

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22308

施钾量对川中丘陵区春玉米基部节间特性及抗倒伏能力的影响

易茜¹, 朱从桦^{1, 2}, 谭杰^{1, 3}, 张嘉莉¹, 曹跃强¹, 孔凡磊¹, 袁继超^{1*}

(1. 四川农业大学农学院, 四川 成都 611130; 2. 四川省农业科学院作物研究所, 四川 成都 610066; 3. 米易县农牧局, 四川 攀枝花 617200)

摘要:为探明提高川中丘陵区春玉米抗倒伏能力的适宜施钾量, 2013—2014 年开展田间试验, 采用单因素随机区组设计, 设置 5 个施钾量: 0、45、90、135 和 180 kg · hm⁻², 测定吐丝期和灌浆期玉米基部节间物质积累特征、化学组分、力学指标、倒伏率以及籽粒产量。结果表明, 相比无钾肥处理, 施钾处理增产 1.19% ~ 8.43% (2013 年)、1.75% ~ 9.19% (2014 年), 植株倒伏率降低 11.11% ~ 44.44% (2013 年)、12.50% ~ 52.10% (2014 年)。玉米倒伏率与吐丝期和灌浆期基部第 2 节至第 5 节的硬皮穿刺强度、茎秆压碎强度、茎秆折断强度和纤维素含量呈显著负相关, 与吐丝期基部第 2 节至第 3 节的鲜重和鲜密度、灌浆期基部第 2 节至第 5 节钾含量呈显著负相关, 与灌浆期基部第 2 节至第 5 节可溶性糖含量和淀粉含量呈显著正相关。施用钾肥能提高玉米茎秆基部第 2 节间至第 5 节间的鲜重和干重。基部第 2 节至第 5 节的纤维素含量、硬皮穿刺强度、茎秆压碎强度和折断强度随着施钾量的增加呈现先增加后下降的趋势, 其中钾肥用量为 90 kg · hm⁻² 时的数值最大。综上所述, 施用 95.0 ~ 121.0 kg · hm⁻² 钾肥, 能够明显增加春玉米基部节间的纤维素含量, 增强茎秆折断强度、硬皮穿刺强度和茎秆压碎强度, 提高抗倒伏能力, 降低倒伏率, 最终增加籽粒产量。本研究为川中丘陵区春玉米抗倒、丰产施肥技术提供了理论依据和实践基础。

关键词: 春玉米; 钾肥用量; 基部节间特征; 抗倒伏; 产量

玉米是重要的粮饲兼经济能源作物, 其稳产高产受资源、环境及种植水平等的影响。目前, 密植是提高玉米产量的重要途径, 但增密也会增加倒伏风险, 倒伏严重会导致减产^[1-3], 而且不利于机械化收获。倒伏直接破坏玉米群体地上部空间分布, 减弱叶片物质生产能力, 破坏茎秆的疏导系统, 导致水分、养分、可溶性糖和信号物质等的运输受阻; 倒伏通常导致减产 5% ~ 50%, 极其严重时会绝收^[4-5]; 倒伏率增加 1%, 约减产 108 kg · hm⁻²^[6]。据统计, 我国每年因倒伏造成玉米产量的损失近 100 万 t^[7]。前人在耕种方式^[2-3, 8]、病虫害防治^[9]、植物生长调节剂^[10]、品种差异^[1]、肥水管理^[11-13]、生态环境^[14-15]等方面开展玉米壮秆抗倒

伏研究, 以期增强玉米茎秆的抗倒能力, 实现减损增产。

玉米的抗倒伏能力与茎秆形态特征、力学特性及物质组成密切相关^[16-18]。钾是玉米正常生长发育所必需的营养元素, 增施钾肥后, 茎秆含钾量和粗纤维含量增加, 硬皮组织和维管束鞘更加发达, 茎秆厚壁细胞木质化程度增加, 茎秆机械硬度增加, 下位节间的伸长被抑制, 节间加粗, 茎秆抗倒伏能力增加, 倒伏率显著下降, 最终增加籽粒产量^[11-13]。钾肥增强玉米抗倒伏能力方面的机理研究主要集中在北方玉米区, 川中丘陵区鲜见报道, 而且各区域研究得出的适宜钾肥用量差异较大。春玉米是川中丘陵区的主要作物, 生育中后期由于大风暴雨天气较多, 玉米倒伏发生较为频繁, 如何增强抗倒能力是该区玉米高产稳产与发展机械化收获急需解决的热点问题, 而增施钾肥是提高玉米植株抗到能力与产量的有效措施。为此, 本研究以‘正红 505’为材料, 研究施钾量对玉米茎秆节间物质积累、物质组成、力学特征、倒伏率及产量的影响, 分析上述各项指标与玉米倒伏之间的相互关

收稿日期: 2022-05-15; 录用日期: 2022-07-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0301206, 2017YFD0301704)。

作者简介: 易茜 (1990-), 硕士研究生, 主要从事玉米抗逆稳产栽培技术研究。E-mail: yqsicau@163.com。

通讯作者: 袁继超, E-mail: yuanjichao5@163.com。

系, 探明川中丘陵区玉米高产抗倒的适宜钾量, 为玉米高产抗倒栽培提供理论支持和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2013年4月至2014年8月, 在四川省简阳市英明村(30° 43' N, 103° 52' E)进行定位试验。试验区属亚热带湿润气候区, 年均无霜

期大于280 d, 年均气温16.0℃, 10℃以上活动积温5500~6000℃, 年均降水量900~1000 mm, 主要分布在6—8月, 生长季(4—7月)平均气温和降水量见图1。土壤为棕紫泥土, 试验前0~25 cm耕层土壤基本性状为有机质10.12 g·kg⁻¹, 全氮0.97 g·kg⁻¹, 全磷0.18 g·kg⁻¹, 全钾10.56 g·kg⁻¹, 碱解氮67.42 g·kg⁻¹, 有效磷14.23 g·kg⁻¹, 速效钾55.46 mg·kg⁻¹。

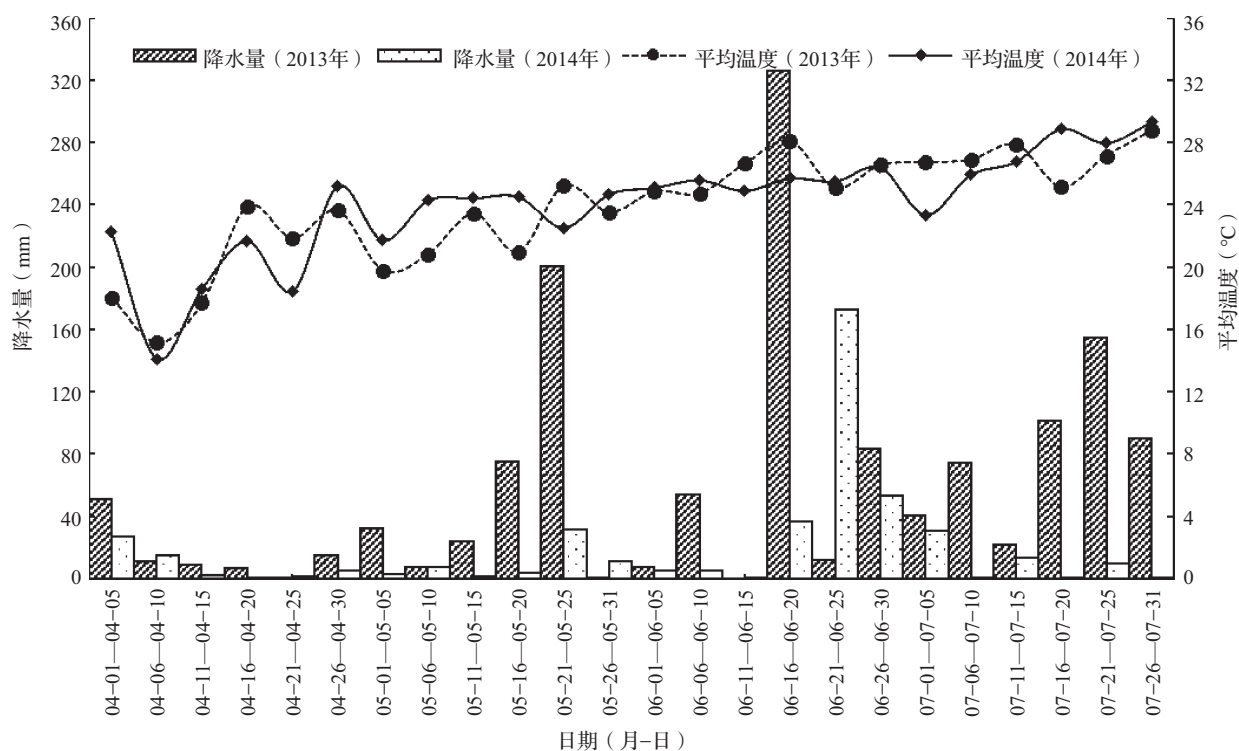


图1 2013年和2014年玉米生长季(4—7月)每5 d的降水量和平均温度

1.2 供试材料

供试玉米品种为‘正红505’(四川农业大学正红生物技术有限责任公司提供), 是四川省农业农村厅推荐的在四川丘陵区种植面积最大的品种之一。

1.3 试验设计

试验采用单因素随机区组设计, 设置0、45、90、135、180 kg·hm⁻², 共5个钾肥(K₂O)水平, 分别记为K₀、K₁、K₂、K₃、K₄, 各3次重复, 共计15个小区, 小区面积4 m×6 m=24 m²。所有处理钾肥为氯化钾(K₂O≥60%), 氮肥为尿素(N≥46%), 磷肥为过磷酸钙(P₂O₅≥12%), 纯氮用量为225 kg·hm⁻², 磷肥(P₂O₅)用量为90 kg·hm⁻², 磷肥全作底肥在播种时撒施于窄行, 氮肥和钾肥均按基肥:追肥=1:1, 基肥在播种前撒施于窄行, 追肥在大喇叭口期于窄行开中沟施入。播

种前采用旋耕机整地, 整地后播种地块平坦, 土壤上松下实, 采用宽窄行栽培方式, 宽行1.6 m, 窄行0.4 m, 株距0.2 m, 种植密度约为50000株·hm⁻²。分别于2013年4月3日和2014年4月1日浇足底水, 窄行起垄覆膜, 次日上午穴播2颗, 1叶1心引苗出膜, 4叶1心定苗(每穴留1株), 在大喇叭口期揭去地膜, 其余田间管理措施同当地大面积高产田块, 2013年8月2日和2014年7月29日收获。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 节间物质积累特征

于玉米吐丝期(2013年6月19日、2014年6月16日)和灌浆期(2013年7月11日、2014年7月12日), 每小区选取8株代表性植株, 将茎秆从节间分开, 测量基部向上第2节、第3节、第4节、第5节间鲜重, 并测定节间长、节间粗(茎秆长轴和短轴

的长度,分别记为a和b),待测量其机械强度(穿刺强度、压碎强度和折断强度)后,置于恒温干燥箱内105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重,再称重。

1.4.2 节间力学特性

利用1.4.1的节间鲜样,采用植物茎秆强度测定仪AWOS-SL04测定各项指标。用针型探测头(横截面积为0.01 cm²)垂直于茎秆中部,缓慢向下穿透茎秆表皮为止,记录最大值作为硬皮穿刺强度;用圆型探测头(横截面积为1 cm²)垂直于茎秆中部,缓慢向下至茎秆破裂为止,记录最大值作为压碎强度;用Y型探测头(横截面积为0.5 cm²)垂直于茎秆中部,缓慢向下至茎秆折断为止,记录最大值作为折断强度。

1.4.3 节间物质组成特性

利用1.4.1的节间干样,粉碎后过0.25 mm筛,采用H₂SO₄-H₂O₂消化,用FP6410型火焰光度计测定钾含量,按照高俊凤等^[19]方法测定可溶性糖、淀粉和纤维素含量。

1.4.4 倒伏率和产量

收获时统计各小区种植总株数、倒伏株数、实收株数,计算倒伏率,并按田间实收株数计产。

1.5 相关参数计算

茎秆体积 $V=\pi l \cdot ab/4$ (a和b分别为茎秆长轴和短轴长,l为节间长度)

基部节间茎秆鲜密度($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$)=基部节间茎秆鲜重(g)/基部节间茎秆体积(dm³)

基部节间茎秆干密度($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$)=基部节间茎秆干重(g)/基部节间茎秆体积(dm³)

倒伏率(%)=倒伏株数/种植总株数×100

1.6 数据统计与分析

运用DPS 7.05和SPSS 19.0统计分析,多重比较采用最小显著差异法(LSD法),两年数据趋势基本一致,本文重点对2014年结果进行阐述和讨论。

2 结果与分析

2.1 施钾量对玉米倒伏率及产量的影响

从表1可得,钾肥施用量对玉米的籽粒产量和田间倒伏率均有显著影响,籽粒产量(Y)随施钾量(X)的增加而先增后减,二者之间呈二次凸函数关系,2013和2014年的回归方程分别为 $Y=-0.065303X^2+12.5575X+8692.0$ ($R^2=0.7410^{**}$)和 $Y=-0.071116X^2+13.5201X+8690.7$ ($R^2=0.7516^{**}$),在施钾量分别为96.15和95.06 kg·hm⁻²时产量达到

最高;田间倒伏率(Y)则随施钾量(X)的增加呈现先降低后略升高,二者之间呈二次凹函数关系,2013和2014年的回归方程分别为 $Y=0.006173X^2-0.1500X+23.25$ ($R^2=0.8235^{**}$)和 $Y=0.0006469X^2-0.1553X+20.79$ ($R^2=0.8051^{**}$),在施钾量分别为121.49和120.03 kg·hm⁻²时倒伏率最低。可见,适量施用钾肥既能增产,又能降低倒伏率。

表1 施钾量对春玉米倒伏率、产量及其构成的影响

处理	2013 年		2014 年	
	产量 (kg·hm ⁻²)	倒伏率 (%)	产量 (kg·hm ⁻²)	倒伏率 (%)
K ₀	8743.50e	22.50a	8708.60d	20.00a
K ₁	8959.17c	20.00a	9060.32b	17.50b
K ₂	9480.83a	12.50c	9508.71a	9.58d
K ₃	9112.50b	15.00bc	9078.39b	12.50c
K ₄	8847.50d	16.25b	8861.40c	13.75c

注: 同列不同小写字母表示 0.05 水平上差异显著。

2.2 施钾量对玉米节间物质积累的影响

从表2可得,在吐丝期和灌浆期,玉米茎秆基部节间第2节间至第5节间的鲜重和干重随节位的上升呈先增后降趋势。与第2节间、第4节间、第5节间相比,第3节间吐丝期鲜重和干重分别增加19.45%、5.82%、21.62%和19.70%、0.44%、9.04%,灌浆期分别增加12.39%、4.77%、20.87%和11.95%、0.28%、6.22%。随着钾肥施用量增加,吐丝期和灌浆期基部第2节间至第5节间的鲜重和干重呈逐渐上升或先升后降趋势。与K₀相比,K₁、K₂、K₃、K₄处理吐丝期第2节间至第5节间的平均鲜重和干重分别提高22.3%、26.5%、32.7%、35.6%和14.2%、13.2%、17.7%、17.7%,灌浆期分别提高-1.8%、3.2%、22.9%、16.9%和0.8%、3.4%、21.0%、13.0%。在吐丝期和灌浆期,玉米茎秆基部节间第2节间至第5节间的鲜密度和干密度随节位的上升呈逐渐下降趋势。与第2节间相比,第5节间吐丝期的鲜密度和干密度分别下降12.21%~18.16%和9.34%~13.84%,灌浆期分别下降16.06%~18.84%和7.86%~19.40%,这表明玉米茎秆基部节间离地越远则充实度越差。随着钾肥水平的提高,吐丝期和灌浆期基部第2节间至第5节间的干、鲜密度先增加后降低,以K₃处理最高。综上所述,施用90~135 kg·hm⁻²钾能明显提高玉米基部第2节间至第5节间物质积累量,增加各节间的充实程度,进而增强玉米抗倒伏能力。

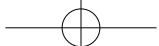


表 2 施钾量对玉米节间物质积累特征的影响

项目	处理	吐丝期				灌浆期			
		第 2 节	第 3 节	第 4 节	第 5 节	第 2 节	第 3 节	第 4 节	第 5 节
鲜重 (g)	K ₀	21.96b	27.79b	26.68b	23.17b	32.98bc	37.23b	35.47b	32.96a
	K ₁	28.24ab	33.25ab	32.84a	27.51ab	31.03c	37.07b	37.15ab	30.79a
	K ₂	28.81a	34.09ab	33.26a	29.81a	33.88bc	38.02ab	37.98ab	33.23a
	K ₃	31.95a	37.05a	33.29a	29.87a	40.21ab	47.01a	44.83a	38.38a
	K ₄	31.80a	38.35a	35.08a	29.85a	43.74a	45.04ab	39.63ab	33.72a
干重 (g)	K ₀	3.69b	4.57a	4.44b	3.93b	4.12b	4.64b	4.60b	4.38b
	K ₁	4.27ab	5.00a	5.11a	4.61ab	4.14b	4.65b	4.70b	4.40b
	K ₂	4.16ab	4.93a	5.04ab	4.70ab	4.33ab	4.69b	4.75b	4.58ab
	K ₃	4.43a	5.29a	5.04a	4.81a	4.99a	5.64a	5.59a	5.25a
	K ₄	4.31ab	5.18a	5.23a	4.85a	4.68ab	5.30ab	5.21ab	4.85ab
鲜密度 (g · dm ⁻³)	K ₀	6.61b	6.160a	5.36b	4.44b	7.98c	6.76b	5.53c	5.08b
	K ₁	7.76ab	6.86a	6.15a	5.04ab	7.68c	6.99b	6.33bc	5.29ab
	K ₂	7.70ab	6.89a	5.78ab	5.09ab	8.30bc	7.11b	6.61ab	5.49ab
	K ₃	8.16a	7.06a	5.80ab	5.18a	10.20ab	8.61a	7.33a	6.11a
	K ₄	7.88ab	6.70a	5.66ab	4.80ab	10.23a	7.88ab	6.38bc	5.40ab
干密度 (g · dm ⁻³)	K ₀	1.09a	0.95a	0.84b	0.75a	1.00b	0.84b	0.71c	0.68c
	K ₁	1.11a	1.03a	0.96a	0.84a	1.03b	0.88b	0.80bc	0.76b
	K ₂	1.12a	1.00a	0.88ab	0.82a	1.06b	0.88b	0.83ab	0.76b
	K ₃	1.13a	1.01a	0.88ab	0.84a	1.26a	1.03a	0.92a	0.84a
	K ₄	1.10a	0.95a	0.85b	0.78a	1.10ab	0.93ab	0.84ab	0.78ab

注：同一项目同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著，下同。

2.3 施钾量对玉米节间物质成分含量的影响

从表 3 可知，施钾能提高吐丝期和灌浆期基部各节间的钾含量，随施钾量的增加，吐丝期基部各节间钾含量逐渐增加（二者之间呈显著正相关，钾肥每增加 1 kg · hm⁻²，第 2 ~ 5 节间平均钾含量增加 0.003 个百分点），灌浆期则先增加后降低（二者之间呈二次凸函数关系，以 K₃ 处理最高），进一步分析发现，不施钾（K₀ 处理）和过量（K₄ 处理）灌浆期各节间的钾含量低于吐丝期，而适量施钾（K₂ 和 K₃ 处理）则相反，灌浆期高于吐丝期，表明适量施钾有利于增加生育后期基部节间的钾含量。

纤维素是植物细胞壁的主要组成成分，与茎秆机械强度密切相关^[20]。玉米基部节间在吐丝以后进一步纤维化，纤维素含量逐渐增加，5 个钾肥处理 4 个节间平均灌浆期纤维素含量较吐丝期平

均提高 69.5%。两个时期基部各节间的纤维素含量均随钾肥用量的增加而先增后降，以 K₂ 处理最高，K₂ 处理各节间的纤维素含量分别比对照（K₀）高 66.5% ~ 113.3% 和 78.9% ~ 152.9%。

基部节间贮存的淀粉和可溶性糖与细胞充实度关系密切^[21]。钾肥对基部各节间的淀粉和可溶糖含量均有显著影响，但影响的趋势和程度在不同时期之间存在较大差异，在吐丝期，随着施钾量的增加，各节间可溶性糖含量和淀粉含量均呈现先增后降趋势，以 K₂ 处理最高。但在灌浆期，随着施钾量的增加，各节间可溶性糖含量和淀粉含量均呈现先降后升趋势，以 K₂ 处理最低。进一步分析发现，K₂ 处理灌浆期的糖分（可溶糖和淀粉）含量较吐丝期低，而 K₀ 和 K₄ 处理则相反，表明适量施钾加速基部节间分向籽粒的转运。

表 3 施钾量对玉米节间物质组成的影响 (%)

项目	处理	吐丝期				灌浆期			
		第 2 节	第 3 节	第 4 节	第 5 节	第 2 节	第 3 节	第 4 节	第 5 节
钾含量	K ₀	1.31d	1.18c	1.21c	1.38ab	1.03c	1.02c	0.986c	1.07c
	K ₁	1.43cd	1.47bc	1.41b	1.39ab	1.42b	1.49b	1.421b	1.47b
	K ₂	1.63c	1.50bc	1.27bc	1.40ab	1.71ab	1.74a	1.757a	1.70a
	K ₃	1.88b	1.75b	1.43b	1.33b	1.88a	1.90a	1.955a	1.79a
	K ₄	2.18a	2.11a	1.71a	1.53a	1.90a	1.79a	1.783a	1.50b
纤维素含量	K ₀	5.40d	4.20d	5.07d	4.35c	7.23d	6.33c	8.00d	9.60c
	K ₁	5.66d	7.63bc	5.78c	4.93c	9.23cd	10.85b	10.64c	10.36c
	K ₂	8.99a	8.72a	9.00a	9.28a	18.29a	15.64a	18.45a	17.17a
	K ₃	7.96b	8.35ab	8.83a	8.54b	15.19b	11.63b	16.26b	13.61b
	K ₄	6.92c	7.44c	7.60b	8.28b	10.74c	10.81b	11.02c	11.26c
可溶性糖含量	K ₀	6.37a	5.27bc	3.85b	3.53bc	7.20a	6.54a	5.59a	4.91a
	K ₁	6.57a	5.60b	6.04a	4.30ab	4.44b	6.53a	5.44a	3.43c
	K ₂	6.58a	6.78a	6.40a	4.45a	3.14c	4.48b	2.94c	3.37c
	K ₃	5.20b	4.88c	3.95b	3.06cd	4.05bc	4.66b	3.25bc	3.81b
	K ₄	3.89c	5.06bc	3.28c	2.54d	4.08bc	6.05a	3.64b	3.62bc
淀粉含量	K ₀	0.44c	0.49d	0.87b	0.73c	1.14b	1.137a	1.340a	1.20b
	K ₁	0.73b	0.76bc	0.93b	0.87b	1.24ab	1.070a	1.143b	1.06c
	K ₂	0.93a	0.95a	1.22a	1.20a	0.78c	0.743c	0.988c	0.87d
	K ₃	0.71b	0.84ab	1.20a	0.74c	1.34a	1.053a	1.100bc	1.32a
	K ₄	0.43c	0.72c	0.89b	0.75bc	0.80c	0.854b	1.016bc	0.91d

2.4 施钾量对玉米节间力学特性的影响

由表 4 可以看出,各节间的硬皮穿刺强度、茎秆压碎强度和茎秆折断强度均随着节位的上升而降低,两个时期(吐丝期与灌浆期)5 个钾肥水平平均每上升 1 节,穿刺强度、压碎强度和折断强度分别降低 5.09、43.79 和 54.17 N;钾肥对基部各节间的机械强度有显著影响,随施钾量的增加,吐丝期和灌浆期各节间的硬皮穿刺强度、茎秆压碎强度和茎秆折断强度均呈现先增后减趋势,以 K₂ 处理最高。与对照(K₀)相比,吐丝期和灌浆期 K₂ 处理硬皮穿刺强度增加 15.42% ~ 27.53% 和 16.74% ~ 33.47%,茎秆压碎强度提高 8.68% ~ 25.40% 和 14.43% ~ 28.22%,茎秆折断强度提高 23.57% ~ 44.37% 和 21.08% ~ 40.24%。可见,施用钾肥能够显著提高基部各节间的机械强度,其中

以钾肥(K₂O)用量 90 kg·hm⁻² 为最佳。

2.5 玉米节间抗倒伏指标与其物质组分的相关性

从图 2、图 3 和图 4 可得,节间硬皮穿刺强度与其鲜重、鲜密度、干密度、钾含量、纤维素含量、可溶性糖含量呈正相关,其中与节间鲜密度和干密度呈极显著正相关, R²=0.7957^{**} 和 R²=0.5994^{**};与节间干重和淀粉含量相关性不大。节间压碎强度与其鲜密度、干密度、钾含量、可溶性糖含量呈正相关,其中与节间鲜密度和干密度呈极显著正相关, R²=0.6077^{**} 和 R²=0.8452^{**};与节间鲜重、干重、纤维素含量相关性不大。节间折断强度与其鲜密度、干密度、钾含量、可溶性糖含量呈正相关,其中与节间鲜密度和干密度呈极显著正相关, R²=0.6265^{**} 和 R²=0.7155^{**};与节间鲜重、干重、纤维素含量相关性不大;与节间淀粉含量呈负相关。

表 4 施钾量对玉米节间力学特性的影响 (N)

项目	处理	吐丝期				灌浆期			
		第 2 节	第 3 节	第 4 节	第 5 节	第 2 节	第 3 节	第 4 节	第 5 节
穿刺强度	K ₀	39.30b	32.06b	28.65a	25.06c	44.09a	37.30a	32.68a	26.14b
	K ₁	42.33ab	37.81a	33.19a	29.20ab	49.14a	41.91a	37.10a	31.47ab
	K ₂	45.36a	38.88a	35.41a	31.96a	51.47a	44.21a	38.48a	34.89a
	K ₃	44.75a	37.64a	31.87a	28.09bc	47.91a	43.15a	34.90a	31.44ab
	K ₄	43.08ab	37.69a	33.86a	29.25ab	46.77a	43.11a	36.73a	33.88ab
压碎强度	K ₀	351.69b	264.16c	230.98b	194.85c	301.52d	262.34b	200.74d	190.30c
	K ₁	356.46ab	284.56bc	248.92a	210.83b	323.24bc	265.08b	227.32c	203.43b
	K ₂	382.23a	315.36a	255.25a	244.35a	362.04a	300.19a	257.38a	228.01a
	K ₃	367.49ab	293.43ab	250.26a	240.22a	342.68ab	285.96ab	241.06b	220.41a
	K ₄	361.88ab	289.72b	248.88a	220.55b	320.92cd	279.98ab	225.39c	209.07b
折断强度	K ₀	346.26b	243.91c	209.20c	180.57c	328.88b	270.68c	221.49c	170.18c
	K ₁	353.81b	284.99b	214.48bc	182.87c	352.06b	299.96ab	225.38c	185.21c
	K ₂	427.87a	352.13a	284.37a	239.00a	403.26a	327.75a	269.58a	238.66a
	K ₃	366.94b	289.87b	237.87b	201.57b	347.80b	284.87bc	252.98b	216.08b
	K ₄	373.03b	286.43b	229.63bc	191.89bc	339.99b	282.28bc	231.61c	210.36b

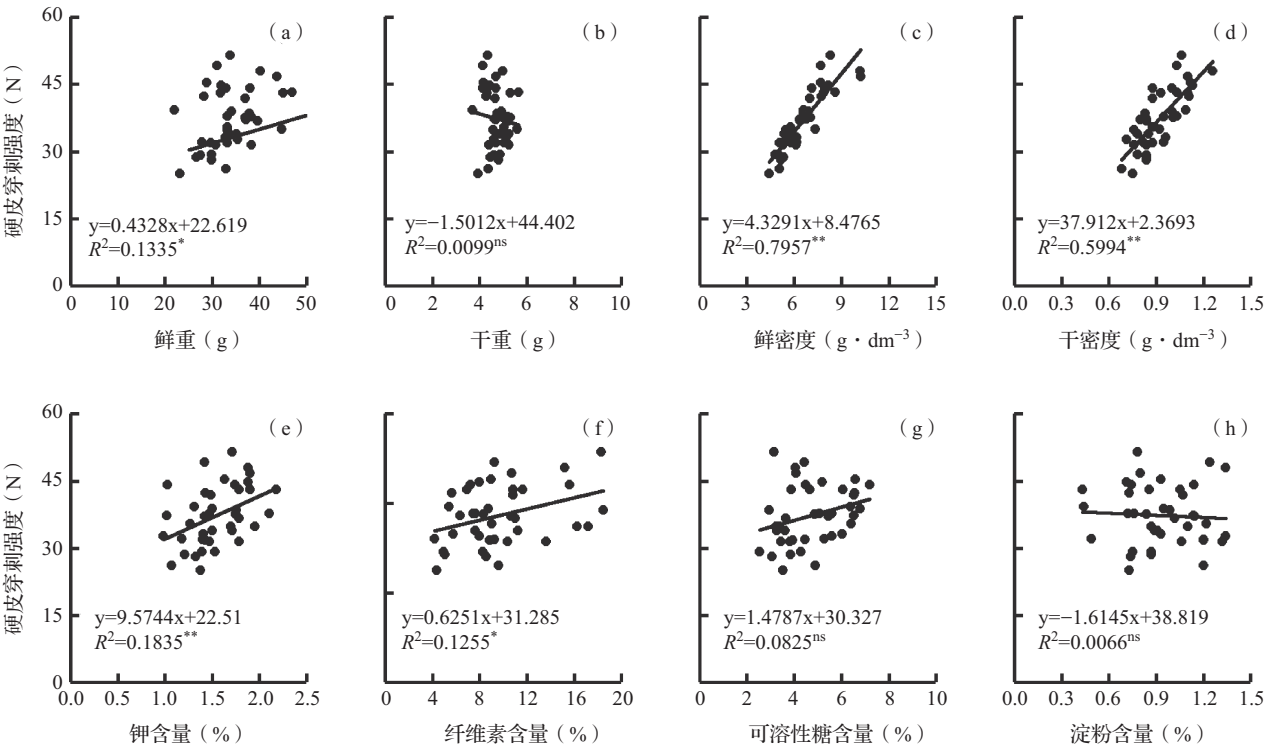


图 2 玉米节间硬皮穿刺强度与物质组分的相关性

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上影响显著, ns 表示在 0.05 水平上影响不显著。

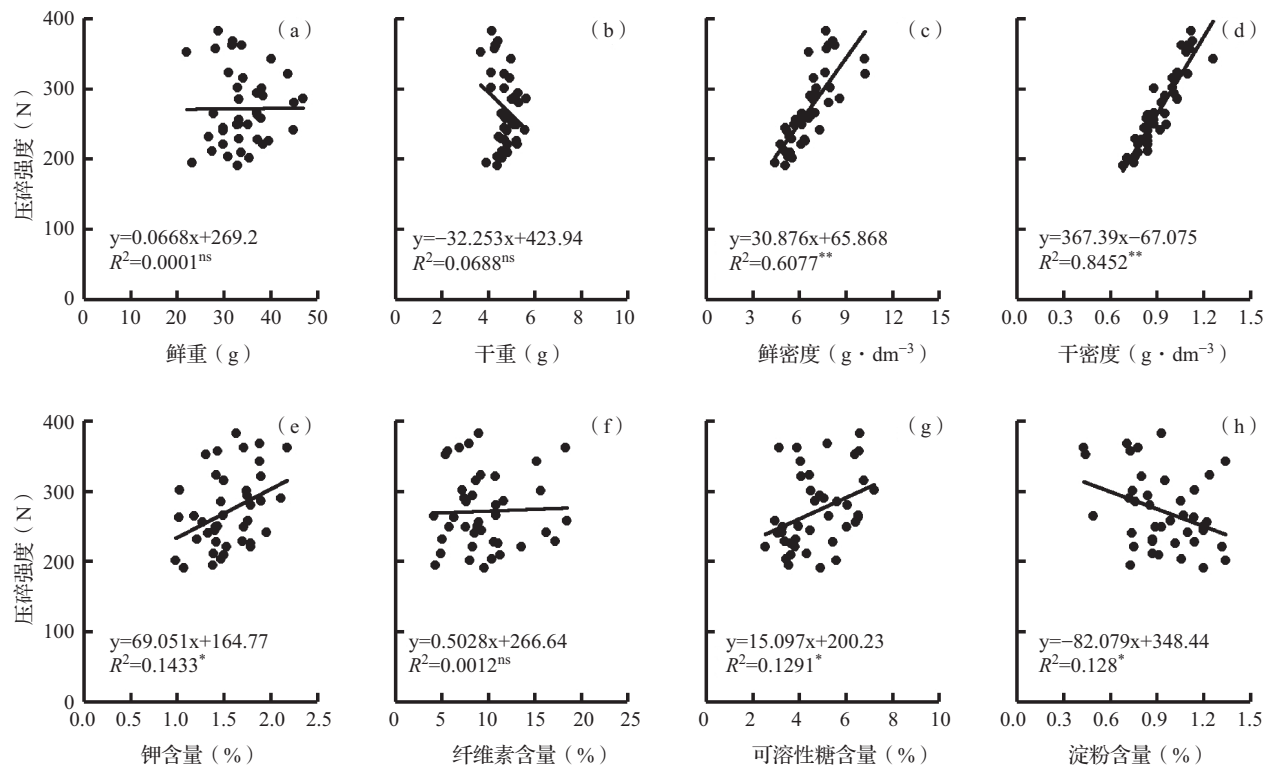


图3 玉米节间压碎强度与物质组分的相关性

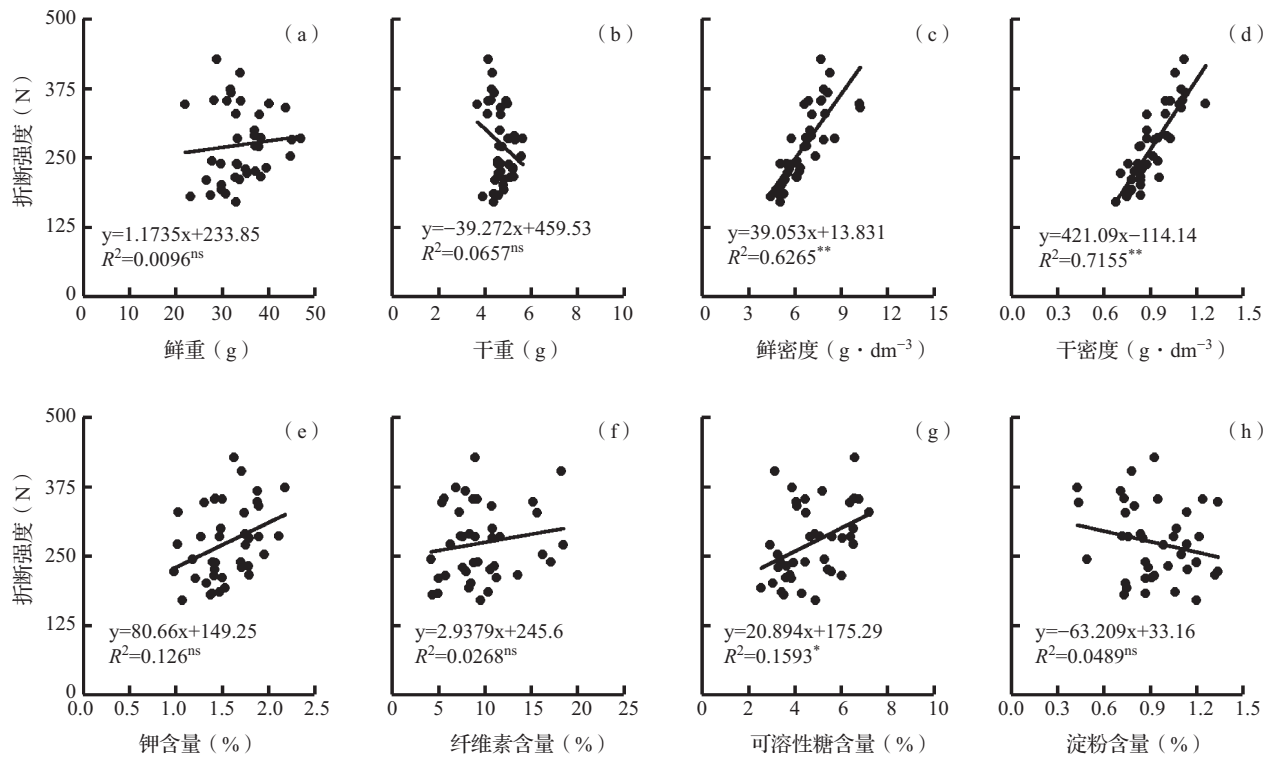
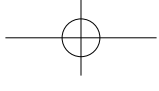


图4 玉米节间折断强度与物质组分的相关性



2.6 玉米倒伏率和基部节间特性的关系

将两年的数据进行联合分析,从表5可得,玉米基部第2节间至第5节间的物质组成、力学特性与其倒伏率关系十分密切,其中倒伏率与两个时期基部各节间的穿刺强度、压碎强度、折断强度和纤维素含量呈极显著负相关,与灌浆期基部节间的可

溶性糖和淀粉含量呈正相关,与其钾含量呈负相关,与两个时期基部节间的鲜重和鲜密度呈负相关,尤其是吐丝期,表明提高生育后期(吐丝期和灌浆期)基部节间的密度和纤维素含量,增强其机械强度可以提高其抗倒伏能力,降低田间倒伏率。

表5 玉米倒伏率与节间各指标间的相关性

指标	吐丝期				灌浆期			
	第2节	第3节	第4节	第5节	第2节	第3节	第4节	第5节
倒伏率	鲜重							
	-0.672*	-0.641*	-0.689*	-0.833*	-0.357	-0.356	-0.451	-0.323
	鲜密度							
	-0.639*	-0.640*	-0.161	0.296	-0.403	-0.413	-0.660*	-0.501
	硬皮穿刺强度							
	-0.859**	-0.774**	-0.783**	-0.805**	-0.706**	-0.853**	-0.684**	-0.837**
	茎秆压碎强度							
	-0.742**	-0.897**	-0.787**	-0.880**	-0.841**	-0.854**	-0.873**	-0.887**
	茎秆折断强度							
	-0.806**	-0.851**	-0.842**	-0.811**	-0.705**	-0.637**	-0.818**	-0.935**
	钾含量							
	-0.541	-0.477	-0.190	0.028	-0.783**	-0.805**	-0.822**	-0.821**
	纤维素含量							
	-0.908**	-0.812**	-0.907**	-0.910**	-0.893**	-0.872**	-0.870**	-0.859**
	可溶性糖含量							
	0.251	-0.400	-0.245	0.287	0.830**	0.869**	0.919**	0.646**
	淀粉含量							
	-0.602	-0.858**	-0.742*	-0.576	0.443	0.769**	0.815**	0.387

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上影响显著。

3 讨论

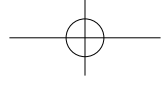
3.1 合理施钾可以抗倒增产

玉米的抗倒能力与其机械强度密切相关,抗折强度、穿刺强度、压碎强度的数值越大,玉米的抗倒伏能力越强,群体倒伏率也越低^[11, 22-26]。施用钾肥可在一定程度上增加玉米茎秆的机械强度,从而提高其抗倒能力^[13],李波等^[11]、姚培清等^[13]研究表明,施用钾肥后基部茎秆第3节至第6节间穿刺强度可以提高 17.9% ~ 46.0%^[11, 13]。本研究结果表明,施用钾肥可提高吐丝期和灌浆期基部向上第2节至第5节间的茎秆折断强度、硬皮穿刺强度、茎秆压碎强度,降低田间倒伏率,但钾肥用量并不是越多越好,随着钾肥用量增加,玉米基部节间的

抗折强度、穿刺强度和压碎强度均表现为先增后降,田间倒伏率呈先降后略升的趋势,与钾肥施用量之间呈二次凹函数关系,而籽粒产量则与之呈二次凸函数关系,无论是高产还是抗倒,钾肥用量都要适宜,但二者的适宜用量不尽相同,本试验条件下抗倒的最适钾肥用量为 121.0 kg · hm⁻²,而高产的适宜钾肥用量为 95.0 kg · hm⁻²,兼顾产量和抗倒伏性能,推荐川中丘陵区施钾量为 95.0 ~ 121.0 kg · hm⁻²。这一结果远低于前人在北方玉米区研究的结果^[11-13],这可能与川中丘陵区特定的生态条件和应用的品种有关,因此玉米抗倒高效的钾肥用量应因地制宜。

3.2 合理施钾提高玉米基部节间组成物质含量,增加茎秆强度

玉米抗倒机械强度的提高得益于节间物质组成



(主要包括钾素、可溶性糖、淀粉、纤维素等), 以及茎秆结构的改善^[12, 16-18]。钾肥能够稳定植株细胞结构和细胞间隙, 增加厚壁细胞纤维素含量和木质化程度, 增加厚壁组织层, 增加基部节间维管束数量, 加速碳水化合物的合成和运输, 降低基部节间非蛋白质的积累, 使机械组织发达, 增强茎秆强度, 增加植株的抗倒伏能力^[27-30]。本研究结果中, 施用钾肥可以增加基部节间的干物质积累, 提高基部第2~5节间的鲜、干重及其密度以及纤维素、淀粉、可溶糖和钾含量, 这是其增强茎秆机械强度的重要物质基础。进一步分析发现, K_1 和 K_2 处理灌浆期基部第2节至第5节的鲜重和鲜密度以及纤维素和钾含量均高于吐丝期, 而干重和干密度以及可溶糖含量大多低于吐丝期, 但其干重和干密度均低于吐丝期, 表明合理施用钾肥能够促进基部节间物质向穗部转移, 这可能是其增产的重要生理机制之一, 但这种物质的转移并不会减弱植株抗倒伏能力, 也不会增加倒伏率, 这与其吸收更多钾素和水分以及合成较多的纤维素等结构物质有关。

4 结论

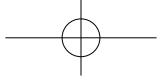
合理施用钾肥可以提高玉米基部节间物质积累和纤维素、淀粉、可溶糖含量, 增加折断强度、穿刺强度和压碎强度, 提高抗倒能力, 降低田间倒伏率, 并提高籽粒产量。川中丘陵区, 春玉米兼顾产量和抗倒伏性能, 推荐施钾量为 $95.0 \sim 121.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著增加茎秆抗倒伏能力, 加速碳水化合物向籽粒运输, 显著降低倒伏率, 最终提高籽粒产量。此外, 还应充分考虑土壤供钾能力、品种特性及氮、磷、钾互作效应等因素, 制定最适施钾量。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Shi D Y, Li Y H, Zhang J W, et al. Effects of plant density and nitrogen rate on lodging-related stalk traits of summer maize[J]. Plant Soil Environ, 2016, 62: 299-306.
- [3] 唐丽媛, 李从锋, 马玮, 等. 渐密种植条件下玉米植株形态特征及其相关性分析[J]. 作物学报, 2012, 38(8): 1529-1537.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 曹庆军, 曹铁华, 杨粉团, 等. 灌浆期风灾倒伏对玉米籽粒灌浆特性及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(9): 1107-1113.
- [7] 丰光, 黄长铃, 邢锦丰. 玉米抗倒伏的研究进展[J]. 作物杂志, 2008(4): 12-14.
- [8] 沈学善, 李金才, 屈会娟, 等. 砂姜黑土区小麦玉米秸秆全量还田对玉米抗倒性能的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2005-2012.
- [9] 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.
- [10] 杨可攀, 顾万荣, 李丽杰, 等. DCPTA 和 ETH 复配剂对玉米茎秆力学特性及籽粒产量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(4): 809-820.
- [11] 李波, 张吉旺, 崔海岩, 等. 施钾量对高产夏玉米抗倒伏能力的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(11): 2093-2099.
- [12] 郭艳青, 朱玉玲, 刘凯, 等. 水钾互作对高产夏玉米茎秆结构和功能的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 143-149.
- [13] 姚培清, 王意琼, 彭正萍, 等. 钾肥用量对夏玉米干物质和钾素积累、分配及抗倒性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4): 133-138.
- [14] Xue J, Gou L, Zhao Y S, et al. Effects of light intensity within the canopy on maize lodging[J]. Field Crops Research, 2016, 188: 133-141.
- [15] Mi C Q, Zhang X D, Li S M, et al. Assessment of environment lodging stress for maize using fuzzy synthetic evaluation[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 54: 1053-1060.
- [16] Daniel J R, Margaret J, Shien Y L, et al. Maize stalk lodging: morphological determinants of stalk strength[J]. Crop Science, 2017, 57: 926-934.
- [17] 陈艳军, 吴科斌, 张俊雄, 等. 玉米茎秆力学参数与抗倒伏性能关系研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 89-92.
- [18] Huang J L, Liu W Y, Zhou F, et al. Mechanical properties of maize fibre bundles and their contribution to lodging resistance[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 298-307.
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [20] Appenzeller L, Doblin M, Barreiro R, et al. Cellulose synthesis in maize: isolation and expression analysis of the cellulose synthase (CesA) gene family[J]. Cellulose, 2004, 11: 287-299.
- [21] Ishimaru K, Togawa E, Ookawa T, et al. New target for rice lodging resistance and its effect in typhoon[J]. Planta, 2008, 227(3): 601-609.
- [22] 唐海涛, 曹万明, 梅碧蓉, 等. 玉米杂交种灌浆期穗下第一茎节抗折特性灰色关联度分析[J]. 西南农业学报, 2014, 27(2): 495-500.
- [23] Kang M S, Din A K, Zhang Y D, et al. Combining ability for rind puncture resistance in maize[J]. Crop Science, 1999, 39(2): 368-371.



- [24] 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.
- [25] Zuber M S, Gmgn C O. A new technique for measuring stalk strength in corn [J]. Crop Science, 1961, 1: 378–380.
- [26] 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.
- [27] 勾玲, 赵明, 黄建军, 等. 玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究 [J]. 作物学报, 2008, 34 (4): 653–661.
- [28] 李文娟, 何萍, 金继运. 钾素对玉米茎髓和幼根超微结构的影响及其与茎腐病抗性的关系 [J]. 中国农业科学, 2010, 43 (4): 729–736.
- [29] Jia Y B, Yang X E, Feng Y, et al. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency [J]. Journal of Zhejiang University–Science B, 2008, 9 (5): 427–434.
- [30] 刘立军, 袁莉民, 王志琴, 等. 旱种水稻倒伏生理原因分析与对策的初步研究 [J]. 中国水稻科学, 2002, 16 (3): 225–230.

Effects of potassium application rate on basal internode characteristics and lodging resistance of spring maize in the hilly area of central Sichuan

YI Qian¹, ZHU Cong-hua^{1, 2}, TAN Jie^{1, 3}, ZHANG Jia-li¹, CAO Yue-qiang¹, KONG Fan-lei¹, YUAN Ji-chao^{1*}
(1. College Agronomy of Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130; 2. Crop Research Institute of Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu Sichuan 610066; 3. Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Miyi County, Panzhihua Sichuan 617200)

Abstract: In order to find out suitable potassium (K) fertilizer application rates in improving lodging resistance in hilly area of central Sichuan basin, a field experiment was conducted in 2013 and 2014, a single factor randomized block design was adopted and five K fertilizer application rates (K_2O_5) were set up, including 0, 45, 90, 135, 180 $kg \cdot hm^{-2}$. The matter accumulation characteristics, chemical composition and mechanical indexes of basal internode in silking stage and filling stage, lodging rate and grain yield were measured. The results showed that the yield of spring maize increased by 1.19%–8.43% (2013) and 1.75%–9.19% (2014); and the lodging rate decreased by 11.11%–44.44% (2013) and 12.50%–52.10% (2014), compared with no K fertilizer input treatment. The lodging rate of maize was significant negative correlated with rind penetration strength, stalk crushing strength and stalk breaking strength of the second to the fifth internode at basal in silking stage and filling stage, fresh weight and fresh density of the second and the third internodes at basal in silking stage, and K content of the second to the fifth internode at basal in filling stage; while significant positive correlated with the content of soluble sugar and starch in the second to the fifth internode at basal in filling stage. The fresh matter weight and dry matter weight of the second to the fifth internode at basal of maize stalk were increased by applying K fertilizer. With the increase of K fertilizer application, the cellulose content, stalk breaking strength, rind penetration strength, and stalk crushing strength of the second to the fifth internode at basal showed a trend of increase first and then decrease, and the highest value was got under the treatment that K fertilizer application rate was 90 $kg \cdot hm^{-2}$. In summary, under the K fertilizer application rate of 95.0 $kg \cdot hm^{-2}$ to 121.0 $kg \cdot hm^{-2}$, the lodging resistance of plants were increased with the increase of cellulose content, stalk breaking strength, rind penetration strength, and stalk crushing strength of the basal internode, which resulted in much lower lodging rate and higher yield finally. This study could provide both theoretical and practical basis for lodging resistant and high yield fertilization technology in spring maize production in hilly area of central Sichuan basin.

Key words: spring maize; potassium fertilizer rate; basal internode characteristic; lodging resistance; yield