

灌排模式对超级稻南粳5055抗倒伏能力的影响研究

郝树荣, 潘永春, 董博豪, 吴蕴玉, 王子欣
(河海大学 农业工程学院, 南京 210098)

摘要:【目的】研究不同灌排模式对超级稻南粳5055抗倒伏能力的影响。【方法】于2017年5—10月在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灌排模式的桶栽试验。共设浅水勤灌(FSI)、浅湿调控(WSI)、控制灌溉(CI)和秸秆覆盖旱作(DPS)4个处理。【结果】相较FSI处理, WSI处理减少了灌水量, 提高了花后期光合速率和叶面积, 但茎秆形态和力学特性改善不显著; CI处理相较WSI处理进一步改善茎秆形态和力学特性, 显著提高抗倒伏能力, 增加产量的同时节约灌水量; DPS处理较FSI处理降低了茎鞘物质输出率和转化率, 但干旱严重, 茎鞘干物质累积量小于FSI处理, 茎秆形态性状未能优化, 抗倒伏能力下降。【结论】综合产量、抗倒伏能力及灌水量, 最佳灌排模式为控制灌溉, 其次为浅湿调控。

关键词:灌排模式; 干物质累积; 茎秆形态; 力学特性; 抗倒伏

中图分类号:S274.1

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180346

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.

0 引言

倒伏是水稻生产中普遍存在的问题, 已成为高产稳产的重要限制因素之一。倒伏主要分为根倒伏和茎倒伏, 在我国南方地区, 水稻主要以茎倒伏为主^[1-4]。倒伏造成水稻茎秆维管束断裂、叶片相互交叠, 降低叶片光合作用, 阻碍碳、氮等有机物向籽粒运移, 降低水稻产量、品质以及机械收获效率^[5-6]。茎倒伏与水稻茎秆性状密切相关, 灌排模式是影响水稻茎秆性状的重要因素, 所以研究水稻在不同灌排模式下的抗倒伏性能, 选择适宜的灌排模式对于增强水稻抗倒伏性能从而提高水稻产量, 解决我国的粮食安全问题, 同时减少灌溉用水量, 缓解我国农业用水压力, 促进农业可持续发展意义重大。

Nishiuchi等^[7]发现拔节期过度淹水会增加基部节间长度、减小茎粗、使茎秆机械强度降低, 生育后期易倒伏; Ohe等^[8]和Won等^[9]也认为生育期淹水深度过大会降低水稻抗倒伏能力; 杨长明等^[10]研究表明全生育期干旱胁迫会抑制节间延伸生长, 增加基部茎粗、茎壁厚度和茎秆强度, 从而提高水稻抗倒伏能力; 刘立军等^[11]研究表明旱种水稻基部茎秆壁厚、节间充实度均低于常规水稻, 抗倒伏能力明显下降。郭相等^[12-13]研究指出分蘖期和拔节期旱涝交替胁迫增加基部茎粗, 改善茎秆结构, 降低株高以及地上部鲜质量, 降低弯曲力矩, 提高水稻抗倒伏能力。前人研究多集中在水稻某一生育期旱涝胁迫或涝胁迫条件下的茎秆性状的变化规律^[11-14], 而对全生育期采用某种灌排模式对水稻地上部干物质累积分配及茎秆抗倒伏能力的综合影响研究较少, 且主要研究对象为非超级稻。近年来, 各地不断培育株高较高、穗型较大的超级稻, 在大幅度提高产量的同时, 也面临着倒伏问题的考验。因此全生育期内不同灌排模式下超级稻抗倒伏性能如何, 还需进一步研究。

本试验以超级稻南粳5055为试验材料, 设置不同灌排模式进行桶栽试验, 测定株高、重心高度、茎粗、壁厚等茎秆形态性状和地上部干物质累积分配等物质生产特性、花后期光合速率指标以及茎秆力学特性, 分

收稿日期:2018-06-22

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)。副教授,硕士生导师,博士,主要从事节水灌排理论与技术研究。E-mail:srhao@hhu.edu.cn

析其与茎秆抗倒伏能力的关系,探讨不同灌排模式对超级稻南粳 5055 茎秆形态和干物质累积分配以及抗倒伏能力的影响,为确定科学的灌排模式,实现水稻抗倒伏高产和节约农田灌溉用水提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017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(31°86'N, 118°60'E)。试验区属亚热带湿润气候,年平均温度 15.7 ℃,多年平均降雨量 1 021.3 mm,本试验水稻全生育期内降雨量 605 mm(60%年型)。试验土壤取自附近稻田耕作层的黏壤土,土壤干体积质量为 1.31 g/cm³,饱和含水率(质量)为 38.7%,pH 值为 7.2,有机质为 2.40%,速效氮、速效磷和速效钾量分别为 47.4、10.37 和 90 mg/kg。

1.2 试验设计与实施

试验设浅水勤灌(Frequent and Shallow Irrigation, FSI)、浅湿调控(Wet-shallow Irrigation, WSI)、控制灌溉(Controlled Irrigation, CI)和秸秆覆盖旱作(Drought Planting with Straw Mulching, DPS)4 个处理,每处理 5 个重复。试验采用高 1 m、边长 0.4 m 的柱状方桶,分别在桶外壁不同侧面设置分层取土孔、取水孔和地下水位观测管。桶底铺设 20 cm 砂石反滤层,经晒干、打碎、过筛后将土样分层压实装入桶中。水稻供试品种为当地高产超级稻“南粳 5055”(Oryza sativa L.Nanjing5055)。5 月 11 日育秧,6 月 17 日移栽,行株距为 20 cm×15 cm,每桶 6 穴,每穴 2 株,10 月 26 日收获,全生育期共 164 d。肥料采用尿素(含 N 量 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 量 15%)、氯化钾(含 K₂O 量 63%)。施肥标准参照当地高产田,施纯氮 244 kg/hm²,N、P₂O₅、K₂O 质量比为 1:0.45:0.8,氮肥分 3 次施入,基肥、分蘖肥、穗肥质量比为 4:2:4,磷肥全部作为基肥 1 次施入,钾肥分 2 次施入,基肥、分蘖肥质量比为 6:4。具体灌排指标见表 1,土壤水分达到下限时,灌水至上限,降雨深度超过蓄雨深度,排水至蓄雨上限;无水层时,通过桶壁取土孔取土用烘干法测定土壤含水率。除灌排措施外,其他农技措施均相同。

表 1 不同灌排模式的灌排控制指标									mm
处理	灌排模式	控制指标	返青期	分蘖前期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
1	FSI	灌水上限	30	30	0	40	40	40	0
		灌水下限	10	10	60%	10	10	10	自然落干
		蓄雨上限	40	100	0	150	200	200	0
2	WSI	灌水上限	30	20	0	30	30	30	0
		灌水下限	10	90%	60%	90%	100%	80%	自然落干
		蓄雨上限	40	60	0	100	100	80	0
3	CI	灌水上限	30	100%	0	100%	100%	100%	80%
		灌水下限	10	70%	60%	70%~80%	80%	70%	自然落干
		蓄雨上限	40	60	0	80	80	80	0
4	DPS	灌水上限	100%	100%	0	100%	100%	100%	80%
		灌水下限	80%	60%	50%	60%	60%	50%	自然落干
		蓄雨上限	40	60	0	80	80	80	0

注 “mm”表示田面水深,“%”表示 30 cm 表层土壤含水率占饱和含水率的比例。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 主茎地上部黄熟期测定指标及方法

于黄熟期每个处理随机选 3 穴,每穴取 2 个主茎,剪掉根部,测定以下项目,6 个重复取平均值。

- 1)株高:用钢尺测定茎秆基部至穗顶的高度(cm)。
- 2)重心高度、重心比例:采用文献[4]中的方法测定主茎地上部重心高度(cm)和重心比例(%)。
- 3)穗长、主茎剑叶长度和宽度:用钢尺测定穗长、叶长度和最大宽度,叶面积=0.7×叶长×最大叶宽。
- 4)节间充实度(g/cm):节间充实度=某节间干物质质量/某节间长度。
- 5)茎秆抗折力 F_{max} :本研究取主茎基部 II、III 节测试抗折力,去叶鞘,将茎秆水平放置,用 CMT6104 电子万能试验机,将压力应变传感器置于茎秆中心位置,自上而下施加垂向压力,传感器以 0.1 mm/s 的速度持续下降,直至茎秆发生屈服破坏,即为茎秆抗折力(N)。
- 6)节间粗度 D 与茎壁厚度 T :将测量抗折力的节间从中部剪断,用数显游标卡尺测长轴外径和短轴外径,平均值为节间粗度(mm);测长轴和短轴与茎壁 4 个交点处的厚度,平均值为茎壁厚度(mm)。

7)抗弯刚度 $B_s(\text{N} \cdot \text{cm}^2)^{[4]}$: $B_s = E \cdot I$, 其中 E 为弹性模量, $E = \frac{FL^3}{48\delta I}$; δ 为茎秆承受 $F_{\max}$ 时茎秆中心位置的最大位移量(mm); I 为截面惯性矩(cm^4), $I = \frac{\pi a^4}{4} \left[1 - \left(1 - \frac{T}{4} \right)^4 \right]$, a 为节间半径($D/2$)(mm); T 为茎壁厚度(mm); L 为茎秆抗折试验中茎秆悬空长度, 本试验 II 节为 0.05 m, III 节为 0.08 m。

8)截面模量 $S_M(\text{mm}^3)$: 将剥去叶鞘的茎秆近似为空心圆柱体, 则截面模量为 $S_M = \frac{\pi D^3}{32} \cdot (1 - \alpha^4)$; D 为节间粗度(mm); α 为截面内径与外径的比。

9)弯曲力矩 $B_M(\text{N} \cdot \text{cm})$: $B_M = \text{节间基部至穗顶长度}(\text{cm}) \times \text{该节间基部至穗顶鲜质量}(\text{g}) \times 0.001 \times 9.8$ 。

10)倒伏指数 λ : $\lambda = B_M / F_{\max} \times 100$ 。

1.3.2 主茎地上部干物质累积分配测定指标及方法

1)地上部分鲜质量和干质量: 分别于抽穗期和黄熟期采集水稻地上部分, 分为茎、叶和穗 3 部分, 105°C 下杀青 30 min, 80°C 烘干至恒质量, 测定各部分干物质质量(g)。

2)茎鞘物质输出率和转化率: 茎鞘物质输出率为抽穗期茎鞘干物质质量与成熟期茎鞘干物质质量之差与抽穗期茎鞘干物质质量的比值(%); 茎鞘物质转化率为抽穗时茎鞘干物质质量与成熟期茎鞘干物质质量之差与成熟期穗干物质质量的比值(%)。

3)光合速率 P_n : 开花期后选取主茎剑叶, 用便携式光合仪(LI-6400)在恒定光强条件下测定($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

1.4 数据统计分析

使用 SPSS17.0 对不同灌排模式下超级稻的各项指标进行方差分析(analysis of variance, ANOVA), 用 Duncan 法($P < 0.05$)进行多重比较。数据在分析前进行方差同质性和正态性检验。

2 结果与分析

2.1 不同灌排模式对超级稻生长指标及茎秆形态性状的影响

不同灌排模式下超级稻生长指标如表 2 所示。FSI 处理的株高显著高于 WSI、CI 和 DPS 处理, WSI、CI 和 DPS 处理株高分别比 FSI 处理降低了 2.7%、7.1% 和 7.8%。FSI、CI 和 DPS 处理之间重心高度差异显著, FSI 处理 > WSI 处理 > DPS 处理 > CI 处理。FSI、WSI 和 DPS 处理重心比例无显著差异, 但均显著大于 CI 处理。FSI、WSI 和 CI 处理单株鲜质量无差异, 均显著大于 DPS 处理, 分别为 DPS 处理的 1.20、1.25 和 1.22 倍。WSI 和 CI 处理穗鲜质量差异不显著, 分别较 FSI 处理增加 20.0% 和 25.7%。各处理穗长有显著差异, DPS 处理 > CI 处理 > WSI 处理 > FSI 处理, 相较于 FSI 处理, WSI、CI 和 DPS 处理穗长增加 8.7%、13.5% 和 26.7%。CI 和 WSI 处理剑叶面积显著大于 FSI 处理, 是 FSI 处理的 1.29 倍、1.23 倍。DPS 处理主茎叶面积显著大于 FSI 处理, 二者均显著小于 CI 处理。

表 2 不同灌排模式下超级稻生长指标

处理	株高/cm	重心高度/cm	重心比例/%	单株鲜质量/g	穗鲜质量/g	穗长/cm	剑叶面积/cm ²	主茎叶面积/cm ²
FSI	90.95 ± 0.53a	40.12 ± 0.62a	44.25 ± 0.34a	18.00 ± 0.29a	4.20 ± 0.18b	13.63 ± 0.58d	18.87 ± 2.44c	131.58 ± 4.30c
WSI	88.52 ± 0.62b	39.20 ± 0.25ab	44.49 ± 0.47a	18.71 ± 0.28a	5.04 ± 0.11a	14.82 ± 0.41c	23.26 ± 0.92ab	156.97 ± 2.44ab
CI	84.55 ± 0.18c	36.00 ± 0.17c	42.46 ± 0.26b	18.20 ± 0.26a	5.28 ± 0.08a	15.47 ± 0.28b	24.39 ± 1.70a	165.79 ± 4.46a
DPS	83.83 ± 0.68c	37.90 ± 0.72b	45.31 ± 0.47a	14.95 ± 0.25b	3.94 ± 0.14b	17.27 ± 0.26a	21.07 ± 2.57bc	148.88 ± 4.52b

注 同一列内不同小写字母表示 5% 的水平显著差异, 下同。

不同灌排模式下超级稻的茎节形态指标如表 3 所示。对于 I 节, FSI、WSI、CI 处理节间长度均显著大于 DPS 处理, 其中 WSI 与 FSI 处理差异不显著, CI 处理显著小于 FSI 处理; FSI 和 WSI 处理节间粗度无显著差异, 均显著小于 CI 处理, 三者均显著大于 DPS 处理; CI 处理茎壁厚度显著大于 DPS 处理, 二者与 FSI、WSI 处理均无显著差异; CI 和 DPS 处理节间充实度显著大于 FSI 和 WSI 处理。对于 II 节, FSI 和 DPS 处理节间长度差异不显著, 但均显著大于 WSI 和 CI 处理, 其中 CI 处理节间长度最小; 对于 III 节, 受水分胁迫的 CI 和 DPS 处理节间长度显著小于 FSI 和 WSI 处理; CI 处理 II、III 节粗度、茎壁厚度和节间充实度均大于其他处理, DPS 处理最小, CI 处理 > WSI 处理 > FSI 处理 > DPS 处理。相较于 FSI、WSI、CI 处理有效提高 I、II、III 节的充实度; DPS 处理虽提高 I 节的充实度, 但降低了 II、III 节的充实度, 可能与 DPS 处理严重水分胁迫影响干物质积累有关。

表3 不同灌排模式下超级稻的茎节形态指标

处理	节间长度/cm			节间粗度/mm		
	I	II	III	I	II	III
FSI	5.68±0.26a	7.88±0.19a	10.30±0.17a	5.02±0.14b	4.77±0.15b	4.42±0.10b
WSI	4.90±0.21ab	6.85±0.06b	10.26±0.37a	5.17±0.18b	4.83±0.06b	4.46±0.11b
CI	4.52±0.41b	6.02±0.14c	9.32±0.24b	5.41±0.10a	5.08±0.04a	4.68±0.04a
DPS	2.48±0.22c	7.60±0.28a	9.51±0.26b	4.26±0.10c	3.67±0.08c	3.68±0.06c
处理	茎壁厚度/mm			节间充实度/(g·cm ⁻¹)		
	I	II	III	I	II	III
FSI	1.04±0.08ab	0.80±0.03b	0.74±0.04ab	0.080±0.008b	0.055±0.006c	0.041±0.005b
WSI	1.01±0.04ab	0.86±0.04a	0.73±0.02ab	0.081±0.009b	0.060±0.002b	0.043±0.005ab
CI	1.08±0.06a	0.87±0.03a	0.76±0.02a	0.094±0.010a	0.065±0.003a	0.046±0.004a
DPS	0.98±0.08b	0.71±0.04c	0.69±0.07b	0.098±0.016a	0.034±0.003d	0.028±0.002c

2.2 不同灌排模式对超级稻干物质累积分配及转运的影响

不同灌排模式下超级稻地上部干物质累积分配及转运如表4所示。DPS处理净光合速率与WSI和CI处理无显著差异,三者均显著大于FSI处理。WSI处理抽穗期及黄熟期茎鞘干物质质量与FSI处理无显著差异,均显著大于CI和DPS处理,CI处理茎鞘干物质质量显著大于DPS处理。WSI和CI处理穗干物质质量差异不显著,但均显著大于FSI和DPS处理,WSI和CI处理穗干物质质量较FSI处理分别增加23.3%和29.9%,较DPS处理分别增加26.5%和33.3%。CI处理叶干物质质量较FSI和DPS处理显著增加18.3%和10.3%。CI处理地上部干物质质量与WSI处理无显著差异,较FSI和DPS处理分别显著增加11.2%和20.9%。在地上部干物质转运上,WSI处理茎鞘物质输出率和FSI处理无显著差异,转化率低于FSI处理,二者显著大于CI和DPS处理,其大小顺序为FSI处理>WSI处理>CI处理>DPS处理,CI和DPS处理茎鞘物质输出率分别为FSI处理的75.2%和56.8%,转化率分别为FSI处理的48.3%和43.6%。

表4 不同灌排模式下超级稻地上部干物质累积分配及转运

处理	花后期净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	抽穗期茎鞘 干物质质量/g	黄熟期干物质质量/g				输出率/%	转化率/%
			茎鞘	穗	叶	总干物质		
FSI	18.04±0.70b	3.42±0.04a	3.01±0.03a	3.48±0.10b	1.09±0.04c	7.58±0.15b	12.05±0.54a	11.92±0.75a
WSI	20.98±0.33a	3.29±0.03a	2.89±0.03a	4.29±0.11a	1.24±0.02ab	8.44±0.16a	11.91±0.23a	9.16±0.31b
CI	21.06±0.47a	2.88±0.09b	2.62±0.08b	4.52±0.10a	1.29±0.02a	8.43±0.20a	9.06±0.20b	5.76±0.18c
DPS	22.22±0.81a	2.57±0.03c	2.39±0.03c	3.39±0.12b	1.17±0.04bc	6.97±0.19c	6.85±0.25c	5.20±0.21c

2.3 不同灌排模式对超级稻茎秆力学指标的影响

不同灌排模式下超级稻茎秆力学指标如表5所示。对于II节,WSI与FSI处理抗折力无显著差异,CI处理抗折力和截面模量显著大于其他处理,DPS处理最小,CI处理>WSI处理>FSI处理>DPS处理;FSI、WSI和CI处理抗弯刚度、弯曲力矩无显著差异,均显著大于DPS处理;CI处理倒伏指数最小,DPS处理最大,WSI与FSI处理无显著差异,DPS处理>FSI处理>WSI处理>CI处理。对于III节,CI处理抗折力显著大于FSI和DPS处理,与WSI处理无显著差异;CI处理截面模量显著大于其他处理,WSI与FSI处理差异不显著,但均显著大于DPS处理;CI处理弯曲力矩与WSI处理无显著差异,二者均显著大于FSI和DPS处理;各处理抗弯刚度和倒伏指数无显著差异。

表5 不同灌排模式下超级稻茎秆力学指标

处理	抗折力/N		截面模量/mm ³		抗弯刚度/(N·cm ²)	
	II	III	II	III	II	III
FSI	8.97±0.42b	4.59±0.04bc	8.43±0.32c	6.74±0.09b	46.02±1.81a	84.31±1.36a
WSI	9.38±0.26b	4.84±0.21ab	9.17±0.21b	7.04±0.21b	47.48±0.80a	86.75±1.08a
CI	10.31±0.12a	5.23±0.32a	10.16±0.06a	7.89±0.15a	49.66±1.42a	88.97±2.28a
DPS	6.85±0.24c	4.05±0.25c	4.70±0.28d	4.13±0.08c	40.07±1.08b	83.85±1.75a
处理	弯曲力矩/(N·cm)		倒伏指数			
	II	III	II	III		
FSI	13.48±0.22a	10.57±0.16b	152.99±1.60b	230.01±1.98a		
WSI	14.01±0.22a	11.39±0.14a	146.27±1.73b	237.30±4.59a		
CI	13.68±0.31a	11.24±0.20a	137.72±2.73c	220.30±9.04a		
DPS	11.20±0.23b	8.78±0.13c	167.30±2.69a	216.98±2.85a		

2.4 茎秆性状与倒伏指数的相关性分析

超级稻茎秆性状与倒伏指数的相关关系如表6所示。倒伏指数与茎秆部分形态和力学指标有显著或极显著相关关系。茎秆形态性状中,倒伏指数与重心高度显著正相关,与重心比例和节间长度极显著正相关,而与节间茎粗、茎壁厚度和节间充实度极显著负相关,与株高相关性不显著。茎秆力学特性中,倒伏指数与抗折力、茎秆截面模量极显著负相关,节间抗折力越大和茎秆截面模量越大的水稻抗倒伏能力更强。倒伏指数与弯曲力矩负相关,因抗折力与弯曲力矩极显著正相关,抗折力的变化影响倒伏指数与弯曲力矩的相关性,对倒伏指数和弯曲力矩进行偏相关分析可知,二者呈正相关关系($r=0.405$),但不显著。单株鲜质量与弯曲力矩极显著正相关,单株鲜质量越大,基部节间所受弯曲力矩越大,但由于单株鲜质量增加促进植株茎鞘物质累积量增加,节间粗度和茎壁厚度增大,对抗折力产生正向影响。控制抗折力对倒伏指数与单株鲜质量进行偏相关分析可知,二者存在正相关关系($r=0.271$),但不显著。

表6 超级稻茎秆性状与倒伏指数的相关关系

性状	株高	重心高度	重心比例	节间长度	节间粗度	茎壁厚度	节间充实度	单株鲜质量	抗折力	抗弯刚度	截面模量	弯曲力矩	倒伏指数
株高	1												
重心高度	0.847**	1											
重心比例	0.309	0.695**	1										
节间长度	0.502*	0.794**	0.769**	1									
节间粗度	0.472*	0.052	-0.465*	-0.418*	1								
茎壁厚度	0.377	0.091	-0.250	-0.343	0.888**	1							
节间充实度	0.387	-0.023	-0.470*	-0.483*	0.980**	0.935**	1						
单株鲜质量	0.628**	0.301	-0.199	-0.215	0.940**	0.919**	0.930**	1					
抗折力	0.367	0.020	-0.409*	-0.436*	0.956**	0.920**	0.959**	0.911**	1				
抗弯刚度	0.421*	0.304	-0.016	-0.054	0.715**	0.861**	0.743**	0.785**	0.795**	1			
截面模量	0.408*	0.028	-0.449*	-0.440*	0.989**	0.912**	0.980**	0.930**	0.976**	0.768**	1		
弯曲力矩	0.808**	0.573**	0.042	0.050	0.794**	0.753**	0.754**	0.914**	0.738**	0.671**	0.773**	1	
倒伏指数	0.043	0.493*	0.862**	0.830**	-0.793**	-0.629**	-0.810**	-0.601**	-0.742**	-0.351	-0.787**	-0.364	1

注 “*”表示5%水平下显著,“**”表示1%水平下极显著。

3 讨论

3.1 不同灌排模式对超级稻产量的影响

水稻产量主要来源于抽穗后功能叶片的光合产物,其中花后功能叶片光合产物所占比例可达总质量的90%^[16-17]。因此研究功能叶片的光合能力有助于理解不同灌排模式对产量的影响。本试验通过测定不同灌排模式剑叶面积以及花后期净光合速率可知,相较于浅水勤灌,浅湿调控和控制灌溉能显著增加剑叶面积,秸秆覆盖旱作对剑叶面积的增加不显著;三者花后期净光合速率均大于浅水勤灌。表明浅湿调控和控制灌溉不仅能够增加超级稻功能叶片面积,同时可提高花后期净光合速率,从而提高抽穗后功能叶片光合产物对籽粒的供应能力。水稻籽粒产量还来源于前期贮藏在茎鞘中的物质在生育后期向穗部的转运。本试验中,浅水勤灌虽节间粗度、茎壁厚度小于控制灌溉,但由于其株高较高、节间较长,茎鞘干物质累积量较大,茎鞘物质输出率和转化率显著大于控制灌溉和秸秆覆盖旱作。表明增加抽穗前贮藏在茎鞘中的干物质累积量,有利于提高茎鞘干物质向籽粒转运。综合功能叶片光合产物和茎鞘干物质转运,浅湿调控和控制灌溉产量高于浅水勤灌和秸秆覆盖旱作。

3.2 影响超级稻抗倒伏能力的特性

水稻抗倒伏能力与株高、重心高度、节间长度、茎壁厚度等茎秆形态性状以及植株各器官干物质累积分配有关^[15]。茎秆机械强度与节间粗度、茎壁厚度、茎秆干质量显著正相关^[16-17]。倒伏指数与株高、重心高度、基部节间长度显著正相关,与节间充实度、抗折力及截面模量显著负相关^[3-4]。试验研究表明,倒伏指数与重心高度、重心比例、基部节间长度显著正相关,与基部节间粗度、茎壁厚度、节间充实度、抗折力显著负相关。弯曲力矩取决于株高和地上部鲜质量,株高越高,地上部鲜质量越大,弯曲力矩越大,同时地上部鲜质量增加促进茎秆物质累计量增加,增加节间充实度,提高抗折力。通过对弯曲力矩和倒伏指数偏相关分析知,两者正相关性不显著。这与杨惠杰等^[18]认为“倒伏指数与株高、弯曲力矩显著正相关,与节间粗度关系不密切”的结论不同。茎秆截面模量和节间充实度取决于节间粗度和茎壁厚度,茎粗、壁厚的增加能够提高茎

秆截面模量和节间充实度,促进茎秆机械组织的发育和充实,提高茎秆抗折力,增强抗倒伏能力。超级稻株高较高,但是适宜的灌排模式下,基部节间倒伏指数仍低于临界值(200),说明适宜灌溉模式可以通过增加节间粗度、茎壁厚度等综合影响,降低超级稻的倒伏风险,这与张忠旭等^[19-20]认为“株高不是造成倒伏的直接原因,高秆不一定易倒伏”的结论一致。因此,要增强水稻的抗倒伏能力,关键在于增加节间粗度和茎壁厚度,促进茎秆机械组织的充实。

3.3 不同灌排模式对超级稻抗倒伏能力的影响

赵黎明等^[21]研究表明轻干湿交替灌溉降低植株高度和基部节间长度,生物产量和茎鞘干物质累积量均较大。本研究表明,相较于浅水勤灌,浅湿调控能够显著降低株高,对基部节间长度和粗度及茎壁厚度的影响不显著;显著增加穗干物质质量和地上部干物质累积量,对茎鞘干物质累积量无显著影响;茎秆形态指标和力学特性与浅水勤灌无显著差异,因此对茎秆抗倒伏能力的提高并不显著。与浅水勤灌相比,浅湿调控水分管理模式较为节水,对超级稻的水分胁迫程度较轻,加之2017年降雨强度小,较少达到蓄雨上限,因此浅湿调控的土壤水分状态变化与浅水勤灌差异较小,茎秆形态性状与浅水勤灌差异性较小,抗倒伏能力无显著提高。浅湿调控与浅水勤灌抗倒伏能力差异不大,但可达到提高产量,节约灌溉用水的效果。

彭世彰等^[22]研究表明控制灌溉条件下水稻节间长度小于浅水勤灌,而基部茎秆壁厚、节间充实度高于浅水勤灌,抗倒伏能力也较强。郭相等^[15]研究表明,节水灌排模式下茎粗、茎壁厚度、茎秆截面面积、倒一和倒二节间充实度较传统淹灌模式均显著增加,基部节间长度显著降低,抗折力提高。研究表明,控制灌溉通过适当的水分胁迫抑制超级稻基部节间的伸长,使基部节间横向发展,增加节间粗度和茎壁厚度,提高了茎秆的机械性能和抗弯截面模量,降低了茎秆壁厚组织承受的应力;同时株高降低和节间缩短,有助于降低弯曲力矩。以上因素综合作用使茎秆抗倒伏能力提高。由于天气预报的准确性,极少出现降雨前灌水现象,因此控制灌溉雨后蓄水既能提高雨水利用效率又能够减少灌溉次数,从而减少灌溉水量。

刘立军等^[11]认为旱种水稻基部茎粗、节间充实度低于常规灌溉。本试验表明,秸秆覆盖旱作超级稻基部I节长度最小,而II节长度显著增大。干旱能抑制I茎节伸长,但旱后复水时,II节产生了强烈的反弹,旱后的水分补偿可拮抗水分缺失导致的节间长度降低。赵宏伟等^[23]研究表明干旱胁迫不仅抑制茎叶穗生长,且降低干物质累积量,胁迫程度越重,抑制作用越明显。研究表明,秸秆覆盖旱作超级稻茎鞘干物质累积量减小,茎鞘物质输出率及转化率均降低,而秸秆覆盖旱作单株穗干物质质量与浅水勤灌处理无显著差异,这可能是由于秸秆覆盖旱作剑叶面积和花后期光合速率大于浅水勤灌,功能叶片光合产物增加的原因。秸秆覆盖旱作超级稻长期处于干旱状态且未能及时获得更多水分补偿导致节间粗度、茎壁厚度都低于其他处理,茎秆截面模量及贮藏物质能力降低,茎鞘干物质累积量和机械强度降低。虽然秸秆覆盖旱作比控制灌溉和浅湿调控能够减少更多的灌溉用水,但也因此降低了水稻抗倒伏能力,不利于水稻高产稳产目标的实现。

4 结 论

1)相较于浅水勤灌,浅湿调控显著提高了南粳5055花后期净光合速率和剑叶面积,穗干质量增加了23.3%,茎鞘贮藏干物质质量无显著差异,对节间粗度、茎壁厚度等茎秆形态性状和力学特性的改善不显著。

2)控制灌溉相较于浅水勤灌不但显著提高了花后期功能叶片对籽粒贡献,降低了茎鞘干物质输出率和转化率,而且进一步改善茎秆形态性状和力学特性,显著提高茎秆抗倒伏能力,穗干质量相较于浅水勤灌增加29.9%,同时明显降低了灌水量。

3)秸秆覆盖旱作虽较浅水勤灌降低了茎鞘物质输出率和转化率,但由于干旱胁迫严重,茎鞘干物质累积量低于浅水勤灌,茎秆形态性状未能优化,抗倒伏能力下降。从南粳5055产量、茎秆抗倒伏能力及灌溉水量等方面综合考虑,控制灌溉最佳,其次为浅湿调控。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 申广勤,石英尧,黄艳玲,等. 水稻抗倒伏特性及其与茎秆性状的相关性研究[J]. 中国农学通报, 2007(12): 58-62.
- [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] KASHIWAGI, SASAKI, 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.
- [6] KASHIWAGI T, HIROTSU N, UJIE 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.
- [7] NISHIUCHI S, YAMAUCHI T, TAKAHASHI H, et al. Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice[J]. *RICE*, 2011, 5(1):2.
- [8] OHE, OKITA, DAIMON. Effects of deep-flooding irrigation on growth, canopy structure and panicle weight yield under different planting patterns in rice[J]. *Plant Production Science*, 2010, 13(2): 193-198.
- [9] WON, CHOI, LEE, et al. Water saving by shallow intermittent irrigation and growth of rice[J]. *Plant Production Science*, 2005, 8(4): 487-492.
- [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] 刘立军, 王康君, 葛立立, 等. 旱种水稻基部节间性状与倒伏的关系及其生理机制[J]. *作物学报*, 2012, 38(5): 848-856.
- [12] 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.
- [13] 王振昌, 郭相平, 杨静晗, 等. 旱涝交替胁迫对水稻干物质生产分配及倒伏性状的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 114-123.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张喜娟, 姜树坤, 郑旭, 等. 水稻基部伸长节间性状与茎秆机械强度的相关分析和QTL定位[J]. *植物生理学通讯*, 2009, 45(3): 223-228.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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(2):81-85.
- [20] 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.
- [21] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 等. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 159-169.
- [22] 彭世彰, 张正良, 庞桂斌. 控制灌溉条件下寒地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.
- [23] 赵宏伟, 田雪飞, 于美芳, 等. 孕穗期干旱胁迫对寒地粳稻干物质积累、转运及产量形成影响[J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(11): 1-8.

The Resistance of Super Rice *Oryza Sativa* L. Nanjing 5055 to Lodging under Different Irrigation and Drainage

HAO Shurong, PAN Yongchun, DONG Bohao, WU Yunyu, WANG Zixin
(College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract:【Objective】This paper is to investigate the effect of different irrigation and drainage on resistance of rice, *Oryza sativa* L. Nanjing 5055 against lodging. 【Method】The experiments were conducted in pots and we considered four treatments: frequent shallow irrigation(FSI), wet-shallow irrigation(WSI), controlled irrigation (CI), and deficit-irrigation with straw mulching (DPS). In each treatment, we measured the morphology and mechanical properties of the rice stem, the changes in growth indexes, the photosynthetic rate of the flag leaf after the flowering stage, as well as the translocation of the stem-sheath to dry-matter (PDESS) and to the grain (PDTSS) respectively. 【Result】Compared with FSI, WSI reduced irrigation water consumption but increased the photosynthetic rate and flag leaf area after the flowering stage, beneficial to yield, despite having no significant improvement in morphology and mechanical properties of the stems. Compared with WSI, CI not only reduced the amount of irrigation water, but also improved the morphology and mechanical characteristics of the stems, thereby enhancing lodging resistance and increasing the final yield. Compared with FSI, DPS reduced the translocation from stem-sheath (PDESS) to dry-matter and the grain (PDTSS), but increased the dry-matter accumulation due to the increased water stress, leading to a decrease in lodging resistance. 【Conclusion】Considering yield, lodging resistance and irrigation water consumption, CI was the most suitable irrigation and drainage method, followed by WSI. The results presented in this paper can help design irrigation and drainage system in southern China to improve resistance of rice against lodging and safeguarding its production.

Key words: irrigation- drainage patterns; dry- matter accumulation; stem morphology; mechanical properties; lodging resistance

责任编辑:赵宇龙