

# 不同灌溉方式对香稻产量品质及水分利用率的影响

韦小珊<sup>1,2</sup>, 梁俭伟<sup>1</sup>, 张集胜<sup>1,2</sup>, 佟天一<sup>1,2</sup>, 黄穗华<sup>1,2</sup>, 莫钊文<sup>1,2</sup>,  
田 华<sup>1,2</sup>, 潘圣刚<sup>1,2</sup>, 段美洋<sup>1,2</sup>, 唐湘如<sup>1,2</sup>

(1. 华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642; 2. 农业部华南地区作物栽培科学观测实验站, 广东 广州 510642)

**摘要:**为探讨提高香稻产量和稻米品质的水管理方式。以香稻品种象牙香占和美香占2号为试验材料,设置常规灌溉(CK)、干湿交替灌溉(W1)、轻度落干(W2)、自然补水灌溉(W3)、重度落干(W4)5种灌溉方式,研究不同灌溉方式对产量、品质及水分利用率形成的影响。与对照相比,就象牙香占而言,W1、W2处理能够有效提高叶片净光合速率、产量构成因素和稻米品质,产量增加了8.23%和11.24%,水分利用率提高了24.35%和19.94%,而W3、W4处理产量构成因素和稻米品质显著降低,产量降低了24.32%和17.57%;就美香占2号而言,W1、W2处理能够有效提高叶片净光合速率、产量构成因素和稻米品质,产量提高了0.05%和6.99%,W3、W4处理产量构成因素和稻米品质显著降低,产量显著降低了27.07%和17.61%,W4处理水分利用率降低了3.22%。齐穗后期轻度落干灌溉和干湿交替灌溉能够改善香稻产量及稻米品质,水分过度胁迫对水稻产量、光合参数、稻米品质等均有不利的影响,故掌握水稻需水的关键时期及阈值,是有效提高水分利用率、增产和改善稻米品质的重要因素。

**关键词:**香稻;灌溉方式;产量构成;产量品质;水分利用率

中图分类号:S511.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2020)04-0129-08

doi:10.7668/hbxb.20190792



## Effects of Different Irrigation Methods on Yield, Quality and Water Use Efficiency of Fragrant Rice

WEI Xiaoshan<sup>1,2</sup>, LIANG Jianwei<sup>1</sup>, ZHANG Jisheng<sup>1,2</sup>, TONG Tianyi<sup>1,2</sup>, HUANG Suihua<sup>1,2</sup>,  
MO Zhaowen<sup>1,2</sup>, TIAN Hua<sup>1,2</sup>, PAN Shenggang<sup>1,2</sup>, DUAN Meiyang<sup>1,2</sup>, TANG Xiangru<sup>1,2</sup>

(1. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Scientific Observing and Experimental Station of Crop cultivation in South China, Ministry of Agriculture. P. R. China, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the suitable irrigation technique with high yield and good quality. With scented rice varieties Xiangyaxiangzhan and Meixiangzhan 2 as experimental materials, effects of water use efficiency, yield and quality formation under five water management modes (traditional flooding irrigation (CK), alternate wetting and moderate drying irrigation (W1), and drying and moistening irrigation (W2), natural replenishment irrigation (W3), alternate wetting and severe drying irrigation (W4) were analyzed by pot experiment. Compared with controls, in terms of ivory fragrance of W1 and W2 treatment could effectively improve the leaf net photosynthetic rate, yield components and rice quality, production increased by 8.23% and 11.24%, and water use efficiency increased by 24.35% and 19.94%, while the W3, W4, processing the yield components and rice quality significantly reduced, and yield reduced by 24.32% and 17.57%, in the case of Meixiangzhan 2, W1 and W2 treatment could effectively improve the leaf net photosynthetic rate, yield components and rice quality, output control effectively increased by 0.05% and 6.99%, the yield components and rice quality of W3 and W4 treatment were significantly reduced, the yield was significantly decreased by 27.07% and 17.61%, and the water utilization rate was decreased by 3.22%. It could improve fragrant rice yield and rice quality, water excessive stress on rice yield and photosynthetic parameters, rice quality all had adverse effect,

收稿日期:2019-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(31971843)

作者简介:韦小珊(1993-),女,贵州三都人,在读硕士,主要从事作物栽培与生理研究。

通讯作者:唐湘如(1964-),男,湖南宁乡人,教授,博士,博士生导师,主要从事作物栽培与生理研究。

so the control of rice water requirement a key period of booting stage, filling stage and the water requirement of threshold, it is an important factor to improve water use efficiency, yield and rice quality.

**Key words:** Fragrant rice; Irrigation mode; Yield composition; Yield and quality; Water use efficiency

水稻是我国的主要粮食作物,同时也是用水量最多的作物<sup>[1]</sup>。水分管理方式对其产量和品质会产生重要影响<sup>[2]</sup>,传统的“大水大肥”粗放式管理,灌溉决策主要依据生产经验判断,主观性强、随意性大,过量灌溉施肥现象较为普遍,导致水、肥资源浪费,土壤盐渍化、酸化,水体环境污染加重<sup>[3]</sup>。随着社会经济的发展,对水资源的需求进一步扩增,研究如何解决有限的农业水资源的合理利用以满足农业生产需要的问题,从而提高水资源的利用率,是解决当前水资源供需矛盾的重要途径<sup>[4]</sup>。近年来,为在一定程度上缓解农业用水紧张,国内外学者在灌溉方式对水稻生长发育的影响方面进行了大量研究<sup>[5]</sup>出现了湿润灌溉、干湿交替灌溉以及旱种旱管等节水灌溉方式<sup>[2]</sup>。研究发现,在适宜的时期进行适度控水可有效改善水稻田间温光条件<sup>[6-7]</sup>,强壮稻株根系,提高养分的吸收和利用能力<sup>[8-9]</sup>,从而激发植物潜能增产提质<sup>[10]</sup>,实现降本增效,又能发挥社会带动作用<sup>[11]</sup>。与淹水灌溉相比,干湿交替灌溉水分管理在维持和提高水稻产量的同时,可以节约用水量,显著提高水分利用效率<sup>[12-13]</sup>。

香稻是稻中的珍品,香米因具有怡人香味而受到消费者的喜爱,具有很高的市场价值<sup>[14-15]</sup>,随着人口增长、人民生活水平的提高,人们对于水稻的风味及营养价值有了更高的追求<sup>[16]</sup>。香稻米的价格比一般优质大米高出很多,同时其销量仍在逐年增长<sup>[17]</sup>,香稻已经引起国内外植物学家和水稻育种学家的关注<sup>[18]</sup>。如何在稳产甚至增产的前提下提高香稻水分利用率是目前人们研究的重点和热点,且鉴于香米高价值和日益增加的需求量,深入开展香稻增香的研究对提高种稻效益,并进一步促进香稻大面积推广种植和专业化生产具有重要意义<sup>[19]</sup>。依据国内外众多学者对稻田非充分灌溉技术的大量研究结果<sup>[20]</sup>,本研究通过选用2个香稻品种,设置了5种不同的灌溉方式,与常规灌溉模式进行对比,分析了在不同灌溉模式下对香稻产量品质及其水分利用率的影响,皆在为提高香稻的高产优质栽培及水分利用率提供一定的理论依据和技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料与栽培概况

试验于2018年晚季在广东省广州市华南农业大学教学试验农场进行。供试水稻品种为象牙香占和美

香占2号2个常规香稻品种,自播种至收获的生育期为113 d,采用盆栽土培(盆上内径30 cm,下内径25 cm,高25 cm),每盆装干土12.5 kg。土壤理化性质:有机质22.01 g/kg,全氮0.93 g/kg,全钾23.26 g/kg,全磷0.87 g/kg,pH值4.57。基质育秧,7月17日播种,8月1日移栽3苗/穴,每盆5穴。基肥每盆施香稻专用肥(12.5% N,6% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,10% K<sub>2</sub>O和15%有机物)10 g,采用一次性全施肥法。移栽后至水稻返青开始进行水分处理于11月6日收获。

### 1.2 试验设计

试验设置了常规灌溉(对照)、干湿交替灌溉、轻度落干灌溉、自然补水灌溉、重度落干灌溉5种灌溉模式,分别用CK、W1、W2、W3、W4表示。CK:常规灌溉,按照传统的灌溉模式对水稻进行浅水灌溉2~4 cm,中期晒田,浅水灌溉直至收获的前7 d排水晒田;W1:干湿交替灌溉,移栽返青后保持土壤表面湿润状态,当土壤水势达-15 kPa左右时进行浅水灌溉,待其自然落干,再浅水灌溉2~4 cm,依次循环;W2:轻度落干,齐穗期后进行轻度落干处理,待土壤自动落干至-15 kPa后进行灌溉2~4 cm,待其自然落干至指定土壤水势后继续灌溉,如此循环至收获前7 d晒田;W3:自然补水灌溉,移栽返青后,在自然雨水灌溉的条件下,观察水稻植株当达到萎蔫状态(-50~-70 kPa)时对其进行浅水灌溉2~4 cm,待其自然落干水稻植株再次达到萎蔫状态时再进行浅水灌溉2~4 cm,如此循环至收获前7 d排水晒田;W4:重度落干,水稻前期按照传统灌溉方式进行,待水稻生长至齐穗期后对水稻进行重度落干处理,即当土壤水势达-30 kPa后进行灌溉2~4 cm,待其自然落干至-30 kPa后再灌溉,依次循环。每个处理安装真空表式土壤负压计(中国科学院南京土壤研究所生产),监测9~11 cm深土壤水势,每天8:30及18:00记录水势,当土壤水势达到所指定指标值时,用容量瓶灌溉2~4 cm,每个处理18盆,共计216盆,整个生育期严格控制病虫害。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 考种 于水稻成熟期,各处理取9盆用于考种,每3盆作为一个重复,计有效穗数、穗粒数、结实率、千粒质量,另外将每3盆脱粒后称质量计算每3盆收获的籽粒质量。

1.3.2 稻米品质测定 将收获的稻米风干储藏3个月,用于品质性状的测定。谷粒直链淀粉含量和

蛋白质含量用 FOSS-TECATOR 公司生产的近红外谷物分析仪 (In-fratec1241 grain analyzer) 测定。糙米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、长宽比等的测定参照部颁标准《NY147-88 米质测定方法》。

1.3.3 光合特性生理 于水稻分蘖盛期、孕穗期、齐穗期及成熟期选择天气晴朗有太阳的上午(9:00-11:00),随机选取 9 株长势一致的水稻植株用 LI-6400 便携式光合测定仪 (LI-COR 公司, 美国) 测定最顶端完全展开叶的净光合速率 (Pn)、蒸腾速率 (Tr)、气孔导度 (Cond) 以及水分利用率 (WUE) 等光合特性。

1.3.4 水分利用率 每盆实际灌溉水量(m<sup>3</sup>) 所生产的干物质(稻谷/kg) 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):

$$WUE = \text{单位面积产量} / \text{单位面积灌溉量}。$$

#### 1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 和 Statistics 软件进行数据整理和统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量及其构成因素

由表 1 可知,就象牙香占而言,与 CK 相比,W1、

W2 处理下产量分别提高了 8.23% 和 11.24%, 差异未达到显著性,而 W3 处理显著降低了 24.32%, W4 处理降低了 17.57%, 未达到显著性差异。产量提高的主要原因是在处理 W2 条件下,提高了象牙香占的每盆穗数、穗粒数及千粒质量,W1 处理下提高了结实率和千粒质量;而在处理 W3 下,由于水分胁迫严重不仅导致其每盆穗数降低,其穗粒数和结实率均显著下降,W4 处理下由于齐穗后期重度落干处理,水稻受到水分胁迫,水分供应不足,阻碍籽粒灌浆结实,产生了很多空瘪粒,这是其减产的主要因素。就美香占 2 号而言,与 CK 相比,W1、W2 处理下产量分别提高了 0.05% 和 6.99%, 没有达到显著差异,而 W3、W4 处理下产量分别显著降低了 27.07% 和 17.61%。原因是 W1 处理下其每盆穗数、结实率得到提高,W2 处理下有效穗数、穗粒数、千粒质量提高,从而提高了产量;而在 W3 处理下水稻自返青开始便受到了水分胁迫,从而导致其有效穗数和结实率均显著降低,处理 W4 作用下尽管穗粒数较高,但其不仅有效穗数降低且结实率显著降低,导致 W3、W4 处理下产量显著降低。

表 1 不同灌溉方式对香稻产量及其构成因素的影响

Tab. 1 Effects of different irrigation methods on yield and composition factors of fragrant rice

品种 Cultivar	处理 Treatment	有效穗数/(穗/盆) Productive panicles	穗粒数 Grains per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒质量/g 1000-grain weight	产量/(g/盆) Harvested yield
象牙香占	CK	34.19 ± 2.15ab	87.56 ± 0.46b	68.42 ± 0.75a	17.78 ± 0.38b	31.93 ± 1.18ab
Xiangyaxiangzhan	W1	33.67 ± 0.17ab	84.90 ± 5.54bc	70.39 ± 0.40a	18.50 ± 0.17ab	34.56 ± 0.49a
	W2	35.00 ± 2.89a	115.52 ± 1.85a	64.17 ± 1.04b	18.18 ± 0.22ab	35.52 ± 2.88a
	W3	26.83 ± 1.74b	76.33 ± 1.74c	55.71 ± 0.33c	19.31 ± 0.12a	24.16 ± 1.06c
	W4	33.33 ± 3.33ab	88.34 ± 4.55b	57.95 ± 1.11c	19.04 ± 0.78ab	26.32 ± 0.98bc
美香占 2 号	CK	35.52 ± 3.03a	77.13 ± 3.56bc	69.44 ± 5.6ab	17.63 ± 0.07b	32.86 ± 0.98a
Meixiangzhan 2	W1	37.87 ± 1.57a	73.79 ± 2.09c	75.63 ± 1.23a	17.07 ± 0.03b	32.88 ± 0.83a
	W2	36.33 ± 0.88a	91.38 ± 4.18a	62.53 ± 2.55bc	19.04 ± 0.78a	35.16 ± 0.81a
	W3	27.02 ± 0.99b	87.05 ± 3.51ab	55.43 ± 0.11c	17.88 ± 0.21ab	23.97 ± 1.37c
	W4	35.00 ± 2.89a	89.89 ± 3.34a	55.68 ± 2.75c	18.18 ± 0.22ab	27.08 ± 0.36b

注:同一列小写字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ , LSD 检验)。表 2 同。

Note: The same column with different lowercase letters means significant difference ( $P < 0.05$ ). The same as Tab. 2.

### 2.2 稻米品质

由表 2 可知,不同的灌溉模式下对不同香稻品质影响各不相同。就象牙香占而言,与对照相比,各处理条件下的糙米率无显著差异,除 W4 处理显著降低了其整精米率外,其余各处理的整精米率均显著提高。就蛋白质含量而言,除 W1 处理显著提高其蛋白质含量外,其余各处理均显著降低。除 W1 处理显著降低其直链淀粉外,其余各处理均无显著差异;就垩白粒率、垩白度而言,W3 处理能够显著

提高其垩白粒率、垩白度;W1、W2、W4 处理其垩白粒率显著降低,W1 处理其垩白度无显著性差异,W2、W4 处理垩白度显著性降低。

就美香占 2 号而言,与对照相比,除处理 W4 糙米率显著降低外,W1、W2 处理糙米率显著提高,W3 处理糙米率无显著差异。W3、W4 处理能够显著降低整精米率,其余各处理均显著提高。W2 处理下显著提高其蛋白质含量。其余各处理均显著降低其蛋白质含量。除 W2 处理显著降低了其直链淀粉

外,其余各处理均无显著差异。除 W1 处理显著提高了垩白粒率、垩白度外,其余各处理均显著降低或无显著差异。就长宽比而言,除 W2、W4 处理下显

著提高了其长宽比外,W1 处理下其籽粒长宽比显著降低,W3 处理下无显著差异。

表 2 不同灌溉方式对香稻品质的影响

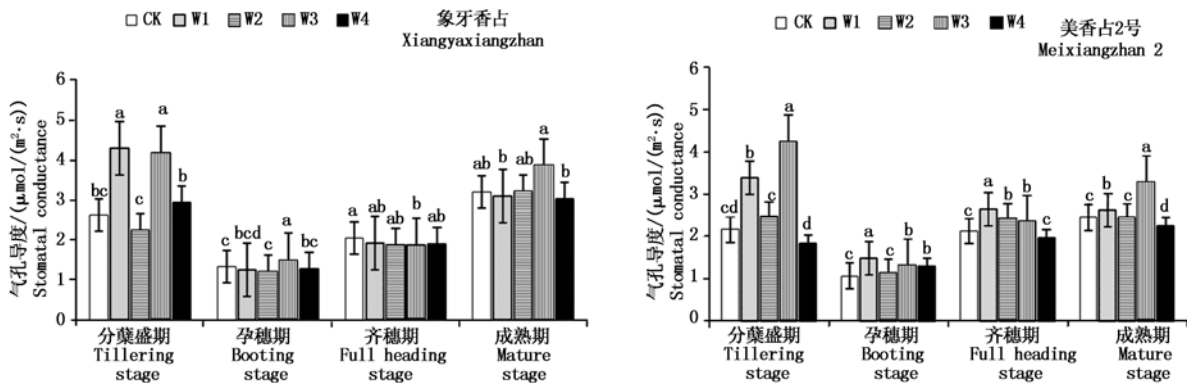
Tab.2 Effects of different irrigation methods on composition factors of fragrant rice quality

品种 Cultivar	处理 Treatment	糙米率/% Brown rice	整精米率/% Head milled rice	蛋白质/% Protein mass fraction	直链淀粉/% Amylose mass fraction	垩白粒率/% Percentage of chalky rice	垩白度/% Chalkiness degree	长宽比 Length width ratio
象牙香占 Xiangyaxiangzhan	CK	77.20 ± 0.26a	47.58 ± 0.38b	7.57 ± 0.03b	18.50 ± 0.06a	4.00 ± 0.58b	0.53 ± 0.07b	3.41 ± 0.05b
	W1	75.35 ± 2.47a	52.28 ± 1.90a	8.07 ± 0.03a	17.70 ± 0.12b	2.33 ± 0.33c	0.39 ± 0.03bc	3.63 ± 0.00a
	W2	75.35 ± 2.47a	52.28 ± 1.90a	6.83 ± 0.07e	18.73 ± 0.22a	1.67 ± 0.33cd	0.28 ± 0.09cd	3.62 ± 0.02a
	W3	78.36 ± 0.17a	52.15 ± 0.73a	7.00 ± 0.06d	18.77 ± 0.09a	9.67 ± 0.33a	1.96 ± 0.07a	3.44 ± 0.02b
	W4	78.23 ± 0.19a	43.55 ± 0.27c	7.30 ± 0.00c	18.83 ± 0.03a	1.00 ± 0.58d	0.14 ± 0.09d	3.68 ± 0.03a
美香占 2 号 Meixiangzhan 2	CK	79.76 ± 0.13c	58.90 ± 0.10c	7.33 ± 0.03b	18.50 ± 0.10a	3.67 ± 0.33b	0.45 ± 0.03b	3.31 ± 0.02b
	W1	80.79 ± 0.15b	59.72 ± 0.19b	6.97 ± 0.03d	18.10 ± 0.15a	7.00 ± 0.00a	1.35 ± 0.16a	3.26 ± 0.01c
	W2	82.15 ± 0.01a	62.35 ± 0.06a	7.47 ± 0.03a	17.57 ± 0.17b	0.33 ± 0.33c	0.02 ± 0.02c	3.39 ± 0.01a
	W3	79.50 ± 0.07c	54.52 ± 0.07e	6.97 ± 0.03d	18.37 ± 0.12a	3.33 ± 0.33b	0.58 ± 0.02b	3.34 ± 0.01b
	W4	78.78 ± 0.05d	58.29 ± 0.16d	7.20 ± 0.06c	18.43 ± 0.09a	1.00 ± 0.58c	0.12 ± 0.06c	3.43 ± 0.01a

2.3 不同灌溉方式对香稻光合特性的影响

2.3.1 气孔导度 由图 1 可知,就象牙香占而言,与 CK 相比,W1 处理除分蘖盛期显著性提高其气孔导度外,其余各时期均无显著差异;W2 处理各时期气孔导度均无显著性差异;W3 处理分蘖盛期、孕穗期气孔导度显著提高,齐穗期显著降低,成熟期无显著差异;W4 处理各时期气孔导度均无显著差异。

就美香占 2 号而言,与 CK 相比,W1 处理下各时期气孔导度均显著提高;W2 处理下除齐穗期显著提高外,其余各时期气孔导度均无显著差异;W3 处理下各时期气孔导度均显著提高;W4 处理孕穗期显著提高了气孔导度,成熟期气孔导度显著降低,分蘖盛期、齐穗期其气孔导度无显著差异。



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ , LSD 检验)。图 2-4 同。  
Different lowercase means significant difference ( $P < 0.05$ , LSD test). The same as Fig. 2-4.

图 1 不同灌溉方式对香稻叶片气孔导度的影响

Fig.1 Effects of different irrigation methods on stomatal conductance of fragrant rice leaves

2.3.2 净光合速率 由图 2 可知,就象牙香占而言,与 CK 相比,W1 处理分蘖盛期净光合速率无显著差异,孕穗期、齐穗期和成熟期净光合速率均显著提高;W2 处理齐穗期净光合速率显著降低,分蘖盛期、孕穗期、成熟期净光合速率均无显著差异;W3、W4 处理除分蘖盛期净光合速率无显著差异外,其余各时期净光合速率均显著提高。就美香占 2 号而言,与 CK 相比,W1 处理除分蘖盛期净光合速率显

著降低外,其余各时期净光合速率均显著提高;W2 处理分蘖盛期、孕穗期净光合速率无显著差异,齐穗期、成熟期净光合速率均显著提高;W3 处理分蘖盛期、成熟期净光合速率均显著降低,齐穗期显著提高,孕穗期无显著差异;W4 处理分蘖盛期、孕穗期净光合速率无显著差异,齐穗期、成熟期净光合速率均显著提高。

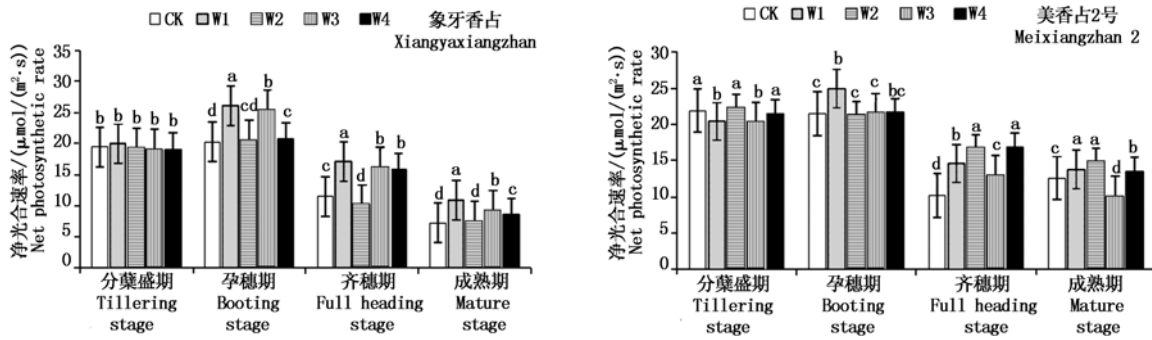


图2 不同灌溉方式对香稻叶片净光合速率的影响

Fig. 2 Effects of different irrigation methods on net photosynthetic rate of fragrant rice

2.3.3 蒸腾速率 由图3可知,对象牙香占而言,与CK相比,W1处理除成熟期显著提高蒸腾速率外,其余各时期蒸腾速率无显著差异;W2处理各时期蒸腾速率均无显著差异;W3处理除齐穗期和成熟期无显著差异外,其余各时期均显著提高了蒸腾速率;W4处理除齐穗期蒸腾速率无显著差异外,其余各时期蒸腾速率均显著降低。就美香占2号而

言,与CK相比,W1处理各时期蒸腾速率均显著提高,W2处理除分蘖盛期、齐穗期蒸腾速率显著降低外,其余各时期其蒸腾速率均无显著差异;W3处理孕穗期、齐穗期蒸腾速率显著提高,分蘖盛期、成熟期均无显著差异;W4处理齐穗期、成熟期蒸腾速率显著提高,孕穗期显著降低,分蘖盛期蒸腾速率无显著差异。

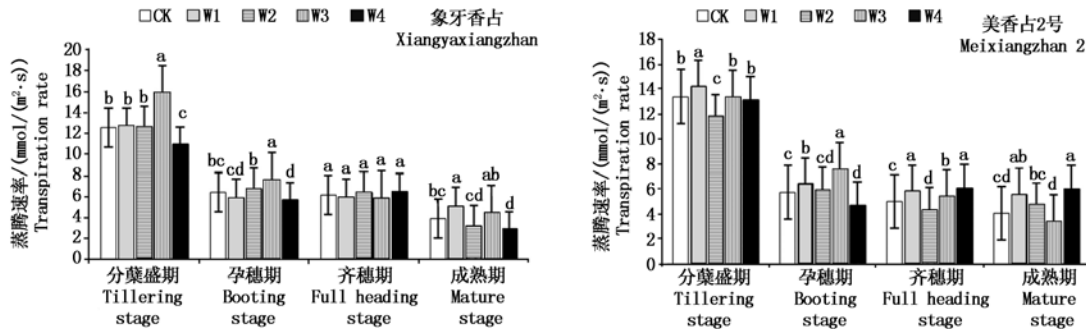


图3 不同灌溉方式对香稻叶片蒸腾速率的影响

Fig. 3 Effects of different irrigation methods on the transpiration rate of fragrant rice leaves

#### 2.4 不同灌溉方式对香稻水分利用率的影响

由图4可知,两香稻品种在各处理下其灌水量均显著低于常规灌溉处理。在轻度灌溉和干湿交替灌溉处理的条件下均能够有效提高两香稻品种的水分利用率,其次过度的水分胁迫不仅不能提高香稻的产量反而降低香稻的水分利用率。就象牙香占而言,与CK相比,在W1、W2处理下其水分利用率分

别提高了24.35%和19.94%,而在W4处理下其水分利用率降低了3.22%。就美香占2号而言,与CK相比,W1、W2、W4处理下水分利用率分别提高了20.47%、28.01%、5.65%。象牙香占在齐穗后期重度落干处理下水分利用率降低的原因可能是由于土壤过度干燥导致开裂,水稻受到的干旱胁迫过渡导致产量降低。

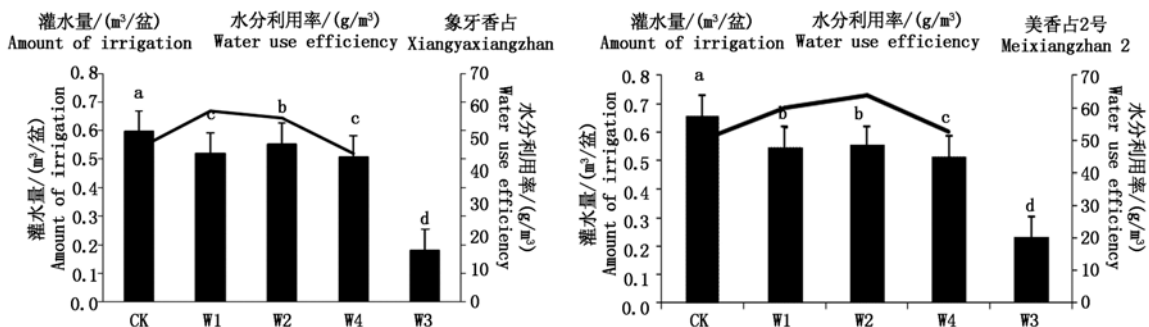


图4 不同灌溉方式对香稻水分利用率的影响

Fig. 4 Effects of different irrigation methods on water use efficiency of fragrant rice

### 3 讨论与结论

随着水资源供需矛盾日益激烈,近年来关于节水水稻作、旱作水稻及土壤水分胁迫对水稻生长、发育及产量影响的研究较多<sup>[21]</sup>,但研究结果不一,有研究认为节水灌溉比保持水层灌溉可提高产量<sup>[22-25]</sup>,也有研究认为节水灌溉将降低产量<sup>[26-28]</sup>。本研究结果表明,与传统漫灌的水稻栽培方式(CK)相比,全生育期干湿交替灌溉(W1)和齐穗后期轻度落干灌溉(W2)处理均能够提高2个香稻品种的产量,自然补水灌溉(W3)、齐穗后期重度落干灌溉(W4)处理下香稻品种象牙香占产量降低但没有达到显著差异,美香占2号的产量显著降低,这与裴岗、傅志强等<sup>[29-30]</sup>研究结果较一致。从产量构成因素上来看,可以发现W1、W2产量的提高与产量构成因素的提高密切相关,而W3和W4产量的显著降低是由于在高强度的水分胁迫下产量的构成因素有效穗数、穗粒数降低或无显著差异加上结实率显著降低而导致的减产。这可能是由于轻度的节水灌溉和干湿交替灌溉,有利于根系的生长并提高了根系活力,使水稻吸收更多的水分和养分,提高了水稻的净光合速率、蒸腾速率,利于“源”的积累和“库”的形成,从而有利于同化物向库的运输,促进籽粒灌浆结实<sup>[21]</sup>,从而获得增产,而自然补水灌溉和齐穗后期重度落干灌溉处理下水稻受水分胁迫严重处于水分亏缺状态,使“源”不足,阻碍籽粒灌浆结实,导致有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量低,是造成产量低的主要原因<sup>[30]</sup>。

其次不同灌溉方式对不同香稻品种的稻米品质影响也不一样,就象牙香占而言,干湿交替灌溉和齐穗后期轻度落干灌溉处理下香稻整精米率显著提高,垩白粒率、垩白度显著降低,长宽比显著提高,显著提高了稻米品质;自然补水灌溉下整精米率显著提高,蛋白质含量显著降低,垩白粒率、垩白度显著提高,显著降低了稻米外观品质;齐穗后期重度落干灌溉处理下香米整精米率、蛋白质含量显著降低,碾磨品质显著降低,外观品质显著提高。就美香占2号而言,干湿交替灌溉处理下显著提高了糙米率、整精米率,碾磨品质显著提高,垩白粒率、垩白度显著提高,显著降低了稻米的外观品质;齐穗后期轻度落干灌溉处理下糙米率、整精米率、蛋白质含量显著提高,垩白粒率、垩白度显著降低,长宽比显著提高,显著提高了稻米品质。自然补水灌溉处理下,整精米率、蛋白质含量显著降低,外观品质无显著性差异,稻米品质显著降低;齐穗后期重度落干灌溉处理下香

米糙米率、整精米率、蛋白质含量显著降低,显著降低了稻米的碾磨品质,但外观品质显著提高。本研究结果表明,干湿交替灌溉能够改善稻米品质,齐穗后期轻度落干能够显著提高稻米品质,这可能是干湿交替灌溉和齐穗后期轻度落干灌溉处理下显著增强了籽粒中的蔗糖合成酶等酶的活性,提高了淀粉积累速率和数量<sup>[31]</sup>,这与刘立军等<sup>[32]</sup>、柯传勇<sup>[33]</sup>结果一致。自然灌溉条件下稻米品质显著降低,齐穗后期重度落干灌溉处理虽然外观品质显著提高,但其碾磨品质和蛋白质含量显著降低,对稻米品质产生了一定影响。这与杨建昌等<sup>[31]</sup>、王秋菊等<sup>[34]</sup>、徐国伟等<sup>[35]</sup>的研究结果较一致。此外本研究结果表明,各处理除了齐穗后期重度落干灌溉处理下降低了象牙香占的水分利用率外,其余各处理均能够提高香稻的水分利用率,这与杨生龙等<sup>[36]</sup>研究结果不太一致,造成研究结果不一致的原因可能与试验地所处的生态环境、栽培方式、品种类型及水分处理的时间及干旱程度的不同等内外在因素有关。

在农艺技术条件和气候因素相同的条件下,与常规灌溉相比,干湿交替灌溉、齐穗后期轻度落干灌溉、自然补水灌溉以及齐穗后期重度落干灌溉方式下,象牙香占产量分别增产8.23%,11.24%,减产24.32%,17.57%;美香占2号产量增产0.05%,6.99%,减产27.07%,17.61%。

与常规灌溉相比,干湿交替灌溉、齐穗后期轻度落干灌溉、齐穗后期重度落干灌溉方式下象牙香占水分利用率分别提高24.35%,19.94%,降低3.22%;美香占2号水分利用率分别提高了20.47%,28.01%,5.65%。

不同灌溉方式对稻米品质影响不同,与常规灌溉相比,齐穗后期轻度落干能够显著提高稻米品质,干湿交替灌溉能够有效改善稻米品质,自然补水灌溉处理显著降低了稻米品质,齐穗后期重度落干虽然能够显著提高稻米的外观品质,但其碾磨品质显著降低,影响了稻米品质。

#### 参考文献:

- [1] 彭如梦,朱安,张思洁,陈茜,蒋玉兰,刘立军. 节水灌溉方式对水稻产量和稻田土壤性状的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 31-35. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.008.  
Peng R M, Zhu A, Zhang S J, Chen Q, Jiang Y L, Liu L J. Review of effects of water-saving irrigation on rice yield and soil characteristics in paddy fields[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(23): 31-35.
- [2] 张宏路,朱安,胡昕,姚磊,方焯琦,夏仕明,刘立军. 稻田常用节水灌溉方式对水稻产量和米质影响的研究进展[J]. 中国稻米, 2018, 24(6): 8-12. doi:10.3969/j.issn.1006-8082.2018.06.002.

- Zhang H L, Zhu A, Hu X, Yao L, Fang Y Q, Xia S M, Liu L J. Research progress on effects of common water saving irrigation methods in paddy field on rice yield and quality [J]. *Chinese Rice*, 2018, 24(6): 8 - 12.
- [3] 项小敏, 赵东风, 章心惠, 刘慧琴, 郭勤卫, 张婷. TSZ-1 型土壤水分速测仪在设施辣椒节水灌溉上的应用初探[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(1): 80 - 83. doi: 10.16178/j. issn. 0528-9017. 20190127.
- Xiang X M, Zhao D F, Zhang X H, Liu H Q, Guo Q W, Zhang T. Application of TSZ-1 soil moisture velocity meter in water-saving irrigation of facility pepper [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(1): 80 - 83.
- [4] 张洪燕, 刘军刚. 节水灌溉衬砌渠道工程对区域地下水水位的影响研究[J]. *水利技术监督*, 2019(2): 177 - 180. doi: 10.3969/j. issn. 1008-1305. 2019. 02. 054.
- Zhang H Y, Liu J G. Study on the influence of water conservation irrigation lining channel project on regional groundwater level [J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2019(2): 177 - 180.
- [5] 赵雪涵, 王麒, 曾宪楠, 宋秋来, 孙健. 秸秆还田下灌溉方式对水稻生长发育的影响研究现状及展望[J]. *黑龙江农业科学*, 2019(11): 137 - 141. doi: 10.11942/j. issn1002-2767. 2019. 11. 0137.
- Zhao X H, Wang Q, Zeng X N, Song Q L, Sun J. Current situation and prospect of the research on the effects of irrigation modes on the growth and development of rice under straw return [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2019(11): 137 - 141.
- [6] 罗贤伟, 万仁海, 付淑明, 喻春林. 水稻节水栽培技术的增温增产效应[J]. *农业工程技术*, 2016, 36(11): 73. doi: 10.16815/j. cnki. 11-5436/s. 2016. 11. 057.
- Luo X W, Wan R H, Fu S M, Yu C L. Effect of water saving rice cultivation on increasing temperature and increasing yield [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2016, 36(11): 73.
- [7] 孙斌. 不同灌溉方式耦合氮肥运筹下寒地粳稻产量形成机理的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- Sun B. Study on yield formation mechanism of japonica rice in cold region under different irrigation methods of coupled nitrogen fertilization [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [8] 肖新, 朱伟, 肖靓, 刘成, 邓艳萍, 汪建飞. 不同水肥管理对水稻分蘖期根系特征和氮磷钾养分累积的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4): 903 - 908. doi: 10.19336/j. cnki. trtb. 2016. 04. 20.
- Xiao X, Zhu W, Xiao J, Liu C, Deng Y P, Wang J F. Effects of water and fertilizer management on root characteristics and nitrogen, phosphorous and potassium uptakes of rice at tillering stage [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(4): 903 - 908.
- [9] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 王志琴, 杨建昌. 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. doi: 10.3724/SP. J. 1006. 2016. 01026.
- Chu G, Zhan M F, Zhu K Y, Wang Z Q, Yang J C. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(7): 1026 - 1036.
- [10] 张鹏, 范家慧, 程宁宁, 林电. 水肥一体化减量施肥对芒果产量、品质及肥耗的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(2): 114 - 118. doi: 10.11838/sfsc. 1673-6257. 18328.
- Zhang P, Fan J H, Cheng N N, Lin D. Effect of water and fertilizer integration with reduction of fertilizer on yield and quality of mango [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019(2): 114 - 118.
- [11] 郑雪松, 李树森, 王晓旭, 孙晓, 周伟, 王自强. 基于物联网的雪桃智能水肥一体化应用技术[J]. *现代农业科技*, 2020(5): 157 - 160, 163.
- Zheng X S, Li S S, Wang X X, Sun X, Zhou W, Wang Z Q. Integrated application technology of intelligent water and fertilizer of snow peach based on internet of things [J]. *Xiandai Nongye Keji*, 2020(5): 157 - 160, 163.
- [12] 王丹. 不同密度下肥水优化对寒地水稻抗倒伏性能的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- Wang D. Effects of fertilizer and water optimization at different densities on lodging resistance of rice in cold regions [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011.
- [13] Bouman B A M, Humphreys E, Tuong T P, Barker R. Rice and water [J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 92: 187 - 237. doi: 10.1016/S0065-2113(04)92004-4.
- [14] Lau W C P, Rafii M Y, Ismail M R, Puteh A, Latif M A, Ramli A. Review of functional markers for improving cooking, eating, and the nutritional qualities of rice [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 832. doi: 10.3389/fpls. 2015. 00832.
- [15] Mo Z W, Li W, Pan S G, Fitzgerald T L, Xiao F, Tang Y J, Wang Y L, Duan M Y, Tian H, Tang X R. Shading during the grain filling period increases 2-acetyl-1-pyrroline content in fragrant rice [J]. *Rice*, 2015, 8(1): 9. doi: 10.1186/s12284-015-0040-y.
- [16] 李梦兴, 唐湘如, 莫钊文, 王汝超, 熊礼. 晒肥对香稻香气和糙米硒含量以及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(6): 213 - 219. doi: 10.7668/hbnxb. 2016. 06. 033.
- Li M X, Tang X R, Mo Z W, Wang R C, Xiong L. Effect of selenium fertilizer on aroma, selenium content in brown rice and grain yield of aromatic rice [J]. *Acta Agronomica Boreali-Sinica*, 2016, 31(6): 213 - 219.
- [17] Shan Q W, Zhang Y, Chen K L, Zhang K, Gao C X. Creation of fragrant rice by targeted knockout of the *OsBADH2* gene using TALEN technology [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2015, 13(6): 791 - 800. doi: 10.1111/pbi. 12312.
- [18] 彭波, 孔冬艳, 王蓝迪, 彭宇, 韩富星, 辛晴晴, 宫安东, 孙艳芳, 庞瑞华, 宋晓华, 李金涛, 周棋赢, 宋世枝. 河南香稻品种主要代谢物质的检测与分析[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2019, 32(2): 207 - 213. doi: 10.3969/j. issn. 1003-0972. 2019. 02. 007.
- Peng B, Kong D Y, Wang L D, Peng Y, Han F X, Xin Q Q, Gong A D, Sun Y F, Pang R H, Song X H, Li J T, Zhou Q Y, Song S Z. Detection and analysis of the main metabolites in aromatic rice varieties from Henan [J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 32(2): 207 - 213.
- [19] 田华, 潘圣刚, 莫钊文, 段美洋, 唐湘如. 不同水分和粒肥处理对香稻香气、品质和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(6): 36 - 41. doi: 10.13522/j. cnki. ggps. 2017. 0608.
- Tian H, Pan S G, Mo Z W, Duan M Y, Tang X R. Effects of soil moisture and fertilization on fragrance, quality and yield of fragrant rice [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(6): 36 - 41.
- [20] 邱才飞, 邵彩虹, 关贤交, 钱银飞, 陈金, 张天玉, 彭春瑞. 节水灌溉对双季晚稻农田生态及水肥利用的影

- 响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(4): 509 - 517. doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2018.04.007.
- Qiu C F, Shao C H, Guan X J, Qian Y F, Chen J, Zhang T Y, Peng C R. Effects of water-saving irrigation on farmland ecology and water and fertilizer utilization of double cropping late rice [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(4): 509 - 517.
- [21] 吕银斐,任艳芳,刘冬,张艳超,何俊瑜. 不同水分管理方式对水稻生长、产量及品质的影响[J]. 天津农业科学, 2016, 22(1): 106 - 110. doi:10.3969/j.issn.1006-6500.2016.01.023.
- Lü Y F, Ren Y F, Liu D, Zhang Y C, He J Y. Effect of different water managements on growth, grain yield and quality of rice [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2016, 22(1): 106 - 110.
- [22] Zhang H, Zhang S F, Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q. Postanthesis moderate wetting drying improves both quality and quantity of rice yield [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 726 - 734. doi: 10.2134/agronj2007.0169.
- [23] 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. doi:10.1111/j.1672-9072.2007.00555.x.
- [24] Zhang Q F. Strategies for developing green super rice [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(42): 16402 - 16409. doi: 10.1073/pnas.0708013104.
- [25] 聂晓,王毅勇,刘兴土. 节水灌溉对三江平原寒地水稻生理生态需水和产量的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(6): 168 - 173. doi:10.7668/hbxb.2011.06.033.
- Nie X, Wang Y Y, Liu X T. Effects of water-saving irrigation on ecological and physiological water requirement and yield of cold rice at Sanjiang Plain [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(6): 168 - 173.
- [26] 张耗,剧成欣,陈婷婷,曹转勤,王志琴,杨建昌. 节水灌溉对节水抗旱水稻品种产量的影响及生理基础[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4782 - 4793. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2012.23.004.
- Zhang H, Ju C X, Chen T T, Cao Z Q, Wang Z Q, Yang J C. Effect of water-saving irrigation on the grain yield of water-saving and drought-resistance rice and its physiological bases [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4782 - 4793.
- [27] Belder P, Bouman B A M, Cabangon R, Lu G A, Qui-lang E J P, Li Y H, Spiertz J H J, Tuong T P. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia [J]. *Agriculture Water Management*, 2004, 65(3): 193 - 210. doi:10.1016/j.agwat.2003.09.002.
- [28] 张玉屏,朱德峰,林贤青,陈惠哲. 不同时期水分胁迫对水稻生长特性和产量形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 48 - 53. doi:10.3321/j.issn:1000-7601.2005.02.010.
- Zhang Y P, Zhu D F, Lin X Q, Chen H Z. Effects of water stress on rice growth and yield at different growth stages [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 48 - 53.
- [29] 裴岗,张玉屏,朱德峰,林贤青,陈惠哲. 不同水分处理对晚稻生长及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2007, 20(4): 573 - 576. doi:10.3969/j.issn.1001-4829.2007.04.002.
- Pei G, Zhang Y P, Zhu D F, Lin X Q, Chen H Z. Effects of different water treatment on late season rice growth and yield [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 20(4): 573 - 576.
- [30] 傅志强,黄璜,朱华武,陈灿. 不同灌溉方式对水稻生长及产量的影响[J]. 作物研究, 2011, 25(4): 299 - 303. doi:10.3969/j.issn.1001-5280.2011.04.01.
- Fu Z Q, Huang H, Zhu H W, Chen C. Effects of different irrigation methods on paddy rice growth and yields [J]. *Crop Research*, 2011, 25(4): 299 - 303.
- [31] 杨建昌,袁莉民,唐成,王志琴,刘立军,朱庆森. 结实期干湿交替灌溉对稻米品质及籽粒中一些酶活性的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(8): 1052 - 1057. doi: 10.3321/j.issn:0496-3490.2005.08.015.
- Yang J C, Yuan L M, Tang C, Wang Z C, Liu L J, Zhu Q S. Effect of dry-wet alternate irrigation on rice quality and activities of some enzymes in grains during the filling [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(8): 1052 - 1057.
- [32] 刘立军,李鸿伟,赵步洪,王志琴,杨建昌. 结实期干湿交替处理对稻米品质的影响及其生理机制[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(1): 77 - 84. doi:10.3969/j.issn.1001-7216.2012.01.013.
- Liu L J, Li H W, Zhao B H, Wang Z Q, Yang J C. Effects of alternate drying-wetting irrigation during grain filling on grain quality and its physiological mechanisms in rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(1): 77 - 84.
- [33] 柯传勇. 不同水分处理对水稻生长、产量及品质的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2010. doi:10.7666/d.y1805173
- Ke C Y. Effects of different water treatments on rice growth, yield and quality [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [34] 王秋菊,张玉龙,李明贤,赵宏亮,迟力勇,王立志. 控水灌溉对水稻生长发育的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(5): 14 - 18. doi:10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2010.05.004.
- Wang Q J, Zhang Y L, Li M X, Zhao H L, Chi L Y, Wang L Z. Effect of control irrigation on rice growth and development [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(5): 14 - 18.
- [35] 徐国伟,王朋,唐成,王志琴,刘立军,杨建昌. 旱种方式对水稻产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(1): 112 - 117. doi:10.3321/j.issn:0496-3490.2006.01.019.
- Xu G W, Wang P, Tang C, Wang Z Q, Liu L J, Yang J C. Effect of dry-cultivation patterns on the yield and quality of rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(1): 112 - 117.
- [36] 杨生龙,王兴盛,强爱玲,杨生明. 不同灌溉方式对水稻产量及产量构成因子的影响[J]. 中国稻米, 2010, 16(1): 49 - 51. doi:10.3969/j.issn.1006-8082.2010.01.014.
- Yang S L, Wang X S, Qiang A L, Yang S M. Effects of different irrigation methods on rice yield and yield components [J]. *China Rice*, 2010, 16(1): 49 - 51.