

控水灌溉对寒地水稻物质生产及 灌浆动态和产量的影响

吕艳东^{1,2,3}, 郑桂萍³, 郭晓红³, 殷大伟^{1,2}, 宋金丽⁴,
马殿荣^{1,2}, 徐正进^{1,2}, 陈温福^{1,2}

(1. 沈阳农业大学水稻研究所, 辽宁 沈阳 110161; 2. 辽宁省北方粳稻遗传育种重点实验室, 辽宁 沈阳 110161;
3. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319; 4. 黑龙江省龙镇农场组织部, 黑龙江 五大连池 164135)

摘要:以垦鉴稻 5 号为材料, 采用负压式土壤湿度计监测土壤水势, 通过防雨棚内的盆栽控水试验, 较系统地研究了水稻返青至成熟期 -8 ~ -10 kPa 的间歇控水灌溉对寒地水稻物质生产、灌浆动态和产量影响。主要结果如下: 控水处理使供试品种的穴穗数减少 1.54%; 穗粒数增加了 3.93%; 优、中、劣势粒的结实率分别增加了 3.53%、12.77% 和 28.97%; 优、中、劣势粒的千粒重分别增加了 0.96%、0.48% 和 0.60%; 生物产量增加 8.27%; 经济系数提高 5.73%; 经济产量增加 14.47%。控水处理使供试品种开花后的干物质积累量增加, 鞘输出率和转换率分别提高 6.21% 和 4.01%。控水处理加速了供试品种的灌浆进程, 延迟了劣势粒峰值出现的时间, 提高了优、中、劣势粒的 $\bar{G}$ 、 G_{max} 、 I 和 W_{max} 值, 缩短优、中、劣势粒的活跃生长期。

关键词: 控水灌溉; 寒地水稻; 物质生产; 灌浆动态; 产量

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)05-0120-08

我国是世界上最大的水稻生产国^[1], 水稻耗水量是农作物里最大的, 其耗水量占全国总用水量 54%, 占农业总用水量 65% 以上。我国水稻约 15% 分布在北方的半干旱、干旱地区, 仅辽、吉、黑三省水稻面积达 440 万 hm^2 左右。以往关于土壤水分对水稻影响的研究以结实期的最多^[2~7], 在水稻的全程生育期不同阶段、不同程度、以及不同历时的水分胁迫对水稻生长发育的影响也有研究^[8~13]。随着我国水资源的日益紧缺和受灾面积大持续时间长的特大旱灾的频繁发生, 说明进行持续的水稻水分调控试验研究是非常具有现实意义的, 而这方面的研究较少^[14~17], 尤其在寒地关于控水灌溉对水稻产量影响的系统研究更少^[18]。为了既能节水, 又使控水指标数量化, 又能避免盲目节水而导致的水稻产量下降, 研究控水灌溉与水稻产量的关系十分必要。本研究采用负压式土壤湿度计严格监测土壤水势, 以生产上应用的主栽品种为材料, 研明控水灌溉对水稻产量及产量构成因素、物质生产和灌浆动态诸性状指标的调控效应, 为寒地节水灌溉增产保优技术指标的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设计

试验于 2009 年在黑龙江八一农垦大学盆栽场进行, 在防雨棚中人工严格控水, 晴天时打开防雨棚。供试土壤为草甸土, 土壤的基础条件碱解氮 200.00 mg/kg、有效磷 15.22 mg/kg、速效钾 170.20 mg/kg、有机质 2.51%、pH 7.61。

供试品种垦鉴稻 5 号, 主茎为 12 片叶。4 月 10 日浸种, 4 月 19 日播种 (水 9 L/ m^2 , 可溶性育苗专用肥 60 g/ m^2 , 移栽灵 2 mL/ m^2 , 三者混匀喷施苗盘), 4 月 26 日出苗, 秧田管理正常进行, 5 月 20 日进行移栽, 每盆 3 穴, 每穴 3 苗, 选叶龄均为 3.1 ~ 3.5 的秧苗, 均匀分布。盆栽基肥氮肥为尿素, 用量 0.76 g/盆 (以纯 N 计); 磷肥为磷酸二铵, 用量 0.49 g/盆 (以 P_2O_5 计); 钾肥为硫酸钾, 用量 1.16 g/盆 (以 K_2O 计), 5 月 30 日施分蘖肥尿素 0.27 g/盆 (以纯 N 计)。7 月 20 日施穗肥尿素 0.06 g/盆 (以纯 N 计), 硫酸钾 0.17 g/盆 (以 K_2O 计)。

采用盆栽人工控制水分方法, 盆钵直径为 28 cm, 高 30 cm, 每盆装过筛混匀土 10 kg, 移栽前模拟

收稿日期: 2011-03-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAD01A01-6); 国家科技支撑计划项目 (2007BAD65B03-3); 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (nyhyzx07-001); 农业科技成果转化资金项目 (2008GB2B200089)

作者简介: 吕艳东 (1978-), 男, 黑龙江大庆人, 博士研究生, 主要从事水稻高产生理研究。E-mail: luyandong336@sohu.com。

通讯作者: 陈温福 (1955-), 男, 辽宁法库人, 教授, 博士生导师, 从事水稻超高产育种及高产栽培生理研究。E-mail: wfchen5512@yahoo.com.cn。

水耙地搅浆,沉降几日后插秧。用南京土壤研究所生产的负压式土壤湿度计监测土壤水势。开始控水时安装负压式土壤湿度计,安装时陶头中部离土表 10 cm,在土表湿度计管的周围用泥将缝隙塞严,以免影响试验效果。控水处理共用 8 支土壤湿度计监测土壤水势,每日 8:00 和 14:00,2 次读表,根据处理要求及时补水。处理:插秧后浅水层 3~5 cm,返青后,自然落干至 -8~-10 kPa;然后覆水至 3~5 cm,再自然落干至 -8~-10 kPa,如此反复直至蜡熟末期。全生育期土壤水势最低控制在 -10 kPa 以内。对照:插秧后至蜡熟末期浅水层 3~5 cm。生育期间人工除草。供试盆数为处理和对照各 37 盆,随机排列。9 月末收获。

1.2 测试内容与方法

分别于分蘖盛期、拔节期、开花期、灌浆盛期、成熟后期取样,每次取 4 穴,测定各处理的干物质积累量。每次取样时切去根系,将每穴地上部分分成叶、茎、鞘、穗和枯叶几部分,烘干至恒重后称重。

标记样穗及取样:于开花期挂牌,标记同日开花的穗子 100 个,于花后 7、14、21、28、35、42、49 d 取样,每次取单穗 8~10 个。根据每穗上的一次枝梗数,将每个单穗分为上、中、下三部分,如果一次枝梗数能被 3 整除,上、中、下部平均分配,如果不能被 3 整除,下部优先分配,其次中部分配。摘取优(上部

一次枝梗上的粒)、中(枝梗上除了优势粒和劣势粒的所有粒)、劣势粒(下部二次枝梗上的粒),剔除未受精的空粒,于 105℃ 杀青 0.5 h,然后转入 70℃ 烘干至恒重,计算籽粒平均重,进行籽粒灌浆动态研究。本文参照朱庆森等的方法由 Richards 方程导出一系列次级参数,用以分析寒地水稻籽粒增重的基本特征及控水对籽粒增重的影响。

每个处理选有代表性的植株 7 穴,测定项目主要有每株穗数,将每穗分成优势粒、中势粒和劣势粒 3 部分,分别计数各部分的实粒数、空秕粒数,并称取粒重,计算结实率、千粒重。

2 结果与分析

2.1 土壤水分对水稻产量及产量构成因素的影响

全生育期进行 -8~-10 kPa 的间歇控水,对每穴穗数和每穗粒数的影响如表 1。控水处理减少了垦鉴稻 5 号的收获穗数。与 CK 的每穴 27.9 个穗数相比,处理穗数减少了 0.4 个,减少了 1.54%,两者差异不显著。控水处理增加了垦鉴稻 5 号的穗粒数。与 CK 的每穗 65.9 个粒相比,处理增加了 2.6 个,增加了 3.93%,两者差异不显著。

分析两品种不同粒位穗粒数差异,结果如表 2,控水处理的优势粒和中势粒多于 CK 的,劣势粒少于 CK 的,但差异均未达显著水平。

表 1 不同处理的穗数和穗粒数

Table 1 Panicles per hill and grain number per panicle under different treatments

项目 Item	穗数/穴 PPH	5%和1%显著水平		粒数/穗 GNPP	5%和1%显著水平	
处理 Treatment	27.4	a	A	68.5	a	A
CK	27.9	a	A	65.9	a	A

注:PPH-穗数/穴;GNPP-粒数/穗,下同。Note: PPH, Panicles per hill; GNPP, Grain number per panicle. The same as followed.

表 2 各处理不同部位穗粒数比较

Table 2 Comparison of grains of different positions under different treatments

优势粒 Superior grains			中势粒 Middle grains			劣势粒 Inferior grains		
项目 Item	穗粒数 GNPP	5%和1% 显著水平	项目 Item	穗粒数 GNPP	5%和1% 显著水平	项目 Item	穗粒数 GNPP	5%和1% 显著水平
处理 Treatment	12.4	a A	处理 Treatment	50.6	a A	处理 Treatment	5.5	a A
CK	12.0	a A	CK	48.0	a A	CK	5.9	a A

全生育期进行 -8~-10 kPa 的间歇控水,对垦鉴稻 5 号不同粒位的结实情况影响规律相同。图 1 是垦鉴稻 5 号不同处理优、中、劣势粒的结实率,可见控水处理不同程度地增加了该品种优、中、劣势粒的结实率,与 CK 的 91.10%、76.14% 和 53.06% 相比,分别增加了 3.53%、12.77% 和 28.97%,其中中

势粒和劣势粒与 CK 相比达到差异显著水平。

垦鉴稻 5 号不同处理优、中、劣势粒的千粒重,如图 2,可见控水处理不同程度地增加了该品种优、中、劣势粒的千粒重,与 CK 的 23.70、23.15 g 和 21.35 g 相比分别增加了 0.96%、0.48% 和 0.60%,但均未达到差异显著水平。

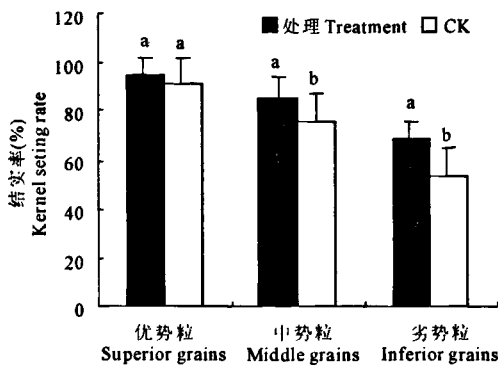


图 1 各处理不同部位结实率比较

Fig.1 Comparison of kernel setting rate of different positions under different treatments

从物质生产角度分析,产量等于生物产量与经济系数的乘积。控水处理增加了该品种的生物产量,与 CK 的 62.76 g/穴相比,处理增加了 5.19 g/穴,增加了 8.27%,两者差异不显著。控水处理增加了该品种的经济系数,与 CK 的 0.521 相比,处

理增加了 0.030,增加了 5.73%,两者差异不显著。控水处理增加了该品种的经济产量,与 CK 的 32.69 g/穴相比,处理增加了 4.72 g/穴,与 CK 相比增加了 14.47%,两者差异不显著(表 3)。

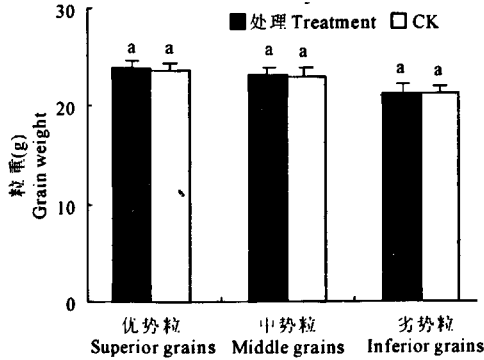


图 2 各处理不同粒位千粒重

Fig.2 1000-grain weight of different positions under different treatments

表 3 不同处理的生物产量、经济系数和经济产量

Table 3 Biomass,harvest index and economic yield under different treatments

项目 Item	生物产量 Biomass (g/穴)	5%和1% 显著水平		经济系数 Harvest index	5%和1% 显著水平		经济产量 Economic yield (g/穴)	5%和1% 显著水平	
处理 Treatment	67.95	a	A	0.551	a	A	37.41	a	A
CK	62.76	a	A	0.521	a	A	32.69	a	A

为了考查控水处理使垦鉴稻 5 号产量发生变化的原因,分别对不同处理的优、中、劣势粒的产量及其对产量的贡献进行了测定,结果如表 4。CK 的优、中、劣势粒分别构成产量的 22.14%、72.20%和

5.66%。控水处理增加了该品种优、中、劣势粒的经济产量,与 CK 相比,处理分别增加 0.412 g/穴、3.950 g/穴和 0.100 g/穴,增加幅度分别为 5.68%、16.74%和 19.86%。

表 4 不同部位产量百分比

Table 4 Percentage of yield of different positions

项目 Item	优势粒 Superior grains			中势粒 Middle grains			劣势粒 Inferior grains		
	产量 Yield (g/穴)	贡献率(%) Contribution rate	±△ (%)	产量 Yield (g/穴)	贡献率(%) Contribution rate	±△ (%)	产量 Yield (g/穴)	贡献率(%) Contribution rate	±△ (%)
处理 Treatment	7.649	20.44	5.68	27.550	73.63	16.74	0.560	2.216	19.86
CK	7.237	22.14	0.00	23.600	72.20	0.00	0.460	1.849	0.00

2.2 不同土壤水分下干物质积累的动态变化

2.2.1 土壤水分对干物质积累的影响 水稻干物质的积累和分配是产量形成的基础,而干物质的生产与积累是一个复杂、动态的生命过程。本试验分别在分蘖盛期(7月3日)、拔节期(7月20日)、开花期(8月4日)、灌浆盛期(8月23日)、成熟后期(9月7日)测定了各处理的干物质重,结果如图 3。在开花期以前,以茎蘖数较多的处理干物质生产量大。

而在开花期以后,供试品种的干物质并不是以穗数较多的 CK 生产量大,尽管处理的穗数少于 CK,但其单株干物质生产量从开花期以后直到成熟一直高于 CK。抽穗期-成熟期干物质积累量大而稳定是水稻高产群体的重要特点之一,这也是处理产量高于 CK 的一个原因之一。

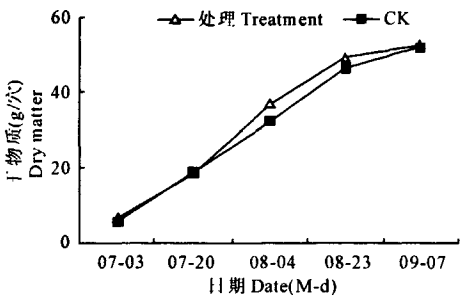


图 3 不同处理干物质积累动态
Fig.3 Development of dry matter accumulation under different treatments

2.2.2 不同土壤水分下茎、鞘干物质质量和物质输出率的变化 全生育期进行 - 8 ~ - 10 kPa 的间歇控

水,不仅影响了水稻的分蘖,也影响其茎、鞘中的干物质积累和物质再利用(如表 5)。处理齐穗期茎、鞘、穗的干重均高于 CK,成熟期处理的茎和鞘干重均低于 CK。处理的茎、鞘输出量分别为 0.49 g/穴和 2.60 g/穴,相对应的输出率分别为 8.84% 和 24.02%,转换率分别为 2.16% 和 11.52%;与处理相比,CK 的茎不但没有输出,却出现了累积,其鞘的输出量也低于处理,与之相应的是 CK 的茎输出率和转换率为负值,鞘的输出率和转换率也低于处理。这一结果说明控水处理提高了该品种的干物质积累,同时也提高了干物质向籽粒中的分配比率,运转效率提高。这也是处理比 CK 的产量高、经济系数大的一个原因。

表 5 控水处理对垦鉴稻 5 号茎、鞘干物质、物质输出率和转换率的影响
Table 5 Effect of controlling water on dry matter yield of stem and sheath and exportation percentage and transformation percentage of stem and sheath in Kenjiandao 5

项目 Item	齐穗期干重 (g/穴) DMW during FHS			成熟期干重 (g/穴) DMW during MS			输出量 (g/穴) Sendout		输出率 (%) Exportation percentage		转换率 (%) Transformation percentage	
	茎干重 SDMW	鞘干重 ShDMW	穗干重 PDMW	茎干重 SDMW	鞘干重 ShDMW	穗干重 PDMW	茎 Stem	鞘 Sheath	茎 Stem	鞘 Sheath	茎 Stem	鞘 Sheath
处理 Treatment	8.36	10.82	7.65	7.87	8.22	30.19	0.49	2.60	5.84	24.02	2.16	11.52
CK	7.49	10.27	5.50	8.60	8.44	29.86	- 1.12	1.83	- 14.89	17.81	- 4.58	7.51

注:DMW - 干重;FHS - 齐穗期;MS - 成熟期;FR - 灌浆速率;茎鞘物质输出率% = (齐穗期茎鞘干重 - 成熟期茎鞘干重)/齐穗期茎鞘干重 × 100,茎鞘物质转换率% = (齐穗期茎鞘干重 - 成熟期茎鞘干重)/(成熟期穗干重 - 齐穗期穗干重) × 100^[19]。
Note: DMW, Dry matter weight; FHS, Full heading stage; MS, Mature stage; FR, Filling rate.

2.2.3 不同土壤水分下水稻籽粒的灌浆特性

1) 不同土壤水分下籽粒增重的变化。

处理与 CK 不同部位籽粒的增重过程如图 4、5 所示。不同部位籽粒的增重过程具有相同的规律,随着时间进程籽粒重量均表现优势粒 > 中势粒 > 劣

势粒。优势粒由于竞争能力强,启动灌浆早,籽粒增重快,劣势粒由于生理上的弱势,竞争能力弱,启动灌浆晚,粒重始终处于最低。与 CK 相比,处理各粒位的粒重在 7 ~ 28 d 增加的比较快速,而 CK 尤其是劣势粒相对比较平缓。

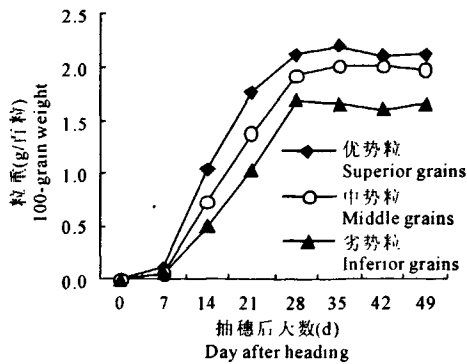


图 4 处理的籽粒增重曲线
Fig.4 The curve of grain-weight increasing in treatment

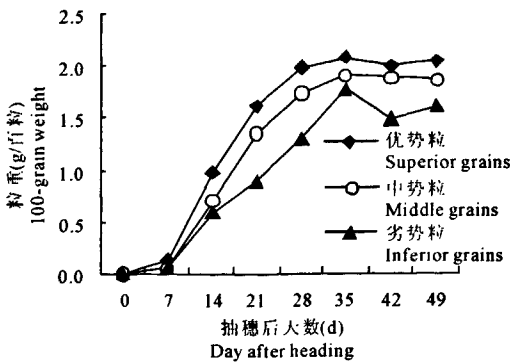


图 5 CK 的籽粒增重曲线
Fig.5 The curve of grain-weight increasing in CK

2) 土壤水分对籽粒灌浆速率的影响。

品种间灌浆速率的差异及不同部位籽粒的灌浆能力强弱将影响籽粒的充实度,一般认为早开花优势粒灌浆速率大、籽粒充实好、千粒重高,迟开花

的劣势粒其灌浆速率小、籽粒充实差、千粒重低。处理和 CK 不同粒位籽粒灌浆的 Richards 方程决定系数均较大(表 6),这说明 Richards 方程能很好的模拟该品种不同粒位籽粒的增重过程。

表 6 墨鉴稻 5 号不同粒位籽粒增重的 Richards 方程
Table 6 The Richards equation of grain-weight increasing of different positions in Kenjiandao 5

项目 Item	方程 Equations of Richards	相关系数 R	决定系数 R ²
处理 Treatment	优势粒 Superior grains $X_2 = 2.1645 / \{ [1 + 0.455174 * \text{EXP}(-0.204443 * X_1)]^{(1/0.034553)} \}$	0.9992	0.9983
	中势粒 Middle grains $X_2 = 2.0352 / \{ [1 + 2.2265 * \text{EXP}(-0.176746 * X_1)]^{(1/0.157976)} \}$	0.9983	0.9966
	劣势粒 Inferior grains $X_2 = 1.6570 / \{ [1 + 168380016.8605 * \text{EXP}(-0.790631 * X_1)]^{(1/5.5848)} \}$	0.9962	0.9924
CK	优势粒 Superior grains $X_2 = 2.0589 / \{ [1 + 0.000665 * \text{EXP}(-0.183275 * X_1)]^{(1/0.000067)} \}$	0.9989	0.997
	中势粒 Middle grains $X_2 = 1.9241 / \{ [1 + 0.000575 * \text{EXP}(-0.162963 * X_1)]^{(1/0.000057)} \}$	0.9993	0.9985
	劣势粒 Inferior grains $X_2 = 1.6563 / \{ [1 + 1.6324 * \text{EXP}(-0.135910 * X_1)]^{(1/0.177951)} \}$	0.9851	0.9703

通过计算籽粒单位时间内单位籽粒的干物质生长量得到其灌浆速率[g/(百粒·d)],处理和 CK 不同粒位籽粒灌浆速率(如图 6、7)。处理和 CK 优、中、劣势粒的灌浆速率曲线均为单峰曲线。不同的是:处理和 CK 峰的形状不同,处理的峰比较陡峭,而 CK 的峰比较平缓,处理各粒位的最大灌浆速率分别大于 CK 30.2%、16.3%和 90.2%,且高灌浆速率持续的时间相对较短说明控水处理使该品种的灌浆加速。另一点不同的是:处理的劣势粒峰值出现明显延后,即处理的优、中势粒峰值出现在抽穗后 14 d,而处理的劣势粒峰值出现在抽穗后 21 d,表明优势粒灌浆快时,其劣势粒受到影响灌浆速率变慢;CK 与处理不同,其优、中、劣势粒的峰值均在抽穗后 14 d 出现。这与前人的研究结果有异同,主要可能与品种类型及生态环境不同有关。

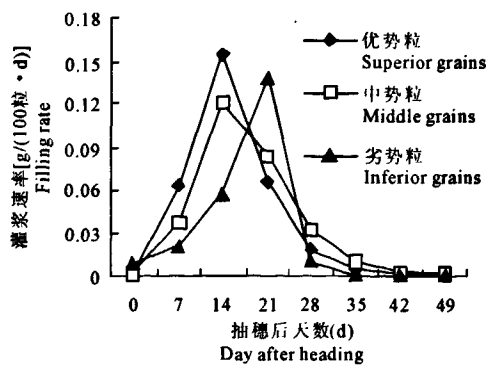


图 6 处理不同粒位灌浆速率曲线
Fig.6 Grain-filling rate curves of different positions in treatment

Richards 生长曲线是由 N 的大小决定的一簇曲线,当 $0 < N < 1$ 时,速率曲线左偏;当 $N > 1$ 时,速率曲线右偏。本试验处理和 CK 的优、中势粒的 N 值均小于 1,速率曲线左偏,劣势粒的 N 值有 $N > 1$ 和

$N < 1$ 两种情况。CK 优、中、劣势粒的 N 值均小于 1,优、中、劣势粒灌浆增重的特征相似,时间上也近于同步,为同步灌浆型;而处理优、中势粒的 $N < 1$,劣势粒的 $N > 1$,劣势粒出现了灌浆滞后现象,为异步灌浆型(表 7)。表明本试验的控水条件影响了该品种不同粒位籽粒的灌浆,并最终影响产量。

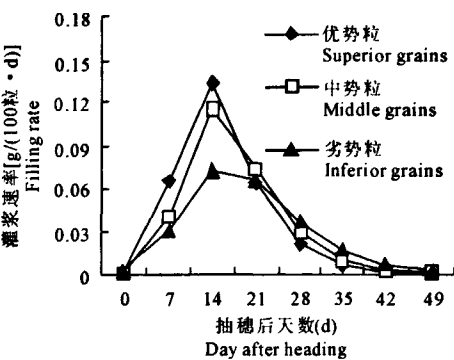


图 7 CK 不同粒位灌浆速率曲线
Fig.7 Grain-filling rate curves of different positions in CK

表 7 墨鉴稻 5 号不同粒位籽粒增重的 Richards 方程参数
Table 7 The parameters of Richards equation for weight increasing of differently-positioned grains in Kenjiandao 5

项目 Item		A (g/百粒)	B	K	N
优势粒 Superior grains	处理	2.165	0.4552	0.204	0.0346
	CK	2.059	0.0007	0.183	0.0001
中势粒 Middle grains	处理	2.035	2.2265	0.177	0.1580
	CK	1.924	0.0006	0.163	0.0001
劣势粒 Inferior grains	处理	1.657	1.68×10^8	0.791	5.5848
	CK	1.656	1.6324	0.136	0.1780

根据不同粒位各处理的 Richards 方程,可计算出灌浆次级参数(表 8)。由表 8 可以看出,处理和

CK 不同粒位籽粒灌浆的起始生长势 R_0 不同,但表现出明显的规律性,基本都为优势粒 > 中势粒 > 劣势粒,说明优势粒的生长势大,这与它启动灌浆早,籽粒生长初期的灌浆速率大有密切关系。

控水处理对不同粒位籽粒达到最大灌浆速率的时间 $T_{\max,G}$ 影响不大,处理和 CK 达到最大灌浆速率的时间均表现劣势粒 > 中位粒 > 优势粒。处理达最大生长速率的时间为 12.6 ~ 21.8 d,长于 CK 的 10.6 ~ 16.3 d。

控水处理后优、中、劣势粒的平均生长速率和最大生长速率 $G_{\max}$ 值均有升高,其升高的幅度都为劣势粒 > 优势粒 > 中势粒,说明本试验的控水条件,加

速了该品种的灌浆进程。
控水处理后优、中、劣势粒的 I 值均有升高,其升高的幅度为劣势粒 > 中势粒 > 优势粒,即控水使达到最大灌浆速率时的籽粒干物重占最终干物重的比率升高。

控水处理使优、中、劣势粒的活跃生长期 D 缩短,供试品种优、中、劣势粒的 D 值分别缩短 0.9、0.1 d 和 12.9 d。虽然控水处理使得供试品种的活跃生长期 D 缩短,但同时却使供试品种优、中、劣势粒的 $W_{\max,G}$ 值增大,即增加了供试品种生长速率最大时的生长量,其增加的幅度为劣势粒 > 中势粒 > 优势粒。

表 8 垦鉴稻 5 号不同粒位籽粒增重的 Richards 次级参数
Table 8 The secondary parameters of Richards equation for weight increasing of differently-positioned grains in Kenjiandao 5

项目 Item		R_0	$\pm \Delta$ (%)	$T_{\max,G}$ (d)	$\pm \Delta$ (%)	$\bar{G}$ [g/(百粒·d)]	$\pm \Delta$ (%)	$G_{\max}$ [g/(百粒·d)]	$\pm \Delta$ (%)
优势粒 Superior grains	处理	5.91	-99.68	12.6	18.76	0.109	15.24	0.160	5.91
	CK	1833	0.00	10.6	0.00	0.094	0.00	0.139	1833
中势粒 Middle grains	处理	1.12	-99.93	15.0	36.21	0.083	6.27	0.123	1.12
	CK	1630	0.00	11.0	0.00	0.078	0.00	0.115	1630
劣势粒 Inferior grains	处理	0.14	-81.46	21.8	33.59	0.086	67.12	0.142	0.14
	CK	0.76	0.00	16.3	0.00	0.052	0.00	0.076	0.76

表 8 续
Continue table 8

项目 Item		I (%)	$\pm \Delta$ (%)	D (d)	$\pm \Delta$ (%)	$W_{\max,G}$ (g/百粒)	$\pm \Delta$ (%)
优势粒 Superior grains	处理	37.4	1.70	19.9	-8.78	0.810	6.92
	CK	6.8	0.00	21.8	0.00	0.757	0.00
中势粒 Middle grains	处理	39.5	7.41	24.4	-0.47	0.804	13.61
	CK	36.8	0.00	24.5	0.00	0.708	0.00
劣势粒 Inferior grains	处理	71.4	79.11	19.2	-40.14	1.182	79.19
	CK	39.8	0.00	32.1	0.00	0.660	0.00

3 结论与讨论

程建平等^[20]研究认为:间歇灌溉有利于增加单株有效穗数、每穗实粒数和每穗颖花数,提高结实率和千粒重,从而提高了产量;彭世彰等^[21]研究认为:与常规灌溉相比,控水灌溉的成穗数增加,穗粒数、实粒数、结实率和千粒重增加,理论产量和实际产量增加;杨丽敏^[22]研究认为:间歇灌溉条件下每穗实粒数增多,结实率明显提高,千粒重加大,最终形成的产量结果比 CK 增产显著。本研究结果表明:全生育期进行 -8 ~ -10 kPa 的间歇控水,减少了垦鉴稻 5 号的穴穗数,这与程建平等和彭世彰等人的研究结果相反,可能是试验条件不同造成的,前者是在

大田情况下进行,而本试验是盆栽试验,同时试验所采用的品种对控水的反应也不同;控水处理增加了垦鉴稻 5 号的穗粒数,增加了该品种优、中、劣势粒的结实率和千粒重,这与前人的研究结果相同。从产量构成因素角度分析,我们可以得出如下结论:全生育期进行 -8 ~ -10 kPa 的间歇控水处理使垦鉴稻 5 号的穴穗数小幅度降低,但却能够通过穗粒数增加、结实率提高、千粒重增加来弥补其对产量所造成的损失,致使控水处理增加了该品种的产量。从物质生产角度分析,控水处理使垦鉴稻 5 号的生物产量和经济系数提高,最终使得该品种产量增加。我们从中可以得到一条启示:就寒地水稻而言,在保证较高生物产量的基础上提高经济系数将成为育种

和栽培的主攻方向。同时笔者认为:品种的抗旱性不同,尤其不同生育阶段敏感性不同,其产量及其构成对控水的反应存在一定差异,最终导致产量构成因素的有增有减。因此,在水稻节水栽培过程中,应选用抗旱性强品种,因品种采取适宜的栽培技术措施和科学的水分管理,充分发挥品种的节水高产潜力,最终实现高产。

张瑞珍等^[7]研究认为:抽穗开花期保持湿润状态比有水层对增加产量有利,其原因可能是没有水层,土壤通气条件得到改善,后期根系活力增强,延缓了叶片的衰老,增加了干物质的积累量,生物产量转化为经济产量的效率提高;董淑喜等^[13]研究认为:灌浆乳熟期遭受轻度水分胁迫比此时期土壤有水层对产量增加更为有利,其原因是因为土壤通气条件得到了改善,增强了根系生长活力,光合作用增强,增加了干物质的积累,使生物产量转化为经济产量的效率提高。本研究结果表明,在开花期以后,垦鉴稻 5 号的干物质并不是以穗数较多的 CK 生产量大,尽管处理的穗数少于 CK,但其单株干物质生产量从开花期以后直到成熟一直高于 CK,其原因是开花期进行 $-8 \sim -10\text{kPa}$ 的间歇控水处理,稻田处于“干湿交替”的水分循环状态,既能满足水稻对田间水分要求较高、耐湿不耐旱的特性又能改善稻田土壤通透性,供氧充足,增强了根系生长活力,延缓了叶片的衰老,为水稻生长发育创造了良好的生长条件,从而增加了该品种的干物质积累,提高了干物质向籽粒中的分配比率、提高运转效率,增加经济产量。这与前人的研究结果一致。

以往的研究表明,结实期遭受土壤干旱会降低籽粒灌浆速率、缩短灌浆时间,导致结实率和粒重的降低^[23]。刘凯等^[24]研究认为:结实期进行适度的土壤干旱或土壤轻度落干处理,即在开花受精的敏感期后,土壤水势保持在 $-10 \sim -30\text{kPa}$ 时,植株的水分状况在夜间可得以恢复,从而促进同化物向籽粒的运转,促进籽粒灌浆,提高结实率和粒重。王维等^[25]研究认为:结实期适度的土壤干旱虽然缩短了灌浆期,但显著提高了籽粒灌浆速率,使同化物再调运和灌浆速率加快之得超过灌浆期缩短之失,从而增加了结实率、粒重和产量。本研究结果表明:全生育期进行 $-8 \sim -10\text{kPa}$ 的间歇控水处理加速了垦鉴稻 5 号的灌浆进程,控水处理提高了该品种优、中、劣势粒的 $\bar{G}$ 、 $G_{\max}$ 、 I 和 $W_{\max.G}$ 值,缩短优、中、劣势粒的活跃生长期,但可通过 $\bar{G}$ 、 $G_{\max}$ 、 I 和 $W_{\max.G}$ 值的提高来弥补活跃生长期缩短所带来的损失。寒地水稻生育期短,并且后期降温快,水稻生产受温度影

响大。在本试验条件下,综合控水对供试品种籽粒灌浆参数 $\bar{G}$ 、 $G_{\max}$ 、 I 、 D 和 $W_{\max.G}$ 的影响看,相当于提前了该品种的生育期,有利于该品种充分灌浆,有利于结实率、千粒重的提高,最终导致该品种产量的增加,这对寒地水稻生产是有利的。我们建议全生育期进行 $-8 \sim -10\text{kPa}$ 的间歇控水处理可作为寒地水稻高产灌溉的土壤水势指标。

参考文献:

- [1] Zhai J L, Feng R G, Xu J. Constraining factors to sustainable utilization of water resources and their countermeasures in China[J]. Chinese Geographical Science, 2003, 13(4): 310—316.
- [2] 刘凯, 张耗, 张慎凤, 等. 结实期土壤水分和灌溉方式对水稻产量与品质的影响及其生理原因[J]. 作物学报, 2008, 34(2): 265—276.
- [3] 蔡昆争, 吴学祝, 骆世明, 等. 抽穗期不同程度水分胁迫对水稻产量和根叶渗透调节物质的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 6148—6158.
- [4] 王维, 蔡一霞, 杨建昌, 等. 结实期土壤水分亏缺影响水稻籽粒灌浆的生理原因[J]. 植物生态学报, 2011, 35(2): 195—202.
- [5] 李华, 王冬吟, 朱德峰. 土壤水分状况对水稻物质积累和产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2008, 36(1): 104—105.
- [6] 王贺正, 马均, 李旭毅, 等. 水分胁迫对水稻籽粒灌浆及淀粉合成有关酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1550—1558.
- [7] 张瑞珍, 邵玺文, 童淑媛, 等. 开花期水分胁迫对水稻产量构成及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(1): 1—3, 7.
- [8] 蔡昆争, 吴学祝, 骆世明. 不同生育时期土壤干旱后复水对水稻生长发育的补偿效应[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 34—36.
- [9] 邵玺文, 刘红丹, 杜震宇, 等. 不同时期水分处理对水稻生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 193—196.
- [10] 张卫星, 朱德峰, 林贤青, 等. 干旱胁迫对不同穗型超级稻品种产量及穗部性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 255—260.
- [11] 郑桂萍, 李红宇, 刘丽华, 等. 土壤水势对寒地水稻穗部性状和产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(4): 417—423.
- [12] 王成媛, 王伯伦, 张文香, 等. 干旱胁迫时期对水稻产量及产量性状的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2): 160—166.
- [13] 董淑喜, 徐淑琴. 水分胁迫对寒区水稻生长特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6): 64—66.
- [14] 蔡亮. 持续中度水分胁迫对水稻耗水量和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2010, (10): 29—31.
- [15] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华, 等. 不同灌溉方式对水稻生长与产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(5): 653—658.
- [16] 邓环, 曹凌贵, 程建平, 等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 602—606.
- [17] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华. 干湿交替灌溉方式下水稻节水增产机理研究[J]. 杂交水稻, 2009, 24(3): 72—75.
- [18] 冯延江. 黑龙江省水稻节水灌溉方式的研究[J]. 黑龙江农业科学, 2010, (11): 6—8.
- [19] 陆建飞, 黄丕生, 丁艳锋, 等. 持续土壤水分胁迫对水稻物质积

- 累和运转的影响[J]. 江苏农业学报, 1998, 14(3): 135—140.
- [20] 程建平, 曹凑贵, 潘圣刚, 等. 不同灌溉方式下水稻产量性状相关性分析及通径分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 96—98, 99.
- [21] 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, 2000, 19(3): 3—7.
- [22] 杨丽敏. 间歇灌溉对水稻生长发育及产量性状的影响[J]. 北方水稻, 2008, 38(3): 68—69.
- [23] Wardlaw I F, Willenbrink J. Mobilization of fructan reserves and changes in enzymes activities in wheat stems correlate with water stress during kernel filling[J]. New Phytol, 2000, 148: 413—422.
- [24] 刘凯, 叶玉秀, 唐成, 等. 水稻籽粒中乙烯和 ACC 对土壤水分的反应及其与籽粒灌浆的关系[J]. 作物学报, 2007, 33(4): 539—546.
- [25] 王维, 张建华, 杨建昌, 等. 适度土壤干旱对贪青小麦茎鞘贮藏性糖运转及籽粒充实的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1019—1025.

Effect of water-controlled irrigation on dry matter production, filling dynamics and yield of rice in cold region

LV Yan-dong^{1,2,3}, ZHENG Gui-ping³, GUO Xiao-hong³, YIN Da-wei^{1,2}, SONG Jin-li⁴,
MA Dian-rong^{1,2}, XU Zheng-jin^{1,2}, CHEN Wen-fu^{1,2}

(1. Rice Institute of Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110161, China;

2. Key Laboratory of Northern Japonica Rice Breeding of Liaoning, Shenyang, Liaoning 110161, China;

3. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

4. The Organization Department of the Longzhen Farm, Wudalianchi, Heilongjiang 164135, China)

Abstract: With Kenjiandao 5 as material, the effects of intermittent controlling water treatments at $-8 \sim -10$ kPa of soil water potential from re-green to mature on dry matter production, filling dynamics and yield of rice in cold region were studied with potted planting in chamber rainproof by examining soil water potential with negative pressure soil moisture tensiometer. The main results are as follows: Panicles per hill of treatment cultivar decreased 1.54%; grain numbers per panicle increased 3.93%; kernel setting rate of superior grains, middle grains and inferior grains increased 3.53%, 12.77% and 28.97% respectively; 1000-grain weight of superior grains, middle grains and inferior grains increased 0.96%, 0.48% and 0.60% respectively; biomass increased 8.27%; harvest indexes increased 5.73%; economic yield increased 14.47% under the condition of controlling-water treatment. Dry weight of reatment cultivar was higher than its of the CK from anthesis to mature; exportation percentage and transformation percentage of dry matter in sheath increased 6.21% and 7.77% respectively under the condition of controlling-water treatment. The process of grain filling of treatment cultivar was accelerated; grain filling rate peak appearing time of inferior grains of treatment cultivar was delayed; $\bar{G}$, G_{max} , I and W_{max} of superior grains, middle grains and inferior grains was raised respectively; the growing period of treatment cultivar were shorten under the condition of controlling-water treatment.

Keywords: water-controlled irrigation; rice in cold region; dry matter production; filling dynamics; yield