

砂质脱潮土区不同冬小麦品种(系)抗倒伏特性研究

黄玲¹, 杨文平¹, 梅沛沛¹, 焦爽², 徐丽娜¹, 张志勇¹, 欧行奇¹, 姚素梅^{1*}

(1.河南科技学院 生命科技学院/现代生物育种河南省协同创新中心,

河南 新乡 453003; 2.新乡市土壤肥料工作站, 河南 新乡 453003)

摘要:【目的】研究河南省砂质脱潮土区冬小麦的抗倒伏性能。【方法】以河南省砂质脱潮土区种植的13个不同冬小麦品种(系)为研究对象, 分析灌浆中期冬小麦农艺性状、茎秆物质特性和力学特性与抗倒性能的关系, 并对与小麦抗倒指数相关的9个性状进行相关、聚类分析和主成分分析。【结果】灌浆中期的株高和重心高度不是冬小麦品种(系)倒伏的决定因素。不同冬小麦品种(系)的基部第二节间的机械强度和抗倒指数与第二节间长度在一定范围内负相关, 但相关性不显著; 与株高构成指数和基二/株高极显著和显著负相关; 与茎粗、茎壁厚度和厚径比显著和极显著正相关。聚类分析中类群I通过降低株高和优化基部第二节间来改善抗倒性能。类群II通过基部第二节间特性优化来改善抗倒性能, 类群III通过降低株高和提高茎秆机械强度来降低倒伏。主成分分析得到的3个主成分因子对抗倒性状变异累计贡献率为83.72%。主成分因子Y1反映茎秆指标变异的48.11%, 其中茎壁厚度和厚径比、机械强度是决定Y1的主要因素。【结论】抗倒指数是由多因素决定的综合性状, 基二/株高、茎壁厚度和茎粗和厚径比可以作为评价抗倒指数的指标选项。就砂质脱潮土区提高小麦抗倒育种对策而言, 除茎秆的机械强度外, 注重基部第二节间长度占株高的比例和茎壁厚度与茎粗的比例同样重要。

关键词: 冬小麦品种(系); 砂质土; 茎秆特性; 机械强度; 抗倒指数

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2020420

OSID:



黄玲, 杨文平, 梅沛沛, 等. 砂质脱潮土区不同冬小麦品种(系)抗倒伏特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 31-39.

HUANG Ling, YANG Wenping, MEI Peipei, et al. Lodging Resistance of Different Winter Wheat Lines in a Sandy Fluvo-aquic Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 31-39.

0 引言

【研究意义】倒伏已经成为制约小麦高产、稳产和优质的重要因素之一^[1-2]。小麦倒伏主要分为茎秆倒伏和根系倒伏, 其中以茎秆倒伏较为普遍, 在小麦生育中后期, 随着植株贮藏物质向穗部转运增加, 穗质量增加, 茎秆质量逐渐降低, 难以负荷基部以上质量, 导致茎秆弯曲或折断而发生倒伏^[3]。茎秆质量较好的品种在生育后期能表现出较强的抗倒伏特性^[4]。研究不同生态环境下冬小麦品种的抗倒特性差异对提高小麦抗倒育种具有重要意义。【研究进展】茎秆基部第二节特性对茎秆抗倒性的直接作用最大, 其中茎秆基部第二节的机械强度与抗倒性能密切相关, 当基部节间机械强度增大时, 其抗倒性相应增强^[5-6]。

因此研究多用基部第二节间的茎秆机械强度(抗折力)、抗倒伏指数和倒伏指数来评价和衡量小麦的倒伏性能^[3,6-8]。Baker等^[9]认为影响倒伏的参数分为内因(品种遗传如形态特征等)和外因(如风力、风速、雨量和雨滴冲击力等), 内因和外因的综合作用决定抗倒伏特性。内因是决定倒伏的主要因子, 不同作物品种的遗传特性及适应性差异导致品种抗倒特性有差异。品种、种植密度、水肥条件等栽培生态环境因素通过影响内因的参数来影响作物的抗倒特性^[9-10]。作物茎秆抗倒伏性能是由多因素决定的综合指标, 这些因素的优化组合是提高作物抗倒伏能力的关键。抗倒伏指数与株高和重心高度呈显著遗传负相关关系, 缩短小麦基部节间长度, 适当降低株高可相应降低植株的重心高度, 株高和重心较低的品种抗倒性较强^[11-14]。适当增加苦荞株高、重心高度, 会有利于提高子叶节间穿刺强度^[6]。除了株高和重心高度外, 禾谷类作物茎秆的抗倒伏能力与茎秆的节间数、质量密度、茎秆外径、壁厚和充实度等指标也密切相关^[8,15]。

【切入点】砂质脱潮土是河南省分布的重要耕作

收稿日期: 2020-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509085); 河南省科技攻关项目(202102110165); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(21IRTSTHN023); 高等教育专项(105020220008)

作者简介: 黄玲(1976-), 女, 讲师, 主要从事作物水分养分高效利用研究。E-mail: hling0801@hist.edu.cn

通信作者: 姚素梅(1974-), 女, 教授, 主要从事作物水分养分高效利用研究。E-mail: smyao@126.com

土壤,质地粗,细砂粒(0.2~0.02 mm)占优势,由于缺乏黏粒与有机质,土壤吸附能力低,各种养分均缺乏^[16]。前人对小麦茎秆倒伏的研究多集中在高产栽培条件下的品种、施肥和种植密度等因素^[13,17-18],而对砂质土壤条件下冬小麦品种抗倒特性研究报道尚不多见。

【拟解决的关键问题】采用田间试验方法,对砂质脱潮土区不同冬小麦品种(系)形态特性、物质特性和力学特性的差异以及与抗倒指数的关系进行研究,旨在为砂质土区中低肥力条件下冬小麦品种(系)栽培和抗倒育种目标提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2013年10月—2014年6月在河南省新乡市新乡县朗公庙镇南于店村(35°12'N, 113°56'E)进行,2013年10月—2014年6月小麦生长季有效降雨132.2 mm。该地土壤质地为砂质脱潮土,0~20 cm耕层有机质为8.8 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾量分别为65.3、15.5和53.4 mg/kg;20~40 cm土层有机质为3.1 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾量分别为20.4、4.5和40.5 mg/kg,耕层有机质属于全国养分分级标准五级,碱解氮和速效钾属于四级,速效磷属于三级,综合属于低肥力土壤。

1.2 试验材料

试验材料为冬小麦13个品种(系):周麦18(ZM18)、周麦22(ZM22)、矮抗58(AK58)、百农207(BN207)、华育198(HY198)、百农201(BN201)、众麦1号(ZM1)、冠麦1号(GM1)、百早207(BH207)、周麦26(ZM26)、中麦895(ZM895),13-70和10-8,采取单因素随机区组设计,每个小区面积为10 m²(5 m×2 m),每个品种(系)重复3次,冬小麦于2013年10月11日播种,播量150 kg/hm²,于2014年6月初收获。各处理之间设保护行,播前施复合肥(N、P、K质量比为20:15:5)450 kg/hm²为基肥,拔节期追施尿素150 kg/hm²,小区的灌水及田间管理措施同当地麦田一致,除越冬水外,分别在拔节期、抽穗期和灌浆初期灌水,每次灌水为900 m³/hm²,采取分次灌溉方式,灌溉总量一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株形态指标

灌浆中期每个处理随机选取10根主茎测定冬小麦的农艺特性:株高、重心高度;基部第二节间的长度、茎粗、茎壁厚度、株高构成指数、基部第二节间的株高构成指数等指标。

重心高度(cm):将茎秆(齐地剪去地上部分)

放在固定支点上保持平衡,测量平衡支点至茎秆基部节间末端的长度(带穗、叶和鞘)。

节间直径(mm):用游标卡尺(0.01 mm)测量茎秆基部第二节间1/2处直径。

株高构成指数=(穗下节长度+穗下第二节长度)/株高×100%;重心/株高=重心高度/株高×100%;基部第二节间的株高构成指数=基部第二节间长度/基部第一、二节间长度之和×100%;基二/株高=基部第二节间长度/株高×100%;厚径比=茎壁厚度/茎粗×100%。

1.3.2 茎秆干物质特性

灌浆中期每个处理取10根主茎测定鲜质量和干质量(g)。剪下基部第二节间,用百分之一天平称其鲜质量(g)。105℃下杀青30 min、80℃烘至恒质量后,用万分之一天平称量干质量(g);测定基部第二节间内外直径、节间长度,计算节间体积(中空圆柱体)、节间鲜密度、干密度和充实度。

鲜密度(g/cm³)=节间鲜质量/节间体积;干密度(g/cm³)=节间干质量/节间体积;充实度(mg/cm)=节间干质量/节间长度^[5]。

1.3.3 茎秆力学特性

茎秆抗折力(机械强度)测定:采用自制的测定机械强度的简单器材,取测定形态指标的植株基部第二节间去叶鞘,置于高50 cm、间隔5 cm的支撑木架凹槽测定器上,使节间中点与测定器中点对应,在中点挂托盘,向托盘内匀速倒入细砂,至茎秆折断时停止,称取托盘和细砂质量,即为该节间的机械强度g(抗折力)^[19]。抗倒指数(CLRI)=节间机械强度(g)/重心高度(cm)^[14]

1.4 数据处理

用Excel2016进行数据处理,采用欧氏距离的离差平方和法,用DPS17.5统计分析软件进行方差分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 形态指标特性

不同冬小麦品种(系)株高、重心高度、穗长、基第二节长和茎壁厚度存在显著差异(表1),经F值检测分析,除茎粗外其余各指标均达到极显著差异水平(P<0.01)。小麦品种(系)不同性状指标均表现出一定的变异性,各性状变异系数范围为6.09%~19.57%,后者为前者的3.21倍,变异系数呈茎壁厚度>基部第二节间长>茎粗>穗长>株高>重心高度的趋势,其中变异系数最小的是重心高度(6.09%),茎壁厚度(19.57%)变异系数最大。

10-8、百早207、百农207、众麦1号和周麦22株高在70.6~74.6 cm,比矮抗58和13-70高

9.41%~28.03%；百旱 207 重心高度比矮抗 58 增加 18.97%；周麦 22 和众麦 1 号穗长最长，较矮抗 58 和中麦 895 增加 29.95%~35.90%；矮抗 58 基部第二节间最长，为 6.5 cm，比 10-8 和周麦 18 增加 45.52%；百旱 207 茎粗最粗，较百农 201 高 32.53%；冠麦 1 号较百农 201、13-70 和周麦 18 茎壁厚度增加 46.43%~86.36%。

表 1 不同冬小麦品种（系）形态指标的差异

Table 1 Differences on morphological characters of different winter wheat cultivars (lines)

品种	株高/cm	重心高度/cm	穗长/cm	基二节长/cm	茎粗/mm	茎壁厚度/mm
10-8	74.6±1.7a	41.9±0.7def	7.1±0.1f	4.5±0.5e	4.14±0.5abcd	0.49±0.07ab
13-70	64.5±1.4e	42.5±0.8cdef	7.6±0.2cde	5.0±0.2cde	4.23±0.6abcd	0.33±0.04de
AK58	58.3±1.1f	40.2±0.9f	6.5±0.2g	6.5±0.5a	4.07±0.4bcd	0.40±0.05bcd
BH207	73.6±1.8a	47.9±1.6a	7.5±0.3def	5.6±0.7bcd	4.75±0.3a	0.47±0.05abc
BN201	67.8±1.0d	44.8±1.9abcd	7.9±0.4cd	5.2±0.2cde	3.59±0.3d	0.29±0.06e
BN207	70.6±1.4a	43.9±1.3bcde	8.1±0.2bc	4.9±0.4cde	4.57±0.2ab	0.49±0.06ab
GM1	69.8±0.8bc	44.7±3.7abcd	7.4±0.4def	5.1±0.2cde	4.15±0.2abcd	0.55±0.12a
HY198	70.5±1.7bc	42.8±2.0cdef	7.2±0.4ef	5.4±1.1bcd	4.21±0.4abcd	0.41±0.01bcd
ZM895	70.3±1.4bc	45.7±2.3ab	6.6±0.5g	4.8±0.2de	4.37±0.3abc	0.47±0.02abc
ZM1	73.4±0.6a	45.4±2.9abc	8.5±0.7ab	6.1±0.7ab	3.69±0.3d	0.40±0.01bcd
ZM18	70.7±1.7bc	40.9±0.6ef	7.5±0.2ef	4.5±0.3e	3.73±0.5cd	0.37±0.02cde
ZM22	72.5±0.9ab	45.6±1.9abc	8.8±0.1a	5.0±0.2cde	3.96±0.2bcd	0.43±0.06bc
ZM26	69.0±1.2cd	42.4±1.8cdef	7.4±0.3def	5.8±0.6abc	4.19±0.5abcd	0.46±0.08abc
平均值	69.7	43.76	7.53	5.26	4.13	0.43
标准差	4.4	2.7	0.7	0.7	0.45	0.08
变异系数	6.27	6.09	9.44	13.74	11.01	19.57
F	28.60**	3.78**	13.94**	3.96**	2.11	4.39**

注 同列数据后不同小写字母不同表示不同品种间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

表 2 不同冬小麦品种（系）形态指标构成指数

Table 2 Differences on morphological characters indexes of different winter wheat cultivars (lines)

品种	株高构成指数/%	基二构成株高指数/%	重心高度/株高/%	基二/株高/%	厚径比/%
10-8	61.7±0.9e	59.5±3.2a	56.2±0.5f	5.98±0.5e	11.74±0.44ab
13-70	63.1±1.2de	53.6±2.4abcd	65.9±0.2ab	7.81±0.5bc	7.74±0.29e
AK58	70.2±2.3a	57.8±1.2ab	69.0±0.7a	11.16±0.9a	9.74±0.64cd
BH207	62.0±0.9de	55.0±1.1abcd	65.1±1.3bc	7.63±1.1bc	9.88±0.65c
BN201	62.0±1.0e	54.2±1.9abcd	66.1±1.5ab	7.67±0.1bc	8.13±0.90de
BN207	66.9±1.2bc	59.0±4.6a	62.2±1.0cd	7.00±0.7cde	10.77±0.68bc
GM1	63.5±0.2de	50.6±5.2cd	64.1±4.5bcd	7.26±0.3bcd	13.12±2.54a
HY198	64.2±2.4cde	56.4±9.4abc	60.8±1.8de	7.69±1.4bc	9.80±0.80c
ZM895	67.3±1.1b	51.9±2.8bcd	65.0±2.1bc	6.83±0.3cde	10.70±0.25bc
ZM1	57.3±0.8f	49.0±3.0d	61.9±3.4cd	8.31±0.9b	10.80±0.73bc
ZM18	64.8±2.1bcd	53.3±abcd	57.9±0.6ef	6.32±0.3de	10.10±1.18c
ZM22	61.84±2.3e	53.2±1.3abcd	63.0±2.0bcd	6.90±0.3cde	10.2±0.80bc
ZM26	58.2±2.5f	48.7±4.1d	61.4±2.1d	8.36±0.8b	11.01±0.62bc
平均值	63.32	54.02	62.96	7.60	10.34
标准差	3.70	4.70	3.80	1.40	1.58
变异系数	5.83	8.70	6.03	18.10	15.32
F	13.07**	2.33*	8.45**	8.94**	6.32**

不同冬小麦品种（系）形态指标构成指数存在显著差异（表 2）。各形态指标构成指数变异系数范围为 5.83%~18.10%，后者为前者的 3.10 倍，变异系数呈基二/株高>厚径比>基二株高构成指数>重心高度/株高>株高构成指数的趋势，其中株高构成指数变异系数最小（5.83%），基二/株高变异系数最大（18.10%）。

矮抗 58 的株高构成指数、重心高度和基部第二节间长占株高比例均最大，分别较其他品种（系）增加 4.33%~22.44%、33.52%~86.57%和 6.13%~22.92%。10-8 和百农 207 基部第二节间的株高构成指数最高，比冠麦 1 号、中麦 895、众麦 1 号和周麦 26 高 13.71%~22.14%。13-70 和百农 201 的茎厚/占茎粗比例

相对最低, 比冠麦 1 号和 10-8 降低 30.71%~41.02%。

2.2 茎秆物质特性

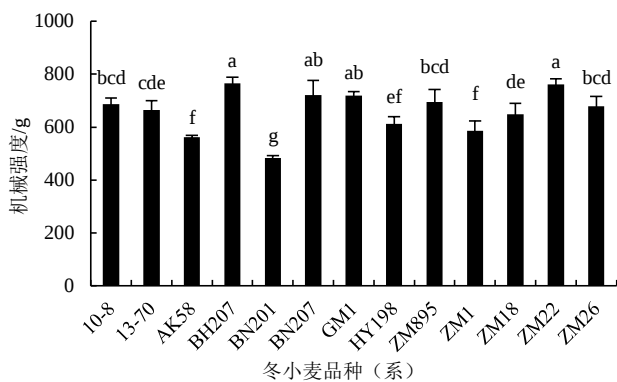
不同冬小麦品种(系)的基部第二节间的鲜质量、干质量、鲜密度、干密度和充实度存在显著差异(表 3)。小麦品种(系)的茎秆物质特性指标变异系数较大, 各性状变异系数范围为 22.0%~33.15%, 后者为前者的 1.51 倍, 变异系数呈干密度>充实度>鲜密度>干质量>鲜质量的趋势, 其中鲜质量的变异系数最小(22.0%); 干密度变异系数最大(33.15%)。基部第二节间的鲜质量范围为 0.34~0.56 g, 百早 207、矮抗 58 和中麦 895 鲜质量相对最高, 比周麦 18 和周麦

26 高 54.74%~75.79%; 基部第二节间干质量范围为 0.107~0.170 g, 百早 207、10-8 和矮抗 58 干质量相对最大, 比百农 207、冠麦 1 号、众麦 1 号和周麦 26 高 46.43%~86.36%。基二节的鲜密度和干密度范围为 1.26~2.30 g/cm³ 和 0.316~0.794 g/cm³, 13-70 和百农 201 的鲜密度相对较高, 较其他品种增加 37.22%~106.81%; 百农 201、周麦 18、10-8 和 13-70 的干密度较其他品种(系)增加 45.59%~151.47%。不同冬小麦品种(系)充实度在 13.97~37.67 mg/cm 之间变化, 其中以 10-8 表现最高, 百早 207、中麦 895、周麦 18 充实度均在 27.6 mg/cm 以上。

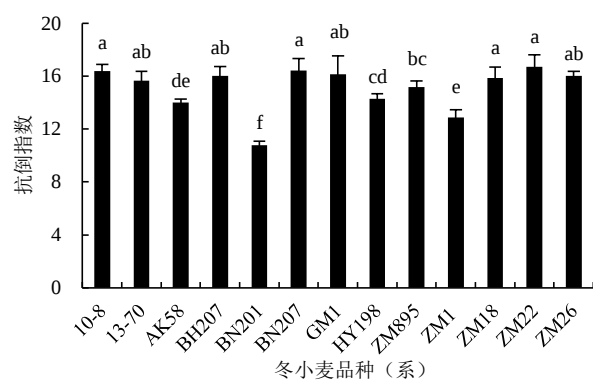
表 3 不同冬小麦品种(系)第二节茎秆密度、充实度差异

Table 3 Difference on stem density, filling degree of different winter wheat varieties (lines)

品种	鲜质量/g	干质量/g	鲜密度/(g cm ⁻³)	干密度/(g cm ⁻³)	充实度/(mg cm ⁻¹)
10-8	0.347±0.06de	0.167±0.038ab	1.40±0.06bcd	0.668±0.02abc	37.67±9.9a
13-70	0.433±0.04bcd	0.123±0.006cd	2.21±0.49a	0.632±0.15abc	24.50±0.1bc
AK58	0.470±0.10abc	0.157±0.025abc	1.58±0.12bcd	0.530±0.06bcde	24.00±2.1bcd
BH207	0.557±0.03a	0.170±0.010a	1.59±0.21bcd	0.488±0.08cdef	30.77±5.3ab
BN201	0.363±0.09de	0.127±0.038bcd	2.30±0.29a	0.794±0.07a	24.24±6.4bcd
BN207	0.370±0.04cde	0.110±0.010de	1.20±0.13d	0.356±0.03ef	22.43±3.2bcd
GM1	0.343±0.05de	0.107±0.015de	1.11±0.11d	0.346±0.04ef	21.06±3.0bcd
HY198	0.373±0.06cde	0.117±0.038cde	1.54±0.77bcd	0.500±0.34bcdef	23.08±2.4bcd
ZM895	0.490±0.09ab	0.137±0.038abcd	1.78±0.23abc	0.496±0.11cdef	28.71±4.1ab
ZM1	0.397±0.06bcde	0.107±0.015de	1.61±0.32bcd	0.434±0.09def	17.80±4.3cd
ZM18	0.317±0.03e	0.123±0.025cd	1.82±0.18ab	0.700±0.07ab	27.63±5.6abc
ZM22	0.367±0.01cde	0.117±0.006cde	1.56±0.2bcd	0.496±0.08cdef	23.33±0.6bcd
ZM26	0.320±0.09e	0.080±0.001e	1.26±0.32cd	0.316±0.01f	13.97±1.5d
平均值	0.40	0.126	1.612	0.52	24.55
标准差	0.09	0.030	0.44	0.17	7.63
变异系数	22.0	25.5	27.03	33.15	31.06
<i>F</i>	3.92**	3.41**	3.44**	4.27**	2.74*



(a) 机械强度



(b) 抗倒指数

图 1 不同冬小麦品种(系)机械强度和抗倒指数

Fig.1 MS and CLRI of different winter wheat varieties (lines)

2.3 茎秆力学特性和抗倒指数

不同冬小麦品种(系)的机械强度和抗倒指数表现出一定的变异性(图 1, 图中不同小写字母表示不

同品种间差异), 经 *F* 值检测分析, 各指标均达到极显著差异水平($P<0.01$)。机械强度和抗倒指数变异系数分别为 12.72%和 11.69%。冬小麦品种(系)茎

秆机械强度变化范围为 482~766 g，百早 207、百农 207、冠麦 1 号和周麦 22 的机械强度较矮抗 58、百农 201、华育 198、众麦 1 号和周麦 18 高 54.74%~75.79%，且差异显著。茎秆抗倒伏指数的范围为 10.77~16.72，百农 201 的抗倒伏指数最低，较其他品种降低 19.74%~55.29%。

2.4 抗倒伏性状与茎秆倒伏指数的相关性

由茎秆机械强度和抗倒指数与各性状的相关分析可知（表 4），在灌浆中期小麦基部第二节间机械强度与株高、重心高度、茎壁厚度和茎粗达极显著正相关关系，相关系数分别为 0.470、0.370、0.569 和 0.480；与厚径比显著正相关，相关系数为 0.404。而与基部第二节间长度与株高比例呈极显著负相关关

系，相关系数为-0.400；与第二节间鲜密度和干密度呈显著负相关关系，相关系数分别为-0.389 和-0.384。表明灌浆期间，一定范围内的株高、重心高度、基部第二节间茎壁厚度、茎粗和厚径比增加会提高茎秆的机械强度；而基部第二节间长度占株高比例较大、基二鲜密度和干密度增加会降低茎秆的机械强度。小麦抗倒指数与茎壁厚度和机械强度呈极显著正相关关系，相关系数分别为 0.476 和 0.881；与茎粗、厚径比呈显著正相关关系，相关系数为 0.344 和 0.386。而与基部第二节间长度与株高比例、鲜密度呈显著负相关关系，相关系数为-0.327 和-0.376。机械强度、茎壁厚度、厚径比和茎粗增加会提高抗倒指数，基二占株高比例增加、鲜密度和干密度的增加会降低茎秆的抗倒指数。

表 4 形态指标与机械强度和抗倒指数的相关性

Table 4 Correlation analysis on MS and CLRI with morphologic parameters

指标	株高/cm	重心高度/cm	基二/株高	茎壁厚度/mm	茎粗/mm	厚径比	鲜密度/(g cm ⁻³)	干密度/(g cm ⁻³)	机械强度/g
机械强度	0.470**	0.370**	-0.400**	0.569**	0.480**	0.404*	-0.389*	-0.384*	
抗倒指数	0.247	-0.111	-0.327*	0.476**	0.344*	0.386*	-0.376*	-0.277	0.881**

注 *和**表示相关性在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著。

2.5 抗倒伏特性的聚类分析

以与小麦倒伏特性关系密切的株高、重心高度、基二/株高、茎壁厚度、茎粗、内壁外径、鲜密度、干密度、机械强度和抗倒指数 10 个指标，进行标准化处理后采用离差平方和法对 13 个小麦品种（系）进行系统聚类分析。由图 2 可知，在欧氏距离为=5.5，小麦品种（系）可划分为 3 个类群。类群 I 包含 13-70、百农 201 和矮抗 58，类群 II 包含冠麦 1 号、周麦 26、百农 207、中麦 895、百早 207、周麦 22、众麦 1 号和华育 198，类群 III 包含 10-8 和周麦 18。

由表 5 可知，类群 I 株高、茎壁厚度、厚径比、机械强度和抗倒伏指数相对较低，基二占株高比例、鲜密度和干密度较高，表明这类群通过降低株高和优化基本第二节来改善抗倒性能。类群 II 通过基部第二节间综合优化来改善抗倒性能，类群 III 通过降低株高和提高茎秆机械强度来降低倒伏。株高、重心高度、

基二/株高、茎壁厚度、机械强度和抗倒伏指数的变异系数均表现为 $I > II > III$ ；茎粗、厚径比、鲜密度和干密度的变异系数表现为 $I > III > II$ ；鲜密度和干密度的变异系数分别在 III 和 II 最高。

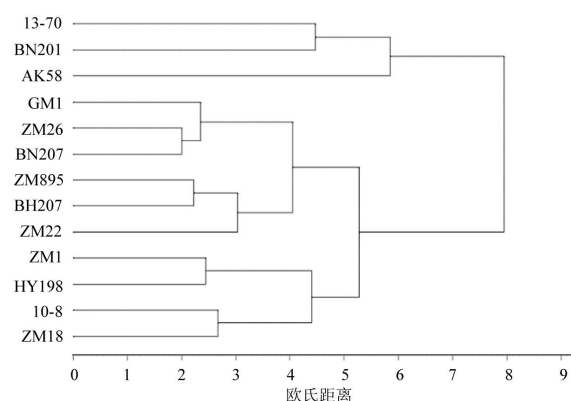


图 2 抗倒性聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of different on lodging resistance

表 5 不同类群机械强度和抗倒指数的相关性状差异

Table 5 Difference on correlated characters with MS and CLRI of different clusters

类群	指标	株高/cm	重心高度/cm	基二/株高/%	茎壁厚度/mm	茎粗/mm	厚径比/%	鲜密度/(g cm ⁻³)	干密度/(g cm ⁻³)	机械强度/g	抗倒伏指数
I	平均值	63.5	42.5	8.88	0.34	3.96	8.5	2.030	0.652	570	13.5
	变异系数	7.59	5.41	22.39	17.32	8.10	12.45	18.62	24.12	16.09	18.43
II	平均值	72.3	42.8	7.07	0.42	3.94	10.6	1.593	0.576	633	14.9
	变异系数	2.80	4.51	15.59	11.76	6.70	7.97	10.84	26.09	6.94	10.58
III	平均值	71.0	45.0	7.33	0.48	4.33	11.1	1.417	0.416	724	16.1
	变异系数	2.45	4.13	8.17	8.45	7.09	9.73	19.06	23.60	4.83	3.16

2.6 抗倒伏特性相关指标的主成分分析

为明确影响茎秆抗倒性能的关键性状，对聚类分析的指标进行主成分分析（表 6），共有 3 个主成分

因子（ Y_1 、 Y_2 、 Y_3 ）入选，累计贡献率 83.72%，说明这 3 个主成分因子能代表影响茎秆抗倒性能的主要因素。主成分 Y_1 反映茎秆抗倒性能变异的 48.11%，

表达式为 $Y_1=0.288X_1+0.195X_2-0.185X_3+0.438X_4+0.288X_5+0.396X_6-0.400X_7-0.316X_8+0.394X_9$, 其中茎壁厚度、茎厚/茎粗、机械强度决定了表型变异。主成分 Y_2 解释 22.06% 的表型变异, 表达式为: $Y_2=0.499X_1+0.334X_2-0.586X_3-0.105X_4-0.104X_5-0.107X_6+0.291X_7+0.406X_8+0.115X_9$, 其中株高、干密度、重心高度的系数较大。主成分 Y_3 解释 13.56% 的表型变异, 表达式为: $Y_3=-0.174X_1+0.462X_2+0.206X_3-0.056X_4+0.616X_5-0.439X_6+0.267X_7-0.101X_8+0.239X_9$, 其中茎粗、重心高度系数较大。

表 6 抗倒特性相关的 9 个指标的主成分分析

Table 6 Principal components analysis among 9 traits of lodging resistance

项目	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9
特征值	4.330	1.985	1.220	0.769	0.328	0.181	0.106	0.070	0.012
贡献率/%	48.106	22.056	13.556	8.544	3.647	2.011	1.178	0.773	0.130
累积贡献率/%	48.106	70.162	83.718	92.262	95.908	97.919	99.097	99.870	100
株高/cm	0.288 0	0.499 2	-0.174 1	0.196 7	0.147 2	-0.540 7	0.318 5	0.341 7	0.258 3
重心高度/cm	0.194 7	0.333 8	0.462 3	0.653 0	0.129 9	0.291 8	0.027 1	-0.256 8	-0.204 5
基二/株高	-0.185 1	-0.586 3	0.205 8	0.280 5	0.199 4	0.051 1	0.593 4	0.299 4	0.130 0
茎壁厚度/mm	0.437 5	-0.104 5	-0.055 9	-0.161 1	0.528 9	0.233 5	-0.234 9	0.490 3	-0.372 5
茎粗/mm	0.287 7	-0.103 8	0.615 7	-0.390 6	0.277 6	-0.210 8	-0.084 1	-0.250 9	0.428 2
厚径比	0.395 7	-0.106 9	-0.438 8	0.139 0	0.021 1	0.488 2	0.015 8	-0.178 9	0.590 8
鲜密度/(g cm ⁻³)	-0.399 5	0.291 3	0.267 4	0.011 0	-0.066 6	0.322 5	-0.309 2	0.546 3	0.425 9
干密度/(g cm ⁻³)	-0.315 9	0.405 6	-0.101 0	-0.396 8	0.433 4	0.326 4	0.472 9	-0.215 4	-0.059 8
机械强度/g	0.393 5	0.114 8	0.239 2	-0.317 5	-0.610 1	0.268 4	0.405 0	0.217 7	-0.135 4

3 讨论

3.1 冬小麦株高、重心高度和节间长度对茎秆抗倒伏特性的影响

冬小麦生育后期茎秆抗倒伏特性与株高、重心高度和倒数第二节间壁厚有较强的相关性^[20]。本研究中小麦基部第二节间机械强度与株高、重心高度表现出显著正相关关系, 而抗倒指数与株高和重心高度呈不显著相关关系。聚类分析的第Ⅲ类小麦群体平均株高和重心高度分为 71.0 cm 和 45.0 cm 时, 机械强度和抗倒指数最高。姚金保等^[11]、WIERSMA 等^[12]、马均等^[19]研究指出适当降低株高可相应降低植株的重心高度, 从而增强植株抗倒伏能力。Tripathi 等^[21]研究得出株高最高的小麦品种没有发生倒伏; 株高第二的品种倒伏趋势增加; 株高较低品种抗倒伏性居中。Islam 等^[22]在水稻研究中也发现有些抗倒性强的品种的株高反而大于抗倒性弱的品种, 株高偏高的小麦品种基部第二节间长度偏低, 弯曲力矩偏大, 表现出较好的抗倒伏特性; 株高偏低, 主茎质量低的品种, 基部第二节间长度较长, 表现出抗折力低的趋势^[23]。评价小麦品种的抗倒性不能单以株高而论, 矮秆并非抗倒的唯一决定因素^[11], 传统的矮化育种由于降低了株高相对提高了抗倒伏能力, 但限制了产量的进一步提高。现代小麦品种的株高和重心高度与优化的茎秆特性相适宜, 进一步表明抗倒指数是由多因素决定的综合性状。在一定的抗倒范围内, 可以适当增加株高以提高生物量从而实现产量的进一步提高。

小麦基部第二节间长度和茎秆抗折断力可以作

为品种抗倒性选择的重要指标, 基部第一、第二节间越长, 倒伏指数越大, 抗倒指数越小^[24-25]。也有研究^[23,26]认为作物基部节间长度对倒伏性能关系不显著。本研究也得出相同结论, 不同冬小麦品种(系)的基部第二节间长度变异系数达到 13.74%, 与机械强度和抗倒伏指数在一定范围内表现出负相关关系, 但相关性不显著。基部第二节间的株高构成指数和基二/株高的变异系数分别为 8.7% 和 18.1%, 且与机械强度和抗倒指数呈极显著和显著负相关关系。节间长度的变化, 使得茎秆干物质分配发生了改变, 影响了植株的抗倒能力。株高变化的一定范围内, 基二节间占株高比例达到一定的阈值不会降低茎秆的抗倒指数, 但基二节间长度占株高比例较大则会降低茎秆的机械强度和抗倒指数。可以参考将基二/株高的比例作为评价抗倒伏指数的指标选项之一。

3.2 冬小麦茎粗、茎壁厚度、节间质量对茎秆抗倒特性的影响

禾谷类作物茎秆的抗倒伏能力与茎秆基部第二节间的密度、外径、壁厚、干质量等指标密切相关^[14-15, 27]。孟令志等^[28]研究得出小麦茎秆抗折断力与基部节间直径和壁厚表现出正相关关系, 基部第二节间越粗、基部第一、第二节间充实度越大的作物, 抗倒指数越大^[11, 24, 28]。本研究中小麦基部第二节间机械强度与厚径比、茎壁厚度和茎粗达显著和极显著正相关关系; 抗倒指数与茎壁厚度和机械强度呈极显著正相关关系(0.476 和 0.881); 与茎粗、厚径比呈显著正相关关系(0.344 和 0.386)。表明茎秆的厚径比可以作为评价茎秆机械强度的形态指标选项之一^[29-30]。

徐磊等^[5]研究得出提高基部节间茎秆的干密度可以实现抗倒性和产量的同步提高,利用基部节间茎秆鲜、干密度来评价小麦品种的抗倒性是可行的。本研究中基部第二节间机械强度和抗倒指数与鲜密度和干密度呈显著负相关关系,与充实度呈不显著正相关关系。当茎壁厚度越厚、茎粗越大,茎秆体积越大,茎秆的抗倒指数越大,茎秆的鲜密度和干密度降低。当茎秆质量越大,节间长度越小,茎秆的充实度越大,在一定范围内,抗倒指数越高。有研究表明茎秆的充实度较好,地上部鲜质量越大,茎秆维管束数目越多,粗纤维量和硅量越高,其植株的抗倒能力就越强^[26,31]。郝树荣指出增加水稻节间粗度和茎壁厚度,促进茎秆机械组织的充实可以提高水稻的抗倒伏能力^[32]。也有研究认为作物倒伏性与基部节间茎粗、茎秆质量呈不显著的负相关或显著负相关关系^[25,33],产生的结论差异可能与不同作物茎秆结构特性和生态环境有关,需要进一步有针对性的研究。

3.3 冬小麦茎秆机械强度与抗倒指数的关系

影响小麦抗倒性的因素较多,抗倒性往往是由其中一个或几个关键性状来决定的。不同抗倒品种(系)在抗倒特性上表现有差异,有关因素在不同品种中所起的作用不尽相同,同一个性状与小麦抗倒性的关系在前人不同的研究中得到的结论也不尽相同^[34-35],多性状的优化组合是提高小麦品种抗倒伏能力的关键。吴泽芳等^[23]指出小麦茎秆基部第二机械强度远大于其自身质量,抗倒指数与机械强度表现为极显著正相关关系。本研究中机械强度与抗倒指数呈极显著正相关,相关系数达 0.881,茎秆基部第二节间机械强度对抗倒指数具有积极正效应作用。孟令志等^[28]将抗倒品种(系)划分为 3 类,分别是通过降低株高改善抗倒性;通过提高茎秆抗折断力改善抗倒性;同时通过降低茎秆高度和提高茎秆抗折断力改善抗倒性。本研究中不同类型品种抗倒性能的决定关键性状表现不同,聚类分析中类群 I 通过降低株高和优化基部第二节来改善抗倒性能;类群 II 通过基部第二节间综合优化来改善抗倒性能;类群 III 通过降低株高和提高茎秆机械强度来降低倒伏。第 I 至第 III 类群的机械强度和抗倒指数的变异系数均表现为 I > II > III;各指标的变异系数表现为抗倒性强的类群低于抗倒性弱的类群。在主成分分析中,主成分因子 Y1 反映茎秆指标变异的 48.11%,其中茎壁厚度、厚径比、机械强度是决定 Y1 的主要因素。株高、干密度、重心高度是决定主成分因子 Y2 的主要因素,茎粗、重心高度是决定主成分因子 Y3 的主要因素。进一步表明茎秆的抗倒性能是多性状的优化组合,灌浆期小麦基部第二节间的茎壁厚度、厚径比和机械强度可以作为评价茎

秆抗倒伏指数的参考。

4 结 论

1) 13 个品种(系)中,百农 207、周麦 18、周麦 22、10-8、13-70、百早 207、冠麦 1 号和周麦 26 的抗倒指数相对较大,抗倒能力相对较强。抗倒指数是由多因素决定的综合性状,不同品种与其抗倒特性组配方式多样,本研究中类群 I 通过降低株高和优化基部第二节来改善抗倒性能;类群 II 通过基部第二节间综合优化来改善抗倒性能;类群 III 通过降低株高和提高茎秆机械强度来降低倒伏。

2) 株高和重心高度影响茎秆的机械强度,但不是茎秆抗倒特性的决定因素。基二/株高的比例可以作为评价抗倒伏指数的指标选项。一定株高范围内,基二节间占株高比例达到一定的阈值不会降低茎秆的抗倒指数,但基二节间长度占株高比例较大则会降低茎秆的机械强度和抗倒指数。

3) 灌浆期间基部第二节间的茎壁厚度、厚径比和机械强度可以作为评价茎秆抗倒伏指数的指标,茎壁厚度和茎粗越大,茎秆的机械强度越大,抗倒伏指数也越高。

参考文献:

- [1] CROOK M J, ENNOS A R. Stem and root characteristics associated with lodging resistance in four winter wheat cultivars[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1994, 123(2): 167-174.
- [2] PEAKE A S, HUTH N I, CARBERRY P S, et al. Quantifying potential yield and lodging-related yield gaps for irrigated spring wheat in sub-tropical Australia[J]. *Field Crops Research*, 2014, 158: 1-14.
- [3] 冯素伟, 李淦, 胡铁柱, 等. 不同小麦品种茎秆抗倒性的研究[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(6): 1 055-1 059.
- [4] FENG Suwei, LI Gan, HU Tiezhu, et al. Study on the stem lodging resistance of different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(6): 1 055-1 059.
- [5] 吕厚波, 冯安荣, 董瑞, 等. 不同基因型小麦灌浆和抗倒伏性能与籽粒产量的关系[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(6): 27-33.
- [6] LYU Houbo, FENG Anrong, DONG Rui, et al. Grain-filling characteristics and stem lodging resistance and their relationships with grain yields of different genotypic wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 24(6): 27-33.
- [7] 徐磊, 王大伟, 时荣盛, 等. 小麦基部节间茎秆密度与抗倒性关系的研究[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(4): 673-679.
- [8] XU Lei, WANG Dawei, SHI Rongsheng, et al. Relationship between lodging-resistance and the density of the bottom elongate stem in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(4): 673-679.
- [9] 韦爽, 万燕, 晏林, 等. 不同苦荞品种茎秆强度和植株性状的差异及其相关性[J]. *作物杂志*, 2015(2): 59-63.
- [10] WEI Shuang, WAN Yan, YAN Lin, et al. Difference and correlation of

- different Tartary buckwheat cultivars in stem strength and plant characters[J]. *Crops*, 2015(2): 59-63.
- [7] 李杰, 张洪程, 龚金龙, 等. 不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(11): 2 234-2 243.
- LI Jie, ZHANG Hongcheng, GONG Jinlong, et al. Effects of different planting methods on the culm lodging resistance of super rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(11): 2 234-2 243.
- [8] ZHANG W J, LI G H, YANG Y M, et al. Effects of nitrogen application rate and ratio on lodging resistance of super rice with different genotypes[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 63-72.
- [9] BAKER C J, STERLING M, BERRY P. A generalised model of crop lodging[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2014, 363: 1-12.
- [10] 张元元, 孙晓琴, 王春堂, 等. 不同波涌畦灌对冬小麦茎秆抗倒伏能力的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(3): 23-27, 89.
- ZHANG Yuanyuan, SUN Xiaoqin, WANG Chuntang, et al. Stalk lodging resistance of winter wheat under different surge flow border irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(3): 23-27, 89.
- [11] 姚金保, 张平平, 任丽娟, 等. 小麦抗倒指数遗传及其与茎秆特性的相关分析[J]. *作物学报*, 2011, 37(3): 452-458.
- YAO Jinbao, ZHANG Pingping, REN Lijuan, et al. Inheritance of lodging resistance index and its correlations with culm traits in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(3): 452-458.
- [12] WIERSMA J J, DAI J, DURGAN B R. Optimum timing and rate of trinexapac-ethyl to reduce lodging in spring wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(3): 864-870.
- [13] 王丹, 丁位华, 冯素伟, 等. 不同小麦品种茎秆特性及其与抗倒性的关系[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1 496-1 502.
- WANG Dan, DING Weihua, FENG Suwei, et al. Stem characteristics of different wheat varieties and its relationship with lodging-resistance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1 496-1 502.
- [14] 李金才, 尹钧, 魏凤珍. 播种密度对冬小麦茎秆形态特征和抗倒指数的影响[J]. *作物学报*, 2005, 31(5): 662-666.
- LI Jincai, YIN Jun, WEI Fengzhen. Effects of planting density on characters of culm and culm lodging resistant index in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5): 662-666.
- [15] 杨霞, 王红娟, 徐文静, 等. 不同抗倒性小麦品种的茎秆结构及其化学成分和力学特性分析[J]. *河南农业大学学报*, 2012, 46(4): 370-373.
- YANG Xia, WANG Hongjuan, XU Wenjing, et al. Analysis of microstructure of stem and its chemical composition and mechanical property in different lodging resistance wheat cultivars[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2012, 46(4): 370-373.
- [16] 河南省土壤普查办公室. 河南土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 221-224.
- [17] 郭翠花, 高志强, 苗果园. 不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 151-155.
- GUO Cuihua, GAO Zhiqiang, MIAO Guoyuan. Relationship between lodging and mechanical characteristics of winter wheat stem under different yield levels[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 151-155.
- [18] PEAKE A S, BELL K L, CARBERRY P S, et al. Vegetative nitrogen stress decreases lodging risk and increases yield of irrigated spring wheat in the subtropics[J]. *Crop and Pasture Science*, 2016, 67(9): 907.
- [19] 马均, 马文波, 田彦华, 等. 重穗型水稻植株抗倒伏能力的研究[J]. *作物学报*, 2004, 30(2): 143-148.
- MA Jun, MA Wenbo, TIAN Yanhua, et al. The culm lodging resistance of heavy panicle type of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(2): 143-148.
- [20] 刘仲秋, 刘馨惠, 卞城月, 等. 秸秆覆盖条件下宽幅精播冬小麦茎秆抗倒性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(1): 6-10.
- LIU Zhongqiu, LIU Xinhui, BIAN Chengyue, et al. Research of stalk lodging resistance of winter wheat with wide-precision planting pattern under straw mulching[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(1): 6-10.
- [21] TRIPATHI S C, SAYRE K D, KAUL J N. Planting systems on lodging behavior, yield components, and yield of irrigated spring bread wheat[J]. *Crop Science*, 2005, 45(4): 1 448-1 455.
- [22] ISLAM M S, PENG S B, VISPERAS R M, et al. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem[J]. *Field Crops Research*, 2007, 101(2): 240-248.
- [23] 吴泽芳, 衡艳, 邱丹, 等. 33 份水稻材料的抗倒伏性评价[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(4): 736-744.
- WU Zefang, HENG Yan, QIU Dan, et al. Lodging resistance related parameters evaluation in 33 rice germplasm[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(4): 736-744.
- [24] 魏中伟, 马国辉. 超高产杂交水稻超优 1000 的生物学特性及抗倒性研究[J]. *杂交水稻*, 2015, 30(1): 58-63.
- WEI Zhongwei, MA Guohui. Biological characteristics and lodging resistance of super high yielding hybrid rice chaoyou 1000[J]. *Hybrid Rice*, 2015, 30(1): 58-63.
- [25] 汪灿, 阮仁武, 袁晓辉, 等. 不同莽麦品种抗倒伏能力与根系及茎秆性状的关系[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(1): 65-71.
- WANG Can, RUAN Renwu, YUAN Xiaohui, et al. Relationship between root and stem traits and lodging resistance in different buckwheat cultivars[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2015, 37(1): 65-71.
- [26] 陈有军, 周青平, 孙建, 等. 不同燕麦品种田间倒伏性状研究[J]. *作物杂志*, 2016(5): 44-49.
- CHEN Youjun, ZHOU Qingping, SUN Jian, et al. Comparison of lodging resistance among different oats (*avena sativa* L.)[J]. *Crops*, 2016(5): 44-49.
- [27] ZHANG M W, WANG H, YI Y, et al. Effect of nitrogen levels and nitrogen ratios on lodging resistance and yield potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Plos One*, 2017, 12(11): e0187543.
- [28] 孟令志, 买春艳, 于立强, 等. 黄淮冬麦区部分小麦品种(系)抗倒伏相关性状分析[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(7): 888-895.
- MENG Lingzhi, MAI Chunyan, YU Liqiang, et al. Analysis of lodging-associated traits on some wheat cultivars and breeding lines in the yellow-Huai river valley winter wheat zone[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(7): 888-895.
- [29] 王健, 朱锦懋, 林青青, 等. 小麦茎秆结构和细胞壁化学成分对抗压强度的影响[J]. *科学通报*, 2006, 51(6): 679-685.

- [30] 王芬娥, 黄高宝, 郭维俊, 等. 小麦茎秆力学性能与微观结构研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 92-95.
WANG Fene, HUANG Gaobao, GUO Weijun, et al. Mechanical properties and micro-structure of wheat stems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 92-95.
- [31] 陈桂华, 邓化冰, 张桂莲, 等. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系及配合力分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 407-417.
CHEN Guihua, DENG Huabing, ZHANG Guilian, et al. The correlation of stem characters and lodging resistance and combining ability analysis in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 407-417.
- [32] 郝树荣, 潘永春, 董博豪, 等. 灌排模式对超级稻南粳 5055 抗倒伏能力的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 15-21.
HAO Shurong, PAN Yongchun, DONG Bohao, et al. The resistance of super rice oryza sativa L. Nanjing 5055 to lodging under different irrigation and drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 15-21.
- [33] 李木英, 陈关, 潘晓华, 等. 直播稻不同品种茎秆和根系性状与抗倒伏性关系[J]. 中国稻米, 2012, 18(2): 17-21.
- [34] XIAO Yonggui, LIU Jianjun, LI Haosheng, et al. Lodging resistance and yield potential of winter wheat: effect of planting density and genotype[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2015, 2(2): 168-178.
- [35] KELBERT A J, SPANER D, BRIGGS K G, et al. The association of culm anatomy with lodging susceptibility in modern spring wheat genotypes[J]. Euphytica, 2004, 136(2): 211-221.

Lodging Resistance of Different Winter Wheat Lines in a Sandy Fluvo-aquic Soil

HUANG Ling¹, YANG Wenping¹, MEI Peipei¹, JIAO Shuang²,
XU Lina¹, ZHANG Zhiyong¹, OU Xingqi¹, YAO Sumei^{1*},

(1. College of Life Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology/Collaborative Innovation Center of Modern Biological Breeding, Xinxiang 453003, China; 2. Xinxiang Soil & Fertilizer Working Station, Xinxiang 453003, China)

Abstract: 【Objective】 Lodging refers to the process that the crop shoots are displaced from their vertical stance. It is impacted by many factors including whether, crop varieties, soil type. The objective of this work is to experimentally study the variation of lodging between different winter wheat lines in a sandy fluvo-aquic soil in Henan province.

【Method】 The experiment was conducted in a field in which we compared 13 winter wheat lines. For each line, we measured the material properties and lodging resistance of its stems during the middle grain-filling stages under different agronomic managements. The relationship between the lodging resistance index (CLRI) of the second internode and nine culm properties was calculated using correlation, cluster and principal component analysis.

【Result】 Plant height and location of the gravitational center of the aerial parts had little impact on the lodging of the wheat in the middle grain-filling stage. The mechanical strength of the second internode of all lines was negatively correlated to the CLRI though not at a significant level. Plant height and the ratio of length of the second internode to plant height were both negatively correlated with the mechanical strength and the CLRI, both at significant level. The culm diameter, stem thickness and the ratio of stem thickness to culm diameter were all positively correlated with the mechanical strength and CLRI at significant level. Cluster analysis of Group I showed that reducing plant height and optimizing the second internode improved lodging resistance of the wheat, while the Group II analysis revealed that optimizing the traits of the second internode were equally effective. The result of Group III was that reducing plant height and increasing mechanical strength of the stems can also improve the lodging resistance. There were three principal component factors cumulatively contributing 83.72% of the principal component analysis, and the principal component factors (PCF) reflected 48.11% of the variation in the stem. Stem thickness, ratio of stem thickness to culm diameter and the mechanical strength were the major factors controlling PCF1, while plant height, dry density and location of the gravitational center were key determinants of PCF2. Stem thickness and location of the gravitational center were the main factors of PCF3. **【Conclusion】** Lodging resistance index (CLRI) is a parameter determined by a multitude of factors, but it can be estimated using the ratio of length of the second internode to the plant height, as well as stem thickness, culm diameter, the ratio of stem thickness to culm diameter. Breeding new genotypes to improve above crop traits are needed to enhance their lodging resistance when the crops are grown in the sandy fluvo-aquic soil in Henan province.

Key words: winter wheat lines; sandy fluvo-aquic soil; stem characterizes; mechanical strength; culm lodging resistant index (CLRI)

责任编辑：白芳芳