

# 膜下滴灌水肥耦合对寒地水稻产量 构成因素及产量的影响

吕艳东<sup>1</sup>, 郭晓红<sup>1</sup>, 李猛<sup>1</sup>, 陈立强<sup>1</sup>, 牛同旭<sup>1</sup>,  
赵海成<sup>1</sup>, 孙嵩<sup>1</sup>, 姚琪<sup>1</sup>, 周云峰<sup>2</sup>, 郑桂萍<sup>1</sup>, 周健<sup>1</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院 黑龙江省教育厅寒地作物种质改良与栽培重点实验室,  
黑龙江 大庆 163319; 2. 大庆市星火牧场, 黑龙江 大庆 163163)

**摘要:** [目的] 在目前推广的水稻膜下滴灌旱作种植方式基础上, 在寒地研究其水肥一体化技术, 提出高产高效水肥优化组合方案, 为膜下滴灌水肥耦合技术推广应用提供配套的水肥管理技术参考和理论依据。[方法] 以龙粳 31 号和空育 131 为材料, 采用随机区组试验设计, 研究膜下滴灌水肥耦合对寒地水稻产量构成因素及产量的影响。[结果] 膜下滴灌以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理、分蘖肥与穗肥用量分别为 87, 15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理能够增加两品种的穗数/m<sup>2</sup>; 膜下滴灌的两种水分、肥料处理对两品种穗粒数的影响不显著。膜下滴灌处理以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理其生物产量、经济系数和经济产量高于以体积含水量降至饱和含水量的 60% 为控水下限的水分管理, 两品种的表现是一致的。膜下滴灌以体积含水量降至饱和含水量的 60% 为控水下限的水分管理, 同时分蘖肥与穗肥用量分别为 70, 12 kg/hm<sup>2</sup> 的处理两品种的经济产量均为最低。空育 131 以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理, 同时分蘖肥与穗肥用量分别为 87, 15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理最适合膜下滴灌旱种; 龙粳 31 号以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理, 同时分蘖肥与穗肥用量分别为 70, 12 kg/hm<sup>2</sup> 的处理最适合膜下滴灌旱种。[结论] 不同品种对膜下滴灌水肥耦合的反应不同, 膜下滴灌旱种处理水肥耦合对寒地水稻产量有重要影响。

**关键词:** 膜下滴灌; 水肥耦合; 产量构成因素; 产量; 寒地水稻

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)05-0046-07

**中图分类号:** S274.1

**文献参数:** 吕艳东, 郭晓红, 李猛, 等. 膜下滴灌水肥耦合对寒地水稻产量构成因素及产量的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 46-52. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.008; Lü Yandong, Guo Xiaohong, Li Meng, et al. Effect of water and fertilizer coupling on rice yield and its components under drip irrigation with plastic film mulching in cold region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 46-52. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.008

## Effect of Water and Fertilizer Coupling on Rice Yield and Its Components Under Drip Irrigation with Plastic Film Mulching in Cold Region

LÜ Yandong<sup>1</sup>, GUO Xiaohong<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, CHEN Liqiang<sup>1</sup>, NIU Tongxu<sup>1</sup>,  
ZHAO Haicheng<sup>1</sup>, SUN Song<sup>1</sup>, YAO Qi<sup>1</sup>, ZHOU Yunfeng<sup>2</sup>, ZHENG Guiping<sup>1</sup>, ZHOU Jian<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Varieties Improvement and Cultivation of Crops in Cold Region of Heilongjiang Ministry of Education, College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. Daqing Xinghuo Pasturage Farm, Daqing, Heilongjiang 163163, China)

**Abstract:** [Objective] Based on the present popularising plantation of rice under drip irrigation with plastic film mulching, the integrate water and fertilizer technologies in cold region were studied, and an optimized water and fertilize scheme of high yield and high efficiency was put forward in order to provide technical

收稿日期: 2016-12-29

修回日期: 2017-03-10

资助项目: 国家重点研发计划项目“粮食作物产量与效率层次差异及其丰产增效机理”(2016YFD0300104); 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B01, 2015BAD23B05-08); 黑龙江省农垦总局科研项目(HNK125-B-08-21A, HNK135-02-02); 黑龙江八一农垦大学省作物学重点学科学术骨干科研启动金项目(ZWXQDJ-8); 黑龙江八一农垦大学博士启动金项目(XDB2012-03)

第一作者: 吕艳东(1978—), 男(汉族), 黑龙江省大庆市人, 博士, 主要从事水稻节水栽培研究。E-mail: luyandong336@sohu.com。

通讯作者: 郭晓红(1980—), 女(汉族), 黑龙江省宁安市人, 博士, 副教授, 主要从事水稻节水栽培研究。E-mail: guoxh1980@163.com。

reference and theoretical foundation of matching water and fertilizer management for widespread use of upland rice under drip irrigation with plastic film mulching. [Methods] Using Longjing 31 and Kongyu 131 as materials, the effects of water and fertilizer coupling on yield components and yield of rice under drip irrigation with plastic film mulching in cold region were studied using randomized block experiment design. [Results] Panicles per square meter of the two varieties were both increased in a treatment. Drip-watering volumetric low level of the treatment was 80% of the saturated moisture content, and applied fertilizers at tillering and panicle-growing stages were 87 kg/hm<sup>2</sup> and 15 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. Grain numbers per panicle of the two varieties in all treatments were not significantly different in drip irrigation with plastic mulching. The biomasses, harvest indexes and economic yields of the two varieties were both observed higher in the treatment using 80% of the saturated moisture content as drip-watering volumetric low level than that in the treatment using 60% as the low level. Economic yields of the two varieties were both the lowest in the treatment using 60% of the saturated moisture content as low watering level and simultaneously applying 70 kg/hm<sup>2</sup> and 12 kg/hm<sup>2</sup> fertilizers at tillering and panicle-growing stages. For Kongyu 131 variety, the appropriate water and fertilizer coupling pattern in regime of drip irrigation with plastic mulching was as follows: watering low level at 80% of the saturated moisture content, 87 kg/hm<sup>2</sup> and 15 kg/hm<sup>2</sup> fertilizers at tillering and panicle-growing stages. For Longjing 31 variety, it was: watering with low level at 80% of the saturated moisture content, 70 kg/hm<sup>2</sup> and 12 kg/hm<sup>2</sup> fertilizers at the two stages, respectively. [Conclusion] The responses of the two rice varieties to different treatments of water and fertilizer coupling were different. Water and fertilizer coupling in regime of drip irrigation with plastic film mulching had important effect on the rice yield in cold region.

**Keywords: drip irrigation with plastic film mulching, water and fertilizer coupling, yield components, yield, rice in cold region**

水稻是中国种植面积和产量最大的粮食作物,也是耗水量最多的作物之一<sup>[1-2]</sup>,其耗水量占中国总用水量的 54%左右,占农业总用水量的 65%以上<sup>[3]</sup>,水稻的高产和稳产对于维系国家安全和稳定至关重要<sup>[4]</sup>。随着人口的增长、城镇和工业的发展、全球气候的变化以及环境污染的加重,用于作物灌溉的水资源愈来愈匮乏,严重威胁作物特别是水稻生产的发展。虽然旱作水稻得到一定的发展,但总体来说产量偏低,且稳定性差,导致旱作栽培模式的推广具有一定风险性,并且推广难度较大<sup>[5]</sup>。水稻膜下滴灌可实现机械化精量播种,栽培方式不同于覆膜旱作<sup>[6]</sup>,灌溉方式也不同于间歇灌溉<sup>[7]</sup>、湿润灌溉<sup>[8]</sup>,通过滴灌技术少量多次将水分输送到水稻根部,使土壤含水量在田间持水量 90%左右,将肥料溶于水通过水肥一体化技术滴灌于作物根部,并使施肥在数量、时间上与作物的需求量同步,提高肥料和水分的利用率<sup>[9]</sup>。

水和肥料是水稻生长的 2 个重要限制因素,这 2 个因素的交互作用共同影响水稻产量。水和肥料的适时适量可以明显促进作物增产,同时提高作物的水和肥料的利用效率,而不适宜的水和肥料不仅会使作物减产<sup>[10]</sup>,更会造成环境污染与恶化<sup>[11]</sup>。目前,国内外针对水肥耦合对不同作物产量的影响已有大量研

究<sup>[12-14]</sup>,而对于水稻灌水施肥技术的研究,主要是针对传统育秧移栽种植<sup>[15-21]</sup>,于水稻膜下滴灌旱作水肥耦合机理与模型的研究报道甚少<sup>[22]</sup>。因此,本试验拟在目前推广的水稻膜下滴灌旱作种植方式基础上,进一步在寒地研究其肥水管理技术,旨在将传统水肥管理革新为膜下滴灌水肥一体化技术;同时,提出高产高效水肥优化组合方案,为寒地水稻膜下滴灌旱作高效栽培技术提供科学依据和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

龙粳 31 号和空育 131,2 个品种的主茎叶片数均为 11。

### 1.2 试验设计

试验于 2014 年在黑龙江八一农垦大学农学院试验基地进行。5 月 25 日浸种。5 月 27 日整地、施底肥。5 月 28 日区划。5 月 29 日人工播种。膜宽 90 cm,膜上种 4 行;小区内行距 15~30~15 cm,穴距 13 cm,小区间横向间距 40 cm。旱直播芽谷,单穴点播 5~7 粒,超过 7 株间苗;每处理 24 行,每行 6 m;随机区组试验设计,3 次重复。6 月 3 日出苗,6 月 14 日施分蘖肥,7 月 28 日施穗肥。

水肥处理:使用 MPM-160 B 型水分仪测定土壤水分,测定深度为田面下 15 cm,5 点测定(测定方法

下同)各处理基肥均相同:尿素(46%纯 N)144 kg/hm<sup>2</sup>;磷酸二铵(64%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)160 kg/hm<sup>2</sup>;硫酸钾(50%K<sub>2</sub>O)125 kg/hm<sup>2</sup>。各处理肥水管理方式详见表 1。生育期间人工除草。9 月末收获。

表 1 水肥处理试验方案

处理	水分管理	肥料管理	
		分蘖肥尿素用量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	穗肥尿素用量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
S <sub>1</sub> F <sub>1</sub>	三叶一心后,当田面以下 15 cm 体积含水量降至饱和含水量的 60%时;然后滴灌至饱和,再降至饱和含水量的 60%,如此反复直至收获	70	12
S <sub>1</sub> F <sub>2</sub>	三叶一心后,当田面以下 15 cm 体积含水量降至饱和含水量的 60%时;然后滴灌至饱和,再降至饱和含水量的 60%,如此反复直至收获	87	15
S <sub>2</sub> F <sub>1</sub>	三叶一心后,当田面以下 15 cm 体积含水量降至饱和含水量的 80%时;然后滴灌至饱和,再降至饱和含水量的 80%,如此反复直至收获	70	12
S <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	三叶一心后,当田面以下 15 cm 体积含水量降至饱和含水量的 80%时;然后滴灌至饱和,再降至饱和含水量的 80%,如此反复直至收获	87	15

供试土壤为草甸土,土壤的基础条件:碱解氮 175.01 mg/kg;速效磷 26.45 mg/kg;速效钾 90.62 mg/kg;有机质 3.05%;pH 值 8.38。

### 1.3 测试内容与方法

考种:水稻成熟时每个品种的处理和对照选取有代表性的植株 2 穴,带回室内考察农艺性状和产量性状,测定项目主要有每株穗数、草重、实粒数、空秕粒数,并称取粒重,计算结实率、千粒重。

### 1.4 数据分析

利用 EXCEL 和 DPS 统计软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 膜下滴灌下水肥对水稻产量构成因素的影响

膜下滴灌下水分与肥料对 2 个品种穗数/m<sup>2</sup> 影响的 *F* 测验结果说明:2 个品种水分间、肥料间、肥料与水分间的差异均达极显著水平。水分间的比较:2 个品种的 2 个水分处理均以 S<sub>2</sub> 的穗数/m<sup>2</sup> 较多,且 2 个品种的 2 个水分处理间的差异均达极显著水平(表 2)。肥料间的比较:2 个品种的 2 种肥料处理以 F<sub>2</sub> 处理的穗数/m<sup>2</sup> 较多,F<sub>1</sub> 处理的较少,且 2 个品种的 2 个肥料处理间差异均达极显著水平(表 2)。上述结果说明,2 个品种的穗数/m<sup>2</sup> 以体积含水量降至饱和含水量的 80%为控水下限的水分管理相对较多;2 个品种的穗数/m<sup>2</sup> 以分蘖肥与穗肥用量分别为 87,15 kg/hm<sup>2</sup> 的较多。

膜下滴灌下 2 个品种的穗数/m<sup>2</sup> 水分与肥料间存在互作效应,说明各处理组合的效应不是各单因素效应的简单相加,而是肥料效应随水分而不同。空育 131 以 S<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 处理的穗数/m<sup>2</sup> 最多,以 S<sub>2</sub>F<sub>1</sub> 处理的穗数/m<sup>2</sup> 最少,且两处理间的差异达极显著水平;龙粳 31 号以 S<sub>2</sub>F<sub>1</sub> 处理的穗数/m<sup>2</sup> 最多,以 S<sub>1</sub>F<sub>1</sub> 处理的穗

数/m<sup>2</sup> 最少,且各处理间的差异均达极显著水平(表 2)。同时可以看出两品种相对应的各处理均以空育 131 的穗数/m<sup>2</sup> 较多,这与两品种的特性有关,即空育 131 为多蘖型品种,龙粳 31 号为寡蘖型品种。

表 2 不同处理对 2 个品种产量构成因素的影响

品种	处理	产量构成因素			
		穗数/ (个·m <sup>-2</sup> )	穗粒数/ 个	结实率/ %	千粒重/ g
空育 131	S <sub>1</sub>	604.8 <sup>bb</sup>	34.7 <sup>aA</sup>	76.3 <sup>bb</sup>	22.5 <sup>bA</sup>
	S <sub>2</sub>	718.2 <sup>aA</sup>	38.9 <sup>aA</sup>	88.7 <sup>aA</sup>	24.6 <sup>aA</sup>
	F <sub>1</sub>	604.8 <sup>bb</sup>	35.2 <sup>aA</sup>	78.4 <sup>bA</sup>	23.0 <sup>aA</sup>
	F <sub>2</sub>	718.2 <sup>aA</sup>	38.4 <sup>aA</sup>	86.6 <sup>aA</sup>	24.2 <sup>aA</sup>
龙粳 31	S <sub>1</sub>	408.8 <sup>bb</sup>	55.9 <sup>aA</sup>	92.2 <sup>aA</sup>	23.3 <sup>aA</sup>
	S <sub>2</sub>	443.8 <sup>aA</sup>	60.5 <sup>aA</sup>	93.2 <sup>aA</sup>	23.1 <sup>aA</sup>
	F <sub>1</sub>	424.2 <sup>bb</sup>	58.6 <sup>aA</sup>	93.0 <sup>aA</sup>	23.1 <sup>aA</sup>
	F <sub>2</sub>	428.4 <sup>aA</sup>	57.8 <sup>aA</sup>	92.3 <sup>aA</sup>	23.2 <sup>aA</sup>

注:表中不同大、小写字母表示不同处理下各产量要素在 5% 和 1% 水平上差异显著。下同。

膜下滴灌下水分与肥料对 2 品种穗粒数影响的 *F* 测验结果表明,2 个品种水分间、肥料间的差异不显著、肥料与水分间的差异达显著水平。①水分间的比较。2 个品种的 2 个水分处理均以 S<sub>2</sub> 的穗粒数较多,但 2 个品种的 2 个水分处理间的差异不显著(表 2)。②肥料间的比较。空育 131 的 2 种肥料处理以 F<sub>2</sub> 处理的穗粒数较多,F<sub>1</sub> 处理的较少,但两者差异不显著;龙粳 31 号的 2 种肥料处理以 F<sub>1</sub> 处理的穗粒数较多,F<sub>2</sub> 处理的较少,但两者差异未达显著水平(表 2)。上述结果说明,2 种水分、肥料处理对 2 个品种穗粒数的影响不显著。

膜下滴灌下 2 个品种的穗粒数水分与肥料间存在互作效应,说明各处理组合的效应不是各单因素效

应的简单相加,而是肥料效应随水分而不同。2 个品种均以  $S_2 F_1$  处理的穗粒数最多,以  $S_1 F_1$  处理的穗粒数最少,且两处理间的差异达显著水平;说明以体积含水量降至饱和含水量的 60% 为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 70, 12 kg/hm<sup>2</sup> 的处理降低了 2 个品种的穗粒数(表 3)。同时可以看出 2 个品种相对应的各处理均以龙粳 31 号的穗粒数较多,这与 2 个品种的特性有关,即空育 131 为小穗型品种,龙粳 31 号为大穗型品种。

表 3 不同处理的产量构成因素及产量的比较

产量构成要素	处理	空育 131 均值	龙粳 31 号均值
穗数/(个·m <sup>-2</sup> )	$S_1 F_1$	610.4 <sup>bb</sup>	400.4 <sup>dd</sup>
	$S_1 F_2$	599.2 <sup>c</sup>	417.2 <sup>c</sup>
	$S_2 F_1$	599.2 <sup>c</sup>	448.0 <sup>aa</sup>
	$S_2 F_2$	837.2 <sup>a</sup>	439.6 <sup>bb</sup>
穗粒数/个	$S_1 F_1$	30.8 <sup>ba</sup>	54.1 <sup>ba</sup>
	$S_1 F_2$	38.6 <sup>a</sup>	57.6 <sup>ba</sup>
	$S_2 F_1$	39.7 <sup>a</sup>	63.1 <sup>a</sup>
	$S_2 F_2$	38.2 <sup>a</sup>	57.9 <sup>ba</sup>
结实率/%	$S_1 F_1$	66.4 <sup>bb</sup>	92.2 <sup>a</sup>
	$S_1 F_2$	86.1 <sup>a</sup>	92.1 <sup>a</sup>
	$S_2 F_1$	90.3 <sup>a</sup>	93.8 <sup>a</sup>
	$S_2 F_2$	87.2 <sup>a</sup>	92.5 <sup>a</sup>
千粒重/g	$S_1 F_1$	21.9 <sup>ba</sup>	23.1 <sup>a</sup>
	$S_1 F_2$	23.2 <sup>a</sup>	23.4 <sup>a</sup>
	$S_2 F_1$	24.1 <sup>a</sup>	23.2 <sup>a</sup>
	$S_2 F_2$	25.2 <sup>a</sup>	23.0 <sup>a</sup>
生物产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	$S_1 F_1$	12 411.1 <sup>bb</sup>	10 186.0 <sup>ba</sup>
	$S_1 F_2$	10 924.4 <sup>cb</sup>	10 374.2 <sup>ab</sup>
	$S_2 F_1$	11 285.9 <sup>bc</sup>	11 397.6 <sup>a</sup>
	$S_2 F_2$	14 837.3 <sup>a</sup>	11 354.6 <sup>a</sup>
经济系数	$S_1 F_1$	0.219 <sup>bb</sup>	0.453 <sup>cb</sup>
	$S_1 F_2$	0.426 <sup>a</sup>	0.500 <sup>ba</sup>
	$S_2 F_1$	0.461 <sup>a</sup>	0.538 <sup>a</sup>
	$S_2 F_2$	0.469 <sup>a</sup>	0.478 <sup>bc</sup>
经济产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	$S_1 F_1$	2 699.075 <sup>c</sup>	4 611.8 <sup>bc</sup>
	$S_1 F_2$	4 655.057 <sup>bb</sup>	5 193.5 <sup>cd</sup>
	$S_2 F_1$	5 179.911 <sup>bb</sup>	6 123.4 <sup>a</sup>
	$S_2 F_2$	6 944.279 <sup>a</sup>	5 144.0 <sup>ba</sup>

膜下滴灌下水分与肥料对空育 131 结实率影响的 F 测验结果说明:空育 131 的结实率水分间、肥料间、肥料与水分间的差异均达显著水平。膜下滴灌早种下水分与肥料对龙粳 31 号结实率影响的 F 测验结果说明:龙粳 31 号的结实率水分间、肥料间、肥料与水分间的差异均不显著。水分间的比较:2 个品种的 2 个水分处理均以  $S_2$  的结实率较高,其中空育 131 的 2 个水分处理间的差异达显著水平,龙粳 31 号的 2 个

水分处理间的差异不显著(表 2)。肥料间的比较:空育 131 的 2 种肥料处理以  $F_2$  处理的结实率较高, $F_1$  处理的较低,且两者差异达显著水平;龙粳 31 号的两种肥料处理以  $F_1$  处理的结实率较高, $F_2$  处理的较低,但两者差异未达显著水平(表 2)。上述结果说明,以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 87, 15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理能够提高空育 131 的结实率。2 种水分、肥料处理对龙粳 31 号结实率的影响不显著。

膜下滴灌下空育 131 的结实率水分与肥料间存在互作效应,说明各处理组合的效应不是各单因素效应的简单相加,而是肥料效应随水分而不同;空育 131 以  $S_2 F_1$  处理的结实率最高,以  $S_1 F_1$  处理的结实率最低,且两处理间的差异达极显著水平;说明以体积含水量降至饱和含水量的 60% 为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 70, 12 kg/hm<sup>2</sup> 的处理降低了空育 131 的结实率。膜下滴灌早种下龙粳 31 号的结实率水分与肥料间不存在互作效应,说明各处理组合的效应只是各单因素效应的简单相加;龙粳 31 号以  $S_2 F_1$  处理的结实率最高,以  $S_1 F_2$  处理的结实率最低,且各处理间的差异均不显著(表 3)。

膜下滴灌下水分与肥料对空育 131 千粒重影响的 F 测验结果表明,空育 131 的千粒重水分间的差异达显著水平,肥料间、肥料与水分间的差异不显著。膜下滴灌早种下水分与肥料对龙粳 31 号结实率影响的 F 测验结果说明:龙粳 31 号的结实率水分间、肥料间的差异均不显著,肥料与水分间的差异显著。①水分间的比较。空育 131 的 2 个水分处理以  $S_2$  的千粒重较高, $S_1$  的千粒重较低,且 2 处理间的差异达显著水平;龙粳 31 号的 2 个水分处理以  $S_1$  的千粒重较高, $S_2$  的千粒重较低,但 2 处理间的差异不显著(表 2)。②肥料间的比较。两品种的两种肥料处理均以  $F_2$  处理的千粒重较高, $F_1$  处理的较低,但两处理间的差异均不显著(表 2)。上述结果说明,以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理能够提高空育 131 的千粒重。2 种水分、肥料处理对龙粳 31 号千粒重的影响不显著。

膜下滴灌下空育 131 的千粒重水分与肥料间不存在互作效应,说明各处理组合的效应只是各单因素效应的简单相加;空育 131 以  $S_2 F_2$  处理的千粒重最高,以  $S_1 F_1$  处理的千粒重最低,且两处理间的差异达显著水平;说明以体积含水量降至饱和含水量的 60% 为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 70, 12 kg/hm<sup>2</sup> 的处理降低了空育 131 的千粒重。膜下滴灌早种下龙粳 31 号的千粒重水分与肥料

间存在互作效应,说明各处理组合的效应不是各单因素效应的简单相加,而是肥料效应随水分而不同;龙粳 31 号以  $S_1 F_2$  处理的千粒重最高,以  $S_2 F_2$  处理的千粒重最低,且各处理间的差异均不显著(表 3)。

## 2.2 膜下滴灌下水肥对水稻生物产量和经济系数的影响

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。膜下滴灌下水分与肥料对 2 个品种生物产量影响的 F 测验结果(表 4)表明,2 个品种的生物产量水分间、肥料与水分间的差异达显著水平,肥料间的差异不显著。①水分间的比较。2 个品种的 2 个水分处理均以  $S_2$  的生物产量较高, $S_1$  的较低,且两处理间的差异均达极显著水平。②肥料间的比较。2 个品种的 2 个种肥料处理均以  $F_2$  处理的生物产量较高, $F_1$  处理的较低,其中空育 131 的 2 个处理间差异达显著水平,龙粳 31 号的 2 个处理间差异不显著(表 4)。上述结果说明,以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理能够提高 2 个品种的生物产量。分蘖肥与穗肥用量分别为  $87,15 \text{ kg/hm}^2$  的处理能够提高空育 131 的生物产量。

表 4 不同处理对 2 个品种生物产量和经济系数的影响

品种	处理	生物产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	经济系数
空育 131	$S_1$	11 667.8 <sup>bb</sup>	0.323 <sup>bb</sup>
	$S_2$	13 061.6 <sup>aA</sup>	0.465 <sup>aA</sup>
	$F_1$	11 848.5 <sup>ba</sup>	0.340 <sup>bb</sup>
	$F_2$	12 880.8 <sup>aA</sup>	0.447 <sup>aA</sup>
龙粳 31	$S_1$	10 280.1 <sup>aA</sup>	0.477 <sup>ba</sup>
	$S_2$	11 376.1 <sup>bb</sup>	0.508 <sup>aA</sup>
	$F_1$	10 791.8 <sup>aA</sup>	0.496 <sup>aA</sup>
	$F_2$	10 864.4 <sup>aA</sup>	0.489 <sup>aA</sup>

膜下滴灌下 2 个品种的生物产量水分与肥料间存在互作效应,说明各处理组合的效应不是各单因素效应的简单相加,而是肥料效应随水分而不同;空育 131 以  $S_2 F_2$  处理的生物产量最高,以  $S_1 F_2$  处理的生物产量最低,且  $S_2 F_2$  与其他 3 个处理间的差异均达极显著水平;说明以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为  $87,15 \text{ kg/hm}^2$  的处理能够增加空育 131 的生物产量。龙粳 31 号以  $S_2 F_1$  处理的生物产量最高,以  $S_1 F_1$  处理的生物产量最低,且两处理间的差异达显著水平(表 3)。

膜下滴灌下水分与肥料对空育 131 经济系数影响的 F 测验结果说明,空育 131 的经济系数水分间、肥料间的差异达显著水平,肥料与水分间的差异不显

著。膜下滴灌旱种下水分与肥料对龙粳 31 号经济系数影响的 F 测验结果表明,龙粳 31 号的经济系数水分间、肥料与水分间的差异达显著水平,肥料间的差异不显著。①水分间的比较。2 个品种的 2 个水分处理均以  $S_2$  的经济系数较高, $S_1$  的较低,且两处理间的差异达极显著和显著水平(表 4)。②肥料间的比较。空育 131 的两种肥料处理以  $F_2$  处理的经济系数较高, $F_1$  处理的较低,且两处理间的差异达极显著水平;龙粳 31 号的两种肥料处理以  $F_1$  处理的经济系数较高, $F_2$  处理的较低,但两处理间的差异不显著(表 4)。上述结果说明,以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理能够提高两品种的经济系数。分蘖肥与穗肥用量分别为  $87,15 \text{ kg/hm}^2$  的处理能够提高空育 131 的经济系数。

膜下滴灌旱种下空育 131 的经济系数水分与肥料间不存在互作效应,说明各处理组合的效应只是各单因素效应的简单相加;空育 131 以  $S_2 F_2$  处理的经济系数最高,以  $S_1 F_1$  处理的经济系数最低,且两处理间的差异达显著水平;说明以体积含水量降至饱和含水量的 60% 为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为  $70,12 \text{ kg/hm}^2$  的处理降低了空育 131 的经济系数。膜下滴灌旱种下龙粳 31 号的千粒重水分与肥料间存在互作效应,说明各处理组合的效应不是各单因素效应的简单相加,而是肥料效应随水分而不同;龙粳 31 号以  $S_2 F_1$  处理的经济系数最高,以  $S_1 F_1$  处理的经济系数最低,且  $S_2 F_1$  与其他 3 个处理间的差异均达显著或极显著水平;说明以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为  $70,12 \text{ kg/hm}^2$  的处理能够提高龙粳 31 号的经济系数(表 3)。

## 2.3 膜下滴灌下水肥对水稻产量的影响

膜下滴灌下水分与肥料对空育 131 经济产量影响的 F 测验结果说明:空育 131 的经济产量水分间、肥料间的差异达显著水平,肥料与水分间的差异不显著。膜下滴灌旱种下水分与肥料对龙粳 31 号经济产量影响的 F 测验结果说明:龙粳 31 号的经济产量水分间、肥料与水分间的差异达显著水平,肥料间的差异不显著。①水分间的比较。两品种的 2 个水分处理均以  $S_2$  的经济产量较高, $S_1$  的较低,且两处理间的差异达极显著水平(表 5)。②肥料间的比较。空育 131 的两种肥料处理以  $F_2$  处理的经济产量较高, $F_1$  处理的较低,且两处理间的差异达极显著水平;龙粳 31 号的两种肥料处理以  $F_1$  处理的经济产量较高, $F_2$  处理的较低,但两处理间的差异不显著(表 5)。上述结果说明,以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为

控水下限的水分管理能够提高两品种的经济产量。分蘖肥与穗肥用量分别为 87,15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理能够提高空育 131 的经济产量。

表 5 不同处理对 2 个品种经济产量的影响

处理	经济产量(kg·hm <sup>-2</sup> )	
	空育 131	龙粳 31
S <sub>1</sub>	3 677.1 <sup>bb</sup>	4 902.7 <sup>bb</sup>
S <sub>2</sub>	6 062.1 <sup>aA</sup>	5 768.7 <sup>aA</sup>
F <sub>1</sub>	3 939.5 <sup>bb</sup>	5 367.6 <sup>aA</sup>
F <sub>2</sub>	5 799.7 <sup>aA</sup>	5 303.7 <sup>aA</sup>

综上所述,从产量构成因素角度分析(表 3),膜下滴灌下空育 131 S<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 经济产量最高的原因主要是:尽管以体积含水量降至饱和含水量的 80%为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 87,15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理使 S<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 的穗粒数和结实率并不是 4 个处理中最高的,但 S<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 的穗数/m<sup>2</sup> 和千粒重确是 4 个处理中最高的,且与其他 3 个处理间的差异达显著或极显著水平,最终使得 S<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 的产量为 4 个处理中最高的,且与其他 3 个处理间的差异均达极显著水平。膜下滴灌下龙粳 31 号的情况却不同:尽管以体积含水量降至饱和含水量的 80%为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 70,12 kg/hm<sup>2</sup> 的处理使 S<sub>2</sub>F<sub>1</sub> 的千粒重并不是 4 个处理中最高的,但 S<sub>2</sub>F<sub>1</sub> 的穗数/m<sup>2</sup>,穗粒数和结实率均是 4 个处理中最高的,且穗数/m<sup>2</sup> 极显著地高于其他 3 个处理,最终使得 S<sub>2</sub>F<sub>1</sub> 产量最高。

膜下滴灌下两品种均以 S<sub>1</sub>F<sub>1</sub> 处理的产量最低:空育 131S<sub>1</sub>F<sub>1</sub> 处理的穗粒数、结实率和千粒重均为 4 个处理中最低的,且穗粒数和结实率显著和极显著地低于其他 3 个处理,尽管其穗数/m<sup>2</sup> 极显著地高于 S<sub>2</sub>F<sub>1</sub> 和 S<sub>1</sub>F<sub>2</sub>,却不能弥补穗粒数、结实率和千粒重所带来的产量损失,以至于 S<sub>1</sub>F<sub>1</sub> 处理的经济产量最低;龙粳 31 号 S<sub>1</sub>F<sub>1</sub> 处理的穗数/m<sup>2</sup> 和穗粒数均为 4 个处理中最低的,其中穗数/m<sup>2</sup> 与其他 3 个处理间的差异达极显著水平,虽然其结实率和千粒重不是 4 个处理中最低,却不能弥补穗数/m<sup>2</sup> 和穗粒数所带来的产量损失,以至于 S<sub>1</sub>F<sub>1</sub> 处理的经济产量最低。

从中我们可以得出如下结论:膜下滴灌下以体积含水量降至饱和含水量的 80%为控水下限的水分管理其产量高于以体积含水量降至饱和含水量的 60%为控水下限的水分管理,两品种的表现是一致的;膜下滴灌旱种下以体积含水量降至饱和含水量的 60%为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 70,12 kg/hm<sup>2</sup> 的处理两品种的经济产量均为最低。

### 3 讨论

作物的水分与肥料管理是农田管理中一个重要的理论问题,协调两者关系达到最优化时,便可能实现低投入、高产出和高品质的目标<sup>[22]</sup>。作物在不同的生长条件下和不同的生育阶段,施用不同的灌溉水量与肥量都会对产量形成很大的影响<sup>[23]</sup>。马波等<sup>[14]</sup>,何文寿<sup>[24]</sup>研究认为灌水量与施肥量的交互作用显著,而且高水配以高肥对作物增产作用明显。何进宇等<sup>[25]</sup>研究表明,水肥耦合尤其水氮交互作用对旱作水稻产量的影响达到了显著水平;当施肥量和灌水量达到阈值后,如果继续增加水肥施用量,则会造成旱作水稻产量下降和水肥资源浪费。本研究结果表明:膜下滴灌下水肥互作对空育 131 产量的影响不显著,这与前人的研究结果不一致;而膜下滴灌下水肥互作对龙粳 31 号产量的影响差异达显著水平,这与前人的研究结果是一致的。其中空育 131 以体积含水量降至饱和含水量的 80%为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 87,15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理(S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)最适合膜下滴灌旱种,龙粳 31 号以体积含水量降至饱和含水量的 80%为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 70,12 kg/hm<sup>2</sup> 的处理(S<sub>2</sub>F<sub>1</sub>)最适合膜下滴灌旱种;说明在本试验条件下,空育 131 以高水配以高肥产量最高,并没有出现灌水量和施肥量的阈值反应,而龙粳 31 号确以高水配低肥的产量最高,出现了施肥量的阈值反应。

合理的水分和养分管理是水稻高产、优质、高效的重要基础。基于近几年国内灌溉技术和水稻产业的长足发展,水肥一体化的理念开始接受并应用。然而,寒地水稻传统的漫灌生产一时间很难全部改变,多年来应用的各种模式的旱作、旱种水管等生产也占有一定比例的面积,再加上近几年膜下滴灌的逐年推广应用,不同灌溉模式的水稻生产在寒地稻区还将长期存在。因此,大力发展滴灌技术和推广节水、节肥、节药技术,全面提升内寒地水稻生产水平,不仅需要深入的理论技术研究,同时还需要加大推广力度,建立标准化体系,提高设备的质量,加大扶持力度等多项工作的共同努力。

### 4 结论

膜下滴灌旱种下 2 个品种的穗数/m<sup>2</sup> 以体积含水量降至饱和含水量的 80%为控水下限的水分管理相对较多;膜下滴灌旱种下 2 个品种的穗数/m<sup>2</sup> 以分蘖肥与穗肥用量分别为 87,15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理较多;膜下滴灌旱种下 2 种水分、肥料处理对 2 个品种穗粒

数的影响不显著;膜下滴灌旱种下以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理、分蘖肥与穗肥用量分别为 87,15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理能够提高空育 131 的结实率;膜下滴灌旱种下以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理能够提高空育 131 的千粒重。2 种水分、肥料处理对龙粳 31 号结实率、千粒重的影响不显著。

膜下滴灌旱种下以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理能够提高 2 个品种的生物产量和经济系数。膜下滴灌旱种下分蘖肥与穗肥用量分别为 87,15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理能够提高空育 131 的生物产量和经济系数。

膜下滴灌旱种下以体积含水量降至饱和含水量的 80% 为控水下限的水分管理其产量高于以体积含水量降至饱和含水量的 60% 为控水下限的水分管理,2 个品种表现一致;膜下滴灌旱种下以体积含水量降至饱和含水量的 60% 为控水下限的水分管理,同时分蘖肥与穗肥用量分别为 87,15 kg/hm<sup>2</sup> 的处理两品种的经济产量均为最低。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 青先国. 水稻丰产高效实用技术[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2008:1-11.
- [2] 司徒淞,王和洲,张薇. 中国水稻节水若干问题的探讨与建议[J]. 灌溉排水学报,2000,19(1):30-33.
- [3] 王辉,曾祥宽,张燕之,等. 水稻旱作在我国发展的前景分析[J]. 农业经济,2001(11):36-38.
- [4] 章秀福,王丹英,方福平,等. 中国粮食安全和水稻生产[J]. 农业现代化研究,2005,26(2):85-88.
- [5] 王昌华,张燕之,郑文静,等. 北方旱作水稻研究现状及发展前景[J]. 北方水稻,2008(6):13-18.
- [6] 程旺大,张国平,赵国平,等. 嘉早 935 水稻覆膜旱栽的物质积累及运转研究[J]. 作物学报,2003,29(3):413-418.
- [7] 邓环,曹凑贵,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.
- [8] 邹桂花,梅捍卫,余新桥,等. 不同灌水量对水、旱稻营养生长和光合特性及其产量的影响[J]. 作物学报,2006,32(8):1179-1183.
- [9] 邵光成,蔡焕杰,吴磊,等. 新疆大田膜下滴灌的发展前景[J]. 干旱地区农业研究,2001,19(3):122-127.
- [10] Idso S B, Wall G W, Kimball B A. Interactive effects

of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment and light intensity reductions on net photosynthesis of sour orange tree leaves[J]. Environmental and Experimental Botany, 1992, 33(3):367-375.

- [11] Power J F, Schepers J S. Nitrate contamination of ground water in North America[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1989,3(26):165-187.
- [12] Li Zizhen, Li Weide, Li Wenlong. Dry-period irrigation and fertilizer application affect water use and yield of spring wheat in semi-arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2004,65(2):133-143.
- [13] 尹光华,刘作新,李桂芳,等. 辽西半干旱区春小麦氮磷水耦合产量效应研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1):41-45.
- [14] 马波,田军仓. 膜下小管出流压砂地西瓜水肥耦合产量效应研究[J]. 节水灌溉,2009(10):6-12.
- [15] 郭晓红,吕艳东,周健,等. 肥水耦合对寒地水稻品质的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):71-74.
- [16] 吕艳东,郭晓红,李红宇,等. 肥水耦合对寒地水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(11):93-97.
- [17] 王丹,刘元英,彭显龙,等. 肥水优化管理对寒地水稻抗倒伏性能的影响[J]. 核农学报,2012,26(2):4536-4542.
- [18] 吴自明,赵伟,潘晓华. 不同肥水管理及改变源库比对水稻剑叶温度的影响[J]. 江西农业大学学报,2012,34(2):203-207.
- [19] 孙爱华,朱士江,郭亚芬,等. 控灌条件下稻田田面水含氮量、土壤肥力及水氮互作效应试验研究[J]. 土壤通报,2012,43(2):362-368.
- [20] 苏朋,傅昱,何艳,等. 水肥耦合管理对华中双季稻区还田秸秆腐解及土壤碳素转化影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):1-11.
- [21] 庞桂斌,杨士红,徐俊增. 节水灌溉稻田水肥调控技术试验研究[J]. 节水灌溉,2015(9):44-47.
- [22] 邢英英,张富仓,张燕,等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报,2014,30(21):70-80.
- [23] 王殿武,刘树庆,文宏达,等. 高寒半干旱区春小麦田施肥及水肥耦合效应研究[J]. 中国农业科学,1999,32(5):62-68.
- [24] 何文寿. 宁夏植物营养与肥料研究现状与展望[J]. 农业科学研究,2013,34(1):54-60.
- [25] 何进宇,田军仓. 膜下滴灌旱作水稻水肥耦合模型及组合方案优化[J]. 农业工程学报,2015,31(13):77-82.