

水分胁迫对超级稻生长发育和抗倒伏能力的影响

郝树荣, 董博豪, 周 鹏, 潘永春, 王子欣

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘 要:【目的】明确水分胁迫条件下影响超级稻抗倒伏能力的主要因素。【方法】于2016年5—10月在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室进行不同水分胁迫处理的盆栽试验,于拔节初期设浅水勤灌(CK)、轻旱(C1)、重旱(C2)3个处理,研究了超级稻(南粳5055、新两优6380)形态性状、力学性状和抗倒伏能力。【结果】拔节初期水分胁迫抑制株高增加,降低重心高度,减小节间长度,增大基部茎粗,壁厚和充实程度,南粳5055轻旱、重旱处理的倒伏指数分别比浅水勤灌处理减小24.49%、33.67%,累积破坏能量分别增加8.44%、2.58%;新两优6380轻旱、重旱处理的倒伏指数分别比浅水勤灌处理减小34.78%、32.61%,累积破坏能量分别增加15.43%、2.32%。轻旱处理的倒伏指数较小,累积破坏能量较大,更有利于抗倒伏能力的提升。相较于南粳5055,新两优6380的节间干质量和充实度更大,使抗弯刚度、抗折力明显增大,抗倒伏能力更强,且对轻旱的响应更加积极。株高、重心高度、节间长度和弯曲力矩与倒伏指数极显著正相关,抗折力、抗弯刚度与倒伏指数极显著负相关。同时,单位长度干质量、抗折力、抗弯刚度与累积破坏能量均极显著正相关。【结论】株高、节间长度、抗折力、单位长度干质量是影响超级稻抗倒伏能力的主要因素。拔节初期水分胁迫通过抑制节间伸长、减小弯曲力矩,提高节间充实程度,增强超级稻抗倒伏能力,轻旱效果最佳。新两优6380抗倒伏能力优于南粳5055。

关 键 词:水分胁迫; 超级稻; 倒伏; 形态性状; 力学性状

中图分类号:S274.1

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180118

郝树荣,董博豪,周鹏,等. 水分胁迫对超级稻生长发育和抗倒伏能力的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(9):1-8.

0 引 言

水稻是我国主要粮食作物,在我国长江下游地区,水稻生育后期经常遇到台风等不利气象条件,特别是近年来推出的株高较高、穗型较大的超级稻,产量潜力大幅度提高,但面临着倒伏问题的考验。倒伏是内因和外界环境条件综合作用引起的茎秆从自然直立状态到永久错位的现象,是水稻生产中普遍而突出的问题^[1-2],水稻倒伏可分为茎倒伏和根倒伏,占主导地位的移栽稻以茎倒伏为主^[3-4]。研究表明,水稻发生倒伏的敏感时期是齐穗后21~30 d,发生倒伏的敏感节位多在茎秆基部的2~3个节间^[5-7]。水稻倒伏受品种、风速、种植密度、水分、肥料等多种因素影响^[8-14]。抗倒伏能力与株高、重心高度、基部节间长度、节间粗度、茎壁厚度、节间干质量和单株鲜质量等茎秆形态性状以及抗折力、弹性模量、弯曲力矩、抗弯刚度等力学性状密切相关^[15-16]。倒伏造成的叶片互相交叠、降低叶片光合能力、通风透光条件变差、茎秆维管束断裂、妨碍干物质运转等问题,易导致水稻减产、稻米品质下降及影响机械收割^[12,17-18]。因此研究水稻抗倒伏能力与茎秆形态与力学性状的关系,采取有效措施控制和防止倒伏发生,对水稻高产稳产有重大意义。试验以农业部认定的超级稻南粳5055(粳稻)和新两优6380(籼稻)为试验材料,通过在拔节初期设置不同水分胁迫水平,测定水稻黄熟期茎秆形态性状及力学性状,分析其与倒伏指数的关系,探讨水分胁迫对超级稻抗倒伏能力的影响规律及作用机理,明确影响抗倒伏能力的主要因素,为超级稻抗倒伏栽培提供一定依据。

收稿日期:2018-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51309080);江苏省水利科技项目(2016007);江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX17_0444);中央高校基本科研业务费项目(2017B629X14)

作者简介:郝树荣(1971-),女(回族),河北怀来人。副教授,博士,主要从事节水灌排理论与技术的研究。E-mail: srhao@hhu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2016年5—10月在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室进行(北纬31°57',东经118°50'),试验区属亚热带季风气候,湿润多雨,多年平均降雨量1 019.5 mm。试验用土取自附近稻田耕作层的黏壤土,pH值为7.4,田间持水率为30.4%(质量含水率,FC)。速效氮、速效磷质量分数分别为50.2、9.6 mg/kg。

1.2 试验方案设计

水稻供试品种为当地常用高产品种“南粳5055”(常规粳稻,平均株高96.5cm,株高适中)和“新两优6380”(籼型两系杂交稻,平均株高130 cm,相对较高)。采用盆栽试验,盆顶内径29 cm、盆底内径26 cm、高35 cm。土样经晒干、粉碎、过筛后均匀施入基肥:尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)0.15 g/kg、过磷酸钙($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)0.60 g/kg、氯化钾(KCl)0.15 g/kg。装盆后土壤干体积质量为1.20 g/cm³。水稻5月15日育秧、6月24日三叶一心时移栽,每盆3穴、每穴2株。拔节初期水分胁迫7 d,共设置3个水分胁迫水平:CK(浅水勤灌)、C1(70%FC~80%FC)、C2(60%FC~70%FC)。每个处理18个重复。除水分胁迫外,其他农技措施均相同。

1.3 测定项目与方法

于黄熟期每个处理随机选3穴,每穴2个主茎,共6个重复,剪掉根部,测定相关指标。

1)株高、重心高度、重心比例:用钢尺量取茎秆基部到穗顶的长度即为株高。采用杨长明等^[10]的方法,将主茎(剪去地下部分,保留茎、鞘、叶和穗)保持自然姿态,用平衡法找出整个茎秆的平衡点,平衡点距植株基部的距离即为重心高度。重心比例为某一时期水稻重心高度株高的比值。

2)穗长、穗鲜质量和单株鲜质量:用钢尺测定穗长并称鲜质量,剪去地下部分称单株鲜质量。

3)节间长度、节间干质量和单位长度节间干质量:将主茎按节点剪断,基部第一伸长节间称为第一节间(I),依次向上分别为第二节间(II)和第三节间(III)。测量各节间长度。将各节间茎秆置于烘箱,105℃下杀青30 min,80℃下烘至恒质量,测定各节间茎秆干质量。单位长度节间干质量=节间干质量/节间长度。

4)节间粗度和茎壁厚度:将节间从中部截断,用数显游标卡尺测定茎秆长轴外径和短轴外径(带叶鞘),取平均值为节间粗度。测定长轴和短轴与茎壁4个交点的厚度,取平均值为茎壁厚度。

5)茎秆抗折力(F)、弯曲力矩(BM)和倒伏指数(LI):茎秆抗折力测试方法参考文献[19],由于茎基部倒伏是水稻倒伏的主要形式^[20],故选取基部第二节间进行测试。将茎秆(含叶鞘)水平放置,二端固定为简支梁,中间部分悬空,采用电子万能试验机(CMT6104),将压力应变传感器(20N)置于茎秆中心位置,自上而下施加竖向压力,传感器以0.1 mm/s的速度向下移动,随着传感器下移,茎秆压力和挠度不断增加,直到茎秆发生屈服破坏时压力达到最大值,即为茎秆最大抗折力(N);弯曲力矩=第二节间基部至穗顶长度×第二节间基部至穗顶鲜质量×0.001×9.8, N·cm;倒伏指数 $LI=4/BM \cdot (F \cdot L)$,式中: L 为2支点间距(cm)。

6)累积破坏能量(D):水稻茎秆自开始受力到发生破坏,中心位移量与压力乘积之和即为茎秆累积破坏能量。传感器的位移量和施加压力均由计算机软件自动采集,采集间隔为0.1 s。根据确定的破坏时间,计算此前每个0.1 s内压力和位移的乘积,求和得到累积破坏能量。

7)抗弯刚度(BS):抗弯刚度 $BS=F \cdot L^3/(48\delta)$,式中: BS 为抗弯刚度(N·mm²); F 为茎秆抗折力(N); L 为二支点间距(mm); δ 为最大抗折力时对应的中心位移量(mm)^[21]。

1.4 数据统计与分析

使用Microsoft Excel 2016进行数据处理;使用IBM SPSS Statistics 22对不同水分处理下的水稻各项指标进行方差分析(analysis of variance, ANOVA)及Duncan多重比较。所有数据分析前进行方差同质性和正态性检验。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对水稻生长指标及茎秆形态性状的影响

表1为水分胁迫条件下超级稻各项生长指标。由表1可知,水稻黄熟期不同水分胁迫处理的株高,南粳5055和新两优6380均表现为CK>C1处理>C2处理,且二品种各处理间差异均显著。其中,南粳5055 C1、C2处理的株高分别比CK低6.20%、10.80%,新两优6380 C1、C2处理的株高分别比CK低16.60%、19.09%。水

分胁迫同时降低了水稻重心高度,南粳5055 C1、C2处理的重心高度分别比CK下降了12.30%、11.71%,新两优6380 C1处理的重心高度比CK下降7.70%,C2与CK处理差异不显著。南粳5055各处理间重心比例差异不显著,新两优6380C1、C2处理的重心比例分别比CK大10.70%、10.63%。二品种剑叶面积均表现为C1处理显著大于CK、C2处理,其中南粳5055 C1处理的剑叶面积分别比CK、C2处理大18.83%、21.81%,新两优6380 C1处理的剑叶面积分别比CK、C2处理大14.98%、25.28%。不同水分处理下二品种单株鲜质量均表现为C2处理低于CK和C1处理。南粳5055不同水分胁迫处理稻穗鲜质量表现为C1处理>CK>C2处理,各处理间差异显著;新两优6380表现为CK、C1处理高于C2处理。南粳5055水分胁迫处理的穗长大于CK,新两优6380穗长各处理间差异不显著。

表1 水分胁迫条件下水稻生长指标

品种	处理	株高/cm	重心高度/cm	重心比例	剑叶面积/cm ²	单株鲜质量/g	穗鲜质量/g	穗长/cm
南粳5055	CK	97.23±0.79a	44.70±1.16a	46.00±1.54a	17.81±0.15b	18.21±0.09a	4.61±0.06b	14.00±0.06b
	C1	91.20±0.64b	39.23±0.12b	43.02±0.36a	21.16±0.31a	18.33±0.23a	4.98±0.02a	15.70±0.00a
	C2	86.73±0.84c	39.47±0.07b	45.51±0.36a	17.37±0.37b	15.76±0.28b	3.8±0.09c	15.90±0.36a
新两优6380	CK	134.90±0.95a	54.97±0.81a	40.75±0.48b	41.42±0.82b	21.95±0.09a	5.76±0.10a	25.61±0.21a
	C1	112.50±1.05b	50.73±0.27b	45.11±0.65a	47.62±0.53a	22.61±0.59a	5.67±0.11a	26.75±0.14a
	C2	109.14±0.09c	49.20±0.26b	45.08±0.21a	38.01±0.78c	20.66±0.13b	4.79±0.13b	25.88±0.51a

注 不同字母表示同一列数据在0.05水平下差异显著,下同。

水分胁迫处理显著降低了节间长度,增大了节间粗度和茎壁厚度,重点表现在基部第一、第二节间。不同水分胁迫处理的水稻茎节形态指标显示(表2),南粳5055品种C1、C2处理的茎秆基部第一、第二节间长度分别比CK小5.37、6.97 cm和4.60、6.48 cm,减少了49.69%、64.51%和37.00%、52.14%;第三节间则相反,随水分胁迫程度的加深,节间长度反而增大。新两优6380品种C1、C2处理的基部第一、第二节间长度分别比CK小1.9、3.13 cm和1.4、1.33 cm,减少了19.93%、32.87%和10.91%、10.39%,而第三节间长度CK、C1处理差异不显著,C2处理最大。对于节间粗度,二品种水稻基部第一、第二节间均表现为C1处理>C2处理>CK,各处理间差异显著。其中,南粳5055品种C1、C2处理比CK大2.36、0.66 mm和1.15、0.54 mm,提高了22.79%、7.76%和15.45%、7.25%。新两优6380品种C1、C2处理比CK大2.02、0.93 mm和1.05、0.35 mm,提高了26.97%、12.39%和13.87%和4.59%。南粳5055基部第三节间粗度各处理表现为C1、C2处理>CK,新两优6380则表现为C1处理>CK、C2处理。水分胁迫下二品种水稻基部第一、第二节间茎壁厚度均高于CK,具体表现为南粳5055品种C1和C2处理比CK大0.38、0.42 mm和0.96、1.06 mm,提高了38.05%、42.16%和44.17%、48.77%,新两优6380品种第二节间C1处理比CK大0.73 mm,C2处理与CK差异不显著。南粳5055基部第三节间茎壁厚度表现为C1处理高于CK和C2处理,新两优6380基部第三节间茎壁厚度各处理间差异不显著。

表2 水分胁迫条件下水稻茎秆形态性状

品种	处理	节间长度 /cm			节间粗度/mm			茎壁厚度/mm		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
南粳5055	CK	10.80±0.40a	12.43±0.24a	12.23±0.07c	8.50±0.01c	7.44±0.04c	6.16±0.02b	2.59±0.03b	2.17±0.01c	1.54±0.03b
	C1	5.43±0.33b	7.83±0.35b	13.10±0.12b	10.87±0.12a	8.59±0.13a	7.16±0.10a	3.58±0.03a	3.13±0.02a	1.66±0.03a
	C2	3.83±0.26c	5.95±0.18c	17.57±0.09a	9.16±0.05b	7.98±0.08b	7.14±0.02a	3.69±0.05a	3.23±0.02b	1.45±0.04b
新两优6380	CK	9.53±0.18a	12.83±0.30a	16.30±0.40b	7.48±0.01c	7.55±0.08c	7.21±0.01b	1.84±0.03c	1.50±0.04b	1.31±0.04a
	C1	7.63±0.03b	11.43±0.17b	16.87±0.20b	9.49±0.03a	8.59±0.03a	7.77±0.05a	2.57±0.08a	2.11±0.04a	1.41±0.02a
	C2	6.40±0.06c	11.50±0.32b	18.37±0.18a	8.40±0.09b	7.89±0.02b	7.17±0.03b	2.03±0.03b	1.50±0.04b	1.41±0.10a

注 I、II、III分别表示第一、第二、第三节节。

表3为水分胁迫条件下茎秆基部节间干质量和单位长度节间干质量。由表3可知,对于节间干质量,南粳5055基部第一、第二节间干质量表现为CK>C1处理>C2处理,第三节间不同水分胁迫处理间差异不显著。新两优6380基部第一节间干质量规律与南粳5055的一致,第二、第三节间则表现为水分胁迫处理节间干质量大于浅水勤灌处理。对于基部第一、第二节间单位长度节间干质量,二品种均表现为水分胁迫处理大于浅水勤灌处理,其中南粳5055基部第一节间C1、C2处理分别比CK大39.12%、25.90%,基部第二节间C1、C2处理分别比CK大35.67%、19.32%;新两优6380基部第一节间C1、C2处理分别比CK大13.72%、13.83%,基部第二节间C1、C2处理分别比CK大29.28%、18.43%。不同水分胁迫下二品种基部第三节间单位长度节间干质量略有不同,南粳5055表现为CK>C1处理>C2处理,新两优6380表现为C1处理>C2处理>CK。

表3 水分胁迫条件下茎秆基部节间干质量和单位长度节间干质量

品种	处理	节间干质量/g			单位长度节间干质量/(mg·cm ⁻¹)		
		I	II	III	I	II	III
南粳 5055	CK	0.64±0.01a	0.57±0.02a	0.52±0.01a	69.64±3.96c	45.59±1.40c	42.23±0.47a
	C1	0.52±0.01b	0.48±0.01b	0.51±0.01a	96.88±4.70a	61.85±1.62a	38.68±0.17b
	C2	0.36±0.01c	0.32±0.01c	0.51±0.01a	87.68±5.93b	54.40±1.33b	30.74±0.45c
新两优 6380	CK	0.86±0.01a	1.09±0.01c	0.96±0.02b	90.63±2.03b	85.04±2.39c	59.11±0.40c
	C1	0.79±0.01b	1.26±0.02a	1.18±0.02a	103.06±0.88a	109.94±1.53a	69.78±1.54a
	C2	0.66±0.01c	1.16±0.00b	1.21±0.01a	103.16±1.83a	100.72±2.56b	65.76±0.21b

2.2 水分胁迫对茎秆力学性状及抗倒伏能力的影响

1) 水分胁迫对抗弯刚度的影响

抗弯刚度指茎秆抵抗弯曲变形的能力,其大小受到茎粗、壁厚和截面形状等的影响。表4为水分胁迫条件下超级稻茎秆力学性状和抗倒伏能力。由表4可知,水稻二品种水分胁迫处理的抗弯刚度均大于浅水勤灌处理,南粳5055品种C1、C2处理间差异不显著,新两优6380品种表现为C1处理>C2处理>CK,且各处理间差异显著。

2) 水分胁迫对抗折力和弯曲力矩的影响

抗折力是茎秆受到垂向力作用发生折断时需要的最小拉力,是衡量抗倒伏能力的主要指标。二品种水分胁迫处理的基部第二节间抗折力显著高于浅水勤灌处理,南粳5055品种C1、C2处理的茎秆抗折力为分别比CK大24.85%、15.78%;新两优6380品种C1、C2处理的茎秆抗折力分别比CK大31.3%、12.24%。弯曲力矩是整个植株施加到基部节间力的大小,弯曲力矩越大,施加到基部节间的力越大,发生倒伏的可能性越大。二品种不同水分胁迫处理的弯曲力矩均表现为CK>C1处理>C2处理,且各处理间差异显著。

3) 水分胁迫对倒伏指数和累积破坏能量的影响

倒伏指数是对水稻倒伏性能评判的综合参数,其数值越大,抗倒伏能力越弱,水稻发生倒伏的概率越高。由表4可知,二品种水分胁迫处理的倒伏指数均小于浅水勤灌处理,C1、C2处理之间差异不显著。其中,南粳5055品种C1、C2处理的倒伏指数分别比CK减小24.49%、33.67%,新两优6380品种C1、C2处理的倒伏指数分别比CK减小34.78%、32.61%。累积破坏能量是衡量水稻茎秆抗倒伏能力的重要指标,体现了茎秆抵抗持续受力和持续变形的能力。大部分情况下,水稻因风吹而倒伏是一个渐进过程。在持续风力作用下,茎秆发生横向弯曲,当水平推力不超过抗折力时,由于自身的弹性,茎秆可在外力消除后恢复原状。但若推力持续时间过长,即使不超过抗折力,茎秆仍可能因为变形过大而产生疲劳破坏。不同水分胁迫处理南粳5055品种茎秆累积破坏能量表现为C1处理>C2处理>CK,且各处理间差异显著。C1、C2处理分别比CK处理增加8.44%、2.58%;新两优6380品种C1处理最大,CK、C2处理间差异不显著。C1、C2处理分别比CK增加15.43%、2.32%。

表4 水分胁迫下茎秆力学性状及抗倒伏能力

品种	处理	抗弯刚度/(10 ³ N·m ²)	抗折力/N	弯曲力矩/(N·cm)	倒伏指数	累积破坏能量/(10 ³ J)
南粳 5055	CK	18.19±0.78b	10.18±0.44b	17.35±0.07a	0.98±0.04a	34.12±0.14c
	C1	22.71±0.36a	12.71±0.20a	16.38±0.10b	0.74±0.02b	37.00±0.26a
	C2	21.06±0.24a	11.79±0.13a	13.4±0.27c	0.65±0.02b	35.08±0.06b
新两优 6380	CK	58.77±0.96c	12.69±0.21c	29.02±0.33a	0.92±0.02a	43.94±0.08b
	C1	77.16±2.11a	16.67±0.45a	24.93±0.59b	0.60±0.02b	50.72±0.54a
	C2	65.96±1.98b	14.25±0.43b	22.10±0.13c	0.62±0.02b	44.96±0.16b

2.3 茎秆相关性状与抗倒伏能力的相关分析

1) 茎秆形态性状与抗倒伏能力的相关分析

表5为二品种水稻茎秆性状与抗倒伏能力的相关分析结果。由表5可知,二品种水稻的株高、重心高度和节间长度均与倒伏指数极显著正相关($P<0.01$),与累积破坏能量负相关,但只有南粳5055重心高度与累积破坏能量显著负相关($P<0.05$)。南粳5055的茎粗与倒伏指数负相关,与累积破坏能量极显著正相关($P<0.01$)。新两优6380的茎粗与倒伏指数极显著负相关($P<0.01$),与累积破坏能量极显著正相关($P<0.01$)。南粳5055壁厚和穗长均与倒伏指数极显著负相关($P<0.01$)关系,壁厚与累积破坏能量显著正相关($P<0.05$)、穗长与累积破坏能量正相关但不显著。新两优6380壁厚和穗长均与倒伏指数负相关但不显著,与累积破坏能量显著正相关($P<0.05$)。

表5 茎秆性状与抗倒伏能力的相关性分析结果

茎秆相关性状	项目	倒伏指数		累积破坏能量	
		南粳5055	新两优6380	南粳5055	新两优6380
茎秆形态性状	株高	0.896**	0.960**	-0.373	-0.498
	重心高度	0.942**	0.900**	-0.753*	-0.381
	节间长度	0.956**	0.822**	-0.514	-0.568
	茎粗	-0.623	-0.770*	0.928**	0.964**
	壁厚	-0.946**	-0.525	0.674*	0.944**
	穗长	-0.903**	-0.550	0.637	0.727*
物质生产特性	剑叶面积	-0.162	-0.225	0.835**	0.855**
	单株鲜质量	0.671*	0.148	0.213	0.537
	穗鲜质量	0.443	0.509	0.456	0.276
	单位长度干质量	-0.661	-0.869**	0.891**	0.820**
茎秆力学性状	抗折力	-0.822**	-0.824**	0.919**	0.950**
	弯曲力矩	0.827**	0.872**	-0.043	-0.234
	抗弯刚度	-0.802**	-0.814**	0.904**	0.910**

注 *和**分别表示在0.05和0.01水平差异显著和极显著。

2)物质生产特性与抗倒伏能力的相关分析

南粳5055的剑叶面积和单位长度干质量与倒伏指数负相关($P<0.05$),与累积破坏能量极显著正相关($P<0.01$);单株鲜质量与倒伏指数显著正相关($P<0.05$),与累积破坏能量正相关但不显著。新两优6380的剑叶面积与倒伏指数负相关,与累积破坏能量极显著正相关($P<0.01$);单位长度干质量与倒伏指数极显著负相关($P<0.01$),与累积破坏能量极显著正相关($P<0.01$);单株鲜质量与倒伏指数和累积破坏能量均正相关但不显著。对于穗鲜质量,二品种水稻均与倒伏指数和累积破坏能量正相关但不显著。

3)茎秆力学性状与抗倒伏能力的相关分析

二品种茎秆力学性状与抗倒伏能力的相关关系表现一致,抗折力、抗弯刚度均与倒伏指数极显著负相关($P<0.01$)关系,与累积破坏能量极显著正相关($P<0.01$)关系;弯曲力矩与倒伏指数极显著正相关($P<0.01$),与累积破坏能量负相关但不显著。

3 讨 论

3.1 影响水稻抗倒伏能力的特性

前人研究株高和重心高度与抗倒伏能力的关系不一致。李国辉等^[4]以广东早季和晚稻为试材、赵建明等^[5]选用国内外31个水稻品种、董明辉等^[6]以17个粳稻品种,均发现株高、重心高度对抗倒伏性有较大负效应。杨波等^[7]以超级稻连粳7号、杨惠杰等^[22]以16个超高产粳稻为试材,认为水稻抗倒伏能力与株高、重心高度有一定正相关关系,但未达到显著水平。兰彩霞等^[23]发现株高偏高的杂交稻,株高与其倒伏指数的相关性达到显著水平,株高偏低的亲本倒伏指数与株高的相关性未达到显著水平。陆红飞等^[24]以南粳44为试材进行盆栽试验,发现株高的增加不利于水稻抗倒伏。本试验表明,倒伏指数与株高、重心高度呈极显著正相关(表5)。关于节间长度、茎粗和壁厚对抗倒伏能力的影响,李国辉等^[4]发现倒伏指数与节间粗度正相关,节间越粗抗倒伏能力反而下降;杨惠杰等^[22]发现水稻抗倒伏性能主要取决于壁厚,与节间粗度关系不大;本试验显示,二品种节间长度与倒伏指数均极显著正相关。南粳5055茎粗与倒伏指数负相关但不显著、壁厚与倒伏指数间极显著负相关;新两优6380茎粗与倒伏指数显著负相关,壁厚与倒伏指数负相关但不显著。说明节间长度对不同品种水稻抗倒伏能力的影响是最大的,但不同水稻品种的节间性状指标对抗倒伏能力的影响有差异,南粳5055壁厚比茎粗对抗倒伏能力的贡献大,而新两优6380茎粗比壁厚对抗倒伏能力的贡献大。Kashiwagi等^[12,17]研究表明距地面40 cm内茎秆干物质质量和密度与抗倒伏能力显著正相关;Islam等^[1]采用不同基因型水稻比较试验表明超级稻表现出较强抗倒伏能力的主要原因是基部节间单位长度干质量显著提高;李国辉等^[4]对常规稻、杨波等^[7]对超级稻的研究均发现节间充实度是抗倒伏能力强的直接原因。本试验发现,南粳5055单位长度节间干质量与累积破坏能量呈极显著正相关,新两优6380倒伏指数与单位长度节间干质量显著负相关(表5),表明节间充实度越好,对植株地上部负载的支撑作用越大,抗倒伏能力越强。

茎秆力学性状是影响水稻抗倒伏能力的另一重要因素。试验发现抗折力和抗弯刚度与倒伏指数极显著负相关,弯曲力矩与倒伏指数极显著正相关。说明提高茎秆基部抗折力和弹性变形的能力有利于增加茎

秆抗倒伏能力。

3.2 水分胁迫对水稻抗倒伏能力的影响

Jackson 等^[25]研究表明淹水会促进茎秆生长使茎秆变细,干旱会增加水稻基部茎粗。郭相等^[20]研究表明,干旱增加基部茎粗、改善茎秆细观结构,提高茎秆机械性能,抑制茎秆延伸生长,降低弯曲力矩,提高水稻抗倒伏能力。彭世彰等^[15]认为控制灌溉下水稻节间长度下降、基部茎秆壁厚增加,力学性能较常规灌溉更为优越。本试验结果与前人研究结果一致,水分胁迫抑制株高增加、降低重心高度,胁迫程度越重抑制效应越大。

轻旱对水稻单株鲜质量影响不显著,而重旱显著降低了单株鲜质量。对于穗鲜质量,南粳 5055 轻旱处理最大、重旱最小,而新两优 6380 浅水勤灌和轻旱处理无显著差异,重旱处理最小。不同品种水稻穗长对水分胁迫的响应不同,南粳 5055 水分胁迫处理的穗长大于浅水勤灌处理,而新两优 6380 各处理间差异不显著。水分胁迫对水稻茎秆的影响除了表现为对株高、重心和鲜质量的影响外,还表现为节间长度、节间粗度、茎壁厚度和节间充实度的变化从而影响水稻的抗倒伏能力。前人研究表明,水分胁迫协调了水稻植株的生长,形成较理想的株型,茎秆粗壮抗倒伏^[26]。在本试验中,从节间长度的对比来看,基部第一、第二节间长度随水分胁迫的加深而减小,第三节间有所增长但前三节间总长度仍小于浅水勤灌,这与株高的对比关系一致。前期水分胁迫限制了早生的基部节间的伸长,后期复水后上部节间出现了补偿生长。水分胁迫增大了基部第一、第二节间的茎壁厚度,但不同水稻品种对轻旱、重旱处理的响应不同。单位长度节间干质量表征了茎秆充实程度,基部前三节间充实度,水分胁迫处理高于浅水勤灌。综上,水分胁迫在限制水稻基部茎节伸长的同时,导致节间粗度、壁厚与充实度的提高,有利于水稻抗倒伏性能的提高。

前人研究表明,水分胁迫处理的水稻植株抗折力增大,倒伏指数降低^[27]。在本试验中,轻旱增大了基部节间抗折力和抗弯刚度,重旱的抗折力和抗弯刚度有所下降但仍高于浅水勤灌。倒伏指数越小,累积破坏能量越大,茎秆抗倒伏能力越强。水分胁迫处理倒伏指数低于浅水勤灌,轻旱和重旱处理差异不显著,而累积破坏能轻旱处理最大。综合 2 个指标认为轻旱处理水稻抗倒伏能力最强。

3.3 不同水稻品种抗倒伏能力差异及对水分胁迫响应

马跃芳等^[28]研究发现,不同品种大麦的株高与倒伏极显著正相关,但某些高秆品种也具有抗倒能力,而某些矮秆品种却不一定抗倒。华泽田等^[29]研究发现,东北地区的超级粳稻中植株较高的品种抗倒伏能力强,而植株较低的品种抗倒伏能力反而较差。本试验中,新两优 6380 的株高、重心高度、剑叶面积、单株鲜质量、穗长、节间长度大于南粳 5055,节间粗度、茎壁厚度比南粳 5055 小,导致弯曲力矩较大,不利于茎秆抗倒伏。相较于南粳 5055,新两优 6380 的倒伏指数小、累积破坏能量大,抗倒伏能力较强(表 4),主要原因是新两优 6380 的节间干质量和单位长度节间干质量大于南粳 5055,使抗弯刚度、抗折力明显增大。进一步说明,矮秆不一定比高秆抗倒伏能力强。

不同品种水稻对水分胁迫的响应不同。水分胁迫导致了株高下降、基部第一、第二节间长度减小,茎粗增大。比较二品种发现,新两优 6380 株高下降的幅度更大,但基部节间长度减小幅度小于南粳 5055。两品种不同处理茎粗变化差异不明显,轻旱处理壁厚最大,但新两优 6380 重旱处理壁厚减小、而南粳 5055 重旱处理壁厚则增大。对于基部第二节间干质量,南粳 5055 随水分胁迫加深而减小,新两优 6380 水分胁迫处理的节间干质量则增大。二品种节间长度和节间干质量的不同表现,导致水分胁迫下新两优 6380 单位长度节间干质量的增大幅度大于南粳 5055。对于茎秆力学性状,新两优 6380 轻旱处理的抗弯刚度、抗折力和弯曲力矩的变化幅度均大于南粳 5055 轻旱处理。新两优 6380 轻旱处理的倒伏指数和累积破坏能量的变化幅度大于南粳 5055,重旱处理二品种的抗倒伏能力变化差异不大。综上可知,新两优 6380 对轻旱胁迫的响应更加积极。

本试验为盆栽试验,水稻的根系生长受限,冠层尤其是下部叶片接受更多的光热资源,生长条件与自然条件田间作物生长不同,研究成果有待大田试验进一步验证。

4 结 论

1)水分胁迫降低株高、重心高度和节间长度,增大节间粗度、茎壁厚度和单位长度节间干质量,提高茎秆机械性能,降低弯曲力矩,增强水稻抗倒伏能力。

2)南粳 5055 品种轻旱、重旱处理的倒伏指数比浅水勤灌处理减小 24.49%、33.67%,累积破坏能量增加

8.44%、2.58%；新两优 6380 品种轻旱、重旱处理的倒伏指数比浅水勤灌处理减小 34.78%、32.61%，累积破坏能量增加 15.43%、2.32%。综合 2 个指标，拔节初期适度轻旱有利于提高超级稻茎秆抗倒伏能力。

3) 水稻茎秆基部节间倒伏指数与株高、重心高度、节间长度、单株鲜质量和弯曲力矩正相关，与壁厚、茎粗、节间充实度、抗折力和抗弯刚度负相关，且均达到显著或极显著水平，是影响水稻抗倒伏能力的主要因素。控制株高、缩短基部节间长度、增加壁厚和茎粗、提高茎秆充实度，并保证茎秆材质强度和弹性变形能力，是增强抗倒伏能力的关键。

4) 本试验中，高秆品种新两优 6380 的抗倒伏能力强于矮秆品种南粳 5055，对轻度水分胁迫的响应更加敏感。

参考文献：

- [1] ISLAM S M, PENG Shaobing, VISPERAS M R, et al. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem [J]. Field Crops Research, 2007, 101(2): 240-248.
- [2] ZHANG Wujun, LI Ganghua, YANG Yiming, 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.
- [3] 金正勋, 郑冠龙, 朱立楠, 等. 不同氮钾肥施用方法对水稻产量及抗倒伏性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(3): 9-14.
- [4] 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): 1 323-1 334.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 杨波, 秦德荣, 刘艳, 等. 超级稻连梗 7 号的抗倒伏机理[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1 212-1 218.
- [8] 张丰转, 金正勋, 马国辉, 等. 水稻抗倒性与茎秆形态性状和化学成分含量间相关分析[J]. 作物杂志, 2010(4): 15-19.
- [9] 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.
- [10] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 等. 不同养分和水分管理模式对水稻抗倒伏能力的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 646-650.
- [11] OLADOKUN M A O, ENNOS A R. Structural development and stability of rice oryza sativa l. var. nerica l. [J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(12): 3 123-3 130.
- [12] KASHIWAGI T, HIROTSU N, UJIIE K, et al. Lodging resistance locus prl5 improves physical strength of the lower plant part under different conditions of fertilization in rice (oryza sativa l.)[J]. Field Crops Research, 2010, 115(1): 107-115.
- [13] OOKAWA T. Varietal difference of physical characteristics of the culm related to lodging resistance in paddy rice. [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1992, 61(3): 419-425.
- [14] 郝树荣, 郑姬, 冯远周, 等. 水稻拔节期水氮互作的后效性影响研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 92-96.
- [15] 彭世彰, 张正良, 庞桂斌. 控制灌溉条件下寒区水稻茎秆抗倒伏力学评价及成因分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 6-10.
- [16] 马国辉, 邓启云, 万宜珍, 等. 超级杂交稻抗倒生理与形态机能研究 I. 培矮 64S/E32 与汕优 63 植株钾、硅和纤维素含量差异[J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2000, 26(5): 329-331.
- [17] TAKAYUKI Kashiwagi, HARUTO Sasaki, KEN Ishimaru. Factors responsible for decreasing sturdiness of the lower part in lodging of rice (oryza sativa l.) [J]. Plant Production Science, 2005, 8(2): 166-172.
- [18] 周继勇, 肖层林, 王仁祥. 水稻抗倒性研究进展[J]. 作物研究, 2006, 20(5): 388-392.
- [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.
- [20] 郭相平, 甄博, 王振昌. 旱涝交替胁迫增强水稻抗倒伏性能[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 130-135.
- [21] NIKLAS K J. A statistical approach to biological factors of safety: bending and shearing in psilotum axes [J]. Annals of Botany, 1998, 82(2): 177-187.
- [22] 杨惠杰, 杨仁崔, 李义珍, 等. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系[J]. 福建农业学报, 2000, 15(2): 1-7.
- [23] 兰彩霞, 郭玉华, 赵鑫闻, 等. 杂交粳稻及其亲本抗倒伏性的相关分析[J]. 华北农学报, 2010, 25(2): 178-181.
- [24] 陆红飞, 郭相平, 甄博, 等. 旱涝交替胁迫下水稻茎节发育及其抗倒伏能力[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 47-52.
- [25] JACKSON M B. Ethylene-promoted elongation: an adaptation to submergence stress [J]. Annals of Botany, 2007, 101(2): 229-248.
- [26] 彭世彰, 郝树荣, 刘庆, 等. 节水灌溉水稻高产优质成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2000, 19(3): 3-7.
- [27] 郭相平, 黄双双, 王振昌, 等. 不同灌溉模式对水稻抗倒伏能力影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 1-5.
- [28] 马跃芳, 金晓平, 龚辉. 大麦倒伏原因的初步研究[J]. 作物研究, 1990(4): 22-25.
- [29] 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, 34(3): 161-164.

The Effects of Water Stress on Growth and Resistance of Super Rice Against Loading

HAO Shurong, DONG Bohao, ZHOU Peng, PAN Yongchun, WANG Zixin

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 2100985, China)

Abstract: **【Objective】** Turgor pressure in plant determines its resistance against loading and the purpose of this paper is to investigate how this is impacted by water stress. **【Method】** Pot experiments were conducted using Nanjing 5055 and Xinliangyou 6380 as the model plants. For each plant, we examined three water levels: moderate drought (C1) and severe drought (C2), with sufficient irrigation as the control (CK). During the experiment from May 2016 to October 2016 conducted in the key laboratory of the Ministry of Education, Southern China Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil and Water Environment at Hohai University, the morphological and the resistance of the super rice against loading under different water stresses were measured and compared. **【Result】** In early jointing stage, water stress inhibited plant growth, lowered the gravitational centroid of the plant and reduced the internode length, while increasing the internode diameter, wall thickness and internode fullness. Compared to CK, C1 and C2 treatments reduced the falling-over rate of Nanjing 5055 by 24.49% and 33.67% respectively, while enhancing the cumulative destructive energy by 8.44% and 2.58% respectively. Similarly, the falling-over rate of Xinliangyou 6380 under C1 and C2 was reduced by 34.78% and 32.61%, while the cumulative destructive energy was enhanced by 15.43% and 2.32%, respectively, compared CK. Compared with Nanjing 5055, Xinliangyou 6380 has a better internode dry quality and inter-flushness, which improve the flexural rigidity and the resistance against bending and loading, apart from its high drought-tolerance. The bending moment and resistance of the plants against loading were positively correlated with plant height, gravitational centroid, internode length, yet negatively correlated with the breaking resistance and bending rigidity. The dry weight per unit length, breaking resistance, bending rigidity were positively correlated with the cumulative damage energy. **【Conclusion】** Plant height, internode length and the resistance against breaking, as well as the dry weight per unit length were the main factors that affect the resistance of the super rice against loading. Occurrence of water stress at the early jointing stage increased the resistance of the plant against loading by inhibiting internode elongation, reducing the bending moment, and increasing the internode enrichment. The moderate water stress was most effective, and Xinliangyou 6380 was more resistant than Nanjing 5055 against loading.

Key words: water stress; super-rice; lodging; morphological traits; mechanical traits

责任编辑:陆红飞