

调环酸钙对糜子茎秆特征及抗倒伏能力的影响

侯晓敏 闫 锋 董 扬 赵富阳 李清泉 卢 环 张金东 张巩亮

(黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院, 161006, 黑龙江齐齐哈尔)

摘 要 倒伏是影响糜子产量和品质的重要因素, 以抗倒伏品种齐泰 1 号和不抗倒伏品种 002-095 为试验材料, 在拔节期喷施不同浓度 (0、100、200 和 400 mg/L) 的调环酸钙, 研究了叶面喷施调环酸钙对糜子茎秆生理特性及抗倒伏能力的影响。结果表明, 调环酸钙处理抑制了糜子株高, 促进了生物量和茎粗增加, 使其植株基部节间的机械强度、节间充实度、节间抗折力、木质素和纤维素含量均显著提高, 而倒伏指数和倒伏系数降低, 抗倒伏能力增强, 从而提高了产量。相关分析表明: 节间抗折力与节间充实度、节间直径、纤维素含量呈正相关, 与株高、重心高度呈负相关。倒伏指数与节间充实度、木质素含量呈极显著负相关。齐泰 1 号和 002-095 最适调环酸钙喷施浓度均为 200 mg/L, 可有效提高糜子的抗倒伏能力。

关键词 糜子; 调环酸钙; 节间抗折力; 抗倒伏能力; 产量

糜子 (*Panicum miliaceum* L.), 又名黍、稷, 是中国北方传统的五谷杂粮之一。糜子是 C₄ 植物, 具有高效利用水资源和抗旱能力, 是干旱、半干旱地区的重要粮食作物。此外, 糜子的生长周期短, 从播种到成熟通常为 60~90 d, 这有利于积温相对不足的地区和季节复种^[1-2]。糜子富含营养物质, 且不含麸质, 升糖指数低, 是麸质不耐受人群的理想食物, 作为多元化特色健康食物在粮食市场上占据着重要的地位^[3]。在糜子生长发育过程中, 植株从灌浆期至乳熟期易受到大风、大雨等外力因素胁迫, 从而造成大面积倒伏现象, 导致糜子产量低、品质差, 严重影响了机械化收获效率。倒伏已成为影响糜子高产、稳产的一个重要限制因素^[4]。植物生长调节剂通过抑制植物体内的赤霉素合成或促进乙烯的释放, 改变内源激素的合成, 从而降低株高和倒伏率。同时植物生长调节剂具有成本低、用量少、见效快等优点。因此, 利用植物生长调节剂降低株高、增强茎秆机械强度和抗折力来改善糜子的倒伏性是有效的手段之一。

调环酸钙是一种重要的植物生长延缓剂, 对环境无污染, 施用后会在土壤中分解为 CO₂ 和 H₂O, 是一种绿色环保低害的植物生长调节剂。调环酸钙的作用机理是通过阻止赤霉素前体向活性赤霉素转化, 阻断赤霉素的合成, 抑制营养器官

生长, 促进生殖生长, 降低株高, 提高作物的抗倒伏性, 同时具有较好的抗病害能力^[5]。研究^[6-7]证实, 调环酸钙对水稻、蔬菜、花卉等具有特定的调节作用。谢佳等^[8]认为, 喷施调环酸钙可以显著降低棉花株高, 增加光合物质积累, 提升棉花产量。宋佳敏等^[9]研究发现, 在水稻始穗期喷施 15 mg/L 调环酸钙可显著增加茎秆粗度和抗折力, 缩短节间长, 增强叶片的光合能力, 提高有效穗数, 实现水稻抗倒增产。张庆等^[10]研究表明, 喷施适量的调环酸钙能明显降低金莲花株高并增加茎粗。李瑞等^[11]研究发现, 喷施 150 mg/L 调环酸钙能有效防止黄瓜幼苗徒长, 促进光合作用, 有利于壮苗。郭兴强等^[12]研究显示, 在拔节后喷施调环酸钙复配剂能显著抑制甜高粱的节间伸长, 降低倒伏率。

目前, 国内外关于调环酸钙在糜子抗倒伏方面的研究鲜见报道。因此, 本试验探究了不同浓度调环酸钙对糜子植株茎秆形态、生理特性、抗倒伏能力及产量的影响, 为黑龙江省地区糜子生产中调环酸钙的合理应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2024-2025 年在黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院科研试验基地 (47°15' N, 123°45' E)

作者简介: 侯晓敏, 主要从事杂粮作物遗传育种及栽培研究, E-mail: houxiaomin2021@163.com

李清泉为通信作者, 主要从事杂粮作物育种研究, E-mail: zls1968@163.com

基金项目: 齐齐哈尔市科技计划联合引导项目 (LNYGG-2024001); 国家谷子高粱产业技术体系建设项目 (CARS-06-14.5-B21)

收稿日期: 2025-02-10; 修回日期: 2025-05-06; 网络出版日期: 2025-06-03

进行。试验地地势平坦，属于中温带大陆性季风气候，年均降水量 400 mm，土壤类型为碳酸盐黑钙土，肥力中等，0~20 cm 土层土壤基础性质：有机质 26.50 g/kg、碱解氮 100.05 mg/kg、有效磷 16.91 mg/kg、速效钾 134.03 mg/kg、pH 7.82。

供试糜子材料为抗倒伏品种齐黍 1 号和不抗倒伏品系 002-095，均由齐齐哈尔分院谷糜研究所选育。供试生长调节剂为调环酸钙（有效成分含量 5%，水剂），生产厂家为鹤壁全丰生物科技有限公司。

1.2 试验设计

采用裂区试验设计，主区为品种，副区为调节剂浓度处理，设置 4 个浓度处理，分别为 0（CK）、100（P100）、200（P200）和 400 mg/L（P400），在糜子拔节期，选择无风晴朗天气进行叶片药剂喷施，每个处理为 1 个小区，每小区 7 行，其中 5 行用于种植，2 行用于间隔防止喷洒时药剂溅射，行长 5.00 m，行距 0.65 m，小区面积 22.75 m²，每小区均匀喷施 300 mL（喷施药品当天、前后 1 d 均无降水），用等量的清水作对照处理（CK），每组 3 次重复。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 茎秆形态与抗倒伏特性 在糜子成熟期，每个处理取 10 株，测定株高、重心高度、叶重、

茎重、节间直径、节间长、节间鲜重、根重、穗长、穗重及节间充实度。用游标卡尺测量基茎粗。依据樊海潮等^[13]的方法，将基部节间分别用 YYD-1 茎秆强度测量仪（浙江托普仪器有限公司生产）测定节间抗折力。节间充实度=节间鲜重/节间长；机械强度=节间抗折力×节间长/2；茎秆倒伏指数=（重心高度×地上部鲜重）/机械强度；倒伏系数=株高×地上部鲜重/机械强度/根重。

1.3.2 产量 在成熟期测定千粒重，每个处理小区去掉边行和行头测定糜子产量，计算小区种子产量、折合每公顷产量并进行统计分析。

1.3.3 茎秆生理 成熟期，每小区取 10 株用于测定茎秆木质素^[14]和纤维素^[15]等化学成分的含量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理以及作图，用 SPSS 22.0 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 调环酸钙对糜子植株形态的影响

由表 1 可知，与 CK 处理相比，调环酸钙处理均使 2 个品种（系）株高和重心高度不同程度地降低，但随着调环酸钙浓度的增加，2 个品种（系）糜子株高和重心高度均呈先降后升趋势。在适宜浓度的调环酸钙处理下，2 个品种（系）叶重、茎

表 1 调环酸钙对糜子茎秆形态指标的影响
Table 1 Effects of prohexadione-calcium on stem morphological indexes of broomcorn millet

品种（系） Variety (line)	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	重心高度 Center of gravity height (cm)	叶重 Leaf weight (g)	茎重 Stem weight (g)	根重 Root weight (g)
齐黍 1 号 Qishu 1	CK	169.80±10.46a	80.05±3.21a	6.80±0.04c	29.20±1.02c	5.68±0.02ab
	P100	159.18±9.88b	75.62±5.66b	7.61±1.33b	30.68±1.96bc	5.80±0.09ab
	P200	154.32±15.34c	71.56±4.70c	10.40±0.89a	39.60±1.01a	5.91±0.04a
	P400	160.95±11.28b	75.24±3.53b	12.00±0.28a	36.20±0.57b	5.20±0.03b
002-095	CK	193.66±16.75a	87.76±5.06a	7.69±0.85b	24.00±0.96c	4.40±0.02ab
	P100	180.33±12.38b	85.08±3.62b	6.33±0.98c	31.22±0.47b	4.80±0.05ab
	P200	175.84±11.66c	79.80±4.11c	10.60±0.63a	42.20±0.74a	5.33±0.01a
	P400	179.48±10.92b	77.98±2.26c	7.80±0.34b	25.47±0.11bc	4.00±0.05b

品种（系） Variety (line)	处理 Treatment	穗重 Panicle weight (g)	穗长 Panicle length (cm)	基茎粗 Basal stem diameter (cm)	地上部鲜重 Aboveground fresh weight (g)
齐黍 1 号 Qishu 1	CK	16.67±0.45c	33.58±1.02a	0.88±0.05b	52.67±1.45c
	P100	24.83±0.63b	33.74±0.95a	0.90±0.01b	63.12±1.23b
	P200	26.60±1.03a	33.88±1.47a	1.14±0.22a	76.60±1.95a
	P400	27.63±0.85a	33.97±1.68a	0.91±0.04b	75.83±2.15a
002-095	CK	14.48±0.74b	35.41±0.74a	0.62±0.01c	46.17±1.48c
	P100	15.62±0.57a	37.23±0.96a	0.83±0.03a	53.17±2.67b
	P200	15.80±0.66a	38.13±1.85a	0.82±0.02a	68.60±1.44a
	P400	15.60±0.41a	35.96±1.43a	0.67±0.04b	48.87±1.55c

不同小写字母代表处理间在 $P < 0.05$ 水平达显著差异，下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ level, the same below.

重、穗重和根重等都有不同程度的增加，基茎粗也有所增加。

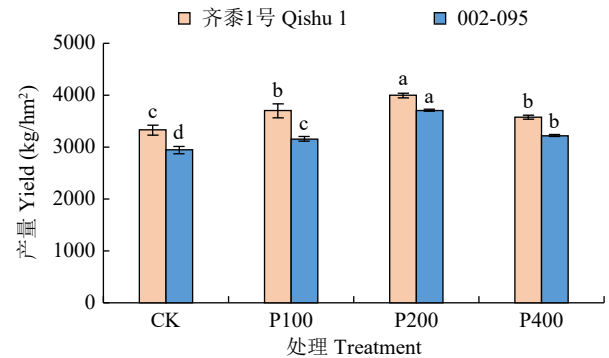
2 个品种（系）在 P200 处理下株高和重心高度均较低，其中齐黍 1 号和 002-095 株高分别较 CK 降低 9.12% 和 9.20%，重心高度分别降低 10.61% 和 9.07%；在 P200 处理下地上部鲜重、根重、基茎粗和穗重均较大，与 CK 处理相比，齐黍 1 号与 002-095 地上部鲜重分别增加 45.43% 和 48.58%，根重分别增加 4.05% 和 21.14%，基茎粗分别增加 29.55% 和 32.26%，穗重分别增加 59.57% 和 9.12%。说明适宜浓度的调环酸钙处理可抑制糜子的节间伸长，促进根的发育，增加植株的生物量。

2.2 调环酸钙对糜子植株产量的影响

由图 1 可知，2 个品种（系）喷施调环酸钙处理产量均显著高于 CK 处理，随调环酸钙浓度的增加呈先上升后下降的趋势，均在 P200 处理达到最大值，齐黍 1 号和 002-095 分别比 CK 处理显著增产 20.14% 和 19.12%。

2.3 调环酸钙对糜子植株茎秆节间特性的影响

由表 2 和表 3 可知，喷施不同浓度的调环酸钙



不同小写字母代表处理间在 $P < 0.05$ 水平达显著差异，下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ level, the same below.

图 1 不同调环酸钙处理对糜子产量的影响

Fig.1 Effects of different prohexadione-calcium treatments on the yield of broomcorn millet

缩短了 2 个品种（系）基部 1~5 节的节间长，增加了 2 个品种（系）基部 1~5 节的节间直径、提高了节间鲜重和节间充实度，P100、P200 和 P400 处理均与 CK 处理之间存在显著性差异。2 个品种（系）基部 1~5 节的节间长均随处理浓度的增加而逐渐降低，均在 P400 处理时达到最小，齐黍 1 号的节间长明显低于 002-095。2 个品种（系）基部 1~5 节的节间直径均随处理浓度的增加而逐渐升高，均在

表 2 调环酸钙对糜子茎秆节间长和节间鲜重的影响

Table 2 Effects of prohexadione-calcium on internode length and fresh weight of internode of broomcorn millet stem

品种(系) Variety (line)	处理 Treatment	节间长 Internode length (cm)					节间鲜重 Fresh weight of internode (g)				
		基 1 节 Section 1	基 2 节 Section 2	基 3 节 Section 3	基 4 节 Section 4	基 5 节 Section 5	基 1 节 Section 1	基 2 节 Section 2	基 3 节 Section 3	基 4 节 Section 4	基 5 节 Section 5
齐黍 1 号 Qishu 1	CK	6.78±1.58a	12.88±1.24a	14.92±0.49a	17.86±1.55a	14.08±2.58a	2.36±0.48d	3.02±0.74d	4.94±0.43d	6.20±0.35d	5.17±0.21d
	P100	6.02±2.49b	12.08±0.76b	14.90±2.57b	16.24±1.08b	14.04±2.44b	2.48±0.26b	4.26±0.25b	5.20±0.32b	6.48±0.21b	5.43±0.63b
	P200	5.52±0.34c	11.63±2.18c	13.25±0.16c	15.57±1.56c	13.20±0.98c	2.66±0.66a	4.88±0.52a	5.84±0.47a	6.63±0.47a	5.92±0.76a
	P400	5.48±0.18c	11.00±1.45c	13.66±0.87c	15.04±1.66c	12.12±1.42c	2.40±0.03c	4.16±0.41c	5.03±0.22c	6.29±0.32c	5.22±0.22c
002-095	CK	7.82±1.33a	14.10±0.83a	18.80±2.74a	19.80±0.71a	17.84±1.11a	2.60±0.85d	3.21±0.48d	4.24±0.54c	4.27±0.76d	4.46±0.41d
	P100	7.26±0.27b	13.26±1.07b	17.58±1.33b	18.32±2.63b	16.60±0.08b	2.66±0.58c	3.66±0.69b	4.36±0.88b	4.33±0.91c	4.93±0.23b
	P200	6.88±1.75c	9.02±1.76c	11.58±0.42c	16.28±0.82c	16.16±1.65c	2.91±0.86a	3.71±0.62a	4.45±0.45a	4.89±0.83a	5.61±0.49a
	P400	6.82±1.03c	8.91±1.58a	11.24±1.25c	15.84±0.49c	15.74±2.01c	2.83±0.76b	3.35±0.55c	4.28±0.36c	4.38±0.79b	4.59±0.74c

表 3 调环酸钙对糜子节间直径和节间充实度的影响

Table 3 Effects of prohexadione-calcium on internode diameter and internode fullness of broomcorn millet

品种(系) Variety (line)	处理 Treatment	节间直径 Internode diameter (cm)				
		基 1 节 Section 1	基 2 节 Section 2	基 3 节 Section 3	基 4 节 Section 4	基 5 节 Section 5
齐黍 1 号 Qishu 1	CK	0.71±0.03c	0.71±0.02c	0.71±0.09c	0.63±0.05c	0.71±0.28c
	P100	0.77±0.07b	0.76±0.43b	0.75±0.11b	0.70±0.03b	0.73±0.04b
	P200	0.81±0.02ab	0.79±0.08a	0.77±0.13ab	0.73±0.10ab	0.75±0.06ab
	P400	0.83±0.21a	0.78±0.19a	0.80±0.08a	0.78±0.06a	0.77±0.11a
002-095	CK	0.63±0.05c	0.63±0.03c	0.63±0.06c	0.56±0.07c	0.61±0.18c
	P100	0.66±0.01b	0.65±0.06b	0.64±0.07b	0.61±0.02b	0.63±0.05b
	P200	0.71±0.04ab	0.69±0.11ab	0.67±0.16ab	0.64±0.01ab	0.65±0.14a
	P400	0.74±0.14a	0.75±0.04a	0.70±0.07a	0.67±0.13a	0.66±0.03a

续表 3 Table 3 (continued)

品种 (系) Variety (line)	处理 Treatment	节间充实度 Internode fullness (g/cm)					
		基 1 节 Section 1	基 2 节 Section 2	基 3 节 Section 3	基 4 节 Section 4	基 5 节 Section 5	均值 Mean
齐黍 1 号 Qishu 1	CK	0.35±0.03b	0.31±0.05b	0.33±0.01b	0.35±0.05b	0.37±0.03b	0.34
	P100	0.41±0.05a	0.35±0.07a	0.35±0.06ab	0.40±0.06a	0.39±0.06b	0.38
	P200	0.48±0.11a	0.42±0.09a	0.44±0.04a	0.43±0.03a	0.45±0.05a	0.44
	P400	0.44±0.05a	0.38±0.02a	0.37±0.07ab	0.42±0.04a	0.43±0.02a	0.41
002-095	CK	0.33±0.01b	0.23±0.01c	0.23±0.02b	0.22±0.02b	0.25±0.01b	0.25
	P100	0.37±0.04ab	0.28±0.01bc	0.25±0.03ab	0.24±0.02ab	0.30±0.02a	0.29
	P200	0.42±0.03a	0.41±0.03a	0.38±0.02a	0.30±0.03a	0.35±0.06a	0.37
	P400	0.41±0.02a	0.38±0.02b	0.38±0.01a	0.28±0.04a	0.29±0.04a	0.35

P400 处理时达到最大。2 个品种 (系) 基部 1~5 节的节间鲜重和节间充实度随处理浓度的增加均呈先升高后下降趋势, 均在 P200 时达到最大, 与 CK 处理相比, 齐黍 1 号 1~5 节的节间鲜重分别显著增加了 12.71%、61.59%、18.22%、6.94%和 14.51%; 002-095 分别显著增加了 11.92%、15.58%、4.95%、14.52%和 25.78%。结果说明, 适宜浓度的调环酸钙可以缩短糜子的节间长, 增加节间鲜重、节间直径和节间充实度。

2.4 调环酸钙对糜子植株茎秆力学特性的影响

由表 4 可以看出, 随着调环酸钙浓度的增加, 基部 1~5 节节间抗折力和机械强度有所增加, 不同

处理间的差异达到显著水平, 2 个品种 (系) 均在 P200 处理时节间抗折力和机械强度最大, 与 CK 处理相比, 齐黍 1 号的 1~5 节节间抗折力分别增加了 41.73、35.64、35.05、28.51 和 26.33 N, 002-095 分别增加了 42.44、41.70、42.42、35.08 和 34.44 N。由表 5 可以看出, 随着调环酸钙浓度的增加, 2 个品种 (系) 倒伏指数和倒伏系数均下降, 与 CK 处理相比, 齐黍 1 号基部 1~5 节 P200 处理的倒伏指数显著降低了 19.89%~28.31%, 002-095 基部 1~5 节 P200 处理的倒伏指数则显著降低了 19.53%~51.67%。以上结果说明, 喷施调环酸钙有助于增加糜子茎秆基部节间抗折力和机械强度, 从而增

表 4 调环酸钙对糜子节间抗折力和机械强度的影响
Table 4 Effects of prohexadione-calcium on internode breaking resistance and mechanical strength of broomcorn millet

品种 (系) Variety (line)	处理 Treatment	节间抗折力 Internode breaking resistance (N)				
		基 1 节 Section 1	基 2 节 Section 2	基 3 节 Section 3	基 4 节 Section 4	基 5 节 Section 5
齐黍 1 号 Qishu 1	CK	42.00±1.46d	40.36±1.38c	33.62±1.75d	30.54±2.43b	29.12±1.46b
	P100	59.42±2.33c	49.54±2.07b	45.58±3.45c	47.86±3.66ab	36.06±1.71ab
	P200	83.73±4.83a	76.00±5.49a	68.67±5.03a	59.05±4.18a	55.45±2.56a
	P400	79.44±4.67b	70.50±4.56a	57.70±4.13b	55.62±4.07a	53.34±1.99a
002-095	CK	32.46±1.21c	25.68±1.77d	22.40±1.56c	21.96±1.43c	16.52±1.47c
	P100	46.43±1.45b	35.53±1.74c	34.86±2.46b	32.43±1.55b	31.10±1.66b
	P200	74.90±4.13a	67.38±3.54a	64.82±3.87a	57.04±2.76a	50.96±2.42a
	P400	50.94±1.89b	45.32±2.76b	43.70±1.56b	32.84±2.44b	26.10±1.46b

品种 (系) Variety (line)	处理 Treatment	机械强度 Mechanical strength (N/cm)				
		基 1 节 Section 1	基 2 节 Section 2	基 3 节 Section 3	基 4 节 Section 4	基 5 节 Section 5
齐黍 1 号 Qishu 1	CK	142.38±13.46c	259.92±10.78c	250.81±3.84c	272.72±5.67c	205.00±6.57c
	P100	178.85±17.62b	299.22±13.26b	339.57±9.57b	388.62±8.68b	253.14±4.47b
	P200	231.09±10.45a	441.75±26.77a	454.97±8.47a	459.85±12.84a	365.97±19.96a
	P400	217.67±21.44a	387.75±20.02a	394.09±4.56a	418.26±16.55a	323.24±9.84a
002-095	CK	126.92±6.87c	181.04±10.75b	210.56±10.66b	217.40±6.93b	147.36±3.57c
	P100	168.55±8.12b	235.59±13.64a	306.48±27.74a	297.09±8.22ab	258.13±4.78b
	P200	257.66±13.47a	303.88±18.15a	375.31±15.69a	464.31±16.19a	411.76±11.97a
	P400	173.71±12.66b	201.90±6.78ab	245.59±3.78ab	260.09±13.25ab	205.41±3.56b

强糜子植株的抗倒伏能力。

2.5 调环酸钙对糜子植株茎秆生理特性的影响

通过图 2 对比发现, 抗倒伏品种齐黍 1 号纤维

素和木质素含量显著高于易倒伏品系 002-095, 2 个品种 (系) 喷施不同调环酸钙处理后纤维素和木质素含量均显著高于 CK 处理, 均在 P200 处理时

表 5 调环酸钙对糜子倒伏指数和倒伏系数的影响											
Table 5 Effects of prohexadione-calcium on lodging index and lodging coefficient of broomcorn millet											
品种(系) Variety (line)	处理 Treatment	倒伏指数 Lodging index					倒伏系数 Lodging coefficient				
		基 1 节 Section 1	基 2 节 Section 2	基 3 节 Section 3	基 4 节 Section 4	基 5 节 Section 5	基 1 节 Section 1	基 2 节 Section 2	基 3 节 Section 3	基 4 节 Section 4	基 5 节 Section 5
齐黍 1 号 Qishu 1	CK	29.61±0.45a	16.22±1.41a	16.81±1.09a	15.46±0.48a	20.57±1.96a	11.06±0.35a	6.06±0.63a	6.28±0.89a	5.77±0.55a	7.68±2.43a
	P100	26.69±2.63b	15.95±1.81b	14.06±0.06b	12.28±1.42b	18.86±1.68b	9.69±0.85b	5.79±1.96c	5.10±0.36b	4.46±1.44b	6.84±1.71b
	P200	23.72±2.46c	12.41±0.75c	12.05±0.45c	11.92±0.55c	14.98±0.53c	8.66±0.43c	4.53±1.12c	4.40±0.77c	4.35±0.48b	5.47±0.41c
	P400	26.21±2.91b	14.71±0.11b	14.48±1.47b	13.64±1.12b	17.65±1.97b	10.78±0.82b	6.05±0.43b	5.96±0.27b	5.61±0.62a	7.26±0.56a
002-095	CK	31.93±0.44a	22.38±2.27a	19.24±0.08a	18.64±1.07a	27.50±1.08a	16.01±1.33a	11.22±0.57a	9.65±0.78a	9.35±0.48a	13.79±2.55a
	P100	26.84±2.79b	19.20±1.24b	14.76±0.19b	15.23±0.63b	17.53±1.11b	11.85±1.46b	8.48±0.66c	6.52±0.71c	6.72±1.57b	7.74±1.42c
	P200	21.25±0.33c	18.01±1.03c	14.59±0.05b	11.79±1.44c	13.29±0.47c	8.78±0.56c	7.44±0.45c	6.03±1.34c	4.87±0.49c	5.49±0.78c
	P400	21.94±1.64c	18.88±1.45c	15.52±0.46b	14.65±0.06b	18.55±1.69b	12.62±1.05b	10.86±0.33b	8.93±1.42b	8.43±0.38b	10.68±1.05b

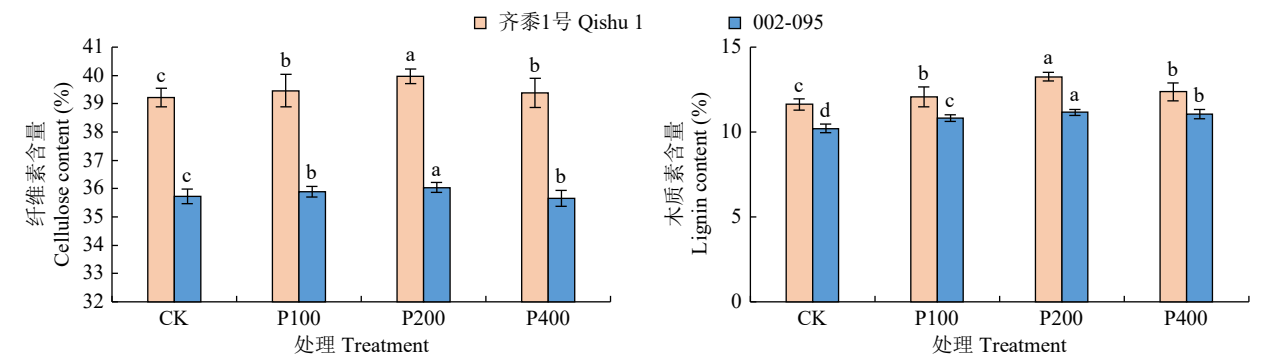


图 2 不同调环酸钙处理茎秆中木质素和纤维素含量
Fig.2 Lignin and cellulose content in stems treated with different levels of prohexadione-calcium

最高。与 CK 处理相比，齐黍 1 号和 002-095 纤维素含量分别增加 1.91%和 0.87%，木质素含量分别增加 13.93%和 9.31%，2 个品种（系）P200 处理与 P100、P400 处理的纤维素和木质素含量均存在显著差异。以上结果说明调环酸钙可增加糜子茎秆纤维素和木质素含量，从而增强糜子植株的抗倒伏能力。

2.6 抗倒伏能力与茎秆形态性状的相关性分析
相关性分析（表 6）表明，节间抗折力与节间充实度呈极显著正相关，与节间直径、纤维素含量呈显著正相关，与重心高度呈极显著负相关，与株高呈显著负相关。倒伏指数与株高、重心高度呈极显著正相关，与节间直径、木质素含量、纤维素含量呈极显著负相关，与节间充实度呈显著负相关。

表 6 抗折力和倒伏指数与茎秆形态性状的相关性分析							
Table 6 Correlation analysis of breaking resistance and lodging index with stem morphological traits							
指标 Index	节间长 Internode length	节间直径 Internode diameter	株高 Plant height	重心高度 Height of center of gravity	节间充实度 Internode fullness	木质素含量 Lignin content	纤维素含量 Cellulose content
节间抗折力 Internode breaking resistance	-0.587	0.747*	-0.761*	-0.835**	0.912**	0.530	0.800*
倒伏指数 Lodging index	0.225	-0.860**	0.972**	0.917**	-0.722*	-0.877**	-0.984**

“*” 和 “**” 分别表示相关性达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。
“*” and “**” indicate significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

结果说明节间抗折力与倒伏指数受多种指标影响，增加节间直径、节间充实度、纤维素含量均能提高糜子的抗倒伏能力。

3 讨论

糜子的抗倒伏能力与其株高、节间抗折力、单株鲜重等多种因素有关，耿小丽等^[16]认为茎基部的

节间性状和株高是判断抗倒伏能力的重要指标，通过喷施植物生长调节剂调控糜子株高，优化茎秆抗倒伏性状，是提高糜子抗倒伏能力常用的一种栽培技术手段。周田田等^[17]研究发现，幼苗齐苗时（播种后 1 周）施用 150 mg/L 调环酸钙可有效抑制花椰菜幼苗株高，增加茎粗。张钰琇^[18]研究表明，拔节期后 1 周喷施 1.0 mL/L 调环酸钙，可显著降低谷

子株高和节间长, 并提高抗倒伏能力, 进而提升产量。姜照伟等^[19]研究发现, 在水稻拔节前 7 d 至拔节始期喷施调环酸钙, 缩短了倒 1~倒 6 节节间长度, 明显增加了节间直径, 降低了田间倒伏率, 本试验结果与其一致, 齐黍 1 号和 002-095 在拔节期喷施调环酸钙, 可显著增加茎粗, 缩短基部 1~5 节节间长度。郭世保等^[20]研究表明, 不同浓度处理下小麦株高会随着调环酸钙浓度的升高逐渐降低。而本研究结果表明, 在拔节期喷施不同浓度的调环酸钙能有效抑制齐黍 1 号和 002-095 的株高和重心高度下降, 随着浓度的增加呈现先下降后上升的趋势, 这有可能与作物品种和种植环境不同有关。关于调环酸钙对茎秆力学特征的影响, 本研究发现, 拔节期喷施调环酸钙显著增加了齐黍 1 号和 002-095 的节间抗折力和机械强度, 这与杨可攀等^[21]关于化控剂对玉米茎秆力学特性影响的研究结果一致。

木质素和纤维素是植物次生细胞壁的主要组成成分, 也是衡量作物抗倒伏能力的一个重要生理指标, 植物激素可调控植株生长发育和形态建成, 影响植物细胞壁合成。邹小智等^[22]研究发现, 赤霉素不仅有效促进生物量的增加, 还影响植株纤维素与木质素的含量。南铭等^[23]研究表明, 茎秆木质素含量与田间实际倒伏率呈显著负相关(相关系数为 -0.9407), 与抗折力呈极显著正相关(相关系数为 0.9862)。梁海燕等^[24]研究发现, 木质素和纤维素等物质的积累, 有利于加固糜子细胞壁的机械强度, 增强茎秆刚性, 从而提高茎秆的抗倒伏能力。刘文彬等^[25]发现, 乙烯利处理可显著提高玉米节间木质素和纤维素的总含量, 增加茎秆的抗折力。本研究表明, 在拔节期喷施 200 mg/L 调环酸钙时, 2 个品种(系)纤维素和木质素含量均达最高, 同一处理间抗倒伏品种齐黍 1 号节间抗折力、木质素、纤维素含量较倒伏敏感型品系 002-095 高, 这与董荷荷等^[26]在小麦上的研究一致。这可能是由于抗倒伏品种齐黍 1 号将大部分养分用于植株茎秆横向生长, 株高降低, 基部节间缩短增粗, 茎秆表皮细胞壁中木质素、纤维素等结构性化合物增加, 从而提高了糜子节间抗折力。

基部节间特性在抗倒伏性中发挥重要作用^[27]。在本研究中, 糜子茎秆基部第 2 节的抗折力与株高呈显著负相关, 这与武翠卿等^[28]关于农艺措施对谷

子抗倒伏力学影响的研究结果一致。董孔军等^[29]研究发现, 倒伏指数能较好地评价糜子的抗倒伏性。本试验发现, 倒伏指数与株高、重心高度呈极显著正相关, 这一结论与纪明雪等^[30]的研究结果一致, 基部第 2 节节间直径、节间充实度、纤维素含量、木质素含量与倒伏指数呈显著或极显著负相关。王旭等^[31]对冬小麦研究认为, 纤维素含量与倒伏指数呈极显著负相关。本研究中, 节间抗折力与纤维素含量呈显著正相关, 这表明增加木质素和纤维素含量对提高糜子抗倒伏能力具有重要作用。本试验对糜子拔节期茎秆形态、节间、力学和生理特性进行分析研究, 而植物生长调节剂具有时效性和专一性, 还可能存在‘反跳’现象等, 因此要系统了解调环酸钙对糜子的影响, 还需要分析多种相关酶活性的变化, 进一步丰富调环酸钙对糜子的调控机理。

4 结论

在糜子拔节期喷施调环酸钙可以显著降低重心高度, 缩短基部 1~5 节节间长度, 提高基部 1~5 节茎秆强度、节间充实度和木质素、纤维素含量, 降低茎秆倒伏指数, 提高植株的抗倒伏能力。喷施 200 mg/L 调环酸钙时可有效提高糜子的抗倒伏能力。

参考文献

- [1] Washburn J D, Schnable J C, Davidse G, et al. Phylogeny and photosynthesis of the grass tribe *Paniceae*. *American Journal of Botany*, 2015, 102(9): 1493-1505.
- [2] Bora P, Ragae S, Marcone M. Effect of parboiling on decortication yield of millet grains and phenolic acids and in vitro digestibility of selected millet products. *Food Chemistry*, 2019, 274(15): 718-725.
- [3] Liu H Y, Zhang J P, Kambiu L, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(18): 7367-7372.
- [4] Yue H, Wang M, Liu S Y, et al. Transcriptome-wide identification and expression profiles of the WRKY transcription factor family in Broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.). *BMC Genomics*, 2016, 17(1): 343.
- [5] Duong M V, Chung J W, Ha V G, et al. Prohexadione-calcium mitigates the overgrowth of corn seedlings. *Agronomy*, 2024, 14(2): 371.
- [6] Ilias I F, Rajapakse N. Prohexadione-calcium affects growth and flowering of petunia and impatiens grown under photosensitive films. *Scientia Horticulturae*, 2005, 106(2): 190-202.
- [7] Kim H Y, Lee I J, Hamayun M, et al. Effect of prohexadione

- calcium on growth components and endogenous gibberellins contents of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2007, 193(6): 445-451.
- [8] 谢佳, 许豆豆, 赵强, 等. 调环酸钙对棉花生长发育的调控效应. *江苏农业科学*, 2024, 52(5): 89-93.
- [9] 宋佳敏, 尤杰, 文廷刚, 等. 不同时期喷施二氢卟吩铁和调环酸钙对水稻倒伏及产量的影响. *江苏农业科学*, 2023, 51(19): 57-61.
- [10] 张庆, 王如意, 李佳秋, 等. 调环酸钙对金莲花幼苗生长及生理生化的影响. *北方园艺*, 2023(9): 104-111.
- [11] 李瑞, 蒋欣梅, 刘汉兵, 等. 不同浓度调环酸钙对黄瓜幼苗徒长防控的影响. *中国蔬菜*, 2020(3): 33-37.
- [12] 郭兴强, 于永静, 吕润海, 等. 调环酸钙—青鲜素复配剂对甜高粱节间生长的调控效应. *中国农业大学学报*, 2009, 14(5): 29-34.
- [13] 樊海潮, 顾万荣, 杨德光, 等. 化控剂对东北春玉米茎秆理化特性及抗倒伏的影响. *作物学报*, 2018, 44(6): 909-919.
- [14] 池宁琳. 植物纤维中不溶性碳水化合物的测定. 上海: 复旦大学, 2012.
- [15] Vansoest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [16] 耿小丽, 武慧娟, 付萍, 等. 叶面喷施多效唑、矮壮素、缩节胺对燕麦抗倒伏性和种子产量的调节作用. *草业科学*, 2023, 40(9): 2340-2347.
- [17] 周田田, 杨文杰. 调环酸钙对花椰菜幼苗生长及徒长防控效果的影响. *浙江农业科学*, 2024, 65(5): 1153-1158.
- [18] 张钰琇. 调环酸钙对谷子株高和抗倒伏性的影响. 晋中: 山西农业大学, 2022.
- [19] 姜照伟, 李小萍, 赵雅静, 等. 立丰灵对水稻抗倒性和产量性状的影响. *福建农业学报*, 2011, 26(3): 355-359.
- [20] 郭世保, 陈俊华, 王朝阳, 等. 5%调环酸钙 EA 对小麦生长和光合作用的影响. *贵州农业科学*, 2016, 44(3): 23-26, 42.
- [21] 杨可攀, 顾万荣, 王悦力, 等. 化控剂对玉米光合、激素及茎秆力学特性的影响. *玉米科学*, 2017, 25(4): 75-83.
- [22] 邹小智, 蒲苗艳, 罗佳, 等. 赤霉素对芦苇生长发育和茎秆理化特性的影响. *分子植物育种*. (2024-12-06)[2025-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240810.1035.004.html>.
- [23] 南铭, 李晶, 赵桂琴, 等. 茎秆基部节间特性和木质素合成与燕麦抗倒伏的关系. *草业学报*, 2022, 31(11): 172-180.
- [24] 梁海燕, 李海, 丁超, 等. 钾肥对糜子茎秆形态、力学、生理特性及抗倒伏能力的影响. *作物杂志*, 2021(6): 177-181.
- [25] 刘文彬, 冯乃杰, 张盼盼, 等. 乙烯利和激动素对玉米茎秆抗倒伏和产量的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9): 1326-1334.
- [26] 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. *中国农业科学*, 2020, 53(21): 4399-4414.
- [27] 宋艳艳, 孙娟娟, 林克剑, 等. 不同燕麦品种(系)的抗倒伏性差异及其影响因素研究. *中国草地学报*, 2024, 46(10): 33-43.
- [28] 武翠卿, 孙静鑫, 郭平毅, 等. 农艺措施对谷子产量及抗倒伏力学性能的影响. *中国农业科学*, 2021, 54(6): 1127-1142.
- [29] 董孔军, 刘天鹏, 何继红, 等. 糜子种质材料的抗倒伏性、农艺性状及力学特性. *西北农业学报*, 2018, 27(8): 1119-1126.
- [30] 纪明雪, 张智勇, 齐冰洁, 等. 燕麦种质资源抗倒伏及生物学性状的差异评价. *麦类作物学报*, 2023, 43(4): 453-462.
- [31] 王旭, 周洁, 朱玉磊, 等. 氮肥运筹对冬小麦第三节间抗倒性的影响. *安徽农业大学学报*, 2021, 48(2): 173-178.

Effects of Prohexadione-Calcium on Stem Characteristics and Lodging Resistance of Broomcorn Millet

Hou Xiaomin, Yan Feng, Dong Yang, Zhao Fuyang, Li Qingquan,
Lu Huan, Zhang Jindong, Zhang Gongliang

(Qiqihar Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China)

Abstract Lodging is a major factor limiting the yield and quality of broomcorn millet. In this study, the lodging-resistant variety Qishu 1 and the lodging-susceptible line 002-095 were used as experimental materials. Different concentrations of prohexadione-calcium (0, 100, 200, and 400 mg/L) were foliar-applied at the jointing stage to investigate their effects on stem physiological characteristics and lodging resistance. The results showed that prohexadione-calcium treatment reduced plant height while increasing biomass and stem diameter. It significantly enhanced the mechanical strength, internode fullness, internode breaking resistance, and the lignin and cellulose contents of basal internodes. Meanwhile, the lodging index and lodging coefficient decreased, indicating improved lodging resistance, which ultimately contributed to increased yield. Correlation analysis revealed that internode breaking resistance was positively correlated with internode fullness, internode diameter, and cellulose content, but negatively correlated with plant height and center of gravity height. The lodging index was significantly negatively correlated with internode fullness and lignin content. Overall, the optimal concentration of prohexadione-calcium for both Qishu 1 and 002-095 was 200 mg/L, which effectively improved lodging resistance.

Key words Broomcorn millet; Prohexadione-calcium; Internode breaking resistance; Lodging resistance; Yield