温超.切花菊F_1代茎秆强度相关性状的遗传分析[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(6):62-68.
Wen C.Inheritance analysis of stem strength related traits in F_1 generation of cut chrysanthemum[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(6):62-68.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202506020

切花菊F_1代茎秆强度相关性状的遗传分析

温超

(山东省农业科学院 休闲农业研究所/农业农村部华东都市农业重点实验室/生态园艺植物育种山东省工程研究中心,
山东 济南 250100)

摘　要:[目的]菊花为世界四大切花之一,其茎秆强度对植株生长发育、切花采收分级评价、瓶插寿命等有重要影响,但有关菊花茎秆强度相关性状的遗传特性和规律仍不清晰。研究切花菊茎秆强度相关性状的遗传与变异特性,可为切花菊茎秆性状遗传特性研究和新品种选育提供理论基础。[方法]对切花菊品种'神马'与'深志'杂交F_1代群体152个植株的茎秆强度、纤维素含量、木质素含量、硅元素含量、钾元素含量共5个茎秆性状和7个主要农艺性状进行测定和分析。[结果]切花菊杂交F_1代群体5个茎秆强度相关性状的变异系数差异较大,其中茎秆强度变异系数最大(46.18%),木质素变异系数最小(7.08%);纤维素含量的标准差最大(38.78 mg/g),而硅元素含量的标准差最小(0.04)。遗传分析表明,纤维素、木质素、硅元素含量呈一定的减小趋势,而茎秆强度、钾元素含量呈一定的增大趋势,高于高亲的占比最高的是茎秆强度(45.39%),而纤维素含量小于低亲的比例最高(76.97%)。相关性分析表明,钾元素与木质素含量呈显著正相关(0.195),而与纤维素含量呈显著负相关(−0.166)。茎秆强度与叶片干重呈显著正相关(0.177),钾元素与叶柄长度呈显著正相关(0.176),而木质素与株高呈显著负相关(−0.190)。通过主成分分析提取到3个主成分,累积贡献率可达68.23%。[结论]切花菊茎秆强度相关性状存在丰富的遗传多样性,不同性状之间存在显著的相关性,其中茎秆强度变异系数最大,遗传上呈一定的增大趋势,子代大于高亲的占比最高。

关键词:切花菊; 茎秆强度; 纤维素; 钾元素; 硅元素
中图分类号:S682.1^{+}1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)06-0062-07

Inheritance analysis of stem strength related traits in F_1 generation of cut chrysanthemum

Wen Chao

(*Institute of Leisure Agriculture/Key Laboratory of East China Urban Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Shandong Engineering Research Center of Ecological Horticultural Plant Breeding, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China*)

Abstract:[Objective]Chrysanthemum is one of the world's four major cut flowers. Its stem strength significantly impacts plant growth and development, the grading evaluation during harvest, and vase life. However, research on the genetic characteristics and patterns of stem strength related traits in chrysanthemum remains unclear. Studying the inheritance and variation of stem strength related traits in cut chrysanthemums can provide a theoretical basis for research on the genetic characteristics of stem traits and the breeding of new varieties.[Method]Five stem traits (stem strength, cellulose content, lignin content, silicon content, and potassium content) and seven main agronomic traits were measured and analyzed in an F_1 progeny population of 152 plants from a cross between the cut chrysanthemum cultivars 'Jinba' and 'Fucashi'.[Result]The coefficients of variation for the five stem strength related traits in the F_1 progeny population varied considerably. The stem strength had the largest coefficient of variation(46.18%), while lignin content had the smallest (7.08%). Cellulose content had the largest standard deviation

收稿日期:2025-06-13　　**修回日期**:2025-07-31
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(32102426)
作者简介:温超(ORCID:0009-0001-1253-6166),博士,助理研究员,研究方向:观赏园艺植物发育与遗传育种,E-mail:dewc6929@163.com

(38.78), whereas silicon content had the smallest (0.04). Genetic analysis indicated that cellulose, lignin, and silicon contents showed a certain decreasing trend, while stem strength and potassium content showed a certain increasing trend. The trait with the highest proportion of progeny exceeding the high parent value was stem strength (45.39%), while cellulose content had the highest proportion of progeny lower than the low parent value(76.97%). Correlation analysis showed that potassium content was significantly positively correlated with lignin content (0.195) and significantly negatively correlated with cellulose content (-0.166). Stem strength was significantly positively correlated with leaf dry weight (0.177), potassium content was significantly positively correlated with petiole length (0.176), while lignin content was significantly negatively correlated with plant height (-0.190). Three principal components were extracted through principal component analysis, with a cumulative contribution rate reaching 68.23%. [Conclusion]There is abundant genetic diversity in stem strength-related traits of cut chrysanthemum, with significant correlations among different traits. Among them, stem strength has the largest coefficient of variation, showing a certain increasing trend genetically, and has the highest proportion of progeny exceeding the high parent value.
Keywords:Cut chrysanthemum, Stem strength, Cellulose, Potassium, Silicon

菊花(*Chrysanthemum morifolium* Ramat.)为菊科菊属,是中国传统十大名花之一,世界四大切花之一。根据海关总署数据统计,2024年我国花卉出口额为5.16亿美元,与2023年相比增幅17.78%,其中鲜切花实现规模、品类双增[1]。切花菊茎秆是菊花植物新品种特异性、一致性和稳定性测试的性状之一,切花菊茎秆强度不但影响田间植株生长发育,还影响切花采收分级评价和瓶插寿命[2]。因此,切花菊茎秆强度相关性状的遗传规律是菊花研究的潜在热点问题之一。

观赏植物茎秆强度受多种因素的共同影响,包括植株形态特征(株高、茎粗、节间长度、花径等)、解剖结构(机械组织、输导组织的形态和分布等)、理化特性(纤维素、木质素等)等内部因素,以及外源施加含矿质元素(钙、硅、磷、钾)的肥料、植物激素等外部因素[3-4]。切花菊'寒小白'×'蒙娜丽莎白'和'QX097'×'蒙娜丽莎白'杂交子代中茎秆性状生长动态基本一致,但株高、茎粗和节间数的遗传变异和杂种优势差异较大[2]。切花菊和盆栽小菊杂交后代的株高主要由非加性效应控制[5]。盆栽小菊和匍匐型地被菊杂交后代株高的杂种优势为正向显著,节间长度的杂种优势负向显著[6]。李仁伟等[7]利用SRAP分子标记的关联分析发现1个与茎粗度相关标记位点。Li等[8]研究了切花菊株高和茎粗的QTL定位。总之,前人在植物形态特征影响茎秆相关性状的遗传机制方面报道较多,而茎秆理化成分对茎秆强度的遗传特性的影响及其规律仍不清晰。本研究选取切花菊品种'神马'与'深志'及其F_1代群体152个植株为研究对象,通过对茎秆强度、纤维素含量等5个茎秆性状的测定和分析,探究切花菊茎秆强度相关性状的遗传特性,为切花菊新品种选育提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于山东省济南市山东省农业科学院花卉试验田(36°40′N, 117°00′E)进行。试验地四季分明,南北走向,春季(3-5月)平均气温为10～20 ℃,夏季(6-8月)平均气温为20～32 ℃,秋季(9-11月)平均气温为11～21 ℃,冬季(12月至次年2月)平均气温为-2～8 ℃。秋季平均降雨量87 mm,冬季平均降雨量11 mm,属于暖温带大陆性季风气候区。

1.2　试验设计

本试验选用的亲本材料为本实验室保存的切花菊品种'神马'和'深志'。2022年5月,采集亲本植株7 cm插穗进行扦插,7～10 d后开始生根。2022年6月,选择2个亲本已生根良好的植株各200株定植于试验田,10月初花开后以'神马'为母本、'深志'为父本进行人工杂交[9],12月采集种子,室温保存于干燥处。2023年3月将所收集的种子播种于植物生长室,5月将小苗移栽入试验田,常规水肥管理。2024年4月,对F_1代单株进行扦插,5月将扦插苗移栽入试验田,常规水肥管理。2024年9月底至10月初,于植株花蕾末期对2个亲本和F_1子代群体152个株系进行茎秆取样,测定茎秆强度、纤维素含量、木质素含量、硅元素含量和钾元素含量,每个株系取5棵植株即5次重复。

1.3　试验方法

1.3.1　茎秆强度指标测定

采用YYD—1型茎秆强度测定仪(浙江托普

仪器有限公司)进行茎秆强度测量,以植株茎秆的最大抗折力作为衡量茎秆机械强度的标准[10]。选取每株自上而下1/3处(第10~20节位)茎段,去掉叶片,截取10 cm茎秆放于支撑架凹槽内,2个支撑点间距5 cm,记录茎秆折断时显示的最大值(N)。

1.3.2 生理指标测定

将菊花茎秆中部(整株的中间1/3部分)样品装入牛皮纸袋,置于烘箱中65 ℃烘至恒重。纤维素含量测定参照蒽酮比色法[11],木质素含量测定参照Klason法[12],硅元素和钾元素含量测定参照国家标准《GB/T 35871-2018 粮油检验 谷物及其制品中钙、钾、镁、钠、铁、磷、锌、铜、锰、硼、钡、钼、钴、铬、锂、锶、镍、硫、钒、硒、铷含量的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》的方法进行。

1.3.3 主要农艺性状测定

按照《NY/T 2228—2012 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 菊花》中的描述方法进行株高和叶片形态性状的测定。选取每株自上而下1/3处(约第10~15片)的成熟叶,进行叶片长度、叶片面积、叶柄长度、叶片鲜重、叶片干重的测定[13]。侧枝数以目测统计数量。

1.4 数据统计分析

利用Excel 2010软件计算各性状的平均值、最大值、最小值、极差、标准差和变异系数[14]。利用SPSS 23.0软件中的皮尔逊相关性分析法分析各个性状之间的相关性。利用Origin 2021软件进行主成分分析。

2 结果

2.1 F_1代茎秆强度相关性状的描述

由表1可见,切花菊杂交F_1子代群体5个茎秆性状的变异系数差异较大,范围为7.08%~46.18%。其中茎秆强度变异系数最大,达46.18%;木质素变异系数最小,为7.08%。硅和钾元素的变异系数均大于30%,变异程度较大。纤维素的标准差最大,达38.78 mg/g,硅元素的标准差最小,仅为0.04 g/kg。

表1 切花菊F_1子代茎秆强度相关性状的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of stem strength related traits in segregating F_1 populations

指标 Index	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	极差 Range	变异系数/% Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
茎秆强度/N Stem strength	36.87	17.03	83.20	7.60	75.60	46.18	0.57	−0.19
纤维素/(mg/g) Cellulose	430.27	38.78	528.34	346.77	181.57	9.01	0.54	−0.02
木质素/% Lignin	35.01	2.48	39.43	29.99	9.44	7.08	−0.11	−1.17
硅/(g/kg) Silicon	0.10	0.04	0.272	0.005	0.26	40.95	1.23	2.74
钾/(g/kg) Potassium	7.40	2.44	14.30	2.61	11.68	32.95	0.47	−0.23

2.2 F_1代茎秆强度相关性状的遗传

由表2可见,切花菊杂交F_1子代群体的纤维素、木质素、硅元素含量平均值仅为亲中值的94.09%、98.53%和85.10%,表明它们在遗传上呈一定的减小趋势,而茎秆强度、钾元素含量平均值为亲中值的121.80%和119.35%,表明它们在遗传上呈一定的增大趋势。大于高亲的占比较高的是茎秆强度和钾元素,达45.39%和44.74%。纤维素的大于高亲比例最低,仅为21.05%,而其小于低亲的比例最高,达76.97%。钾元素小于低亲的比例最低,仅为16.45%。

2.3 F_1代茎秆强度相关性状之间的关联

从F_1子代群体5个茎秆相关性状的相关性分析结果(表3)可见,共有2对性状达到显著相关水平。其中,木质素与钾元素呈显著正相关(0.195)。纤维素与钾元素呈显著负相关(-0.166)。茎秆强度与纤维素、木质素、硅元素、钾元素均不显著相关。

2.4 F_1代茎秆强度相关性状与其它农艺性状之间的关联

由表4可见,F_1子代茎秆相关性状与其它农艺性状之间共有3对性状达到显著相关水平。其中,茎秆强度与叶片干重呈显著正相关,钾元素与叶柄长度呈显著正相关,而木质素与株高呈显著负相关。其它性状之间未达到显著相关水平。

2.5 F_1代茎秆强度相关性状主成分分析

对切花菊F_1代茎秆5个性状进行主成分分析

表2　F_1子代群体茎秆强度相关性状的遗传

Table 2　Heredity of stem strength related traits in segregating F_1 populations

指标 Index	亲本 Parent			F_1子代 Hybrid			(平均值/亲中值)/% Average value/Mid-value	分布比例/% Distribution ratio		
	♀	♂	亲中值 Mid-value	平均值 Average value	变异系数/% CV	极值 Range		<低亲 <Low parent	双亲之间 Between parents	>高亲 >High parent
茎秆强度/N Stem strength	35.90	24.70	30.27	36.87	46.18	7.60～83.20	121.80	23.69	30.92	45.39
纤维素/(mg/g) Cellulose	458.61	455.95	457.28	430.27	9.01	346.77～528.34	94.09	76.97	1.98	21.05
木质素/% Lignin	36.70	34.36	35.53	35.01	7.08	29.99～39.43	98.53	42.76	26.98	30.26
硅/(g/kg) Silicon	0.12	0.12	0.12	0.10	40.95	0.005～0.272	85.10	72.36	1.99	25.65
钾/(g/kg) Potassium	7.49	4.90	6.20	7.40	32.95	2.61～14.30	119.35	16.45	38.81	44.74
总平均比例/% Total average rate							103.77	46.45	20.13	33.42

表3　切花菊F_1子代茎秆强度相关性状的相关性分析

Table 3　Correlation analysis of stem strength related traits in segregating F_1 populations

指标 Index	茎秆强度/N Stem strength	纤维素/(mg/g) Cellulose	木质素/% Lignin	硅/(g/kg) Silicon
纤维素/(mg/g) Cellulose	0.016			
木质素/% Lignin	−0.120	−0.110		
硅/(g/kg) Silicon	−0.039	−0.073	−0.047	
钾/(g/kg) Potassium	0.005	−0.166*	0.195*	0.074

注:*表示显著相关($P<0.05$)。

Note:* indicated significant correlation ($P<0.05$).

发现,前3个主成分的累计贡献率达68.23%(表5),基本包含了茎秆相关性状的所有信息。第1主成分的特征值为1.34,贡献率为26.91%,主要反映了钾元素和木质素含量,其载荷值分别为0.59和0.55;第2主成分的特征值为1.05,贡献率为21.10%,其代表指标为硅元素含量,载荷值为0.66;第3主成分的特征值为1.01,贡献率为20.22%,主要反映了茎秆强度,载荷值为0.75。

3　讨论

切花菊茎秆是植株压力的主要承载部位,能够支撑植株形态和协调营养物质运输,其强度与切花品质和观赏品质密切相关[2]。本研究以切花菊品种'神马'与'深志'及其杂交F_1子代群体为试材,发现子代群体茎秆强度相关性状存在丰富的遗传多样性,不同性状之间存在显著的相关性。

对切花菊品种'神马'与'深志'杂交F_1代群体各性状的分析发现,株高、舌状花数目、筒状花数目、叶片干重变异系数较大,均超40%以上[9,13],本研究中也发现了茎秆强度变异系数最大,且茎秆强度与叶片干重呈现正相关性,表明菊花叶片重量能够对茎秆强度产生显著影响。对切花菊性状遗传分析发现,株高、茎粗、花序直径、舌状花数目、花瓣长度、花梗粗度呈减小趋势,而节间长度、筒状花数目、叶片重量呈增大趋势[9,13,15]。本研究中发现,纤维素、木质素、硅元素含量呈一定的减小趋势,茎秆强度、钾元素呈一定的增大趋势,表明同一个杂交组合里不同性状的遗传特性存在明显差异。吴洋洋等[2]在切花菊'寒小白'×'蒙娜丽莎白'杂交子代中发现茎秆性状存在中亲优势,奥妮等[16]发现切花菊'Q1-81'×'蒙白'正反交后代群体间株高和叶形相关性状存在显著差异,于瑞宁等[17]在切花菊'QD3-71'×'精之一世'和'秦淮春雪'×'神马'杂交后代中发现分枝性状存在不同程度的中亲优势,存在广泛的超亲分离现象。本研究与前人研究结果相似,表明在菊花杂交育种中选择合适的亲本组合有利于获得性状高度分离的子代个体。同时,研究切花菊不同性状的变

表4 切花菊F_1子代茎秆强度相关性状与其它农艺性状的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between stem strength related traits and other agronomic traits in segregating F_1 populations

指标 Index	茎秆强度/N Stem strength	纤维素/(mg/g) Cellulose	木质素/% Lignin	硅/(g/kg) Silicon	钾/(g/kg) Potassium
叶片鲜重/g Leaf fresh weight	0.130	0.040	0.029	−0.035	0.021
叶片干重/g Leaf dry weight	0.177*	0.026	0.040	0.009	0.026
叶片面积/cm^2 Leaf area	0.129	−0.016	−0.020	−0.017	−0.017
叶片长度/cm Leaf length	0.085	0.051	−0.008	0.018	0.029
叶柄长度/cm Petiole length	−0.091	0.056	−0.021	0.007	0.176*
侧枝数 Number of branches	0.120	0.020	−0.072	−0.069	−0.057
株高/cm Hight	0.091	0.114	−0.190*	−0.082	−0.019

注:*表示显著相关($P<0.05$)。

Note:* indicated significant correlation ($P<0.05$).

表5 切花菊F_1子代茎秆强度相关性状主成分分析

Table 5 Principal component analysis of stem strength related traits in segregating F_1 populations

指标 Index	第1主成分 First principal component	第2主成分 Second principal component	第3主成分 Third principal component
茎秆强度/N Stem strength	−0.22	0.48	0.75
纤维素/(mg/g) Cellulose	−0.51	−0.28	−0.12
木质素/% Lignin	0.55	−0.46	0.11
硅/(g/kg) Silicon	0.18	0.66	−0.58
钾/(g/kg) Potassium	0.59	0.16	0.26
特征值 Eigenvalues	1.34	1.05	1.01
贡献率/% Contribution rate	26.91	21.10	20.22
累计贡献率/% Accumulative contribution rate	26.91	48.01	68.23

异性与相关性,通过具有相关遗传趋势性状的归类或合并,有利于降低子代群体评价的复杂性,增加优株(系)筛选效率。对其它农艺性状的改良,直接或间接地影响茎秆强度的改良。

前人研究表明植株形态特征能够影响茎秆强度,但不同植物的株高性状对茎秆强度的影响存在差异。张凤启等[18]发现145份玉米自交系的茎秆穿刺强度与株高呈极显著正相关。刘洁等[19]发现成熟期甘蓝型油菜株高与茎秆穿刺强度呈极显著正相关。谭畅[20]发现青稞基部第2节间抗折力与株高呈极显著相关。然而,刘明等[21]研究表明大豆折断力和株高间无显著相关关系。李成忠[22]发现芍药茎秆强度与株高之间关系并不密切。Davies等[23]发现宫灯百合茎秆强度与株高呈负相关。石文波等[24]发现芍药株高与花茎强度呈正相关,但未达到显著水平。本研究中,茎秆强度与株高呈正相关但不显著,与大豆和芍药的研究结果相似。此外,在5个茎秆性状和7个主要农艺性状相关性分析中,仅有叶片干重与茎秆强度显著相关,且12个指标大多不显著相关,推测可能原因为本研究农艺性状的选择范围不够大,或者测量时期选择过早,植株仍处于生长中,导致茎秆性状与其它指标的相关性不同于前人报道[3,18-20]。

从茎秆化学成分来看,与茎秆强度密切相关的化学成分主要有纤维素、半纤维素、木质素以及硅、钾等矿质元素。刘洁等[19]发现成熟期甘蓝型油菜茎秆的穿刺强度和抗折强度呈极显著正相关,纤维素含量与木质素含量呈显著负相关。李喜强等[25]发现施钾有利于提高胡麻茎秆抗折力,适量的钾素供给能促进木质素的合成。李成忠[22]发现高机械强度类芍药品种花茎机械强度与钙、钾、硅3种元素的含量呈极显著正相关,芍药现蕾后0~7 d和14~21 d,花茎机械强度与纤维素含量呈正相关,与木质素含量呈负相关,现蕾后28~35 d时与木质素含量达显著相关,说明芍药现蕾后的时间影响性状间相关性。本研究中,茎秆强度与纤维素、钾元素含量呈正相关,与木质素、硅元素含量呈负相关,但均不显著。这与李成忠[22]的研

究结果相似，本研究茎秆相关性状测定于花蕾末期，可能植株内木质素仍在积累阶段，生理状态变化较大。此外，许聪[26]发现外施硅处理显著增强了芍药花茎强度，提高了花茎中硅和木质素含量，改变了花茎解剖结构。赵国英等[27]发现施钾可以显著增加冬小麦茎秆基部2个节间的机械强度和抗倒指数，茎秆壁也显著增厚。本研究中钾元素、硅元素含量均与茎秆强度不显著相关，但主成分分析发现钾元素、硅元素含量分别在第1主成分和第2主成分中，表明矿质元素对茎秆强度可能存在影响。马婉茹[28]研究发现硅钙肥兼施处理中显著提高切花小菊茎秆强度，这表明菊花体内元素含量易受栽培措施影响，可以考虑从外界补足进行茎秆强度的提高。

本研究发现了5个切花菊茎秆强度相关性状的遗传表现存在差异，在下一步的研究中，可结合亲本与子代群体间茎秆解剖结构的遗传差异，利用转录组分析、GWAS等技术手段进一步解析茎秆强度相关性状的遗传变异和形成机制，可为切花菊新品种选育提供更多理论支持。

4　结论

本研究以切花菊品种‘神马’与‘深志’及其杂交F_1代群体为试材，通过遗传分析、相关性分析和主成分分析发现子代群体茎秆强度5个相关性状存在丰富的遗传多样性，其中茎秆强度变异系数最大，遗传上呈一定的增大趋势，子代高于高亲的占比最高，同时，不同性状之间存在显著的相关性。

参　考　文　献

[1]中国绿色时报.中国花卉协会分析2024年全国花卉产销情况助力美丽事业更兴旺[EB/OL].(2025-03-28)[2025-06-13]. https://www. forestry. gov. cn/lyj/1/gghhmmcy/20250328/617790.html.
China Green Times. China Flower Association analyzes the national flower production and sales situation in 2024 to promote the prosperity of the beauty industry [EB/OL]. (2025-03-28)[2025-06-13]. https://www.forestry.gov.cn/lyj/1/gghhmmcy/20250328/617790.html.

[2]吴洋洋，徐婷婷，迟天华，等.切花菊茎秆性状的生长动态与遗传分析[J].核农学报，2020，34(1)：55-61.
Wu Y Y, Xu T T, Chi T H, et al. Growth dynamics and genetic analysis of stem-related traits in cut chrysanthemum[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020,34(1):55-61.

[3]夏星，汤寓涵，陶俊，等.观赏植物茎秆强度形成及其调控[J].植物生理学报，2018，54(3)：347-354.
Xia X, Tang Y H, Tao J, et al. Formation and regulation of ornamental plant stem strength[J]. Plant Physiology Journal, 2018,54(3):347-354.

[4]张璐瑶，孙道金，余琪，等.不同定植密度对切花小菊分枝性状和观赏品质的影响[J].江苏农业科学，2022，50(21)：155-165.
Zhang L Y, Sun D J, Yu Q, et al. Effects of different planting density on branch characteristics and ornamental quality of cut chrysanthemum [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(21):155-165.

[5]张飞，房伟民，陈发棣，等.菊花观赏性状的配合力分析[J].园艺学报，2010，37(4)：589-596.
Zhang F, Fang W M, Chen F D, et al. Combining ability analysis on ornamental characters of chrysanthemum[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010,37(4):589-596.

[6]张飞，陈发棣，房伟民，等.菊花营养性状杂种优势表现与主基因+多基因混合遗传分析[J].林业科学，2011，47(2)：46-52.
Zhang F, Chen F D, Fang W M, et al. Heterosis and major gene plus polygene mixed genetic analysis for vegetative traits in chrysanthemum[J]. Scientia Silvae Sinicae,2011,47(2):46-52.

[7]李仁伟，王晨，戴思兰，等.菊花品种表型性状与SRAP分子标记的关联分析[J].中国农业科学，2012，45(7)：1355-1364.
Li R W, Wang C, Dai S L, et al. The association analysis of phenotypic traits with SRAP markers in chrysanthemum [J]. Scientia Agricultura Sinica,2012,45(7):1355-1364.

[8]Li P R, Zhang F, Chen S M, et al. Genetic diversity, population structure and association analysis in cut chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) [J]. Molecular Genetics and Genomics,2016,291(3): 1117-1125.

[9]杨云燕，温超，王珂永，等.切花菊杂交F_1代若干性状的遗传分析[J].中国农业大学学报，2015，20(5)：179-187.
Yang Y Y, Wen C, Wang K Y, et al. Heredity analysis of several characters in F_1 hybrid generation of cut-flower chrysanthemums[J]. Journal of China Agricultural University, 2015,20(5):179-187.

[10]华方静，王乐政，曹鹏鹏，等.夏播红小豆抗倒伏性分析及机收品种评价[J].山东农业大学学报(自然科学版)，2020，51(3)：408-413.
Hua F J, Wang L Z, Cao P P, et al. Lodging resistance analysis of summer adzuki bean and evaluation of mechanical harvest cultivars [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020,51(3):408-413.

[11]王学奎. 植物生理生化实验原理和技术2版[M].北京：高等教育出版社，2006，222-223.
Wang X K. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments 2nd[M]. Beijing, Higher Education Press,2006,222-223.

[12]刘思洁，李青，杨明远，等. 吉林人参中木质素含量的测定[J].人参研究，2011，23(2)：12-14.
Liu S J, Li Q, Yang M Y, et al. Determination of lignin content in *Panax ginseng* of Jilin Province [J]. Ginseng Research,2011,23(2):12-14.

[13]Sun J L, Wen C. Phenotypic variation and inheritance of leaf weight in cut chrysanthemum[J]. Euphytica,2025,221(3):27.

[14]孙嘉璐,温超.开放授粉条件下小菊叶部数量性状的遗传分析[J].天津农业科学,2024,30(9):1-5.
Sun J L, Wen C. Genetic analysis of quantitative traits in leaves of spray chrysanthemum in open pollination[J]. Tianjin Agricultural Sciences,2024,30(9):1-5.

[15]Yang Y Y, Wen C, Ma N, et al. Heterosis and genetic analysis of branching in cut-flower chrysanthemums [J]. Euphytica,2015,205(3):915-925.

[16]奥妮,仰小东,李晨曦,等.菊花正反交F_1代株高和叶形相关性状的遗传差异[J].分子植物种,2020,18(17): 5852-5859.
Ao N, Yang X D, Li C X, et al. Genetic divergence of plant height and leaf shape related traits in reciprocal F_1 progenies of chrysanthemum[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(17): 5852-5859.

[17]于瑞宁,马琦,孙炜,等.标准切花菊分枝性状的杂种优势和混合遗传分析[J].核农学报,2020,34(10):2143-2151.
Yu R N, Ma Q, Sun W, et al. Heterosis and mixed inheritance analysis of branching traits in standard cut-chrysanthemum[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020,34(10):2143-2151.

[18]张凤启,张君,马智艳,等.145份玉米自交系茎秆抗倒伏能力的综合评价[J].河南农业科学,2024,53(11): 34-40.
Zhang F Q, Zhang J, Ma Z Y, et al. Comprehensive evaluation of stem lodging resistance of 145 maize inbred lines [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(11): 34-40.

[19]刘洁,何红琼,牛应泽,等.甘蓝型油菜茎秆强度相关性状及其与农艺性状的相关分析[J].华北农学报,2021,36(S1): 149-154.
Liu J, He H Q, Niu Y Z, et al. Correlation analyses of stalk strength related traits and agronomy traits in *Brassica napus* L [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021,36(S1):149-154.

[20]谭畅.青稞茎秆特征与抗倒伏相关性分析[D].林芝:西藏农牧学院,2021.
Tan C. Association analysis of barley stemcharacteristic and lodging resistan [D]. Linzhi: Agricultural and Animal Husbandry college of Tibet University,2021.

[21]刘明,王贞杰,孙亚男,等.基于主茎力学特性的大豆种质资源抗倒伏性分析[J].大豆科学,2023,42(1):23-31.
Liu M, Wang Z J, Sun Y N, et al. Analysis of lodging resistance of soybean germplasm resources based on mechanical properties of main stem [J]. Soybean Science, 2023,42(1):23-31.

[22]李成忠.影响芍药花茎机械强度的生理机制研究[D].扬州:扬州大学,2013.
Li C Z. Studies on physiological mechanism affecting the mechanical strength of inflorescence stem in herbaceous peony (*Paeonia lactiflora*) [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013.

[23]Davies L J, Brooking I R, Catley J L, et al. Effects of day/night temperature differential and irradiance on the flower stem quality of *Sandersonia aurantiaca*[J]. Scientia Horticulturae, 2002,95(1-2):85-98.

[24]石文波,高天翔,胡蕴钰,等.芍药花茎强度与褪黑素含量的关系分析[J].浙江农业学报,2021,33(4):632-639.
Shi W B, Gao T X, Hu Y Y, et al. Analysis of correlation between inflorescence stem strength and melatonin content of herbaceous peony[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(4):632-639.

[25]李喜强,高玉红,贾玲玲,等.施钾量与密度对胡麻木质素合成积累及抗倒伏特性的调控[J].西北农业学报,2024,33(4): 630-641.
Li X Q, Gao Y H, Jia L L, et al. Regulation of potassium application rate and density on lignin synthesis accumulation and lodging resistance of flax [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024,33(4):630-641.

[26]许聪.硅对芍药花茎强度的调控及*PlHCT1*基因功能研究[D].扬州:扬州大学,2022.
Xu C. The regulation effect of silicon on *Paeonia lactiflora* inflorescence stem strength and the function of *PlHCT1* gene [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.

[27]赵国英,王红光,李东晓,等.灌水次数和施钾量对冬小麦茎秆形态特征和抗倒性的影响[J].麦类作物学报,2017,37(6): 759-768.
Zhao G Y, Wang H G, Li D X, et al. Effect of irrigation frequency and potassium application amount on stem morphological characteristics and lodging resistance of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops,2017,37(6):759-768.

[28]马婉茹.切花小菊茎枝特性评价及适宜立面装饰品种筛选[D].南京:南京农业大学,2019.
Ma W R. Evaluation of stem and branching characteristics of spray cut chrysanthemum and selection of suitable varieties for façade decoration [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2019.

(编辑:郭玥微)