



郑雨,李玉影,韩晓日,等.不同水肥管理措施对寒地水稻产量及水肥利用效率的影响[J].黑龙江农业科学,2019(11):52-57.

不同水肥管理措施对寒地水稻产量及水肥利用效率的影响

郑雨¹,李玉影²,韩晓日¹,刘双全²,姬景红²

(1. 沈阳农业大学 土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为促进水稻高产高效,本试验设置了不同灌溉和氮肥管理模式,在黑龙江省水稻主产区开展田间试验,分析其对水稻产量、效益和水分利用率的影响。结果表明:与农民常规水肥管理(FP)比较,采用间歇灌溉尿素冲施(SWD1)和间歇灌溉氨水冲施(SWD2)水肥管理措施,水稻分别增产 7.6% 和 11.1%,分别增收 21.5% 和 30.8%;SWD1 较 FP 水稻氮、磷、钾肥利用率分别提高 4.6、4.2 和 5.2 个百分点,农学效率分别提高 4.2、10.2 和 8.0 kg·kg⁻¹;SWD2 较 FP 水稻氮、磷、钾肥利用率分别提高 6.7、6.3 和 7.5 个百分点,农学效率分别提高 6.1、14.9 和 11.7 kg·kg⁻¹;SWD1 和 SWD2 较 FP 水分利用效率分别提高 25.1% 和 34.7%。SWD2 较 SWD1 水稻产量、效益、氮肥利用效率和水分利用效率分别提高 3.2%、4.7%、5.6% 和 7.6%,二者差异不显著。

关键词:寒地水稻;灌溉措施;氮肥管理;肥料利用率;水分利用率

水稻耗水量约为其他谷类作物的 2~3 倍^[1],在亚洲,水稻耗水量占总淡水资源消耗量的 45%^[2-3],如何在有限的淡水资源下生产出更多的稻米是当前水稻生产面临的主要挑战。水稻是我国主要的粮食作物,播种面积约为 3 021.6 万 hm²,黑龙江省是我国重要的水稻生产基地,2015 年播种面积达 314.8 万 hm²,占全省粮食作物播种面积的 26%,占全国水稻播种面积的 10.4%^[4]。传统的水稻淹水灌溉耗水量大,每 1 hm² 稻田耗水达 13 500 m³ 左右,不仅消耗了大量生产用水且灌溉水利用率低。在我国每 1 m³ 水生产稻谷仅 0.7 kg,而以色列每 1 m³ 水生产作物量达 2.32 kg^[5]。间歇灌溉也叫涌流灌溉,是由美国学者于 1979 年首先提出,逐渐发展起来的一种地面节水灌溉技术。中国的间歇灌溉技术试验研究始于 1987 年,目前仍处于初级阶段^[6]。黑龙江省地处我国高寒地区,水热资源条件不足,水稻生产中长期存在施肥和灌溉不合理现象,主要表现在氮肥用量偏高、大水漫灌等水肥利用率低等问题方面^[7-8]。稻田水分管理的研究工作报道很多,提出

很多高效灌溉技术^[9-10],但有关寒地水稻水肥高效利用技术报道的不多。本文研究不同灌溉和氮肥管理模式对水稻产量、效益和水肥利用率的影响,旨在为水稻高产、高效生产提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种为绥粳 18。

供试肥料有尿素,大庆化肥生产公司生产;重过磷酸钙,云南磷化集团有限公司生产;氯化钾,中化化肥有限公司生产;氨水,济南德旺化工有限公司生产。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 在黑龙江省设置 3 个试验区,分别为:哈尔滨市阿城区、哈尔滨市方正县和佳木斯市桦川县,土壤类型分别为黑土、草甸土和白浆土。试验设 4 个处理,分别为 CK(常规灌溉不施氮肥)、FP(农民常规灌溉施肥)、SWD1(浅-湿-干灌溉,追施氮肥为尿素)、SWD2(浅-湿-干灌溉,追施氮肥为氨水)。小区面积 30 m²,随机区组设计,3 次重复。4 个处理肥料用量水平相同(除 CK 不施氮肥):N160 kg·hm⁻²,P₂O₅ 65 kg·hm⁻²,K₂O 82.5 kg·hm⁻²。氮肥 40% 作基肥,耙地时施入;40% 作追肥返青时施入,20% 作追肥于分蘖后期和孕穗前期施入。磷、钾肥 100% 作基肥,耙地时施入。供试肥料种类:尿素(含 N46%),氨

收稿日期:2019-07-23

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0300503-04);玉米简化高效施肥技术研究示范(2015BAD23B05-06)。

第一作者简介:郑雨(1989-),女,在读博士,从事植物营养与肥料研究。E-mail:annadian@163.com。

通讯作者:韩晓日(1960-),男,博士,教授,从事植物营养与高效施肥研究。E-mail:hanxiaori@163.com。

水(含N17%),重过磷酸钙(含 P₂O₅ 46%),氯化钾(含K₂O60%),根据养分含量计算肥料实物量。水稻供试品种为绥粳 18,插秧密度为 29.7 cm×13.2 cm。小区单排单灌,每次灌溉记录灌溉时间和灌水量,供试土壤肥力状况见表 1,试验处理见表 2。

表 1 土壤基础肥力分析
Table 1 Analysis of soil basic fertility

地点 Places	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 (N)Hydrolyzable nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	有效磷(P) Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾(K) Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	有效锌 (Zn) Available zinc/ (mg·kg ⁻¹)	有效硼(B) Available boron/ (mg·kg ⁻¹)
阿城	6.15	30.6	153.8	27.6	161.7	1.82	0.63
方正	6.29	33.8	169.7	34.2	179.0	2.03	0.87
桦川	5.48	15.3	105.4	18.7	148.5	2.27	0.54

表 2 水稻水肥管理试验处理
Table 2 Experimental treatment of rice water and fertilizer management

处理 Treatments	施肥成本 Fertilizer cost/(元·hm ⁻²)	处理内容 Processing contents
CK	0	常规淹水灌溉不施氮肥
FP	1574	常规淹水灌溉常规施肥
SWD1	1574	浅-湿-干灌溉追施固体氮肥。从水稻返青至蜡熟期均采用“浅-湿-干”水层管理。即先灌溉 5 cm 的浅水,待田面耕层土壤干燥出现细小裂纹时,再灌溉 5 cm 的浅水,以此循环灌溉直至蜡熟期。在分蘖期和穗分化期冲施尿素
SWD2	1601	浅-湿-干灌溉追施液体氮肥。灌溉同 SWD1,但在分蘖期和穗分化期冲施液体氮肥(氨水)

注:尿素 2 000 元·t⁻¹,氨水 800 元·t⁻¹,重过磷酸钙 3 000 元·t⁻¹,氯化钾 3 300 元·t⁻¹,水稻价格 2.8 元·kg⁻¹。
Note:Urea 2 000 yuan · t⁻¹, ammonia 800 yuan · t⁻¹, superphosphate 3 000 yuan · t⁻¹, potassium chloride 3 300 yuan · t⁻¹, rice 2.8 yuan·kg⁻¹.

1.2.2 测定项目及方法 土壤分析:在春季土壤化冻后,采集土壤样品(0~20 cm),测定土壤 pH、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、有效硫、有效硼和有效锌含量。土壤 pH 采用电位法,有机质采用外加热重铬酸钾容量法,碱解氮采用 1.0 mol·L⁻¹ NaOH 扩散法,速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用 1.0 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提-原子吸收法测定,有效硫采用磷酸盐浸提-硫酸钡比浊法,有效锌采用 DTPA-TEA 浸提-AAS 法,有效硼采用沸水浸提-甲亚胺比色法。植株分析:在秋季水稻收获前,采集水稻植株和籽粒样品,测定全氮、全磷和全钾含量。全氮采用硫酸-催化消煮,凯氏定氮法;全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,钒钼黄比色法;全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,原子吸收法^[11]。灌溉水量测定采用 LXS-80 水表测定,采用 ZHD 型测针测定田间水层深度的变化,每个处理 3 次重复^[12]。水分利用效率测定:以 1 hm² 稻田实际灌溉的单位水量(m³)所生产的干物质(稻谷)量作为灌

溉水的生产效率(Water use efficiency,WUE)。
 $WUE(kg\cdot m^{-3})=单位面积产量/单位面积灌水量。$
 $养分吸收量(kg\cdot hm^{-2})=籽粒产量\times 籽粒养分含量(\%)+植株生物量\times 植株养分含量(\%)。$
肥料表观回收率(RE)和农学效率(AE)表征,计算方法^[13]:
 $RE(\%)=(U_f-U_0)/R_f$
 $AE(kg\cdot kg^{-1})=(Y_f-Y_0)/R_f$
式中:U_f和 U₀分别为施氮(磷、钾)和不施氮(磷、钾)对照的作物地上部养分吸收量;R_f为氮(磷、钾)肥用量;Y_f和 Y₀分别为施氮(磷、钾)和不施氮(磷、钾)对照的作物籽粒产量。
1.2.3 数据分析 应用 DPS 和 Excel 2010 软件处理数据和作图。
2 结果与分析
2.1 不同水肥管理对水稻生长发育的影响
表 3 多点试验结果表明,所有施肥处理水稻在株高、有效穗数、穗粒数和千粒重上均明显好于

对照 (CK), 节水灌溉 (SWD1) 和氮肥冲施 (SWD2) 处理明显好于农民习惯施肥 (FP) 处理。与 FP 比较, SWD1 处理有效穗数平增加 12.6 个·m⁻², 株高增加 3.1 cm, 穗长增加 0.6 cm, 穗粒数增加 5.5 粒, 空瘪率降低 1.2 百分点, 千粒重增加 0.6 g; 与 FP 比较, SWD2 处理有效穗数平增加 36.5 个·m⁻², 株高增加 5.5 cm, 穗长增加

0.9 cm, 穗粒数增加 10.5 粒, 空瘪率降低 1.6 百分点, 千粒重增加 0.9 g; SWD2 与 SWD1 处理比较, 有效穗数平增加 23.9 个·m⁻², 株高增加 2.4 cm, 穗长增加 0.3 cm, 穗粒数增加 5.0 粒, 空瘪率降低 0.4 百分点, 千粒重增加 0.3 g。试验结果表明, SWD2 与 SWD1 对水稻生长发育有明显促进作用, 为水稻高产奠定了物质基础。

表 3 不同水肥处理对水稻生长发育的影响

Table 3 Effects of different water and fertilizer treatments on the growth and development of rice						
处理 Treatments	有效穗数 Effective panicle number/(个·m ⁻²)	株高 Plant height/cm	穗长 Panicle length/cm	穗粒数 Grain number per panicle	空瘪率 Shriveled seed rate/%	千粒重 1000-grain weight/g
CK	297.9±21.6	88.1±2.7	12.6±1.9	73.4±11.9	7.3±0.8	24.5±0.6
FP	359.0±40.0	96.0±5.4	14.5±0.6	88.1±17.0	6.9±1.0	25.5±0.8
SWD1	371.6±41.4	99.1±5.9	15.1±0.9	93.6±18.2	5.7±1.1	26.1±0.3
SWD2	395.5±55.2	101.5±5.5	15.4±0.9	98.6±19.2	5.3±0.9	26.4±0.4

2.2 不同水肥管理对水稻产量效益的影响

不同施肥措施对水稻产量效果影响各不相同, 不同试验地点增产幅度不同, 但呈相同趋势(表4)。从3个试验点效果综合分析, 增产效

果最好的是 SWD2、第二位的是 SWD1、第三位的是 FP。与不施肥 (CK) 相比, FP、SWD1 和 SWD2 处理分别增产 59.0%、71.1% 和 76.6%, 各处理与 CK 产量差异显著; 与 FP 比较, SWD1 和 SWD2 分别增产 7.6% 和 11.1%; 与 SWD1 比较, SWD2 增产 3.2%, 产量差异不显著。从效益上看也呈同样趋势, 与 CK 比较, FP、SWD1 和 SWD2 分别增收 7 134, 9 723 和 10 182 元·hm⁻²。说明采用浅-湿-干灌溉和追施液体氮肥对水稻增产增收效果显著。

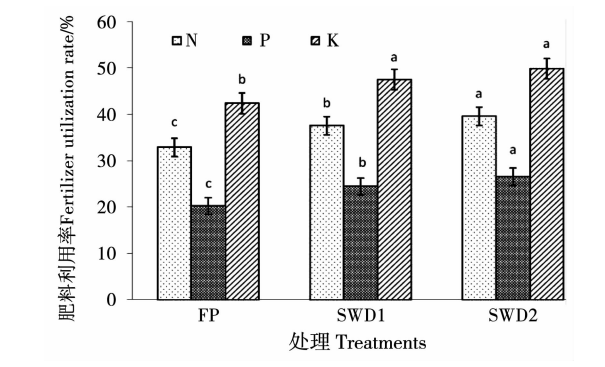
表 4 不同地点不同处理水稻产量和效益

Table 4 Yield and benefit of rice in different places and different treatments				
地点 Places	处理 Treatments	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	增产率 Increase rate/%	增收 Increase income/ (元·hm ⁻²)
方正	CK	5340 c	-	-
	FP	8916 b	67.0	5253
	SWD1	9540 a	78.7	6914
	SWD2	9928 a	85.9	7640
桦川	CK	5152 c	-	-
	FP	8750 b	69.8	8003
	SWD1	9616 a	86.6	10008
	SWD2	9917 a	92.5	11229
阿城	CK	6029 c	-	-
	FP	8600 b	42.6	8145
	SWD1	9108 ab	51.1	10777
	SWD2	9325 a	54.7	11678
平均	CK	5507 c	-	-
	FP	8755 b	59.0	7134 c
	SWD1	9421 ab	71.1	9723 b
	SWD2	9723 a	76.6	10182 a

2.3 不同水肥管理对水稻肥料利用率的影响

肥料利用率是指施肥区作物吸收的养分与无肥区作物吸收的养分差与养分施入量的百分比, 反映了施肥效率问题。试验结果表明(图1), 氮肥利用率最高的是浅-湿-干灌溉液体氮肥冲施 (SWD2), 为 39.6%; 第二位的是浅-湿-干灌溉固体氮肥冲施 (SWD1), 为 37.5%; 第三位的是农民习惯施肥 (FP), 为 32.9%; 与 FP 比较, SWD1 和 SWD2 氮肥利用率分别提高 4.6 和 6.7 百分点。FP、SWD1 和 SWD2 处理, 磷肥利用率分别为 20.2%、24.4% 和 26.5%; 与 FP 比较, SWD1 和 SWD2 磷肥利用率分别提高 4.2 和 6.3 百分点。FP、SWD1 和 SWD2 处理, 钾肥利用率分别为 42.3%、47.5% 和 49.8%; 与 FP 比较, SWD1 和 SWD2 钾肥利用率分别提高 5.2 和 7.5 百分点。农学效率是指单位纯养分所增加的籽粒产量, 反映了施肥增产效应的问题。从农学效率上看(图2), 与 FP 比较, SWD1 和 SWD2 处理水稻

氮肥农学效率分别增加 4.2 和 6.1 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,磷肥农学效率分别增加 10.2 和 14.9 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,钾肥农学效率分别增加 8.0 和 11.7 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$;SWD2 和 SWD1 比较,氮、磷、钾肥农学效率分别增加 1.9, 4.7 和 3.7 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可见浅-湿-干灌溉追施液体氮肥的水肥管理措施可显著提高肥料利用效率和农学效率。



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著,下同
Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level,the same below

图 1 不同水肥处理的水稻的肥料利用率

Fig.1 Fertilizer utilization rate of rice under different water and fertilizer treatments

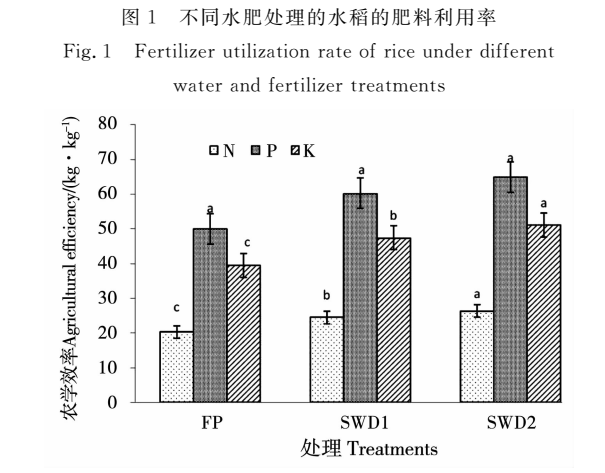


图 2 不同水肥处理下水稻的农学效率

Fig.2 Agronomic efficiency of rice under different water and fertilizer treatments

2.4 不同水肥管理对水分利用效率的影响

灌水量是指从泡田到水稻成熟期,单位面积灌水量。水分利用效率是指单位灌水量所生产水稻籽粒产量,反映了灌水效应的问题。3 个试验点平均结果表明(图 3),CK、FP、SWD1 和 SWD2 水稻灌水量分别为 4 607, 5 258, 4 512 和 4 329 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与 FP 比较,CK、SW1 和 SWD2 水稻灌水量分别降低 12.4%、14.2%和 17.7%。CK、FP、SWD1 和 SWD2 处理水分利用效率分别为 1.20,1.67,2.09 和 2.25 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;与 CK 比较,

FP、SW1 和 SWD2 水分利用效率分别提高 39.2%、74.2%和 87.5%;与 FP 比较,SWD1 和 SWD2 水分利用效率分别提高 25.1%和 34.7%。可见,浅-湿-干灌溉追施液体氮肥可降低水稻灌水量,提高水分利用效率。

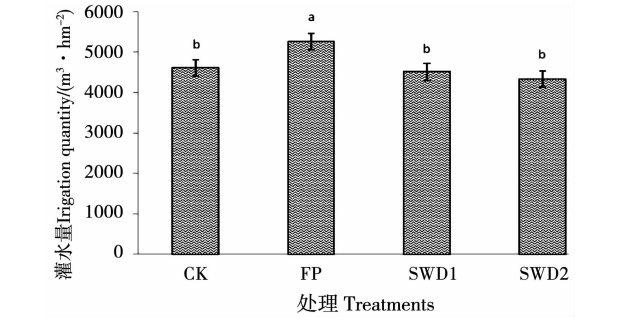


图 3 不同水肥处理下水稻的灌水量

Fig.3 Irrigation amount of rice under different water and fertilizer treatments

3 结论与讨论

3.1 不同水肥管理措施对水稻产量和效益的影响

水、肥是影响水稻生长发育的两大限制因子,水分缺乏水稻生长及养分吸收转化等都受到抑制;肥料不足水稻生长发育所需的养分无法得到满足,对水稻生长发育也不利^[14-5]。水肥调控有效地控制无效分蘖和成穗率,穗粒数与成熟率均有所提高^[16-17]。有研究表明,间歇灌溉穗粒数和千粒重分别比常规灌溉高 2.06%和 2.82%,但是差异并不显著^[18]。本研究结果,SWD1 与 SWD2 较 FP,有效穗数平增加 12.6 和 36.5 个 $\cdot\text{m}^{-2}$,穗粒数平均增加 5.5 和 10.5 粒,空瘪率降低 1.2 和 1.6 百分点,千粒重增加 0.6 和 0.9 g。该研究结果和有关报道基本一致^[9]。作物的水氮耦合,通常是指土壤水分和氮肥相互作用,共同影响作物生长、产量和品质^[19-20]。合理的水肥匹配水稻产量可以增加 8.6%~13.2%^[21-22]。干湿交替灌溉配合适宜施氮量对水稻产量和肥料利用率有协同效应,其原因主要在于这种水氮管理模式增加了水稻各器官氮、磷、钾的有效积累^[23-24]。本研究结果,与农民常规水肥管理(FP)比较,采用间歇灌溉尿素追肥冲施(SWD1)和间歇灌溉氨水冲施(SWD2)水肥管理措施,分别增产 7.6%和 11.1%,分别增收 21.5%和 30.8%。SWD2 较 SWD1 增产 3.2%、增收 7.4%,二者差异不显著。说明采用浅-湿-干灌溉和追施液体氮肥对水稻增

产增收效果显著,与有关报道基本一致^[9,23-25]。

3.2 不同水肥管理措施对水肥利用效率的影响

中国是世界第一大氮肥消费国,氮肥消费量占世界氮肥总量的 30%,与主要产稻国相比,我国水稻生产氮肥施用量高而利用率较低^[8,26]。水肥协调对水稻氮素吸收有显著促进作用,科学施肥是提高肥料利用率的重要举措^[27]。不同灌溉和养分管理模式促进水稻根系生长发育,提高了对水分和养分吸收利用能力,提高水稻产量和水肥利用效率^[7,28-29]。本文结果表明,与农民常规水肥管理(FP)比较,采用间歇灌溉尿素追肥冲施(SWD1)水稻氮、磷、钾肥料利用率分别提高 4.6、4.2 和 5.2 百分点,农学效率分别提高 4.2、10.2 和 8.0 kg·kg⁻¹;采用间歇灌溉氨水冲施(SWD2),水稻氮、磷、钾肥利用率分别提高 6.7、6.3 和 7.5 百分点,农学效率分别提高 6.1、4.9 和 11.7 kg·kg⁻¹,SWD2 氮肥利用率和农学效率显著高于 SWD1。追施氨水效果好于尿素,主要原因是施氨水更有利于吸收和利用,提高了氮肥利用效率,从而提高了产量和效益。水分管理与氮肥调控互作效应促进水稻地上部物质累积和氮素的吸收及向籽粒的转运能力,显著提高水氮资源利用效率及产量^[30-31]。采间歇灌溉,水稻耗水量比传统淹水灌溉减少 18.7%~32.0%,水分利用效率增加 13.4%~29.6%^[32-33]。与淹水灌溉相比,间歇灌溉提高了水稻的产量和水分利用效率,可能是间歇灌溉协调了“源”的积累与“库”的形成,使产量构成更合理^[34-35]。干湿交替灌溉与氮肥调控协同管理较传统水稻栽培显著提高产量和水氮利用效率^[22,36]。本文研究结果,采用间歇灌溉尿素追肥冲施(SWD1)和间歇灌溉氨水冲施(SWD2)水肥管理措施提高了水分利用效率,较农民习惯水肥管理(FP)灌水量分别降低 746 和 929 m³·hm⁻²,水分利用效率分别提高 25.1% 和 34.7%;SWD2 较 SWD1 水分利用效率提高 7.6%。在我国北方稻区降水量较少且分布不均的情况下,采用间歇灌溉对水稻高产和水肥高效利用具有重要意义。

3.3 结论

从灌溉角度看,“浅-湿-干”间歇灌溉较常规淹水灌溉促进了水稻生长发育,增产增收效果显著;从氮肥形态和种类上看,氨水冲施略好于尿素冲施肥;从产量、效益和水肥利用效率上看,

SWD2 略好于 SWD1,但二者差异不显著。因此,生产上应以尿素为主,因为氨水市场供应量少,运输和施肥需要谨慎。黑龙江省乃至东北地区为雨养农业,水资源紧缺,推广应用“浅-湿-干”间歇灌溉,结合尿素追肥或冲施是水稻高产高效的有效途径。

参考文献:

- [1] Carriger S, Vallée D. More crop per drop[J]. Rice Today, 2007, 6(2): 10-13.
- [2] Jiang Y. China's water scarcity[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90: 3185-3196.
- [3] 何海兵, 杨茹, 廖江, 等. 水分和氮肥管理对灌溉水稻优质高产高效调控机制的研究进展[J]. 中国农业科学, 2016, 49(2): 305-318.
- [4] 黑龙江省统计局, 国家统计局黑龙江调查队. 黑龙江统计年鉴[M]. 中国统计出版社, 2016: 286-290.
- [5] 段爱旺, 张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 41-44.
- [6] 岳尚文, 李强. 间歇灌溉技术要点浅析[J]. 内蒙古水利, 2000, 2(3): 38-39.
- [7] Zhang F S, Chen X P, Vitousek P. An experiment for the world[J]. Nature, 2013, 497(7447): 33-35.
- [8] 赵宏亮, 王麒, 孙羽, 等. 秸秆还田下灌溉方式对水稻产量及水分利用率的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(5): 0959-0969.
- [9] 徐丹, 张忠学, 林彦宇, 等. 寒地水稻节水增产高效正交设计试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(6): 22-27.
- [10] 孙永健, 孙园园, 徐微, 等. 水氮管理模式与磷钾肥配施对杂交水稻冈优 725 养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1335-1346.
- [11] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 王天亮, 李杰. 不同灌溉方式下寒地水稻耗水特征与水分利用效率[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(8): 45-48.
- [13] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [14] Terry A H. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture[J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 281-289.
- [15] 程建平, 曹凌贵, 蔡明历, 等. 不同土壤水势与氮素营养对杂交水稻生理特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(2): 199-206.
- [16] 杨丽敏, 孙海正, 赵海新, 等. 节水灌溉对寒地水稻生长发育的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2010(9): 102-106.
- [17] 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.
- [18] 郑星东, 康健. 不同灌溉处理对水稻产量及水分利用效率的影响[J]. 吉林水利, 2013(5): 8-10.
- [19] 马红梅, 谢英荷. 水氮耦合对山西地冬小麦籽粒产量和氮吸收影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2011(2): 140-142.
- [20] 周江明, 姜家彪, 姜新有, 等. 不同肥力稻田晚稻水氮耦合效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(10): 28-35.

- [21] 翟晶,曹凑贵,潘圣刚,等. 水肥耦合对水稻生长性状及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(29): 12632-12635, 12662.
- [22] 张耗,杨建昌. 三种主要粮食作物的节水灌溉技术及其对产量和水分利用率的影响[J]. 作物杂志, 2016(5): 67-74.
- [23] 李国生,王志琴,袁莉民等. 结实期土壤水分和氮素营养对水稻产量与品质的交互影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(2): 161-166.
- [24] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 212-224.
- [25] 刘炜,谷思玉,白雅梅,等. 施肥量与灌溉量对黑龙江省黑土区水稻产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(4): 49-54.
- [26] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002(9): 1095-1103.
- [27] 江立庚,曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. 中国水稻科学, 2002(3): 64-67.
- [28] 李俊峰,杨建昌. 水分与氮素及其互作对水稻产量和水肥利用效率的影响研究进展[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(3): 327-334.
- [29] 王绍华,曹卫星,丁艳锋,等. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 497-501.
- [30] 孙永健,孙园园,徐微,等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1639-1649.
- [31] 程建平,曹凑贵,蔡明历,等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1859-1865.
- [32] 褚光,展明飞,朱宽宇,等. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(7): 1026-1036.
- [33] 林贤青,周伟军,朱德峰,等. 稻田水分管理方式对水稻光合速率和水分利用效率的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(4): 333-338.
- [34] Lu J, Okawa T, Hirasawa T. The effects of irrigation regimes on the water use, dry matter production and physiological responses of paddy rice[J]. Plant Soil, 2000, 223: 207-216.
- [35] 王笑影,闻大中,梁文举. 不同土壤水分条件下北方稻田耗水规律研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 925-929.
- [36] 田亚芹,冯利平,邹海平,等. 不同水分和氮素处理对寒地水稻生育及产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6864-6871.

Effects of Different Measures of Water and Fertilizer Management on Rice Yield and Water and Fertilizer Utilization Efficiency in Cold Region

ZHENG Yu¹, LI Yu-ying¹, HAN Xiao-ri¹, LIU Shuang-quan², JI Jing-hong²

(1. College of Land and Environment Sciences, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: In order to promote high yield and high efficiency of rice, different irrigation and nitrogen management modes were set up in this experiment. Field experiments were carried out in the main rice production areas of Heilongjiang Province to analyze the effect on rice yield, benefit and water use efficiency. The results showed that compared with farmers' conventional water and fertilizer management (FP), the treatments of intermittent irrigation with urea (SWD1) and intermittent irrigation with ammonia (SWD2) could make the rice yield increase by 7.6% and 11.1% respectively, and the income increase by 21.5% and 30.8% respectively. Compared with FP, the utilization rate of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer of SWD1 increased by 4.6, 4.2 and 5.2 percentage points, and the agronomic efficiency increased by 4.2, 10.2 and 8.0 kg·kg⁻¹, respectively. Compared with FP, the utilization rate of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer of SWD2 increased by 6.7, 6.3 and 7.5 percentage points, and the agronomic efficiency increased by 6.1, 14.9 and 11.7 kg·kg⁻¹, respectively. Compared with FP, the water use efficiency of SWD1 and SWD2 increased by 25.1% and 34.7%, respectively. Compared with SWD1, the rice yield, benefit, nitrogen fertilizer and water use efficiency of SWD2 increased by 3.2%, 4.7%, 5.6% and 7.6%, respectively, but no significant difference between the two treatments.

Keywords: rice in cold region; irrigation measures; nitrogen management; fertilizer utilization rate; water use efficiency