

水稻核心种质资源茎秆抗倒伏性研究

袁新捷¹, 刘潇², 陈国兴¹

1. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室, 武汉 430070

摘要 为了探究不同株高、重心高度及基部茎秆性状对水稻抗倒伏能力的影响, 以 533 份水稻核心种质资源为试验材料, 在 2 种栽培条件下, 对 10 个性状进行相关分析和通径分析, 结果表明: 低株高水稻基部第 1 节间壁厚和基部抗折力对倒伏指数有协同作用, 低株高水稻抗倒伏茎秆性状改良应集中在基部第 1 节间茎粗、壁厚, 高株高水稻倒伏性更易受株高和重心高度的影响, 高株高水稻抗倒伏性状改良应集中在基部第 2 节间茎粗, 增强水稻茎秆基部抗折力是提高不同株高水稻抗倒伏能力的途径之一。

关键词 水稻; 核心种质资源; 倒伏指数; 通径分析; 抗倒伏遗传改良; 多样性栽培稻; 群体抗倒伏; 个体抗倒伏

中图分类号 S 511.503.4 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2021)01-0147-07

水稻在成熟期发生倒伏会使稻米产量和品质下降, 收割成本增加^[1-2]。品种自身抗倒伏能力是影响水稻倒伏的主要因素之一^[3-4]。第一次绿色革命中水稻矮秆基因的发现及广泛应用, 解决了高秆品种水稻的倒伏问题, 产量、经济系数均得到大幅度提高^[5], 但株高的降低限制了植株整体生物量的增加, 使得水稻产量长时间无法取得重大突破^[6-8]。有研究发现增加株高以提高生物量进而提高经济产量是高产育种的一条有效途径, 不以降低株高的方式来改善水稻倒伏性是可行的^[9-10]。水稻抗倒伏育种需探索水稻倒伏相关性状改良方法, 以降低水稻倒伏发生率, 稳定并提高水稻产量。

前人水稻茎秆理化特性与倒伏的相关性进行了探索, 发现在不同栽培地区, 水稻基部伸长节间茎粗、壁厚、单位节间干物质量与植株抗倒伏能力关系密切, 水稻基部节间长度过长容易倒伏^[11-13], 水稻茎秆基部的强度能反映出水稻抗倒伏能力强弱, 且茎秆的强度受茎秆淀粉、纤维素、半纤维素、木质素含量和维管束总数的影响^[14-16]。石世杰等^[17]以 5 个水稻品种为试验材料, 在稻虾共作系统中, 研究播期对水稻倒伏指数的影响, 结果显示, 随着播期的推迟, 大部分水稻品种的抗倒伏能力逐渐增加。前人研究所使用的材料在品种数量上较少, 遗传多样性低, 本试验以来自世界范围的多样性栽培稻为试验

材料, 旨在为水稻抗倒伏育种中抗倒伏性状改良提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验地点

试验所用材料来自华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室的 533 份水稻核心种质资源, 其中包括 203 份中国水稻核心种质资源和 330 份世界核心种质资源, 具体种质信息见 Ricevarmap (<http://ricevarmap.ncpgr.cn/>)。

试验地点为华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室盆栽场。

1.2 盆栽试验

2015 年所用盆钵规格: 下部直径 16 cm, 上部直径 19.5 cm, 盆高 19 cm, 每盆均装入 5 kg 风干土壤。大田同批育苗, 5 月 25 日播种, 6 月 16 日移栽, 每品种单插本, 4 次重复, 每 2 个重复排成一列, 每列盆钵连续排列, 行间距为 90 cm。基肥施用量 N-P₂O₅-K₂O: 0.15-0.15-0.15 g/kg, 追肥施用量 N-P₂O₅-K₂O: 0.05-0.05-0.05 g/kg, 追肥溶于水后于分蘖期和孕穗期追施。试验期间适时防治病虫害。

1.3 田间试验

2017 年水稻核心种质资源按水稻品种生育期长短分 3 批播种育秧, 分别为 3 月 25 日、4 月 14

收稿日期: 2020-06-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0100101)

袁新捷, E-mail: 906488313@qq.com

通信作者: 陈国兴, E-mail: chenguoxing@mail.hzau.edu.cn

日、5月4日,秧龄达30 d移栽,单本插,每份材料种植4行,每行5株,行距、株距分别为26.7、20 cm,种植2个小区。基肥施用复合肥(N-P₂O₅-K₂O:15-15-15)30 kg/667 m²,在1叶1心期和分蘖期分别追施尿素5 kg/667 m²。试验期间适时进行人工除草和防治病虫害。

1.4 测定项目与方法

1)测定时间。在水稻齐穗期后25 d取样测定,每份材料每个重复(小区)取3(4)个长势一致的一次分蘖进行抗倒伏相关性状的测定。

2)株高和重心高度的测定。株高为水稻基部至穗顶(不带芒)的距离。重心高度测定时将保持新鲜的植株放在食指尖上,不断调整支点位置使其保持平衡,水稻基部至支点的距离即为重心高度。

3)基部第1、2节间性状测定。基部第1、2节间从节间中部截断测定,用数显游标卡尺测定椭圆形中空茎秆的长短轴的外径,同一截面上随机测3处壁厚值,其平均值记为该节间的壁厚。茎粗=(长轴外径+短轴外径)/2;秆型指数^[18]=基部节间外径(mm)/基部节间长度(cm)×100。

4)基部抗折力测定。参照濑古秀生^[19]的方法进行,截取主茎基部10 cm^[20]长的一段茎秆,保留叶鞘,在该段茎秆中部用秆强测定仪DIK-7401(日本大起理化学工业株式会社)轻轻下压直至茎秆断折,支点距离9 cm,记录下此时仪器上显示的测定值(mm),仪器显示测定值为40时茎秆对仪器的反作用力;白色弹簧为1 kg;黄色弹簧为2 kg;红色弹簧为4 kg。基部茎秆抗折力=测定值/40×最大反作用力。

5)倒伏指数的计算。参照文献^[21]进行,全株加在基部节间的弯矩=基折断部位到穗顶的鲜质量×折断部位到穗顶的距离;基部节间折断时的弯

矩=基部抗折力×两个支点间的距离/4;倒伏指数=全株加在基部节间的弯矩/基部节间折断时的弯矩。

1.5 数据处理

试验数据经Excel 2007进行初步计算和整理后,使用SPSS 21.0软件进行各数据的正态性检验、相关性分析和通径分析^[22]。

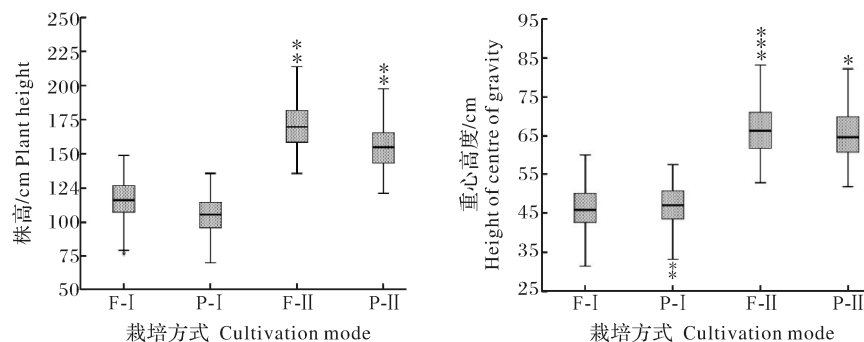
2 结果与分析

2.1 水稻核心种质资源株高与重心高度聚类

由于水稻核心种质资源环境适应性存在差异,部分材料无法正常抽穗,2015年盆栽试验最终获得完整数据522份,2017年田间试验获得完整数据514份。通过K-均值聚类将水稻核心种质资源按株高和重心高度分成类别I、类别II。2015年盆栽试验类别I有275份(P-I),类别II有247份(P-II),2017年田间试验类别I有290份(F-I),类别II有224份(F-II)。

从图1可知,水稻种质资源株高在69.96~223.31 cm、重心高度30.63~88.94 cm,遗传变异丰富,在盆栽、田间试验下的类别I水稻株高和重心高度相对较低,类别II水稻株高和重心高度相对较高。

从表1可知,田间试验条件下的水稻株高比盆栽要高10 cm以上,差异达显著水平,重心高度差异在2 cm以内,同类别间差异未达显著水平。类别II与类别I的倒伏指数均值差异达显著水平,即株高及重心高度较高的水稻种质抗倒伏能力相对于株高及重心高度低的水稻品种较弱。类别II的茎秆基部抗折力均值比类别I高25%以上,差异达显著水平,类别II的基部第1、2节间茎粗、壁厚显著高于类别I,基部第1、2节间秆型指数显著小于类别I。



F: 田间试验; P: 盆栽试验。下同。F: Field culture; P: Pot culture. The same as follows.

图1 水稻核心种质聚类后株高和重心高度分布

Fig.1 Distribution of plant height and height of centre of gravity after clustering of rice core germplasm

表 1 水稻核心种质聚类后各性状均值

Table 1 The mean value of traits after clustering of rice core germplasm

栽培方式 Cultivation mode	株高/cm Plant height (X ₁)	重心 高度/cm Height of centre of gravity (X ₂)	基部第 1 节间茎粗/mm Thick of the first internode (X ₃)	基部第 1 节 间壁厚/mm Wall thickness of the first internode (X ₄)	基部第 1 节 间秆型指数 Culm phenotype index of the first internode (X ₅)	基部第 2 节 间茎粗/ mm Thick of the second internode (X ₆)	基部第 2 节 间壁厚/mm Wall thickness of the second internode (X ₇)	基部第 2 节 间秆型指数 Culm phenotype index of the second internode (X ₈)	基部抗 折力/g Basal stalk breaking- resistant strength (X ₉)	倒伏指数 Lodging index (X ₁₀)
F-I	115.53c	46.06b	6.284b	0.886c	149.07a	5.882b	0.672d	59.83a	665.98d	1.87b
P-I	104.32d	46.38b	6.375b	0.910c	139.58a	5.858b	0.712c	60.93a	996.96b	0.94d
F-II	171.54a	66.73a	7.018a	1.000b	116.82b	6.665a	0.761b	44.13b	836.59c	3.01a
P-II	155.03b	65.35a	7.170a	1.058a	118.07b	6.674a	0.814a	47.82b	1 332.65a	1.31c

注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。Note: Values within a column followed by a different letter are significantly different at 0.05 level.

2.2 株高及重心高度较低的水稻种质倒伏指数与茎秆性状的相关及通径分析

从表 2 可知,在田间试验中,水稻倒伏指数与重心高度呈极显著正相关,相关系数为 $r_{2(F-I)} = 0.332$;在盆栽试验中,水稻倒伏指数与重心高度不具有显著相关性。在 2 种栽培条件下,低株高水稻种质倒伏指数与株高呈极显著或显著性正相关,相关系数分别为 $r_{1(F-I)} = 0.242$ 、 $r_{1(P-I)} = 0.136$ 。低株高水稻种质倒伏指数与基部第 1、2 节间茎粗呈极显著或显著负相关,与基部第 1、2 节间壁厚、秆型指数为极显著负相关,与茎秆基部抗折力的负相关最大,相关系数分别为 $r_{9(F-I)} = -0.606$ 、 $r_{9(P-I)} = -0.642$ 。

由于不同性状之间存在相互作用,以倒伏指数为因变量、其他性状为自变量进行逐步回归,进一步对水稻茎秆性状与倒伏指数进行通径分析(表 3),以确定各性状对倒伏指数的具体效应。在 2 种栽培条件下,水稻基部抗折力、基部第 1 节间壁厚对倒伏

指数的直接作用均为负向,水稻株高、基部第 1 节间茎粗对倒伏指数的直接作用均为正向,且基部抗折力的直接通径系数分别为 $P_{9y(F-I)} = -0.986$ 、 $P_{9y(P-I)} = -0.976$ 。从各性状的间接通径系数可看出,水稻株高、基部第 1 节间茎粗、壁厚通过基部抗折力对水稻倒伏指数的间接作用均为负向。在盆栽试验中,水稻基部第 1 节间壁厚通过基部抗折力对倒伏指数的间接作用最大,间接系数为 $P_{9y(P-I)} \times r_{49(P-I)} = -0.773$;在田间试验中,水稻基部第 1 节间茎粗通过基部抗折力对倒伏指数的间接作用最大,间接系数为 $P_{9y(F-I)} \times r_{39(F-I)} = -0.662$ 。田间试验的水稻倒伏指数还受重心高度的影响,直接通径系数为 $P_{2y(F-I)} = 0.114$ 。水稻株高、基部第 1 节间茎粗壁厚、基部抗折力在不同栽培条件下对低株高水稻倒伏的影响具有一致性,对于低株高的水稻抗倒伏性状改良主要集中在基部茎秆机械强度的增强和基部第 1 节间茎秆增粗、壁厚增厚。

表 2 类别 I 的倒伏指数与各性状的相关分析

Table 2 The correlation analysis between lodging index and other traits in Class I

性状 Traits	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
X ₂	0.788**								
X ₃	0.877**								
X ₄	0.422**	0.285**							
X ₅	0.458**	0.477**							
X ₆	0.403**	0.304**	0.694**						
X ₇	0.471**	0.444**	0.793**						
X ₈	0.041	-0.072	0.508**	0.447**					
X ₉	0.039	0.124*	0.591**	0.568**					
X ₁₀	0.440**	0.308**	0.957**	0.673**	0.563**				
X ₁₁	0.478**	0.498**	0.948**	0.782**	0.610**				
X ₁₂	0.444**	0.314**	0.695**	0.910**	0.533**	0.715**			
X ₁₃	0.474**	0.438**	0.754**	0.871**	0.558**	0.803**			
X ₁₄	0.143*	-0.039	0.526**	0.438**	0.855**	0.577**	0.575**		
X ₁₅	0.030	0.110	0.553**	0.513**	0.828**	0.608**	0.576**		
X ₁₆	0.428**	0.228**	0.671**	0.614**	0.330**	0.622**	0.632**	0.467**	
X ₁₇	0.474**	0.449**	0.790**	0.792**	0.466**	0.767**	0.781**	0.431**	
X ₁₈	0.242**	0.332**	-0.183**	-0.289**	-0.235**	-0.133*	-0.252**	-0.294**	-0.606**
X ₁₉	0.136*	0.114	-0.390**	-0.474**	-0.389**	-0.360**	-0.465**	-0.373**	-0.642**

注:第 1 行为 F-I,第 2 行为 P-I; * 表示达到 0.5 显著性水平; ** 表示达到 0.01 显著性水平。下表同。Note: Row 1 is F-I, and row 2 is P-I; * represents 0.5 significance; ** represents 0.01 significance. The same as follows.

表 3 类别 I 的倒伏指数与各性状的通径分析
Table 3 Path analysis of lodging index and traits in Class I

类别 Class	性状 Traits	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				
			X ₁	X ₃	X ₄	X ₉	X ₂
F-I	X ₁	0.471		0.150	-0.055	-0.422	0.090
	X ₃	0.356	0.199		-0.094	-0.662	0.033
	X ₄	-0.136	0.190	0.247		-0.605	0.035
	X ₉	-0.986	0.202	0.239	-0.084		0.026
	X ₂	0.114	0.371	0.102	-0.041	-0.225	
P-I	X ₁	0.579		0.110	-0.058	-0.463	
	X ₃	0.239	0.265		-0.098	-0.771	
	X ₄	-0.124	0.273	0.190		-0.773	
	X ₉	-0.976	0.274	0.189	-0.098		

2.3 株高及重心高度较高的水稻种质倒伏指数与茎秆性状的相关及通径分析

从表 4 可知,株高及重心高度较高的水稻种质倒伏指数与株高、重心高度呈极显著正相关,与茎秆基部抗折力呈极显著负相关,且相关系数最大,分别为 $r_{9(F-II)} = -0.705$ 、 $r_{9(P-II)} = -0.462$ 。在 2 种栽培条件下,高株高水稻种质倒伏指数与其茎秆性状相关性的差异主要在基部第 2 节间。田间试验中,水稻倒伏指数与基部第 2 节间茎粗、壁厚、秆型指数为极显著负相关;盆栽试验中,水稻倒伏指数与基部第 2 节间茎粗、壁厚、秆型指数不具显著性负相关性。

通径分析结果显示:基部抗折力对倒伏指数的

直接作用最大且为负向,直接通径系数分别为 $P_{9y(F-II)} = -0.924$ 、 $P_{9y(P-II)} = -0.955$,株高、重心高度、基部第 2 节间茎粗的直接作用均为正向,且基部第 2 节间茎粗正向直接作用最强 $P_{6y(F-II)} = 0.340$ 、 $P_{6y(P-II)} = 0.396$,比较各性状间接通径系数,发现基部第 2 节间茎粗通过基部抗折力对倒伏指数的间接作用最大且为负值,在田间条件下,水稻的倒伏指数还受基部第 1 节间壁厚作用 $P_{4y(F-II)} = -0.119$ 。水稻株高、重心高度、基部第 2 节间茎粗、基部抗折力在不同栽培条件下对高株高水稻倒伏的影响具有一致性,对于高株高的水稻抗倒伏性状改良应集中在株高、重心高度的降低,基部茎秆机械强度的增强和基部第 2 节间茎秆增粗。

表 4 类别 II 的倒伏指数与各性状的相关系数

Table 4 The correlation analysis between lodging index and other traits in Class II

性状 Traits	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
X ₂	0.754**								
	0.779**								
X ₃	0.310**	0.074							
	0.457**	0.371**							
X ₄	0.200**	0.010	0.715**						
	0.388**	0.328**	0.773**						
X ₅	0.073	-0.070	0.411**	0.478**					
	0.109	0.047	0.471**	0.503**					
X ₆	0.316**	0.097	0.953**	0.724**	0.407**				
	0.482**	0.412**	0.943**	0.729**	0.466**				
X ₇	0.293**	0.111	0.708**	0.892**	0.490**	0.755**			
	0.397**	0.377**	0.677**	0.839**	0.409**	0.707**			
X ₈	0.099	-0.099	0.513**	0.481**	0.722**	0.546**	0.611**		
	0.182**	0.121	0.426**	0.437**	0.654**	0.477**	0.483**		
X ₉	0.178**	-0.061	0.754**	0.726**	0.345**	0.763**	0.716**	0.462**	
	0.315**	0.271**	0.832**	0.717**	0.387**	0.776**	0.647**	0.384**	
X ₁₀	0.304**	0.430**	-0.324**	-0.476**	-0.245**	-0.313**	-0.402**	-0.270**	-0.705**
	0.391**	0.399**	-0.177**	-0.166*	-0.131*	-0.083	-0.082	-0.104	-0.462**

表 5 类别 II 的倒伏指数与各性状的通径分析
Table 5 Path analysis of lodging index and traits in Class II

类别 Class	性状 Traits	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				
			X ₁	X ₂	X ₆	X ₉	X ₄
F-II	X ₁	0.266		0.125	0.107	-0.165	-0.024
	X ₂	0.166	0.201		0.107	0.056	-0.001
	X ₆	0.340	0.084	0.016		-0.705	-0.086
	X ₉	-0.924	0.047	-0.010	0.259		-0.086
	X ₄	-0.119	0.053	0.002	0.246	-0.671	
P-II	X ₁	0.274		0.256	0.191	-0.301	
	X ₂	0.328	0.213		0.163	-0.259	
	X ₆	0.396	0.132	0.135		-0.741	
	X ₉	-0.955	0.086	0.089	0.307		

3 讨 论

3.1 株高及基部节间性状与倒伏指数的关系

本研究对株高及重心高度聚类后的水稻核心种质资源进行分析,结果表明:株高及重心高度较高的水稻种质抗倒伏能力相对于株高及重心高度低的水稻品种弱。在不同株高水稻种质群体中,株高易受环境影响。栽植密度是影响株高生长的因素之一^[23],高密度下倒伏指数表现出增大的趋势^[24]。田文涛等^[25]利用平均株高在 120 cm 以上的水稻品种得出株高与倒伏指数不具有显著相关性,可能是受基部抗折力的负向间接作用影响。

本研究中水稻基部节间性状与倒伏指数的相关性表明,基部第 1 节间的壁厚及秆型指数均与倒伏指数极显著负相关,与前人的研究结果^[11,26]一致。在生产过程中提高水稻的抗倒伏能力,可通过喷施稀效唑等植物生长延缓剂^[27],增加植株基部茎秆粗度和壁厚,改善基部节间秆型指数。

水稻茎秆的基部抗折力在不同株高群体及栽培条件下,均表现出对水稻抗倒伏的积极作用,提高基部抗折力是最有效增强水稻抗倒伏能力的途径之一。前人从遗传、栽培方面对茎秆强度进行了研究,发现 SCM2 能增强水稻茎秆强度^[28],BC-n 能显著增加植物载质量^[29],栽培过程中,硅肥、钾肥配合施用能增大基部节间的物理强度^[30],乙烯利处理水稻能增加茎秆贮藏物质,增强茎秆韧性^[31]。

3.2 田间试验和盆栽试验对水稻倒伏性状研究的可行性

对比田间、盆栽 2 种栽培方式,田间种植能真实反映水稻的生长潜力和水稻群体抗倒伏能力,株高及重心高度较高的水稻群体倒伏指数显著大于盆栽种植,且群体倒伏指数超出临界值^[19],在田间条件

下有利于筛选个体和群体抗倒伏表现良好的水稻材料。盆栽试验能减少水稻个体间生长环境差异的影响,能配合现代栽培设施、农艺性状检测设备使用,如高通量检测水稻株型建模,进一步挖掘分蘖角度对水稻抗倒伏的影响^[32],为设施农业、现代化农业发展提供参考。

参考文献 References

- [1] 赵新勇,邵在胜,吴艳珍,等.花后人为模拟倒伏对超级稻生长、产量和品质的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(7):980-989.ZHAO X Y,SHAO Z S,WU Y Z,et al.Influence of artificial lodging at grain-filling stage on plant growth, yield and quality of super rice[J].Chinese journal of eco-agriculture, 2018,26(7):980-989 (in Chinese with English abstract).
- [2] 敖礼林.水稻倒伏的危害与综合管控[J].科学种养,2018(6):17-18.AO L L.The harm of rice lodging and its comprehensive control[J].Scientific cultivation,2018(6):17-18(in Chinese).
- [3] JIANG M, YAMAMOTO E, YAMAMOTO T, et al. Mapping of QTLs associated with lodging resistance in rice (*Oryza sativa* L.) using the recombinant inbred lines derived from two high yielding cultivars, Tachisugata and Hokuriku 193 [J]. Plant growth regulation, 2019, 87(2):267-276.
- [4] 赖上坤,陈春,赖尚科,等.水稻主要农艺性状和抗倒性的基因型差异及其相互关系[J].核农学报,2018,32(7):1256-1266. LAI S K, CHEN C, LAI S K, et al. Genotypic differences and correlations between rice main agronomic traits and lodging-resistance[J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2018, 32(7):1256-1266 (in Chinese with English abstract).
- [5] 涂从勇,王丰.绿色革命六十载,天下粮安系终生——半矮秆水稻之父黄耀祥院士的学术成就回顾[J].广东农业科学,2019,46(9):1-7. TU C Y, WANG F. Sixty years' devotion to green revolution and a life time commitment to food security: review on the academic achievements of Huang Yaoxiang, father of semi-dwarf rice breeding[J]. Guangdong agricultural sciences, 2019, 46(9):1-7(in Chinese with English abstract).

- [6] 程式华,翟虎渠.杂交水稻超高产育种策略[J].农业现代化研究,2000(3):147-150,154.CHENG S H, QU H Q. Breeding strategies for superior high-yielding in hybrid rice[J]. Research of agricultural modernization, 2000(3): 147-150, 154 (in Chinese with English abstract).
- [7] PENG S, CASSMAN K G, VIRMANI S S, et al. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential[J]. Crop science, 1999, 39(6): 1552-1559.
- [8] YANG W, PENG S B, LAZA R C, et al. Grain yield and yield attributes of new plant type and hybrid rice[J]. Crop science, 2007, 47(4): 1393-1400.
- [9] 关玉萍,沈枫.水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及对产量的影响[J].吉林农业科学,2004,29(4):6-11. GUAN Y P, SHEN F. Effect of lodging resistance on yield of rice and its relationship with stalk physical characteristics[J]. Journal of Jilin agricultural sciences, 2004, 29(4): 6-11 (in Chinese with English abstract).
- [10] 章忠贵,刘斌美,许学,等.水稻株高突变系的农艺性状与抗倒伏研究[J].核农学报,2010,24(3):430-435. ZHANG Z G, LIU B M, XU X, et al. Agronomic characters and lodging resistance of plant height mutants of rice[J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2010, 24(3): 430-435 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王文霞,周燕芝,曾勇军,等.不同机直播方式对南方优质晚籼稻产量及抗倒伏特性的影响[J].中国水稻科学,2020,34(1):46-56. WANG W X, ZHOU Y Z, ZENG Y J, et al. Effects of different mechanical direct seeding patterns on yield and lodging resistance of high-quality late Indica rice in south China[J]. Chinese journal of rice science, 2020, 34(1): 46-56 (in Chinese with English abstract).
- [12] GIRIJA R M, SATYANARAYANA P V, CHAMUNDESWARI N, et al. Molecular breeding of "Swarna" a mega rice variety for lodging resistance[J]. Molecular breeding, 2019, 39(4): 1-14.
- [13] ZHAO X Y, ZHOU N, LAI S K, et al. Elevated CO₂ improves lodging resistance of rice by changing physicochemical properties of the basal internodes[J]. Science of the total environment, 2019, 647: 223-231.
- [14] SAMADI A F, SUZUKI H, UEDA T, et al. Identification of quantitative trait loci for breaking and bending types lodging resistance in rice, using recombinant inbred lines derived from Koshihikari and a strong culm variety, Leaf Star [J]. Plant growth regulation, 2019, 89(1): 83-98.
- [15] 易艳红,王文霞,曾勇军,等.人工模拟机械开沟穴直播提高早籼稻茎秆抗倒伏能力及产量[J].中国农业科学,2019,52(15):2729-2742. YI Y H, WANG W X, ZENG Y J, et al. Artificial simulation of hill-drop drilling mechanical technology to improve yield and lodging resistance of early season indica rice [J]. Scientia agricultura sinica, 2019, 52(15): 2729-2742 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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 G H, DENG H B, ZHANG G L, 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 (in Chinese with English abstract).
- [17] 石世杰,李纯杰,曹湊贵,等.稻虾共作模式下不同播种期对水稻产量和品质的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(2):25-32. SHI S J, LI C J, CAO C G, et al. Effects of different sowing date on yield and quality of high quality rice in rice-crayfish ecosystem [J]. 2020, 39(2): 25-32 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王秀凤,党立华,都华,等.水稻茎秆抗倒性构成因素的研究[J].北方水稻,2008(2):16-21,39. WANG X F, DANG L H, DU H, et al. Studies on the composition of lodging resistance in rice [J]. North rice, 2008(2): 16-21, 39 (in Chinese with English abstract).
- [19] 瀨古秀生.水稻の倒伏に関する研究[J].九州農業試験場彙報,1962(7):419-495. HIDEO S. Study on lodging of rice [J]. Kyushu agricultural experiment station dictionary, 1962(7): 419-495 (in Japanese with English abstract).
- [20] 华泽田,郝宪彬,沈枫,等.东北地区超级杂交粳稻倒伏性状的研究[J].沈阳农业大学学报,2003(3):161-164. HUA Z T, HAO X B, SHEN F, et al. Lodging traits of north japonica super hybrid rice [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2003(3): 161-164 (in Chinese with English abstract).
- [21] OOKAWA T, ISHIHARA K. Varietal differences of physical characteristics of the culm related to lodging in paddy rice [J]. Japanese journal of crop science, 1992, 61: 419-452.
- [22] 孙华卫,张道荣,刘先斌,等.襄阳市小麦产量与主要农艺性状的通径分析[J].湖北农业科学,2018,57(S2):23-26. SUN H W, ZHANG D R, LIU X B, et al. Path analysis between wheat yield and main agronomic traits in xiangyang city [J]. Hubei agricultural sciences, 2018, 57(S2): 23-26 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李思平,丁效东,向丹,等.氮肥水平与栽植密度互作对不同生育期水稻生长及产量的影响[J].华北农学报,2019,34(4):174-182. LI S P, DING X D, XIANG D, et al. Effects of interaction between nitrogen application level and planting density on growth and yield of rice at different growth stages [J]. Acta agriculturae boreali-sinica, 2019, 34(4): 174-182 (in Chinese with English abstract).
- [24] 徐富贤,蒋鹏,周兴兵,等.多效唑对杂交中稻不同密肥群体产量和抗倒伏性的影响[J].核农学报,2020,34(5):1088-1096. XU F X, JIANG P, ZHOU X B, et al. Effects of paclobutrazol on yield and lodging resistance with different dense-fertilizer population in mid-season hybrid rice [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2020, 34(5): 1088-1096 (in Chinese with English abstract).
- [25] 田文涛,邵平,王隼,等.超级杂交稻茎秆形态结构及其与抗倒性的关系研究[J].杂交水稻,2017,32(2):67-71,81. TIAN W T, SHAO P, WANG Y, et al. Stem morphological structure and

- its relation to lodging resistance of super hybrid rice[J].Hybrid rice,2017,32(2):67-71,81(in Chinese with English abstract).
- [26] 郭长春,张桥,孙永健,等.不同产量水平的杂交水稻品种穴直播茎秆抗倒特性及其差异性比较[J].浙江大学学报,2019,45(2):143-156.GUO C C, ZHANG Q, SUN Y J, et al. Comparison of stem lodging resistance characteristics and differences of indica hybrid rice cultivars with different yield levels in precision direct seeding[J].Journal of Zhejiang University(agriculture and life sciences), 2019, 45(2): 143-156 (in Chinese with English abstract).
- [27] 萧长亮,解保胜,王安东,等.氮和稀效唑调控对寒地水稻倒伏和产量的影响[J].作物杂志,2017(6):96-103.XIAO C L, XIE B S, WANG A D, et al.Effects of nitrogen and uniconazole regulation on lodging resistance and yield of rice in cold region[J]. Crops,2017(6):96-103(in Chinese with English abstract).
- [28] OOKAWA T, HOBO T, YANO M, et al. New approach for rice improvement using a pleiotropic QTL gene for lodging resistance and yield[J/OL]. Nature communications, 2010, 1: 132 [2020-06-08]. <https://scite.ai/reports/10.1038/ncomms1132>.
- [29] 饶玉春,徐娜,胡江,等.水稻控制茎秆强度基因 *BC-n* 及其应用;CN109321580A[P]. 2019-02-12.RAO Y C, XU N, HU J, et al. Rice stalk strength gene *BC-n* and its application; CN109321580A[P].2019-02-12(in Chinese).
- [30] 何巧林,张绍文,李应洪,等.硅钾配施对水稻茎秆性状和抗倒伏能力的影响[J].杂交水稻,2017,32(1):66-73. HE Q L, ZHANG S W, LI Y H, et al.Effects of silicon and potassium fertilizer combination on stem traits and lodging resistance of rice[J]. Hybrid rice, 2017, 32(1): 66-73 (in Chinese with English abstract).
- [31] 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 (in Chinese with English abstract).
- [32] WU D, GUO Z L, YE J L, et al. Combining high-throughput micro-CT-RGB phenotyping and genome-wide association study to dissect the genetic architecture of tiller growth in rice[J]. Journal of experimental botany, 2019, 70(2): 545-561.

Stem lodging resistance of rice core germplasm

YUAN Xinjie¹, LIU Xia², CHEN Guoxing¹

1. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract In order to explore the effects of different plant height, center of gravity height and basal stem traits on lodging resistance of rice, 10 traits of 533 rice core germplasm under two cultivation modes including pot culture and field culture were analyzed with correlation and path analysis. The results showed that the first internode wall thickness and basal stem breaking-resistant strength of the low-plant rice had synergy on the lodging index, indicating that improving lodging resistance of low-plant rice should focus on the first internode stem thickness and wall thickness. The lodging of high-plant rice is more affected by plant height and height of gravity center, indicating that improving lodging resistance of high-plant rice should concentrate in the second internode stem thickness. The improvement of lodging resistance of rice germplasm with different plant height can be achieved by enhancing the bending strength of rice basal stem. It will provide an important reference for improving lodging resistance of rice with different plant height.

Keywords rice; core germplasm; lodging index; path analysis; lodging resistance genetic improvement; diversity cultivated rice; population lodging resistance; individual lodging resistance

(责任编辑:张志钰)