

江淮地区不同灌溉与种植方式对水稻产量及水分利用效率的影响

吴 汉¹, 吴 含¹, 钱 娜¹, 柯 健^{2*}, 郭 爽³

(1.安徽省淠史杭灌区灌溉试验总站, 安徽 六安 237158; 2.安徽农业大学 农学院, 合肥 230036; 3.中联智慧农业股份有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘 要:【目的】研究不同灌溉与种植方式对水稻产量及水分利用效率的影响, 提出适宜江淮地区的水稻灌溉和种植方式。【方法】于 2018—2019 年开展了为期 2 a 的田间试验, 试验设置 4 个处理: 传统淹灌+移栽 (FI+PTR)、传统淹灌+直播 (FI+DSR)、间歇灌溉+移栽 (II+PTR)、间歇灌溉+直播 (II+DSR), 研究不同灌溉与种植方式对水稻产量及其构成因素、需水量、水分利用效率的影响。【结果】与传统淹灌相比, 间歇灌溉下水稻产量无显著变化, 但需水量减少了 8.16%~9.84%, 水分生产率提高了 10.68%~14.73%。直播水稻相比移栽水稻的产量下降了 5.33%~10.46%, 需水量增加了 7.32%~8.00%, 水分生产率下降了 12.36%~23.14%。与移栽水稻相比, 直播水稻的有效穗数有所增加, 而穗粒数、千粒质量、结实率均有所下降。间歇灌溉下, 直播水稻 (II+DSR) 较移栽水稻的产量下降了 5.99%~12.59%, 需水量增加了 7.21%~7.63%, 水分生产率下降了 12.55%~24.79%。直播水稻需水量的增加主要是由于苗期需水量的增加所致, 而分蘖期需水量与移栽水稻并无显著差异, 且拔节后的需水量显著下降。【结论】间歇灌溉+移栽水稻 (II+PTR) 在稳定水稻产量的同时, 可减少其需水量、提高水分生产率, 是一种适宜江淮地区稻田高产稳产且水分高效利用的水稻生产模式。而对于直播水稻, 应进一步采取适宜的生产技术以减少其苗期耗水以提高其水分利用效率。

关 键 词: 间歇灌溉; 直播; 移栽; 需水量

中图分类号: S274; S511

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022014

OSID:



吴汉, 吴含, 钱娜, 等. 江淮地区不同灌溉与种植方式对水稻产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 39-46, 71.

WU Han, WU Han, QIAN Na, et al. The Effects of Different Combinations of Irrigation and Planting Method on Yield and Water Use Efficiency of Rice in Jianghuai Region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 39-46, 71.

0 引 言

【研究意义】随着近年来经济的快速发展, 江淮地区农业生产经营主体发生了巨大改变, 使得该地区的农业种植方式也在不断变革, 以直播稻、机插秧为代表的轻简化水稻生产技术得到了快速发展^[1-2]。然而, 江淮地区的丘陵高岗地貌限制了机插秧的大面积推广应用, 而直播稻在该地区的种植面积则呈逐年扩大的趋势^[3]。【研究进展】尽管直播稻的种植存在一定风险^[4], 如出苗不齐、易倒伏等使直播稻产量较移栽水稻有所下降^[5-7]。然而, 随着适宜直播品种的选

育与农艺、农机技术的提高, 近些年来直播稻的产量已经近似与移栽水稻的产量相当^[8], 甚至有报道称直播稻产量可超过移栽稻^[9-10]。然而, 随着人口增长和气候变化, 可用于灌溉的水资源愈加匮乏, 严重威胁到了水稻的可持续生产。Cabangon 等^[11]认为直播稻大田生长期的延长增加了水稻的需水量。孙雪梅等^[12]的研究结果也表明, 直播稻增加了生育前期的生态需水量从而增加了直播水稻整个生育期的需水量。亦有研究结果认为, 与移栽水稻相比, 直播水稻减少了育秧期的水分消耗, 需水量反而下降^[13]。此外, 郑天翔等^[14]研究结果显示, 与移栽水稻淹灌相比, 水稻旱直播减少了 30% 的灌水量。免耕直播水稻较移栽水稻减少了泡田水, 生长期内渗漏量减少^[15]。Liu 等^[8]试验结果表明, 在常规淹灌下, 直播稻与移栽水稻的产量和水分投入均无显著差异。然而, 随着节水灌溉技术的推广, 移栽水稻的需水量显著下降^[1, 16-17], 总的来说, 江淮地区水稻间歇灌溉技术应用较多, 由于免耕

收稿日期: 2022-01-07

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (2008085QC119); 安徽省高等学校自然科学研究项目 (KJ2019A0176); 安徽省水利科技计划项目 (slkj2021-03); 芜湖市科技攻关项目 (2020dx09)

作者简介: 吴汉 (1992-), 男, 工程师, 主要从事水稻节水灌溉技术研究。

E-mail: wh18255372060@163.com

通信作者: 柯健 (1989-), 男, 讲师, 主要从事水稻生理生态。

E-mail: 409584445@qq.com

直播与旱直播水稻产量不佳,前茬作物收割留茬较高、秸秆还田等原因,江淮地区的直播水稻仍主要使用传统的泡田耕作模式。【切入点】前人关于直播稻与移栽稻的差异研究方面并未在同一节水灌溉条件下进行。Wang 等^[18]曾指出,关于节水灌溉条件下的直播水稻与移栽水稻产量及需水量差异方面的研究甚少。此外,前人在比较移栽水稻与直播水稻需水差异时,往往只关注了大田生长期内的差异,却忽略了移栽水稻育秧期间的水分消耗情况。【拟解决的关键问题】为此,本研究同时考虑了不同的灌溉和水稻种植方式,研究不同处理对水稻产量和水分利用效率影响,为江淮地区水稻高产稳产且保障水资源高效利用提供理

论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2018—2019 年在安徽省淠史杭灌区的灌溉试验总站内(117.55 E, 31.80 N)进行,土壤有机质百分量为 1.89%,pH 值为 5,全氮百分量为 0.082%,全磷百分量为 0.106%,全钾百分量为 1.39%。试验期间气象条件如图 1 所示,由试验站内安装的小型自动气象站(Watch Dog2900ET, SPECTRUM, US)监测获得。供试水稻品种为隆两优 1307,为两系杂交水稻。

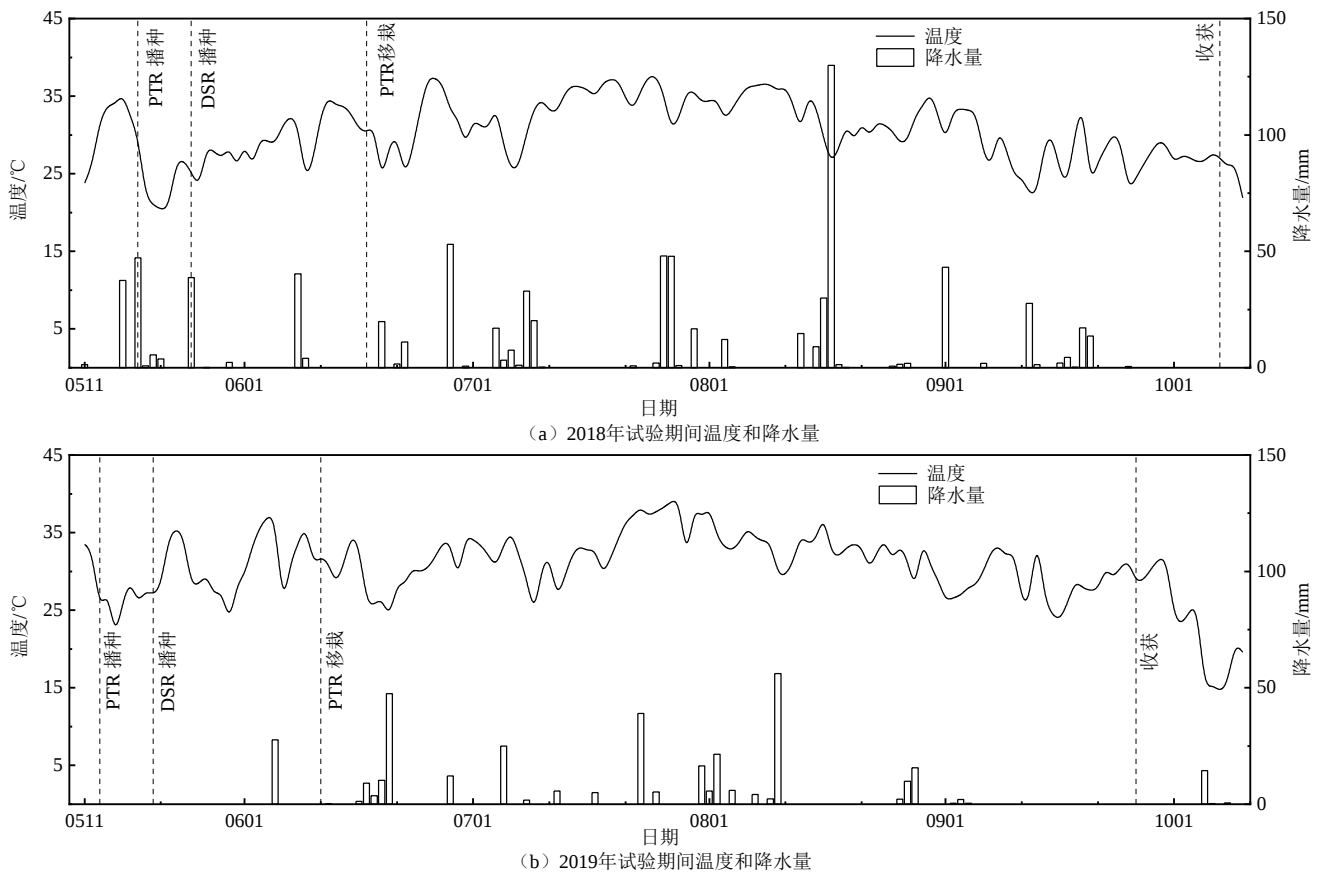


图 1 试验期间气象状况

Fig.1 Meteorological data during the test

1.2 试验设计

试验采用双因素裂区设计,以灌溉方式为主区,种植方式为副区。主处理设 2 种灌溉方式:传统淹灌(FI)、间歇灌溉(II)。副处理设 2 个种植方式:移栽(PTR)、直播(DSR)。共计 4 个处理,每个处理重复 3 次。共计 12 个小区,每个小区规格为 2.5 m×1.6 m。各处理水稻不同生育阶段水分控制标准见图 2,其中田间水位监测利用测针于每日 08:00 测量(测坑内安装一测桩,测桩底部与土层持平);土壤相对含水率为土壤含水率与土壤饱和含水率之比(土壤含水率通过称质量法测得,当田间无水层时,

每 3 天测量 1 次)。

1.3 田间管理

2018 年、2019 年的移栽处理分别于 5 月 18、13 日播种(水育秧),6 月 17、11 日移栽,田间水稻的株行距为 20 cm×21 cm;2018 年、2019 年的直播处理分别于 5 月 25、20 日播种(水直播),每公顷播种 37.5 kg。2018 年、2019 年的水稻分别于 10 月 7 日、9 月 26 日收割。田间施氮量为 180 kg/hm²,直播水稻的基肥:分蘖肥:穗肥=2:6:2;移栽水稻的基肥:分蘖肥:穗肥=6:2:2;K₂O 和 P₂O₅ 均为 120 kg/hm²,一次性基施。病虫草害防治参考当地措施。

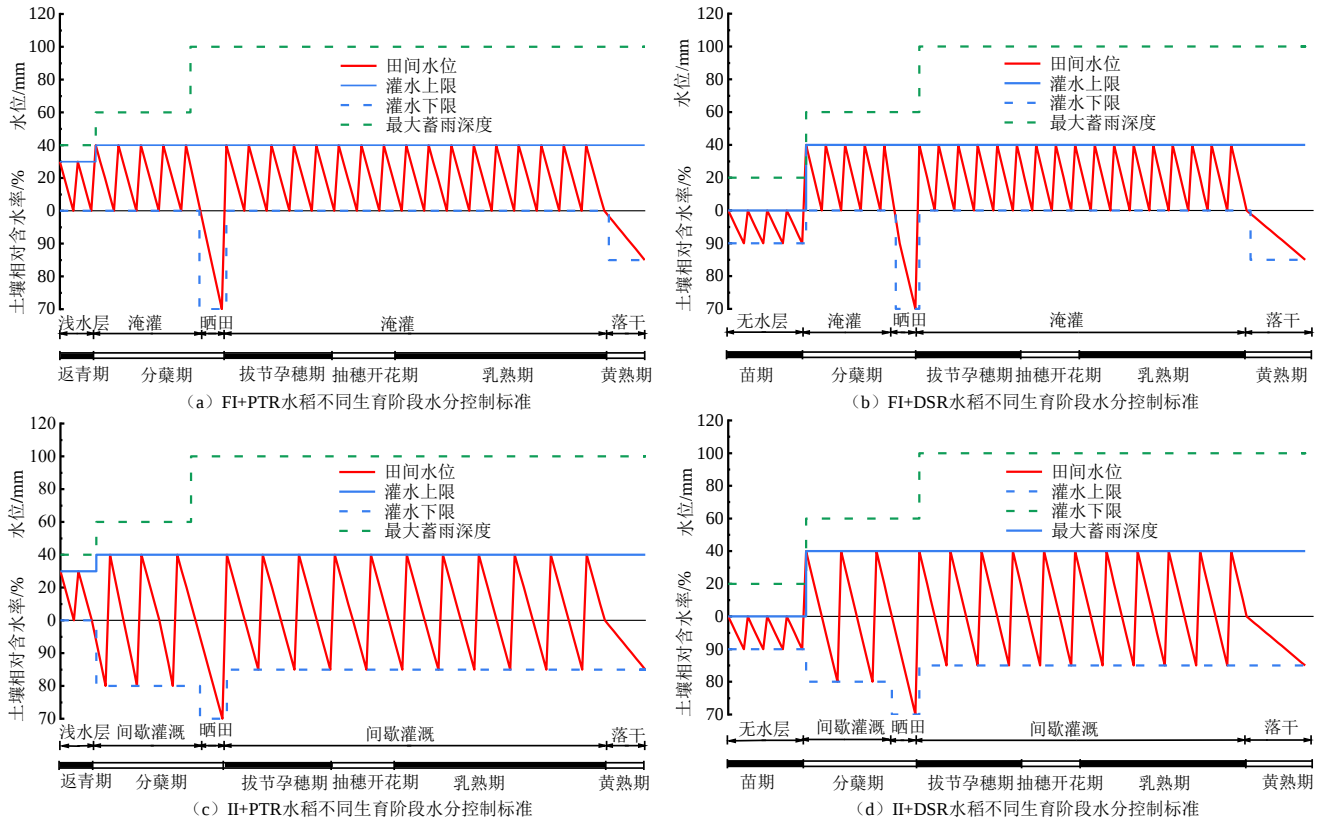


图 2 水稻不同生育阶段的水分控制标准

Fig.2 Water control standards at different growth stages of rice

1.4 测定指标与方法

1.4.1 产量及其构成因素

移栽水稻每个小区于收获前选取 3 个连续的 10 穴水稻计算有效穗数，再取相同茎蘖数的植株 10 穴进行室内考种，直播水稻每个小区选取 3 个 0.5 m² 面积的水稻计算有效穗数，再取 0.1 m² 面积的有效穗数进行室内考种，统计穗粒数、千粒质量、结实率，并进行实收记产。

1.4.2 灌、排水量

灌水量由流量计直接计量。若雨后田间水位超过最大蓄水深度，则按照水位处理的设计方案进行排水，排水前后的水层深度变化量即为排水量。试验在有底测坑内进行，田间渗漏量可近似视为 0。

1.4.3 需水量

测坑田面有水层时，时段内的需水量计算式为：

$$ET_d = h_1 - h_2 + p + m - c, \quad (1)$$

式中： ET_d 为水稻日需水量 (mm)； h_1 为第一日初田面水深 (mm)； h_2 为第二日初田面水层深度 (mm)； p 为第一日降水量 (mm)； m 为第一日灌水量 (mm)； c 为第一日排水量 (mm)。

测坑田面无水层时，时段内的需水量计算式为：

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + p + m - c, \quad (2)$$

式中： ET_{1-2} 为时段 1-2 的水稻需水量 (mm)； i 为土

壤层号； n 为土层总数； γ_i 第 i 层土壤干体积质量 (g/cm³)； H_i 为第 i 层土壤厚度 (cm)； W_{i1} 为第 i 层土壤在该时段开始时的含水率 (干土质量的百分率，%)； W_{i2} 为第 i 层土壤在该时段末的含水率 (干土质量的百分率，%)； p 为时段内降水量 (mm)； m 为时段内灌水量 (mm)； c 为时段内排水量 (mm)。

移栽水稻的苗期需水量按照秧田需水量：大田需水量=12：1 换算。

1.4.4 需水强度

$$S_{1-2} = ET_{1-2} / T_{1-2}, \quad (3)$$

式中： S_{1-2} 为时段 1-2 的需水强度 (mm/d)； ET_{1-2} 为该时段内水稻的需水量 (mm)； T_{1-2} 为该时段的天数 (d)。

1.4.5 水分利用参数

$$I = Y / ET, \quad (4)$$

$$WUE_m = Y / m, \quad (5)$$

式中： I 为水分生产率 (kg/m³)； Y 为水稻产量 (kg/m²)； ET 为需水量 (m³/m²)。 WUE_m 为灌溉水利用效率 (kg/m³)； m 为灌水量 (m³/m²)。

1.5 数据处理与分析

数据采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 进行分析与处理，采用 OriginPro 2018 进行作图。采用一般线性模型进行方差分析，利用最小显著极差法 (LSD 法) 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

由表 1 可知, 年份、种植方式及二者的交互作用显著影响水稻产量, 而灌溉方式对水稻产量的影响不显著。直播水稻产量较移栽水稻显著下降了 5.33%~10.46%。间歇灌溉下, 直播水稻的产量为 10.48~12.25 t/hm², 低于相同灌溉方式下的移栽水稻 (11.99~13.03 t/hm²), 且在 2018 年达到了显著水平。

表 1 不同灌溉与种植方式下水稻产量及其构成因素

Table 1 Effects of different irrigation and planting methods on rice yield and its components

年份	处理	有效穗数	每穗粒数	千粒质量/g	结实率/%	产量/(t hm ⁻²)
2018	FI+PTR	275.3b	185a	27.33ab	89.62a	11.53a
	FI+DSR	300.33a	162b	27.17ab	79.89b	10.58b
	II+PTR	276.3b	188a	27.56a	90.62a	11.99a
	II+DSR	295.0a	166b	26.81b	79.83b	10.48b
2019	FI+PTR	259.3a	189a	27.80a	92.04a	12.51ab
	FI+DSR	268.3a	186a	26.58b	89.51b	11.93b
	II+PTR	256.0a	201a	27.63a	92.37a	13.03a
	II+DSR	264.7a	195a	26.68b	89.18b	12.25ab
方差分析	年份 (Y)	**	**	ns	**	**
	灌溉方式 (W)	ns	ns	ns	ns	ns
	种植方式 (P)	**	**	**	*	**
	Y×W	ns	ns	ns	ns	ns
	W×P	ns	ns	ns	ns	ns
	Y×P	ns	*	ns	**	*
	Y×W×P	ns	ns	ns	ns	ns

注 不同小写字母表示同一年份不同处理在 0.05 水平上差异显著; **, *和 ns 分别表示处理在 0.01, 0.05 水平上差异显著及差异不显著, 下同。

2.2 全生育期灌水量、排水量与需水量

由表 2、图 3 可知, 年份、灌溉方式、种植方式显著影响水稻全生育期的灌水量、排水量和需水量。2019 年灌水量、需水量显著高于 2018 年, 排水量则相反。间歇灌溉下的灌水量要低于传统淹灌, 2019 年达到显著水平; 2018 年间歇灌溉的排水量显著高于传统淹灌, 2019 年则相反; 与传统淹灌相比, 间

相同灌溉和种植方式下, 2019 年的水稻产量均高于 2018 年。

年份显著影响有效穗数、穗粒数和结实率; 种植方式显著影响有效穗数、穗粒数、千粒质量和结实率; 灌溉方式对产量各构成因素影响均不显著; 年份与种植方式的交互作用显著影响每穗粒数和结实率。直播水稻的有效穗数高于移栽水稻, 而穗粒数、千粒质量和结实率低于移栽水稻。2019 年的有效穗数低于 2018 年, 而穗粒数和结实率则相反。

歇灌溉的需水量显著下降。与移栽水稻相比, 直播水稻的灌水量在 2 a 间表现不同, 2018 年减少, 2019 年增多; 而直播水稻的排水量 2 a 均显著下降; 直播水稻的需水量显著增加。II+DSR 的需水量较 II+PTR 显著提高了 40.1~44.6 mm, 而与 FI+PTR 相比则下降了 8.7~17.0 mm。

表 2 不同灌溉与种植方式下水稻灌、排水量与需水量

Table 2 Effects of different irrigation and planting methods on rice irrigation and drainage

年份	处理	降水量/mm	灌水量/mm	排水量/mm	需水量/mm
2018	FI+PTR	684.4	255.6a	412.7a	604.6b
	FI+DSR	741.7	165.9b	193.9c	649.4a
	II+PTR	684.4	250.3a	463.5a	555.8c
	II+DSR	741.7	169.1b	338.6b	595.9b
2019	FI+PTR	336.1	372.1b	54.2a	645.9b
	FI+DSR	336.1	413.6a	39.8b	699.7a
	II+PTR	336.1	256.2c	29.3bc	584.3d
	II+DSR	336.1	284.4c	19.7c	628.9c
方差分析	Y	-	**	**	**
	W	-	**	**	**
	P	-	**	**	**
	Y×W	-	*	*	*
	W×P	-	*	ns	ns
	Y×P	-	ns	ns	ns
	Y×W×P	-	ns	ns	ns

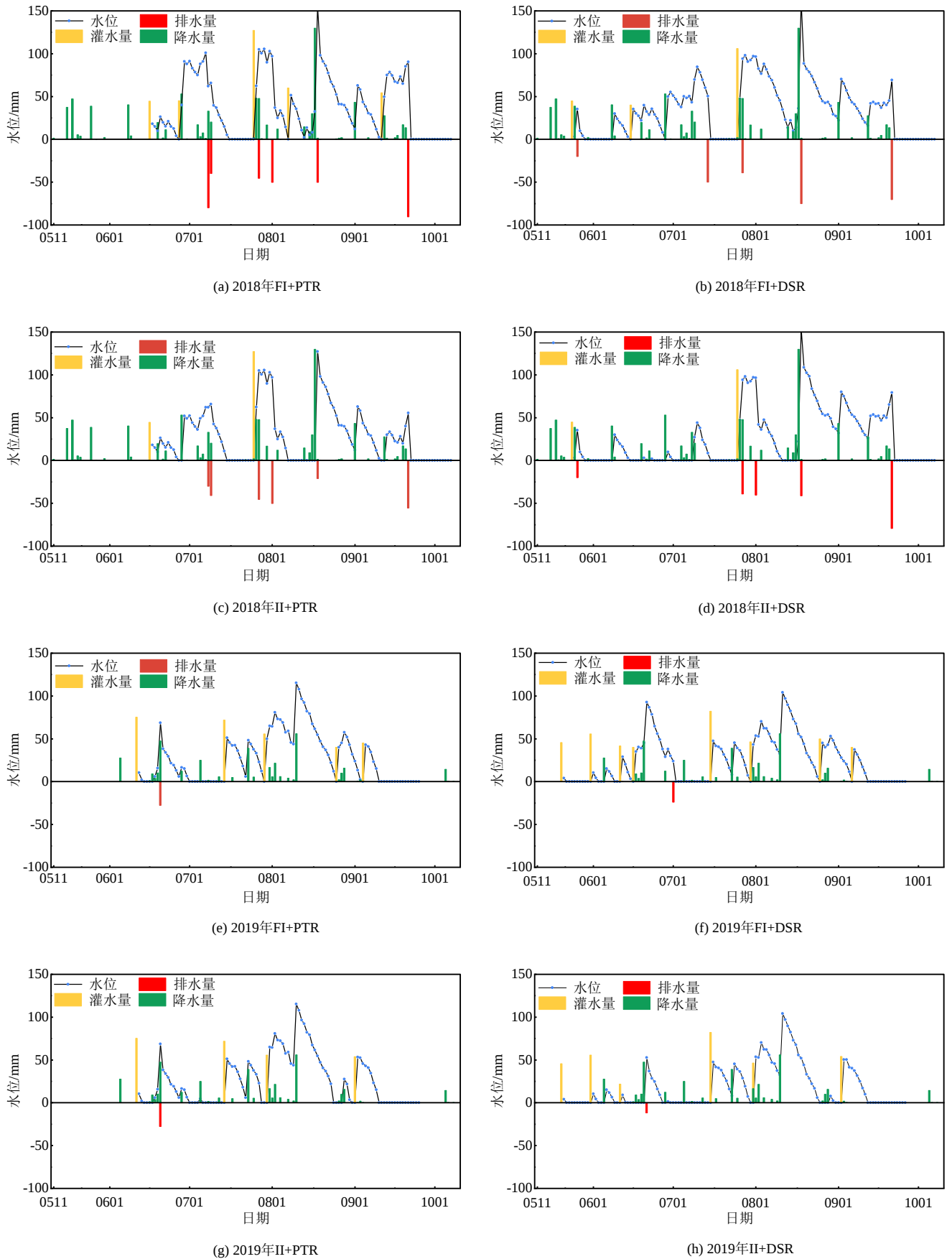


图3 不同处理下的田间水位变化

Fig.3 Water depth changes under different treatments

2.3 各生育期需水量与需水强度

由表3可知,年份显著影响水稻各生育时期的需水量和需水强度。种植方式显著影响苗期、拔节孕穗期、抽

节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、黄熟期的需水量和需水强度。种植方式显著影响苗期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、黄熟期的需水量和需水强度。除

苗期和 2018 年的黄熟期外, 间歇灌溉下各时期的需水量、需水强度较传统淹灌均显著下降。与移栽水稻相比, 直播水稻较苗期需水量、需水强度显著增加, 分蘖期与黄熟期无显著变化, 而在拔节期、抽穗开花期、乳熟期显著减少。2019 年水稻分蘖期的需水量显著低于 2018 年。

2.4 水分生产率

由表 4、图 4 可知, 灌溉方式、种植方式、年份与种植方式的交互作用显著影响水分生产率。间歇灌溉下的水分生产率显著高于传统淹灌。直播水稻的水分生产率显著低于移栽水稻。间歇灌溉下移栽水稻

(II+PTR) 的水分生产率最大 ($2.23 \sim 2.34 \text{ kg/m}^3$), II+DSR ($1.76 \sim 1.95 \text{ kg/m}^3$) 与之相比显著下降了 $12.55\% \sim 24.79\%$ 。

年份、灌溉方式、种植方式、年份与灌溉方式的交互作用、年份与种植方式的交互作用显著影响水分灌溉水利用效率。间歇灌溉的灌溉水利用效率在 2018 年与传统淹灌相比无显著差异, 2019 年显著提高。与移栽水稻相比, 直播水稻的灌溉水利用效率年际间表现不一致。II+DSR 的灌溉水利用效率在 2018 年显著高于 II+PTR, 而在 2019 年则相反。

表 3 不同灌溉与种植方式下水稻各生育时期需水量和需水强度

Table 3 Effect of different irrigation and planting methods on rice evapotranspiration and water requirement intensity

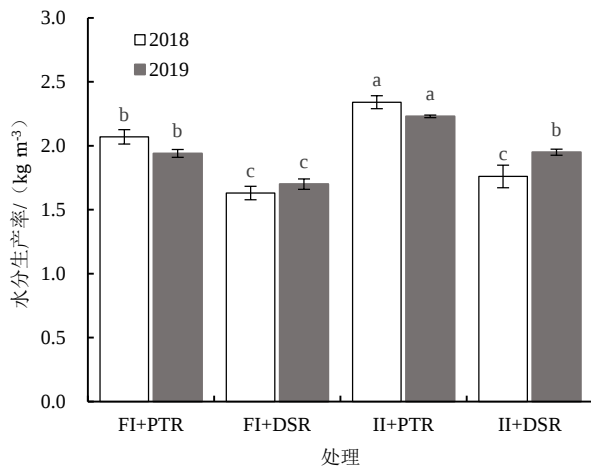
年份	处理	需水量/mm						需水强度/(mm d^{-1})					
		SS	TS	JS	FS	MS	YM	SS	TS	JS	FS	MS	YM
2018	FI+PTR	11.9b	196.3a	204.3a	70.5a	77.7a	43.9a	0.40b	5.45a	7.05a	6.41a	3.88a	2.92a
	FI+DSR	87.6a	200.5a	191.0b	67.4ab	57.6c	45.3a	2.86a	5.54a	6.58b	6.12ab	2.88 c	3.02a
	II+PTR	11.9b	185.0ab	178.2c	67.3ab	69.1b	44.2a	0.40b	5.14b	6.14c	6.12ab	3.45b	2.94a
	II+DSR	88.6a	178.6b	170.7c	63.7b	47.9d	46.4a	2.86a	4.96b	5.88c	5.79b	2.40d	3.09a
2019	FI+PTR	13.2b	176.3ab	212.6a	78.8a	134.4a	30.5a	0.45b	5.18a	7.09a	7.16a	5.84a	3.05a
	FI+DSR	93.1a	182.4a	201.0b	76.7ab	113.4b	33.1a	4.41a	5.37a	6.70b	6.97ab	4.93b	3.31a
	II+PTR	13.2b	160.5b	191.4c	73.5c	121.5b	24.2b	0.45b	4.72b	6.38c	6.68b	5.28b	2.45b
	II+DSR	92.7a	159.2b	183.8d	65.2d	103.4c	24.7b	4.41a	4.68b	6.21d	5.92c	4.49c	2.47b
方差分析	Y	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	W	ns	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	**	**
	P	**	ns	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	**
	Y×W	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
	W×P	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
	Y×P	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Y×W×P	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注 SS: 苗期, TS: 分蘖期, JS: 拔节孕穗期, FS: 抽穗开花期, MS: 乳熟期, YM: 黄熟期。

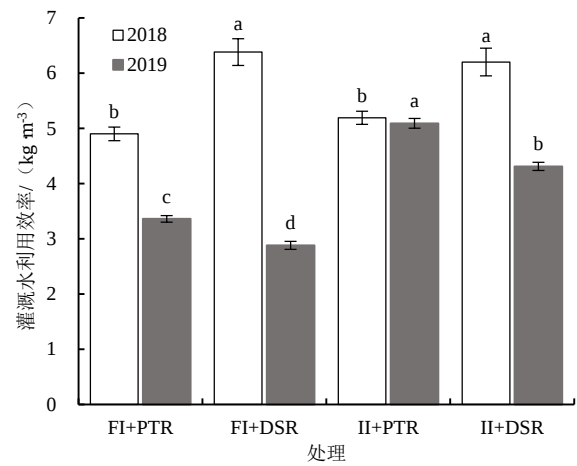
表 4 水稻水分利用效率影响因素的方差分析

Table 4 Variance analysis of factors affecting rice water use efficiency

水分利用参数	Y	W	P	Y×W	W×P	Y×P	Y×W×P
水分生产率	ns	**	**	ns	ns	**	ns
灌溉水利用效率	**	**	**	**	ns	**	ns



(a) 水分生产率



(b) 灌溉水利用效率

图 4 不同灌溉与种植方式下水稻水分利用效率

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

3 讨论

3.1 产量及其构成因素

不同节水灌溉技术的增产效果不同^[1], 间歇灌溉由于其增产稳产效果显著, 因此被大面积推广^[19-20]。本试验结果表明, 间歇灌溉下直播水稻(II+DSR)的产量为 10.48~12.25 t/hm², 已达到高产水平, 与传统淹灌下的直播水稻(FI+DSR)无显著差异, 但显著低于移栽水稻(FI+PTR, II+PTR), 这与人^[12,14]研究结果基本一致。何海兵等^[19]研究指出, 与传统淹灌相比, 干湿交替灌溉下水稻的有效穗数有所下降, 但每穗粒数、千粒质量、结实率显著增加, 使得产量显著提高。本研究存在相似的规律, 但不显著, 这可能是由于水稻品种及栽培措施的差异所致。此外, 直播稻由于其出苗不齐, 在生产中往往通过加大播种量来保证有效穗数, 然而这也使得播种密度增加, 影响水稻后期的生长发育^[12-13]。本试验结果表明, 尽管直播水稻的有效穗数较移栽水稻增加, 但穗粒数、结实率、千粒质量却显著下降, 最终导致水稻产量相比移栽水稻下降了 5.33%~10.46%。

3.2 水分利用

以往研究结果一致认为, 节水灌溉具有显著的节水效应^[1,12,16,19]。本研究表明, 与传统淹灌相比, 间歇灌溉下移栽水稻的需水量显著下降, 这与此前在该地区的研究结果基本一致^[20]。同一灌溉方式下, 直播水稻的需水量较移栽水稻显著增加。由于直播水稻在分蘖期的需水量与移栽水稻无显著差异, 但拔节后(拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期)的需水量要显著低于移栽水稻, 因此可推算直播水稻需水量的增加主要来自苗期, 这与 Cabangon 等^[11]的结果一致。然而, 亦有研究认为直播水稻较移栽水稻更为节水^[13-14], 造成这种差异的主要原因是以往研究中, 直播水稻主要配合节水灌溉, 如旱直播旱管、湿润灌溉, 而移栽水稻则大多是传统淹灌。本研究结果也表明, 间歇灌溉下直播水稻(II+DSR)的需水量较传统淹灌下移栽水稻(FI+PTR)减少了 8.7~17.0 mm。近期的研究结果显示, 在常规淹灌下, 直播稻与移栽稻的水分投入无显著差异^[8]; 在干湿交替灌溉下, 旱直播水稻较移栽水稻减少了水分投入^[10]。一方面, 以往研究将灌水量与降水量之和定义为水分投入总量, 并未考虑排水; 另一方面, 以往研究中的直播稻苗期与本试验灌溉方式下有所差异, 这些差异是以往研究结果与本试验结果不一致的主要原因。研究认为, 不同的种植方式影响水稻的根系发育, 从而改变了其需水规律^[19]。本试验结果表明, 直播水稻与移栽水稻的分蘖期需水量与需水强度差异不显著, 而在拔节后, 移栽水稻需水量

与需水强度要显著高于直播水稻, 这可能是因为拔节前水稻叶面积较小、根系尚未发育完善, 需水主要以棵间蒸发为主; 而拔节后, 移栽水稻的根系发达, 叶面积大, 蒸腾作用更强^[8,21]。

与传统淹灌相比, 间歇灌溉下水稻产量无显著差异, 需水量显著下降, 使得水分生产效率显著提高。尽管受天气影响, 年际间需水量存在着显著差异, 而水分利用效率年际间并无显著差异, 移栽水稻达到 1.94~2.34 kg/m³, 与前人在节水灌溉条件下的水分利用效率相差不大^[22]。而直播水稻需水增加, 产量下降, 这导致水分利用效率较移栽水稻显著下降。上述分析表明, 直播水稻水分生产率的降低一方面是由于苗期需水增加; 另一方面是由于穗粒数、结实率、千粒质量显著下降使得水稻产量下降。苗期需水主要以棵间蒸发为主, 因此, 如何减少苗期棵间蒸发是提高直播水稻水分生产率的一个重要思考方向。前人通过推迟起始灌溉时间以减少直播稻在苗期的耗水量^[23], 而免耕和秸秆覆盖也有望减少直播稻苗期需水量。

4 结论

1) 与传统淹灌相比, 间歇灌溉下水稻产量无显著变化, 需水量显著减少了 8.16%~9.84%, 水分生产率显著升高了 10.68%~14.73%。与移栽水稻相比, 直播水稻产量显著下降了 5.33%~10.46%, 需水量显著增加 7.32%~8.00%, 水分生产率显著下降 12.36%~23.14%。间歇灌溉辅以移栽是适宜江淮地区稻田高产稳产且符合水分高效利用的一种水稻生产模式。

2) 间歇灌溉下, 直播水稻较移栽水稻产量显著下降了 5.99%~12.59%, 需水量显著增加了 7.21%~7.63%, 水分生产率显著下降了 12.55%~24.79%。同一灌溉方式下, 与移栽水稻相比, 直播水稻的产量显著下降, 需水量显著增加。直播水稻应采取适宜的生产技术以减少苗期耗水。

参考文献:

- [1] ZHUANG Yanhua, ZHANG Liang, LI Sisi, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 374-382.
- [2] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(7): 1 273-1 289.
ZHANG Hongcheng, GONG Jinlong. Research status and development discussion on high-yielding agronomy of mechanized planting rice in china[J]. *Scienia Agricultura Sinica*, 2014, 47(7): 1 273-1 289.
- [3] SANGITA Mohanty, NAYAK A K, DEBAARA Bhaduri, et al. Real-time application of neem-coated urea for enhancing N-use efficiency and minimizing the yield gap between aerobic direct-seeded and puddled transplanted rice[J]. *Field Crops Research*. 2021(264):

- 1-12.
- [4] 项亚威. 杂交稻直播与移栽方式的产量、抗倒性和稻米品质研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
XIANG Yawei. Yield, Lodging resistance and rice quality in hybrid rice grown under direct seeding and transplanting[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.
 - [5] 张喜娟, 来永才, 孟英, 等. 种植方式对寒地粳稻生育期、产量和温度利用的影响[J]. 作物杂志, 2017(5): 124-128.
ZHANG Xijuan, LAI Yongcai, MENG Ying, et al. Effects of planting patterns on growth, yield and temperature utilization of japonica rice in cold region[J]. Crops, 2017(5): 124-128.
 - [6] 张明静, 韩笑, 胡雪, 等. 不同种植方式下温度升高对水稻产量及同化物转运的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1 537-1 552.
ZHANG Mingjing, HAN Xiao, HU Xue, et al. Effects of elevated temperature on rice yield and assimilate translocation under different planting patterns[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(7): 1 537-1 552.
 - [7] 罗友谊, 王慰亲, 郑华斌, 等. 不同机械有序种植方式对水稻生长特性及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(7): 162-171.
LUO Youyi, WANG Weiqin, ZHENG Huabin, et al. Influences of different mechanical and orderly planting methods on growth characteristics and yield of rice[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(7): 162-171.
 - [8] LIU Hongyan, HUSSAIN Saddam, ZHENG Manman, et al. Dry seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015(35): 285-294.
 - [9] ISHFAQ Muhammad, AKBAR Nadeem, ANJUM Shakeel Ahmed, et al. Growth, yield and water productivity of dry direct seeded rice and transplanted aromatic rice under different irrigation management regimes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2 656-2 673.
 - [10] XU Le, YUAN Shen, WANG Xinyu, et al. Comparison of yield performance between direct-seeded and transplanted double-season rice using ultrashort-duration varieties in central China[J]. The Crop Journal, 2021, 10(1): 1-9.
 - [11] CABANGON R J, TUONG T P, ABDULLAH N B. Comparing water input and water productivity of transplanted and direct-seeded rice production systems [J]. Agricultural Water Management, 2002, 57(1): 11-31.
 - [12] 孙雪梅, 于艳梅, 孙艳玲, 等. 控制灌溉条件下粳稻不同种植模式对比研究[J]. 黑龙江水利, 2017, 3(8): 6-11.
SUN Xuemei, YU Yanmei, SUN Yanling, et al. Comparative study on different cropping partners of Japonica rice under controlled irrigation[J]. Heilongjiang Water Resources, 2017, 3(8): 6-11.
 - [13] KUMAR Satyendra, NARJARY Bhaskar, KUMAR Kapil, et al. Developing soil matric potential based irrigation strategies of direct seeded rice for improving yield and water productivity[J]. Agricultural Water Management, 2019(215): 8-15.
 - [14] 郑天翔, 唐湘如, 罗锡文, 等. 节水灌溉对精量穴直播水稻产量形成的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5): 99-101.
ZHENG Tianxiang, TANG Xiangru, LUO Xiwen, et al. Effect of water-saving irrigation on the yield formation of precision hill-direct-seeding rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(5): 99-101.
 - [15] 魏永霞, 侯景翔, 吴昱, 等. 不同水分管理旱直播水稻生长生理与节水效应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 253-264.
WEI Yongxia, HOU Jingxiang, WU Yu, et al. Effects of different water management on growth physiology and water-saving of dry direct seeding rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 253-264.
 - [16] 张鸿, 朱从桦, 李其勇, 等. 灌溉方式和施氮量对直播稻氮素和水利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1 802-1 814.
ZHANG Hong, ZHU Conghua, LI Qiyong, et al. Effect of irrigation management and nitrogen rate on nitrogen and water utilization of direct-seeded rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1 802-1 814.
 - [17] 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.
HE Haibing, YANG Ru, LIAO Jiang, et al. Research advance of high-yielding and high efficiency in resource use and improving grain quality of rice plants under water and nitrogen managements in an irrigated region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(2): 305-318.
 - [18] WANG Weiqin, PENG Shaobing, LIU Hongyan, et al. The possibility of replacing puddled transplanted flooded rice with dry seeded rice in central China: A review[J]. Field Crop Research, 2017(2): 305-318.
 - [19] 何海兵, 杨茹, 吴汉, 等. 干湿交替灌溉下氮素形态对水稻花期光合及产量形成的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(11): 2 230-2 237.
HE Haibing, YANG Ru, WU Han, et al. Effect of N forms on photosynthesis at flowering and yield formation in wetting-drying alternation irrigation[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(11): 2 230-2 237.
 - [20] 吴汉, 柯健, 何海兵, 等. 不同间歇时间灌溉对水稻产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 37-44.
WU Han, KE Jian, HE Haibing, et al. Experimental study on the effects of different intermittent irrigations on yield and water use efficiency of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 37-44.
 - [21] MOHAMMAD Ali, SUDHISHRI Susama, DAS T.K., et al. Water balance in direct-seeded rice under conservation agriculture in North-western Indo-Gangetic Plains of India[J]. Irrigation Science, 2018, 36(6): 381-393.
 - [22] 魏永霞, 汝晨, 刘慧, 等. 黑土区水稻耗需水过程与产量形成及水分利用的响应关系[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(1): 56-65.
WEI Yongxia, RU Chen, LIU Hui, et al. Response relationship of rice yield formation and water use efficiency to water consumption process in black soil area[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(1): 56-65.
 - [23] JIANG Qingwei, WANG Weiqin, CHEN Qian, et al. Response of first flood irrigation timing after rice dry-direct-seeding: productivity and GHG emissions in Central China[J]. Agriculture water management, 2016(177): 241-247.