

文章编号:1000-8551(2018)05-0959-11

# 秸秆还田下灌溉方式对水稻产量及水分利用率的影响

赵宏亮<sup>1</sup> 王麒<sup>1</sup> 孙羽<sup>1</sup> 曾宪楠<sup>1</sup> 张小明<sup>2</sup> 王萍<sup>3</sup>  
王曼力<sup>1</sup> 冯延江<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> 黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所,黑龙江 哈尔滨 150086; <sup>2</sup> 东北农业大学农学院,  
黑龙江 哈尔滨 150030; <sup>3</sup> 黑龙江省农业科学院信息中心,黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:**为探究秸秆还田结合节水灌溉技术的应用效果,本试验通过在秸秆全量还田条件下,设置不同灌溉方式,研究其对水稻生长发育、产量及其构成因素、水分利用效率等的影响,结果表明,在水稻生长发育上,秸秆还田下节水灌溉能够在一定程度上提高水稻中前期分蘖数,降低成熟期水稻植株株高,随着灌水量的减少,分蘖成穗率逐渐降低;在水稻生长发育的中前期,适当减少水分供给有利于水稻叶片和茎鞘干物质的积累,叶片干物质输出率与转换率以控灌Ⅰ处理最大,分别达到 14.19% 和 4.15%,茎鞘干物质输出率和转换率间以歇灌溉处理最大,分别达 28.69% 和 17.39%;在产量及其构成因子上,水稻产量依次为间歇灌溉>淹水灌溉>控灌Ⅰ>控灌Ⅱ;在水分利用效率上,灌溉水水分利用效率以控灌Ⅱ最大,为 3.55 kg·m<sup>-3</sup>,自然降水水分利用率以间歇灌溉最大,为 1.10 kg·m<sup>-3</sup>,总水分利用率以控灌Ⅰ最大,为 0.75 kg·m<sup>-3</sup>。综上,在秸秆还田和保证产量的前提下,间歇灌溉和控灌Ⅰ处理最佳。本研究为东北地区水稻秸秆还田下水分管理,提高水资源利用效率,促进水稻生产可持续发展提供了理论依据。

**关键词:** 秸秆还田;灌溉方式;生长发育;产量;水分利用效率

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2018.05.0959

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国重要的粮食作物,约占粮食总产量的 40%<sup>[1]</sup>。同时,水稻也是高耗水作物,其用水量占农业用水量的 65% 以上<sup>[2]</sup>。目前,水稻生产的灌溉方式主要以淹水灌溉为主,用水量达 6 000~9 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,耗水量巨大,浪费严重<sup>[3]</sup>。近年来,国内外科研工作者在水稻节水灌溉方式和技术及其对水稻生长发育、产量影响等方面进行了大量研究<sup>[4-7]</sup>,并取得了一定成果,如“浅、湿、晒”灌溉技术<sup>[8-10]</sup>、间歇灌溉技术<sup>[11-12]</sup>、控制灌溉技术<sup>[13-14]</sup>等,有效促进了水稻生产的可持续发展。

水稻秸秆中含有大量的有机质、氮、磷、钾和微量元素,是农业生产重要的有机肥源<sup>[15]</sup>。研究表明,秸秆还田是最为直接和经济的处理方式<sup>[16]</sup>。目前,关于水稻秸秆还田的研究主要集中在其对土壤物理性质<sup>[17-18]</sup>、土壤养分积累与吸收<sup>[19-20]</sup>、秸秆腐解规

律<sup>[21-22]</sup>、水稻生长发育和产量品质<sup>[23-24]</sup>以及温室气体排放<sup>[25-26]</sup>等方面的影响,基本探明了水稻秸秆还田的效应,提高了资源利用效率,降低了环境污染。

水稻秸秆还田技术的研究虽然取得了巨大的进步,但其与灌溉技术,尤其是与节水灌溉技术相结合的研究尚鲜见报道。因此,本研究在水稻种植面积较大的黑龙江省进行相关试验,通过在秸秆全量还田条件下,设置不同的灌溉方式,探讨其对水稻生长发育、产量及水分利用效率等的影响,以期为水稻秸秆还田下水分管理提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为龙稻 22、中龙粳 2、中龙粳 3、龙香稻

收稿日期:2017-08-14 接受日期:2018-02-02

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503136),黑龙江省水稻现代农业产业技术协同创新体系,黑龙江省自然科学基金面上项目(c2015030),哈尔滨市科技创新人才项目(2015RQQSJ076)

作者简介:赵宏亮,男,助理研究员,主要从事气候变化与水稻栽培研究。E-mail:hongliang\_1979@126.com

\* 通讯作者:冯延江,男,研究员,主要从事水稻栽培研究。E-mail:zixuanfeng2008@163.com

2、龙稻 7、龙稻 26、龙稻 14、龙稻 17,共 8 个水稻品种,由黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所提供。

## 1.2 试验设计

试验于 2016 年在黑龙江省农业科学院黑龙江现代农业示范区水田区进行(45°49'N,126°48'E,海拔 117 m)。该区域属中温带大陆性季风气候,冬长夏短,年平均气温 4.5℃,全年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温 2 700℃以上,全年作物生长期约 155 d,年平均降水量 569.1 mm,降水主要集中在 6~9 月。供试土壤为黑土,基本理化性质:有机质 29.56 g·kg<sup>-1</sup>,速效氮 79.56 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 55.84 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 168.42 mg·kg<sup>-1</sup>。

试验设 1 个常规灌溉处理,3 个节水灌溉处理,即淹水灌溉(对照,CK)、间歇灌溉、控灌 I、控灌 II。具体操作方法:1)插秧至返青期:4 种灌溉处理采用相同的灌溉方式,灌浅水层(0~20 mm);2)分蘖期:淹水灌溉小区采用传统的深水淹灌方式,田间水位始终保持在 100~150 mm;间歇灌溉每 7~9 d 灌水 1 次,每次灌水 50~70 mm,使田面形成 20~40 mm 水层,自然落干,有水层 4~5 d,无水层 3~4 d,反复交替;控灌 I 处理实行定额灌溉,定额量为灌溉后田间水层深度保持在 30 mm 左右;控灌 II 处理实行定额灌溉,定额量为灌溉后田间水层深度保持在 15 mm 左右;3)水稻生育中后期(拔节孕穗、抽穗开花、乳熟期)控灌 I、控灌 II 处理采取间歇灌溉处理,但实行定额灌溉,控灌 I 水层深度保持在 30 mm 左右,控灌 II 水层深度保持在 15 mm 左右。乳熟末期 8 月中旬,淹水灌溉、间歇灌溉、控灌 I、控灌 II 处理全部人工排水晒田。4 个处理均采用遇降雨深蓄不排水的管理措施。每小区单排单灌。

试验于 2016 年 4 月 15 日播种,5 月 18 日插秧,单本栽插,插秧规格 30 cm×13 cm,随机区组排列,每份材料种植 10 行,每行 30 株,设 3 次重复。所有处理施肥如下:纯氮 120 kg·hm<sup>-2</sup>,纯磷 80 kg·hm<sup>-2</sup>,纯钾 50 kg·hm<sup>-2</sup>,其中氮肥 50%,磷肥 100%,钾肥 50%作基肥施入,其他田间管理与当地生产实际相同。秸秆还田方式为全量还田。

## 1.3 测定项目与方法

1.3.1 灌溉水量测定 采用 LXS-80 水表(上海佑科仪器仪表有限公司)进行灌溉水量测定,于每次灌溉前记录水表读数,每次灌溉后记录水表读数,计算出每次灌溉用水量。

1.3.2 田间水层测定 田间水层采用直尺测定,每处理分别放置 5 个直尺,每次灌水后分别读取水层深度,取 5 点平均值为该处理水层深度。

1.3.3 降雨量测定 采用田间自动气象观测站对整个生育期间的降雨量进行自动采集。

1.3.4 水稻茎蘖数、株高测定 每份材料定点 10 穴作为观测点,分别在分蘖期(tillering stage, TS)、孕穗期(booting stage, BS)、齐穗期(full heading stage, FS)、成熟期(maturity, MA)测定植株分蘖数(number of tillers, NT)、株高(plant height, PH)。抽穗前株高为地面至最高叶尖长度,抽穗后株高为地面至穗顶的长度。

1.3.5 水稻干物质生产量测定 每份材料选取长势一致的植株 5 穴,分别在分蘖期、孕穗期、齐穗期、成熟期于田间将其紧贴地面割取地上部植株,随后在实验室内,将其分为叶、茎鞘、穗 3 部分装袋,在烘箱中杀青 30 min(105℃),然后 80℃烘干至恒重,按照公式计算干物质输出率与转换率:

$$\text{干物质输出率} = (\text{齐穗期茎鞘干重} - \text{成熟期茎鞘干重}) / \text{齐穗期茎鞘干重} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{干物质转换率} = (\text{齐穗期茎鞘干重} - \text{成熟期茎鞘干重}) / \text{饱粒干重} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.6 产量相关性状测定 成熟期每份材料选取长势一致的植株 5 株进行产量相关性状测定,包括穗长(panicle length, PL)、有效穗数(productive panicle numbers per plant, PPN)、每穗粒数(spikelet number per panicle, SNP)、每穗实粒数(filled-grain number per panicle, FGP)、每穗瘪粒数(flat grain number, FGN)和千粒重(thousand grain weight, TGW),并按照公式计算结实率(seed set rate, SSR)、产量(grain yield, GY)。

$$\text{结实率} = \text{每穗实粒数} / \text{每穗粒数} \times 100\% \quad (3)$$

1.3.7 水分利用效率测定 以 1 hm<sup>2</sup> 稻田实际灌溉的单位水量(m<sup>3</sup>)所生产的干物质(稻谷)量作为灌溉水的生产效率,按照公式计算灌溉水分利用效率(water use efficiency, WUE):

$$\text{WUE} = \text{单位面积产量} / \text{单位面积灌水量} \quad (4)$$

## 1.4 数据处理

为消除水稻品种自身对灌溉效果的影响,本研究将供试的 8 个水稻品种分别作为每个灌溉处理的 1 次重复进行数据统计分析,利用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 2007 软件对试验数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田下不同灌溉方式对水稻茎蘖数、株高的影响

由表 1 可知,4 种灌溉方式下水稻茎蘖动态变化规律趋于一致,随着生育进程的推进,均呈先增加后逐

渐减小的变化规律,且在孕穗期时达到最大,在成熟期达到最低。其中以分蘖期、齐穗期控灌Ⅱ的分蘖数最大,孕穗期、成熟期间歇灌溉的分蘖数最大,3种节水灌溉方式在分蘖期、孕穗期的分蘖数均高于淹水灌溉,但4种灌溉方式间的分蘖数差异未达显著水平。在分蘖成穗率方面,淹水灌溉(CK)最大,其次是间歇灌溉、控灌Ⅰ、控灌Ⅱ,且淹水灌溉显著高于控灌Ⅰ和控灌Ⅱ,3个节水灌溉方式间差异不显著。节水灌溉方式在一定程度上能够提高水稻中前期分蘖数,但无效分蘖较多,导致分蘖成穗率较低。结果表明,在水稻生长发育前期适当减少灌溉水量能够增加水稻分蘖数,而后期适当增加灌水量能增加有效分蘖,进而提高分蘖成穗率。

Table 1 Effect of different irrigation regimes on number of rice tillers under straw returning to field					
项目 Items	分蘖数 Number of tillers/(tillers·plant <sup>-1</sup> )				分蘖成穗率 Percentage of productive tillers/%
	分蘖期 TS	孕穗期 BS	齐穗期 FS	成熟期 MA	
淹水灌溉 Flooding irrigation	14.75a	16.42a	14.63a	13.88a	83.61a
间歇灌溉 Intermittent irrigation	15.67a	17.33a	14.54a	14.04ab	75.62ac
控灌Ⅰ Control irrigation I	16.38a	16.96a	14.79a	12.79abd	69.09bc
控灌Ⅱ Control irrigation II	16.63a	16.79a	15.50a	11.63acd	68.12bc
平均值 Average value	15.86	16.87	14.86	13.08	74.11
标准差 Standard deviation	0.84	0.38	0.44	1.12	7.16
变异系数 CV/%	5.31	2.25	2.93	8.55	9.66

注:同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。  
Note; Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. The same as following.

由图1可知,不同灌溉方式下,水稻植株高度变化趋势基本一致,分蘖期至孕穗期、孕穗期至齐穗期是水稻株高增长最快的2个阶段,齐穗期后水稻植株高度趋于平稳,变化较小。不同灌溉方式下的水稻植株高度差异未达显著水平,分蘖期水稻植株高度依次为间歇灌溉>控灌Ⅱ>控灌Ⅰ>淹水灌溉;孕穗期水稻植株高度依次为控灌Ⅱ>间歇灌溉>淹水灌溉>控灌Ⅰ;齐穗期和成熟期水稻植株高度依次为淹水灌溉>间歇灌溉>控灌Ⅰ>控灌Ⅱ。

## 2.2 秸秆还田下不同灌溉方式水稻干物质积累与分配特征

2.2.1 秸秆还田下不同灌溉方式水稻植株干物质积累动态 由表2可知,除孕穗期控灌Ⅱ水稻干物质显著高于淹水灌溉外,不同灌溉方式间水稻干物质差异不显著。总体上看,节水灌溉处理水稻干物质在各生育时期均高于淹水灌溉处理,分蘖期以控灌Ⅱ干物质最大,其次是间歇灌溉、控灌Ⅰ、淹水灌溉;孕穗期以控灌Ⅱ干物质最大,其次是控灌Ⅰ、间歇灌溉、淹水灌溉;齐穗期以控灌Ⅰ干物质最大,其次是控灌Ⅱ、淹水灌溉、间歇灌溉;成熟期以控灌Ⅱ干物质最大,其次是控灌Ⅰ、淹水灌溉、间歇灌溉。结果表明,节水灌溉在一定程度上能够有效促进水稻生长发育,增加光合同化物的积累。

II,3个节水灌溉方式间差异不显著。节水灌溉方式在一定程度上能够提高水稻中前期分蘖数,但无效分蘖较多,导致分蘖成穗率较低。结果表明,在水稻生长发育前期适当减少灌溉水量能够增加水稻分蘖数,而后期适当增加灌水量能增加有效分蘖,进而提高分蘖成穗率。

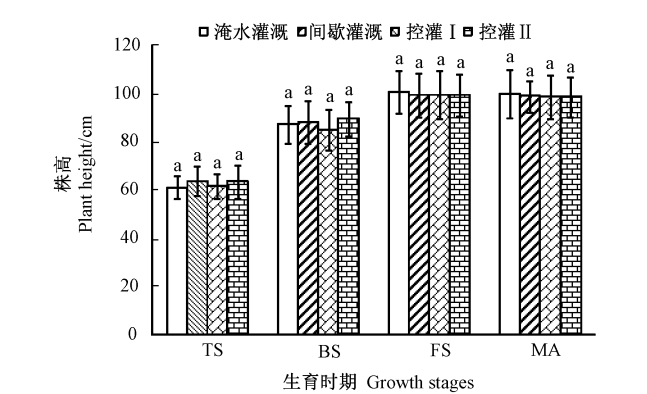


图1 秸秆还田下节水灌溉对水稻株高的影响  
Fig.1 Effect of different irrigation regimes on plant height of rice under straw returning to field

由图2可知,水稻不同生育阶段干物质生长量存在一定差异,淹水灌溉表现为齐穗期-成熟期>孕穗期-齐穗期>分蘖期-孕穗期,而3种节水灌溉方式表现规律一致,均为齐穗期-成熟期>分蘖期-孕穗期>孕穗期-齐穗期;在分蘖期-孕穗期3种节水灌溉方式的干物质生长量均高于淹水灌溉,其中以控灌Ⅱ最高,而在孕穗期-齐穗期期间则相反,淹水灌溉的干物质生长量高于3种节水灌溉方式,齐穗期-成熟期以控灌Ⅱ最大,其次是淹水灌溉、间歇灌溉、控灌Ⅰ。

表 2 水稻不同生育时期干物质积累动态  
Table 2 Dynamic of dry matter accumulation during different growth stage in rice

灌溉方式 Irrigation regimes	植株单茎干物质质量 Dry matter weight per plant/g			
	分蘖期 TS	孕穗期 BS	齐穗期 FS	成熟期 MA
淹水灌溉 Flooding irrigation	0.56a	1.48b	2.56a	4.32a
间歇灌溉 Intermittent irrigation	0.66a	1.70ab	2.54a	4.27a
控灌 I Control irrigation I	0.58a	1.73ab	2.72a	4.40a
控灌 II Control irrigation II	0.67a	1.90a	2.59a	4.43a
平均值 Average value	0.62	1.70	2.60	4.35
标准差 Standard deviation	0.05	0.17	0.08	0.07
变异系数 CV/%	8.79	10.18	3.11	1.68

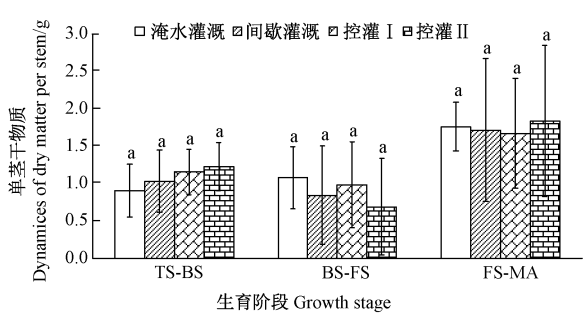


图 2 水稻不同生育阶段单茎干物质  
Fig. 2 Dry matter weight of rice in different growth stage of rice

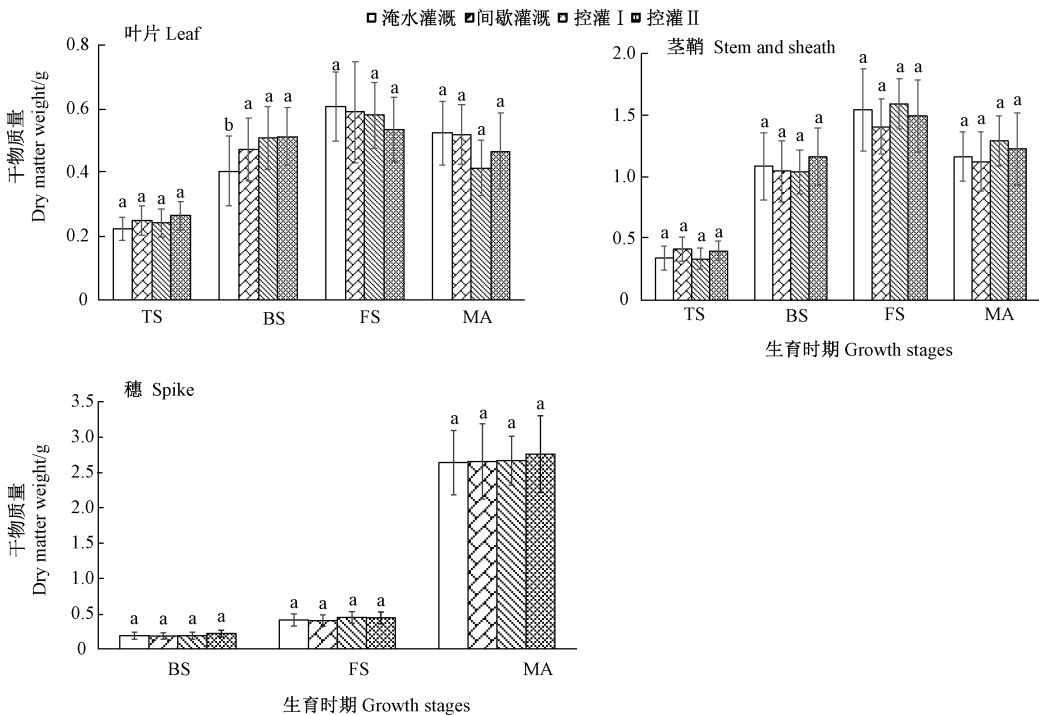


图 3 不同生育时期水稻单茎干物质在各器官中的分配特征  
Fig. 3 Distribution of dry matter in organs in different growth stage

结果表明,节水灌溉能有效促进水稻前期的生长发育,为水稻产量形成奠定良好基础。

2.2.2 秸秆还田下不同灌溉方式水稻干物质分配特征 由图 3 可知,随着生育进程的发展,4 种灌溉方式的叶片和茎鞘的干物质积累均呈先增加后减少的趋势,以齐穗期最大,分蘖期最小;穗干物质逐渐增加,以成熟期最大。从干物质在器官中的分配来看,分配到叶片中的干物质均在分蘖期和孕穗期控灌 II 处理最多,淹水灌溉处理最少,在齐穗期和成熟期则淹水灌溉处理最多;分配到茎鞘中的干物质各处理无规律性表现,在成熟期表现为控灌 I 和控灌 II 处理多于淹水灌



溉和间歇灌溉处理;分配到穗中的干物质在孕穗期表现为控灌Ⅱ>淹水灌溉>控灌Ⅰ>间歇灌溉,随着生育期进程的推进,在齐穗期和成熟期控灌Ⅱ和控灌Ⅰ处理分配到穗中的干物质多于间歇灌溉和淹水灌溉。

由图4可知,随着生育进程的推进,4种灌溉方式下水稻植株干物质在叶片和茎鞘中的比例均逐渐减少,在穗中的比例均逐渐增加。干物质在叶片中的分配比例,4种灌溉方式均是分蘖期最大,其中控灌Ⅰ最大,达41.98%,其次是控灌Ⅱ、淹水灌溉、间歇灌溉,

分配比例分别为39.80%、39.66%、37.60%;干物质在茎鞘中的分配比例,淹水灌溉、控灌Ⅱ在孕穗期最大,分配比例分别为64.71%、61.44%,间歇灌溉在分蘖期最大,分配比例为62.40%,而控灌Ⅰ则在齐穗期最大,分配比例为60.79%;干物质在穗中的分配比例,4种灌溉方式均在成熟期最大,分配比例均达60%以上。结果表明,在水稻生长发育的中前期,适当减少水分供给有利于水稻叶片和茎鞘干物质的积累,可为后期水稻产量形成输出更多的光合同化物。

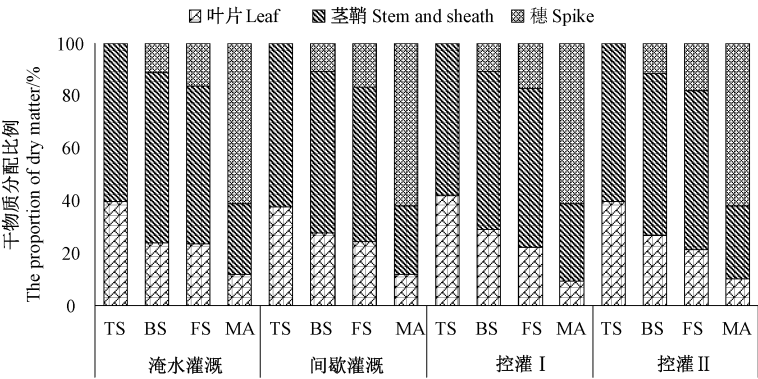


图4 不同生育时期水稻单茎干物质在各器官中的分配比例  
Fig.4 Distribution rate of dry matter per stem in organs at different growth stages

2.2.3 秸秆还田下不同灌溉方式水稻干物质转运特征

由图5可知,4种灌溉方式下,干物质输出率和转换率,均表现为茎鞘高于叶片,各器官对产量形成的贡献表现为茎鞘大于叶片。在叶片干物质输出率与干物质

转换率方面均为控灌Ⅰ最大,分别达到14.19%和4.15%,其次是淹水灌溉、控灌Ⅱ、间歇灌溉;在茎鞘干物质输出率和转换率方面,均是间歇灌溉最大,分别达到28.69%和17.39%,其次是控灌Ⅱ、淹水灌溉、控灌Ⅰ。

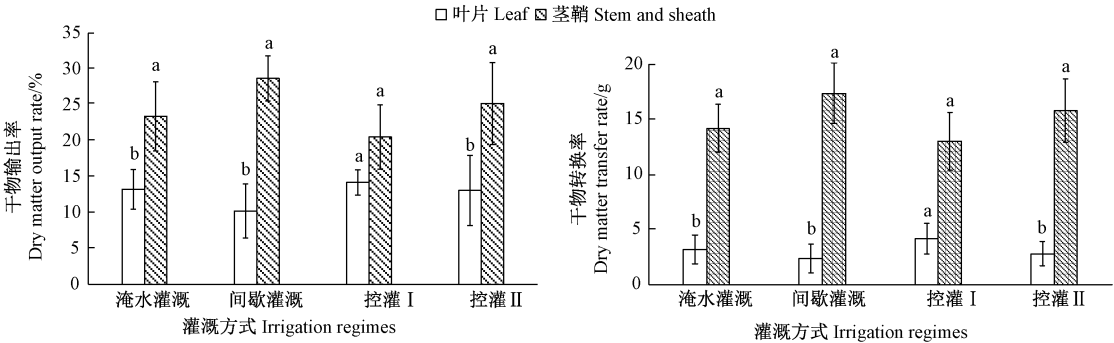


图5 不同灌溉方式水稻干物质转运特征  
Fig.5 Characteristics of dry matter transport in rice under different irrigation regimes

2.3 秸秆还田下不同灌溉方式对水稻产量及其构成因子的影响

由表3可知,品种、灌溉方式对水稻产量及其构成因素均存在影响,除穗长、每穗实粒数外,品种、灌溉方

式对有效穗数、每穗粒数、每穗瘪粒数和千粒重、结实率、产量的影响均达到显著或极显著水平;品种与灌溉方式的互作效应对有效穗数、每穗粒数、每穗实粒数、每穗瘪粒数和千粒重、结实率、产量的影响差异均达到

极显著水平,而对穗长的影响差异不显著。秸秆还田条件下,与淹水灌溉相比,控灌Ⅰ和控灌Ⅱ产量均有所下降,分别降低 1.99% 和 10.74%,而间歇灌溉产量有所提高,总体表现为间歇灌溉 > 淹水灌溉 > 控灌Ⅰ > 控灌Ⅱ。

表 3 不同灌溉方式水稻产量及其构成因子  
Table 3 Rice yield and its component factors under different irrigation regimes

灌溉方式 Irrigation regimes	有效穗数 PPN/个	穗长 PL/cm	每穗实粒数 FGP	每穗瘪粒数 FGN	每穗粒数 SNP	结实率 SSR/%	千粒重 TGW/g	产量 GY /( kg·hm <sup>-2</sup> )
淹水灌溉 Flooding irrigation	13.38a	20.66ab	138.33a	9.29b	147.67ab	93.68a	26.95c	8 656.72b
间歇灌溉 Intermittent irrigation	14.04a	21.07a	136.58a	9.89b	146.48ab	93.30a	27.21a	9 088.92a
控灌 I Control irrigation I	12.79ab	20.41bc	133.96a	8.85b	142.81bc	93.59a	27.05b	8 484.87c
控灌 II Control irrigation II	11.62b	20.88ab	138.52a	15.77a	154.29a	89.92b	25.06d	7 727.19d
平均值 Average value	12.96	20.76	136.85	10.95	147.81	92.62	26.57	8 489.43
标准差 Standard deviation	1.03	0.28	2.11	3.24	4.79	1.81	1.01	568.16
变异系数 CV/%	7.93	1.37	1.54	29.60	3.24	1.95	3.80	6.69
品种 Variety	5.75 **	18.42 **	37.58 **	6.44 **	36.71 **	7.24 **	1 537.86 **	1 324.74 **
F 值 F value	灌溉方式 Irrigation regimes	4.03 *	1.87	0.59	12.15 **	2.78 *	9.58 **	1 047.21 **
	品种 × 灌溉方式 Variety × irrigation regimes	1.61	2.17 **	3.65 **	2.66 **	4.26 **	2.26 **	512.81 **

注:\*,\*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。  
Note:\*,\*\* mean significant difference at 0.05 and 0.01 levels,respectively. The same as following.

由表 4 可知,秸秆还田条件下,不同灌溉方式对不同品种产量及其构成因子的影响不尽相同,在产量方面,灌溉方式对所有供试品种的影响均达极显著水平,其中以龙稻 22、中龙粳 2、中龙粳 3、龙稻 7 在间歇灌溉下产量最高,其次为淹水灌溉,这与前面的分析结果一致,而龙香稻 2、龙稻 26、龙稻 14、龙稻 17 分别在控灌、控灌Ⅱ、淹水灌溉下产量最高,这主要是由品种自身特性决定的;在产量构成因子方面,灌溉方式对龙稻 7 的有效穗数影响达显著水平,对龙稻 22、中龙粳 3、龙香稻 2 的穗长影响差异均达极显著水平,对龙稻 22、龙香稻 2、龙稻 17 的每穗实粒数的影响差异达显著或极显著水平,对龙稻 22、中龙粳 2、龙稻 7 的每穗瘪粒数的影响达显著或极显著水平,对龙稻 22、龙香稻 2、龙稻 7、龙稻 17 的每穗粒数的影响达显著或极显著水平,对龙稻 22、中龙粳 2、龙稻 7 的结实率影响达显著或极显著水平,对所有供试品种的千粒重的影响均达极显著水平。

表 4 不同品种水稻产量及其构成因子  
Table 4 Rice yield and its component factors under different varieties

水稻品种 Rice variety	项目 Items	有效穗数 PPN/个	穗长 PL/cm	每穗实粒数 FGP	每穗瘪粒数 FGN	每穗粒数 SNP	结实率 SSR/%	千粒重 TGW/g	产量 GY /( kg·hm <sup>-2</sup> )
龙稻 22 Longdao 22	淹水灌溉 Flooding irrigation	17.00a	20.32a	116.17ab	7.00b	123.16a	94.36a	29.67a	9 679.84b
	间歇灌溉 Intermittent irrigation	17.00a	21.20a	125.33a	8.33b	133.67a	93.38a	28.43b	10 580.29a
	控灌Ⅰ Control irrigationⅠ	12.33a	18.86b	91.33bc	10.83b	102.16b	89.61a	29.467a	8 797.73c
	控灌Ⅱ Control irrigationⅡ	15.33a	20.97a	107.17b	24.50a	131.67a	81.74b	27.53c	8 420.86d
	平均值 Average value	15.42	20.34	110.00	12.67	122.67	89.77	28.78	9 369.68
	标准差 Standard deviation	2.20	1.049	14.49	8.05	14.40	5.73	0.99	964.21
	变异系数 CV/%	14.27	5.16	13.17	63.53	11.74	6.39	3.44	10.29
	F 值 F value	1.36	7.22**	6.79**	9.79**	6.31**	9.69**	219.89**	190.79**

表 4(续)

水稻品种 Rice variety	项目 Items	有效穗数 PPN/个	穗长 PL/cm	每穗实粒 数 FGP	每穗瘪粒 数 FGN	每穗粒数 SNP	结实率 SSR/%	千粒重 TGW/g	产量 GY /(kg·hm <sup>-2</sup> )
中龙粳 2 Zhonglongjing 2	淹水灌溉 Flooding irrigation	11.67a	19.38a	189.33a	9.50b	198.833 ab	95.23a	26.00a	10 275.97b
	间歇灌溉 Intermittent irrigation	12.33a	20.45a	203.00a	15.00ab	218.00a	92.87ab	24.43b	10 751.21a
	控灌 I Control irrigation I	11.00a	20.88b	180.83b	7.33b	188.17b	96.15a	25.57a	9 085.37d
	控灌 II Control irrigation II	10.33a	20.25a	180.50a	18.83a	199.33ab	90.73b	23.67c	9 624.81c
	平均值 Average value	11.33	20.24	188.42	12.67	201.08	93.74	24.92	9 934.34
	标准差 Standard deviation	0.86	0.63	10.55	5.23	12.40	2.44	1.06	730.42
	变异系数 CV/%	7.59	3.11	5.60	41.26	6.17	2.60	4.27	7.35
	F 值 F value	0.46	0.41	1.32	4.09 *	1.76	3.81 *	104.38 **	598.15 **
中龙粳 3 Zhonglongjing 3	淹水灌溉 Flooding irrigation	17.00a	18.88b	127.16a	7.66a	134.83a	94.11a	24.13b	9 361.34b
	间歇灌溉 Intermittent irrigation	15.66ab	21.25a	149.50a	12.17a	161.66a	92.96a	23.83b	10 475.23a
	控灌 I Control irrigation I	12.67b	17.80b	130.00a	8.67a	138.67a	93.89a	24.46a	7 029.34d
	控灌 II Control irrigation II	13.33ab	19.48b	148.00a	9.00a	157.00a	94.54a	22.03c	8 214.94c
	平均值 Average value	14.66	19.35	138.67	9.38	148.04	93.88	23.62	8 770.22
	标准差 Standard deviation	2.02	1.44	11.72	1.95	13.27	0.66	1.09	1 482.73
	变异系数 CV/%	13.76	7.46	8.45	20.75	8.96	0.71	4.60	16.91
	F 值 F value	3.06	6.63 **	1.14	0.61	1.16	0.24	127.88 **	654.59 **
龙香稻 2 Longxiangdao 2	淹水灌溉 Flooding irrigation	13.00ab	22.16b	115.50c	5.50a	121.00b	95.36a	27.15a	7 343.29b
	间歇灌溉 Intermittent irrigation	10.00ab	24.05a	149.33ab	9.33a	158.67a	94.25a	26.767 a	8 381.69ab
	控灌 I Control irrigation I	14.00a	24.67a	152.00a	6.00a	158.00a	96.20a	27.47a	9 872.43a
	控灌 II Control irrigation II	8.00b	23.37ab	131.17bc	7.33a	138.50ab	94.72a	21.80b	5 460.23c
	平均值 Average value	11.38	23.56	137.00	7.04	144.04	95.13	25.90	7 732.02
	标准差 Standard deviation	2.75	1.07	17.06	1.71	17.98	0.85	2.68	1 853.95
	变异系数 CV/%	24.19	4.55	12.45	24.32	12.49	0.89	10.34	23.98
	F 值 F value	2.54	6.16 **	7.08 **	1.71	7.02 **	1.01	22.09 **	13.1 **
龙稻 7 Longdao 7	淹水灌溉 Flooding irrigation	13.66ab	20.80a	143.00a	11.83a	154.83a	92.34b	28.80a	8 817.74b
	间歇灌溉	17.67a	20.47a	117.50b	4.33b	121.83c	96.48a	28.43b	9 674.84a
	控灌 I Control irrigation I	14.00ab	20.25a	122.50ab	4.66b	127.16bc	96.37a	28.87a	8 346.67c
	控灌 II Control irrigation II	11.33b	20.47a	132.00ab	12.17a	144.17ab	91.19b	23.40c	7 065.20d
	平均值 Average value	14.17	20.50	128.75	8.25	137.00	94.10	27.38	8 476.11
	标准差 Standard deviation	2.62	0.23	11.24	4.33	15.23	2.73	2.67	1 089.51
	变异系数 CV/%	18.48	1.11	8.73	52.54	11.12	2.90	9.71	12.85
	F 值 F value	4.33 *	0.17	2.57	9.08 **	5.13 **	5.85 ** 1	104.86 **	1 151.55 **
龙稻 26 Longdao 26	淹水灌溉 Flooding irrigation	9.67a	20.83a	126.00ab	5.67a	131.67ab	95.62a	27.50a	6 776.72d
	间歇灌溉 Intermittent irrigation	13.66a	20.55a	115.16b	8.33a	123.50b	93.26a	27.66a	7 421.21c
	控灌 I Control irrigation I	12.66a	20.00a	136.66a	10.50a	147.16a	92.83a	27.26b	7 954.81b
	控灌 II Control irrigation II	13.33a	20.08a	133.83ab	7.16a	141.00ab	95.03a	27.50a	8 400.87a
	平均值 Average value	12.33	20.36	127.92	7.92	135.83	94.18	27.48	7 638.40
	标准差 Standard deviation	1.83	0.39	9.62	2.04	10.40	1.35	0.16	700.27
	变异系数 CV/%	14.80	1.94	7.52	25.76	7.66	1.43	0.60	9.17
	F 值 F value	2.45	0.33	2.16	1.06	2.39	0.88	6.95 **	187.63 **

表 4(续)

水稻品种 Rice variety	项目 Items	有效穗数 PPN/个	穗长 PL/cm	每穗实粒 数 FGP	每穗瘪粒 数 FGN	每穗粒数 SNP	结实率 SSR/%	千粒重 TGW/g	产量 GY /(kg·hm <sup>-2</sup> )
龙稻 14 Longdao 14	淹水灌溉 Flooding irrigation	12.33ab	21.58ab	147.50b	16.16b	163.66b	90.07ab	26.26c	9 317.99a
	间歇灌溉 Intermittent irrigation	11.00ab	20.83b	132.16b	12.00b	144.16b	91.55ab	28.10a	7 600.47b
	控灌 I Control irrigation I	13.33a	20.96b	135.66b	9.50b	145.16b	93.67a	26.60b	9 300.48a
	控灌 II Control irrigation II	8.66b	22.35a	168.33a	29.33a	197.66a	85.55b	26.06c	7 518.75b
	平均值 Average value	9.55	17.21	117.16	13.61	130.61	72.34	26.75	8 434.42
	标准差 Standard deviation	2.01	0.69	16.32	8.82	24.99	3.43	0.92	1 010.72
	变异系数 CV/%	21.12	4.02	13.92	64.85	19.13	4.75	3.44	11.98
	F 值 F value	2.45	0.33	2.16	1.06	2.39	0.88	6.95**	187.63**
龙稻 17 Longdao 17	淹水灌溉 Flooding irrigation	14.33a	21.31a	142.00a	11.00a	153.33a	92.33a	26.96c	8 449.22a
	间歇灌溉 Intermittent irrigation	15.00a	19.78a	100.66b	9.66a	110.33b	91.67a	30.03a	7 826.41b
	控灌 I Control irrigation I	12.33a	19.85a	122.66ab	13.33a	136.00ab	90.03a	26.76c	7 492.07c
	控灌 II Control irrigation II	12.67a	20.06a	107.16b	17.83a	125.00b	85.82a	28.50b	7 111.88d
	平均值 Average value	13.58	20.25	118.12	12.95	131.16	89.96	28.07	7 719.89
	标准差 Standard deviation	1.29	0.71	18.39	3.58	18.13	2.92	1.52	567.11
	变异系数 CV/%	9.47	3.54	15.57	27.67	13.82	3.25	5.42	7.34
	F 值 F value	0.49	1.96	4.32*	1.11	4.32*	1.22	463.70**	267.10**

2.4 秸秆还田下不同灌溉方式水分利用效率分析

2.4.1 秸秆还田下不同灌溉方式田间灌水量分析 由表 5 可知,间歇灌溉、控灌 I、控灌 II 3 种节水灌溉方式均有较好的节水效果,且灌水量显著降低。节水效果最好的是控灌 II,其次是控灌 I、间歇灌溉。与淹水

灌溉相比,间歇灌溉、控灌 I、控灌 II 分别节水 10.97%、23.08% 和 28.72%。从水稻全生育期看,不同灌溉方式均是分蘖至抽穗灌溉用水量最大,占整个生育期灌水量的 40% 以上。

表 5 不同灌溉方式田间灌水量

Table 5 Field irrigation amount with different irrigation regimes

灌溉方式 Irrigation regimes	泡田 Steeping field /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	插秧至返青 Transplanting to turning green stage /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	返青至分蘖 Turning green stage to tillering stage /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	分蘖至抽穗 Tillering stage to heading stage /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	抽穗至成熟 Heading stage to maturity /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	灌溉水量 Irrigation amount /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	自然降水 Natural rainfall /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	全生育期 合计 Total amount /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	节水 Water saving/%
淹水灌溉 Flooding irrigation	600	225	1 410	2 910	1 230	6 375	8 250	14 625	—
间歇灌溉 Intermittent irrigation	600	225	900	1 920	1 125	4 770	8 250	13 020	10.97
控灌 I Control irrigation I	600	225	600	915	660	3 000	8 250	11 250	23.08
控灌 II Control irrigation II	600	225	300	690	360	2 175	8 250	10 425	28.72

注:“—”表示不存在。  
Note: ‘—’ means no existed.



表 6 不同灌溉方式水分利用效率比较

Table 6 Comparison on water use efficiency of different irrigation regimes

灌溉方式 Irrigation regimes	产量 Yield  /(kg·hm <sup>-2</sup> )	灌水量 Irrigation amount  /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	自然降水 Natural rainfall  /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	总用水量 Total water amount  /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	灌溉水水分 利用效率 Irrigation WUE  /(kg·m <sup>-3</sup> )	自然降水水分 利用效率 Natural rainfall WUE  /(kg·m <sup>-3</sup> )	总水分利用效率 Total WUE  /(kg·m <sup>-3</sup> )
淹水灌溉 Flooding irrigation	8 656. 72	6 375	8 250	14 625	1. 36	1. 05	0. 59
间歇灌溉 Intermittent irrigation	9 088. 92	4 770	8 250	13 020	1. 91	1. 10	0. 70
控灌 I Control irrigation I	8 484. 87	3 000	8 250	11 250	2. 83	1. 03	0. 75
控灌 II Control irrigation II	7 727. 19	2 175	8 250	10 425	3. 55	0. 94	0. 74

2.4.2 秸秆还田下不同灌溉方式水分利用效率分析

水分利用效率是衡量植物水分消耗与物质生产之间关系的重要综合指标,由表 6 可知,灌溉水水分利用效率依次为控灌Ⅱ>控灌Ⅰ>间歇灌溉>淹水灌溉;自然降水水分利用率依次为间歇灌溉>淹水灌溉>控灌Ⅰ>控灌Ⅱ;总水分利用效率依次为控灌Ⅰ>控灌Ⅱ>间歇灌溉>淹水灌溉。

3 讨论

水稻的茎蘖数、株高是影响其产量的重要农艺性状。周龙艳<sup>[27]</sup>在秸秆全量还田下,研究干湿交替灌溉和常规灌溉对水稻产量的影响,发现干湿灌溉的茎蘖数、有效穗数、每穗粒数高于常规灌溉,且产量显著提高。王伟等<sup>[28]</sup>通过研究秸秆还田下不同灌溉方式对水稻产量的影响,发现浅湿调控灌溉模式有利于控制水稻茎蘖量,降低水稻株高,形成合理的群体结构,同时还可显著提高水稻有效穗数和千粒重,进而提高水稻产量。本研究结果表明,秸秆还田下节水灌溉方式能够促进水稻中前期茎蘖数,后期适当增加灌水量能够增加有效分蘖,提高分蘖成穗率,有利于控制水稻株高,降低成熟期水稻植株株高,提高植株抗倒伏能力,降低收割成本,这与前人研究结果基本一致。

水稻产量形成的过程,实际上是干物质生产、分配、运转的过程<sup>[29]</sup>。张武益等<sup>[30]</sup>研究表明,秸秆还田下干湿交替灌溉水稻分蘖提早,成熟期比淹水灌溉提前,能够有效缓解秸秆还田的负面影响,增加水稻后期干物质积累量和产量。江峰<sup>[31]</sup>研究发现在秸秆还田下,整个生育周期干湿灌溉的单茎干物质重均高于常

规灌溉,且随着生育进程的推进,差异逐渐增大。本研究结果表明,秸秆还田下节水灌溉有利于植株总干物质的积累,促进了水稻前期干物质积累量,分配到叶片中的干物质在分蘖期和孕穗期均高于淹水灌溉,但齐穗期和成熟期则相反,而茎鞘和穗干物质则无明显规律,这有利于叶源的积累,为后期向库输出干物质奠定了良好基础,这与前人研究结果不完全一致。本研究中,在水稻产量及其构成因素方面,不同灌溉方式间,与淹水灌溉相比,控灌Ⅰ、控灌Ⅱ产量均有所降低,而间歇灌溉产量有所提高,这与前人研究结果一致。不同品种间产量方面,供试品种龙稻 14、龙稻 17 在 3 种节水灌溉方式下的产量均低于淹水灌溉,而其余 6 个供试品种产量在 3 种节水灌溉条件下均高于淹水灌溉,说明在秸秆还田下采取适当的节水灌溉方式能够促进水稻产量的提高,本研究结果具有一定的普遍性。

水分管理是水稻生产中的重要环节,杨士红等<sup>[32]</sup>研究发现控制灌溉和秸秆还田相结合不仅有利于水稻生长发育、减少灌溉用水量,还可显著提高其产量及水分利用效率。本研究结果表明,秸秆还田下 3 种节水灌溉方式的灌溉水水分利用效率均高于淹水灌溉,这与杨士红等<sup>[32]</sup>研究结果一致,表明节水灌溉能够有效提高水资源利用效率。

综上,关于水稻秸秆还田下不同灌溉方式对水稻的茎蘖数、株高、干物质生产、产量及产量构成因素等的影响,学者们的研究结论并无一致性,这可能是由于研究所用的水稻品种、所处区域、秸秆还田量、灌溉方式、灌水量等不同所致,因此还有待进一步研究,以期为指导秸秆还田下水稻水分管理提供科学依据。

## 4 结论

在一定范围内减少水稻灌溉用水量,有利于水稻中前期的生长发育,同时与淹水灌溉相比,产量差异不大,水分利用效率有所提高,因此,综合考虑不同灌溉方式对水稻生长发育、产量及其构成因素等的影响,本研究结果表明,秸秆还田下间歇灌溉和控灌 I(水层 30 mm)灌溉方式较好,能够实现水稻节水增效。目前,在水稻秸秆还田和节水灌溉方面进行了大量研究,但二者相结合的相关研究鲜有报道,今后应加强这方面的研究,以期为保障水稻生产的可持续发展提供科技支撑。

## 参考文献:

- [1] 徐世宏,梁天锋,曾华忠,江立庚,丁成泉,张玉. 不同耕作方式下水分管理对水稻氮素吸收利用的影响[J]. 核农学报,2009,23(6):1065-1069
- [2] 顾春梅,赵黎明. 国内外寒地水稻节水灌溉技术研究进展[J]. 北方水稻,2012,42(4):70-72
- [3] 姚林,郑华斌,刘建霞,贺慧,黄璜. 中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J]. 生态学杂志,2014,33(5):1381-1387
- [4] 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
- [5] 高继平,张文忠,隋阳辉,姚晨,高明超,赵明辉. 水分胁迫下水稻拔节孕穗期冠气温度差与产量及品质的关系[J]. 核农学报,2016,30(3):596-604
- [6] Yang J C, Liu K, Wang Z Q, Du Y, Zhang J H. Water-saving and high-yielding irrigation for lowland rice by controlling limiting values of soil water potential[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007,49(10):1445-1454
- [7] Sujono J, Matsuo N, Hiramatsu K, Mochizuki T. Improving the water productivity of paddy rice (*Oryza sativa* L.) cultivation through water saving irrigation treatments[J]. Agricultural Sciences,2011,2(4):511-517
- [8] 任艳军. 寒地水稻优质高产浅湿灌溉技术[J]. 北方水稻,2013,43(5):50-51
- [9] 金日峰. 水稻实行“薄、浅、湿、晒”灌溉制度的探讨[J]. 水利天地,2008(8):37
- [10] 周义成,田雨春,陈宝忠,李孟双,吴凤晨,姜海轩. 水稻“浅、晒、浅湿”灌溉技术[J]. 内蒙古民族大学学报,2008,14(2):84-85
- [11] 林燕春,陈化寨,崔瑾,刘小艳,张迁西. 水稻节水高产栽培间歇灌溉技术[J]. 广东农业科学,2010,37(12):29-31
- [12] 王义炳,孙进,王少华. 水稻间歇灌溉技术的探讨[J]. 水土保持研究,1996,3(3):108-111,117
- [13] 李丹,郭富庆,董霖,黄彦,詹红丽. 水稻控制灌溉技术在我国东北三省的应用分析[J]. 节水灌溉,2011(11):63-66
- [14] 倪同坤,戴柏元,王卫军,陈晓婷. 水稻控制灌溉技术在苏北沿

- 海垦区的应用[J]. 江苏农业科学,2008,36(3):52-54
- [15] 王麒. 秸秆还田和施氮量对寒地水稻生长及土壤养分的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2015
- [16] 游来勇,李冰,王昌全,杨娟,白根川,黄春. 秸秆还田量对麦-稻轮作体系作物产量、氮素吸收利用效率的影响[J]. 核农学报,2015,29(15):2394-2401
- [17] 王秋菊,常本超,张劲松,韩东来,隋玉刚,陈海龙,杨兴玉,王雪冬,焦峰,新家宪,刘峰. 长期秸秆还田对白浆土物理性质及水稻产量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(14):2748-2757
- [18] Zhang G S, Chan K Y, Li G D, Huang G B. Effect of straw and plastic film management under contrasting tillage practices on the physical properties of an erodible loess soil[J]. Soil and Tillage Research,2008,98(2):113-119
- [19] 丛日环,张丽,鲁艳红,黄庆海,石孝均,李小坤,任涛,鲁剑巍. 长期秸秆还田下土壤铵态氮的吸附解吸特征[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):380-388
- [20] Wang Q, Wang S. Effects of nitrogen amount on yield and nutrient absorption of cold land japonica rice under the condition of straw returning[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015,737:325-331
- [21] 王麒,宋秋来,冯延江,孙羽,曾宪楠,来永才. 施用氮肥对还田水稻秸秆降解的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):197-201
- [22] 罗文丽,周柳强,谭宏伟,李伏生. 水稻秸秆降解规律及养分释放特征[J]. 南方农业学报,2014,45(5):808-812
- [23] 胡星. 秸秆全量还田与有机无机肥配施对水稻产量形成的影响[D]. 扬州:扬州大学,2008
- [24] 胡诚,刘东海,乔艳,刘友梅,李双来,陈云峰. 不同的秸秆还田对土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. 湖北农业科学,2017,56(10):1854-1856
- [25] 张艳波,彭其安. 水稻秸秆还田对稻田土壤  $N_2O$  排放的影响[J]. 湖北农业科学,2016,55(10):2539-2543,2554
- [26] Thuy N H, Shan Y H, Bijay S, Wang K R, Cai, Z C, Yadvinder S, Buresh R J. Nitrogen supply in rice-based cropping systems as affected by crop residue management[J]. Soil Science Society of America Journal,2008,72(2):514-523
- [27] 周龙艳. 秸秆还田与灌溉模式对超级梗稻产量、养分吸收及稻米品质的影响[D]. 扬州:扬州大学,2016
- [28] 王伟,朱利群,王文博,胡乃娟,张政文,卞新民. 秸秆还田地不同水氮条件对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(4):43-48
- [29] 林瑞余,梁义元,蔡碧琼,何海斌,林文雄. 不同水稻产量形成过程的干物质积累与分配特征[J]. 中国农学通报,2006,22(2):185-190
- [30] 张武益,朱利群,王伟,张政文,卞新民. 不同灌溉方式和秸秆还田对水稻生长的影响[J]. 作物杂志,2014(2):113-118
- [31] 江峰. 秸秆还田与灌溉模式对超级梗稻产量形成、及温室气体排放的影响[D]. 扬州:扬州大学,2014
- [32] 杨士红,沙世伟,何秋艳,徐俊增,吕玉平. 节水灌溉水稻生长及产量对秸秆还田的响应[J]. 中国农村水利水电,2015(8):20-23

## Effect of Different Irrigation Regimes on Rice Yield and Water Use Efficiency Under Straw Returning to Field

ZHAO Hongliang<sup>1</sup> WANG Qi<sup>1</sup> SUN Yu<sup>1</sup> ZENG Xiannan<sup>1</sup> ZHANG Xiaoming<sup>2</sup>  
WANG Ping<sup>3</sup> WANG Manli<sup>1</sup> FENG Yanjiang<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Crop Cultivation and Tillage, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086;

<sup>2</sup> College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030; <sup>3</sup> Information Center of  
Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086)

**Abstract:** In order to explore the application effect of straw returning to field combined with water-saving irrigation technology, the effect of different irrigation regimes on rice growth and development, yield and its components, and water use efficiency was studied under the condition of straw returning to full field. The results showed that as for rice growth and development, to some extent, straw returning to field combined with water-saving irrigation technology could increase tillers number in the early middle period, decrease plant height at maturity, reduced the panicle formation percentage with the decrease of irrigation amount. In the early middle period of rice growth and development, proper reduction of water supply is beneficial to the accumulation of dry matter in leaves and stems and sheath, the dry matter output rate and transfer rate of leaves were the largest under the treatment of control irrigation I, arriving at 14.19% and 4.15%, and the dry matter output rate and transfer rate of stems and sheath were the largest under the treatment of intermittent irrigation, arriving at 28.69% and 17.39%, respectively. As for yield and its components, the yield order of the different irrigation regimes was intermittent irrigation > flooding irrigation > control irrigation I > control irrigation II. As for water use efficiency, irrigation water use efficiency was the largest under the treatment of control irrigation II with  $3.55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , and natural rainfall water use efficiency was the largest under the treatment of control irrigation II, arriving at  $1.10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Total water use efficiency was the largest under the treatment of control irrigation I, arriving at  $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . The results concluded that, under the condition of straw returning to field and ensuring yield, the best irrigation regimes were intermittent irrigation and control irrigation I. The results could provide theoretical basis for water management under straw returning to field in Northeast China, increase water use efficiency and improve rice production sustainable development.

**Keywords:** straw returning to field, irrigation regime, growth and development, yield, water use efficiency