

▪ 作物水肥高效利用 ▪

文章编号: 1672-3317(2022)11-0001-06

土壤水分对水稻耗水特性及生长发育的影响

杨丞¹, 陈艺周¹, 马世浩¹, 王贵兵¹, 张赓³, 李小坤^{1,2*}

(1.华中农业大学 资源与环境学院/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室/
华中农业大学 微量元素研究中心, 武汉 430070; 2.华中农业大学 双水双绿研究院,
武汉 430070; 3.全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要:【目的】明确土壤水分对水稻耗水特性、水分利用效率以及叶片水分生理状况的影响, 为水稻水资源高效利用提供理论依据。【方法】采用盆栽试验的方法, 以“扬两优 6”为材料, 通过设置不同土壤含水率, 以占田间持水率比例进行划分: 90%以上(W1, 对照)、75%~90%(W2)、60%~75%(W3)和 45%~60%(W4), 探究土壤水分对水稻耗水量、耗水强度、生物量、产量、水分利用效率以及叶片生理状况的影响。【结果】降低土壤水分能够减少水稻水资源的消耗, 与 W1 处理相比, W2、W3 处理和 W4 处理的全生育期耗水量分别减少 32.4%、58.7%和 69.9%, 全生育期的耗水强度分别降低 32.4%、61.5%和 73.5%。W2 处理的水稻水分利用效率显著高于其他土壤水分处理; 与 W1 处理相比, 尽管 W2 处理的籽粒产量和生物量分别降低 13.2%和 12.4%, 但水分利用效率提高 24.5%, 而 W3 处理和 W4 处理的水分利用效率分别降低 36.0%和 74.7%。【结论】从水分高效利用和保障水稻正常生长发育的角度综合考虑, 土壤含水率为田间持水率的 75%~90%时, 可在保证较高的水稻产量前提下, 提高水分利用效率, 减少水资源的消耗, 具有较好的推广应用前景。

关键词: 水分亏缺; 水稻; 耗水特性; 水分利用效率

中图分类号: S365; S511

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021448

OSID:



杨丞, 陈艺周, 马世浩, 等. 土壤水分对水稻耗水特性及生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(11): 1-5, 36.

YANG Cheng, CHEN Yizhou, MA Shihao, et al. The Effect of Soil Moisture on Water Consumption and Growth of Rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(11): 1-5, 36.

0 引言

【研究意义】水稻是发展中国家最重要的粮食作物, 在我国约有 65%的人口以稻米为主食^[1-2]。同时水稻也是我国农业用水的第一大户, 约有 70%的农业用水用于水稻生产^[3]。随着人口的不断增长、农业用水需求的增加以及可利用淡水量的降低, 用于稻田灌溉的水资源愈加匮乏^[4]。而以往水稻栽培过程中的大水淹灌方式水资源浪费现象极其严重, 节水灌溉是为适应水资源危机而提出的高效灌溉方式, 已经在水稻研究领域作为一个优先发展方向^[5]。【研究进展】近年来, 国内外研究学者对水稻节水灌溉进行了大量研究, 提出了浅湿灌溉、间歇灌溉以及滴灌等诸多节水灌溉技术, 均取得了显著成效^[6-9]。节水灌溉下土壤墒情不同, 水稻各生育阶段的耗水量不同, 各生育阶

段对水分的敏感程度也不同^[10-11]。【切入点】为了进一步挖掘节水灌溉技术下水稻水分高效利用的潜力, 探明土壤墒情与水稻水分消耗特征的相关性很有必要。【拟解决的关键问题】为此, 本研究通过精确控制土壤含水率来研究土壤水分对水稻耗水特性、水分利用效率以及叶片水分生理状况的影响, 以期水稻节水技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2020 年 6—10 月在湖北省武汉市华中农业大学(30°28'N, 114°29'E)微肥楼盆栽场透光防雨棚中进行。试验品种为湖北省大面积推广的高产中熟水稻品种籼型两系杂交水稻扬两优 6 号, 该品种于 2005 年通过国家审定, 全生育期 145 d, 2003—2004 年参加湖北省中稻品种区域试验, 2 a 平均产量为 8.34 t/hm², 米质达国标优质稻谷 3 级标准, 需肥水平中等偏上, 对水分较为敏感。试验土壤取自武穴市水稻土耕作层 0~30 cm, 土壤自然风干后粉碎过筛(2 mm)后备用(土壤质量含水率为 1.8%)。供试土壤基本理化性质: pH

收稿日期: 2021-09-17

基金项目: 湖北省水稻“三优”科技创新行动项目(2018—2020); 全国农业技术推广服务中心农业农村资源等监测统计-墒情监测项目(2020); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662018YJ026)

作者简介: 杨丞(1996-), 男, 博士研究生, 研究方向为水稻水肥管理。
E-mail: yangcheng2019@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 李小坤(1979-), 男, 教授, 研究方向为水稻水肥管理。
E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn

值为 5.08, 有机质量为 19.7 g/kg, 全氮量为 1.70 g/kg, 速效磷量为 18.9 mg/kg, 速效钾量为 80.0 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置 4 种不同水分处理, 分别为土壤含水率占土壤田间持水率的 90%以上(W1, 灌溉上限为 5 cm 水层)、75%~90%(W2)、60%~75%(W3)和 45%~60%(W4), 灌溉上限为设定田间持水率的百分比最大值, 灌溉下限为设定田间持水率的百分比最小值, 每个处理 4 次重复。使用高 30 cm、直径 30 cm 底部密封的塑料桶, 将与塑料桶相似大小的黑色塑料袋套于桶外防透光, 每桶装土 10 kg。每盆纯 N、P₂O₅ 和 K₂O 的施用量分别为 2、1、1.5 g, 肥源分别为 NH₄Cl、(NH₄)₂HPO₄ 和 K₂SO₄, 均为分析纯, 作底肥拌土一次性施用。移栽前测定盆栽土壤饱和含水率, 其方法为土壤装盆后浇水静置 24 h 使土壤完全浸透至表面湿润且无水层, 然后记录浇水量。采用土培育秧, 6 月 23 日播种, 7 月 17 日移栽, 每盆定植 3 株秧苗。水稻返青期间每盆均留 3~5 cm 水层, 返青后使用精度 0.001 kg 的天平采用称质量法控制土壤含水率: 将盆中含水土壤和水稻植株一起称质量 ($M_{总}$) 后, 减去浇水前干土质量 ($M_{干土}$) 和盆质量 ($M_{盆}$), 再将该水分质量与田间持水率进行比较, 增减浇水量达到控制水分处理的调控范围。根据土壤含水率 (ω , %) 计算灌溉水量 (植株鲜质量未计算在内), 计算式为:

$$\omega = \frac{M_{总} - M_{干土} - M_{盆}}{M_{干土} - M_{盆}} \times 100\% \quad (1)$$

每天进行定量补水, 灌溉用水为蒸馏水, 使用 1 000 mL 量筒 (精度 10 mL) 准确量取灌溉量。

1.3 测定项目与方法

1) 耗水量及耗水强度

每次浇水, 各盆单独记录耗水量。耗水强度由单株水稻某一时期的耗水量与该时期的时间之比计算得到。

2) 生长指标

于返青结束、分蘖盛期、抽穗期和乳熟期测量 3 穴植株基部至植株最高处的高度, 记为水稻株高。同时, 在抽穗期取 3 穴植株, 按茎、叶分开, 叶片使用叶面积仪 LI-3100C 测定绿叶面积后和茎秆分别放入烘箱 105 ℃杀青 30 min, 而后于 60 ℃烘至恒质量, 用 1/100 天平称量计算地上部生物量。比叶重由单株叶片生物量与单株绿叶面积的比值计算得到。

3) 生理指标

本研究所有生理指标均于抽穗期测定。于 18:00 在离根区 15 cm 剪断茎秆, 次日 06:00 用脱脂棉吸收伤流液称质量测定根系伤流量, 根系伤流速度由伤流量与时间的比值计算得到。SPAD 值由 SPAD 仪测定,

选取叶片中部及上、下 3 cm 处测量, 取 10 次测定的平均值作为 1 个重复。在距离叶片 1 m 处使用 UT300A 红外测温仪测定植株冠层完全展开叶叶片中部向光部分的叶温, 同时记录此时大气温度, 测得叶温与大气温度的差值即为气叶温差。采用蒽酮比色法测定可溶性糖量; 用磺基水杨酸提取脯氨酸, 采用茚三酮显色法测定脯氨酸量。取冠层完全展开叶 3 片, 放入封口塑料袋置于冰盒带回室内称鲜质量 m_1 后, 将叶片完全浸没在水中浸泡 24 h, 用滤纸吸干表面水分称质量计 m_2 , 而后在 60 ℃烘箱烘干至恒质量计 m_3 , 根据以下公式计算叶片相对含水率 (RWC):

$$RWC = \frac{m_1 - m_3}{m_2 - m_3} \times 100\% \quad (2)$$

4) 产量及水分利用效率

于成熟期取 3 穴植株, 按籽粒和稻草分开, 籽粒风干去杂后, 称质量并测定含水率, 按照 14% 的含水率计算产量。籽粒和稻草在 60 ℃烘箱烘干至恒质量后计算成熟期地上部生物量。水分生产效率和水分利用效率分别由生物量和籽粒产量与耗水量之比计算得到。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 26 统计软件分析试验数据及绘图, 采用 Duncan ($P < 0.05$) 多重检验进行均值比较。

2 结果与分析

2.1 土壤水分对水稻耗水特性的影响

表 1 为土壤水分对水稻耗水量的影响。由表 1 可知, 随着土壤水分的降低, 水稻全生育期和各生育时期的耗水量均减少。与土壤田间持水率的 90%以上 (W1) 相比, 土壤田间持水率 75%~90% (W2)、60%~75% (W3) 和 45%~60% (W4) 水稻全生育期的耗水量分别减少 32.4%、58.7%和 69.9%, 分蘖—拔节期的耗水量分别减少 33.8%、60.5%和 69.3%, 拔节—抽穗期的耗水量分别减少 28.2%、58.3%和 67.4%, 抽穗—成熟期的耗水量分别减少 36.7%、57.2%和 73.9%。

表 1 土壤水分对水稻耗水量的影响

处理	分蘖—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期	全生育期
W1	6.08	7.37	5.37	18.82
W2	4.03	5.29	3.40	12.72
W3	2.40	3.07	2.30	7.77
W4	1.87	2.40	1.40	5.67

不同土壤水分下水稻不同生育时期的耗水强度见表 2。与 W1 处理相比, W2、W3 处理和 W4 处理全生育期的耗水强度分别降低 32.4%、61.5%和 73.5%, 分蘖—拔节期的耗水强度分别降低 33.8%、62.8%和 72.7%, 拔节—抽穗期的耗水强度分别降低

30.7%、64.6%和 75.3%，抽穗—成熟期的耗水强度分别降低 34.8%、57.2%和 73.9%。说明降低土壤水分能够降低水稻全生育期和各生育时期的耗水强度，减少水资源的消耗。

表 2 土壤水分对水稻耗水强度的影响

Table 2 Effects of soil water on water

处理	consumption intensity of rice			g/(株 d)
	分蘖—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期	
W1	190.1	263.1	153.4	198.1
W2	125.9	182.4	100.0	133.9
W3	70.7	93.0	65.7	76.2
W4	51.9	64.9	40.0	52.5

2.2 土壤水分对水稻产量和水分利用效率的影响

表 3 为土壤水分对水稻产量和水分利用效率的影响

表 3 土壤水分对水稻产量和水分利用效率的影响

Table 3 Effects of soil water on grain yield and water use efficiency of rice

处理	生物量/(g 株 ⁻¹)		水分生产效率/(g kg ⁻¹)		籽粒产量/(g 株 ⁻¹)	水分利用效率/(g kg ⁻¹)
	抽穗期	成熟期	抽穗前	全生育期		
W1	32.47±0.78 a	38.79±2.10 a	2.32±0.06 b	1.92±0.10 b	16.70±0.47 a	0.83±0.02 b
W2	27.36±0.30 b	35.29±0.75 b	2.83±0.03 a	2.51±0.05 a	14.50±0.54 b	1.03±0.04 a
W3	12.07±0.66 c	13.61±0.70 c	2.06±0.11 c	1.53±0.08 c	4.72±0.36 c	0.53±0.04 c
W4	5.32±0.16 d	7.06±0.38 d	1.23±0.04 d	1.11±0.06 d	1.33±0.17 d	0.21±0.03 d

注 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.3 土壤水分对水稻生长情况的影响

图 1 为土壤水分对水稻株高动态的影响。由图 1 可知，随着土壤水分的降低，水稻各生育期的株高降低。与 W1 处理相比，W2、W3 处理和 W4 处理分蘖盛期的株高分别降低 4.5%、13.9%和 21.1%，抽穗期的株高分别降低 9.6%、26.8%和 34.2%，乳熟期的株高分别降低 2.4%、26.2%和 31.1%。

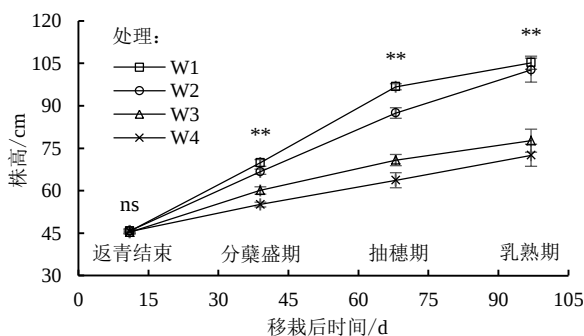


图 1 土壤水分对水稻株高动态的影响

Fig.1 Effects of soil water on plant height dynamics of rice

不同土壤水分下水稻抽穗期的根系伤流速度见图 2。与 W1 处理相比，W2、W3 处理和 W4 处理的根系伤流速度分别降低 32.7%、92.5%和 92.8%。

由表 4 可知，随着土壤水分的降低，水稻的叶面积和相对含水率降低，而比叶重、SPAD、可溶性糖量和脯氨酸量提高。与 W1 处理相比，W2、W3 处理和 W4 处理的叶面积分别降低 19.4%、45.0%和 75.6%，相对含水率分别降低 1.1%、8.2%和 13.7%，比叶重

响。由表 3 可知，随着土壤水分的降低，水稻的生物量和籽粒产量均降低，水分利用效率和生物量的水分生产效率先升高后降低，其中 W2 处理的水分利用效率和生物量的水分生产效率均是最高。与 W1 处理相比，W2、W3 处理和 W4 处理抽穗期的生物量分别降低 15.8%、62.8%和 83.6%，成熟期生物量分别降低 9.0%、64.9%和 61.8%，籽粒产量分别降低 13.2%、71.7%和 92.0%；W2 处理抽穗前、全生育期的生物量水分生产效率和水分利用效率分别提高 22.0%、30.5%和 24.5%，而 W3 处理抽穗前、全生育期的生物量水分生产效率和水分利用效率分别降低 11.0%、20.5%和 36.0%，W4 处理抽穗前、全生育期的生物量水分生产效率和水分利用效率分别降低 46.9%、42.2%和 74.7%。

分别提高 5.4%、34.3%和 59.4%，SPAD 值分别提高 9.1%、18.8%和 17.2%，可溶性糖量分别提高 8.0%、16.4%和 22.5%，脯氨酸量分别提高 39.9%、202.0%和 392.6%。与 W1 处理相比，W2 处理的气叶温差无显著差异，而 W3 处理和 W4 处理的气叶温差均显著降低，说明土壤水分过低容易引起叶片温度的升高不利于水稻正常生理反应的进行。

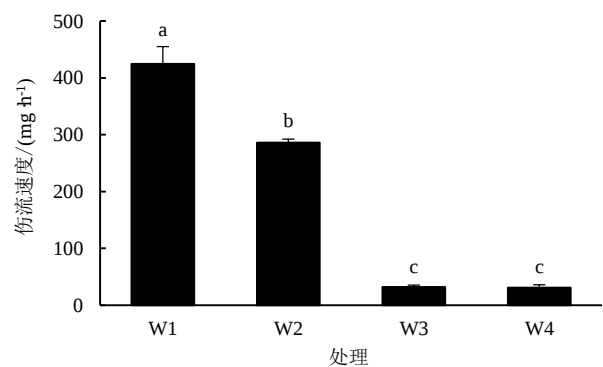


图 2 土壤水分对水稻根系伤流速度的影响

Fig.2 Effects of soil water on root bleeding rate of rice

2.4 水稻抽穗期耗水特性和叶片生理性状 Person 相关性分析

选取水稻植株抽穗期的耗水特性和叶片生理性状进行 Person 相关性分析。由表 5 可知，植株耗水量、耗水强度与叶面积显著正相关，而与 SPAD 值、可溶性糖量显著负相关，说明植株维持较大的叶面积以提高光合潜力需要消耗更多的水资源。叶片相对含水率

与叶面积、比叶重、气叶温差显著正相关,而与可溶性糖量、脯氨酸量显著负相关,说明良好的叶片水分状况是维持叶片细胞扩张、促进叶面积增大、优化叶

片形态结构的前提,而叶片水分亏缺容易导致渗透调节物质可溶性糖和脯氨酸大量积累。

表 4 土壤水分对水稻叶片生理性状的影响

Table 4 Effects of soil water on leaf physiological traits of rice

处理	叶面积/(m ² 株 ⁻¹)	比叶重/(g m ⁻²)	相对含水率/%	SPAD	气叶温差/℃	可溶性糖量/%	脯氨酸量/(μg g ⁻¹)
W1	0.34±0.05 a	30.06±1.45 c	84.94±4.11 a	38.9±2.1 c	3.27±0.15 a	3.81±0.13 b	15.44±1.05 d
W2	0.28±0.01 b	31.69±1.83 c	83.99±3.66 a	42.5±0.7 b	3.41±0.25 a	4.12±0.62 ab	21.59±1.83 c
W3	0.19±0.01 c	40.36±1.59 b	78.01±0.69 b	46.3±0.5 a	1.53±0.12 b	4.44±0.17 ab	46.62±4.75 b
W4	0.08±0.01 d	47.90±1.23 a	73.27±1.99 b	45.6±1.0 a	0.75±0.08 c	4.67±0.54 a	76.04±4.59 a

表 5 水稻抽穗期耗水特性和叶片生理性状 Person 相关性分析

Table 5 Person correlation analysis of water consumption characteristics and leaf physiological traits in rice booting stage

指标	耗水量	耗水强度	叶面积	比叶重	相对含水率	SPAD	气叶温差	可溶性糖	脯氨酸
耗水量	1								
耗水强度	0.999**	1							
叶面积	0.957*	0.950*	1						
比叶重	-0.925	-0.911	-0.987*	1					
相对含水率	0.926	0.911	0.984*	0.999**	1				
SPAD	-0.979*	-0.980*	-0.878	0.838	-0.843	1			
气叶温差	0.902	0.881	0.946	-0.983*	0.986*	-0.834	1		
可溶性糖	-0.990**	-0.987*	-0.988*	0.961*	-0.960*	0.940	-0.926	1	
脯氨酸	-0.910	-0.897	-0.987*	0.998**	-0.996**	0.812	-0.969*	0.954*	1

注 *和**分别代表影响显著 ($P<0.05$) 和影响极显著 ($P<0.01$)。

3 讨论

土壤含水率作为表征土壤水分状况的关键参数,对掌握水稻的耗水情况和实现稻田的高效节水灌溉具有重要意义。路兴花等^[12-13]研究表明随着土壤含水率的降低,水稻全生育期耗水量、各生育阶段耗水量及耗水强度逐渐降低,这与本试验关于耗水特性研究结果相一致。这是因为降低土壤水分能够显著减少水稻棵间蒸发量以及叶片的奢侈蒸腾量,从而减少水稻生产过程中水资源的消耗^[14]。此外,张鸿等^[15]研究表明稻田耗水量呈单峰变化趋势,分蘖期最小,抽穗期最大。而在本研究中,不同生育时期的耗水量和耗水强度均表现为抽穗期>分蘖期>乳熟期,这可能是因为水稻分蘖时期大气温度较高,盆面蒸发量较大所导致的。

与其他作物相比,水稻对土壤水分变化的响应更加敏感,也更容易受到水分亏缺的限制。王友贞等^[16]研究表明,水稻在分蘖期、拔节孕穗期、抽穗期及乳熟期的适宜灌水下限分别为土壤饱和含水率的70%、85%、80%和70%,各生育期灌溉下限低于该值均会导致产量大幅降低,与本研究结果基本一致。随着土壤水分的降低,水稻地上部生长发育受水分亏缺限制效应愈加明显(图3)。已有研究表明,水稻籽粒产量、生物量及叶面积随着土壤含水率的降低而降低,这是由于水分亏缺限制了叶片的细胞扩张、光合速率以及同化物的分配,从而减少了干物质的积累^[17]。此外,过低的土壤水分诱导了叶片内渗透调节物质可溶性

糖和脯氨酸的积累,以维持水分胁迫条件下的细胞膨压和气体交换^[18]。与土壤含水率为田间持水率的90%以上的灌溉方式相比,土壤含水率为田间持水率的75%~90%的灌溉方式下叶片能够通过提高渗透调节物质可溶性糖和脯氨酸的积累维持较高的相对含水率以保障水稻植株体内生理生化反应的正常进行,可在保证较高的水稻产量前提下显著提高水分利用效率。综合考虑水稻的耗水特性及生长发育状况,土壤含水率为田间持水率的75%~90%是本研究中适宜水稻高效节水灌溉的最佳土壤水分处理。由于大田试验环境的复杂性,较难实现土壤水分的精准控制。因此,本研究采用盆栽试验的方法来精确控制土壤含水率,尽管盆栽试验的土壤、植物以及大气环境与大田存在较大差异,但该研究结果为发展稻田的节水灌溉技术提供的理论依据仍然适用。当然,要建立实际生产过程中的水稻墒情监测指标体系仍有待开展大田试验进一步深入研究。

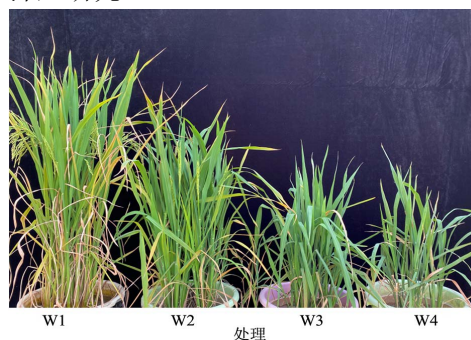


图 3 移栽 80 d 后不同土壤水分下水稻表型

Fig.3 Phenotype of rice under different soil water 80 days after transplanting

4 结 论

1) 降低土壤水分能够降低水稻全生育期的耗水量和耗水强度。

2) 降低土壤水分导致水稻生长过程中产生水分亏缺, 植株根系伤流速度、叶片相对含水率和气叶温差降低, 可溶性糖和脯氨酸量升高。

3) 从水分高效利用和保障水稻正常生长发育的角度综合考虑, 土壤含水率为田间持水率的75%~90%时, 可在保证较高的水稻产量前提下, 提高水分利用效率, 减少水资源的消耗, 具有较好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives[J]. Ecological Economics, 2011, 70(4): 749-758.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
National Bureau of statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [3] 姚林, 郑华斌, 刘建霞, 等. 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): 1 381-1 387.
YAO Lin, ZHENG Huabin, LIU Jianxia, et al. Current situation and prospect of rice water-saving irrigation technology in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1 381-1 387.
- [4] GUPTA A, RICOMEDINA A, CANODELGADO A I. The physiology of plant responses to drought[J]. Science, 2020, 368(6 488).
- [5] 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.
NIE Xiao, WANG Yiyong, LIU Xingtu. 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.
- [6] 马世浩, 杨丞, 王贵兵, 等. 水稻节水灌溉技术模式研究进展[J]. 节水灌溉, 2021(8): 19-24.
MA Shihao, YANG Cheng, WANG Guibing, et al. Research progress of rice water-saving irrigation technology mode[J]. Water Saving Irrigation, 2021(8): 19-24.
- [7] 陈伟, 窦超银, 王良, 等. 辽宁中部地区水稻适宜灌溉方式试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 73-76.
CHEN Wei, DOU Chaoyin, WANG Liang, et al. Experimental study on suitable irrigation mode for rice in middle area of Liaoning Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 73-76.
- [8] 易镇邪, 苏雨婷, 谷子寒, 等. 不同生育阶段间歇灌溉对镉污染稻田双季稻产量构成与镉累积的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 364-368.
YI Zhenxie, SU Yuting, GU Zihan, et al. Effects of intermittent irrigation at different growth stages on yield components and cadmium accumulation of double-cropping rice in Cd-contaminated paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 364-368.
- [9] 徐强, 马晓鹏, 吕廷波, 等. 滴灌条件下不同土壤质地对水稻苗期根系生长和分布的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 249-256.
XU Qiang, MA Xiaopeng, LYU Tingbo, et al. Effects of different soil texture on root growth and distribution of rice seedlings under drip irrigation[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(3): 249-256.
- [10] 刘慧, 魏永霞, 汝晨. 寒地黑土区水稻植株干物质积累对耗水过程的响应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 195-204.
LIU Hui, WEI Yongxia, RU Chen. Response of rice dry matter accumulation to water consumption process in cold black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 195-204.
- [11] 汝晨, 魏永霞, 刘慧, 等. 水稻产量及其构成要素对耗水过程的响应综述[J]. 节水灌溉, 2017(12): 97-103.
RU Chen, WEI Yongxia, LIU Hui, et al. Response of rice yield and its components to water consumption[J]. Water Saving Irrigation, 2017(12): 97-103.
- [12] 路兴花, 吴良欢, 庞林江. 不同土壤水分含量对水稻水分利用特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(2): 186-190.
LU Xinghua, WU Lianghuan, PANG Linjiang. Effects of soil moisture on water utilization characteristics of rice (*Oryza sativa*)[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(2): 186-190.
- [13] 张亮, 曹秀清, 蒋尚明, 等. 间歇灌溉模式不同间歇时间下江淮丘陵水稻耗水规律及其节水效益研究[J]. 节水灌溉, 2020(10): 6-9.
ZHANG Liang, CAO Xiuqing, JIANG Shangming, et al. Study on water consumption law and water saving benefit of rice in jianghuai hilly area under different intermittent time of intermittent irrigation mode[J]. Water Saving Irrigation, 2020(10): 6-9.
- [14] 彭世彰, 徐俊增, 黄乾, 等. 控制灌溉水稻叶片水平的水分利用效率试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 47-52.
PENG Shizhang, XU Junzeng, HUANG Qian, et al. Experimental study on leaf water use efficiency of paddy rice under controlled irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(11): 47-52.
- [15] 张鸿, 姜心禄, 郑家国. 四川丘陵季节性干旱区水稻田间耗水量研究[J]. 杂交水稻, 2012, 27(1): 71-74.
ZHANG Hong, JIANG Xinlu, ZHENG Jiaguo. Studies on water consumption of paddy field in seasonal drought hilly region of Sichuan Province[J]. Hybrid Rice, 2012, 27(1): 71-74.
- [16] 王友贞, 袁先江, 汤广民, 等. 水稻旱作覆膜土壤水分控制指标的试验研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 62-64.
WANG Youzhen, YUAN Xianjiang, TANG Guangmin, et al. Experimental research on suitable soil moisture control index for dry-farming rice mulched with plastic film[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(3): 62-64.
- [17] 胡继超, 姜东, 曹卫星, 等. 短期干旱对水稻叶水势 光合作用及干物质分配的影响[J]. 应用生态学报, 2004(1): 63-67.
HU Jicao, JIANG Dong, CAO Weixing, et al. Effect of short-term drought on leaf water potential, photosynthesis and dry matter partitioning in paddy rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004(1): 63-67.
- [18] 徐孟亮, 姜孝成, 周广洽, 等. 水稻抗旱性与叶片抗脱水能力 脯氨酸及糖的关系[J]. 生命科学研究, 1998(2): 38-42.
XU Mengliang, JIANG Xiaocheng, ZHOU Guangqia, et al. Relation between rice (*Oryza sativa* L.) drought-resistance and its ability to resist water-escaping, proline and sugar[J]. Life Science Research, 1998(2): 38-42.