张喜成,曹晓良,杨会勇,等.61份玉米自交系茎秆针刺强度与解剖结构的关系[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(3):33-42.
Zhang X C, Cao X L, Yang H Y, et al.Relationship between rind penetrometer resistance and anatomical indexes of stalks in 61 maize inbred lines[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(3):33-42.
**doi**: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202411058

# 61份玉米自交系茎秆针刺强度与解剖结构的关系

张喜成[1,2,3],曹晓良[1],杨会勇[1],吕爱枝[1],李坤[2,3*],何美敬[1*]

(1.河北北方学院 农林科技学院,河北 张家口,075000;2.作物基因资源与育种全国重点实验室,北京,100081;
3.中国农业科学院 作物科学研究所,北京,100081)

**摘　要**:[目的]倒伏对玉米的品质和产量有重大影响,是我国玉米生产面临的重要问题。茎秆皮层针刺强度(Rind Penetrometer Resistance, RPR)是衡量玉米茎秆抗倒伏能力的主要指标,本文旨在利用61份玉米自交系材料探究玉米茎秆针刺强度与解剖结构之间的关系。[方法]采用茎秆切片和电子显微镜技术对61份玉米自交系茎秆进行结构观察,利用针刺强度仪进行茎秆强度测定,探究各指标之间的关系。[结果]针刺强度与厚壁组织厚度、外围皮层单个维管束面积、厚壁组织厚度与茎秆半径的比值、厚壁组织面积以及厚壁组织面积占茎秆截面积的比例等性状之间存在极显著正相关关系($P<0.01$)。针刺强度还与茎秆的周长和直径存在显著正相关关系($P<0.05$)。基于隶属函数D值进行系统聚类将所有材料分为3个类群,类群Ⅲ的玉米茎秆针刺强度最高,且与其它2类差异显著。通过建立线性回归模型发现,玉米茎秆厚壁组织厚度和外围单个维管束的面积共同决定着47%的玉米茎秆针刺强度,从而进一步影响玉米抗倒伏能力。[结论]综合2个不同指标的系统聚类可以得出TIAN77、TY1是抗倒伏性优异的自交系,以上结果可为选育抗倒伏玉米品种提供依据。

**关键词**:玉米; 抗倒伏能力; 针刺强度; 茎秆; 解剖特性
**中图分类号**:S513　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)03-0033-10

## Relationship between rind penetrometer resistance and anatomical structure in 61 maize inbred lines

Zhang Xicheng[1,2,3], Cao Xiaoliang[1], Yang Huiyong[1], Lü Aizhi[1], Li Kun[2,3*], He Meijing[1*]

(*1.College of Agriculture and Forestry Science and Technology, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China; 2. State Key Laboratory of Crop Gene Resources and Breeding, Beijing 100081, China; 3.Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

**Abstract**:[Objective]Lodging significantly impacts maize quality and yield, posing a major challenge in Chinese maize production. Rind penetrometer resistance (RPR) is a key indicator of stalk lodging resistance. This study aimed to explore the relationship between RPR and stalk anatomical structure using 61 maize inbred lines. [Methods]Stalk cross-sections were analyzed using microtome sectioning and electron microscopy, while RPR was measured with a penetrometer. Correlations between these traits were statistically evaluated. [Results]The results revealed that RPR was positively correlated with the thickness of sclerenchyma, average area of single small vascular bundle, sclerenchyma thickness/stalk radius, sclerenchyma area, and sclerenchyma area/stalk cross-sectional area at $P<0.01$ level. Significant positive correlation ($P<0.05$) were also found with stalk circumference and diameter. Cluster analysis based on membership function D-value categorized the materials into three groups, with group III exhibiting significantly higher RPR than others. Linear regression analysis revealed that sclerenchyma

**收稿日期**:2024-11-29　　**修回日期**:2025-01-21
**基金项目**:河北北方学院基本科研业务费(JYT2023010);河北北方学院博士基金(BSJJ202207);现代种业科技创新专项(21326319D)
**作者简介**:张喜成(ORCID:0009-0003-9062-7527),硕士研究生,研究方向:玉米种质资源及遗传育种;曹晓良(ORCID:0009-0000-7833-2660),硕士研究生,研究方向:作物分子生物学与遗传育种;张喜成和曹晓良为同等贡献作者
*通信作者:何美敬(ORCID:0000-0002-7631-4714),副研究员,博士,E-mail:hemeijing85@163.com;李坤(ORCID:0009-0006-9933-0449),副研究员,博士,E-mail:likun01@caas.cn

thickness and peripheral vascular bundle area collectively determine 47% of RPR variation, directly influencing lodging resistance. [Conclusion]Comprehensive evaluation identified TIAN77 and TY1 as elite lodging-resistance inbred lines. These findings provided a theoretical basis for breeding lodging-resistance maize varieties through anatomical trait selection.

**Keywords**: Maize, Lodging resistance, Rind penetrometer resistance, Stalk, Anatomical indexes

玉米(*Zea mays* L.)是我国三大主粮之一,不仅在保障国家粮食安全,助力农业可持续发展等方面有着举足轻重的作用,也是重要的经济作物和饲料作物[1-2]。提高玉米单产和保障玉米稳产是促进我国玉米生产发展的重要目标,而倒伏问题一直是制约玉米高产稳产的重要因素之一。不同程度的倒伏可造成玉米减产5%~50%,严重时甚至会导致绝产[3-4]。因此,深入研究玉米抗倒伏特性对促进我国玉米生产发展具有重要的意义。

玉米倒伏主要分为茎倒伏和根倒伏[5],其中茎倒伏会破坏植株冠层结构和茎秆的传输系统,进而破坏光合产物的运输,对玉米的产量和品质造成的危害最大[6-7]。玉米茎倒伏除受气候、土壤、栽培管理等因素影响外,还与茎秆特性密切相关[8-10]。姜春霞等[11]利用'郑单958'研究氮肥与种植密度对春玉米抗倒性能调控效应时,得出穿刺强度与倒伏率呈极显著负相关,相关系数为-0.619。杨青华等[12]研究发现,茎秆硬皮穿刺力是影响玉米倒伏的关键,与倒伏率相关性系数为-0.994,呈极显著负相关。玉米茎秆的解剖结构,包括表皮组织、维管束系统、薄壁组织等不同层次的细胞组成和排列方式,在很大程度上决定了茎秆的针刺强度特性。Wang等[13]选用玉米自交系JING724及其改良系JING724A1,研究茎秆直径、维管束数量和面积、细胞壁组分对抗倒伏影响,结果表明玉米自交系JING724穿刺强度高,但柔韧性不足也难以支撑玉米植株生长,改良系JING724A1有较好的柔韧性、更多的维管束、较厚的厚壁组织等特征,更有利于抗倒伏。蒋傲男等[14]利用不同品种春玉米来探究茎秆显微结构与抗折强度的关系,研究发现维管束数目、最小面积、单个维管束平均面积、韧皮部面积等显微结构指标与基部第3节茎秆穿刺强度和抗折力密切相关,维管束鞘细胞层厚度对抗折力有重要影响。由此可见,影响玉米抗倒伏的茎秆性状很多,且各性状影响程度不同。其中茎秆针刺强度和解剖结构性状作为影响玉米倒伏的重要指标,两者的相关性研究仍处于不断探索和完善的阶段,对于不同材料、不同环境条件下茎秆针刺强度的变化规律及其解剖学基础还需要更深入的研究。

基于此,本研究以61份玉米自交系为试验材料,通过测定茎秆皮层针刺强度,观察测量厚壁组织厚度、维管束面积等8个玉米茎秆解剖结构性状,分析各性状与茎秆强度之间的关系,筛选茎秆抗倒伏的关键性指标,以期为选育优良抗倒伏玉米品种提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验所用61份自交系(表1),包含热带、亚热带和温带材料,血缘类型丰富,具有广泛的遗传多样性和代表性。试验材料均由中国农业科学院作物科学研究所提供。

### 1.2 试验方法

供试材料于2021年5月在中国农业科学院作物科学研究所昌平试验基地进行种植。采用随机区组设计排列,重复3次,每份材料2行,每行17株,行长4 m,株距0.25 m,行间距0.65 m。

#### 1.2.1 茎秆针刺强度测定

综合参考刘东尧等[15]和刘小刚等[16]的测定方法,取样时期为玉米的抽雄期(VT),在种植的3次重复中,每次重复每份自交系取3株代表性植株,用测试仪器YYD-1型茎秆强度测定仪(测头横截面积为1 $mm^2$)测量茎秆穗下第1节针刺强度。在测定茎秆的针刺强度过程中,将测头垂直于茎秆匀速平稳地刺入茎秆节间中部,精确读取并记录穿透茎秆表皮时的数值,即针刺强度(单位:$N/mm^2$)。当重复测量茎秆同一节间时,要注意与测过的孔洞保持距离,避免影响针刺强度数值。

#### 1.2.2 解剖特征数据测定

综合参照崔海岩等[17]和边大红等[18]的测定方法,选取玉米抽雄期(VT)穗位下第1节茎秆样品进行测定,每份自交系3个重复各选取代表性植株3株,共9株。具体方法为:取FAA固定液(Formalin-Aceto-Alcohol Fixative Solution,酒精-醋酸-福尔马林混合固定液)中的茎秆样品,通过

**表1　玉米自交系清单**

**Table 1**　List of maize inbred lines

| 编号 Number | 种质名称 Germplasm name | 编号 Number | 种质名称 Germplasm name | 编号 Number | 种质名称 Germplasm name |
|---|---|---|---|---|---|
| L1 | CHANG7－2 | L22 | JH96C | L43 | LXN |
| L2 | CHENG698 | L23 | JI53 | L44 | LY |
| L3 | CHUAN48－2 | L24 | JI63 | L45 | LY042 |
| L4 | D047 | L25 | JI842 | L46 | M153 |
| L5 | D863F | L26 | JI846 | L47 | M165 |
| L6 | DAN3130 | L27 | JI853 | L48 | M97 |
| L7 | DAN340 | L28 | JIAO51 | L49 | MN |
| L8 | DAN360 | L29 | JY01 | L50 | MO113 |
| L9 | DAN4245 | L30 | K10 | L51 | MO17 |
| L10 | DAN598 | L31 | K12 | L52 | NAN21－3 |
| L11 | DAN599 | L32 | K14 | L53 | NMJT |
| L12 | HTH－17 | L33 | K22 | L54 | P138 |
| L13 | HU803 | L34 | L3180 | L55 | P178 |
| L14 | HUA83－2 | L35 | LG001 | L56 | SHEN5003 |
| L15 | HUANGC | L36 | LIAO138 | L57 | TIAN77 |
| L16 | HYS | L37 | LIAO159 | L58 | TIE7922 |
| L17 | HZS | L38 | LIAO5114 | L59 | TT16 |
| L18 | IRF291 | L39 | LIAO5262 | L60 | TX5 |
| L19 | IRF314 | L40 | LIAO5263 | L61 | TY1 |
| L20 | J4112 | L41 | LV28 | | |
| L21 | JH59 | L42 | LX9801 | | |

手工切片方法制作玉米茎秆节间横切切片,然后用5%间苯三酚和浓盐酸染色3 min。采用OLYMPUS SZ61体视显微镜进行显微观察和拍照。通过ImageJ软件测量茎秆切片厚壁组织厚度、单个维管束面积(图1),利用游标卡尺和卷尺测量抽雄期穗下第1节茎秆半径及周长。玉米茎秆解剖结构性状相关缩略词见表2。

### 1.3　数据处理与分析

用Excel 2019软件进行散点图绘制以及综合评价值D值的计算,用OriginPro 2024进行聚类分析、相关性分析以及谱系图的绘制,用SPSS 27.0软件进行多因素方差分析(MANOVA)、主成分分析(PCA)和线性回归分析。参考郑云霄等[19]和汪明华等[20]方法,计算隶属函数$\mu(PC_{ij})$、综合指标权重$w_j$、综合评价值D值,公式如下:

$$\mu(PC_{ij})=(PC_{ij}-PC_{j,\ min})/(PC_{j,\ max}-PC_{j,\ min}) \quad (1)$$

式中,$\mu(PC_{ij})$为隶属函数,$PC_{j,\ max}$为所有自交系中第j个指标在各自交系中的最大值,$PC_{j,\ min}$为所有

**表2　茎秆解剖结构性状及其缩略词**

**Table 2**　Full names and abbreviations of the anatomical indexes

| 指标全称 Full names of the indicators | 英文缩写 Abbreviation |
|---|---|
| 茎秆皮层针刺强度 Rind penetrometer resistance | RPR |
| 厚壁组织厚度 Sclerenchyma thickness | ST |
| 外围皮层单个维管束面积 Average area of single small vascular bundle | ASVB |
| 厚壁组织厚度/半径 Sclerenchyma thickness/stalk radius | ST/SR |
| 厚壁组织面积 Sclerenchyma area | SA |
| 茎秆横截面积 Stalk cross－sectional area | SCA |
| 厚壁面积/茎秆横截面积 Sclerenchyma area/stalk cross－sectional area | SA/SCA |
| 茎秆周长 Stalk circumference | SC |
| 茎秆直径 Stalk diameter | SD |

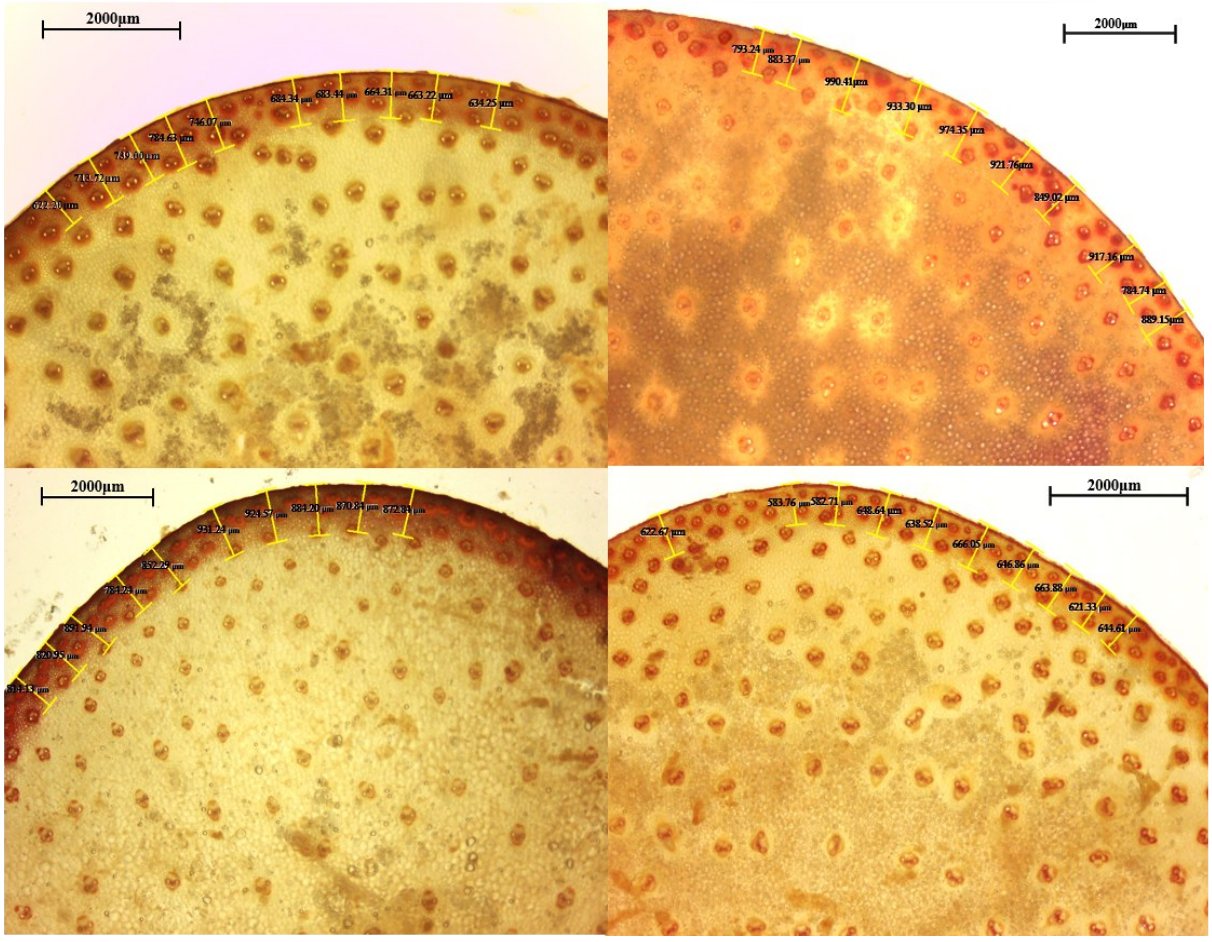



图1 玉米自交系茎秆横截面

**Fig.1** Cross-section of maize inbred stalks

自交系中第j个指标在各自交系中的最小值。

$$(w_j)=p_j/(\Sigma p_j) \tag{2}$$

式中,$(w_j)$为综合指标权重,$p_j$为综合指标第j个的贡献率,j的取值范围为1~n。

$$(D值)=\Sigma[\mu(PC_j)\times w_j] \tag{3}$$

式中,D值为综合评价值,综合考虑了所有指标及其权重,j的取值为1~n。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米自交系茎秆解剖结构性状描述

对玉米自交系的针刺强度(RPR)、厚壁组织厚度(ST)、外围皮层单个维管束面积(ASVB)等8个茎秆解剖结构性状进行描述性统计分析发现,玉米茎秆针刺强度的变化范围为18.55~38.50 N/mm$^2$,平均值为24.59 N/mm$^2$,9个指标的变异系数范围为0.12%~0.33%(表3),其中变异系数最大的指标为外围皮层单个维管束面积,变异系数为0.33%,最小的是茎秆周长和茎秆直径,变异系数为0.12%。根据不同样本数的偏度与峰度置信区间[21],发现针刺强度和厚壁组织厚度/半径(ST/SR)的偏度在95%置信区间为峰值正常或平坦的偏态分布,茎秆横截面积(SCA)的偏度在95%置信区间为尖峰型偏态分布,其余各解剖特性表型均属于正态分布。

对茎秆各性状进行方差分析,9个茎秆相关性状的均方、标准化均方、$F$值以及显著性见表4。可见,自交系间各性状均达到极显著水平($P<0.01$),其中厚壁组织厚度(ST)的均方值相对较高,外围皮层单个维管束面积(ASVB)的均方值相对较低,各性状均具有较为广泛的变异。

表3　不同玉米自交系茎秆解剖结构性状

**Table 3**　Characteristics of stem traits among different maize inbred lines

| 性状 Traits | 最小值 Min | 最大值 Max | 平均值 Mean | 标准差 SD | 变异系数/% CV | 偏度 Skewness | 峰度 Kurtosis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RPR/(N/mm$^2$) | 18.55 | 38.50 | 24.59 | 5.56 | 0.23 | 1.14 | −0.02 |
| ST/mm | 0.39 | 1.13 | 0.67 | 0.13 | 0.20 | 0.65 | 0.33 |
| ASVB/mm$^2$ | 0.03 | 0.12 | 0.06 | 0.02 | 0.33 | 0.92 | 1.34 |
| ST/SR/% | 4.72 | 11.95 | 7.46 | 1.45 | 0.19 | 1.08 | 1.08 |
| SA/mm$^2$ | 20.14 | 67.48 | 36.45 | 9.85 | 0.27 | 0.75 | 0.91 |
| SA/SCA/% | 9.23 | 22.61 | 14.44 | 2.68 | 0.19 | 0.69 | 0.81 |
| SCA/mm$^2$ | 128.37 | 516.39 | 255.03 | 60.95 | 0.24 | 1.25 | 4.38 |
| SC/mm | 41.36 | 82.30 | 57.50 | 6.63 | 0.12 | 0.60 | 2.18 |
| SD/mm | 12.84 | 25.71 | 17.96 | 2.08 | 0.12 | 0.61 | 2.19 |

表4　玉米自交系茎秆性状的方差分析

**Table 4**　Analysis of variance of clustering of traits of different maize strains

| 性状 Traits | 自由度 Degree of freedom | 均方 Mean square | 标准化均方 Zscore MS | *F*值 *F* value |
|---|---|---|---|---|
| RPR | 60 | 15.631 | 0.512 | 30.511** |
| ST | 60 | 17.210 | 0.460 | 37.441** |
| ASVB | 60 | 10.529 | 0.682 | 15.430** |
| ST/SR | 60 | 14.077 | 0.564 | 24.955** |
| SA | 60 | 17.264 | 0.458 | 37.707** |
| SA/SCA | 60 | 13.979 | 0.567 | 24.638** |
| SCA | 60 | 15.433 | 0.519 | 29.742** |
| SC | 60 | 14.408 | 0.553 | 26.052** |
| SD | 60 | 14.731 | 0.542 | 27.163** |

注:**表示在0.01水平上差异极显著。

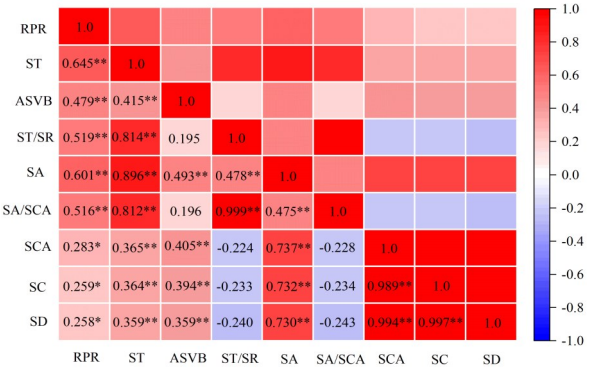
Note: ** indicated highly significant difference at 0.01 level.

### 2.2　玉米茎秆解剖结构性状相关性分析

玉米茎秆解剖结构性状的相关性如图2所示,颜色越深代表相关系数越大。在36对相关关系中,有83.3%的组合(即30个)呈现正相关关系,其中,有25对性状的相关性达到极显著水平($P<0.01$),另有4对性状为显著相关($P<0.05$)。茎秆针刺强度与8个解剖结构性状的相关分析显示,有5个性状与茎秆针刺强度呈极显著正相关,占62.5%。如图3A~3E所示,玉米茎秆的针刺强度(RPR)与厚壁组织厚度ST($r=0.645$)、厚壁组织厚度/半径ST/SR($r=0.519$)、厚壁组织面积SA($r=0.601$)以及厚壁组织面积/茎秆截面积SA/SCA($r=0.516$)、外围皮层单个维管束面积ASVB($r=0.479$)之间均呈极显著正相关关系。图3F-3H可见,玉米茎秆的针刺强度(RPR)与茎秆横截面积SCA($r=0.283$)、茎秆周长SC($r=0.259$)以及茎秆直径SD($r=0.258$)之间呈显著正相关关系。上述相关关系中,玉米茎秆中厚壁组织厚度、厚壁组织面积与玉米茎秆针刺强度相关性最高。

### 2.3　玉米自交系解剖性状与针刺强度的逐步回归分析

为进一步探讨玉米茎秆解剖结构性状与针刺强度的关系,构建玉米茎秆针刺强度的预测模型,根据表5逐步回归模型相关系数表可见,本研究以针刺强度(y)为因变量,以测定的玉米茎秆解剖结构性状为自变量,建立的最优逐步回归模型为$y=4.978+22.244X_1$(厚壁组织厚度)$+74.588X_2$(外围单个维管束的面积)。逐步回归分析的结果表明,玉米茎秆厚壁组织厚度和外围单个维管束的面积为影响针刺强度的主要指标,综合回归分




**表示显著相关($P<0.05$);**表示极显著相关($P<0.01$);各性状全称见表2

* represents significant correlation($P<0.05$);** represents extremely significant correlation($P<0.01$);Full names of different indicators were shown in Table 2

**图2 玉米茎秆解剖结构性状间的相关性**

**Fig.2** Correlation coefficient between traits

析$R^2$结果可见,这2个指标共同决定着玉米茎秆针刺强度47%的变异。

**表5 逐步回归模型相关系数**

**Table 5** Correlation coefficients for stepwise regression models

| 模型 Model | 回归系数 B | 标准误 Standard error | 标准回归系数 Beta | t检验 t—test | 显著性 Distinctiveness |
|---|---|---|---|---|---|
| 常量 Constant | 4.978 | 2.741 | | 1.816 | 0.074 |
| ST | 22.244 | 4.259 | 0.539 | 5.222 | <0.001 |
| ASVB | 74.588 | 30.124 | 0.256 | 2.476 | 0.016 |

## 2.4 抗倒伏指标的筛选及玉米自交系抗倒伏综合评价

主成分分析结果显示,最初的9个与抗倒伏关联的性状可转化为2个新的独立指标,累积贡献率为86.313%(表6),说明这2个主成分可以解释原始值中的大部分变异,第1主成分主要由针刺强度、厚壁组织厚度、厚壁组织面积以及厚壁组织厚度与半径的比值这4个关键性状分量决定,其影响相当于4.692个原始性状的综合效应,能够解释原始数据信息总量的51.433%。而第2主成分则主要受茎秆横截面积、茎秆直径和茎秆周长这3个性状分量的影响,其作用力相当于3.139个原始性状,能够阐述原始数据标准差异的34.880%。主成分分析的结论表明,针刺强度、厚壁组织厚度、厚壁组织面积、厚壁组织厚度与半径的比值、茎秆横截面积、茎秆直径以及茎秆周长这7个性状在玉米茎秆强度建成上贡献率较高,其中主成分1中最高向量的性状是厚壁组织面积,主成分2中向量最高的性状是茎秆直径。

系统聚类分析表明(图4A),在欧氏距离为4.2时,61份玉米自交系的茎秆解剖结构性状可分为3个类群,类群Ⅰ包括52个自交系,类群Ⅱ包括7个自交系,类群Ⅲ包括2个自交系,3个类群的针刺强度由大到小为:类群Ⅲ>类群Ⅱ>类群Ⅰ。

基于主成分分析结果,利用隶属函数值计算得到每个自交系的抗倒伏综合评价值,即D值,并

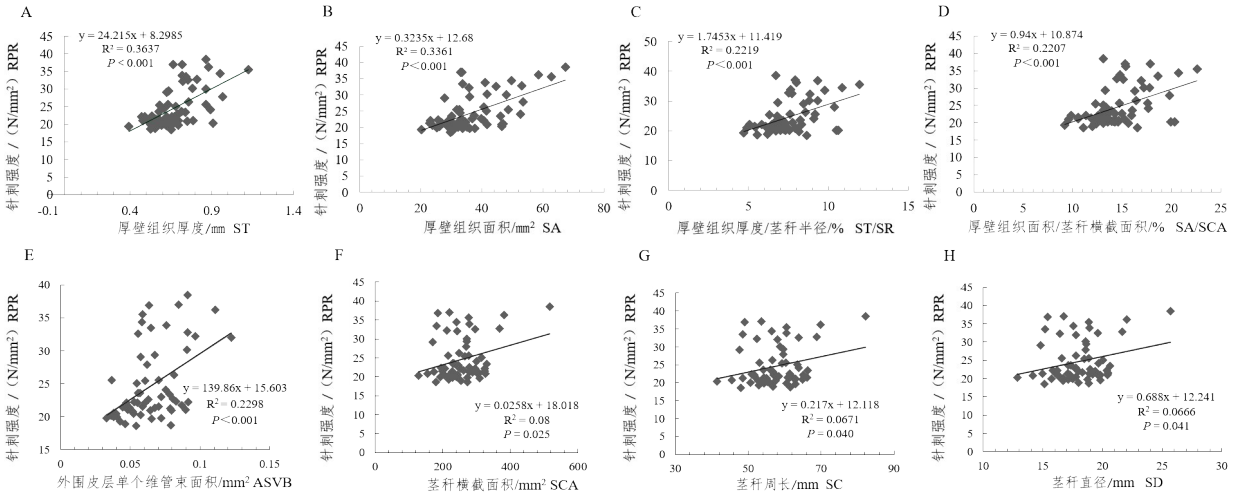



**图3 玉米茎秆针刺强度与8个解剖结构性状的线性回归分析**

**Fig.3** Scatter plot of correlation traits

**表6　各性状主成分的特征向量及贡献率**

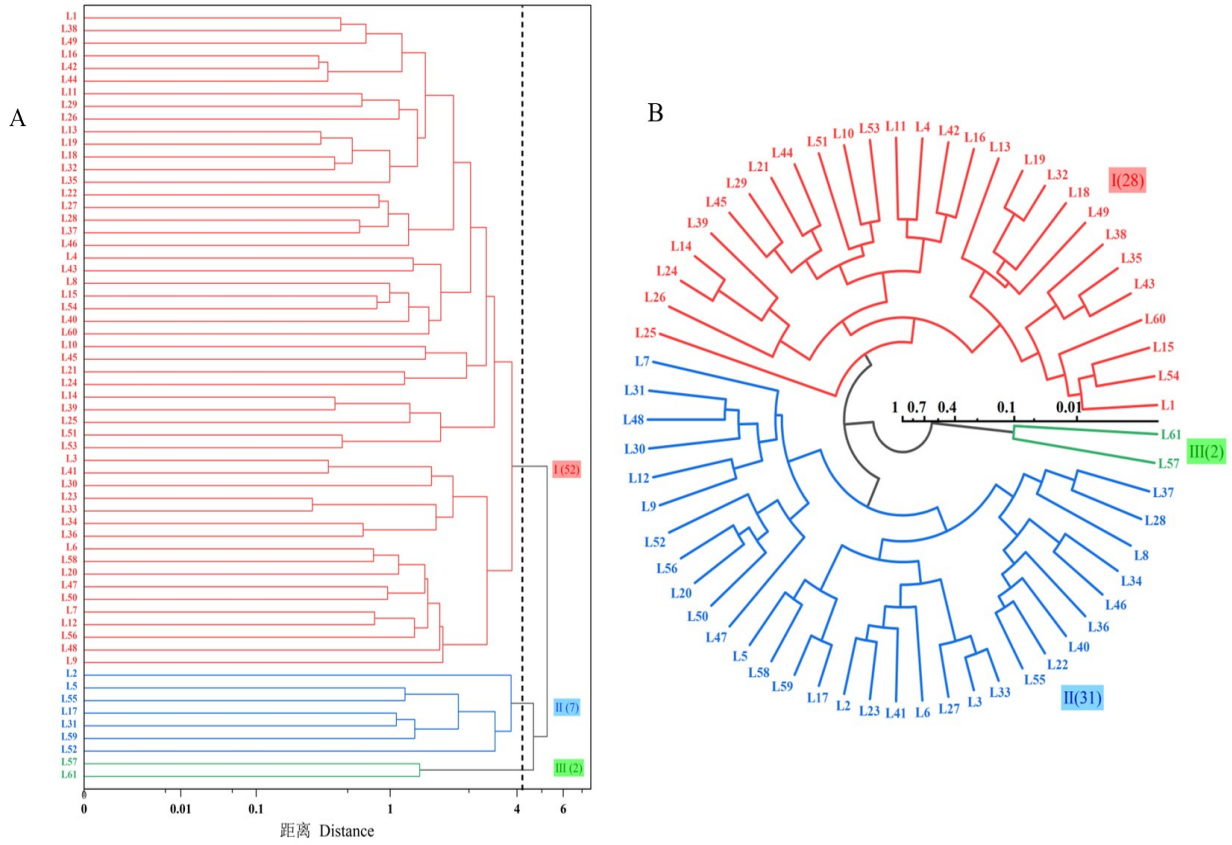
**Table 6**　Eigenvectors and percentages of accumulated contribution of principal components

| 性状 Traits | 主成分1 Principal component 1 | 主成分2 Principal component 2 |
|---|---|---|
| RPR | 0.657 | −0.398 |
| ST | 0.913 | −0.353 |
| ASVB | 0.587 | 0.078 |
| ST/SR | 0.672 | −0.760 |
| SA | 0.981 | 0.025 |
| SA/SCA | 0.625 | −0.762 |
| SCA | 0.653 | 0.750 |
| SC | 0.652 | 0.747 |
| SD | 0.650 | 0.754 |
| 特征值EV | 4.629 | 3.139 |
| 贡献率/% CR | 51.433 | 34.880 |
| 累计贡献率/% CCR | 51.433 | 86.313 |

依据D值大小对玉米自交系的茎秆强度进行分类(表7),发现茎秆强度较强的自交系为TIAN77和TY1。通过D值系统聚类分析,61份自交系同样可划分出3个类群(图4B),Ⅰ类是茎秆强度差的自交系,有28份;Ⅱ类为茎秆强度较好的自交系,有31份;Ⅲ类是茎秆强度强的自交系,共有2份。

## 3　讨论

倒伏不仅影响玉米产量品质,而且严重制约着玉米机械化收获程度的提高,其中,茎秆倒伏的影响最为严重[6-7],因此,加强对玉米茎秆强度方面的研究,对提高玉米品种抗倒伏能力具有重要意义。玉米的茎秆强度是一个受多因子影响的复杂性状,单一或少量指标难以全面准确地反应其强度大小。茎秆的针刺强度可以很好地反映玉米茎秆的抗倒伏性,而且测定简便,可大规模广泛应用[22-23],而紧密的机械组织细胞及维管束特征与茎秆强度存在着高度相关性[24],因此,探讨玉米茎秆




A. 基于8个解剖性状的系统聚类图;B. 基于D值的系统聚类图

A Clustering analysis based on 8 anatomical indexes; B Clustering analysis based on D−value

**图4 61个玉米自交系的茎秆强度聚类分析图**

**Fig.4** Cluster analysis diagram of 61 inbred lines of maize

表7 61份玉米自交系茎秆强度分类

**Table 7** Classification of lodging resistance in 61 maize inbred lines

| 类群 Group | 份数 Number | D值 D－value | 自交系名称 Inbred lines |
|---|---|---|---|
| Ⅰ | 28 | 0.128 49～0.419 32 | LIAO5114、LXN、LG001、P138、HUANGC、CHANG7－2、TX5、MN、IRF291、K14、IRF314、HU803、HYS、LX9801、DAN599、D047、LY、JH59、LY042、JY01、NMJT、DAN598、MO17、JI846、LIAO5262、HUA83－2、JI63、JI842 |
| Ⅱ | 31 | 0.442 01～0.713 54 | DAN340、DAN4245、HTH－17、K12、M97、K10、NAN21－3、MO113、J4112、SHEN5003、M165、HZS、TT16、D863F、TIE7922、DAN3130、LV28、CHENG698、JI53、JI853、K22、CHUAN48－2、L3180、M153、P178、JH96C、LIAO5263、LIAO138、DAN360、JIAO51、LIAO159 |
| Ⅲ | 2 | 0.844 13～0.914 33 | TIAN77、TY1 |

显微结构相关性状与抗倒伏性的关系，有助于优化抗倒伏材料的筛选方法，减少茎秆倒伏所致的产量损失。

茎秆解剖结构性状和针刺强度的表型变异范围广泛，甄选出具有高针刺强度和茎秆韧性好的材料对提高玉米抗倒伏性具有重要价值。在本研究中，我们发现玉米茎秆解剖结构性状与针刺强度之间存在显著的相关性，对玉米茎秆解剖结构性状特征进行解析，可以更深入地理解影响茎秆强度的核心要素。王越等[25]研究表明维管束数目少、单个维管束面积大的自交系在抗倒伏育种中有重要作用，单个维管束面积与倒伏之间呈正相关关系，这与任佰朝等[26]研究得出的皮层与维管束的厚壁细胞厚度变小，维管束数目减少，导致玉米倒伏风险增加的结论保持一致。勾玲等[27]的研究表明在玉米抽雄-吐丝期间，茎秆基部节间针刺强度与厚壁组织厚度、厚壁组织厚度/半径、单位节长干质量均呈显著正相关关系，这与本研究结果相近。此外，本研究针刺强度与解剖性状的相关性分析结果中针刺强度和茎秆横截面积为正相关，这与郑云霄等[19]的相关性分析中针刺强度与茎秆横截面积为负相关不一致。虽然针刺强度与茎秆解剖结构性状之间存在显著的相关性，但并非所有性状都能拟合到线性模型中。建立线性模型时，本研究发现一些性状如茎秆横截面积与针刺强度的相关性并不显著，这可能是由于茎秆横截面积虽然在一定程度上能够反映茎秆粗细，但茎秆的抗倒伏能力更依赖于其内部结构的强度，如厚壁组织的厚度和维管束的分布等。因此，即使茎秆横截面积较大，如果其内部结构强度不高，也无法承受较大的外力作用。未来的研究可以通过更深入的分析，探索解剖结构性状对针刺强度的响应机理，并进一步优化模型，以更准确地预测玉米茎秆的抗倒伏能力。

近年来主成分分析、隶属函数和聚类分析相结合的方式已应用于多种作物特性评价研究[28-30]，由此得到的结果更加可靠。本研究分别基于8个结构性状及隶属函数D值进行了系统聚类，将61份材料分为3个类群，其中类群Ⅲ只包含了2个自交系，分别是TIAN77、TY1。参考郑云霄等[19]和田艺心[27]的分析方法引入综合评价值(D值)，综合考虑了所有指标及其权重，为评估茎秆强度提供了全面的量化依据，TIAN77和TY1在61个自交系中的综合评价值排前两位，分别为0.914 33和0.844 13，可以考虑将这2个自交系运用到玉米茎秆强度的遗传改良中。

## 4 结论

厚壁组织较厚的玉米茎秆具有更高的针刺强度，单个维管束面积较大的玉米茎秆也表现出较高的针刺强度，两者共同决定着玉米茎秆针刺强度47%的变异，在育种实践中，可以利用现代分子生物学技术，如基因编辑、分子标记辅助选择等手段，对这2个指标进行遗传改良。在玉米自交系和杂交种的选育过程中，可以将厚壁组织和单个维管束面积作为重要的筛选指标，通过遗传改良和选择育种，培育出具有优良抗倒伏性状的玉米新品种。综合2个不同指标的系统聚类结果，发现TIAN77、TY1在61个自交系中茎秆针刺强度和解剖性状表现最好，是抗倒伏优良的自交系，可以作为日后选育优良抗倒伏品种的亲本材料；K12、NAN21-3、HZS、TT16、D863F次之。基于2个不同指标聚类结果，类群Ⅰ和Ⅱ共筛选出7个自交系，其厚壁组织厚度范围为0.72～1.13 mm、单个

维管束面积为0.06～0.12 mm$^2$,在上述2个指标范围内的自交系,其茎秆穿刺强度高于30 N/mm$^2$。因此,在选育抗倒伏能力较高的玉米品种时,应将茎秆针刺强度和解剖性状综合考虑,以提高筛选抗倒伏性品种的准确度。

## 参 考 文 献


[1]李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望[J].中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
Li S K, Zhao J R, Dong S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11):1941-1959.

[2]杨国虎,李新,王承莲,等.种植密度影响玉米产量及部分产量相关性状的研究[J].西北农业学报,2006,15(5):57-60,64.
Yang G H, Li X, Wang C L, et al. Study on effects of plant densities on the yield and the related characters of maize hybrids [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2006, 15(5):57-60, 64.

[3]杨今胜,张晓龙,郑培峰,等.玉米抗倒伏能力评价方法研究进展[J].中国农业大学学报,2022,27(6):21-29.
Yang J S, Zhang X L, Zheng P F, et al. Research progress on the evaluation methods of maize lodging resistance [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(6):21-29.

[4]王云奇,李金鹏,王志敏,等.12叶展倒伏对夏玉米子粒灌浆特性和产量的影响[J].玉米科学,2016,24(4):90-97,104.
Wang Y Q, Li J P, Wang Z M, et al. Effects of lodging at V12 stage on the characters of grain filling and yield of summer maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(4): 90-97, 104.

[5]Berry P M, Sterling M, Spink J H, et al. Understanding and reducing lodging in cereals [M]//Advances in Agronomy Volume 84.Amsterdam: Elsevier, 2004: 217-271.

[6]赵雪,周顺利.玉米抗茎倒伏能力相关性状与评价研究进展[J].作物学报,2022,48(1):15-26.
Zhao X, Zhou S L. Research progress on traits and assessment methods of stalk lodging resistance in maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(1):15-26.

[7]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.

[8]王夏青,宋伟,张如养,等.玉米茎秆抗倒伏遗传的研究进展[J].中国农业科学,2021,54(11):2261-2272.
Wang X Q, Song W, Zhang R Y, et al. Genetic research advances on maize stalk lodging resistance [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(11):2261-2272.

[9]刘卫星,王晨阳,王强,等.不同玉米品种茎秆抗倒特性及其与产量的关系[J].河南农业科学,2015,44(7):17-21.
Liu W X, Wang C Y, Wang Q, et al. Stalk lodging-resistance property and its correlation with yield among different maize varieties[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(7): 17-21.

[10]杨今胜.玉米田间原位抗倒伏能力评价方法研究[D].长春:吉林农业大学,2023.
Yang J S. Study on evaluation method of in-situ lodging resistance of maize in field[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.

[11]姜春霞,张伟,颜志乾,等.氮肥与种植密度对春玉米产量及抗倒伏性能的调控效应[J].植物营养与肥料学报,2024,30(1):36-48.
Jiang C X, Zhang W, Yan Z Q, et al. Effects of nitrogen application rate and planting density on yield, lodging resistance of spring maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024,30(1): 36-48.

[12]杨青华,冉午玲,李蕾蕾,等.玉米茎秆性状与倒伏的相关性及其通径分析[J].河南农业大学学报,2016,50(2):167-170.
Yang Q H, Ran W L, Li L L, et al. Correlation and path analysis of lodging resistance with maize stem characters [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016, 50 (2): 167-170.

[13]Wang X Q, Shi Z, Zhang R Y, et al. Stalk architecture, cell wall composition, and QTL underlying high stalk flexibility for improved lodging resistance in maize[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 515.

[14]蒋傲男,闫静琦,卢海博,等.不同春玉米品种茎秆显微结构对抗折强度的响应[J].玉米科学,2020,28(5):53-59.
Jiang A N, Yan J Q, Lu H B, et al. Response of stem microstructure of different spring maize varieties to bending strength[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(5):53-59.

[15]刘东尧,闫振华,陈艺博,等.增温对玉米茎秆生长发育、抗倒性和产量的影响[J].中国农业科学,2021,54(17):3609-3622.
Liu D Y, Yan Z H, Chen Y B, et al. Effects of elevated temperature on maize stem growth, lodging resistance characters and yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(17):3609-3622.

[16]刘小刚,马飞前,王红武,等.玉米茎秆穿刺强度遗传研究[J].作物杂志,2014(4):27-31.
Liu X G, Ma F Q, Wang H W, et al. Inheritance analysis of maize rind penetrometer resistance[J]. Crops, 2014(4):27-31.

[17]崔海岩,靳立斌,李波,等.遮阴对夏玉米茎秆形态结构和倒伏的影响[J].中国农业科学,2012,45(17):3497-3505.
Cui H Y, Jin L B, Li B, et al. Effects of shading on stalks morphology, structure and lodging of summer maize in field [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(17):3497-3505.

[18]边大红,刘梦星,牛海峰,等.施氮时期对黄淮海平原夏玉米茎秆发育及倒伏的影响[J].中国农业科学,2017,50(12):2294-2304.
Bian D H, Liu M X, Niu H F, et al. Effects of nitrogen application times on stem traits and lodging of summer maize (*Zea mays* L.) in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(12):2294-2304.

[19]郑云霄，刘文斯，赵永锋，等.玉米种质资源的抗倒伏性评价及鉴定指标筛选[J].植物遗传资源学报，2019，20(6)：1588-1596.
Zheng Y X，Liu W S，Zhao Y F，et al. Evaluation of lodging resistance and selection of identification indexes of maize germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources，2019，20(6)：1588-1596.

[20]汪明华，李佳佳，陆少奇，等.大豆品种耐高温特性的评价方法及耐高温种质筛选与鉴定[J].植物遗传资源学报，2019，20(4)：891-902.
Wang M H，Li J J，Lu S Q，et al. Construction of evaluation standard for tolerance to high-temperature and screening of heat-tolerant germplasm resources in soybean[J]. Journal of Plant Genetic Resources，2019，20(4)：891-902.

[21]徐晓岭，朱灵芝.均匀分布的区间估计方法及应用[J].统计与决策，2012，28(24)：23-25.
Xu X L，Zhu L Z. Interval estimation method of uniform distribution and its application[J]. Statistics & Decision，2012，28(24)：23-25.

[22]Xue J，Ming B，Xie R Z，et al. Evaluation of maize lodging resistance based on the critical wind speed of stalk breaking during the late growth stage[J]. Plant Methods，2020，16(1)：148.

[23]刘艳丽，田伯红，徐玉鹏，等.玉米抗倒伏性评价方法的研究[J].玉米科学，2019，27(5)：116-122.
Liu Y L，Tian B H，Xu Y P，et al. Assessment method of resistance to lodging in corn[J]. Journal of Maize Sciences，2019，27(5)：116-122.

[24]Wang J，Zhu J M，Lin Q Q，et al. Effects of stem structure and cell wall components on bending strength in wheat[J]. Chinese Science Bulletin，2006，51(7)：815-823.

[25]王越，李小雨，李青青，等.不同杂种优势群玉米茎秆维管束性状比较分析[J].河北农业大学学报，2021，44(5)：14-20，56.
Wang Y，Li X Y，Li Q Q，et al. Difference analysis of the stalk vascular bundles in different maize heterotic groups[J]. Journal of Hebei Agricultural University，2021，44(5)：14-20，56.

[26]任佰朝，张吉旺，李霞，等.大田淹水对高产夏玉米抗倒伏性能的影响[J].中国农业科学，2013，46(12)：2440-2448.
Ren B Z，Zhang J W，Li X，et al. Effects of water logging on stem lodging resistance of summer maize under field conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica，2013，46(12)：2440-2448.

[27]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.

[28]田艺心，曹鹏鹏，高凤菊.基于主成分、隶属函数和聚类分析的大豆耐盐性综合评价[J].山东农业科学，2020，52(4)：16-22.
Tian Y X，Cao P P，Gao F J. Comprehensive evaluation on soybean salt tolerance based on principal component，membership function and cluster analyses[J]. Shandong Agricultural Sciences，2020，52(4)：16-22.

[29]吴月莹，邓思情，刘松芹，等.镉浓度对不同玉米品种幼苗生长及生理特性的影响[J].玉米科学，2024，32(1)：82-89.
Wu Y Y，Deng S Q，Liu S Q，et al. Effects of cadmium concentration on seedling growth and physiological characteristics of different maize varieties[J]. Journal of Maize Sciences，2024，32(1)：82-89.

[30]李玉骁，汪磊，汪魏，等.向日葵种质资源的耐盐性评价[J].植物遗传资源学报，2024，25(9)：1480-1492.
Li Y X，Wang L，Wang W，et al. Salt tolerance evaluation of sunflower germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources，2024，25(9)：1480-1492.

(编辑：郭玥微)