

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.02093

## 施钾量对高产夏玉米抗倒伏能力的影响

李 波 张吉旺\* 崔海岩 靳立斌 董树亭 刘 鹏 赵 斌

作物生物学国家重点实验室 / 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018

**摘 要:** 倒伏是玉米高产的重要限制因素之一。本研究旨在探讨施钾量对高产夏玉米抗倒伏能力的影响, 为钾肥科学施用提供科学依据。选用登海 661 (DH661)和郑单 958 (ZD958), 设置 6 个施钾水平, 研究高产条件下施钾量对夏玉米基部茎节穿刺强度、伤流量和产量的影响, 并观察基部第 3 茎节显微结构。结果表明, 施钾肥能显著提高茎秆的穿刺强度, DH661 和 ZD958 最大提高幅度分别为 17.90%和 25.57%, 但不同茎节提高幅度不同。伤流液的强度随着施钾量的增大先增加后减小, 开花前促进作用大, 吐丝期 DH661 和 ZD958 施钾 180 kg hm<sup>-2</sup>时最高, 分别比对照提高 24.30%和 29.68%。单位面积内维管束增加, 特别是小维管束增多是提高茎秆穿刺强度的关键。施钾肥可以显著提高玉米产量, 随施钾量的增加, 籽粒产量呈先增高后降低的趋势, DH661 和 ZD958 分别在施钾 180 kg hm<sup>-2</sup>和 240 kg hm<sup>-2</sup>时达到最高产量。

**关键词:** 夏玉米; 施钾量; 穿刺强度; 伤流量; 茎秆显微结构

## Effects of Potassium Application Rate on Stem Lodging Resistance of Summer Maize under High Yield Conditions

LI Bo, ZHANG Ji-Wang\*, CUI Hai-Yan, JIN Li-Bin, DONG Shu-Ting, LIU Peng, and ZHAO Bin

State Key Laboratory of Crop Biology / College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

**Abstract:** Lodging is an important factor to limit grain yield of summer maize. This study is to investigate the effects of potassium (K) application rate on the lodging resistance of summer maize under high yield cultivation conditions to that providing a reference of reasonable cultivation way. Two cultivars of summer maize (*Zea mays* L.), Denghai 661 (DH661) and Zhengdan 958 (ZD958), were used and six levels of K application rates were designed. The results showed that the grain yield and bleeding sap were increased at the first, and then gradually decreased with the increment of K application rate. Applied K could enhance rind penetrometer resistance by 17.90%, 25.57% in maximum for DH661 and ZD958. But the increase in different internodes was different. The increased vascular bundles especially the small vascular bundles, per unit area of crease rection of internode, were the key reason to improve stalk puncture strength. DH661 and ZD958 reached the highest yield at the K application rate of 180 kg ha<sup>-1</sup> and 240 kg ha<sup>-1</sup> respectively.

**Keywords:** Summer maize; Potassium application rate; Rind penetrometer resistance; Bleeding sap; Stem microstructure

倒伏是影响夏玉米获得高产的重要限制因素之一<sup>[1]</sup>, 它破坏了茎秆的疏导系统, 既影响根系向叶片输送水分和养料, 也影响叶片向果穗输送光合产物。从形态学的角度来提高玉米的抗倒性前人已有研究<sup>[2]</sup>。穿刺强度(rind penetrometer resistance, RPR)是衡量茎秆抗倒性的一个良好指标<sup>[3]</sup>, 与田间倒伏率有高度的相关性<sup>[4]</sup>, 前人提出以 3~6 节间的 RPR

作为鉴定的关键部位, 可有效提高抗倒性品种的选育和抗倒伏鉴定的可靠性<sup>[5]</sup>。高 RPR 品种的选择已被用来提高秸秆的质量<sup>[6]</sup>。前人从种植密度和品种出发, 研究 RPR 与倒伏的关系<sup>[6-8]</sup>, 认为随密度增加 RPR 降低<sup>[7]</sup>; 茎秆节间 RPR 随着节位的上升而呈二次函数递减<sup>[8]</sup>。如何通过农艺措施, 提高作物的穿刺强度, 降低倒伏率成为了研究热点。有些学者通过

本研究由山东省现代农业产业技术体系项目, 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118602)和国家公益性行业(农业)科研专项(201103003)资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 张吉旺, E-mail: jwzhang@sdau.edu.cn, Tel: 0538-8245838

第一作者联系方式: E-mail: 583844575@163.com, Tel: 15854851860

Received(收稿日期): 2012-03-30; Accepted(接受日期): 2012-07-05; Published online(网络出版日期): 2012-09-10.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20120910.1355.017.html>

控制施肥来调节作物的 RPR。程富丽等<sup>[9]</sup>报道增施钾肥可以提高玉米茎秆强度,减轻玉米倒伏。田保明<sup>[10]</sup>综合了前人的研究结果指出,施用钾肥抑制了下位节间的伸长,且相应节间的直径增粗,茎壁厚度和维管数目增加,茎秆的硬度和强度提高。施钾量对茎秆的穿刺强度影响的机制鲜见报道。本研究在高产条件下,研究施钾量对夏玉米茎秆 RPR 的变化规律、伤流强度和显微结构的影响,探讨施钾量对高产夏玉米抗倒伏能力的影响及其调控。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

在山东农业大学试验农场进行试验,土壤类型为棕壤,试验地耕层地力和生育期内的气象条件见表 1。2010 年选用 2005 年李登海创造夏玉米高产记录的耐密高产品种登海 661 (DH661); 2011 年选用郑单 958 (ZD958)和 DH661。设施钾( $K_2O$ )量: 0、120、180、240、300 和 360  $kg\ hm^{-2}$  6 个处理,分别用 K0、K120、K180、K240、K300 和 K360 表示。所用钾肥为氯化钾(含  $K_2O$  60%),分别于播种和拔节期按照 1:1 施入,每个处理均施氮 225  $kg\ hm^{-2}$  和  $P_2O_5$  90  $kg\ hm^{-2}$ ,氮肥在拔节期、大喇叭口期按 4:6 的比例施入,磷肥在播种前全部施入。种植密度均为 67 500 株  $hm^{-2}$ ,等行距种植,行距 60 cm,小区面积 30  $m^2$ ,3 次重复,随机区组排列。2010 年 6 月 16 日播种,10 月 7 日收获; 2011 年 6 月 19 日播种,10 月 11 日收获。足墒播种,全生育期无灌溉,按高产田水平进行田间管理。

### 1.2 测定项目与方法

1.2.1 茎秆硬皮穿刺强度(rind penetrometer resistance, RPR, 简称穿刺强度) 用浙江托普仪器有限公司生产的 YYD-1 型数字式测力仪,将一定横断面积(如 0.01  $cm^2$ )的测头,在茎秆节间中部垂直于茎秆方向匀速缓慢插入,读取穿透茎秆表皮的最大值。本试验在玉米吐丝期(8 月 13 日)测定 3~6 节间的穿刺强度。

1.2.2 伤流强度测定 分别在大喇叭口期(8 月 1

日)、吐丝期(8 月 13 日)、花后 10 d (8 月 23 日)、花后 20 d (9 月 1 日),从每小区选择 4~5 株,每天 18 时剪去地上部,套上已称重的装有脱脂棉的密封塑料套,第 2 天早 6 时收集木质部伤流液。称量塑料套后,离心收集脱脂棉中的汁液,每个处理重复取样 4 次。

1.2.3 茎秆显微结构观察 在吐丝期,截取各处理地上第 3 茎节,测量其横截面积,用卡诺固定液固定,70%乙醇保存。后期用 Olympus BX51 荧光显微镜摄像系统及徒手切片法测定茎秆显微结构。观察记录维管束结构,包含大小维管束个数,并计算维管束密度<sup>[11]</sup>。

维管束密度=维管束数目/横截面积

1.2.4 数据处理与分析 采用 Microsoft Excel 和 SPSS 13.0 软件统计分析数据,采用 LSD 法(最小显著差异法)进行多重比较,两年规律一致,本文主要用 2011 年大田试验数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 施钾量对茎节穿刺强度的影响

由表 2 可以看出,施钾量可以显著提高 RPR,但对不同茎节提高幅度不同。各处理与 K0 相比,DH661 的第 3、第 4、第 5 和第 6 节间 RPR 分别提高 9.17%、10.87%、10.79%和 17.90%; ZD958 的第 3、第 4、第 5 和第 6 节间 RPR 分别提高 17.51%、11.68%、25.57%和 19.43%。2 个品种第 3 茎节 RPR 随施钾量增加而增大,超过一定限度后减小; DH661 的第 4、第 5、第 6 茎节 RPR 也呈现相同趋势, ZD958 的第 4、第 5、第 6 茎节 RPR 随施钾量增加而不断增大。

### 2.2 施钾量对茎秆伤流量的影响

从大喇叭口期至吐丝期玉米伤流液量多,说明玉米前期以营养生长为主,从土壤中吸收养分多;进入花粒期伤流液显著降低,以不施用钾肥降低最多, DH661 和 ZD958 降幅分别达 50.30%和 41.35%,而施用钾肥可以降低这一趋势。两品种开花前伤流量均随施钾量的增加呈先增加后减小的趋势, DH661 和 ZD958 在吐丝期(8 月 13 日)以 K180 处理

表 1 试验地耕层基础地力和生长期内气象条件

Table 1 Agrochemical characters of the soil tillage layer and climatic conditions during the growth and development of maize

年份 Year	全氮 Total N ( $g\ kg^{-1}$ )	速效磷 Available P ( $mg\ kg^{-1}$ )	速效钾 Available K ( $mg\ kg^{-1}$ )	有机质 Organic matter ( $g\ kg^{-1}$ )	降水量 Rainfall (mm)	平均气温 Mean temperature ( $^{\circ}C$ )	日照时数 Sunshine (h)
2011	0.74	45.2	75.76	11.3	504.3	23.70	596.0
2010	0.70	37.5	96.29	10.8	479.2	23.95	643.6

表 2 施钾量对茎秆穿刺强度的影响  
Table 2 Effects of potassium application rate on stalk rind penetraion resistance (N mm<sup>-2</sup>)

品种 Cultivar	基部节间 Bottom internode	K0	K120	K180	K240	K300	K360
2011							
登海 661 DH661	3	41.45 c	45.25 a	44.48 a	43.43 b	43.10 b	43.90 ab
	4	41.40 b	45.90 a	44.15 a	41.35 b	41.68 b	41.30 b
郑单 958 ZD958	5	38.75 b	41.98 a	42.93 a	40.55 b	40.83 ab	40.57 b
	6	36.18 c	42.65 a	42.13 a	40.98 ab	41.00 ab	39.53 b
	3	37.28 b	38.60 b	42.25 a	43.80 a	41.50 a	41.90 a
	4	36.83 b	36.03 b	37.25 b	37.30 b	40.28 a	41.13 a
	5	33.93 b	33.45 b	35.13 b	34.68 b	39.73 a	42.60 a
	6	32.68 c	32.00 c	34.65 b	34.23 b	38.93 a	39.03 a
2010							
登海 661 DH661	3	42.52 b	44.85 a	45.12 a	44.00 b	44.26 ab	43.34 b
	4	41.72 c	44.71 a	45.66 a	43.52 b	42.73 b	42.32 bc
	5	39.26 c	41.75 b	42.38 a	42.42 a	40.65 c	41.21 b
	6	37.42 c	41.24 a	41.76 a	40.64 ab	40.27 b	40.32 b

K0、K120、K180、K240、K300 和 K360 分别表示施钾(K<sub>2</sub>O)量为 0、120、180、240、300 和 360 kg hm<sup>-2</sup>。同行不同字母表示差异达 5%显著水平。  
K0, K120, K180, K240, K300, and K360 represent that the application amount of potassium (K<sub>2</sub>O) are 0, 120, 180, 240, 300, and 360 kg hm<sup>-2</sup>, respectively. Values followed by different letters in a row are significant by different at the 5% probability level.

最高，分别比对照高 24.30%和 29.68%。花后各处理间虽有差异，但不随施钾量呈一定规律变化。不同品种在不同时期伤流量达到最高时，施钾量不一(表 3)。

2.3 施钾量对地上第 3 茎节显微结构的影响  
2.3.1 维管束数目 由表 4 可以看出，在不同施钾量下，2 个品种的小维管束数目(N1)、总维管束数

表 3 施钾量对茎秆伤流量的影响  
Table 3 Effects of potassium application rate on quantity of bleeding sap in stalk (g)

品种 Cultivar	月/日 Month/day	K0	K120	K180	K240	K300	K360
2011							
登海 661 DH661	8/1	36.58 c	40.58 a	38.20 b	37.90 b	37.90 b	36.33 c
	8/13	32.20 c	32.63 c	40.03 a	37.68 b	33.00 c	35.50 b
	8/23	31.30 a	32.95 a	26.67 b	24.23 b	24.73 b	26.10 b
	9/1	18.18 b	26.98 a	22.55 a	20.30 b	19.60 b	22.40 a
郑单 958 ZD958	8/1	34.87 b	35.83 b	39.33 a	40.53 a	38.80 a	40.25 a
	8/13	31.75 c	39.95 b	41.18 a	40.73 a	37.17 b	37.85 b
	8/23	34.28 b	36.65 a	35.60 a	32.67 b	33.70 b	32.05 b
	9/1	20.45 c	27.40 a	24.60 b	24.12 b	24.58 b	25.48 b
2010							
登海 661 DH661	7/26	36.62 c	38.45 ab	39.82 a	38.74 a	36.84 bc	37.14 b
	8/7	33.62 c	35.40 b	40.12 a	39.86 a	36.42 b	36.24 b
	8/17	30.21 a	31.64 a	27.48 b	26.54 c	28.86 b	25.84 c
	8/27	20.44 b	26.73 a	22.38 b	20.36 b	21.46 b	20.68 b

K0、K120、K180、K240、K300 和 K360 分别表示施钾(K<sub>2</sub>O)量为 0、120、180、240、300 和 360 kg hm<sup>-2</sup>。同行不同字母表示差异达 5%显著水平。  
K0, K120, K180, K240, K300, and K360 represent that the application amount of potassium (K<sub>2</sub>O) are 0, 120, 180, 240, 300, and 360 kg hm<sup>-2</sup>, respectively. Values followed by different letters in a row are significant by different at the 5% probability level.

表 4 施钾量对第 3 茎节维管束数目的影响  
Table 4 Effects of potassium application rate on the number of vascular bundles of the third internode

项目 Item	K0	K120	K180	K240	K300	K360
登海 661 DH661						
小维管束数 N1	320 c	348 c	336 c	492 b	600 a	448 b
总维管束数 N	460 c	516 c	592 c	656 b	784 a	680 b
第 3 节间横截面面积 S (mm <sup>2</sup> )	410.53 c	445.17 bc	503.18 b	467.73 b	645.08 a	494.17 c
总维管束密度 D (mm <sup>-2</sup> )	1.12	1.16	1.18	1.40	1.22	1.40
郑单 958 ZD958						
小维管束数 N1	420 c	500 b	492 b	536 a	564 a	484 b
总维管束数 N	592 c	640 b	656 b	760 a	664 b	632 b
第 3 节间横截面面积 S (mm <sup>2</sup> )	502.33 a	534.11 a	456.62 c	488.94 b	471.81 b	481.38 b
总维管束密度 D (mm <sup>-2</sup> )	1.16	1.20	1.44	1.55	1.41	1.31

K0、K120、K180、K240、K300 和 K360 分别表示施钾(K<sub>2</sub>O)量为 0、120、180、240、300 和 360 kg hm<sup>-2</sup>。同行不同字母表示差异达 5%显著水平。

K0, K120, K180, K240, K300, and K360 represent that the application amount of potassium (K<sub>2</sub>O) are 0, 120, 180, 240, 300, and 360 kg hm<sup>-2</sup>, respectively. N1: number of small vascular bundles; N: number of vascular bundles; S: cross-sectional area of the third internode; D: density of vascular bundles. Values followed by different letters in a row are significant by different at the 5% probability level. Values followed by different letters in a row are significant by different at the 5% probability level.

目(N)以及横截面面积(S)均存在显著差异。DH661 与 ZD958 在 K240 处理下总维管束密度最大, 分别高出对照 25.17%和 33.38%, 此时两品种小维管束数目、总维管束数目分别高出对照 53.75%、42.61%和 27.62%、28.38%; 小维管束数目随施钾量的变化与总维管束数目趋势相同, 说明小维管束数目对于茎秆的稳定性起着主要作用。随施钾量的增加, 维管束的数目及维管束的密度呈增加趋势, 到达一定程度后降低, 但相对于不施钾, 各处理均有所增加。

2.3.2 维管束形态 K0 的维管束数目明显小于其他处理, 而且排布分散, 施钾处理排布均匀。K0 与其他处理相比, 其维管束鞘小, 厚度薄, 而内部的疏导组织大, 说明在维管束中, 主要起支撑作用的为维管束鞘。通过茎秆显微结构观察发现, 随施钾量的增加, 维管束着色程度先浓后淡, 说明维管束的面积先增加后减小(图 1)。

2.4 施钾量对夏玉米产量的影响

从表 5 可以看出, 施钾可以显著提高玉米产量, 随施钾量的增加, 籽粒产量呈先增高后降低的趋势, 两年两个品种趋势一致。2011 年和 2010 年 DH661 的最高产量均为 K180 处理, 分别比对照提高 7.6%、13.6%; 而 ZD958 在 K240 处理的产量最高, 比对照提高 5.8%。2011 年, 同一施钾量下 DH661 产量都高于 ZD958。过量施钾产量反而有所下降, 2011 年和 2010 年 DH661 在 K360 较最高产量 K180 处理分别下降了 7.5%和 6.2%, ZD958 较最高产量下降了 4.1%。

3 讨论

3.1 施钾量对茎秆抗倒伏能力的影响

玉米作为高秆作物, 常常发生倒伏, 致使玉米减产 5%~20%<sup>[12]</sup>。黄淮海夏玉米生长正值雨季, 受风雨影响严重; 另外, 随着种植密度的提高, 群体质量受到较大影响, 倒伏成为该区域夏玉米产量提高的重要限制因素之一。前人<sup>[6-8]</sup>研究发现, RPR 与倒伏之间相关系数高。刘魏魏等<sup>[7]</sup>研究指出随种植密度的提高, 茎秆穿刺强度显著降低, 更易倒伏。刘晓燕等<sup>[13]</sup>提出氯化钾通过提高诱导木质素的合成来降低茎腐病的发生率, 从而降低倒伏; 同时有研究认为钾显著提高饲用玉米木质素含量<sup>[14]</sup>, 而 Ketterings 等<sup>[15]</sup>研究表明, 钾对牧草木质素含量影响不明显。勾玲等<sup>[16]</sup>研究发现钾肥可促进碳水化合物化合物的合成和运输, 减少茎秆中非蛋白质的积累, 使机械组织发达, 增强茎秆强度, 增加植株的抗倒伏能力。本研究表明, 施用钾肥可以提高茎秆穿刺强度, 对不同茎节提高幅度不同, 高位茎节增加幅度大, 说明钾肥可以通过提高各节位的 RPR 来降低倒伏风险。倒伏直接破坏了植株疏导系统, 影响了养分及水分的运输。伤流量的多少反应了根系吸收水分的能力, 在一定意义上讲, 代表了根系活性的强弱<sup>[17]</sup>, 对维持茎秆强度起着一定的作用。施钾提高了茎秆伤流量, 对开花前的影响更显著。说明施钾增加了根系从土壤中吸收养分的能力, 从而使地上部位的代谢旺盛, 增强了抗倒伏能力。

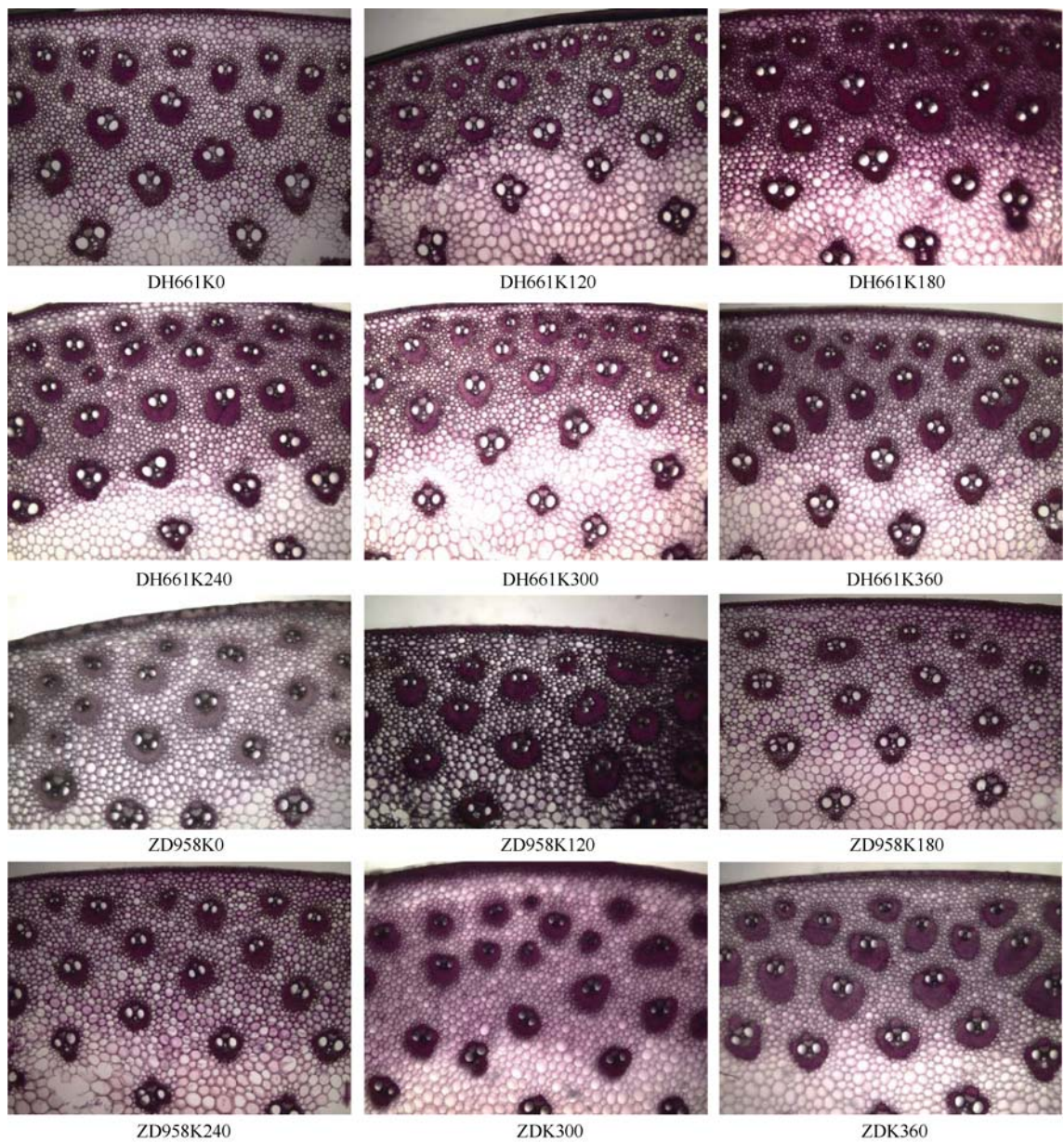


图 1 施钾量对茎边缘维管束显微结构的影响(×40)

Fig. 1 Effects of potassium application rate on the structure of vascular bundles on the edge of crease rection internode (×40)

DH661K0: 登海 661 施钾(K<sub>2</sub>O)量 0 kg hm<sup>-2</sup>; DH661K120: 登海 661 施钾(K<sub>2</sub>O)量 120 kg hm<sup>-2</sup>.

DH661K0: the application amount of potassium (K<sub>2</sub>O) is 0 kg hm<sup>-2</sup> in Denghai 661; DH661K120: the application amount of potassium (K<sub>2</sub>O) is 120 kg hm<sup>-2</sup> in Denghai 661.

表 5 施钾量对夏玉米产量的影响

Table 5 Effects of potassium application rate on grain yield of summer maize (kg hm<sup>-2</sup>)

年份 Year	品种 Cultivar	K0	K120	K180	K240	K300	K360
2011	登海 661 DH661	9918 c	10196 bc	10670 a	10566 a	10219 ab	9875 c
	郑单 958 ZD958	8885 d	9172 b	9250 b	9405 a	9166 b	9017 c
2010	登海 661 DH661	8655 c	9720 a	9828 a	9335 b	9257 b	9216 b

表中各列数据后小写字母不同表示其在 5% 水平差异显著。

Values followed by different small letters are significantly different at 5% probability levels.

3.2 施钾对茎秆显微结构的影响

茎的形态解剖结构是倒伏内在的影响因子。李文娟等<sup>[18]</sup>研究认为钾素能稳定细胞结构,防止细胞

间隙的扩大,加固细胞壁。改善钾素营养能使小麦、玉米、水稻等禾本科作物厚壁组织层的厚度增加。充足的供钾不但有利于根系生长<sup>[19]</sup>,而且还能增加

玉米茎秆强度<sup>[20]</sup>。Marschnwe<sup>[21]</sup>也指出,钾能改善作物组织结构,增厚厚角组织细胞,使厚壁细胞木质化及增加纤维素含量,提高叶片的硅化度。本研究表明,施用钾肥后,玉米维管束数目增加,特别是小维管束数目,同时,髓腔变小,机械组织内部排列整齐,进而提高茎秆强度。

### 3.3 施钾量对夏玉米产量的影响

谭德水等<sup>[22]</sup>研究指出连续13年长期施钾可提高东北地区黑土、草甸土玉米产量。王宜伦等<sup>[23]</sup>指出施钾可以使潮土夏玉米产量增加4.68%~14.35%,钾肥还可显著提高饲用玉米的生物产量,增产5.3%~27.7%<sup>[24]</sup>。本研究表明,施钾肥可以提高玉米的产量,品种间有差异,DH661和ZD958分别在施钾180 kg hm<sup>-2</sup>和240 kg hm<sup>-2</sup>时达到最高产量。

## 4 结论

施用钾肥可以显著增加茎秆的穿刺强度,高位茎节提高幅度大,促进了整株的抗倒伏能力。施用钾肥后,花前伤流量增多,满足了玉米体内代谢的养分、水分的需要,从而一定程度上提高了茎秆强度。茎秆维管束排列均匀,小维管束增多,促使维管束密度增加,是钾肥能提高玉米抗倒伏能力的内部原因。

## References

- [1] Din A K, Kang M S, Zhang Y, Magari R. Combining ability for rind puncture resistance in maize. *Crop Sci*, 1999, 39: 368–371
- [2] Hondroyianni E, Papakosta D K, Gagianas A A. Corn stalk traits related to lodging resistance in two soils of differing quality. *Maydica*, 2000, 45: 125–133
- [3] Flint Gaarcia S A, Darrah L L, McMullen M D, Hibbard B E. Phenotypic versus marker assisted selection for stalk strength and second generation European corn borer resistance in maize. *Theor Appl Genet*, 2003, 107: 1331–1336
- [4] 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. *Crop Sci*, 2004, 44: 711–717
- [5] Gou L(勾玲), Huang J-J(黄建军), Sun R(孙锐). Variation characteristic of stalk penetration strength of maize with different density tolerance varieties. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2010, 26(11): 156–162 (in Chinese with English abstract)
- [6] Dudley J W. Selection for rind puncture resistance in two maize populations. *Crop Sci*, 1994, 34: 1458–1460
- [7] Liu W-W(刘魏魏), Zhao H-J(赵会杰), Li H-H(李红旗). Effects of planting densities and modes on stem lodging resistance of summer maize. *J Henan Agric Sci* (河南农业科学), 2011, 40(8): 75–78 (in Chinese with English abstract)
- [8] Gou L(勾玲), Huang J-J(黄建军), Zhang B(张宾). Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(10): 1688–1695 (in Chinese with English abstract)
- [9] Cheng F-L(程富丽), Du X(杜雄), Liu M-X(刘梦星), Jin X-L(靳小利), Cui Y-H(崔彦宏). Lodging of summer maize and the effects on grain yield. *J Maize Sci* (玉米科学), 2011, 19(1): 105–108 (in Chinese with English abstract)
- [10] Tian B-M(田保明), Yang G-S(杨光圣), Cao G-Q(曹刚强), Shu H-Y(舒海燕). The performance of lodging and root cause analysis for lodging resistance in crops. *Chin Agric Sci Bull* (中国农学通报), 2006, 22(4): 163–167 (in Chinese with English abstract)
- [11] He Q-P(何启平), Dong S-T(董树亭), Gao R-Q(高荣岐). Comparison of ear vascular bundles in different maize cultivars. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(7): 1187–1196 (in Chinese with English abstract)
- [12] Norberg O S, Mason S C, Lowry S R. Ethephon influence on harvestable yield, grain quality and lodging of corn. *Agron J*, 1988, 80: 768–772
- [13] Liu X-Y(刘晓燕), Jin J-Y(金继运), He P(何萍), Gao W(高伟), Li W-J(李文娟). Effect of potassium chloride on lignin metabolism and its relation to resistance of corn to stalk rot. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2007, 40(12): 2780–2787 (in Chinese with English abstract)
- [14] Du X(杜雄), Zhang L-F(张立峰), Li H-B(李会彬), Yang F-C(杨福存), Bian X-J(边秀举). Effects of potassium application on nutrient absorption dynamic, biomass and quality formation of forage maize. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2007, 13(3): 393–397 (in Chinese with English abstract)
- [15] Ketterings Q M, Godwin G, Cherney J H, Kilcer T F. Potassium management for brown midrib sorghum × sudangrass as replacement for corn silage in the north-eastern USA. *J Agron Crop Sci*, 2005, 191: 41–46
- [16] Gou L(勾玲), Zhao M(赵明), Huang J-J(黄建军), Zhang B(张宾), Li T(李涛), Sun R(孙锐). Bending mechanical properties of stalk and lodging-resistance of maize. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2008, 34(4): 653–661 (in Chinese with English abstract)
- [17] Chang J(常江), Zhang Z-L(张自立), Gao H-J(郜红建), Huang J-Y(黄界颖), Gan X-H(甘旭华). Effect of rare earth on composition of bleeding sap of rice. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2004, 10(5): 522–525 (in Chinese with English abstract)
- [18] Li W-J(李文娟), He P(何萍), Jin J-Y(金继运). Effect of potassium on ultrastructure of maize stalk pith and young root and their relation to resistance to stalk rot. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2010, 43(4): 729–736 (in Chinese with English abstract)
- [19] Jia Y B, Yang X E, Feng Y, Jilani G. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency. *J Zhejiang Univ Sci B*, 2008, 9(5): 427–434
- [20] Li M-R(李莫然), Mei L-Y(梅丽艳), Han Q-X(韩庆新), Wang

- Q(王芊). Investigation on harmfulness and prevention with potash fertilizer of bacterial wilt of corn in Heilongjiang province. *Heilongjiang Agric Sci* (黑龙江农业科学), 1994, (2): 12–16 (in Chinese with English abstract)
- [21] Marschnwe H. Mineral Nutrition of Higher Plants. London: Academic Press, 1986. pp 341–368
- [22] Tan D-S(谭德水), Jin J-Y(金继运), Huang S-W(黄绍文). Effect of long-term K application on corn yield and potassium forms in plough layer of black soil and meadow soil in northeast of China. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2007, 15(4): 850–855 (in Chinese with English abstract)
- [23] Wang Y-L(王宜伦), Tan J-F(谭金芳), Han Y-L(韩燕来), Miao Y-H(苗玉红). Effects of different potassium fertilizer application rates on yield, plant K accumulation of summer maize and K-efficiency in alluvial soil. *Southwest China J Agric Sci* (西南农业学报), 2009, 22(1): 110–114 (in Chinese with English abstract)
- [24] Zuo Q-H(左启华), Zhang L-F(张立峰), Li H-B(李会彬), Du X(杜熊), Bian X-J(边秀举). Effect of potassium application on biomass, nutritional quality and bleeding sap of forage maize in cold plateau. *Acta Agric Boreali-Occident Sin* (西北农业学报), 2011, 20(1): 65–69 (in Chinese with English abstract)