张永康,王树彦,张锦豪,等.藜麦种质资源的茎秆性状评价[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(4):1-9.
Zhang Y K, Wang S Y, Zhang J H, et al.Evaluation of stem traits in quinoa germplasm resources[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(4):1-9.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202404013

藜麦种质资源的茎秆性状评价

张永康[1],王树彦[1*],张锦豪[1],李佳娜[1],邢路虹[1],刘瑞香[2],郭占斌[3]

(1.内蒙古农业大学 农学院,内蒙古 呼和浩特 010019;2.内蒙古农业大学 沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010011;
3.内蒙古益稷生物科技有限公司,内蒙古 呼和浩特 010011)

摘　要:[目的]藜麦种子具有全谷物高营养的品质,但倒伏是制约藜麦产量的重要因素之一,明确藜麦作物茎秆的抗倒伏特性,有利于筛选具有不同倒伏能力的藜麦品种(系),为藜麦抗倒伏育种鉴定、评价和创新提供理论依据。[方法]本研究根据株高、籽粒大小、倒伏特性和生育期长短选取22份供试藜麦品种(系)并对其生育期、茎秆表型性状、茎秆机械强度和生理特征共16个指标进行测定和分析。[结果]22份藜麦品种(系)具有较高度的遗传变异,14个性状的变异系数为12.39%~81.08%,倒伏指数的变异系数最大,纤维素含量的变异系数最小。多因素方差分析得出作物倒伏特性与品种(系)、生育期、机械强度指标三者具有显著互作关系。相关性分析发现弯曲力矩、倒伏指数与茎秆表型性状、机械强度指标具有显著或极显著相关关系。基于13个茎秆特性指标以及隶属函数均值进行聚类分析可将22份藜麦品种(系)划分为3个类群,第Ⅰ类为抗倒伏组,第Ⅱ、Ⅲ类群为易倒伏组。多元线性回归分析得出,11个茎秆特性指标与倒伏指数和倒伏率做回归,R^2均大于0.85。22份藜麦品种(系)的隶属函数均值为2.21~1.47,倒伏率范围为18.13%~91.83%,倒伏等级为2~5级。[结论]22份藜麦品种(系)农艺性状遗传多样性较为丰富,可为藜麦种质资源的创造提供参考。倒伏指数和弯曲力矩对作物倒伏能力评价具有重要作用。综合分析后推测K157、W120为抗倒伏品系,Y4、W26为易倒伏品系。

关键词:倒伏性; 茎秆特性; 倒伏指数; 弯曲力矩

中图分类号:S519　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1671-8151(2024)04-0001-12

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)是苋科藜属一年生双子叶植物[1],是全谷物完全蛋白食物,富含多种氨基酸和多种有益于人体健康的化学物质,这种粮食作物是目前世界公认的唯一能够满足人体所需基本营养需求的单体植物。因其高营养价值,近年来南美洲的玻利维亚、秘鲁、厄瓜多尔,欧洲的丹麦、波兰,北美洲的美国,以及亚洲的中国、印度等国家也逐渐开始种植藜麦,我国主要种植区为山西、内蒙古、河北、青海等。藜麦喜冷凉、干旱及高海拔的生长环境,抗逆性较强,可以在干旱、瘠薄、寒冷等恶劣环境中正常生长发育[2],被公认为在土壤与气候逆境下仍能进行粮食生产的优选作物。

藜麦的根系分布较浅,茎秆较脆弱,尤其是密植条件下从灌浆期开始到成熟期,如果遇到雨或大风等极端恶劣天气,极易发生倒伏和茎秆折断现象,不仅影响藜麦籽粒品质和产量,而且影响机械化收割,降低农业生产效率,增加生产成本。姜丽霞等[3]研究发现油菜在终花后和灌浆期间易发生倒伏,一般减产15%~30%,严重时达60%以上。李树岩等[4]研究发现夏玉米在大喇叭口和灌浆期会发生不同程度的根倒伏或茎倒伏。据统计,每年作物因倒伏减产高达5%~40%[5]。因此,如何改善藜麦群体抗倒性能,确定作物倒伏关键

收稿日期:2024-04-02　　**修回日期:**2024-06-02
基金项目:呼和浩特市应用技术研究与开发资金项目(2022-农-5);中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0138);内蒙古自治区燕麦藜麦产业技术创新推广体系;呼和浩特市应用技术研究与开发资金项目(2023-农-1)
作者简介:张永康(ORCID: 0009-0008-3748-5386),硕士研究生,研究方向:藜麦作物遗传育种
*通信作者:王树彦,教授,硕士生导师,wangshuyan2006@163.com

时期,进而稳定藜麦产量和品质,已成为当前内蒙古阴山丘陵旱作区藜麦生产亟待突破的重大课题之一。

藜麦虽然具有极高的营养价值,但目前生产过程中时常发生倒伏,不仅降低藜麦产量,还影响其品质。倒伏现象是作物生产中面临的一个共性问题,诸多专家学者对不同作物进行了深入研究,发现油菜[6]、小麦[7-8]、玉米[9]等作物因倒伏导致不同程度的减产。例如,董秀春等[10]在鲁西南对不同小麦品种进行抗倒性试验,发现自开花后倒伏可导致小麦减产7%~40%。近年来,国内外关于作物倒伏影响因素的研究有较多报道,概括起来有以下几个方面:①茎秆形态特性[11-14];②茎秆解剖结构[15-16];③茎秆力学特征[17-19];④茎秆生理特性[20-22];⑤茎秆抗倒伏遗传特性[23-25]等。可见预防倒伏和增强作物的抗倒伏能力是藜麦种植的重要技术之一。但有关不同生育时期对藜麦倒伏影响的报道较少。针对藜麦不同生育期茎秆倒伏问题,以提升藜麦茎秆抗倒伏性能为目标,本研究通过选用22份藜麦种质资源,在灌浆期和成熟期对植株茎秆相关性状进行测定,主要为茎壁厚、株高、分枝数、抗折力、抗穿刺力、弯曲力矩、茎秆纤维素、木质素含量和茎粗等,明确其茎秆特性,综合分析藜麦茎秆性状与作物倒伏的关系,旨在为藜麦茎秆抗倒伏育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用22份藜麦种质资源,试验材料由内蒙古蒙农藜麦研究院提供。2023年将试验材料种植于内蒙古自治区呼和浩特市武川县西乌兰不浪镇东后河村武川藜麦科技小院试验田(41.20°N,111.09°E)。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,3次重复,小区面积6 m^2(6 m×1 m)。根据株高、籽粒大小、倒伏特性和生育期长短选取22份供试藜麦品种(系)。株高:G662、Z227、W120、G723、G729、G788、K157;籽粒大小:Y1~Y6;倒伏特性:1540、1537、ML6、G28、W26、W3;生育期长短:K159、W118、W132。于藜麦灌浆期和成熟期进行取样,测量与植株抗倒伏特性相关的指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎秆农艺性状指标

于植株生长发育过程中的灌浆期和成熟期,分别选取5株长势基本一致的植株,测量株高、重心、穗位高、茎壁厚、分支数、茎基部第二节间至穗顶鲜重、茎粗,测定方法见表1。

表1 农艺性状指标的测定方法

Table 1 Determination methods for agronomic traits

性状 Trait	测定方法 Determination
株高/cm	使用株高尺(精度0.1 cm)测量植株地表到主穗顶部的距离[15]
茎壁厚/mm	用游标卡尺(精度0.01 mm)测定剥除藜麦植株茎鞘的基部第二节间的壁厚和直径[15]
重心/cm	地上茎基部第一节间到平衡点的距离,使用平衡法[26]
茎粗/mm	使用游标卡尺,测量植株地上30 cm处的茎秆粗度[26]
穗位高/cm	根部贴近地面到果穗第一着生节位置的高度[27]
分支数/个	从植株茎基部开始至主穗基部的分支个数[28]
茎基部第二节间至穗顶鲜重/g	截取植株茎基部第二节间至穗顶,使用百分位天平称量其鲜重[29]

1.3.2 茎秆力学指标

抗折力、抗压力和抗穿刺力测定:采用植物茎秆强度测定仪(世亚科技SY-S03),参照卢昆丽等[30]和马晓君等[31]的方法测定;弯曲力矩与倒伏指数按照李国辉等[29]的方法计算,弯曲力矩=基部节间至穗顶长度×基部节间至穗顶鲜重,倒伏指数=弯曲力矩/抗折力×100%。

1.3.3 结构性碳水化合物含量

灌浆期和成熟期取样,取样部位为藜麦茎秆基部第二节间。采用植物(Plant)木质素(Lignin)ELISA检测试剂盒及酶标仪(450 nm),测定样品中木质素含量。采用植物(Plant)纤维素(Cellulose)ELISA检测试剂盒及酶标仪(450 nm),测定样品中纤维素含量。

1.3.4 倒伏率和倒伏等级

收获前统计各小区内倒伏植株数和种植总株数,用于计算倒伏率,倒伏率(%)=倒伏株数/种植总株数×100。倒伏等级认定参照王凯等[32]的标准,1级为无倒伏(倒伏率=0),2级为轻度倒伏

(0<倒伏率≤25%),3级为中度倒伏(25%<倒伏率≤50%),4级为重度倒伏(50%<倒伏率≤75%),5级为严重倒伏(倒伏率>75%)。

1.4　数据处理

采用Excel 2019整理数据;使用SPSS 26软件对茎秆表型性状、茎秆机械强度指标、生理指标的数据进行描述性统计、多因素方差分析、多元线性回归分析和隶属函数综合评价分析;使用Origin 2021软件对茎秆特性数据绘制相关性分析的热点图和聚类分析的聚类图。

2　结果与分析

2.1　22份藜麦品种(系)的描述性统计分析

表2可见,14个性状的变异系数范围为12.39%~81.08%;倒伏指数的变化范围为46.46%~1 555.36%,变异系数最大;纤维素含量的变化范围为131.49~207.00 mg·mL^{-1},变异系数最小。其余指标中,变异系数较小的性状有株高、茎粗、重心、木质素含量,变异系数为16.32%~24.54%。变异系数较大的性状为抗折力、弯曲力矩、倒伏率,变异系数为60.15%~65.49%。22份藜麦品种(系)具有较为丰富的遗传多样性,不同品种(系)间性状差异较大。

2.2　22份藜麦品种(系)多因素方差分析

机械强度指标主效应检验结果见表3,不同品种(系)间、生育期间、机械强度指标三者均存在极显著差异(P<0.01);品种(系)与生育期、品种(系)与机械强度指标、生育期与机械强度指标的二者交互作用存在极显著(P<0.01)的互作效应;品种(系)、生育期、品种(系)与机械强度指标的三者交互作用存在极显著(P<0.01)的互作效应。说明藜麦作物倒伏特性与品种(系)、生育期、机械强度指标密切相关。

表2　22份藜麦品种(系)的农艺性状和机械强度指标统计

Table 2　Statistics of agronomic traits and mechanical strength indicators of 22 quinoa varieties (lines)

性状 Trait	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
株高/cm	98.12	297.81	167.49	27.33	16.32
重心/cm	30.56	216.69	98.76	24.24	24.54
茎壁厚/mm	0.90	6.10	3.09	1.09	35.15
分枝数/个	7.00	42.00	24.00	8.00	32.00
穗位高/cm	23.95	252.58	108.64	37.70	34.70
木质素含量/(mg•mL^{-1})	34.69	87.76	62.29	14.83	23.81
纤维素含量/(mg•mL^{-1})	131.49	207.00	173.04	21.43	12.39
抗折力/N	23.95	521.52	143.28	93.83	65.49
抗压力/N	35.39	328.71	149.79	56.36	37.62
抗穿刺力/N	10.37	96.23	39.84	16.83	42.24
弯曲力矩/(g•cm)	4 618.81	105 789.62	35 356.55	21 265.80	60.15
倒伏指数/%	46.46	1 555.36	317.78	257.67	81.08
倒伏率/%	1.79	96.24	52.53	33.65	64.07
茎粗/mm	10.42	25.91	16.88	3.43	20.33

2.3　22份藜麦品种(系)相关性分析

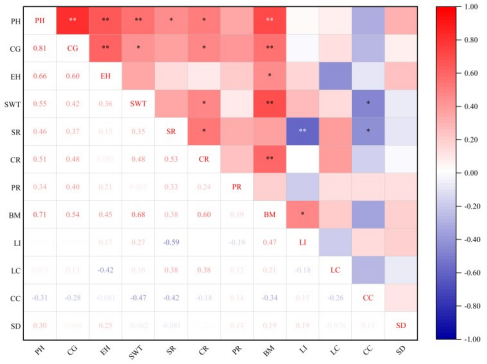
对处于灌浆期的22份藜麦品种(系)的茎秆特性进行相关分析,结果表明12个与倒伏相关的指标有部分具有相关性(图1)。其中,株高与重心、穗位高、茎壁厚、弯曲力矩呈极显著正相关(P<0.01),与抗折力、抗压力呈显著正相关(P<0.05)。重心与穗位高、弯曲力矩呈极显著正相关(P<0.01),与茎壁厚、抗压力呈显著正相关(P<0.05)。穗位高与弯曲力矩呈显著正相关(P<0.05)。茎壁厚与弯曲力矩呈极显著正相关(P<0.01),与抗压力呈显著正相关(P<0.05),与纤维素含量呈显著负相关(P<0.05)。抗折力与倒伏指数呈极显著负相关(P<0.01),与抗压力显著正相关(P<0.05),与纤维素含量显著负相关(P<0.05)。抗压力与弯曲力矩呈极显著正相关(P<0.01)。弯曲力矩与倒伏指数呈显著正相关(P<

表3 机械强度指标的主体间效应检验

Table 3 Inter—subject effect test of mechanical strength index

变量 Variate	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	*F*	*Pr*(>*F*)
品种(系)	21	210 504 961.10	12.90	<0.001
生育期	2	1 904 476 232.76	116.74	<0.001
机械强度指标	4	36 291 408 338.11	2 224.62	<0.001
品种(系)×生育期	42	143 048 805.25	8.77	<0.001
品种(系)×机械强度指标	84	203 167 621.43	12.45	<0.001
生育期×机械强度指标	8	1 905 267 217.46	116.79	<0.001
品种(系)×生育期×机械强度指标	168	138 986 232.36	8.52	<0.001
残差	329	653 681 291.18		

0.05)。可见,多个指标与弯曲力矩呈极显著正相关($P<0.01$),说明弯曲力矩可作为判断灌浆期作物倒伏的重要指标。



PH:株高;CG:重心;EH:穗位高;SWT:茎壁厚;SR:抗折力;CR:抗压力;PR:抗穿刺力;BM:弯曲力矩;LI:倒伏指数;LC:木质素含量;CC:纤维素含量;SD:茎粗

PH: Plant height; CG: Center of gravity; EH: Ear height; SWT: Stem wall thickness; SR: Stem resistance; CR: Compressive resistance; PR: Puncture resistance; BM: Bending moment; LI: Lodging index; LC: Lignin content; CC: Cellulose content; SD: Stem diameter

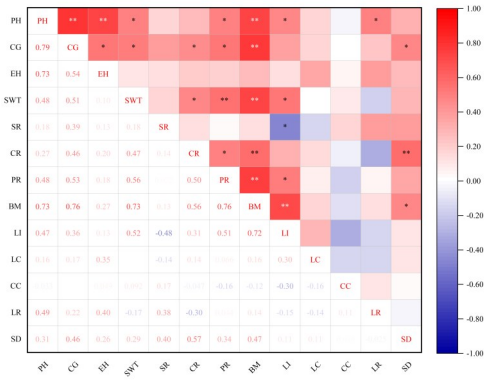
图1 22份藜麦品种(系)灌浆期茎秆特性相关性热图

Fig. 1 Correlation heat maps of stem characteristics of 22 quinoa cultivars (lines) at filling stage

对处于成熟期的22份藜麦品种(系)的茎秆特性进行相关性分析,结果表明13个与倒伏相关的指标之间具有一定的相关性(图2)。其中,株高与重心、穗位高、弯曲力矩呈极显著正相关($P<0.01$),与茎壁厚、抗穿刺力、倒伏指数、倒伏率呈显著正相关($P<0.05$)。重心与弯曲力矩呈极显著正相关($P<0.01$),与穗位高度、茎壁厚、抗压力、抗穿刺力、茎粗呈显著正相关($P<0.05$)。茎壁厚与抗穿刺力、弯曲力矩呈极显著正相关($P<0.01$),与抗压力、倒伏指数呈显著正相关($P<0.05$)。抗折力与倒伏指数呈显著负相关($P<0.05$)。抗压力与弯曲力矩、茎粗呈极显著正相关($P<0.01$),与抗穿刺力呈显著正相关($P<0.05$)。抗穿刺力与弯曲力矩呈极显著正相关($P<0.01$),与倒伏指数呈显著正相关($P<0.05$)。弯曲力矩与倒伏指数呈极显著正相关($P<0.01$),与茎粗呈显著正相关($P<0.05$)。多个指标与弯曲力矩呈极显著正相关($P<0.01$),与倒伏指数呈显著正相关($P<0.05$),说明弯曲力矩、倒伏指数可作为判断成熟期作物倒伏的重要指标。

2.4 22份藜麦品种(系)聚类分析

基于株高、重心、穗位高、茎壁厚、抗折力、抗



PH,CG,EH,SWT,SR,CR,PR,BM,LI,LC,CC,SD,同图1。LR:倒伏率

PH, CG, EH, SWT, SR, CR, PR, BM, LI, LC, CC, SD were the same as in Fig. 2. LR: Lodging rate

图2 22份藜麦品种(系)成熟期茎秆特性的相关性热图

Fig.2 Correlation heat maps of stem characteristics of 22 quinoa varieties (lines) at maturity

压力、抗穿刺力、弯曲力矩、倒伏指数、木质素含量、纤维素含量、倒伏率、茎粗13个茎秆特性指标，以及隶属函数均值，对22份藜麦品种(系)进行聚类分析，可分为3大类(图3)。第Ⅰ类包括4份藜麦品种(系)，为1537、ML6、K157、W120，该类群株高、重心、穗位高、茎壁厚、抗压力、弯曲力矩、茎粗、隶属函数均值相较于第Ⅱ、Ⅲ类群处于中等；抗折力、纤维素含量、倒伏率相较于第Ⅱ、Ⅲ类群处于较低水平；倒伏指数和木质素含量相较于第Ⅱ、Ⅲ类群处于较高水平。第Ⅱ类包括17份藜麦品种(系)，为1540、G662、G28、G723、G729、G788、K159、W3、W26、W118、W132、Y1～Y6，该类群株高、重心、穗位高、茎壁厚、抗压力、抗穿刺力、弯曲力矩、倒伏指数、木质素含量、茎粗、隶属函数均值相较于第Ⅰ、Ⅲ类群处于较低水平；抗折力、纤维素含量和倒伏率相较于第Ⅰ、Ⅲ类群处于中等。第Ⅲ类包括1份藜麦品种(系)，为Z227，该类群株高、重心、穗位高、茎壁厚、抗折力、抗压力、抗穿刺力、弯曲力矩、纤维素含量、倒伏率、茎粗、隶属函数均值相较于第Ⅰ、Ⅱ类群处于较高水平；倒伏指数和木质素含量相较于第Ⅰ、Ⅱ类群处于中等。

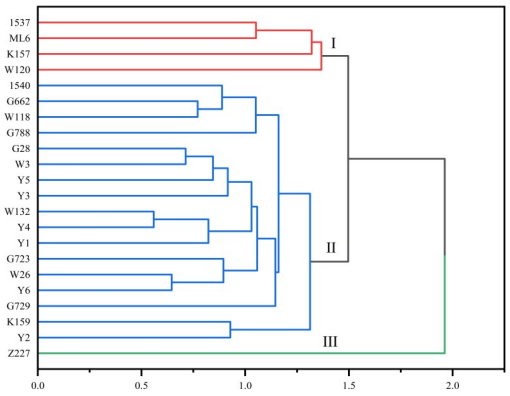


图3　22份藜麦材料系统聚类图

Fig.3　Cluster diagram of 22 quinoa accessions map

2.5　多元线性回归的分析

以灌浆期倒伏指数(Y1)、成熟期倒伏指数(Y2)和倒伏率(Y3)为因变量，以株高(X1)、重心(X2)、穗位高(X3)、茎壁厚(X4)、抗折力(X5)、抗压力(X6)、抗穿刺力(X7)、弯曲力矩(X8)、木质素含量(X9)、纤维素含量(X10)、茎粗(X11)为自变量，构建多元线性回归方程。

$$Y1=269.98-5.67*X1+1.54*X2+0.06*X3+60.88*X4-1.95*X5-0.04*X6-0.76*X7+0.01*X8-2.14*X9+2.87*X10+8.71*X11$$

$$R^2=0.97$$

$$Y2=494.46+0.075*X1-0.201*X2+40.264*X3-0.592*X4-3.024*X5-0.401*X6-2.346*X7+0.011*X8+2.974*X9-2.04*X10+1.362*X11$$

$$R^2=0.90$$

$$Y3=117.123-0.831*X1+0.916*X2-20.707*X3-0.151*X4+0.433*X5-0.230*X6-0.018*X7+0.002*X8-1.123*X9+0.318*X10-3.18*X11$$

$$R^2=0.85$$

各自变量P值见表4。灌浆期时，选取的11个倒伏因子，以Y1为因变量，R^2为0.97，X1对Y1产生显著负向影响($P<0.05$)，X5对Y1产生极显著负向影响($P<0.01$)，X8对Y1产生极显著正向影响($P<0.01$)。成熟期时，选取的11个倒伏因子，以Y2为因变量，R^2为0.90，X5对Y2产生极显著负向影响($P<0.01$)，X8对Y2产生显著正向影响($P<0.05$)；以Y3为因变量，R^2为0.85，X2、X5、X8对Y3产生极显著正向影响($P<0.01$)，X3对Y3产生极显著负向影响($P<0.01$)，X1、X6对Y3产生显著负向影响($P<0.05$)。

表4　倒伏因子与倒伏指数和倒伏率的多元线性回归分析

Table 4　Multiple linear regression analysis of lodging factor, lodging index, and lodging rate

自变量 Independent variable	Y1	Y2	Y3
X1	0.011	0.975	0.049
X2	0.451	0.901	0.004
X3	0.955	0.283	0.004
X4	0.112	0.973	0.956
X5	0.000	0.002	0.004
X6	0.946	0.517	0.035
X7	0.523	0.326	0.961
X8	0.000	0.027	0.004
X9	0.560	0.443	0.085
X10	0.201	0.265	0.270
X11	0.270	0.912	0.122

2.6　隶属函数综合评价分析

根据隶属函数均值对22份藜麦品种(系)进行表型性状的综合评价分析，见表5。22份藜麦品种(系)的隶属函数均值为2.21～1.47，均值越高说明该品种综合表现越好。Z227、K159、Y3、K157、W3值相对较大，排名1～5；1540、Y4、W118、W26、G662值相对较小，排名18～22。倒伏率范围为

18.13%～91.83%,倒伏等级为2～5级。5级倒伏品种(系)有G723、W132、Y2、K159、Y1、Y4、Z227,倒伏率为91.830%～63.280%;4级倒伏品种(系)有G729、W26、Y6、G28,倒伏率为61.743%～51.014%;3级倒伏品种(系)有W118Y3、1537、1540、K157、ML6、G662,倒伏率为45.685%～26.068%;2级倒伏品种(系)有G788、W120、W3,倒伏率为24.610%～18.127%。隶属函数综合评价分析推测Y3、K157、W3、W120、G788为抗倒伏品种(系),Y4、W26可能为易倒伏品种(系)。

表5 22份藜麦品种(系)隶属函数综合评价分析

Table 5 Comprehensive evaluation and analysis of membership function of 22 quinoa varieties (lines)

品种(系) Variety (line)	隶属函数均值 Membership function mean	排名 Ranking	倒伏率/% Lodging rate	倒伏等级 Lodging grade
Z227	2.21	1	63.280	5
K159	2.07	2	82.688	5
Y3	2.02	3	45.320	3
K157	1.96	4	28.304	3
W3	1.93	5	18.127	2
Y2	1.88	6	87.112	5
W120	1.85	7	19.288	2
G788	1.85	8	24.610	2
G28	1.82	9	51.014	4
Y5	1.80	10	51.756	4
ML6	1.77	11	28.189	3
W132	1.77	12	91.398	5
Y1	1.76	13	80.430	5
G729	1.73	14	61.743	4
G723	1.73	15	91.830	5
1537	1.70	16	36.598	3
Y6	1.70	17	52.446	4
1540	1.65	18	29.933	3
Y4	1.62	19	79.946	5
W118	1.56	20	45.685	3
W26	1.51	21	59.812	4
G662	1.47	22	26.068	3

3 讨论

3.1 藜麦参试材料14个性状的遗传多样性

为了进一步明确影响藜麦作物倒伏的内在因素,本研究选用22份藜麦品种(系),在内蒙古自治区呼和浩特市武川县干旱冷凉作物种植区进行种植,对藜麦植株茎秆性状、力学特性、生理特性等方面进行差异性分析。研究结果表明,22份藜麦品种(系)选取的14个性状的变异程度较大,多数指标变异系数为12.39%～42.24%,这与朱丽丽等[33]和王思宇等[34]的研究结果相似,然而个别指标变异系数较大,其中倒伏指数的变化幅度最大,变异系数为81.08%,可能与参试材料的倒伏特性有关。由此得出参试材料在相同的种植条件下,不同品种(系)相同性状之间存在较大差异,具有较为丰富的遗传多样性,有利于评价作物的倒伏特性并从中筛选出具有较好抗倒伏能力的品种。

3.2 藜麦参试材料的抗倒伏特性

方差分析、相关性分析、聚类分析、多元线性回归分析是评估作物遗传多样性和筛选优异种质资源常用的分析方法[35],通过这些方法能够反映作物种质间的遗传差异和相关性状特点,且在作物中已经得到广泛应用。

本试验通过多因素方差分析发现,在品种(系)、生育期、机械强度指标三者交互作用下,三者对藜麦作物倒伏具有极显著的互作效应。由此得出,藜麦作物的生育期不同可影响其机械强度,从而对作物的倒伏特性产生一定的影响。

通过对22份藜麦品种(系)不同时期的表型特征、力学特征、生理指标进行相关性分析,研究发现弯曲力矩在灌浆期和成熟期2个时期与多个指标具有显著或极显著相关关系。勾玲等[36]研究指出,作物茎秆力学性状与茎秆抗倒伏能力高度相关。南铭等[37]研究发现茎壁厚、茎粗和茎秆穿刺强度对燕麦抗倒性影响最大。因此,在藜麦作物品种选育时应选择茎秆机械强度较好的品系进行繁育,可有效提高作物的抗倒伏能力,降低倒伏发生风险,减少作物收获成本。同时,在进行作物倒伏研究时可重点关注弯曲力矩这一指标。

通过聚类分析,对22份藜麦品种(系)的13个茎秆特性指标及隶属函数均值进行分析,可分为3大类。三者均值相互比较发现,第Ⅰ群的9个茎秆特性指标处于中等水平,第Ⅱ类群有11个指标处于较低水平,第Ⅲ类有12个指标处于较高水平,层次数量可清晰地表明藜麦品种(系)的遗传多样性和亲缘关系的远近。3个类群中抗压力、弯曲力矩、倒伏指数和倒伏率存在明显差异。杨晶等[38]研究发现株高、穗长、重心高度、穗位高、基部节长、茎粗、茎粗系数与力学性状是影响燕麦抗倒伏

能力的主要性状。茎秆中木质素的积累,能有效促进茎秆基部的节间伸长,提高细胞壁木质化强度,增大茎秆机械强度增大茎秆抗折力,提高茎秆机械强度和支撑弹性[39]。诸多学者认为,当植株高度过高时,作物的抗倒伏系数降低,产生倒伏,影响产量。抗压力、倒伏指数和倒伏率也可与弯曲力矩一并作为评价藜麦倒伏的重要指标。

多元线性回归分析发现,以倒伏指数和倒伏率为因变量,以11个茎秆特性指标为自变量所得的线性回归方程,R^2均大于0.85,说明本试验选用的11个茎秆特性指标,可以诠释85%以上的倒伏指数和倒伏率变化。同时,结果表明抗折力和弯曲力矩在灌浆期和成熟期均对倒伏指数和倒伏率具有显著影响。另有研究表明,茎粗、秆型指数、抗折力、折断弯矩均可作为评价胡麻抗倒伏性能的指标[40],也与本研究结果相似。根据隶属函数综合评价分析中的隶属函数均值、排名、倒伏率和倒伏等级,初步推测Y3、K157、W3、W120、G788可能为抗倒伏品种(系),Y4、W26可能为易倒伏品种(系);再根据聚类分析结果,K157、W120属于Ⅰ类群,Y4、W26属于第Ⅱ类群,进一步推测K157、W120可能为抗倒伏品种(系),Y4、W26可能为易倒伏品种(系)。后续还需进一步研究,以明确藜麦作物的倒伏机制,提高抗倒伏育种效率。

4　结论

通过对藜麦灌浆期和成熟期的茎秆相关性状进行统计分析,得出以下结论:22份藜麦品种(系)的14个性状变异系数为12.39%~81.08%,说明藜麦不同品种(系)之间具有较为丰富的遗传变异特性,可为藜麦种质资源的筛选提供多元的亲本选择;利用方差分析、聚类分析、多元线性回归分析等分析方法进行数据分析,得出抗压力、弯曲力矩、倒伏指数、倒伏率可作为评价藜麦作物倒伏的关键指标;根据聚类分析及隶属函数综合评价分析的结果,推测K157、W120为抗倒伏品系,Y4、W26为易倒伏品系。

参　考　文　献

[1]任贵兴,杨修仕,么杨.中国藜麦产业现状[J].作物杂志,2015(5):1-5.
Ren G X, Yang X S, Yao Y. Current situation of quinoa industry in China[J]. Crops, 2015(5):1-5.

[2]Vega-Gálvez A, Miranda M, Vergara J, et al. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.), an ancient Andean grain: a review [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(15):2541-2547.

[3]姜丽霞,张智,任军荣,等.冬油菜终花期及灌浆期倒伏对产量及品质的影响[J].中国农学通报,2023,39(30):14-20.
Jiang L X, Zhang Z, Ren J R, et al. Effects of lodging on yield and quality of winter rapeseed at the flowering ending and grain filling stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(30):14-20.

[4]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.
Li S Y, Ma W, Peng J Y, et al. Study on yield loss of summer maize due to lodging at the big flare stage and grain filling stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(19):3952-3964.

[5]Wang N, Wang F X, Shock C, et al. Optimizing quinoa height to counter stem lodging risks in the three main production regions of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 323:109084.

[6]任高峰,吴宇平,李海平.不同时期倒伏对油菜经济性状及产量的影响[J].作物研究,2019,33(4):271-273.
Ren G F, Wu Y P, Li H P. Effects of lodging at different stages on economic characters and yield of rape [J]. Crop Research, 2019, 33(4):271-273.

[7]李宏,陈卫国,杨进文,等.不同施肥方式对小麦倒伏性状的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(5):35-42.
Li H, Chen W G, Yang J W, et al. Effects of different fertilization methods on lodging characters of wheat [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 41(5):35-42.

[8]王树林,王国平,王燕,等.麦棉套作模式下差量播种对小麦抗倒性能及产量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2017,37(12):837-840,848.
Wang S L, Wang G P, Wang Y, et al. Effects of differential seeding rate on lodging-resistant traits and yield components of wheat under wheat-cotton intercropping system [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 37(12):837-840,848.

[9]朱文雪,杨立达,漆信同,等.植物生长调节剂对大豆-玉米带状间作农艺性状及产量的影响[J].四川农业大学学报,2023,41(5):773-780,800.
Zhu W X, Yang L D, Qi X T, et al. Effects of plant growth regulators on agronomic traits and yield of soybean-maize strip intercropping [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(5):773-780,800.

[10]董秀春,卢家文,黄玲,等.鲁西南不同小麦品种的抗倒性与产量差异研究[J].中国农技推广,2019,35(11):36-39.
Dong X C, Lu J W, Huang L, et al. Study on lodging resistance and yield difference of different wheat varieties in southwest Shandong Province [J]. China Agricultural Technology Extension, 2019, 35(11):36-39.

[11]张永平,潘佳楠,郭占斌,等.不同种植密度对藜麦群体抗倒伏性能及产量的影响[J].华北农学报,2021,36(4):108-115.
Zhang Y P, Pan J N, Guo Z B, et al. The effect of different planting densities on lodging-resistant properties and yield of quinoa [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(4):108-115.

[12]文廷刚,王伟中,杨文飞,等.水稻茎秆形态特征与抗倒伏能力对外源植物生长调节剂的响应差异[J].南方农业学报,2020,51(1):48-55.

Wen T G, Wang W Z, Yang W F, et al. Morphological characteristics and lodging resistance of rice stems and its response to exogenous plant growth regulators[J]. Journal of Southern Agriculture ,2020,51(1):48-55.

[13]胡昊,李莎莎,华慧,等.不同小麦品种主茎茎秆形态结构特征及其与倒伏的关系[J].麦类作物学报,2017,37(10):1343-1348.
Hu H, Li S S, Hua H, et al. Research on stalk morphological structure characteristics and its relationship between with the lodging of different wheat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops,2017,37(10):1343-1348.

[14]Wang N, Wang F X, Shock C C, et al. Evaluating quinoa stem lodging susceptibility by a mathematical model and the finite element method under different agronomic practices[J]. Field Crops Research,2021, 271:108241.

[15]张培文,闫素辉,张从宇,等.沿淮地区小麦茎秆抗倒伏能力与基部节间性状的关系[J].江汉大学学报(自然科学版),2022,50(5):41-49.
Zhang P W, Yan S H, Zhang C Y, et al. Relationship between stem lodging resistance and basal internode traits of wheat along Huaihe River[J]. Journal of Jianghan University(Natural Science Edition),2022,50(5):41-49.

[16]汪灿,阮仁武,袁晓辉,等.荞麦茎秆解剖结构和木质素代谢及其与抗倒性的关系[J].作物学报,2014,40(10):1846-1856.
Wang C, Ruan R W, Yuan X H, et al. Relationship of anatomical structure and lignin metabolism with lodging resistance of culm in buckwheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014,40(10):1846-1856.

[17]胡伟,梁国玲,刘凯强,等.青藏高原9个燕麦品种抗倒伏能力及其影响因素研究[J].草地学报,2023,31(6):1788-1797.
Hu W, Liang G L, Liu K Q, et al. Study on lodging resistance and its influencing factors of 9 oat varieties in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica,2023,31(6):1788-1797.

[18]梁国玲,张永超,贾志锋,等.高寒区不同燕麦品种(系)表型性状和茎秆力学特征与抗倒伏性的关系研究[J].草业学报,2019,28(4):58-69.
Liang G L, Zhang Y C, Jia Z F, et al. A study of the relationship between phenotypic traits, stem mechanical traits and lodging resistance of oat varieties for alpine regions[J]. Acta Prataculturae Sinica,2019,28(4):58-69.

[19]Huang J L, Yang Y H, Zhou F, et al. Biomechanical stability variation of rice stem during maturation and wilting[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2023,45:74.

[20]Khaitov B, Karimov A A, Toderich K, et al. Adaptation, grain yield and nutritional characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa*)genotypes in marginal environments of the Aral Sea Basin [J].Journal of Plant Nutrition,2021,44(9):1365-1379.

[21]陈秋静,杨招娣,王仕玉,等.植物生长延缓剂对藜麦抗倒伏能力及产量的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(11):42-48.
Chen Q J, Yang Z D, Wang S Y, et al. Effects of plant growth retarders on lodging resistance and yield of quinoa[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2023,25(11):42-48.

[22]赵玺,王致和,张亚萍,等.钾肥施用量对贫瘠地藜麦产量、蛋白质及倒伏率的影响[J].中国农学通报,2023,39(24):31-37.
Zhao X, Wang Z H, Zhang Y P, et al. Effects of potassium fertilizer application rate on yield, protein content and lodging resistance of quinoa in barren land[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2023,39(24):31-37.

[23]李浩川,张朝林,曲彦志,等.玉米抗倒伏相关性状的遗传特性研究[J].河南农业大学学报,2019,53(1):15-21.
Li H C, Zhang C L, Qu Y Z, et al. Study on the genetic characteristic of the traits related to lodging resistance in maize [J]. Journal of Henan Agricultural University ,2019,53(1):15-21.

[24]王聪,马青美,郭新梅,等.玉米茎秆抗倒伏相关性状的遗传效应分析[J].玉米科学,2021,29(4):9-17.
Wang C, Ma Q M, Guo X M, et al. Genetic effects analysis of stem lodging resistance traits in maize[J]. Journal of Maize Sciences,2021,29(4):9-17.

[25]Wang S, Li H G, Dong Z Y, et al. Genetic structure and molecular mechanism underlying the stalk lodging traits in maize (*Zea mays* L.)[J]. Computational and Structural Biotechnology Journal,2022,21:485-494.

[26]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.

[27]钱甫,张占琴,陈树宾,等.玉米株高和穗位高的全基因组关联分析[J].玉米科学,2024,32(1):65-73,81.
Qian F, Zhang Z Q, Chen S B, et al. Genome wide association analysis of plant height and ear height in maize[J]. Journal of Maize Sciences,2024,32(1):65-73,81.

[28]王涛,陈国栋,冯佰利,等.糜子种质资源在榆林地区的适应性评价及相关农艺性状分析[J].种子,2021,40(11):61-67.
Wang T, Chen G D, Feng B L, et al. Adaptability evaluation and agronomic traits analysis of proso millet germplasm resources in Yulin Area[J].Seed,2021,40(11):61-67.

[29]李国辉,钟旭华,田卡,等.施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理[J].中国农业科学,2013,46(7):1323-1334.
Li G H, Zhong X H, Tian K, et al. Effect of nitrogen application on stem lodging resistance of rice and its morphological and mechanical mechanisms [J]. Scientia Agricultura Sinica,2013,46(7):1323-1334.

[30]卢昆丽,尹燕枰,王振林,等.施氮期对小麦茎秆木质素合成的影响及其抗倒伏生理机制[J].作物学报,2014,40(9):1686-1694.
Lu K L, Yin Y P, Wang Z L, et al. Effect of nitrogen fertilization timing on lignin synthesis of stem and physiological mechanism of lodging resistance in wheat [J]. Acta Agronomica Sinica,2014,40(9):1686-1694.

[31]马晓君,路明远,邢春景,等.群体密度对夏玉米穗下茎秆性状及抗倒伏力学特性的影响[J].玉米科学,2018,26(4):118-125.
Ma X J, Lu M Y, Xing C J, et al. Effects of planting density on stalk and lodging-resistance in summer maize[J]. Journal of Maize Sciences,2018,26(4):118-125.

[32]王凯,赵小红,姚晓华,等.茎秆特性和木质素合成与青稞抗倒伏关系[J].作物学报,2019,45(4):621-627.
Wang K, Zhao X H, Yao X H, et al. Relationship of stem characteristics and lignin synthesis with lodging resistance of hulless barley[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(4):

621-627.
[33]朱丽丽,张发玉,安宁,等.116份藜麦种质资源萌发期抗旱性综合评价[J].干旱地区农业研究,2024,42(1):23-31.
Zhu L L,Zhang F Y,An N,et al.Comprehensive evaluation of drought resistance of 116 quinoa germplasm resources during germination[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2024,42(1):23-31.
[34]王思宇,左文博,朱凯莉,等.71份藜麦品种资源的农艺性状及营养品质分析与评价[J].作物杂志,2022(3):63-72.
Wang S Y,Zuo W B,Zhu K L,et al. Analysis and evaluation of agronomic characteristics and nutritional qualities of 71 quinoa accessions[J]. Crops,2022(3):63-72.
[35]张婷,王雪艳,郭勤卫,等.基于农艺性状的辣椒种质资源遗传多样性[J].浙江农业学报,2024,36(2):325-333.
Zhang T, Wang X Y, Guo Q W, et al. Genetic diversity of pepper germplasm resources based on agronomic traits [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2024,36(2):325-333.
[36]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.
[37]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[J].草业学报,2022,31(11):172-180.
Nan M,Li J,Zhao G Q,et al. Relationship between lodging resistance of oats and the basal internode stem characteristics and lignin synthesis [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(11):172-180.
[38]杨晶,刘文辉,梁国玲,等.高寒地区不同燕麦品系抗倒伏相关性状分析[J].草业学报,2020,29(12):50-60.
Yang J, Liu W H, Liang G L, et al. Traits correlated with lodging resistance of oat strains in the alpine region [J]. Acta Prataculturae Sinica,2020,29(12):50-60.
[39]刘玄,董宏伟,高玉红,等.不同供钾水平下胡麻木质素代谢及其抗倒伏特性研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(5):821-832.
Liu X, Dong H W, Gao Y H, et al. Lignin metabolism and lodging resistance characteristics of oil flax at different potassium levels[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2021,29(5):821-832.
[40]吴瑞香,杨建春,王利琴,等.胡麻品种(系)茎秆形态特征与抗倒伏的相关性分析[J].山西农业科学,2022,50(1):33-40.
Wu R X,Yang J C,Wang L Q,et al. Correlation analysis of stem morphological characteristics and lodging resistance of flax cultivars (lines) [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2022,50(1):33-40.

Evaluation of stem traits in quinoa germplasm resources

Zhang Yongkang[1], Wang Shuyan[1*], Zhang Jinhao[1], Li Jiana[1], Xing Luhong[1], Liu Ruixiang[2], Guo Zhanbin[3]

(*1.College of Agricultural, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2.College of Desert Control Engineering Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China; 3.Inner Mongolia Yiji Biotechnology Co. LTD, Hohhot 010011, China*)

Abstract:[Objective]Quinoa seeds are known for their high nutritional quality as whole grains, but lodging, the bending over of stems, is a significant factor restricting quinoa yield. Understanding the lodging resistance characteristics of quinoa stems is beneficial for screening the varieties (lines) with different lodging abilities, providing theoretical basis for breeding, identification, evaluation, and innovation in quinoa lodging-resistant quinoa. [Methods]In this study, 22 quinoa varieties (lines) were selected based on plant height, grain size, lodging characteristics, and growth period duration. Sixteen indicators, including growth period, stem phenotypic traits, stem mechanical strength, and physiological characteristics, were measured and analyzed. [Results]The 22 quinoa varieties (lines) showed a high degree of genetic variation. The coefficients of variation for 14 traits ranged from 12.39% to 81.08%, with the highest variation in the lodging index and the lowest in cellulose content. Multifactor variance analysis revealed significant correlations between crop lodging characteristics and varieties (lines), growth period, and mechanical strength indicators. Correlation analysis showed significant or highly significant relationships between bending moment, lodging index, and stem phenotypic traits and mechanical strength indicators. Cluster analysis based on 13 stem trait indicators and membership function means divided the 22 quinoa varieties (lines)into three groups: Group Ⅰ (lodging- resistant), and Group Ⅱ and Ⅲ (prone to lodging). Multiple linear regression analysis showed that 11 stem trait indicators had regression coefficients with lodging index and lodging rate, with R2 value greater than 0.85. The membership function means for the 22 quinoa varieties (lines) ranged from 2.21 to 1.47, lodging rate ranged from 18.13% to 91.83%, and lodging grade ranged from 2 to 5. [Conclusion]The 22 quinoa varieties (lines)exhibited rich genetic diversity ofin agronomic traits of 22 quinoa varieties (lines) was rich,, which could provide reference for the creation of quinoa germplasm resources. The Llodging index and bending moment play an important role infor evaluating crop lodging ability evaluation. Comprehensive analysis suggested that K157 and W120 were lodging -resistant strains, while Y4 and W26 may be prone to lodging.

Keywords:Lodging resistance, Stem traits, Lodging index, Bending moment (编辑:郭玥微)