

灌溉和栽培模式 对水稻生长产量及倒伏性状的影响

赵政峰¹, 梁 森², 张 健³, 邱娅柳⁴, 郭相平¹

(1. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 211110; 2. 徐州市水利科学研究所, 江苏 徐州 221018;

3. 江苏省农村水利科技发展中心, 江苏 南京 210029; 4. 高淳区水务局, 江苏 南京 211300)

摘要:研究了栽培和灌溉模式对水稻生长、产量与倒伏性状的影响,以探寻江苏省水稻适宜的节水高产模式。采用桶栽试验,设置移栽稻、直播稻两种栽培模式,以及浅水勤灌、蓄水控灌高蓄、蓄水控灌低蓄3种灌溉模式,分析了水稻生长、产量和倒伏指标对灌溉和栽培模式的响应特征。结果表明,乳熟期前直播稻的株高低于移栽稻,而在黄熟期无显著差异。与移栽稻相比,直播稻植株重心高度和重心比例升高,茎粗减小,抗折力下降,倒伏指数升高(控灌高蓄除外)。控灌低蓄处理能减小节长、增加茎粗,提高茎干抗折力,从而降低茎秆倒伏系数。直播稻产量低于移栽稻。蓄水控灌降低了产量,其中控灌高蓄处理的产量低于低蓄处理,但差异不显著。上述成果对江苏省水稻灌溉和栽培模式选择具有指导意义。

关键词:水稻; 栽培模式; 灌溉模式; 生长产量; 倒伏

中图分类号:S274

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2023)06-0022-0005

Effects of irrigation and cultivation mode on growth yield and lodging traits of rice

ZHAO Zhengfeng¹, LIANG Sen², ZHANG Jian³, QIU Yaliu⁴, GUO Xiangping¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Xuzhou Hydraulic Research Institute, Xuzhou 221018, China;

3. Jiangsu Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing 210029, China;

4. Gaochun Water Affairs Bureau, Nanjing 211300, China)

Abstract: The effects of cultivation and irrigation modes on rice growth yield and lodging traits were studied in order to explore the suitable water-saving and high-yield mode of rice in Jiangsu province. Two cultivation modes of transplanted rice and direct-seeded rice, and three irrigation modes of shallow and frequent irrigation (SFI, CK), controlled irrigation with high depth of water after rainfall (CH) and controlled irrigation with low depth of water after rainfall (CL) were tested by barrel-planted experiments. The results showed that the plant height of direct-seeded rice was lower than that of transplanted rice before milk ripening stage, but there was no significant difference at yellow ripening stage. Compared with transplanted rice, direct-seeded rice would increase the barycenter height and barycenter ratio of plant, decrease stem diameter and bending resistance, and thus increase lodging index (except for CH). CL could reduce the stem length, increase the stem diameter, improve the stem

收稿日期: 2023-03-24

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020049和2019045)

作者简介: 赵政峰(1997—),男,硕士研究生,主要从事灌排技术研究。E-mail:2547887121@qq.com

通信作者: 郭相平(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事灌排技术研究。E-mail:xpguo@hhu.edu.cn

bending resistance, and thus reduce the lodging index of stem. The yield of direct-seeded rice was lower than that of transplanted rice. Controlled irrigation reduced the yield, where CH treatment was lower than CL, while the difference between treatments was not significant. The above results will be useful for rice irrigation and cultivation pattern selection in Jiangsu Province.

Key words: rice; cultivation mode; irrigation mode; growth yield; lodging

目前移栽稻蓄水控灌模式的研究较多,较少涉及直播稻。直播稻具有种植成本低,播种效率高的优点,在江苏省得到了快速发展。但直播稻易于倒伏,会增加收割成本,降低产量和品质^[1]。水稻是江苏省最大耗水作物,水稻节水灌溉意义重大。国内有学者提出了蓄水控灌模式^[2-3],即在传统控制灌溉灌水下限较低的基础上,通过增加雨后蓄水深度提高雨水利用效率,并利用干旱胁迫改善茎干性状,具有较好的节水和抗倒伏效果。灌溉和栽培模式及其耦合效应对江苏省直播稻生长产量和倒伏性状的影响规律有待进一步研究。本文设置不同的栽培和灌溉模式组合,对上述规律进行了分析,以期对江苏水稻灌排和栽培模式选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试区概况

试验于2021年5-11月在南京市河海大学节水园区(31°57'N, 118°50'E)进行。试验区属于亚热带湿润季风气候,年均降雨天数120 d,年均气温为15.4℃,多年平均降水量1 206.5 mm,蒸发量903.2 mm,无霜期220 d。2021年水稻生育期内气象参数见表1。

土壤取自节水园区稻田,质地为黏壤土。饱和体积含水率为43.9%,干容重1.40 g/cm³,土壤速效氮和速效磷含量分别为24.54 mg/kg和13.41 mg/kg。

土壤理化性质见表2。

试验采用桶栽。圆形塑料桶直径70 cm,桶高100 cm。桶底铺设15 cm砂石反滤层,再铺无纺布防止泥沙颗粒进入反滤层。填土厚度为60 cm,土壤分层装入桶内压实(每10 cm进行一次压实)。上部保留25 cm空间蓄水。桶埋入地下80 cm。

供试品种为当地常用高产品种“南粳44”,移栽稻于2021年5月23日进行育秧,7月5日选择三叶一心大小基本一致的秧苗进行移栽,种植密度为16穴/m²,每穴3株。直播稻于6月28日播种,出苗后每穴保留3株,种植密度与移栽稻相同。直播稻和移栽稻均于10月22日进行收获。施基肥(复合肥, N:P:K=15%:15%:15%)300 kg/hm²,返青肥、分蘖肥和穗肥分别施用尿素150 kg/hm²、75 kg/hm²和150 kg/hm²。全生育期进行人工除草。除灌溉和栽培措施外,其他措施均相同。

各处理设计以及灌溉指标控制见表2和表3所示。每个处理重复3次。

2.3 观测内容及测试方法

2.3.1 气象与灌排资料

(1)气象资料

来自园区气象站,包括温度、湿度、风速、太阳辐射量、降雨量等。

(2)田面水深与土壤含水率

每日上午8点测定。当田面有水层时,通过钢尺读取水层深度,遇降雨进行加测;田面无水层时,

表1 节水园区气象资料

月份	平均气温/℃	极端最高气温/℃	极端最低气温/℃	降水量/mm	降水日数/d	日照时数/h
5	22.1	33.9	13.8	224.9	12.0	165.9
6	26.0	35.2	17.3	77.7	15.0	152.5
7	28.1	37.0	20.7	385.6	17.0	148.7
8	27.5	36.2	21.6	200.0	18.0	139.2
9	26.3	35.0	18.2	38.6	3.0	197.6
10	19.2	34.4	8.3	120.2	9.0	174.6
11	12.6	23.3	0.2	23.2	5.0	206.1
全生育期	23.1	37.0	0.2	1 070.2	79.0	1 184.6

表2 试验设计及处理方式

处理编号	灌溉模式	栽培模式
SFI(CK)	浅水勤灌	移栽稻
CH+T	高蓄模式	移栽稻
CL+T	低蓄模式	移栽稻
SFI+D	浅水勤灌	直播稻
CH+D	高蓄模式	直播稻
CL+D	低蓄模式	直播稻

利用埋设在土壤中0~30 cm的TDR探头进行土壤水分测定。

(3)灌排水量

采用体积法折算成水层深度。

2.3.2 作物生长指标

(1)茎粗:每个处理选3穴12株,于田面5 cm以上处测量,采用电子游标卡尺。

(2)株高:在水稻抽穗前测定水稻基部至最高叶尖的高度,抽穗后则测定水稻基部至最高穗尖的高度。

表3 不同处理灌排控制指标

单位:mm

处理	灌溉模式	灌溉控制指标	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
SFI	浅水勤灌	灌水上限	30	30	50	40	40	自然落干
		灌水下限	10	10%~60%	10	10	10	
		蓄雨上限	40	80	90	90	80	
CH	控灌高蓄	灌水上限	30	0	0	0	0	自然落干
		灌水下限	10	60%~70%	70%~80%	80%	70%	
		蓄雨上限	80	120	150	150	150	
CL	控灌低蓄	灌水上限	30	0	0	0	0	自然落干
		灌水下限	10	60%~70%	70%~80%	80%	70%	
		蓄雨上限	60	100	120	120	120	

注:1.“%”表示表层30 cm土壤的含水率占土壤饱和含水率的百分比,0表示含水率为饱和含水率;2.分蘖期和黄熟期灌溉控制指标前高后低。

高度。植株选定与茎粗测量同^[4]。

2.3.4 水稻抗折指标

在水稻收获前每穴取3株主茎,每个处理9个茎干。保留叶鞘、叶片、和穗。

(1)重心高度与重心比例:采用找平衡支点的方法。量取水稻茎秆基部至重心点的长度则为水稻重心高度,该高度除以株高即为重心比例。

(2)节间长度:用直尺测量茎秆基部第二、第三节节的长度(自下而上称为倒二节、倒三节)。

(3)鲜重:将水稻带穗、叶和鞘的完整地上部单茎置于精度为0.01 g的感应天平上测量水稻地上部分鲜重;之后将各水稻进行分割,分别测量穗、茎秆及各茎节的鲜重。

(4)干重:将各节茎鞘、穗和叶片分别装于标记好的牛皮纸信封中,烘箱内105℃杀青半小时后75℃烘干至恒温,取出冷却,用感量为0.01 g的电子天平上分别称量各节间茎鞘、穗和叶片的干重。

(5)茎粗:用游标卡尺测量相互垂直方向上茎干的直径和最小直径作为长轴和短轴茎粗。

(6)茎秆抗折力:取水稻茎秆各节进行抗折力

测试。将待测茎秆水平放置在电子茎秆强度试验机上,两端固定,形成简支梁。传感器以6 cm/min的速度向下移动,当茎秆发生屈服破坏时的压力则为水稻茎秆最大抗折力。

(7)倒伏指数:采用式(1)计算

$$I_L = M / F_{\max} \times 100 \tag{1}$$

式中: I_L 为可能发生倒伏的茎节倒伏系数; M 为节间断裂弯矩; F_{\max} 为该节最大抗折力,测定方法如前述。弯矩 M 采用式(2)计算

$$M = L \times W \times 0.001 \times g \tag{2}$$

式中: L 为该茎节断裂处至穗顶的长度; W 为该茎节断裂处至穗顶的鲜重; g 为重力加速度,取9.8。

2.3.5 水稻产量指标

各处理水稻单打单收,折算成含水率14%时的产量作为实际产量。

2 结果与分析

2.1 灌溉和栽培模式对水稻株高和重心高度的影响

栽培模式对分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期的水稻株高有显著影响,如表4所示。相同灌溉模

表 4-1 栽培和灌溉模式对水稻株高和重心高度的影响

单位:mm

处理	株高/cm					重心高度/cm	重心比例
	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期		
SFI(CK)	48.92±1.93a	61.5±2.81a	87.33±3.96ab	89.58±4.46a	92.75±3.28b	44.84±3.32d	0.53±0.04d
CH+T	50.22±1.86a	62.22±3.19a	89.67±2.6a	90.44±4.45a	95.67±1.22a	47.38±2.01bc	0.57±0.05bc
CL+T	50.22±1.72a	61.89±2.8a	85.67±4.85b	87.56±4.33a	93.22±3.49ab	45.87±2.46cd	0.54±0.03cd
SFI+D	41.67±10.39b	58.58±2.75b	81.33±4.56c	88.08±3.94a	92.33±2.23b	48.65±2.98ab	0.61±0.04a
CH+D	39.78±1.79b	56.89±1.83b	79.22±2.77c	89.07±3.74a	94.12±2.92ab	48.07±0.74bc	0.58±0.04ab
CL+D	43±1.8b	58.89±1.05b	81±2.69c	88.11±2.76a	93.78±2.82ab	50.41±1.48a	0.60±0.03ab

注:表中不同字母表示同列数据在0.05水平下差异显著,下同。

表 4-2 栽培和灌溉模式对水稻株高和重心高度的影响显著性分析

单位:mm

项目	株高/cm					重心高度/cm	重心比例
	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期		
C	41.24***	31.94***	51.622***	0.579	0.498	22.421***	22.648***
I	0.551	0.487	0.494	0.997	3.523*	1.836	0.29
C×I	0.657	1.378	2.967	0.403	0.729	3.234*	4.448*

注:表中C与I分别代表种植方式与灌溉方式;*,**与***分别表示 $P<0.05$, $P<0.01$ 与 $P<0.001$ 。

式下移栽稻株高显著高于直播稻($P<0.001$)。直到进入乳熟期后,栽培模式的影响才逐渐消除($P>0.05$)。生育前期株高的差异,主要是水稻生长期不同所致。移栽稻播种时间早于直播稻,相同日期时生长时间长,株高较大。

灌溉模式对黄熟期株高有显著影响。与浅水勤灌相比,黄熟期蓄水控灌处理的株高有增加的趋势,表现为控灌高蓄>控灌低蓄>浅水勤灌。其中移栽稻控灌高蓄处理株高显著高于浅水勤灌,但控灌低蓄处理与浅水勤灌的差异不显著。这与蓄水深度增加刺激植株生长,而干旱胁迫抑制株高增加有关^[5]。

栽培模式及其与灌溉模式的交互作用对水稻重心高度有显著影响。与CK相比,直播稻蓄水控灌模式下重心均显著升高。相同灌溉模式下,直播稻重心高于移栽稻,其中浅水勤灌和控灌低蓄处理与移栽稻差异显著。相同栽培模式下,移栽稻蓄水控灌处理重心有升高的趋势,其中控灌高蓄处理显著高于浅水勤灌;直播模式下控灌低蓄处理最高且显著大于控灌高蓄处理,与移栽稻的变化趋势不同,原因尚不清楚。重心比例的变化趋势与重心高度相同。总体而言,直播和蓄水控灌模式使重心高度和相对高度较移栽稻有上升的趋势,对提高抗倒伏能力不利。

2.2 灌溉和栽培模式对水稻抗倒伏性能的影响

水稻节长和粗细是影响抗倒伏性能的重要指

标。研究表明茎倒伏主要发生在倒2~倒3节,故本试验测试了灌溉和栽培模式上述两节的倒伏指标,如表5和表6所示。可以看出,灌溉模式显著影响倒2和倒3节的节间长度,控灌低蓄模式有助于减小节间长度,于抗倒伏有利,而高蓄模式效果相反。栽培模式及其交互作用的影响不显著。

栽培模式对茎干倒2节长轴、短轴茎粗影响显著($P<0.05$)。直播稻茎粗小于移栽稻,更容易倒伏。灌溉模式能显著影响倒2节短轴茎粗和倒3节长轴茎粗,即低蓄模式增加而高蓄模式减少茎粗。移栽稻模式下,控灌低蓄与控灌高蓄处理的茎粗差异显著,表明控灌低蓄模式对提高抗倒伏能力有利^[6]。

灌溉模式对倒2和倒3节茎秆的抗折力有显著影响,但栽培模式及其交互作用的影响不显著。直播和移栽模式下控灌低蓄处理,其茎节抗折力较控灌高蓄处理有提高的趋势。尤其是移栽模式下二者差异显著。与浅水勤灌相比,控灌低蓄处理茎节抗折力有增加趋势,而控灌高蓄则有所下降,但均为达到显著差异水平。控灌高蓄处理的茎秆抗折力最小,表明蓄水过高对提高抗倒伏能力不利。

与移栽稻相比,直播稻倒2节倒伏系数有增加的趋势,倒3节则有减少趋势,但差异不显著。控灌低蓄处理降低了倒2和倒3节的倒伏系数,其中移栽稻倒2和直播稻倒3节与浅水勤灌差异显著。因此采用蓄水控灌低蓄处理,有助于提高直播稻的抗倒伏能力。移栽稻控灌高蓄处理倒2节的倒伏指数

表 5-1 灌溉和栽培模式对茎秆力学性能的影响

茎节	处理	节长/mm	长轴粗度/mm	短轴粗度/mm	茎秆抗折力/N
倒2节	SFI(CK)	11.23±1.95a	4.83±0.37ab	4.40±0.38ab	4.15±1.31abc
	CH+T	10.58±2.42ab	4.54±0.41b	4.09±0.31cd	3.3151±2.11bc
	CL+T	8.79±1.23c	5.19±0.41a	4.44±0.38a	5.54±1.44a
	SFI+D	9.07±0.75bc	4.38±0.37b	3.84±0.334d	3.92±1.43bc
	CH+D	9.88±1.60abc	4.56±0.33b	3.95±0.413bcd	3.51±1.07bc
	CL+D	8.97±2.05bc	4.35±1.08b	4.28±0.27abc	4.94±1.55ab
倒3节	SFI(CK)	14.49±1.167a	4.06±0.24ab	3.69±0.298ab	2.93±0.66bc
	CH+T	15.09±2.456a	3.79±0.41b	3.52±0.346b	2.50±0.92c
	CL+T	12.14±1.772b	4.20±0.218a	3.76±0.286ab	3.49±1.43ab
	SFI+D	13.71±0.496a	3.94±0.31ab	3.68±0.217ab	2.77±0.84bc
	CH+D	14.20±1.972a	4.14±0.32a	3.78±0.27ab	2.65±0.86bc
	CL+D	11.97±1.698b	4.19±0.31a	3.81±0.253a	3.80±0.58a

注:表中不同字母表示同列数据在0.05水平下差异显著。

表 5-2 灌溉和栽培模式对茎秆力学性能影响显著性分析

茎节	项目	节长/mm	长轴粗度/mm	短轴粗度/mm	茎秆抗折力/N
倒2节	C	3.953	8.815**	9.525**	0.285
	I	3.616*	0.823	4.427*	6.96**
	C×I	2.478	2.807	2.359	0.315
倒3节	C	2.059	0.914	1.982	0.173
	I	12.694***	3.283*	1.184	6.885**
	C×I	0.257	3.122	1.305	0.364

注:表中C与I分别代表种植方式与灌溉方式;*,**与***分别表示 $P<0.05$, $P<0.01$ 与 $P<0.001$ 。

表 6 灌溉和栽培模式对倒伏指数与产量的影响

处理	倒伏指数		产量 / g
	倒2节	倒3节	
SFI(CK)	218.01±87.28b	202.32±70.11ab	271.85±13.69a
CH+T	318.94±116.37a	265.24±108.23a	191.30±28.55ab
CL+T	159.45±43.89c	189.19±77.48ab	217.50±42.30ab
SFI+D	296.45±116.03ab	264.53±99.11a	206.15±82.50ab
CH+D	297.12±138.47ab	245.19±76.85ab	161.05±48.60b
CL+D	210.38±51.45bc	173.89±26.37b	178.95±35.90ab

最大,且显著大于浅水勤灌和蓄水控灌低蓄模式,表明过高的雨后蓄水深度会增加倒伏风险。

结合表5数据可以看出,倒伏指数的增加与茎节的抗折力下降趋势一致。这说明蓄水控灌模式下的干旱胁迫能提高抗折力,而淹水胁迫的作用相反。若能合理协调二者的影响(如低蓄模式),可以在增加雨水利用的条件下不降低水稻的抗倒伏

性能。

2.3 灌溉和栽培模式对产量的影响

与浅水勤灌相比,蓄水控灌处理的经济产量呈下降趋势,且随着雨后蓄水深度的增加产量下降。与移栽稻相比,2021年直播稻产量均低于对应的移栽稻,但未达到显著水平。

(下转第31页)

表2 北固村水系连通后评价结果对比

河道名称	负载度		可见光植被指数		通达度		淤泥厚度	
	治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后
南北大沟	1.325	1.408 ↑	0.371	0.053 ↓	1.693	2.112 ↑	0.19	0.025 ↓
张唐大沟	4.199	3.200 ↓	0.416	0.059 ↓	1.500	1.936 ↑	0.21	0.027 ↓
西村沟	4.583	2.700 ↓	0.373	0.053 ↓	1.693	1.743 ↑	0.18	0.023 ↓
杭村沟	1.958	1.542 ↓	0.478	0.068 ↓	1.375	1.743 ↑	0.25	0.033 ↓
A 沟	0.750	0.783 ↑	0.433	0.062 ↓	1.222	1.315 ↑	0.21	0.027 ↓
B 沟	1.700	0.533 ↓	0.319	0.045 ↓	1.100	1.341 ↑	0.15	0.019 ↓
C 沟	0.458	1.033 ↓	0.312	0.044 ↓	1.269	1.291 ↑	0.14	0.018 ↓

- [5] 孙健. 环度分析方法在辽河铁岭段水系形态指标评估中的应用[J]. 水利技术监督, 2021(4): 62-25.
- [6] 那娜. 辽河流域平原区河网水系连通性评价[J]. 水利技术监督, 2019(2): 193-196, 246.
- [7] 刘克强, 李敏. 平原河网地区圩区建设与规划的几点思考[J]. 水利规划与设计, 2009(5): 20-21, 54.
- [8] 王延贵, 陈康, 陈吟. 水系连通机理及其影响因素[J].

中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 191-200.

- [9] 高学平, 胡泽, 闫晨丹, 等. 考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 41-47.
- [10] 代稳, 王金凤, 陕振沛, 等. 荆南三口流域水系连通性变化对水资源开发利用的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 114-120.

(上接第26页)

3 结 语

(1)水稻直播模式降低了乳熟期前水稻株高而后期与移栽稻差异不显著。蓄水控灌株高大于浅水勤灌, 其中移栽稻控灌高蓄处理显著高于浅水勤灌。

(2)栽培模式对水稻重心高度和重心比例有极显著影响。直播稻植株重心高度和重心比例高于移栽稻。与浅水勤灌相比, 移栽稻蓄水控灌处理重心比例升高, 而直播稻则呈下降趋势。控灌低蓄处理能降低直播稻和移栽稻的倒伏风险。茎粗和茎干抗折力增加是倒伏指数降低的主要原因。浅水勤灌模式下, 直播稻较移栽稻更容易倒伏。

(3)与对照相比, 蓄水控灌和直播稻模式均降低了水稻产量, 其中直播稻高蓄模式的产量最低。相同灌溉模式下, 直播稻产量均低于移栽稻。因此在追求产量的前提下, 直播稻蓄水控灌高蓄模式应

谨慎采用。

参考文献:

- [1] 冯延江, 王麒, 赵宏亮, 等. 我国水稻直播技术研究现状及展望[J]. 中国稻米, 2020, 26(1): 23-27.
- [2] 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.
- [3] 郭相平, 蒋新会, 袁静. 蓄水控灌模式下水稻耗水量及灌排定额初探[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(1): 65-67.
- [4] 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.
- [5] 甄博, 郭相平, 陆红飞, 等. 旱涝交替胁迫对拔节期水稻生长和土壤氧化还原电位的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 42-47.
- [6] LUO X, WU Z, FU L, et al. Evaluation of lodging resistance in rice based on an optimized parameter from lodging index[J]. Crop Science, 2022(62): 1318-1332.