杜云峰,江颂颂,陈宗奎,等.播期与补灌对节水抗旱稻早优 73 产量、品质与资源利用效率的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(1):123-132.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.01.011

# 播期与补灌对节水抗旱稻早优 73 产量、品质与资源利用效率的影响

杜云峰,江颂颂,陈宗奎,毛紫琳,张志娟,曹凑贵,李萍

华中农业大学植物科学技术学院,武汉 430070

**摘要**　为揭示不同播期和补灌时期对旱作水稻生产的影响,利用大田试验,以节水抗旱稻早优 73 为材料,通过设置不同播期(T1:5 月 30 日;T2:6 月 9 日:农民习惯做法;T3,6 月 19 日)和不同补灌时期(W1:分蘖期+孕穗期补灌;W2:分蘖期+抽穗开花期补灌,农民习惯做法;W3,分蘖期+灌浆乳熟期补灌),综合考察旱作栽培下播期与补灌对水稻生长发育、产量与品质以及资源利用效率的影响。结果显示:与 T2 相比,当播期提前,水稻的株高、茎蘖数、产量、水分利用效率均显著增加,其产量达 11.03 t/hm$^2$,提高了 16.72%;同时垩白度显著降低,经济效益提升 15.81%。当播期推迟,产量和水分利用效率显著降低,稻米品质无显著变化。与 W2 相比,W1 显著增加了水稻产量和水分利用效率,而稻米品质无显著变化。W3 在产量、水分利用效率以及经济效益的提升上更为显著,分别达到 11.67 t/hm$^2$、3.33 kg/m$^3$ 和 15 028 元/hm$^2$,同时稻米品质显著提升。因此,针对湖北省稻(旱)-麦周年轮作系统,水稻应适当提前播期,建议在 6 月中旬以前播种;在灌溉水有限的情况下,需优先满足分蘖期和灌浆乳熟期的灌溉。

**关键词**　节水抗旱稻;旱作栽培;稻-麦轮作;稻米品质;资源利用效率;播期;补灌

**中图分类号**　S 511.507　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2022)01-0123-10

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国第一大粮食作物,同时也是耗水量最多的作物之一,水稻的耗水量是小麦和玉米的 2～3 倍。在目前的水资源需求中,农业用水量达到目前水资源消耗量的 80%左右,而农业生产中,水稻作为主要的农作物之一,不仅种植推广面积大,在需水耗水方面占到农业用量的 60%[1-2]。因此,节约用水以及提高水资源的利用效率是解决大量用水需求与水资源匮乏矛盾的关键所在[3]。在缺水稻作区,以水稻旱作替代传统淹灌的水稻栽培模式的节水优势逐渐体现[4]。

水稻旱作是一种旱地条件下仅利用自然降水和关键生育期的补灌来进行水稻生产,可达到省时、省工、省水的效果。水稻旱作可提高稻-麦周年系统的综合效益,其中经济效益和水分生产率显著提高,同时温室效应显著降低[5]。水稻旱作研究已经有一些进展,但仍然存在旱作条件下水稻产量和品质有一定程度下降的问题,因此,如何协调好节水与产量、品质之间的关系成为亟待解决的主要问题。已有研究表明,水稻旱作过程中,播期提前会使水稻全生育期均提前,延长各生长发育阶段历时,从而导致全生育期变长;播期推迟会出现苗期缩短、生育进程加快、植株的同化物分配偏向于叶片和叶鞘[6]。随着播期的延迟,旱作水稻产量下降;产量构成因子中有效穗数与结实率下降,穗粒数先增加后减少,对千粒重影响不显著[7-8]。邵玺文等[9]认为分蘖期缺水对水稻的影响较大,此时期缺水可影响水稻的有效穗数,从而影响产量。也有研究发现,孕穗期适度干旱有利于同化物积累,孕穗期受旱严重不利于水稻生长发育,叶片光合速率下降,后期叶面积指数、有效叶面积指数与高效叶面积指数均下降,病虫害发生率高[10-12]。前人研究发现,在抽穗期,一定程度的干旱胁迫对水稻的生长发育没有显著的影响[13];但若

收稿日期:2021-11-29
基金项目:中央高校基金科研业务费专项(2662018YJ024);中央高校基金科研业务费专项(2662018YJ024);国家重点研发计划项目(2017YFD0301405-05)
杜云峰,E-mail:1798990223@qq.com
通信作者:李萍,E-mail:sleep1022@mail.hzau.edu.cn

干旱程度过重，会对植株光合作用以及同化物的积累有所影响[14]。前人对旱作模式下水稻生长发育规律已有一些研究，但能够应用于指导实际生产的信息还十分有限。此外，李萍等[15]对湖北省17市州的旱稻种植现状进行了调查，水稻旱作的平均产量在350～650 kg/667 m²，除了机械化程度低、缺乏基础的农田灌溉设施外，旱稻的种植技术不规范和管理粗放是制约旱作栽培的重要因素。因此，本研究以鄂北缺水稻作区的稻-麦轮作系统为对象，在农民习惯做法的基础上，研究不同播期和补灌处理对水稻产量、品质以及资源利用效率的影响，旨在明确鄂北地区水稻旱作栽培的最佳播期和补灌时期，为进一步规范水稻旱作栽培的种植技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与品种

试验于2018年在湖北省枣阳市吴店镇肖湾村华中农业大学试验基地(东经112°40′，北纬32°10′)进行，试验品种为旱优73号(HY73)，HY73是籼型三系杂交旱稻，属于节水抗旱稻品种，在湖北省鄂北缺水稻作区广泛种植。

### 1.2 试验设计与田间管理

采用大田试验，分别开展了播期试验和补灌试验。其中：(1)播期试验共设置3个播期，分别为5月30日(T1)、6月9日(T2，对照)、6月19日(T3)，其中T2处理为当地农民习惯做法。(2)补灌试验设置3种补灌时期，分别为分蘖期与孕穗期补灌(W1)、分蘖期与抽穗开花期补灌(W2，对照)、分蘖期与灌浆乳熟期补灌(W3)。其中W2为当地农民习惯做法。试验采用完全随机区组设计，3次重复，小区面积180 m²。

供试土壤的全氮含量0.91 g/kg，全磷含量0.55 g/kg，全钾含量10.95 g/kg，速效磷11.07 mg/kg，速效钾143 mg/kg，有机质含量22.48 g/kg，pH值为6.88。各小区周围设置带有黑色薄膜覆盖的田埂(宽20 cm，高30 cm)为边界，且不同处理之间设置宽度为1 m的保护行。播种方式采用机直播，行距设置为25 cm。按照当地常用的施肥方式，N、P、K肥作为基肥一次性施入，其中氮肥225 kg/hm²，磷肥90 kg/hm²，钾肥为180 kg/hm²。水分管理以土壤表面湿润即可，田间不建立水层，并记录了生长季内的降雨量和关键时期灌水量(表1)。

### 1.3 环境指标监测

从水稻播种至成熟期间，利用枣阳气象站记录水稻全生育期内降雨量和温度，使用TPJ-20温度记录仪(浙江托普仪器有限公司)和ZC-FS太阳总辐射测试仪(北京哲成科技有限公司)对环境温度和太阳辐射进行全天记录。

**表1 不同播期与补灌处理下的灌水量、降雨量及总供水量**

**Table 1 Irrigation water, rainfall and total water supply under different dry cultivation treatments** mm

| 处理 Treatment | 灌水量 Irrigation amount | 降雨量 Rainfall | 总供水量 Total water supply |
|---|---|---|---|
| T1 | 55.6 | 299.2 | 354.8 |
| T2 | 55.9 | 295.2 | 351.1 |
| T3 | 56.1 | 294.5 | 350.6 |
| W1 | 55.9 | 295.2 | 351.1 |
| W2 | 56.2 | 295.2 | 351.4 |
| W3 | 55.8 | 295.2 | 351.0 |

注：T1：5月30日；T2：6月9日；T3：6月19日。W1：分蘖期＋孕穗期补灌；W2：分蘖期＋抽穗开花期补灌；W3：分蘖期＋灌浆乳熟期补灌。下同。Note: T1: May 30th; T2: June 9th; T3: June 19th. W1: Irrigated at tillering and booting stages; W2: Irrigated at tillering and heading stages; W3: Irrigated at tillering and grouting milk ripening stage. The same as follows.

### 1.4 农艺及生理指标测定

1)生育期记载。记录播期、出苗期、分蘖盛期、抽穗开花期和成熟期等关键生育期。

2)株高。于各小区内选取10株进行测量。在抽穗之前的测量标准以最高叶尖为主，抽穗之后的测量标准以穗顶端的高度为主。分别测定分蘖盛期、孕穗期以及抽穗开花期的株高。

3)茎蘖数。在每个小区中，按照平均茎蘖数原则进行了分蘖盛期、孕穗期以及抽穗开花期茎蘖数的统计。

4)SPAD值。于每个小区内选取12株植株顶部完全展开叶作为测定对象，测定仪器采用日本MINOLTA产SPAD-502型号的SPAD仪，测定方法以叶片上、中、下部三处的平均值作为测定结果。

5)叶面积指数。于每小区选取具有代表性的4株植株，叶面积使用叶面积仪(LICOR-3100)测定。叶片烘干称质量后记录总干物质量以及比叶质量，从而计算出叶面积指数。

6)干物质积累。不同生育期中，在各个小区按照平均茎蘖数原则挑选具有代表性的4株植株，将植株地上部分解为茎、叶、穗三部分。于烘箱105 ℃杀青30 min后，80 ℃烘干至恒定质量后称质量。

### 1.5 产量及构成因子测定

1)实际产量。每小区取4 m²测产，记录实际水

稻籽粒收获量，利用谷物水分速测定仪测定稻谷含水量，以 13.5%的籽粒含水量校准计算籽粒产量。

2)理论产量。以平均有效穗作为参考基准，于每个小区选取具代表性的 5 株植株，记录每穗粒数、结实率、千粒重。

### 1.6　稻米品质测定

取完整风干的稻谷 40 g，利用砻谷机(SY88-TH，BRIC，Korea)、碾米机(Pearlest，Kett，Japan)以及 WinRHIZO 扫描仪(Microtek，Shanghai，China)分别测定稻米的外观品质和加工品质。包括精米率、糙米率、整精米率、垩白度以及垩白粒率。

### 1.7　资源利用效率评价

通过上述指标测定结果，分别计算出籽粒温度生产效率(grain temperature production efficiency，GTPE)、籽粒光能生产效率(grain light energy production efficiency，GLEPE)、灌溉水分利用效率(irrigation water use efficiency，IWUE)、总水分利用效率(irrigation water use efficiency，TWUE)、肥料利用效率(fertilizer use efficiency，FUE)以及经济效益(economic benefit，EB)。

$$GTPE=GY/EAT \tag{1}$$

$$GLEOE=GY/TSR \tag{2}$$

$$IWUE=GY/IV \tag{3}$$

$$TWUE=GY/(IV+P) \tag{4}$$

$$FUE=GY/FAR \tag{5}$$

$$EB=TO-TI \tag{6}$$

式中：GY(grain yield per unit area)为单位面积籽粒产量，kg/hm$^2$；EAT(effective accumulated temperature)为有效积温，℃；TSR(total solar radiation)为太阳总辐射量 MJ/m$^2$；IV(irrigation volume)为灌水量，m$^3$；P 为降水量，m$^3$；FAR(fertilizer application rate)为肥料(氮肥＋钾肥＋磷肥)施用量，kg/hm$^2$；TO(total output)为总产出，元/hm$^2$；TI(total investment)为总投入，元/hm$^2$。

### 1.8　数据分析

数据统计及图表制作使用 Microsoft office Excel 2016，方差分析以及相关性分析采用 SPSS Statistics 21.0 软件。

## 2　结果与分析

### 2.1　环境指标

1)环境温度以及降雨量。由图 1 可知，在 2018 年大田试验的整个水稻生长季内，环境温度的变化相对平稳，基本没有出现环境温度急剧变化的情况。日平均温度维持在 26.5 ℃左右，其中高温出现在 6 月初到 8 月中旬，最高可达 38.3 ℃。9 月份温度逐渐下降。降水主要分布在 6 月中下旬、7 月中下旬以及 9 月中下旬。水稻降雨量在营养生长阶段相较于生殖生长阶段较多，生长季内未出现严重干旱的情况。

2)太阳辐射量。由图 2 可知，日太阳辐射量在 6 月份与 7 月份相对不稳定，于 7 月份达到最高值 32.8 MJ/m$^2$。在水稻的全生育期内，太阳总的辐射量达到 2 214.7 MJ/m$^2$。

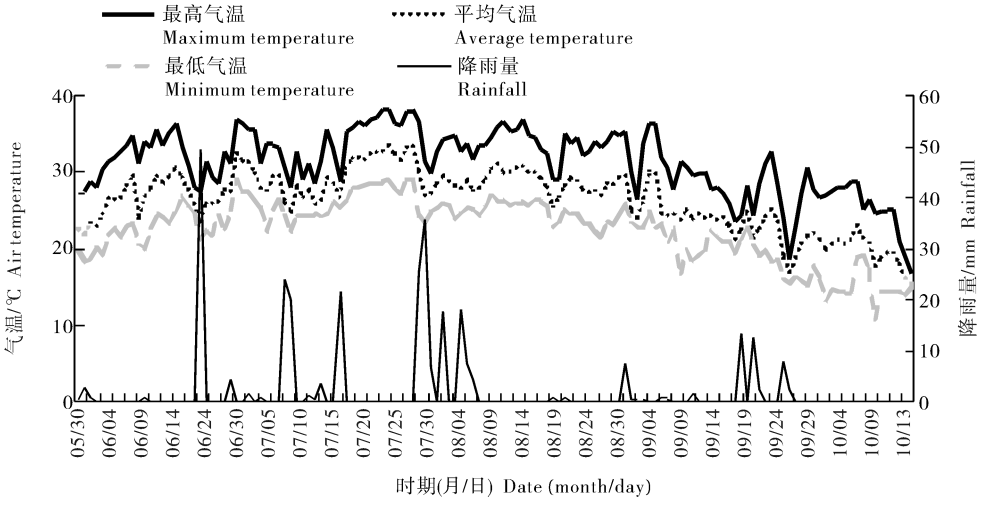



**图 1　2018 年水稻生长季的日最高气温、平均气温和最低气温以及降雨量**

Fig.1　Daily maximum temperature，average temperature and minimum temperature as well as rainfall during rice growing season in 2018

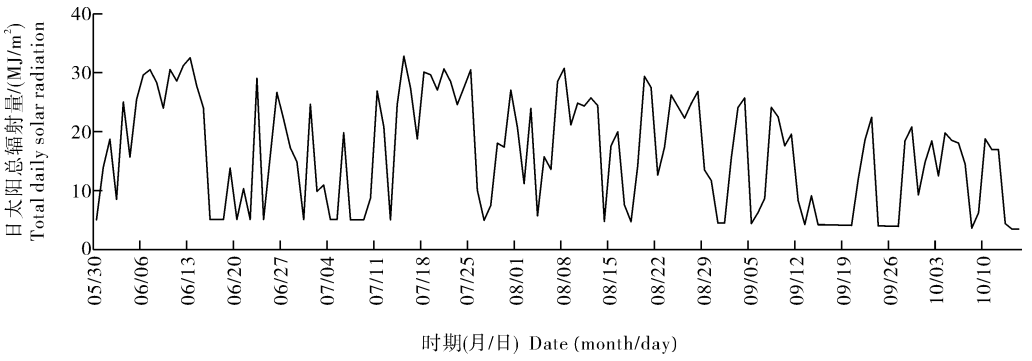



**图2 2018年水稻生长季内日太阳总辐射量**

Fig.2 Total daily solar radiation during the rice growing season in 2018

## 2.2 农艺及生理指标

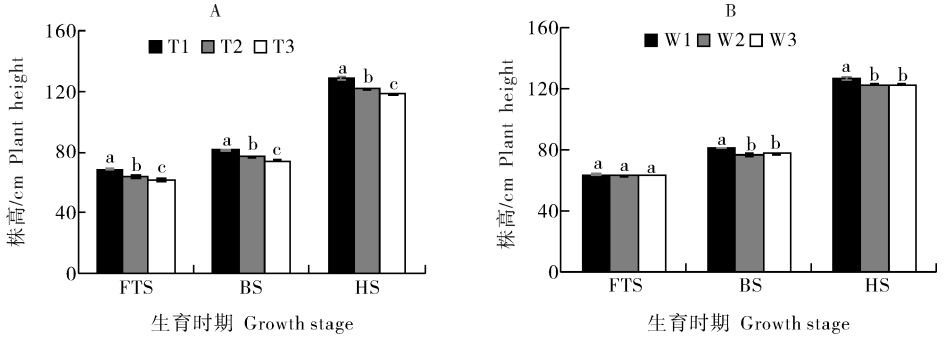
1)生育期。水稻的关键生育期记录如表2所示,随着播期的提前,水稻的生育期也相应提前。而从全生育期来看,播期提前可以明显延长全生育期,与T2相比,T1延长了3 d,T3缩短了6 d。

**表2 不同播期对水稻生育期的影响**

**Table 2 Effects of different sowing dates on rice growth period**

| 处理 Treatment | 播种日期 Sowing date (Month/day) | 出苗期 Seedling stage (Month/day) | 分蘖盛期 Full tiller stage (Month/day) | 抽穗开花期 Heading stage (Month/day) | 成熟期 Mature stage (Month/day) | 全生育期/d Whole growth period |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 05/30 | 06/07 | 07/19 | 09/09 | 10/02 | 125 |
| T2 | 06/09 | 06/15 | 07/29 | 09/16 | 10/09 | 122 |
| T3 | 06/19 | 06/27 | 07/31 | 09/20 | 10/13 | 116 |

2)株高。随着播期的提前,水稻的株高呈显著上升的趋势,即表现为T1>T2>T3。不同生育期内,与对照T2相比,T1分别增加了7.37%、6.02%和5.38%,T3分别减少了3.25%、3.25%和2.97%。就补灌时期而言,分蘖盛期处理相同,故无差异。在孕穗期和抽穗开花期,W1的株高显著高于W2和W3。其中孕穗期W1较W2和W3分别升高5.41%、4.87%,抽穗开花期W1较W2和W3分别升高3.18%、3.40%;W2与W3之间无差异。说明孕穗期对水稻株高的影响较大(图3)。




FTS:分蘖盛期 Full tiller stage; BS:孕穗期 Booting stage; HS:抽穗开花期 Heading stage.下同 The same as follows.

**图3 不同播期(A)和补灌时期(B)对水稻株高的影响**

Fig.3 Different sowing dates(A) and supplementary irrigation period(B) influence on rice plant height

3)茎蘖数。与对照T2相比,在分蘖盛期时,播期提前对茎蘖数无显著影响,而延迟播期则茎蘖数显著降低,在孕穗期以后,播期提前茎蘖数显著增加,播期延迟茎蘖数显著降低,即表现为T1>T2>T3。就补灌时期而言,分蘖盛期和抽穗开花期不同补灌处理间茎蘖数无显著差异,而在孕穗期W1的茎蘖数显著高于W2和W3,但W2与W3之间无差异,此外,从孕穗期至抽穗开花期W1的下降幅度明显高于W2与W3,说明W1的无效分蘖较多(图4)。

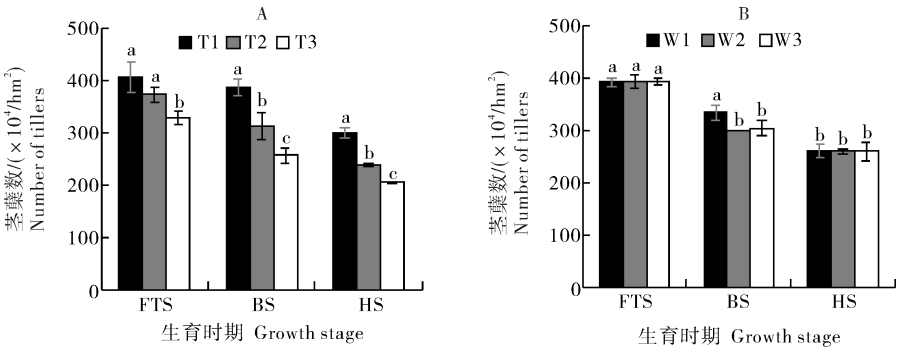
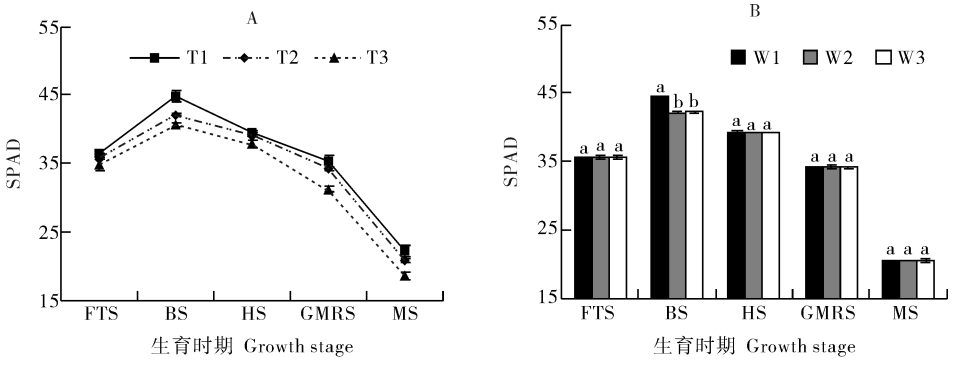



**图 4　不同播期(A)和补灌时期(B)对水稻茎蘖数的影响**

Fig.4　Different sowing dates(A) and supplementary irrigation periods(B) on the number of rice stems and tillers

4)叶片 SPAD 值。叶片 SPAD 值随着水稻生长发育进程呈现先增后减的趋势，其峰值出现在孕穗期，随着播期的延迟，叶片 SPAD 值呈现显著下降趋势，即表现为 T1＞T2＞T3。就补灌时期而言，除孕穗期外，其他各生育期内进行不同补灌处理对叶片 SPAD 值无显著影响。在孕穗期 W1 处理下叶片 SPAD 值显著高于 W2 和 W3，增幅分别为5.38％和 5.30％(图 5)。




GMRS：灌浆乳熟期 Grouting milk ripening stage；MS：成熟期 Mature stage.下同 The same as follows.

**图 5　不同播期(A)和补灌时期(B)对水稻叶片 SPAD 值的影响**

Fig.5　Different sowing dates(A) and supplementary irrigation periods(B) on the SPAD value of rice leaves

5)叶面积指数。叶面积指数随着水稻生长发育进程呈现出先增后减的趋势，在孕穗期达到峰值。随着播期的延迟，叶面积指数呈现显著下降趋势，即表现为 T1＞T2＞T3。就补灌时期而言，分蘖盛期补灌情况一致，故无差异，后期表现出 W1 显著高于 W2 和 W3，即 W1 在孕穗期、抽穗开花期、灌浆乳熟期和成熟期较 W2、W3 平均升高 14.39％、19.86、16.63％和 18.06％，而 W2 和 W3 之间无显著差异，说明孕穗期补灌可提高叶片光合能力，维持较高的光合效率，有利于干物质积累(图 6)。

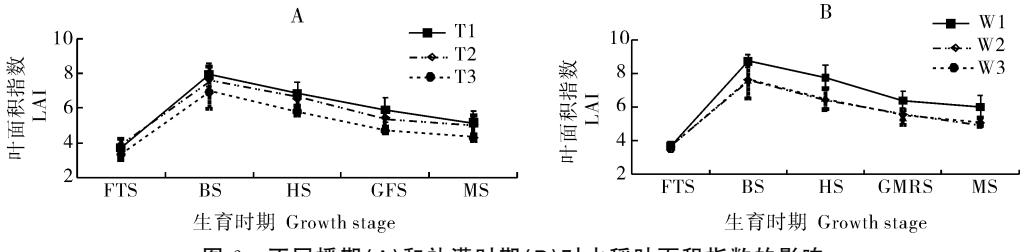



**图 6　不同播期(A)和补灌时期(B)对水稻叶面积指数的影响**

Fig.6　Different sowing dates(A) and supplementary irrigation periods(B) influence on rice leaf area index

6)干物质积累。如表 3 所示，播期提前对干物质积累量的增加起到正效应。T1 与 T2 相比，除分蘖盛期外，其余各关键生育期的干物质积累均表现为 T1 显著大于 T2，从孕穗期至成熟期分别增加 21.31％、13.39％、9.19％和 8.10％，T3 与 T2 相比，干物质积累在分蘖盛期、孕穗期和抽穗开花期显著

降低，在灌浆乳熟期和成熟期无显著变化。就不同补灌时期而言，与对照 W2 相比，除分蘖盛期外，其余各关键生育时期均为 W1 显著大于 W2，W3 与 W2 相比，灌浆乳熟期以后，干物质积累量显著增加。其中，在成熟期时，各处理间的差异均达到显著水平，其干物质的积累量表现为 W3＞W1＞W2，W1 较对照升高了 8.24%，W3 较对照升高了 12.33%。表明灌浆乳熟期补灌对效果最为适宜，利于籽粒灌浆及发育。

## 2.3 产量及其构成因子

随着播期提前，产量显著升高。其中，有效穗数和结实率差异显著，而每粒穗数和千粒重无显著差异。与 T2 相比，T1 的理论产量和实际产量均有显著上升，其增幅分别为 10.28%和 16.72%。T3 的理论产量和实际产量均有下降，其降幅分别为 12.58%和 10.79%。对水稻进行不同补灌处理后，有效穗数变化不显著，而每穗粒数、结实率、千粒重等均变化显著，理论产量和实际产量在不同处理间表现出显著差异。其中，与 W2 相比，W1 的理论产量和实际产量均显著上升，其增幅分别为 9.78%与 14.27%。W3 的理论和实际产量分别达到 12.27 t/hm² 和 11.67 t/hm²，其增幅显著，分别达到 17.64%与 23.36%。理论产量和实际产量均表现出 W3＞W1＞W2(表 4)。

**表 3 不同播期和补灌时期对水稻干物质积累的影响**

**Table 3 Effects of different sowing dates and different supplementary irrigation periods on rice dry matter accumulation**

t/hm²

| 处理 Treatment | 分蘖盛期 FTS | 孕穗期 BS | 抽穗开花期 HS | 灌浆乳熟期 GMRS | 成熟期 MS |
|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 3.95a | 8.14a | 12.79a | 16.52a | 19.48a |
| T2 | 3.46a | 6.71b | 11.28b | 15.13b | 18.02b |
| T3 | 2.70b | 5.85c | 10.25c | 14.04b | 17.06b |
| W1 | 3.41a | 7.59a | 13.61a | 16.63a | 19.58b |
| W2 | 3.40a | 6.70b | 11.24b | 15.23b | 18.09c |
| W3 | 3.40a | 6.79b | 11.26b | 17.10a | 20.32a |

注：同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上呈显著差异。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate that the different treatments are significantly different at 0.05 level. The same as follows.

**表 4 不同播期和补灌时期对水稻产量和产量构成的影响**

**Table 4 Effects of different sowing dates and different supplementary irrigation periods on rice yield and yield components**

| 处理 Treatment | 有效穗数/(×10⁴/hm²) Panicles | 每穗粒数 Spikelets per panicle | 结实率/% Filled grains | 千粒重/g 1 000-grain weight | 理论产量/(t/hm²) Theoretical yield | 实际产量/(t/hm²) Grain yield |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 255.93a | 181.00a | 88.29a | 28.11a | 11.48a | 11.03a |
| T2 | 240.67b | 183.33a | 84.16a | 28.08a | 10.41b | 9.45b |
| T3 | 225.57c | 183.67a | 78.38b | 28.01a | 9.10c | 8.43c |
| W1 | 248.96a | 192.66a | 84.64b | 28.21b | 11.45b | 10.81b |
| W2 | 242.00a | 183.45b | 83.82b | 28.06b | 10.43c | 9.46c |
| W3 | 241.00a | 184.00b | 94.61a | 29.30a | 12.27a | 11.67a |

## 2.4 稻米品质

随着播期的不同，稻米的外观品质与加工品质都有所变化。播期主要对稻米加工品质(糙米率、精米率和整精米率)中整精米率有显著影响，播期提前或延迟都会显著降低整精米率，T1 与 T3 分别较对照 T2 降低 7.23%与 3.02%，而播期提前或延迟对糙米率影响不显著。不同播期对稻米外观品质(垩白粒率与垩白度)影响显著，播期提前会显著降低垩白粒率、垩白度，即 T1 的垩白粒率与垩白度分别较对照 T2 降低了 41.11%与 42.11%，而播期延迟对垩白粒率与垩白度的影响不显著。

不同补灌处理对稻米加工品质指标精米率和整精米率有影响，与 W2 相比，W3 的精米率和整精米率分别较对照 W2 显著升高了 1.33%和 1.88%，糙米率无显著差异，而 W1 的加工品质与 W2 无显著差异。不同补灌处理对稻米外观品质影响显著，与 W2 相比，W3 的垩白粒率与垩白度分别较对照 W2 显著降低了 10.70%与 50.63%，W1 与 W2 无显著差异。说明孕穗期补灌并没有改善稻米加工品质与外观品质，灌浆乳熟期补灌可以提高稻米加工品质与外观品质(表 5)。

表 5　不同播期和补灌时期对稻米外观品质和加工品质的影响

Table 5　Effects of different sowing dates and different supplementary irrigation periods on appearance quality and processing quality of rice

%

| 处理 Treatment | 糙米率 Brown rice rate | 精米率 Milled rice rate | 整精米率 Whole head rice rate | 垩白粒率 Chalky grain rate | 垩白度 Chalkiness |
|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 80.56a | 71.08b | 64.20c | 5.93b | 1.43b |
| T2 | 81.16a | 72.15a | 69.20a | 10.07a | 2.47a |
| T3 | 80.69a | 71.50ab | 67.11b | 10.57a | 2.93a |
| W1 | 81.05a | 70.62b | 68.04b | 10.27a | 2.33a |
| W2 | 81.18a | 71.31b | 68.22b | 10.00a | 2.37a |
| W3 | 81.21a | 72.26a | 69.50a | 8.93b | 1.17b |

## 2.5　资源利用效率评价

1)旱作栽培对光温水肥利用效率的影响。不同播期下光温水肥资源利用效率各项指标均以 T1 最高，T1 的 GTPE、GLEPE、FUE、IWUE 和 TWUE 分别较对照 T2 显著升高了 12.83%、12.50%、16.70%、17.39% 和 15.61%。T3 的 GTPE 和 GLEPE 与对照 T2 没有显著差异，但 T3 的 FUE、IWUE 和 TWUE 分别较对照 T2 显著下降了 10.89%、11.18% 和 10.78%。不同补灌处理光温水肥资源利用效率各项指标均以 W3 最高、W2 最低，W1 的 GTPE、GLEPE、FUE、IWUE 和 TWUE 分别较对照 W2 显著升高了 14.32%、14.58%、14.23%、14.29% 和 14.07%，W3 的 GTPE、GLEPE、FUE、IWUE 和 TWUE 分别较对照 W2 显著升高了 23.21%、25.00%、23.34%、23.34% 和 23.33%(表 6)。

2)旱作栽培对经济效益的影响。不同播期、补灌处理下的农业生产总投入相差不大，因产量差异导致总产出差异明显，最终导致经济效益有所不同。不同播期下的总产出、经济效益大小均为：T1＞T2＞T3，T1 的总产出和经济效益分别比对照 T2 升高 7.72% 和 15.83%，T3 的总产出与经济效益分别比对照 T2 降低 10.86% 与 22.25%。不同补灌时期下的总产出、经济效益大小均为：W3＞W1＞W2，W1 的总产出和经济效益分别比对照 W2 升高 14.28% 和 29.25%，W3 的总产出与经济效益高达 25 667 元/$hm^2$ 和 15 030 元/$hm^2$，分别比对照 W2 升高 23.37% 与 47.87%(表 7)。

表 6　不同播期和补灌时期对光温水肥资源利用效率的影响

Table 6　Effects of different sowing dates and supplementary irrigation periods on the efficiency of light, temperature, water and fertilizer utilization

| 处理 Treatment | 籽粒温度生产效率/(kg/(hm²·℃)) GTPE | 籽粒光能生产效率/(g/MJ) GLEPE | 肥料利用效率/(kg/kg) FUE | 灌溉水分利用效率/(kg/m³) IWUE | 总水分利用效率/(kg/m³) TWUE |
|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 5.19a | 0.54a | 22.29a | 19.85a | 3.11a |
| T2 | 4.60b | 0.48b | 19.10b | 16.91b | 2.69b |
| T3 | 4.42b | 0.47b | 17.02c | 15.02c | 2.40c |
| W1 | 5.27b | 0.55b | 21.83b | 19.44b | 3.08b |
| W2 | 4.61c | 0.48c | 19.11c | 17.01c | 2.70c |
| W3 | 5.68a | 0.60a | 23.57a | 20.98a | 3.33a |

表 7　不同旱作栽培处理对经济效益的影响

Table 7　The impact of different dry farming treatments on economic benefits

元/$hm^2$

| 处理 Treatment | 总产出 Total output | 农资成本 Agricultural materials cost | | | 农机成本 Agricultural machinery cost | | | | 人工成本 Labor cost | | 总投入 Total investment | 经济效益 Economic benefit |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 种子 Seed | 肥料 Fertilizer | 农药 Pesticide | 耕整 Tillage | 机直播 Machinery direct seeding | 灌溉 Irrigation | 机收 Machinery harvest | 撒肥 Fertilization | 打药 Spray | | |
| T1 | 22 403 | 1 350 | 2 609 | 1 500 | 600 | 1 000 | 447 | 1 050 | 580 | 1 500 | 10 636 | 11 767 |
| T2 | 20 797 | 1 350 | 2 609 | 1 500 | 600 | 1 000 | 449 | 1 050 | 580 | 1 500 | 10 638 | 10 159 |
| T3 | 18 539 | 1 350 | 2 609 | 1 500 | 600 | 1 000 | 451 | 1 050 | 580 | 1 500 | 10 640 | 7 899 |
| W1 | 23 775 | 1 350 | 2 609 | 1 500 | 600 | 1 000 | 449 | 1 050 | 580 | 1 500 | 10 638 | 13 137 |
| W2 | 20 805 | 1 350 | 2 609 | 1 500 | 600 | 1 000 | 452 | 1 050 | 580 | 1 500 | 10 641 | 10 164 |
| W3 | 25 667 | 1 350 | 2 609 | 1 500 | 600 | 1 000 | 448 | 1 050 | 580 | 1 500 | 10 637 | 15 030 |

## 3 讨 论

### 3.1 不同播期和补灌时期对水稻生长发育的影响

水稻的生长发育特性受到多种因素的影响，除自身遗传因素外，很大程度上取决于外部环境因子的作用，如播期、灌溉方式等[16]。在水稻旱作栽培模式下，播期提前导致水稻生育期延长、生长发育特性改变、产量提高及稻米品质得到改善。前人研究表明，播期延迟导致生育期缩短的主要原因是缩短了营养生长阶段，即加快了营养生长向生殖生长的转变[17-18]，本试验也得到了相同的结果。此外，本研究还发现，水稻播期提前，其单位面积茎蘖数、叶片SPAD值、叶面积指数以及干物质积累量增加，许有尊等[7]、杜斌等[17]、练红等[18]在杂交旱稻的研究中得到相似结论。适宜时期的水分供应与植株的生长发育状况关系密切，与对照W2相比，W3表现出干物质积累量显著增加，且在成熟期表现出W3＞W1＞W2，这与前人在灌浆乳熟期的水分管理试验中取得的结果相似[19-20]。表明在灌浆乳熟期进行补灌处理可促进水稻籽粒灌浆，有利于干物质的积累。

### 3.2 不同播期和补灌时期对稻米产量和品质的影响

本研究结果表明，在旱作栽培模式下，播期提前水稻实际产量和理论产量均显著提高，同时稻米的垩白粒率和垩白度显著降低。产量提高很大程度上与水稻有效穗数的增加有关，这与前人的研究结果相似[7,17]。此外，本研究中播期延迟对糙米率与精米率的影响均不显著，而黄仁洙等[6]研究发现旱作水稻播种期提前，糙米率显著升高，播种期延迟，糙米率显著下降，可能由于试验所处的环境与具体播种时间不同，品种特性有差异，从而导致稻米品质的研究结果有所不同。本研究对水稻进行不同生育时期的补灌处理，各处理间水稻产量差异显著，表现为W3(分蘖期＋灌浆乳熟期补灌)＞W1(分蘖期＋孕穗期补灌)＞W2(分蘖期＋孕穗期补灌)，灌浆乳熟期补灌处理产量增幅大的原因主要与千粒重和结实率的增加有关，前人在水肥一体化的滴灌试验中也得到相似结果[21]。本研究中W3与W1和W2相比，整精米率和精米率显著提升，而垩白粒率和垩白度显著下降，即表明在灌浆乳熟期补灌可改善稻米品质，这与段骅等[22]的研究结果相一致。

### 3.3 不同播期和补灌时期对稻田资源利用效率的影响

水稻产量是影响资源利用效率的主要因素。本研究结果表明播期和补灌时期均对水稻生产光温水肥资源利用效率、经济效益产生显著的影响。降水是旱作水稻的主要水分来源。本研究中不同播种期的降雨量变化较大，降雨量大小为T1＞T2＞T3。不同播种期中由于T1产量最高，最终以T1的光温水肥资源利用效率最高。本研究中不同补灌时期的光温水肥资源利用效率大小为W3＞W1＞W2，W1与W3的光温水肥资源利用效率各项指标均比对照W2显著提高。说明旱作水稻关键生育期补灌有利于提高资源利用效率，这与前人研究结果[23-24]一致。

本研究结果表明在稻-麦轮作系统下，为缓解茬口矛盾，并有效地利用光温资源，水稻生产季需要适时抢播，建议水稻的安全播种期在5月下旬至6月上旬，一般不迟于6月15日。在灌溉水有限的情况下，应优先保证分蘖期与灌浆乳熟期的补灌，分蘖期补灌可以保证足够的苗数，构建足够的群体；灌浆乳熟期补灌有助于籽粒灌浆，提高结实率和千粒重，达到协同提高产量与资源利用效率的目的。本研究尚未开展不同年份与地区的重复性试验，研究结果仍有待进一步验证。

## 参考文献 References


[1] BOUMAN B, HUMPHREYS E, TUONG T P, et al. Rice and water[J]. Advances in agronomy, 2007, 92(4): 187-237.

[2] PIMENTEL D, BERGER B, FILIBERTO D, et al. Water resources: agricultural and environmental issues[J]. BioScience, 2004, 54(10): 909-918.

[3] 罗越浩.加强水资源管理促进水资源可持续利用的研究[J].农业科技与信息，2018(20)：33，39. LUO Y H. Research on strengthening water resources management and promoting sustainable utilization of water resources [J]. Information of agricultural science and technology, 2018(20): 33, 39 (in Chinese).

[4] 周海燕，杨炳南，颜华，等. 旱作移栽机械产业发展现状及展望[J]. 农业工程，2015，5(1)：12-13，16. ZHOU H Y, YANG B N, YAN H, et al. Status quo and development prospects of dry land transplanting machine industry[J]. Agricultural engineering, 2015, 5(1): 12-13, 16 (in Chinese with English abstract).

[5] CHEN Z K, LI P, JIANG S S, et al. Evaluation of resource and energy utilization, environmental and economic benefits of rice water-saving irrigation technologies in a rice-wheat rotation system[J/OL]. Science of the total environment, 2020, 757(9): 143748[2021-11-29].https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143748.

[6] 黄仁洙，常锐，张燕芝，等. 旱作水稻播种期研究[J]. 辽宁农业科学，1986(2)：10-13. HUANG R Z, CHANG R, ZHANG Y Z, et al. Study on sowing time of rice in dry farming [J]. Lia-

oning agricultural sciences，1986(2)：10-13 (in Chinese).

[7] 许有尊，吴文革，陈刚，等. 杂交旱稻丰产节水栽培关键技术研究与集成应用[J]. 中国稻米，2017，23(4)：39-43. XU Y Z，WU W G，CHEN G，et al. Study and integration of key techniques for high-yielding and water-saving cultivation of upland hybrid rice [J]. China rice，2017，23(4)：39-43 (in Chinese with English abstract).

[8] 刘忠良，刘岩，毕振宇，等.文登区不同播期对旱稻生长及产量的影响[J]. 农业科技通讯，2018(5)：161-163. LIU Z L，LIU Y，BI Z Y，et al. Effects of different sowing dates on growth and yield of upland rice in wendeng district [J]. Bulletin of agricultural science and technology，2018(5)：161-163 (in Chinese).

[9] 邵玺文，阮长春，赵兰坡，等. 分蘖期水分胁迫对水稻生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报，2005，27(1)：6-10. SHAO X W，RUAN C C，ZHAO L P，et al. Effects of water stress on growth and yield of rice in tillering stage [J]. Journal of Jilin Agricultural University，2005，27(1)：6-10 (in Chinese with English abstract).

[10] 段素梅，杨安中，黄义德，等. 干旱胁迫对水稻生长、生理特性和产量的影响[J]. 核农学报，2014，28(6)：1124-1132. DUAN S M，YANG A Z，HUANG Y D，et al. Effects of drought stress on growth and physiological feature and yield of various rice varieties[J]. Journal of nuclear agricultural sciences，2014，28(6)：1124-1132 (in Chinese with English abstract).

[11] 陈亮，汪本福，江元元，等. 孕穗期干旱及复水对水稻叶片生理生化和产量的影响[J]. 中国稻米，2016，22(1)：59-64. CHEN L，WANG B F，JIANG Y Y，et al. Effects of drought and rewatering on rice physiological and biochemical indexes of leaves and grain yield at booting stage[J]. China rice，2016，22(1)：59-64 (in Chinese with English abstract).

[12] 段素梅，杨安中，吴文革，等. 孕穗期干旱胁迫对超级稻后期光合性能及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究，2017，35(6)：104-108，260. DUAN S M，YANG A Z，WU W G，et al. Effects of drought stress at booting stage on photosynthesis and yield of super rice [J]. Agricultural research in the arid areas，2017，35(6)：104-108，260 (in Chinese with English abstract).

[13] 蔡昆争，吴学祝，骆世明，等. 抽穗期不同程度水分胁迫对水稻产量和根叶渗透调节物质的影响[J]. 生态学报，2008，28(12)：6148-6158. CAI K Z，WU X Z，LUO S M，et al. Influences of different degrees of water stress at heading stage on rice yield and osmolytes in leaves and roots [J]. Acta ecologica sinica，2008，28(12)：6148-6158 (in Chinese with English abstract).

[14] 杨晓龙，汪本福，陈亮，等. 抽穗期干旱对水稻生理性状和产量的影响[J]. 中国稻米，2015，21(4)：138-141，146. YANG X L，WANG B F，CHEN L，et al. Effects of drought stress on rice physiological traits and grain yield at heading stage[J]. China rice，2015，21(4)：138-141，146 (in Chinese with English abstract).

[15] 李萍，曹鹏，江颂颂，等. 湖北省旱稻种植现状及其发展前景[J]. 湖北农业科学，2020，59(8)：17-20，24. LI P，CAO P，JIANG S S，et al. Current status and development prospect of upland rice planting in Hubei Province [J]. Hubei agricultural sciences，2020，59(8)：17-20，24 (in Chinese with English abstract).

[16] 姚义，张洪程，霍中洋，等.播种期对直播水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学，2009(6)：97-99. YAO Y，ZHANG H C，HUO Z Y，et al. Effect of seeding date on yield of the direct seeding rice [J]. Jiangsu agricultural sciences，2009(6)：97-99 (in Chinese with English abstract).

[17] 杜斌，陈留根，赵田芬，等. 直播播期对不同类型水稻品种生育期及产量形成的影响[J]. 湖南农业科学，2012(15)：18-21. DU B，CHEN L G，ZHAO T F，et al. Effects of direct-seeding date on growth period and grain yield of different genotypes of rice [J]. Hunan agricultural sciences，2012(15)：18-21 (in Chinese with English abstract).

[18] 练红，周海涛，陈维建，等. 播种期和留桩高度对再生稻产量及产量构成因素的影响[J]. 湖南农业科学，2017(4)：28-31. LIAN H，ZHOU H T，CHEN W J，et al. Effects of sowing dates and stubble height of retaining piles on grain yield and yield components of ratooning rice [J]. Hunan agricultural sciences，2017(4)：28-31 (in Chinese with English abstract).

[19] 邵玺文，马景勇，童淑媛，等. 灌浆乳熟期不同水分处理对水稻产量的影响[J].灌溉排水学报，2006(3)：41-43. SHAO X W，MA J Y，TONG S Y，et al. Effect of different water disposal on growth and yield of rice in milking stage[J].Journal of irrigation and drainage，2006(3)：41-43 (in Chinese with English abstract).

[20] DENG N，LING X，SUN Y，et al. Influence of temperature and solar radiation on grain yield and quality in irrigated rice system[J]. European journal of agronomy，2015，64：37-46.

[21] 许葵花.旱作水稻水肥一体化栽培管理技术[J]. 吉林农业，2017(22)：41. XU K H. Integrated cultivation and management technology of water and fertilizer in upland rice[J]. Agriculture of Jilin，2017(22)：41 (in Chinese).

[22] 段骅，唐琪，剧成欣，等.抽穗灌浆早期高温与干旱对不同水稻品种产量和品质的影响[J]. 中国农业科学，2012，45(22)：4561-4573. DUAN H，TANG Q，JU C X，et al. Effect of high temperature and drought on grain yield and quality of different rice varieties during heading and early grain filling periods [J]. Scientia agricultura sinica，2012，45(22)：4561-4573 (in Chinese with English abstract).

[23] 邢佳伊.干旱锻炼和施氮对小麦生理特性及水分利用效率的影响[D].北京：中国农业科学院，2021. XING J Y. Effects of drought priming and nitrogen application on physiological characteristics and water use efficiency of wheat[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2021 (in Chinese with English abstract).

[24] 宋维周，刘仁旺，江颂颂，等. 节水抗旱稻与高产水稻不同叶位光合特征对土壤水分变化的响应[J]. 华中农业大学学报，2019，38(2)：45-54. SONG W Z，LIU R W，JIANG S S，et al. Responses of photosynthetic characteristics of different leaf po-

sitions in water-saving drought-tolerant rice and high-yield rice to soil moisture change[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(2): 45-54 (in Chinese with English abstract).

# Effects of sowing dates and periods of supplementary irrigation on yield, quality and resource utilization efficiency of water-saving and drought-resistant rice

DU Yunfeng, JIANG Songsong, CHEN Zongkui, MAO Zilin, ZHANG Zhijuan, CAO Cougui, LI Ping

*College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*

**Abstract** The water-saving and drought-resistant rice variety Hanyou 73 was used to conduct field experiments with sowing dates including T1 (May 30), T2 (June 9th, farmers' customary practices), T3 (June 19th) and periods of supplementary irrigation including W1 (tillering stage+booting stage), W2 (tillering stage+heading flowering stage, farmers' customary practices), W3 (tillering stage+milk filling stage) to comprehensively study the effects of sowing dates and periods of supplementary irrigation on the growth and development, yield and quality, and resource utilization efficiency of rice under dry cultivation. The results showed that when the sowing date was advanced, the plant height, number of tillers, yield, and water use efficiency of rice all increased significantly, and its yield reached 11.03 t/hm$^2$ with an increase of 16.72% compared with that of T2. Meanwhile, the chalkiness was significantly reduced, and the economic benefit was increased by 15.81%. When the sowing date was delayed, the yield and total water use efficiency were significantly reduced, and the rice quality did not change significantly. Compared with W2, W1 significantly increased rice yield and water use efficiency, but rice quality did not change significantly. W3 was more significant in the increase of yield, water use efficiency and economic benefits, reaching 11.67 t/hm$^2$, 3.33 kg/m$^3$ and 15 028 yuan/hm$^2$, respectively. At the same time, rice quality was significantly improved. Therefore, the sowing date for the rice (drought)-wheat annual rotation system in Hubei Province should be appropriately advanced, and it is recommended to sow before mid-June. In the case of limited irrigation water, priority should be given to irrigation of the W3 period (tillering stage+milk filling stage).

**Keywords** water-saving and drought-resistant rice; dry cultivation; rice-wheat rotation; rice quality; resource utilization efficiency; sowing date; supplementary irrigation

(责任编辑:张志钰)