

马云静,张志娟,宋国庆,等.稻季旱作对稻麦轮作系统周年产量及资源利用效率的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(6):145-155.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.06.015

稻季旱作对稻麦轮作系统周年产量 及资源利用效率的影响

马云静¹,张志娟¹,宋国庆¹,赵宁杰¹,彭潇¹,曹凑贵¹,谢恒星²,李萍¹

1. 华中农业大学植物科学技术学院,武汉 430070; 2. 渭南师范学院环境与生命科学学院,渭南 714099

摘要 为优化稻麦轮作模式、提高资源利用效率,以3个水稻品种(籼型杂交稻早优73、籼型常规稻黄华占、粳粳杂交稻甬优4949)和1个小麦品种(郑麦9023)为试验材料,设置稻季的常规淹灌对照和旱作处理,研究稻季旱作对稻麦两季的植株生长发育、产量及资源利用效率的影响。结果显示:稻季旱作下,除抽穗开花期甬优4949的茎蘖数外,不同水稻品种的株高、茎蘖数和叶面积均显著降低,降幅分别为6.8%~13.2%、8.2%~35.7%、26.6%~44.7%;其中,早优73具有较高的叶面积且在旱作后降幅最小,黄华占的叶面积最低且旱作后降幅较大,甬优4949的茎蘖数在旱作后变幅最小;早优73的实际产量由7.46 t/hm²降至5.32 t/hm²,黄华占由6.23 t/hm²降至4.46 t/hm²,甬优4949由7.60 t/hm²降至5.27 t/hm²;稻季旱作的后季小麦的株高、分蘖数、叶面积、倒二叶长、叶宽、小穗数、穗长在部分关键生育期显著大于淹灌对照,且稻季旱作后小麦的干物质积累及产量显著提高,其产量为4.49 t/hm²,比对照提高了7.7%;稻季旱作后稻季、麦季及周年的水分利用效率 and 经济效益均显著提高,稻麦周年水分利用率提高了151.9%~156.1%,稻麦周年经济效益提高了8.7%~34.8%,但稻麦轮作周年的氮肥偏生产力、光能利用效率和积温利用效率均降低,降幅分别为14.4%~15.8%、13.8%~16.7%和14.1%~15.8%。因此,水稻旱作(特别是早优73)在湖北省稻-麦周年轮作系统中能获得较高的经济效益。

关键词 稻麦轮作; 水稻; 旱作; 生长发育; 产量; 资源利用效率

中图分类号 S511; S512 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)06-0145-11

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国最重要的粮食作物之一,水稻的高产优质稳产对于我国粮食安全具有重要意义。近年来干旱、高温等自然气候变化频发,可利用淡水资源减少,耕地面积逐年减少,人口增加导致粮食需求增长,供求矛盾日益突出^[1-2]。水稻生产中灌溉用水量大,据统计可消耗农业用水的60%^[3-4]。因此,水稻旱作栽培为解决农业用水紧张开辟了新途径,研究水稻节水灌溉技术和旱作栽培,对我国农业的发展具有重要意义^[5]。稻麦轮作是我国非常重要的种植模式,主要集中在长江中下游地区^[6-7],近年来,由于农村劳动力逐渐流失、水稻育秧移栽工作量大等因素,水稻的发展受到了限制。水稻旱直播具有工序简单、减少劳动力等优点^[8]。旱作对水稻的产量品质及资源利用效率等均有显著影响^[9]。有研究发现,在水稻生育时期进行不同的节水

灌溉处理均使得水稻产量降低^[10],而合理的轮作制度可以提高土壤质量,从而提高作物产量^[11]。也有研究表明,与移栽水稻后茬小麦相比,旱直播水稻的后茬小麦能够增产,主要是旱直播水稻收获后使土壤中碱解氮、速效磷和速效钾含量提高^[12]。金朝强^[13]研究不同水稻种植方式对水稻及后茬小麦生长发育的影响,结果显示,旱直播水稻-小麦轮作系统的经济效益整体较高,更适合大面积推广。

随着产业结构调整和农村农业劳动力减少,水稻直播、旱作等轻简栽培是发展的必然趋势^[14]。陈海玉^[15]研究发现半期旱作处理下所有水稻品种的产量无显著降低,其光、温资源利用效率无显著变化,但经济效益提高。当前,关于优化稻麦轮作系统、提升资源利用效率以及简化稻麦轮作模式以增加经济效益的研究尚少,故有必要对优化稻麦轮作

收稿日期: 2024-11-15

基金项目: 国家重点研发计划专项(2024YFD2300302)

马云静, E-mail: 2795284464@qq.com

通信作者: 李萍, E-mail: sleep1022@mail.hzau.edu.cn

模式、提高资源利用效率和经济效益展开更深入的研究。本研究以3个水稻品种(籼型杂交稻早优73、籼型常规稻黄华占、籼粳杂交稻甬优4949)和1个小麦品种(郑麦9023)为试验材料,设置稻季的常规淹灌对照和旱作处理,探究稻季旱作对稻麦两季的植株生长发育、产量及资源利用效率的影响,以期对稻-麦轮作模式下的水稻旱作栽培提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2021—2022年在湖北省武汉市华中农业大学校内试验田(114°29'E, 30°29'N)的防雨棚内进行,试验地的防雨棚(长35 m、宽25 m、高5 m)顶部防雨设施采用透明聚乙烯薄膜制成,在水稻和小麦生长季降雨时顶部防雨设施保持关闭。大田土壤为黏壤土,pH 6.31,有机质9.8 g/kg,总氮0.59 g/kg,总磷0.78 g/kg,总钾11.8 g/kg。

本试验水稻季选用3个水稻品种,分别为籼型常规稻黄华占、籼型杂交稻早优73、籼粳杂交稻甬优4949,小麦季选用郑麦9023作为供试品种。

1.2 试验设计与田间管理

水稻季试验采用裂区设计,以水稻旱作(DS,土壤水势-30 kPa左右)和常规淹灌(CK)2种水稻种植方式为主区,3个水稻品种为副区,4次重复,共24个小区,每小区面积9 m²。后茬麦季试验,设置水稻旱作后季小麦(DS)和水稻淹灌后季小麦(CK)2个处理,采用条播的种植方式,麦季不进行差异处理。

大田试验中,为了防止水分和养分在处理或小区间扩散,主区间用混凝土墙(宽20 cm、深40 cm)隔开;小区间用田埂(宽50 cm、高20 cm)隔开,用黑色塑料薄膜覆盖田埂并且延伸至地表以下20 cm。

水稻淹灌处理于5月30日开始育秧,秧龄25 d,在3叶1心期人工移栽,移栽密度为行距30 cm株距13 cm,2苗/穴。水稻旱作处理于6月4日开始进行旱直播,播种前浸种催芽,播种量为45 kg/hm²。稻季施肥淹灌处理和旱作处理统一按照施N量146.2 kg/hm²水平,分基肥和追肥多次施入。基肥使用复合肥(17-17-17),追肥使用尿素(46% N),按照 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{分蘖肥}}:m_{\text{促花肥}}=5:3:2$ 的比例施入,磷肥和钾肥作为基肥一次性施入。

水稻收获后移除地上部水稻残茬,用旋耕机旋耕整地,11月6日进行小麦播种,采用人工条播,行距25 cm,种植密度为162.3 kg/hm²。施N量90

kg/hm²,磷肥和钾肥作为基肥同比例一并施入,使用复合肥(17-17-17)。稻季和麦季的杂草使用除草剂和人工去除。其他病虫草害控制技术各处理相同,并参考地区农田管理标准。

1.3 稻季测定指标及方法

1)株高:于各小区选定10株进行测量。分别于分蘖盛期和抽穗开花期测定,抽穗前测量土面至叶尖的平均高度,抽穗后测量土面至最高穗顶的平均高度。

2)茎蘖数:在分蘖盛期和抽穗开花期按照平均分蘖数原则对每个小区进行统计。

3)叶面积:在分蘖盛期和抽穗开花期每个小区选取具有代表性的3株植株使用叶面积仪(Li-Cor Model 3100, LI-COR Inc Lincoln, NE, 美国)测定叶面积。

4)干物质:在抽穗开花期和成熟期,按照平均茎蘖数的原则挑选3株代表性的植株,将地上部分分解为茎、叶、穗3部分,于105℃烘箱杀青30 min,80℃烘干至恒后称质量。

5)产量:在谷粒成熟时,每小区按1 m²收割计产,同时使用谷物水分速测定仪测定含水量,以13.5%籽粒含水量校准计算实际产量。另根据各小区平均有效穗选取5株植株,记录千粒重、结实率和穗粒数等指标,计算理论产量。

1.4 麦季测定指标及方法

1)农艺性状:每个小区选取10株小麦,于分蘖盛期、拔节期、始穗期和灌浆期对小麦的株高、分蘖数、倒二叶叶长、叶宽及叶面积进行统计。株高测量时抽穗前测量土面至叶尖的平均高度,抽穗后测量土面至最高穗顶的平均高度。于灌浆期对小麦的小穗数和穗长进行统计。

2)干物质:在苗期、分蘖盛期、拔节期、抽穗期和灌浆将植株挖出洗净泥土,按照平均茎蘖数的原则挑选3株代表性的植株,分解为根、为茎、叶、穗等器官,于烘箱105℃下进行杀青30 min,80℃下烘干至恒质量后称质量。

3)产量:每小区按1 m²收割计产,同时使用谷物水分速测定仪测定含水量,折算成含水量为14%的麦粒含水量为实际产量。另根据各小区的平均有效穗每小区选取10株,测量千粒重和穗粒数等指标,计算理论产量。

1.5 资源利用效率计算

分别计算出稻季、麦季以及周年的灌溉水分利

用效率(irrigation water use efficiency, IWUE, 公式中表示为 E_{WUE})、氮肥偏生产力(partial factor productivity of nitrogen, PFPN, 公式中表示为 P_N)、光能利用效率(light energy use efficiency, LEUE, 公式中表示为 E_{LEU})、积温利用效率(accumulated temperature use efficiency, ATUE, 公式中表示为 E_{ATU})以及经济效益(economic benefit, EB, 公式中表示为 E)。

$$E_{WUE} = Y/V_i \quad (1)$$

$$P_N = Y/I_{TN} \quad (2)$$

$$E_{LEU} = Y/G_{TSR} \quad (3)$$

$$E_{ATU} = Y/T_{EA} \quad (4)$$

$$E = Y_{to} - Y_{ti} \quad (5)$$

式(1)~(5)中: Y 为单位面积籽粒产量(grain yield per unit area), kg/hm^2 ; V_i 为灌水量(irrigation volume), m^3 ; I_{TN} 为总施氮量(total nitrogen input), kg/hm^2 ; G_{TSR} 为太阳总辐射量(total solar radiation), MJ/m^2 ; T_{EA} 为有效积温(effective accumulated tem-

perature), $^{\circ}C$; Y_{to} 为总产出(total output), 元/ hm^2 ; Y_{ti} 为总投入(total investment), 元/ hm^2 。

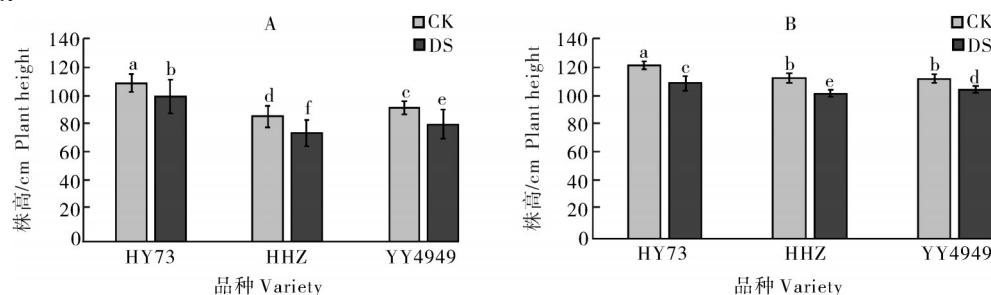
1.6 数据处理

所有试验数据均采用 Excel 进行整理, 用 IBM SPSS Statistics 25 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 稻季旱作对不同类型水稻生长发育的影响

1) 株高。如图 1 所示, 与常规淹灌相比, 旱作显著降低各品种在分蘖盛期和抽穗开花期的株高。在分蘖盛期, 早优 73、黄华占和甬优 4949 的株高分别降低了 8.6%、13.2%、12.4%。在抽穗开花期, 3 个品种分别降低了 10.3%、9.6%、6.8%。在常规淹灌和旱作处理下, 早优 73 在分蘖盛期的株高分别为 111.0 和 101.4 cm, 抽穗开花期的株高分别为 123.8 和 109.2 cm, 均显著高于黄华占和甬优 4949。



HY73: 早优 73 Hanyou 73; HHZ: 黄华占 Huanghuazhan; YY4949: 甬优 4949 Yongyou 4949. 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different letters indicate significant difference among treatments in the same item at 0.05 level. The same as below.

图 1 常规淹灌(CK)与旱作(DS)下水稻分蘖盛期(A)和抽穗开花期(B)株高比较

Fig.1 Comparison of plant height at the tillering(A) and heading(B) stages of rice under conventional flooding(CK) and dry cultivation(DS)

2) 茎蘖数。如图 2 所示, 在分蘖盛期和抽穗开花期, 常规淹灌下水稻的茎蘖数排序为黄华占 > 早优 73 > 甬优 4949。与常规淹灌相比, 旱作显著减少了分蘖盛期不同水稻品种的茎蘖数, 早优 73、黄华占和

甬优 4949 的茎蘖数分别降低了 35.7%、35.5%、21.9%。在抽穗开花期, 早优 73 和黄华占的茎蘖数分别降低了 17.8% 和 28.1%, 甬优 4949 无显著变化。甬优 4949 的茎蘖数在旱作处理下相对稳定, 变幅最小。

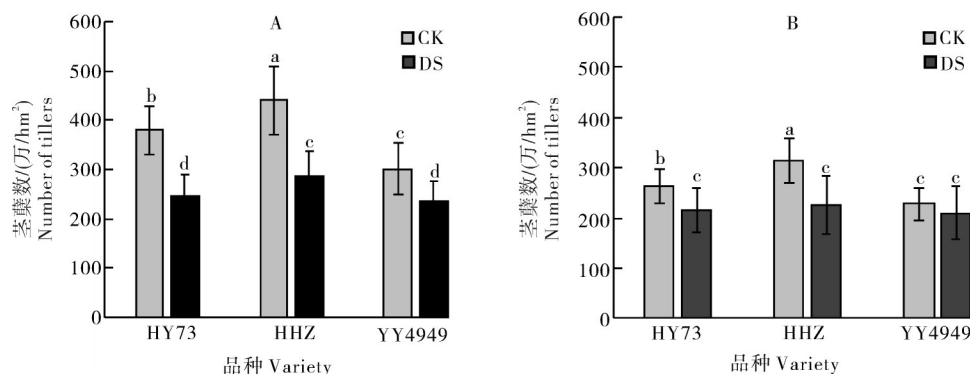


图 2 常规淹灌(CK)与旱作(DS)下水稻分蘖盛期(A)和抽穗开花期(B)茎蘖数比较

Fig.2 Comparison of the number of tillers at the tillering(A) and heading(B) stages of rice under conventional flooding(CK) and dry cultivation(DS)

3)叶面积。如图3所示,与常规淹灌相比,旱作后不同水稻品种在分蘖盛期和抽穗开花期的叶面积均显著降低。在分蘖盛期,早优73、黄华占和甬优4949的叶面积分别降低了27.7%、44.7%和33.4%。

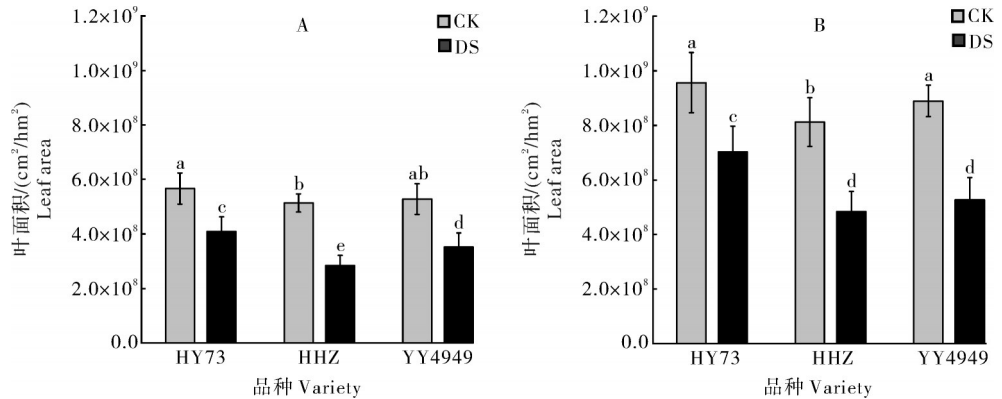


图3 常规淹灌(CK)与旱作(DS)下水稻分蘖盛期(A)和抽穗开花期(B)叶面积比较

Fig.3 Comparison of leaf area at the tillering(A) and heading(B) stages of rice under conventional flooding(CK) and dry cultivation(DS)

4)干物质积累量。如表1所示,常规淹灌下抽穗开花期的地上部干物质积累总量表现为早优73>甬优4949>黄华占。旱作后早优73、黄华占和甬优4949的地上部干物质积累分别显著降低了32.8%、30.7%、31.5%,黄华占降幅最小。旱作后不同水稻各部位干质量均显著降低,茎干质量降低了22.2%~25.9%;叶干质量降低了35.4%~39.4%;穗干质量降低了37.5%~48.9%。早优73和甬优4949的茎干质

在抽穗开花期时,3个品种的叶面积分别降低了26.6%、40.4%和40.74%。不同水分处理下,早优73均表现出较高的叶面积,且旱作后其降幅最小;黄华占的叶面积最低,旱作后降幅较大。

量降幅比黄华占小;但黄华占叶干质量降幅最小;甬优4949的穗干质量降幅最小。3个品种茎干质量在地上部占比均增加,增加了6.9%~15.8%;但3个品种的叶干质量及穗干质量的占比均下降,分别降低了6.8%~9.9%和9.9%~24.0%。早优73和甬优4949的茎干质量占比增幅比黄华占大;黄华占的叶干质量和穗干质量占比降幅比早优73和甬优4949小。

表 1 常规淹灌(CK)与旱作(DS)下水稻干物质积累量比较

Table 1 Comparison of rice dry matter accumulation under conventional flooding(CK) and dry cultivation(DS)

品种 Variety	处理 Treatment	抽穗开花期 HS			成熟期 MS		
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike
HY73	CK	8.21a	4.55a	3.51a	8.23a	3.09a	7.86a
	DS	6.39bc	2.76d	1.79c	6.26cd	2.49bc	2.62c
HHZ	CK	6.48bc	3.72bc	1.98c	6.77bc	2.12cd	5.93b
	DS	4.80d	2.41de	1.24d	5.11d	1.49f	2.09c
YY4949	CK	7.44ab	4.07b	2.87b	7.72ab	3.23a	8.55a
	DS	5.78cd	2.53de	1.54cd	4.97d	2.02de	2.32c

注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。Note:The different lowercase letters show significant difference between different treatments at 0.05 probability.The same as follows.

常规淹灌下成熟期的地上部干物质积累总量表现为甬优4949>早优73>黄华占。旱作使早优73、黄华占和甬优4949的干物质总量显著降低了40.8%、41%、52.2%,早优73和黄华占的降幅小于甬优4949。旱作后不同品种水稻各部位干质量均显著

降低,茎干质量降低了23.9%~35.6%;叶干质量降低了19.5%~37.4%;穗干质量降低了64.7%~72.9%。旱作后早优73和黄华占的各部位干质量降幅均比甬优4949小。3个品种的茎干质量和叶干质量地上部占比均显著增加,茎干质量占比增加了

28.5%~34.9%；叶干质量占比增加了 19.7%~35.9%；但穗干质量占比显著降低了 39.9%~43.9%。旱作后早优 73 的茎干质量占比增幅最小；黄华占叶干质量占比增幅及穗干质量占比降幅均最小。

5)产量。如表 2 所示,旱作后水稻实际产量均显著降低,其中早优 73、黄华占和甬优 4949 分别降低了 27.6%、30.8%、29.4%。旱作后早优 73 的实际产量下降幅度最小。旱作后黄华占和早优 73 的有效穗数均出现显著增加,甬优 4949 则无显著变化,黄华占增

加了 16.6%,早优 73 增加了 8.1%。旱作后水稻穗粒数和结实率均出现显著降低,其中早优 73、黄华占和甬优 4949 的穗粒数分别降低了 35.6%、20.6%、16.5%；结实率分别降低了 20.2%、26.2%、21.2%。旱作后甬优 4949 的穗粒数下降幅度最小；早优 73 的结实率下降幅度最小。旱作后早优 73 和甬优 4949 的千粒重均出现显著降低,黄华占则没有显著变化。常规淹灌下,各个品种收获指数没有显著性差异,旱作后仅甬优 4949 的收获指数显著升高了 51.4%。

表 2 常规淹灌(CK)与旱作(DS)下水稻产量及产量构成因素比较

Table 2 Comparison of rice yield and yield components under conventional flooding(CK) and dry cultivation(DS)								
品种 Variety	处理 Treatment	有效穗数/ (万/hm ²) Panicles	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率/% Filled grains	千粒重/g 1000-grain weight	理论产量/ (t/hm ²) Theoretical yield	实际产量/ (t/hm ²) Grain yield	收获指数 Harvest index
HY73	CK	274±32.4d	240.3±21.4b	58.2±0.05ab	27.1±0.53a	10.3±1.08a	7.0±0.46a	0.33±0.09b
	DS	296±29.9c	155±21.5d	46.4±0.05c	25.8±1.0b	5.4±0.63b	5.0±0.32c	0.43±0.07ab
HHZ	CK	324±25.0b	185±14.5c	52.6±0.06bc	19.6±0.38d	6.2±0.92b	6.0±0.23b	0.40±0.04ab
	DS	377±9.6a	147±6.5d	38.8±0.05d	20.0±0.67d	4.3±0.65c	4.2±0.26d	0.42±0.06ab
YY 4949	CK	263±21.3d	278±24.0a	64.4±0.03a	20.6±0.25c	9.7±1.45a	7.3±0.30a	0.35±0.10b
	DS	263±12.0d	232±18.7b	50.8±0.05bc	19.8±0.39d	6.2±0.94b	5.1±0.17c	0.53±0.03a

2.2 稻季旱作对后季小麦生长发育的影响

1)农艺性状。如表 3 所示,以稻季淹灌的后季小麦为对照,稻季旱作的后季小麦的农艺性状在不同的生育时期表现不同。其中株高在分蘖盛期和始穗期显著增加了 6.6% 和 3.7%。茎蘖数在分蘖盛期、拔节期和灌浆期分别显著增加了 22.2%、17.2% 和

14.3%。倒二叶叶长在始穗期和灌浆期显著增加了 5.6%。倒二叶叶宽在全生育期均显著增加,各时期分别增长 10.7%、5.7%、4.8%、4.8%。叶面积在分蘖盛期、始穗期和灌浆期分别显著增加了 27.2%、4.9%、9.4%。小穗数和穗长在灌浆期均显著增加,分别增长 14.5% 和 9.3%。

表 3 稻季淹灌(CK)与稻季旱作(DS)对后季小麦农艺性状的影响

Table 3 Effects of flooding in the rice season(CK) and dry cultivation in the rice season(DS) on agronomic traits of the subsequent wheat crop					
指标 Indicators	处理 Treatment	分蘖盛期 Full tiller stage	拔节期 Jointing stage	始穗期 Early ear stage	灌浆期 Grouting stage
株高/cm Plant height	CK	27.4b	48.5a	64.3b	78.4a
	DS	29.2a	47.4a	66.7a	77.8a
茎蘖数/(万/hm ²) Number of tillers	CK	118.0b	950.5b	950.5a	688.3b
	DS	144.2a	1114.4a	983.3a	786.6a
倒二叶叶长/cm Top second leaf length	CK	20.5a	20.5a	17.9b	17.9b
	DS	20.8a	20.4a	18.9a	18.9a
倒二叶叶宽/cm Top second leaf width	CK	0.75b	1.41b	1.88b	1.88b
	DS	0.83a	1.49a	1.97a	1.97a
叶面积/(×10 ⁶ cm ² /hm ²) Leaf area	CK	492.3b	893.1a	725.3b	458.9b
	DS	626.3a	925.3a	760.7a	502.1a
小穗数 Number of spikelets	CK				19.3b
	DS				22.1a
穗长/cm Spike length	CK				10.8b
	DS				11.8a

2)干物质积累与分配。如表4所示,稻季旱作的后季小麦的根干质量在苗期、分蘖期、拔节期和成熟期与稻季淹灌的后季小麦根干质量相比均没有显著性差异,但在抽穗期和灌浆期显著增长 27.2% 和 13.1%。在苗期和分蘖期,稻季旱作的后季小麦的地上部干物质质量与稻季淹灌的后季小麦相比显著增长了 51.1% 和 93.1%。稻季旱作的后季小麦的叶干质

量在拔节期和抽穗期没有显著变化,但在灌浆期和成熟期显著增长了 11.2% 和 12.0%。在全生育期,稻季旱作的后季小麦的茎干质量与稻季淹灌的后季小麦相比均无显著差异。在抽穗期、灌浆期和成熟期,稻季旱作的后季小麦的穗干质量分别增长了 15.1%、20.4%、11.9%。

表 4 稻季淹灌(CK)与稻季旱作(DS)对后季小麦干物质质量的影响
Table 4 Effects of flooding in the rice season(CK) and dry cultivation in the rice season(DS)
on the dry matter content of the subsequent wheat crop

生育时期 Fertility period	处理 Treatment	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	穗 Spike
苗期 Seedling stage	CK	0.046a	0.147b		
	DS	0.056a	0.223a		
分蘖期 Tillering stage	CK	0.790a	1.560b		
	DS	0.842a	3.012a		
拔节期 Jointing stage	CK	0.751a	3.677a	4.897a	
	DS	0.865a	3.740a	5.395a	
抽穗期 Heading stage	CK	0.482b	2.983a	10.751a	1.626b
	DS	0.613a	3.707a	11.694a	1.872a
灌浆期 Grouting stage	CK	0.849b	2.088b	11.363a	8.371b
	DS	0.960a	2.321a	12.166a	10.075a
成熟期 Mature stage	CK	0.892a	1.967b	11.832a	14.625b
	DS	0.908a	2.203a	12.334a	16.365a

3)产量。如表5所示,稻季旱作后季小麦的有效穗数、穗粒数、千粒重、理论产量和实际产量均显著大于稻季淹灌的后季小麦。其中有效穗数、穗粒数

和千粒重分别增加了 7.5%、8.4%、4.4%,实际产量分别增加 21.5%、7.7%,稻季淹灌和稻季旱作对后季小麦的收获指数没有显著性差异。

表 5 稻季淹灌(CK)与稻季旱作(DS)对后季小麦产量及产量构成因子的影响
Table 5 Effects of flooding in the rice season(CK) and dry cultivation in the rice season(DS)
on yield and yield components of the subsequent wheat crop

处理 Treatment	有效穗数/(万/hm ²) Panicles	穗粒数 Spikelets per panicle	千粒重/g 1000-grain weight	理论产量/(t/hm ²) Theoretical yield	实际产量/(t/hm ²) Grain yield	收获指数 Harvest index
CK	235b	49.8b	42.1b	4.94b	4.17b	0.48a
DS	253a	54.0a	43.9a	6.00a	4.49a	0.48a

2.3 稻季旱作对稻麦轮作系统资源利用效率的影响

1)稻季旱作对稻麦轮作系统光温水肥利用效率的影响。如表6所示,与常规淹灌处理相比,水稻旱作后各个品种的稻季、麦季及周年的水分生产效率均显著提高,其中早优73、黄华占和甬优4949稻季的水分生产效率分别提高了 114.3%、106.7%、111.1%;麦季的水分利用效率均提高了 4.1%;稻麦轮作周年的水分利用效率分别提高了 156.1%、

154.1%、151.9%。与常规淹灌处理相比,水稻旱作后各个品种的氮肥偏生产力、光能利用效率以及积温利用效率在稻季和周年降低,麦季显著提高。其中早优73、黄华占和甬优4949稻季的氮肥偏生产力分别降低了 27.6%、30.8%、29.4%;早优73和甬优4949的光能利用效率和积温利用效率均降低了 33.3%;3个品种的积温利用效率分别降低了 29.4%、28.6%、29.4%。稻麦轮作周年的氮肥偏生产力降低了 14.4%~15.8%;光能利用效率降低了 13.8%~

16.7%；积温利用效率降低了 14.1%~15.8%。但是，3 个品种麦季的氮肥偏生产力均提高 7.7%；光能利用效率均提高 6.5%；积温利用效率均提高 7.7%。相对于常规淹灌处理，水稻旱作后的稻麦轮作周年水分利用效率旱优 73 的增加幅度最大，甬优 4949 最小；水稻旱作后旱优 73 的稻麦轮作周年氮肥偏生产力、光能利用率和积温利用效率降低幅度最小，甬优 4949 最大。

表 6 稻季淹灌(CK)与稻季旱作(DS)下稻季、麦季和稻-麦周年的资源利用效率比较

Table 6 Comparison of resource use efficiency for rice season, wheat season, and rice-wheat annual under rice season flood irrigation(CK) and rice season dry cultivation(DS)

资源利用效率		CK			DS		
Resource efficiency		HY73	HHZ	YY4949	HY73	HHZ	YY4949
水分利用效率/(kg/m ³) Water use efficiency	稻季 Rice season	0.35c	0.30c	0.36c	0.75a	0.62b	0.76a
	麦季 Wheat season	5.38b	5.38b	5.38b	5.60a	5.60a	5.60a
	周年 Annual	0.55	0.50	0.56	1.41	1.28	1.42
氮肥偏生产力/(kg/kg) Partial productivity of nitrogen fertilizer	稻季 Rice season	29.9ab	25.9bc	31.0a	21.6cd	17.9de	21.9cd
	麦季 Wheat season	33.61b	33.61b	33.61b	36.21a	36.21a	36.21a
	周年 Annual	31.16	28.56	31.91	26.67	24.25	26.85
光能利用效率/(g/MJ) Utilization efficiency of light energy	稻季 Rice season	0.30ab	0.20bc	0.30a	0.20cd	0.20d	0.20cd
	麦季 Wheat season	0.31b	0.31b	0.31b	0.33a	0.33a	0.33a
	周年 Annual	0.29	0.26	0.30	0.25	0.22	0.25
积温利用效率/(kg/(hm ² ·℃)) Utilization efficiency of accumulated temperature	稻季 Rice season	1.7ab	1.4bc	1.7a	1.2cd	1.0d	1.2cd
	麦季 Wheat season	2.35b	2.35b	2.35b	2.53a	2.53a	2.53a
	周年 Annual	1.85	1.70	1.90	1.59	1.44	1.60

2)经济效益。如表 7 所示,与常规淹灌处理相比,水稻旱作后各个品种的稻季、麦季及周年的经济效益均提高,其中旱优 73、黄华占和甬优 4949 稻季的经济效益分别提高了 19.7%、41.6%、3.3%;麦季的经济效益均提高 25.7%;稻麦轮作周年的经济效益分别提高了 21.5%、34.8%、8.7%。相对于常规淹灌处理,水稻旱作后的稻麦轮作周年经济效益黄华占的增加幅度最大。

表 7 稻季淹灌(CK)与稻季旱作(DS)下稻季、麦季和稻-麦周年的经济效益比较

Table 7 Comparison of economic benefits for rice season, wheat season, and rice-wheat annual under rice season flood irrigation(CK) and rice season dry cultivation(DS)

经济效益	CK			DS		
	HY73	HHZ	YY4949	HY73	HHZ	YY4949
稻季农业生产支出 Agricultural production expenditure in rice season	8 354	7 701	8 124	7 917	7 242	7 617
稻季水电和人工支出 Rice seasonal water charges and electricity and labor costs expenditure	13 574	13 574	13 574	4 355	4 355	4 355
稻季产出 Economic output in rice season	29 540	25 601	31 973	21 381	17 724	22 587
稻季经济效益 Economic benefit of rice season	7 612	4 326	10 276	9 109	6 127	10 615
麦季农业生产支出 Agricultural production expenditure in wheat season	6 374	6 374	6 374	6 374	6 374	6 374
麦季水电和人工支出 Water charges in wheat season and electricity and labor costs expenditure	1 137	1 137	1 137	1 137	1 137	1 137
麦季产出 Wheat season economy outputs	10 755	10 755	10 755	11 587	11 587	11 587
麦季经济效益 Economic benefit of wheat season	3 244	3 244	3 244	4 076	4 076	4 076
周年经济效益 Annual economic benefit	10 856	7 570	13 520	13 185	10 203	14 691

3 讨论

3.1 稻季旱作对水稻生长发育与产量的影响

水稻旱作对不同类型水稻的株高、茎蘖数、叶面积等均有显著影响^[16]。本研究中不同类型水稻在旱作后农艺性状的变化不一致,对抗旱做出的响应不同,与水稻的抗旱机制不同有关。有研究表明适度干旱下,水稻的产量出现显著提高,是因为水分胁迫后无效分蘖的数量减少,水稻功能叶的叶面积占比增加,提高光合速率,增加成穗率^[17-18]。

干物质是光合作用的产物,干物质的积累与分配与水稻产量密切相关^[19]。本研究结果显示,干旱胁迫后不同水稻的各部位干物质质量均下降,占地上部比例变化不一。这与李金才等^[20]提出水稻旱作导致水稻干物质积累量减少,同时干物质运转的量和分配的部位会受到影响的研究结果一致。

不同品种的抗旱性不同,水稻旱作后其产量及其产量构成因素的变化存在一定差异,抗旱性强的品种产量及其产量构成因素下降幅度相对较小^[21-23]。前人研究表明,水稻旱作后其产量会呈现下降的趋势,不同类型的水稻其产量的降幅不一致^[24-26]。本试验结果表明,水稻旱作后,早优73和甬优4949的产量降幅较小,抗旱性较强;黄华占的产量降幅较大,抗旱性较弱,这与前人研究结果一致。

3.2 稻季旱作对后季小麦生长发育与产量的影响

水分对作物生长发育的影响直接体现在对养分的吸收利用上,在稻麦轮作系统中,稻田淹水会影响水稻生长的小环境,能够促进有机物质嫌气分解,增加土壤有机质;而麦季的有氧条件则有利于土壤有机质的矿化,从而达到改良土壤的目的,最终影响稻田土壤的特性和水稻产量以及后季作物产量。多数研究表明,前茬水稻旱作导致土壤板结,不利于后茬作物扎根生长,从而导致减产^[27-28]。但也有研究发现,水稻旱作后土壤理化性质优于传统水作,有利于小麦生长^[29],出现这种情况的原因可能是在不同试验中干旱的程度和持续时间不同所致。小麦产量的90%~95%来自叶片的光合作用,而倒二叶是小麦植株中重要的光合器官之一,尤其在旗叶功能衰退后,倒二叶可通过延长光合持续期为籽粒灌浆提供能量。其叶长和叶宽决定叶片展开面积,直接影响光能截获效率。本试验发现,水稻旱作后季小麦的株高、分蘖、倒二叶叶长、叶宽、叶面积和产量及产量

构成因子等均大于常规淹灌水稻的后季小麦,前人研究表明水稻旱作后可使土壤理化性质改变进而提高水稻后季小麦的生物量及产量^[12-13],本研究结果与之一致,表明水稻旱作会影响后季小麦的农艺性状。

3.3 稻季旱作对稻麦轮作系统周年资源利用效率的影响

在水稻生长季,旱作处理比常规淹灌减少了66%的灌溉水使用量,旱作使水稻季水分利用效率大大增加。同时,后季小麦在等量灌溉水的情况下,水稻旱作增加了后季小麦的产量,使水稻旱作后季小麦的水分利用率提高。综合稻季和麦季,水稻旱作提高了稻麦周年的水分利用率。有研究表明,水稻旱作具有减少灌水量、提高水分利用效率的优势^[30],本研究得到类似结果。

在本试验中稻季淹灌与稻季旱作处理的氮肥施用量、光照、温度均一致的情况下,水稻旱作导致水稻产量的降低,使其氮肥偏生产力、光能利用效率、积温利用效率均降低,与陈海玉^[15]研究结果一致。本研究发现,在后季小麦的氮肥施用量、光照、温度均一致的情况下,水稻旱作导致后季小麦产量增加,氮肥偏生产力、光能利用效率、积温利用效率均高于水稻淹灌后季小麦。张富国等^[31]研究表明水稻旱作后季小麦的氮肥利用率和氮肥生产效率超过传统水作后季小麦,本研究得到类似结果。此外,本研究中稻季旱作稻麦周年的氮肥偏生产力、光能利用效率和积温利用效率低于稻季淹灌稻麦轮作,是由于水稻旱作后引起水稻产量一定幅度的降低,导致稻麦周年的氮肥生产力、光能利用效率和积温利用效率降低。

本研究发现,在水稻生长季,旱作处理比常规淹灌减少了5%的机械等农业生产支出和68%的水电人工支出,使水稻季经济效益大大增加。同时,后季小麦在同等农业生产等支出的情况下,水稻旱作增加了后季小麦的产量,使其经济效益提高。综合稻季和麦季,水稻旱作提高了稻麦周年的经济效益,与姜超强等^[32]研究结果一致,稻麦轮作的经济效益大于单季稻。

综上,研究表明稻季旱作下,不同类型水稻的株高、茎蘖数、叶面积、干物质积累量和产量等均受影响,早优73旱作条件下的综合表现最优;稻季旱作后季小麦的生物量及产量均优于稻季淹灌的后季小

麦。此外,稻季旱作显著提高了稻麦轮作周年的水资源利用效率 and 经济效益,但稻麦周年的氮肥偏生产力、光照利用效率、积温利用效率有所降低。水稻旱作后小麦产量显著提高,可能与稻季旱作下土壤理化性质及土壤微生物环境发生变化而导致耕层土壤环境改变有关。关于土壤微生物的组成及土壤特性的改变如何影响后季小麦生长发育的生理机制,仍需进一步深入研究。

参考文献 References

- [1] 周文期,强晓霞,王森,等.水稻 *OsLPL2/PIR* 基因抗旱耐盐机制研究[J].作物学报,2022,48(6):1401-1415. ZHOU W Q, QIANG X X, WANG S, et al. Mechanism of drought and salt tolerance of *OsLPL2/PIR* gene in rice[J]. Acta agronomica sinica, 2022, 48(6): 1401-1415 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈韵宇,王鑫,杨万能,等.干旱处理条件下水稻冠层温度的变化规律探究[J].上海农业学报,2022,38(4):114-121. CHEN Y Y, WANG X, YANG W N, et al. Study on the variation law of rice canopy temperature under drought treatment [J]. Acta agriculturae Shanghai, 2022, 38(4): 114-121 (in Chinese with English abstract).
- [3] CAI H F, CHEN Q G. Rice production in China in the early 21st century[J]. Chinese rice research newsletter, 2000, 8(2): 14-16.
- [4] BOUMAN B A M, HUMPHREYS E, TUONG T P, et al. Rice and water[M]//SPARKS D, DU PONT H. Advances in agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2007: 187-237.
- [5] 陆红娜,康绍忠,杜太生,等.农业绿色高效节水研究现状与未来发展趋势[J].农学学报,2018,8(1):155-162. LU H N, KANG S Z, DU T S, et al. Current status and future research trend on water-saving high-efficiency and eco-friendly agriculture [J]. Journal of agriculture, 2018, 8(1): 155-162 (in Chinese with English abstract).
- [6] 朱利群,王春杰,陈利根,等.长江下游稻麦轮作农田不同施肥措施的固碳潜力分析[J].浙江农业学报,2016,28(7):1249-1261. ZHU L Q, WANG C J, CHEN L G, et al. Analysis into soil organic carbon sequestration potential of different fertilization modes under rice-wheat rotation in Lower Yangtze River [J]. Acta agriculturae zhejiangensis, 2016, 28(7): 1249-1261 (in Chinese with English abstract).
- [7] 范路瑜.施肥措施对稻麦轮作体系磷素利用的影响[D].南京:南京农业大学,2020. FAN L Y. Study on the effect of fertilization measures on phosphorus utilization efficiency under rice-wheat rotation system [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [8] 谢建泉.水稻旱直播栽培技术[J].福建农业科技,2012(10):8-9. XIE J Q. Cultivation techniques of direct-sowing of rice seeds under dry condition [J]. Fujian agricultural science and technology, 2012(10): 8-9 (in Chinese).
- [9] 杜云峰.不同根系类型水稻对干旱胁迫的响应差异及其生理基础研究[D].武汉:华中农业大学,2022. DU Y F. Response differences of different root types of rice to drought stress and its physiological basis [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [10] 林玉萍,聂录,王宇飞.不同节水灌溉方式对水稻产量和品质的影响[J].现代化农业,2017(6):31-32. LIN Y P, NIE L, WANG Y F. Effects of different water-saving irrigation methods on rice yield and quality [J]. Modernizing agriculture, 2017(6): 31-32 (in Chinese with English abstract).
- [11] AI C, ZHANG S Q, ZHANG X, et al. Distinct responses of soil bacterial and fungal communities to changes in fertilization regime and crop rotation [J]. Geoderma, 2018, 319: 156-166.
- [12] 梅俊豪,刘宏岩,聂立孝.不同种植方式水稻的产量和水分生产效率及对后茬小麦生长发育和产量的影响[J].湖北农业科学,2016,55(10):2471-2475. MEI J H, LIU H Y, NIE L X. The rice grain yield and water productivity under different planting patterns and their effects on growth and yield of succeeding winter wheat [J]. Hubei agricultural sciences, 2016, 55(10): 2471-2475 (in Chinese with English abstract).
- [13] 金朝强.不同种植方式对水稻及其后茬小麦生长发育的影响[D].武汉:华中农业大学,2020. JIN Z Q. Effects of different planting methods on the growth and development of rice and its subsequent wheat [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [14] 阮新民,陈曦,岳伟,等.安徽沿江平原区播期对稻麦周年产量、生育期及温光资源利用的影响[J].中国稻米,2021,27(6):38-46. RUAN X M, CHEN X, YUE W, et al. Effects of sowing date on yield, growth period and utilization of temperature and light resources of rice-wheat mode in the plain region along the Yangtze River of Anhui Province [J]. China rice, 2021, 27(6): 38-46 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈海玉.节水灌溉模式和旱作模式下的水稻产量与资源利用效率评价[D].武汉:华中农业大学,2018. CHEN H Y. Rice yield and resource utilization efficiency evaluation under water-saving irrigation and dry cropping [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [16] 朱勇勇,宋秉羲,杨王敏,等.旱作条件下氮肥减施对水稻生长、产量与经济收益的影响[J].生态环境学报,2021,30(11):2150-2156. ZHU Y Y, SONG B X, YANG W M, et al. Effects of reduced nitrogen application on rice growth, yield and economy profits under dry farming conditions [J]. Ecology and environmental sciences, 2021, 30(11): 2150-2156 (in Chinese with English abstract).
- [17] 耿欣宇,刘月月,张强,等.干湿交替灌溉对旱直播水稻产量与品质的影响及其生理机制[J].江西农业大学学报,2023,45(6):1331-1346. GENG X Y, LIU Y Y, ZHANG Q, et al.

- Effect of alternate wetting and drying irrigation on yield and quality of dry direct seeding rice and its physiological mechanism [J]. *Acta agriculturae universitatis jiangxiensis*, 2023, 45 (6):1331-1346 (in Chinese with English abstract).
- [18] 林义月,李阳,张作林,等.干湿交替对直播再生稻抗倒伏性和产量的影响[J].湖北农业科学,2023,62(12):13-17. LIN Y Y, LI Y, ZHANG Z L, et al. Effects of alternate wetting and drying on lodging resistance and yield of direct-seeded ratooning rice [J]. *Hubei agricultural sciences*, 2023, 62 (12) : 13-17 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杨惠杰,李义珍,杨仁崔,等.超高产水稻的干物质生产特性研究[J].中国水稻科学,2001,15(4):265-270. YANG H J, LI Y Z, YANG R C, et al. Dry matter production characteristics of super high yielding rice [J]. *Chinese journal of rice science*, 2001, 15 (4) : 265-270 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李金才,黄义德,魏凤珍,等.旱作对水稻干物质积累、分配及产量的影响[J].安徽农业科学,2001,29(1):56-57. LI J C, HUANG Y D, WEI F Z, et al. Effects of dry farming on dry matter accumulation, distribution and yield of rice [J]. *Journal of Anhui agricultural sciences*, 2001, 29 (1) : 56-57 (in Chinese with English abstract).
- [21] 龚金龙,邢志鹏,胡雅杰,等.籼、粳超级稻产量构成特征的差异研究[J].核农学报,2014,28(3):500-511. GONG J L, XING Z P, HU Y J, et al. Studies on the difference of yield components characteristics between indica and Japonica super rice [J]. *Journal of nuclear agricultural sciences*, 2014, 28 (3) : 500-511 (in Chinese with English abstract).
- [22] 卞金龙,蒋玉兰,刘艳阳,等.干湿交替灌溉对抗旱性不同水稻品种产量的影响及其生理原因分析[J].中国水稻科学,2017,31(4):379-390. BIAN J L, JIANG Y L, LIU Y Y, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on grain yield in rice cultivars with different drought resistance and its physiological mechanism [J]. *Chinese journal of rice science*, 2017, 31 (4) : 379-390 (in Chinese with English abstract).
- [23] 饶玉春,戴志俊,朱怡彤,等.水稻抗干旱胁迫的研究进展[J].浙江师范大学学报(自然科学版),2020,43(4):417-429. RAO Y C, DAI Z J, ZHU Y T, et al. Advances in research of drought resistance in rice [J]. *Journal of Zhejiang Normal University (natural sciences)*, 2020, 43 (4) : 417-429 (in Chinese with English abstract).
- [24] VENUPRASAD R, LAFITTE H R, ATLIN G N. Response to direct selection for grain yield under drought stress in rice [J]. *Crop science*, 2007, 47 (1) : 285-293.
- [25] PANDEY V, SHUKLA A. Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress [J]. *Rice science*, 2015, 22 (4) : 147-161.
- [26] AGGARWAL G C, SIDHU A S, SEKHON N K, et al. Puddling and N management effects on crop response in a rice-wheat cropping system [J]. *Soil and tillage research*, 1995, 36 (3/4):129-139.
- [27] 金朝强,聂立孝.栽培管理措施对稻麦轮作系统土壤有机碳和氮素积累及作物产量的影响[J].湖北农业科学,2020,59(14):12-17. JIN Z Q, NIE L X. Effects of cultivation and management measures on soil organic carbon and nitrogen accumulation and crop yield in rice-wheat rotation system [J]. *Hubei agricultural sciences*, 2020, 59 (14) : 12-17 (in Chinese with English abstract).
- [28] 孙文娟,黄耀,陈书涛,等.稻麦作物呼吸作用与植株氮含量、生物量和温度的定量关系[J].生态学报,2005,25(5):1152-1158. SUN W J, HUANG Y, CHEN S T, et al. Quantitative relationship of wheat and rice respiration with tissue nitrogen, biomass and temperature [J]. *Acta ecologica sinica*, 2005, 25 (5) : 1152-1158 (in Chinese with English abstract).
- [29] 蔡康妮,董新宇.水稻旱作在铁岭市的试验应用讨论[J].种子科技,2021,39(9):3-4. CAI K N, DONG X Y. Discussion on experimental application of rice dry farming in Tieling city [J]. *Seed science & technology*, 2021, 39 (9) : 3-4 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杨晓龙,王彪,汪本福,等.不同水分管理方式对旱直播水稻产量和稻米品质的影响[J].中国水稻科学,2023,37(3):285-294. YANG X L, WANG B, WANG B F, et al. Effects of different water management on yield and rice quality of dry-seeded rice [J]. *Chinese journal of rice science*, 2023, 37 (3) : 285-294 (in Chinese with English abstract).
- [31] 张富国,徐阳春,沈其荣,等.不同种稻方式对后茬大麦产量和土壤微生物量的影响[J].生态与农村环境学报,2009,25(2):49-53. ZHANG F G, XU Y C, SHEN Q R, et al. Effects of rice cultivation pattern on yield of after-crop and soil microbial biomass [J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2009, 25 (2) : 49-53 (in Chinese with English abstract).
- [32] 姜超强,李晨,朱启法,等.皖南不同种植模式碳汇效应及经济效益评价[J].生态环境学报,2022,31(7):1285-1292. JIANG C Q, LI C, ZHU Q F, et al. Evaluation of carbon sink and economic benefit in different planting patterns in southern Anhui [J]. *Ecology and environmental sciences*, 2022, 31 (7) : 1285-1292 (in Chinese with English abstract).

Effects of drought farming during rice season on annual yield and resource utilization efficiency of rice-wheat rotation system

MA Yunjing¹, ZHANG Zhijuan¹, SONG Guoqing¹, ZHAO Ningjie¹,
PENG Xiao¹, CAO Cougui¹, XIE Hengxing², LI Ping¹

1.College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.College of Environment and Life Sciences, Weinan Normal University, Weinan 714099, China

Abstract Rice-wheat rotation is one of the major rice farming systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River. With the increase of water resource shortages and frequent droughts, the advantages of drought farmed rice have become increasingly prominent. 3 rice varieties including indica hybrid rice Hanyou 73 (HY73), indica conventional rice Huanghuazhan (HHZ), and indica-japonica hybrid rice Yongyou 4949 (YY4949) and 1 wheat variety Zhengmai 9023 (ZM9023) were used to optimize the mode of rice-wheat rotation and improve the resource utilization efficiency. The conventional flooding irrigation (as control) and drought farming treatments were set up during the rice season to systematically study the effects of drought farming on the plant growth, yield, and resource use efficiency in both rice and wheat seasons. The results showed that the plant height, number of tillers, and leaf area of different rice varieties under drought farming during the rice season was significantly reduced, with a decrease of 6.8%-13.2%, 8.2%-35.7%, and 26.6%-44.7%, except for the number of tillers in YY73 at the stage of heading and flowering. Among them, HY73 had a higher leaf area and the smallest decrease, HHZ had the lowest leaf area and the largest decrease, and YY4949 had the smallest variation in number of tillers after drought farming. The actual yield of HY73, HHZ, and YY4949 decreased from 7.46 t/hm² to 5.32 t/hm², from 6.23 t/hm² to 4.46 t/hm², and from 7.60 t/hm² to 5.27 t/hm², respectively. The plant height, number of tillers, leaf area, second-top leaf length, leaf width, spikelet number, and spike length of subsequent wheat after drought-farmed rice was significantly higher than that of the control during some key stages of growth and development. The accumulation of dry matter and yield of subsequent wheat after drought-farmed rice was significantly increased, with a yield of 4.49 t/hm², 7.7% higher than that of the control. The water use efficiency (WUE) and economic benefits of the rice season, wheat season, and annual period were significantly improved after drought farming during the rice season. The WUE of rice and wheat increased by 151.9% to 156.1%, and the annual economic benefits of rice and wheat increased by 8.7% to 34.8%. However, the nitrogen partial factor productivity, light energy utilization efficiency, and accumulated temperature utilization efficiency of rice-wheat rotation decreased by 14.4%-15.8%, 13.8%-16.7%, and 14.1%-15.8%, respectively. It is indicated that drought farming of rice (especially HY73) can achieve high economic benefits under the annual rice-wheat rotation system in Hubei Province. It will provide a theoretical basis for drought-cultivated rice in rice-wheat rotation systems.

Keywords rice-wheat rotation; rice; drought farming; growth and development; yield; resource utilization efficiency

(责任编辑:张志钰)