

# 行穴距配置对不同穗型粳稻抗倒伏性的影响

李小朋 王 术 黄元财 贾宝艳 王 岩

沈阳农业大学农学院/农业部东北水稻生物学与遗传育种重点实验室, 沈阳 110866

**摘要** 以辽宁稻区 3 种穗型常规稻品种及杂交稻为试材, 设置 3 种行距、2 种穴距, 研究行穴距配置影响下蜡熟期水稻茎秆物理性状、力学性状及穗型因子与抗倒伏性的关系。结果表明: 行、穴距同时影响水稻茎秆物理性状和穗型性状, 进而使不同穗型水稻品种表现出抗倒伏能力的强弱; 20 cm 穴距下弯穗杂交稻辽优 52210 株高显著升高且抗折力显著下降, 是其倒伏指数较高的主要因素; 沈稻 47 和沈稻 6 号在 25 cm×20 cm 配置下, 植株株高、基部 N2 节间至顶长度和鲜质量、穗颈角、穗长、单穗鲜质量、穗重心明显下降, 倒伏指数降低; 在 35 cm×15 cm 配置下, 3 个水稻品种植株横截面积和抗折力显著高于其他配置, 倒伏指数较低。从穗型角度分析, 沈稻 47 和沈稻 6 号植株抗倒性对行穴距配置变化的适应能力强于辽优 52210。各品种在 25 cm×15 cm、30 cm×20 cm、35 cm×20 cm 配置下穗颈角显著增大, 且后 2 种行穴配置下单穗鲜质量和穗长增加, 穗重心升高, 均会使倒伏指数显著增加。综合来看, 在高密度和低密度行穴距配置下, 抗折力和节间弯矩分别成为倒伏指数增加的诱导因子, 水稻分别受到倒伏和单位面积穗数的限制而无法获得高产稳产。因此, 提高水稻的抗倒伏能力应以增加茎秆基部的抗折力为主攻目标; 品种选择时, 应选择节间弯矩适宜的品种, 可以在保证较大生物量的同时提升抗倒性。

**关键词** 水稻; 行穴距; 抗倒伏性; 倒伏指数; 穗型

**中图分类号** S 511.104 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2016)02-0015-08

水稻移栽的行、穴距是影响水稻中后期群体质量及产量的关键因素之一。自 20 世纪 60 年代以来, 辽宁省水稻生产受日本稻作的影响, 行距一直为 30 cm, 穴距变化较多, 为 10~20 cm。行、穴距过大, 群体露光严重, 造成光能利用率下降<sup>[1-2]</sup>; 行、穴距过小, 个体发育不良, 易发生倒伏<sup>[3]</sup>。随着株型理想的常规品种及杂种优势较强的杂交稻的广泛应用, 需要探讨适宜的行、穴距对水稻倒伏能力的影响。辽宁粳稻区水稻倒伏多以茎秆倒伏居多<sup>[4]</sup>。相关研究表明, 水稻茎秆抗倒性既与穗质量、穗颈角、穗长等穗型特征有关, 还受株高、重心高度、茎基粗度、节间鲜质量和基部节间长度等物理性状和茎秆横切面积、茎壁厚度、茎秆中大小维管束数目及面积等内部解剖结构的影响<sup>[5-8]</sup>。此外, 茎秆中结构性及非结构性碳水化合物、微量元素硅等化学成分的含量也与茎秆抗倒性关系密切<sup>[9-11]</sup>。栽培措施中, 移栽密度和水分运筹对植株倒伏影响最为显著<sup>[12]</sup>。

蜡熟期是倒伏发生与否的关键时期, 且该时期倒伏会导致减产 21%<sup>[5]</sup>。本研究参考国内外水稻生产中的行穴距配置, 以不同穗型粳稻品种及杂交稻为试材, 研究水稻在行穴距配置下抗倒性的差异, 以期探明栽培措施对水稻抗倒性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于沈阳农业大学水稻试验田进行(数据测定时间为 2013 和 2014 年), 以直立穗型品种沈稻 47、半直立穗型品种沈稻 6 号及弯曲穗型杂交稻辽优 52210 为试材, 穗型以成熟期穗颈角大小为标准进行划分<sup>[13]</sup>: 直立穗型为小于 30°, 半直立穗型为 30~60°, 弯穗型为大于 60°。

试验采用三因素裂区设计, 行距配置为主区, 穴距配置为副区, 品种为副副区。行距为 3 个水平, 即 25、30 和 35 cm; 穴距为 2 个水平, 即 15 cm 和 20

收稿日期: 2015-03-27

基金项目: 国家农业科技成果转化基金项目(2011GB2B000006); 辽宁省百千万人才工程基金项目(2012921026); 东北老工业地区大学农业科技服务关键技术继承与示范项目(2013BAD20B08)

李小朋, 硕士研究生。研究方向: 水稻高产优质高效栽培。E-mail: lixiaopeng16@126.com

通信作者: 王 术, 博士, 教授。研究方向: 作物栽培生理。E-mail: wangshusl@126.com

cm。3 次重复,小区宽 3 m,长 6 m,每穴 2~3 苗。4 月 18 日播种,5 月 26 日移栽。试验地土质为壤土,肥力中等,井水灌溉。肥料用量:每  $\text{hm}^2$  施纯 N 185 kg,  $\text{P}_2\text{O}_5$  90 kg,  $\text{K}_2\text{O}$  80 kg。60% 氮肥及全部磷、钾肥作基肥施;氮肥 20% 作返青肥施,20% 作分蘖肥施。田间管理同当地大田生产。

## 1.2 测定项目及方法

于齐穗后 40 d(9 月 20 日为蜡熟期),每小区按平均茎蘖数,取样 5 穴,每穴随机选取 4 个单茎,保留叶鞘、叶片和穗,保持不失水。用植株茎秆强度测定仪(型号 YYD-1,托普仪器有限公司,杭州)测定节间抗折力<sup>[14]</sup>。测定方法:将植株茎秆(留鞘)节间中点与测定仪中点对齐,支点间距 5 cm,向节间中点缓慢施加压力至其折断,折断瞬间的力为该节间的抗折力。从基部向上第 1、第 2、第 3、第 4、第 5 节间用 N1、N2、N3、N4、N5 表示。除 N1 和 N5 节间外,分别测定各节间抗折力。同时测定植株物理性状和穗部性状,物理性状包括:株高、N2 和 N3 节间基部至穗顶的长度(简称节间至顶长)、N2 和 N3 节间至顶鲜质量(简称节间至顶鲜质量),用游标卡尺测定节间粗度(分为长外径和短外径)。穗部性状包括:穗颈角、穗长、穗质量、单穗鲜质量。

## 1.3 数据处理

按瀨古秀生等<sup>[14]</sup>的方法计算各节间的节间弯矩(bending moment)、抗折力(breaking resistance)和倒伏指数(lodging index)。采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据分析,用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析。

2013 年及 2014 年试验均测定节间性状、穗型因子和产量等指标,方差分析显示 2 a 数据差异不显著。为了便于分析,下文以 2 a 数据的平均值进行分析。如无特殊说明,文中密植指的是  $25\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  的配置,稀植指的是  $30\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  和  $35\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  的行穴距配置。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同行穴距配置对水稻茎秆抗倒伏能力的影响

3 种穗型水稻品种茎秆的抗折力均表现为  $\text{N}2 > \text{N}3 > \text{N}4$ ,即基部节间其抗倒伏能力强于上部节间(表 1)。但品种间抗折能力却随行穴距的变化而不同。直立(沈稻 47)和半直立品种(沈稻 6 号)的抗折力变化规律为:穴距一定时,抗折力随着行距的增

加而显著增加;同样地,行距一定时,抗折力随着穴距的增加显著增加。弯穗品种(辽优 52210)在同穴距下,抗折力变化趋势与其他 2 个品种相似,但在行距一定时,随着穴距的增加抗折力反而显著降低。3 种穗型水稻品种节间弯矩的变化规律为:穴距一定时,随着行距的增加节间弯矩增加;行距一定时,随着穴距的增加节间弯矩增加。3 种穗型品种的节间弯矩为辽优 52210 最大,沈稻 47 次之,沈稻 6 号最小。

3 种穗型水稻中,沈稻 6 号的倒伏指数最小,辽优 52210 最大,沈稻 47 居于二者之间。这与节间弯矩呈现的规律性相一致,说明节间弯矩是决定各水稻品种间倒伏指数差异的重要因素。同一品种在不同行穴距配置下,各节间的倒伏指数差异显著。3 种穗型水稻在行穴距为  $25\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  时,由于 N2、N3 节间抗折力较低导致倒伏指数显著升高。3 种穗型水稻在行穴距  $35\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  时,由于节间弯矩显著增加但抗折力增幅较小导致 N2、N3 节间倒伏指数显著上升。特殊的是,由于辽优 52210 在  $20\text{ cm}$  穴距时节间弯矩显著增加而节间抗折力增幅较少甚至不增加,因此,导致倒伏指数显著增加。综上,在本研究条件下,高行距且高穴距的低密度行穴距配置、低行距且低穴距的高密度行穴距配置,均不利于水稻抗倒伏。

## 2.2 不同行穴距配置下水稻基部节间物理性状及其与抗倒性的关系

行穴距配置对水稻茎秆物理性状影响显著(表 2)。对于株高,3 种穗型水稻品种在不同行穴距配置下的表现并不一致。直立和弯穗品种在同等穴距下,株高随着行距的增加而增加;在同等行距下,株高随着穴距的增加而增加。半直立品种在同等穴距下的株高随着行距的增加呈先升高后降低的趋势;在同等行距下株高差异不显著。3 种穗型水稻品种在行穴距调控下节间至顶长与株高呈现出相似的变化规律。相关分析表明,株高与倒伏指数呈极显著正相关(表 3)。辽优 52210 在  $20\text{ cm}$  穴距下,由于株高显著升高使其节间弯矩随之升高而导致倒伏指数显著增大,但株高只是影响因素之一,其节间抗折力下降也是导致倒伏指数升高的主要原因。N2、N3 节间至顶长与节间弯矩、倒伏指数均呈显著正相关,说明基部 N2 和 N3 之中某一节间长度的增加对倒伏指数影响不大,但节间至顶长的增加会使倒伏指数显著增大。节间至顶鲜质量与基部 N2、

表 1 不同行穴距配置下水稻各节间抗折力、节间弯矩和倒伏指数

Table 1 Breaking resistance, bending moment and lodging index of internode in rice with different row-hill spacing

品种 Cultivars	行距×穴距/ cm×cm Row-hill spacing	抗折力/g Breaking resistance			节间弯矩/(g·cm) Bending moment			倒伏指数/% Lodging index		
		N2	N3	N4	N2	N3	N4	N2	N3	N4
I	25×15	816.7c	628.8c	421.4d	1 487.6c	1 146.9cd	767.4bc	145.9a	145.9a	145.7a
	30×15	896.6c	622.3c	473.7c	1 363.3d	1 064.6d	691.2c	121.8b	136.9b	116.9b
	35×15	1 257.7b	798.7b	568.4b	1 752.9b	1 313.7b	854.2b	111.6cd	131.6b	120.2b
	25×20	1 176.0b	803.6b	491.6c	1 538.8c	1 220.9c	778.9bc	104.7de	121.6c	126.8b
	30×20	1 228.3b	795.4b	591.3b	1 497.6c	1 155.0c	766.4bc	97.6e	116.2c	103.7c
	35×20	1 344.2a	947.3a	666.4a	1 945.8a	1 548.4a	1 054.5a	115.9bc	130.8b	126.5b
II	25×15	583.1c	333.2d	143.7c	990.3b	756.2b	468.0c	136.2a	181.9a	264.2a
	30×15	1 058.4a	699.1b	423.0a	1 247.4a	976.2a	649.8a	94.3c	111.8bc	123.0b
	35×15	1 061.7a	811.8a	470.4a	1 324.6a	1 003.0a	651.9a	99.9bc	98.9c	111.2b
	25×20	720.3b	496.5c	328.3b	987.5b	708.5b	420.2c	109.7b	114.4bc	102.4b
	30×20	1 038.8a	713.0b	441.0a	1 327.2a	959.3a	576.5b	102.2bc	108.2bc	104.6b
	35×20	776.7b	622.3	360.2b	1 253.4a	943.0a	564.3b	129.3a	121.8b	125.9b
III	25×15	833.0c	398.5d	212.4c	1 649.5d	1 195.7bc	646.7b	158.6c	241.8a	245.5a
	30×15	1 091.1a	705.6a	384.7a	1 845.6bc	1 339.7ab	746.0a	135.5d	152.1c	156.3c
	35×15	950.6b	633.7b	408.3a	1 703.2cd	1 247.7b	731.7a	143.4cd	158.0c	144.0c
	25×20	707.2d	413.2d	207.6c	1 566.7d	1 058.4c	601.6b	177.1b	206.8b	232.3a
	30×20	829.7c	486.7c	310.3b	1 912.8ab	1 339.1ab	770.4a	184.7b	221.3ab	199.6b
	35×20	802.0c	527.5c	318.5b	2 024.8a	1 423.7a	796.1a	202.1a	217.0ab	200.5b

注：I. 沈稻 47；II. 沈稻 6 号；III. 辽优 52210；N2~N4 分别表示基部向上第 2 至第 4 节间；同一栏中数据后跟不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。下同。Note: I. Shendao 47; II. Shendao 6; III. Liaoyou 52210; N2-N4 indicate from the second internode to the fourth internode upward the base, respectively. Values within a column followed by a different small letter are significantly different at 5% level. The same as follows.

表 2 不同行穴距配置下水稻品种茎秆节间物理性状

Table 2 The different row-hill between the cultivars of rice stalk internode physical properties

品种 Cultivars	行距×穴距/ cm×cm Row-hill spacing	株高/cm Panicle height	节间至顶长/cm Internode length to top		节间至顶鲜质量/g Fresh weight of internode		截面面积/mm <sup>2</sup> Area of cross section	
			N2	N3	N2	N3	N2	N3
I	25×15	109.5a	90.8a	73.3a	13.9d	12.1d	20.7c	16.7d
	30×15	105.5b	87.2b	69.8b	14.7cd	12.6cd	22.6bc	18.6d
	35×15	107.0b	88.5b	70.8b	17.2b	15.0b	27.2a	21.9b
	25×20	106.6b	91.7a	73.7a	14.8cd	12.7cd	22.4bc	19.8cd
	30×20	109.9a	88.5b	70.3b	15.1c	13.2c	24.7b	20.8bc
	35×20	109.2a	91.5a	73.5a	18.7a	16.6a	28.6a	24.6a
II	25×15	105.8c	86.8bc	67.2d	10.1c	8.7d	13.9c	11.4c
	30×15	109.7a	91.7a	77.0a	12.3b	10.6c	18.0b	15.0b
	35×15	105.6c	87.5bc	70.8c	13.4a	11.5b	19.9a	17.2a
	25×20	107.1bc	85.0c	67.3d	10.8c	9.4d	16.8b	14.9b
	30×20	109.4ab	88.7abc	70.8c	13.6a	11.6ab	17.5b	15.8b
	35×20	105.6c	90.2ab	73.8b	13.6a	12.3a	20.9a	18.0a
III	25×15	117.3c	104.7c	92.0bcd	15.8bc	13.0cd	23.9d	16.8e
	30×15	116.9c	104.0c	90.5d	16.2b	13.6bc	24.9cd	19.1d
	35×15	118.5c	104.8c	92.3bc	17.7a	14.8ab	29.4b	23.7b
	25×20	120.1b	108.3b	91.2cd	14.9c	12.0d	25.3cd	21.7c
	30×20	122.4ab	109.0b	93.3b	17.6a	14.5ab	26.0c	22.2bc
	35×20	124.5a	112.0a	95.7a	18.1a	15.0a	34.9a	28.3a

N3 节间的节间弯矩呈极显著正相关。此外,与抗折力和倒伏指数均呈不同程度的正相关。

水稻截面面积是水稻茎秆粗壮程度的体现。直立品种在同等穴距下,基部 N2、N3 节间的截面面积随着行距的增加呈先降低后升高的趋势;半直立品种在同等穴距下,基部 N2、N3 节间截面面积随着行距的增加呈现先增加后降低的趋势;弯穗品种在同等穴距下,基部 N2、N3 节间的截面面积随着行距和穴距的增加均增大。试验结果表明:截面面积与抗

折力呈不显著正相关,与节间弯矩呈极显著正相关,与 N2 节间倒伏指数呈显著正相关。说明,截面面积的增加使节间鲜质量显著增加,从而增加节间弯矩,进而增大节间倒伏指数。在 25 cm×15 cm 的行穴距配置下,由于截面面积过小而导致茎秆过细,抗折力显著下降。此外,3 种穗型水稻品种均存在截面面积较大或较小但其抗倒伏能力较强的配置,即不同水稻品种截面面积与倒伏指数并没有一致性的规律。

表 3 倒伏指数、节间弯矩、抗折力与茎秆主要物理性状的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of breaking resistance, bending moment and lodging index and main physical characteristics of culm

物理性状 Physical characteristics	节间 Internode	抗折力 Breaking resistance		节间弯矩 Bending moment		倒伏指数 Lodging index	
		N2	N3	N2	N3	N2	N3
		株高 Panicle height		-0.23	-0.40	0.69**	0.51*
节间至顶长 Internode length to top	N2	-0.24		0.70**		0.85**	
	N3		-0.37		0.53*		0.77**
节间至顶鲜质量 Fresh weight of internode	N2	0.47*		0.99**		0.43	
	N3		0.46*		0.97**		0.23
截面面积 Area of cross section	N2	0.27		0.85**		0.52*	
	N3		0.22		0.76**		0.29

注:\*,\*\* 分别表示相关达显著和极显著水平。下同。Note:\*,\*\* significantly correlated at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as in the tables below.

### 2.3 不同行穴距配置下水稻穗型因子及其与抗倒性的关系

除茎秆外,穗部性状同样受到行株距配置的显著影响(表 4)。3 种穗型水稻品种在 15 cm 的低穴距下,均表现为随着行距的增大穗颈角降低的趋势,

但未达到显著水平;在 20 cm 的高穴距下则表现为随着行距的增大穗颈角呈上升的趋势,同样未达到显著水平。特别的是,在极低的密度下,水稻穗颈角基本不发生变化,即随着密度的增大,穗颈角呈先下降而后上升的趋势。

表 4 行穴距配置对水稻穗型因子的影响

Table 4 Effect of row-hill spacing on panicle factors of rice

行距× 穴距/ cm×cm Row-hill spacing	I				II				III			
	穗颈角/(°) Neck- panicle angle	穗重心/cm Panicle barycenter	单穗鲜 质量/g Fresh panicle mass	穗长/cm Panicle length	穗颈角/(°) Neck- panicle angle	穗重心/cm Panicle barycenter	单穗鲜 质量/g Fresh panicle mass	穗长/cm Panicle length	穗颈角/(°) Neck- panicle angle	穗重心/cm Panicle barycenter	单穗鲜 质量/g Fresh panicle mass	穗长/cm Panicle length
25×15	27.7a	11.7b	4.5b	17.3d	55.0a	9.5d	3.3d	15.8c	82.6a	14.5b	5.3b	25.7c
30×15	23.7ab	11.4c	5.4a	18.0c	41.5b	10.5a	3.5c	16.9b	78.2ab	13.8c	5.5ab	25.9bc
35×15	20.7b	12.0a	5.5a	18.4b	32.5c	10.2bc	3.6c	16.8b	68.5b	14.2b	5.8a	25.2c
25×20	17.3b	11.8ab	5.3a	18.9b	39.0bc	8.5e	3.4c	17.8a	70.5b	13.8c	5.5ab	25.4c
30×20	20.5b	11.9ab	5.4a	18.7b	45.8b	10.2ab	3.7b	17.1b	76.8ab	14.6b	5.8ab	26.5a
35×20	20.5b	11.8ab	5.5a	19.5a	44.5b	9.9c	3.8a	18.1a	76.8ab	15.3a	5.8a	26.2b

直立和弯穗品种在同等穴距下,穗重心表现为随着行距的增加呈上升趋势,但未达到显著水平。特殊的是,在 25 cm×15 cm 配置下,2 种水稻品种穗重心上升且穗颈角显著增大,半直立品种的穗颈角同样显著增大。说明由于空间不足,水稻在高密度下穗颈角会增大。不同的是,半直立品种的穗重

心在同等穴距下,表现为先上升后显著下降的趋势;在同等行距下,随着穴距的增加穗重心呈不显著的下陷趋势。

相同穴距下,3 种穗型水稻单穗鲜质量表现为:随着行距的增加单穗鲜质量显著增加;同等行距处,随着穴距的增加单穗鲜质量同样显著增加。在同等

穴距下,3 种穗型水稻品种的穗长均呈现随着行距的升高而升高的趋势,在同等行距下穗长随着穴距的增加而增加。即种植密度越小,单穗鲜质量越大且穗长越长,而且差异显著。

相关分析表明,穗颈角与 N2、N3 节间抗折力呈显著负相关,与 N2、N3 节间倒伏指数呈显著性正相关(表 5)。穗长、穗重心和单穗鲜质量均与 N2、N3 节间的节间弯矩和倒伏指数呈极显著正相关。说明

穗部性状的改变对节间弯矩影响很大,穗长、穗重心高度和单穗鲜质量的增加均会使节间弯矩显著增加,而其对抗折力影响较小,进而使倒伏指数显著增大。在 20 cm 的高穴距下,30 cm 和 35 cm 的中高行距使穗颈角显著增大,穗长显著增加,穗重心显著上升并且单穗鲜质量显著增大,此 4 项穗部性状均使倒伏指数增加。而 25 cm×15 cm 的配置使穗颈角显著增加同样会增加倒伏风险。

表 5 节间弯矩、倒伏指数和抗折力与穗型因子的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between breaking resistance, bending moment, lodging index and panicle type factors

穗型因子 Panicle type factors	抗折力 Breaking resistance		节间弯矩 Bending moment		倒伏指数 Lodging index	
	N2	N3	N2	N3	N2	N3
穗颈角 Neck-panicle angle	-0.52*	-0.67**	0.33	0.13*	0.75**	0.78**
穗长 Panicle length	-0.15	-0.36	0.72**	0.60**	0.79**	0.81**
穗重心 Panicle barycenter	-0.10	-0.30	0.83**	0.69**	0.75**	0.74**
单穗鲜质量 Fresh panicle weight	0.30	0.10	0.72**	0.60**	0.79**	0.81**

### 2.4 不同行穴距配置对水稻产量及其构成因素的影响

从产量及其构成因素分析(表 6),合理密植有助于获得高产。由于产量受到单位面积穗数、每穗粒数、千粒重、结实率等综合因素的影响,从整体上看,在每 m<sup>2</sup>保障 19 穴的基础上,处理间产量差异不显著。更低密度的行穴距配置无法保证足够的有效穗数,虽然穗粒数会有所增加,但同时千粒重和结实率也会受到行穴距增加的影响而下降,导致产量显

著降低。特殊的是,沈稻 47 在 25 cm×15 cm 的高密度行穴距配置下,每穗粒数和结实率的显著下降致使产量下降;沈稻 6 号在 30 cm×20 cm 的较低密度行穴距配置下,虽然单位面积穗数下降,但由于每穗粒数的增加而并没有使产量显著下降;辽优 52210 在 35 cm×15 cm 的宽行距配置下,单位面积穗数减少而使产量显著下降。相同的是,在行穴距配置为 30 cm×15 cm 和 35 cm×15 cm 时,3 个品种千粒重均较大。在行穴距配置为 25 cm×20 cm

表 6 不同行穴距配置对水稻产量及其构成因素的影响

Table 6 Effect of different row spacing on grain yield and its components of japonica rice

年份 Year	行距×穴距/ Row-hill spacing	I					II					III				
		产量/ Yield (t/hm <sup>2</sup> )	每 m <sup>2</sup> 有 效穗数 Valid panicles	每穗 粒数 Number per spikele	结实 率/% Seeding rate	千粒 重/g 1 000- grain weight	产量/ Yield (t/hm <sup>2</sup> )	每 m <sup>2</sup> 有 效穗数 Valid panicles	每穗 粒数 Number per spikele	结实 率/% Seeding rate	千粒 重/g 1 000- grain weight	产量/ Yield (t/hm <sup>2</sup> )	每 m <sup>2</sup> 有 效穗数 Valid panicles	每穗 粒数 Number per spikele	结实 率/% Seeding rate	千粒 重/g 1 000- grain weight
2013	25×15	9.70bc	408.9a	150.3c	88.1c	25.4ab	9.98a	448.9a	118.2d	89.5bc	24.8ab	10.64a	315.6ab	142.1d	89.5bc	24.8ab
	30×15	10.78a	377.74b	152.8bc	90.2b	25.8a	9.59ab	403.7b	124.8cd	89.2bc	25.2a	10.67a	296.6ab	143.9d	89.2bc	25.3a
	35×15	10.59ab	339.7c	154.5bc	90.2ab	25.5ab	9.56ab	327.1d	133.0bc	91.7ab	25.4a	9.97bc	298.5ab	162.2c	91.7ab	25.2a
	25×20	10.24abc	373.3b	164.4b	92.1a	25.5ab	9.67ab	370.0bc	124.9cd	93.1a	24.9ab	10.53ab	323.3a	199.6b	93.1a	25.2a
	30×20	9.79bc	331.1c	171.1ab	90.6ab	25.4ab	9.34ab	347.3cd	137.7ab	90.8ab	24.5bc	9.52c	297.3ab	209.0b	90.8ab	24.3b
2014	35×20	9.56c	327.8c	185.4a	89.6bc	25.2b	9.13b	307.2d	145.4a	87.7c	24.0c	9.66c	278.7b	228.1a	87.7c	24.8ab
	25×15	9.62bc	402.6a	149.3bc	87.4c	25.3ab	9.93a	446.9a	124.9b	89.2bc	24.9ab	10.61a	311.4ab	143.1d	89.3bc	24.8ab
	30×15	10.65a	372.44b	150.8bc	89.7b	25.6a	9.62ab	402.7b	125.2b	89.1bc	25.3a	10.69a	299.9ab	162.7c	89.3bc	25.2a
	35×15	10.52ab	333.6c	151.5bc	90.1ab	25.5ab	9.55ab	347.1cd	136.8a	91.5ab	25.5a	9.94bc	294.7ab	169.3c	90.8a	25.1a
	25×20	10.16ab	368.9.3b	161.4b	91.6a	25.4ab	9.61ab	366.0bc	128.4b	92.7a	24.8ab	10.51ab	318.4a	197.4b	89.5ab	25.2a
	30×20	9.77bc	326.1c	164.1b	90.1ab	25.4ab	9.42ab	344.3cd	133.0a	90.4ab	24.6bc	9.68c	299.6ab	207.6b	90.3ab	24.6ab
	35×20	9.59c	321.2c	173.4a	89.3bc	25.2b	9.21b	311.2d	137.7a	88.6c	24.2c	9.65c	282.4b	222.5a	87.6c	24.8ab

时,结实率均较高。

### 3 讨论

倒伏指数受到节间抗折力和节间基部至顶长度和鲜质量的共同影响,在三者的共同作用下,使植株节间抗倒伏能力体现出强弱之分,其中节间至顶长度和鲜质量受到水稻节间和穗的共同影响。本研究发现,行穴距配置的变化对以上物理性状均会产生不同程度的影响。3种穗型水稻的节间弯矩为辽优52210最大,沈稻6号最小,沈稻47居中。而各品种间倒伏指数的差异规律与之相似。这说明在水稻品种间由于节间弯矩差异较大,而抗折力差异相对较小,因此,可将节间弯矩作为判断品种间倒伏指数差异的重要指标。

本研究没有测定基部N1节间的抗折力,由于水稻品种的基部第一节间一般短于5cm,且其抗折力较强。前人的研究表明,水稻倒伏多发生在基部向上第2、3节间<sup>[10]</sup>。分析发现,N4节间距离地面较高,其节间倒伏的发生对水稻产量和收获工作的影响相对较少,说明植株发生倒伏的薄弱环节主要发生在距地面约10~40cm处的基部第2至第3节间<sup>[13]</sup>。

本研究中,3种穗型水稻在行穴距为25cm×15cm和35cm×20cm时,N2、N3倒伏指数均显著升高。前者由于密度较大导致茎秆细弱致使抗折力下降,同时穗颈角显著增大致使其节间弯矩增加;而后者是由于节间至顶鲜质量和节间至顶长度的增加使节间弯矩显著增加但其抗折力增幅却较小,与此同时,穗部性状的变化同样使节间弯矩明显增大。因此,高行穴距和低行穴距的配置均不利于植株抗倒伏。此外,由于辽优52210在20cm穴距时节间弯矩显著增加但其节间抗折力增幅较少甚至不增加,从而导致倒伏指数显著增加。其中,节间弯矩的增大与其株高有关。

茎秆物理性状对植株倒伏影响显著<sup>[15-18]</sup>。其中,株高对植株倒伏发生与否具有较强的调控能力。对于株高与抗倒性的关系,不同研究者持有不同观点。杨惠杰等<sup>[5]</sup>、赵建明等<sup>[19]</sup>和董明辉等<sup>[20]</sup>认为倒伏指数与株高呈显著正相关。张忠旭等<sup>[21]</sup>认为株高与抗倒伏能力关系不明显。本研究发现,株高与倒伏指数呈极显著正相关。其中,杂交稻辽优52210在高穴距配置下株高显著上升,倒伏指数显

著升高;但常规粳稻品种的株高与抗倒伏能力无明显关系,行穴距配置下株高高低与否并不会直接导致倒伏指数增大或减少。

张忠旭等<sup>[21]</sup>、Kashiwagi等<sup>[22]</sup>认为抗倒伏能力与截面面积呈极显著正相关,李红娇等<sup>[13]</sup>认为截面面积对基部第1节间倒伏指数影响不大。本研究发现,基部N2、N3节间截面面积与倒伏指数呈显著正相关,试验中通过水稻倒伏指数与截面面积的对比分析可知,截面面积偏大或偏小均有可能使植株具有较强的抗倒伏能力。原因在于,本试验中,在低密度的行穴距配置下,截面面积通常较大。这会导致节间鲜质量增加,同时低密度也会对穗部性状产生影响,从而增加节间弯矩。在抗折力增幅有限的情况下,导致倒伏指数增大。因此,在本试验设置的6种组合下,截面面积不是倒伏发生与否的决定性因素。

前人研究认为在北方稻区直立穗型和半弯穗型粳稻抗倒伏能力要强于弯穗型粳稻<sup>[13,23-24]</sup>,本研究通过穗型比较可知,直立品种沈稻47、半直立品种沈稻6号和弯穗品种辽优52210均存在抗倒伏能力较强的行穴距配置,差别在于适应行穴距变化的能力不同。对行穴距配置间水稻穗部性状与倒伏指数的相关系数分析表明,水稻基部节间的抗倒伏特性与穗部性状关系密切。穗颈角、单穗鲜质量、穗长、穗重心高度在行穴距配置的调控下变化显著且对均倒伏指数有着明显影响。对于同一品种,在20cm的宽穴距下,30cm和35cm的中、高行距使穗颈角显著增大,穗长显著增加,穗重心显著上升且单穗鲜质量显著增大,使倒伏指数显著增加。此外,25cm×15cm的配置使穗颈角显著增加,倒伏风险增加。

从产量角度分析,合理密植有助于作物获得高产。产量受到构成因素的综合影响,而单位面积穗数是最主要的影响因素。本研究中,虽然30cm×20cm和35cm×20cm的行穴距配置可使水稻单穗粒数增加,但单位面积穗数的不足,使其产量显著降低。此外,千粒重的增加表明植株田间冠层分布良好且源库协调,而过度密植和稀植都会降低千粒重。

综合来看,行穴距配置的改变,对植株茎秆的物理性状影响显著,但各物理性状的改变不会都朝着有利茎秆抗倒伏的方向发生,因此,行穴距的改变使

植株同时具备有利和不利的物理性状,在力学性状的综合作用下,在整体上表现出抗倒性的强弱。虽然不同穗型水稻植株抗倒性对行穴距配置变化的适应能力不同,但都可以通过适宜的行穴距配置来提高抗倒伏能力。综合来看,3种穗型水稻品种在35 cm×15 cm配置下,抗倒性表现均较好且产量较高。这说明一定程度的密植对北方地区粳稻的稳产和抗倒伏能力的提升有利。当然,对于沈稻6和辽优52210也可以采用30 cm×15 cm的配置,这样可以通过增加单位面积穗数来增加产量。品种选育过程中,提升植株抗倒伏能力应以提升抗折力为主攻方向。由于降低株高会使生物学产量下降,选择适宜节间弯矩水稻品种,既可以降低株高从而使生物量下降的同时,又可以使倒伏指数处于抗倒性较强的范围之内。

本文探讨了行穴距配置与水稻基部节间抗折力、节间弯矩和倒伏指数的关系,不同行穴距配置下水稻植株茎秆的组织解剖结构、化学成分、根系生长特性有待进一步研究,同时,本研究每种穗型只选择一个品种,其他相同穗型水稻品种的抗倒性规律是否一致,仍需进一步试验研究。

### 参 考 文 献

- [1] 王健林,徐正进.穗型和行距对水稻冠层受光态势的影响[J].中国水稻科学,2005,19(5):422-426.
- [2] 孙永健,陈宇,孙园园,等.不同施氮量和栽插密度下三角形强化栽培杂交稻抗倒伏性与群体质量的关系[J].中国水稻科学,2012,26(2):189-196.
- [3] 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):2234-2243.
- [4] 苏仕华,王珏,孙成亮,等.水稻倒伏与产量影响的调查分析[J].北方水稻,2008,38(6):41-43.
- [5] 杨惠杰,杨仁崔,李义珍,等.水稻茎秆性状与抗倒性性状的关系[J].福建农业大学学报,2000,15(2):1-7.
- [6] 韩亚东,张文忠,徐正进,等.不同穗型不同行向水稻穗遮光问题理论研究[J].生态农业研究,2000,8(1):14-17.
- [7] 雷小龙,刘利,苟文,等.种植方式对杂交籼稻植株抗倒伏特性的影响[J].作物学报,2003,29(10):1814-1825.
- [8] 范存留,胡运高,杨国涛,等.重穗型杂交水稻植株抗倒伏性与茎秆物理性状的关系[J].贵州农业科学,2015,43(3):1-4.
- [9] 王端飞,李刚华,耿春苗,等.播插方式对超级粳稻宁梗3号产量及群体均衡性的影响[J].作物学报,2012,38(2):307-314.
- [10] 杨艳华,朱镇,张亚东,等.不同水稻品种抗倒伏能力与茎秆形态性状的关系[J].江苏农业学报,2011,27(2):231-235.
- [11] 郭玉华,朱四光,张龙步.不同栽培条件对水稻茎秆生化成分的影响[J].沈阳农业大学学报,2003,34(2):89-91.
- [12] 杨世民,谢力,郑顺林,等.氮肥水平和栽插密度对杂交稻茎秆理化特性与抗倒伏性的影响[J].作物学报,2009,35(1):93-103.
- [13] 李红娇,张喜娟,李伟娟,等.不同穗型粳稻品种抗倒伏性的比较[J].中国水稻科学,2009,23(2):191-196.
- [14] 瀬古秀生,佐本啓智,鈴木嘉一郎.水稻の倒伏に及ぼす二,三栽培条件の影響(II)[J].日本作物学会紀事,1959,27(2):173-176.
- [15] 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.
- [16] HIROSHI H. High-yielding Japonica rice cultivars perform best even at reduced nitrogen fertilizer rate[J]. Crop Science, 2003,43(3):921-926.
- [17] SETTER T L, LAURELES E V, MAZAREDO A M. Lodging reduces yield of Japonica rice by self-shading and reduction in canopy photosynthesis[J]. Field Crops Research, 1997,49(2):95-106.
- [18] KASHIWAGI T, SASAKI H, ISHIMARU K. Factors responsible for decreasing sturdiness of the lower part in lodging of Japonica rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant Prod Sci, 2005, 8: 166-172.
- [19] 赵建明,姜兴强,胡宁.水稻抗倒伏的材料学特性[J].北方水稻,2007(3):69-73.
- [20] 董明辉,张洪程,戴其根,等.不同粳稻品种倒伏指数及其相关农艺性状的分析[J].吉林农业大学学报,2003,25(2):120-123.
- [21] 张忠旭,陈温福,杨振玉,等.水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及其对产量的影响[J].沈阳农业大学学报,1999,30(2):81-85.
- [22] KASHIWAGI T, TOGAWA E, HIROTSU N, et al. Improvement of lodging resistance with QTLs for stem diameter in Japonica rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Theor Appl Genet, 2008, 117:749-757.
- [23] 张喜娟,李红娇,李伟娟,等.北方直立穗型粳稻抗倒性的研究[J].中国农业科学,2009,42(7):2305-2312.
- [24] OOKAWA T, ISHIHARA K. Varietal difference of physical characteristic of the culm related to lodging resistance in paddy Japonica rice[J]. Jpn J Crop Sci, 1992,61:419-425.

## Effects of row-hill spacing on lodging resistance of japonica rices with different panicles

LI Xiaopeng WANG Shu HUANG Yuancai JIA Baoyan WANG Yan

*College of Agronomy, Shenyang Agricultural University/Key Laboratory of Northeastern Rice Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture, Shenyang 110866, China*

**Abstract** The conventional and hybrid japonica rice cultivars in Liaoning Province with three panicle types and three row distances and two hill distances were used to study the effects of physic and mechanic features, panicle factors under various row-hill spacing on the lodging resistance of japonica rice cultivars. The results showed that row and hill distances simultaneously affected the physic and mechanic features of japonica rice plant, thereby making japonica rice with different panicles exhibit different lodging capacity. Liaoyou 52210 significantly increased plant height and decreased flexural strength from 20 cm hill distance, which is the main factors of higher lodging index. Traits including plant height, the length and fresh weight of base N2 section, panicle angle, panicle length, fresh panicle weight and panicle gravity of Shendao 47 and Shendao 6 at the configuration of 25 cm $\times$ 20 cm decreased significantly. At the configuration of 35 cm $\times$ 15 cm, the cross-sectional area and flexural strength of the three japonica rice cultivars were significantly greater than that of others. From the perspective of panicle type, the adaptabilities of lodging resistance of Shendao 47 and Shendao 6 to the change in the configuration were better than that of Liaoyou 52210. The panicle angle of three japonica rice cultivars at the configuration of 25 cm $\times$ 15 cm, 30 cm $\times$ 20 cm and 35 cm $\times$ 20 cm was significantly larger than that of others. The fresh panicle weight, panicle length and height of panicle gravity at the later two configurations were higher as well. Generally, potential lodging and less panicles of per unit area at the configuration of high and low density limited the obtainment of high and stable yields. The flexural strength and bending moment at the configuration of 25 cm $\times$ 15 cm and 35 cm $\times$ 20 cm was the inducible factor increasing lodging index, indicating that both tense and sparse planting are unfavorable for lodging resistance and the flexural strength of base internode is the main target to increase the lodging resistance. The suitable bending moment of base internode should be considered when selecting cultivars with lodging resistance because the greater biomass is the guarantee for lodging resistance.

**Keywords** rice; row-hill spacing; lodging resistance; lodging index; panicle type

(责任编辑:张志钰)