysis of the relationship between stem traits and lodging resistance of forage sorghum[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(6): 1798-1804
- [4] 王利锋,李晶晶,夏彦,等. 玉米茎秆抗倒伏相关性状全基因组关联分析[J]. 玉米科学,2025,33(7):39-45
WANG L F, LI J J, XIA Y, et al. Genome-wide association analysis of stem lodging resistance traits in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2025, 33(7): 39-45
- [5] 张喜娟,王文龙,孟英,等. 种植方式对寒地水稻抗倒伏性状的影响[J]. 中国农学通报,2024,40(3):16-25
ZHANG X J, WANG W L, MENG Y, et al. Effects of planting methods on lodging resistance of rice in cold[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(3): 16-25
- [6] 高奇,徐翠莲,胡文明. 甜高粱抗倒伏相关性状分布规律研究[J]. 塔里木大学学报,2020,32(2):38-42
GAO Q, XU C L, HU W M. Study on the distribution of lodging resistance related traits in sweet sorghum[J]. Journal of Tarim University, 2020, 32(2): 38-42
- [7] 张彦红,石书兵,叶凯,等. 新疆天山中部台阶地区甜高粱种植密度与相关生育特征规律的研究[J]. 新疆农业科学,2013,50(2):230-237
ZHANG Y H, SHI S B, YE K, et al. Study on sweet sorghums planting density in terraced region of the central Tianshan Mountain with its growth characteristics[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(2): 230-237
- [8] 秦培亮,杨艳山,邵金发. 不同耕作方式对小麦根系构型及抗根倒伏能力的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(6):105-110
QIN P L, YANG Y S, SHAO J F. Influences of different tillage methods on root configuration and lodging resistance of wheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(6): 105-110
- [9] 阿热孜古丽·如孜,艾力克热木·热合木吐拉,马燕,等. 种植密度对饲用甜高粱生产性能及青贮效果的影响[J]. 新疆畜牧业,2022,38(5):15-18
ARZUGUL ROZI, ELIKRAM REHMITULLA, MA Y, et al. Effects of planting density on production performance and silage effect of forage sweet sorghum[J]. XINJIANGXUMU YE 2022, 38(5): 15-18

- [10] 张雪梅,付薇,周丽,等. 行距和播量对绿巨人甜高粱农艺性状及产量的影响[J]. 现代农业科技,2025(12):1-4
ZHANG X M, FU W, ZHOU L, et al. Effects of row spacing and seeding rate on agronomic traits and yield of lyujuren sweet sorghum [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(12):1-4
- [11] 刘泽宇,刘欢,张玉霞,等. 不同前茬对饲用甜高粱生长及产量组成的影响[J]. 草原与草坪,2025,45(5):164-174
LIU Z Y, LIU H, ZHANG Y X, et al. Effects of different fore crop on growth and yield components in forage sweet sorghum [J]. Grassland and Turf, 2025, 45(5):164-174
- [12] 高悦,赵德,梁军,等. 株行距配置对高粱杂交种吉杂159冠层结构和产量的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):64-74
GAO Y, ZHAO D, LIANG J, et al. Influences of plant and row spacing configuration on canopy structure and yield of sorghum hybrid Jizha 159 [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(8):64-74
- [13] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 20806—2006 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2007
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 20806—2006 Determination of neutral detergent fiber (NDF) in feeds[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007
- [14] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 1459—2022 饲料中酸性洗涤纤维的测定[S]. 北京:中国农业出版社,2022
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 1459—2022 Determination of acid detergent fiber in feeds [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2022
- [15] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 20805—2006 饲料中酸性洗涤木质素(ADL)的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2007
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 20805—2006 Determination of acid detergent lignin (ADL) in feeds [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007
- [16] 杨洪昌,范源洪,吴正焜,等. 甜高粱抗倒伏性状评价及其倒伏系数初探[J]. 作物杂志,2008(3):54-56
YANG H C, FAN Y H, WU Z K, et al. Preliminary study of evaluation of lodging resistance and coefficient on sweet sorghum [J]. Crops, 2008(3):54-56
- [17] 周钊恩. 不同株行距配置对大田水稻产量及抗倒性的影响[D]. 扬州:扬州大学,2025:16-18
ZHOU Z E. The effect of different plant spacing configurations on the yield and lodging resistance of field rice [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2025:16-18
- [18] 龚竹娟,黄云,魏朝富. 株行距配置对水稻群体生态及抗倒伏性的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(17):61-65
GONG Z J, HUANG Y, WEI C F. Effects of row spacing on population ecology and lodging resistance of rice [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(17):61-65
- [19] 聂萌恩,柳青山,白文斌,等. 喷施多效唑对谷子农艺性状及抗倒伏力的影响[J]. 中国农学通报,2019,35(33):35-41
NIE M E, LIU Q S, BAI W B, et al. Effects on agronomic characters and lodging resistance of foxtail millet by spraying paclobutrazol [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(33):35-41
- [20] 李维. 播种方式和种植密度对冬小麦群体构建及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022:31-33
LI Z. Effects of sowing pattern and planting density on population construction and yield of winter wheat [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022:31-33
- [21] 谢秀荣,张永强,海峰,等. 匀播增密对适期晚播冬小麦群体结构及产量的影响[J]. 新疆农业科学,2025,62(1):21-28
XIE X R, ZHANG Y Q, HAI F, et al. Effects of uniform sowing and densification on population structure and yield of late sowing winter wheat [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2025, 62(1):21-28
- [22] 刘晓东,王春光,郭文斌,等. 甜高粱弯曲力学特性试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(7):180-185
LIU X D, WANG C G, GUO W B, et al. Experiments on bending mechanical properties of sweet sorghum [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(7):180-185
- [23] 史玉远. 北方小麦种植的抗倒伏技术措施与效果分析[J]. 粮油与饲料科技,2025(4):55-57
SHI Y Y. Technical measures and effect analysis of lodging resistance in wheat planting in northern China [J]. Grain Oil and Feed Technology, 2025(4):55-57
- [24] 赵夕冉,张玉,张嘉豪,等. 密度和行距对直立株型小麦产量、群体冠层特征和抗倒伏性的影响[J]. 中国农学通报,2024,40(14):13-22
ZHAO X R, ZHANG Y, ZHANG J H, et al. Effects of density and row spacing on yield, canopy characteristics and lodging resistance of upright plant type wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(14):13-22
- [25] 张海涵,滕祥勇,王思楠,等. 不同行距对旱直播梗稻产量及抗倒伏能力的影响[J]. 东北农业科学,2024,49(6):23-29
ZHANG H H, TENG X Y, WANG S N, et al. Effect of row distances on yields and Lodging Resistance of Japonica Rice cultivars under dry direct-sowing [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(6):23-29
- [26] LÜ S W, LIN Z S, SHEN J H, et al. OsTCP19 coordinates inhibition of lignin biosynthesis and promotion of cellulose biosynthesis to modify lodging resistance in rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2024, 75(1):123-136
- [27] 牛皓. 饲用高粱木质素含量全基因组关联分析与基因挖掘[D]. 太谷:山西农业大学,2022:86-88
NIU H. Genome wide association study and gene mining of lignin content in forage sorghum [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022:86-88
- [28] 倪军. 氮肥和密度对小麦茎秆抗倒伏性能及木质素积累的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2018:36-39
NI J. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the lignin accumulation in the culm in relation to lodging resistance of wheat [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018:36-39
- [29] 董荷荷,骆永丽,李文倩,等. 不同春季追氮模式对小麦茎秆抗倒性能及木质素积累的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(21):4399-4414
DONG H H, LUO Y L, LI W Q, et al. Effects of different spring nitrogen topdressing modes on lodging resistance and lignin accumulation of winter wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(21):4399-4414
- [30] 严旖旎,单海勇,刘旭杰,等. 生长调节剂对大豆-玉米间作模式中玉米产量和抗倒性的影响[J]. 核农学报,2024,38(9):1805-1813
YAN Y N, SHAN H Y, LIU X J, et al. Effect of growth regulators on maize yield and lodging resistance in soybean-maize intercropping system [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(9):1805-1813
- [31] 任梁,房孟颖,武志海,等. 乙矮合剂对酿造高粱抗倒伏能力及产量的影响[J]. 作物杂志,2024(4):164-171
REN L, FANG M Y, WU Z H, et al. Effects of ethylene-chloromequat-potassium (ECK) on sorghum [*sorghum bicolor* (L.) Moench.] lodging resistance and yield [J]. Crops, 2024(4):164-171