

水旱轮作种植模式对作物产量及资源利用效率的影响

龚松玲, 何明凤, 李成伟, 高珍珍, 刘章勇, 朱波*

(长江大学主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心/长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北荆州 434000)

摘要 [目的]为探明不同种植模式对作物周年产量和温光资源利用效率的影响。[方法]2017—2018年在湖北省荆州市江陵县三湖农场,采用随机区组设计,设置中稻-小麦、中稻-油菜、中稻-冬闲3种植模式进行试验。[结果]中稻-小麦模式周年产量比中稻-油菜和中稻-冬闲分别高8.06%和46.71%;3种植模式水稻季差异不显著,差异主要来自冬季作物,小麦产量是油菜的2倍左右;在经济效益上,中稻-油菜模式收益最高,比中稻-小麦和中稻-冬闲分别高1 123和2 959元/hm²,增幅率为6.63%和19.61%;在积温利用上,中稻-小麦模式积温利用效率最高,比中稻-油菜和中稻-冬闲高1.27%和27.16%。[结论]中稻-油菜模式的经济效益高,环境风险比中稻-小麦式较小,冬闲田的资源利用效率浪费严重,应选出适应力强,且环境友好的冬季作物。

关键词 水旱轮作;种植模式;产量;资源利用效率;经济效益

中图分类号 S344.1 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)04-0032-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.04.009



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Paddy-upland Rotation Systems on Resource Utilization Efficiency and Yield

GONG Song-ling, HE Ming-feng, LI Cheng-wei et al (Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry Yangtze University/ Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland of Education, Jinzhou, Hubei 434000)

Abstract [Objective] To explore the impact of different planting patterns on crop annual yield, temperature and light resource utilization efficiency. [Method] A random block design was adopted at Sanhu Farm in Jiangling County, Jingzhou City, Hubei Province from 2017 to 2018. Three planting modes of rice-wheat, rice-rapeseed and rice-fallow were set up. [Result] The annual yield of rice-wheat model were 8.06% and 46.71% higher than those of the rice-rapeseed and rice-fallow, respectively; there was no significant difference in the rice season of the three planting modes, the difference of which was mainly due to winter crops, and the wheat yield was about twice that of rape; in terms of economic benefits, the rice-rapeseed model had the highest profit, which is 1 123 and 2 959 yuan/hm² higher than those of the medium rice-wheat and medium rice-fallow, respectively, with an increase rate of 6.63% and 19.61%; the accumulated temperature utilization efficiency of the medium rice-wheat model was the highest, which was 1.27% and 27.16% higher than those of the rice-rapeseed and rice-fallow. [Conclusion] In terms of effective accumulated temperature utilization, there is no significant difference between the rice-wheat model and the rice-rapeseed model, but the rice-rapeseed model has higher economic benefits and lower environmental risks than the rice-wheat model. In addition, the utilization efficiency of winter fallow fields is wasteful, and winter crops that are adaptable and environmentally friendly should be selected.

Key words Paddy-upland rotation; Planting mode; Yield; Resource utilization efficiency; Economic benefit

水稻是人类最重要的粮食作物之一,世界上约50%人口以稻米为主食^[1]。中国作为世界上水稻主生产国,其种植面积和籽粒产量分别约占全球的16%和28%。长江中下游地区是我国水稻的主产区,水稻种植面积达2×10⁶ hm²^[2],占全国种植面积的40%^[3],在我国的水稻生产中占有十分重要的地位,对确保该地区乃至全国的粮食安全都有重要意义。水旱轮作是我国长江流域主要的生产系统,常见的有水稻-小麦轮作模式和水稻-油菜轮作模式^[4-6]。当前该地区存在大面积的季节性撂荒,双季稻改种单季稻的现象越来越严重,播种面积明显下降,浪费了许多光、温资源,降低了土地生产效率。随着社会经济条件及粮食安全需求的变化,该区稻田种植制度不断变化^[7-12]。

江汉平原也是我国重要的单双季稻混作区,其中水稻是种植面积最大、单产最高、总产量最多的粮食作物。当前在该地区周年生产模式中,由于受水稻品种与冬季作物品种搭配不够完善、适宜搭配品种较少等问题限制,导致土壤耕作空闲期长和光温资源利用不够充分等,同时现有种植模式周

年配套技术不够完善,导致该地区粮食生产和发展滞后。此外,由于缺乏坚实的理论与实践指导,该地区的主体稻作模式也不够明确,严重影响了当地光温资源的充分发挥。因此,依据作物光温资源高效利用机理及规律,根据江汉平原区域水稻生产气候资源特点、气象灾害发生情况和光温资源高效利用的障碍因子,优化江汉平原区域稻田种植模式,对促进当地稻作模式和农业可持续发展、提升和保障粮食生产的综合能力有重要的现实意义。

鉴于此,笔者以我国长江中下游平原区典型的水稻轮作模式为研究对象,设置了中稻-小麦、中稻-油菜、中稻-冬闲3种植模式,研究不同种植模式对光温资源利用效率和产量的影响,对于优化江汉平原区域稻田种植模式、提升稻田综合功能具有重要现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验于2017年5月—2018年5月在湖北省荆州市江陵县三湖农场试验基地(30°12' N, 112°31' E)进行。该区属北亚热带季风性湿润气候,水热资源丰富,年均降雨量900~1 100 mm,年平均气温16.0~16.4℃。试验田试验前为冬闲-单季稻制,土壤为潮土。试验前耕层土壤(0~20 cm)基本理化性状为:全碳26.44 g/kg、全氮含量2.44 g/kg、碱解氮含量170.88 mg/kg、全磷含量0.38 g/kg、速效磷含量12.67 mg/kg、全钾含量17.76 g/kg、速效钾含量

基金项目 国家重点研发计划项目(2018YFD0301306, 2017YFD0301400);湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金项目(KFT201904);国家自然科学基金项目(31870424)。

作者简介 龚松玲(1994—),女,河南商丘人,硕士研究生,研究方向:农业作物与栽培。*通信作者,副教授,博士,硕士生导师,从事农业作物与栽培研究。

收稿日期 2020-10-16

159 mg/kg、pH 6.92、容重为 1.10 g/cm。

1.2 试验材料 中稻为“隆两优华占”，小麦品种为“郑麦 9023”，油菜为“华油杂 62”。

1.3 试验设计 试验共设置 3 个处理，分别为中稻-小麦模

式(RW)、中稻-油菜模式(RR)、中稻-冬闲模式(RF)。每个处理设置 3 次重复，采用随机区组排列。小区面积 98 m²(长 14 m,宽 7 m),各小区筑埂覆膜,防止水肥串流。不同模式的生育期天数如表 1 所示。

表 1 不同种植模式作物生育期的比较

Table 1 Comparison of the growth period of crops under different planting patterns

种植模式 Planting pattern	播种期-移栽期-收获期 Sowing date-transplanting date-harvesting date		生育期天数 Growth period//d		
	第 1 季 The 1st season	第 2 季 The 2nd season	第 1 季 The 1st season	第 2 季 The 2nd season	周年 Whole year
RW	05-12—06-06—09-25	11-09—05-16	136	190	321
RR	05-12—06-06—09-25	10-28—12-16—05-09	136	195	331
RF	05-12—06-06—09-25	—	136	0	136

1.4 田间管理 ①RW:该模式中稻种植同中稻-冬闲模式中的中稻。小麦于水稻收获后,浅旋耕做厢播种,播种量为 225 kg/hm²,基本苗密度 300 万/hm²。小麦生育期间,施基肥复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16%:10%:22%)600 kg/hm²,追肥 N 90 kg/hm²。其余田间管理措施同一般常规田。②RR:该模式中稻种植同中稻-冬闲模式中的中稻。油菜于水稻收获后,浅旋耕做厢,厢宽 150 cm,沟宽 20 cm,油菜移栽,移栽密度为 30 cm×30 cm。油菜生育期间,施基肥复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16%:10%:22%)600 kg/hm²、硼肥 7.5 kg/hm²,提苗肥尿素 75 kg/hm²,薹肥尿素 75 kg/hm²。其余田间管理措施同一般常规田。③RF:中稻移栽密度 22.4 万穴/hm²(26.70 cm×16.70 cm),每穴 3 苗。中稻全生育时期施肥量 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 180 kg/hm²,以尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和氯化钾(含 K₂O 60%)施用;氮肥按照基肥:薹肥:穗肥为4:3:3施用;磷肥作基肥一次施用;钾肥按照基肥:穗肥为1:1施用。病虫草害防治按当地大面积生产统一实施。

1.5 测定项目与方法 试验地试验期间气象资料由湖北省荆州市气象局提供,主要包括日平均气温、日照时数和降雨量等指标。计算周年和不同作物季的总辐射、有效积温和降雨量。

于收获前调查水稻有效穗,选取各小区生长均匀的 3 m²植株测产,脱粒并晒干,风选清除杂质后,测定总重和含水量。油菜和小麦成熟后,各小区选取生长均匀的 3 m²植株,脱粒并晒干,风选清除杂质后,测定总重和含水量。按照 14%含水量折算水稻产量,按照 13%含水量折算小麦产量。

水稻于各小区取有代表性的水稻植株 6 株,抽穗前分为茎、叶 2 部分,抽穗及抽穗后分为茎、叶、穗 3 部分;取代表性油菜植株 3 株,分茎枝、角壳和籽粒;取代表性小麦植株 10 株,分茎、叶和穗。105 ℃下杀青 30 min,80 ℃下烘干至恒重,测定干物质重,即可得各作物的地上部生物量。

于收获前调查水稻有效穗,选取各小区生长均匀的 3 m²植株测产,脱粒并晒干,风选清除杂质后,测定总重和含水量。油菜和小麦成熟后,各小区选取生长均匀的 3 m²植株,脱粒并晒干,风选清除杂质后,测定总重和含水量。按照 14%含水量折算水稻产量,按照 13%含水量折算小麦产量。

1.6 指标计算 光能生产效率是生育期间平均单位热量生产的单位面积籽粒重量^[13]。积温生产效率是指生育期间日均温≥10 ℃有效积温生产的单位面积籽粒重量^[14]。水分生产效率是指生育期间籽粒重量与总耗水量比值,即平均每立方水生产的单位面积籽粒重量。油菜和小麦没有灌溉,水稻进行间歇灌溉与晒田相结合^[15]。

光能生产效率(g/MJ)=籽粒产量/单位面积的太阳辐射;

积温生产效率(kg/(hm²·℃·d))=籽粒产量/生育期间有效积温;

水分利用效率(kg/m³)=籽粒产量/总耗水量,其中用水量=降水量+灌溉量;

经济效益=产值-成本,产值=产量×单价,其中水稻、小麦和油菜单价按当年当地当季的收购价计算。

1.7 数据处理与统计分析 采用 Microsoft Excel 2010 进行分析整理试验数据;采用 DPS 软件进行方差分析;采用 LSD 法进行显著性水平检验(P<0.05)。试验结果均以 3 次重复分析的平均值与标准误来表示。采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与分析

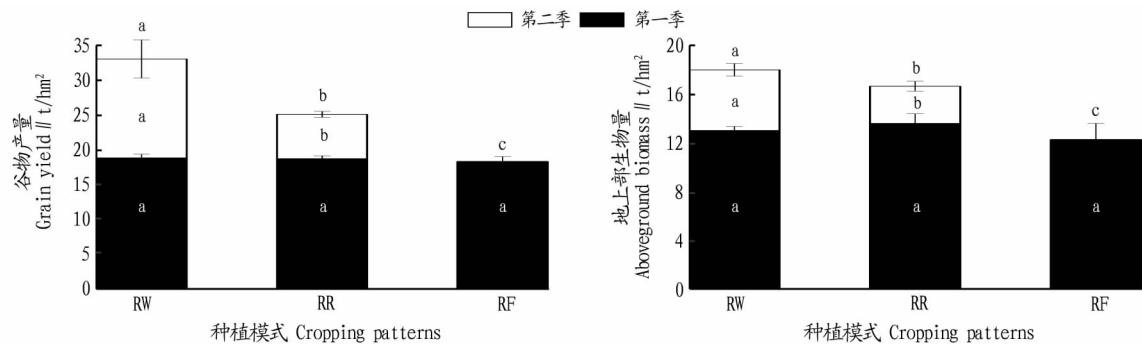
2.1 不同种植模式对水稻产量及产量形成的影响 从表 1 可以看出,不同种植模式对全年的时间利用不同。RW 和 RR 模式的周年生育期最长,为 331 d 左右;RF 模式的周年生育期最短,为 136 d 左右;RF、RW 和 RR 模式第 1 季的生育期一致,第 2 季的生育期天数分别为 0、190、195 d,因此主要是由于第 2 季生育期差异导致周年生育期差异较大,且 RW 和 RR 模式第 2 季的生长天数较为接近,故而 RW 和 RR 模式的周年生长时间较为接近。

由图 1 可知,不同种植模式对作物产量的影响表现出作物季之间的差异性。对于第 1 季作物,RF、RW、RR 模式 2 年的平均产量分别为 10.94、11.32、11.27 t/hm²。对于 1 年的第 2 季作物,RW 和 RR 之间无显著性差异。与 RW 模式相比,RR 模式减少了 11.87%。由于 RF 模式第 2 季为冬闲,因此 RF 模式产量均显著低于其他模式。从整个稻田不同种植模式系统周年来看,2017—2018 年各个模式的大小顺序表现为 RW>RR>RF,与 RW 模式相比,RR、RF 模式分别减少了 2.67%、22.27%,RF 模式产量显著低于其他模式,RW 模式产

量最高,显著高于 RF 模式,且 RR 与 RW 模式之间无显著性差异。

由图 1 可知,对于第 1 季作物,各个模式的大小顺序表现为 RF>RW>RR,其中 RF、RW、RR 模式 2 年的平均地上部生物量分别为 19.55、20.18、19.67 t/hm²。对于第 2 季作物,各个模式地上部生物量的大小顺序表现为 RW>RR>RF,其中 RW 模式显著高于 RR 模式,且 RW 和 RR 模式之间无显

著性差异。由于 RF 模式第 2 季为冬闲,地上部生物量为 0,因此 RF 模式的地上部生物量显著低于其他模式。从整个稻田不同种植模式系统周年来看,各个模式地上部生物量的大小顺序表现为 RW>RR>RF,与 RW 模式相比,RF、RR 模式分别减少了 44.51%和 24.06%。RW 模式地上部生物量最高,均显著高于其他模式,而 RF 模式最低,均显著低于其他模式。



注:不同小写字母表示不同种植模式在 0.05 水平上差异显著,数据以平均值±标准差表示
Note: Different lowercase letters indicated significant differences between planting modes at 0.05 level, the figure are expressed as mean± standard deviation

图 1 不同种植模式对作物产量和地上部生物量的影响

Fig.1 Effects of cropping patterns on grain yield and above ground biomass

2.2 不同种植模式对水稻经济效益的影响 从表 2 可以看出,对于第 1 季作物,RF、RW 和 RR 模式中中稻产值分别为 29 243、29 728 和 29 659 元/hm²,且总投入均为 14 151 元/hm²,对于第 2 季作物,以 RR 模式产值最高,为 12 803 元/hm²,其

次是 RW 模式,RF 模式第 2 季为空闲田,因此无产值。不同种植模式间周年经济效益以 RR 模式最高,达 18 051 元/hm²,从单季来看,第 1 季以 RW 模式最高,第 2 季以 RR 模式最高,因此从效益来看,RR 模式效益最大。

表 2 不同种植模式对水稻经济效益的影响

Table 2 Effects of planting patterns on the economic benefit of rice 元/hm²

处理 Treatment	产值 Total income			成本 Cost			经济效益 Economic income		
	第 1 季 The 1st season	第 2 季 The 2nd season	周年 Whole year	第 1 季 The 1st season	第 2 季 The 2nd season	周年 Whole year	第 1 季 The 1st season	第 2 季 The 2nd season	周年 Whole year
RW	29 728	7 579	37 307	14 151	6 228	20 379	15 577	1 351	16 928
RR	29 659	12 803	42 462	14 151	10 260	24 411	15 508	2 543	18 051
RF	29 243	0	29 243	14 151	0	14 151	15 092	0	15 092

2.3 不同种植模式对水稻有效积温分配的影响 从表 3 可以看出,各模式有效积温在年际间波动较小,比较年有效积温的分配和利用得出,3 种不同种植模式之间存在差异。RW 模式第 1 季有效积温为 2 264 ℃,占全年的 71.63%;第 2 季有效积温为 675 ℃,占全年的 21.35%,两季间的比值为 0.3,两季之和为 2 939 ℃,占全年有效积温 71.63%。RF 和

RR 模式第 1 季有效积温均为 2 264 ℃,占全年有效积温的 71.63%,RR 模式第 2 季有效积温为 633 ℃,占全年有效积温的 29.94%,RR 模式两季间的比值为 0.3;RF 和 RR 模式两季有效积温之和分别为 2 264、2 898 ℃,分别占全年有效积温的 71.63%、93.88%,与 RF 模式相比,RW 和 RR 模式分别增加了 28.48%和 26.65%。

表 3 不同种植模式对水稻季节间有效积温分配的影响

Table 3 Effects of cropping patterns on the effective accumulated temperature of rice

处理 Treatment	第 1 季 First season		第 2 季 Second season		周年 Annual	
	有效积温 Accumulated temperature //℃	比例 Proportion %	有效积温 Accumulated temperature //℃	比例 Proportion %	有效积温 Accumulated temperature //℃	比例 Proportion %
RW	2 264	71.63	675	21.35	2 939	95.23
RR	2 264	71.63	633	20.04	2 898	93.88
RF	2 264	71.63	0	0	2 264	71.63

2.4 不同种植模式对季节间辐射分配的影响 从表 4 可以

看出,比较各模式辐射分配发现,RF 和 RR 模式第 1 季内辐

射量均为 2 283 MJ/m², 占全年总辐射量的 51.21%。RW 模式第 1 季内辐射量为 2 278 MJ/m², 占全年的 54.21%, 第 2 季辐射量为 1 924 MJ/m², 占全年的 43.25%, 两季间的比值为 0.8, 两季辐射量共 4 202 MJ/m², 占全年辐射量的 51.21%。RR 模式第 2 季内辐射量为 1 956 MJ/m², 占全年总辐射量的

43.97%, RW、RR 模式之间辐射量差异不显著, RR 模式两季间的比值分别为 0.9, RF、RR 模式两季辐射量之和分别为 2 278、4 234 MJ/m², 分别占全年辐射的 43.25%、95.18%, 与 RF 模式相比, RW、RR 模式分别增加了 84.09%、85.50%。

表 4 不同种植模式对季节间辐射分配的影响
Table 4 Effects of cropping patterns on the radiation distribution

处理 Treatment	第 1 季 First season		第 2 季 Second season		周年 Annual	
	辐射 Radiation MJ/m ²	比例 Proportion %	辐射 Radiation MJ/m ²	比例 Proportion %	辐射 Radiation MJ/m ²	比例 Proportion %
RW	2 278	51.21	1 924	43.25	4 202	94.46
RR	2 278	51.21	1 956	43.97	4 234	95.18
RF	2 278	51.21	0	0	2 278	51.21

2.5 不同种植模式对水稻光能生产效率的影响 由表 5 可知, 从单季作物来看, 对于第一季作物, 与 RW 模式相比, RF、RR 模式光能生产效率分别减少了 1.63%、0.23%。2018 年, RF、RR 模式的光能生产效率比 RW 模式显著减少了 5.24%、0.66%。对于第 2 季作物, RR 和 RW 模式之间无显著差异,

由于 RF 模式第 2 季为冬闲, 光能生产效率为 0, 因此显著低于其他模式。不同种植模式对周年光能生产效率表现出年度之间差异。各模式周年光能生产效率的大小顺序为 RW>RR>RF, 与 RF 模式相比, RW 和 RR 模式的周年光能生产效率分别提高 0.10 和 0.08 g/MJ, 增幅分别为 36.20% 和 31.55%。

表 5 不同种植模式对光能和积温生产效率的影响
Table 5 Effects of different planting patterns on the solar radiation and GDD production efficiency

处理 Treatment	光能生产效率 Solar radiation production efficiency // g/MJ			积温(≥10℃)生产效率 GDD production efficiency // kg/(hm ² ·℃·d)		
	第 1 季	第 2 季	周年	第 1 季	第 2 季	周年
	The 1st season	The 2nd season	Whole year	The 1st season	The 2nd season	Whole year
RW	0.52±0.01 a	0.16±0.03 c	0.36±0.02 c	5.25±0.11 b	4.68±0.97 a	5.12±0.22 a
RR	0.52±0.01 a	0.14±0.00 c	0.35±0.00 c	5.24±0.08 b	4.39±0.05 a	5.05±0.05 a
RF	0.51±0.02 ab	0	0.26±0.01 d	5.17±0.25 b	0	3.70±0.18 c

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著
Note: Different lowercase letters indicated significant differences at 0.05 level

2.6 不同处理对水稻积温生产效率的影响 由表 5 可知, 对于不同种植模式第 1 季, RR 和 RW 模式积温生产效率比 RF 模式分别提高 0.07 和 0.09 kg/(hm²·℃·d), 增幅分别为 1.42% 和 1.66%, 对于不同种植模式第 2 季, 与 RF 模式积温生产效率相比, RR 和 RW 模式分别为提高 4.39、4.68 kg/(hm²·℃·d), 由于 RF 模式第 2 季为冬闲, 积温生产效率为 0, 因此显著低于其他模式。从不同种植模式周年积温生产效率来看, 与 RW 模式相比, RF、RR 模式积温生产效率分别减少了 1.42、0.07 kg/(hm²·℃·d), 降幅分别为 27.73%、1.27%, RR 和 RW 模式显著高于 RF 模式, RF 模式最低, 显著低于其

他模式。
2.7 不同种植模式对水稻水分利用率的影响 由表 6 可知, 除了降雨量外, 未对油菜和小麦进行灌溉。从单季来看, 对于第一季作物, 不同种植模式 2 年水分利用率的大小顺序均表现为 RW>RR>RF。对于第 2 季作物, 由于 RF 模式第 2 季为冬闲水分利用率为 0 kg/m³, 因此显著低于其他模式。3 种模式在周年水分利用率上表现为 RW>RR>RF, 有显著差异。与 RW 模式相比, RF、RR 模式的水分利用率分别减少了 27.16%、2.41%。

表 6 不同种植模式对水稻水分配置和利用率的影响
Table 6 Effects of different planting patterns on the water distribution and use efficiency of rice

处理 Treatment	降水量 Precipitation // mm			灌溉量 Irrigation // mm			水分利用率 WUE // kg/m ³		
	第 1 季	第 2 季	周年	第 1 季	第 2 季	周年	第 1 季	第 2 季	周年
	The 1st season	The 2nd season	Whole year	The 1st season	The 2nd season	Whole year	The 1st season	The 2nd season	Whole year
RW	511.30	509.60	1 111.90	335	0	335	1.41 b	0.62 cd	1.11 b
RR	511.30	506.00	1 108.30	335	0	335	1.40 b	0.55 d	1.08 b
RF	511.30	600.60	1 111.90	335	0	335	1.38 bc	0	0.81 d

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著
Note: Different lowercase letters indicated significant differences at 0.05 level

3 讨论
稻田轮作制度能够增加作物产量, 并且对各种产量构成

要素具有十分重要的意义^[16-19], 合理的轮作方式可使作物产量提高 10%~15%^[20]。中国南方稻区的玉米-晚稻模式较小

麦-水稻模式增产 10% 以上。王飞等^[21]研究表明,单季稻模式改为油菜-水稻、玉米-水稻、紫云英-水稻、蚕豆-水稻水旱轮作模式后,各模式水稻平均产量较水稻-冬闲模式提高 5.30%~26.70%,水稻季中油菜-水稻和玉米-水稻轮作方式的增产效果最好,旱作期中以玉米-水稻轮作模式增产效果最高,以玉米-水稻轮作模式的产量最高。李清华^[22]研究表明,与冬闲-水稻相比,水旱轮作模式的水稻产量提高了 23.64%~55.49%。该研究结果表明,相比于 RF 模式,RR 和 RW 模式的周年产量分别增加了 25.22%、28.66%,其中 RW 模式的产量最高,是油菜产量的 2 倍左右,但油菜价格一般为小麦价格的 2 倍^[23]。由于 RF 模式第 2 季为冬闲,因此导致 RF 模式的周年产量低于其他模式。

水稻分蘖数、千粒重、结实率等因素都会影响水稻产量^[24-26]。王兰等^[27]研究表明各水旱复种轮作模式的晚稻产量、产量构成因素以及主要生育期群体地上部生物量均高于冬闲连作模式。该研究结果表明,水稻在移栽后 30 d 左右分蘖数达到最大,RR、RW 和 RF 模式中的中稻分蘖数处于较高水平,直至稳定。水稻季中,RR、RW 和 RF 模式的中稻产量最高,中稻生育期较长,且生育期间具有合适的光照及温度,充分利用了 7—8 月份的光温资源,增加了水稻的穗粒数和结实率,故而提高了中稻产量。水稻群体干物质积累是水稻产量形成的物质基础,王勋等^[28]研究表明水稻籽粒产量与水稻干物质积累关系密切,且后期干物质积累与水稻含量呈极显著正相关。水稻后期干物质的积累随有效穗数的增加而增加,即增加水稻群体的量可以提高后期干物质积累量^[29]。

光温资源是影响一个地区作物种植制度的重要影响因素,江汉平原地处南北过渡地带,适宜南北多种作物生长,拥有充足的温、光、水自然资源,为发展多熟农作制提供了优越的自然条件^[30]。其中热量条件是影响植物生长发育的最主要生态因子,也是取得高产的首要条件^[31],因此两熟制季节间资源分配应以热量资源为主,其次是辐射和降水量^[32]。研究结果表明,RW 和 RR 模式总辐射量高,且各模式间总积温差异较小,这是由于 RW 和 RR 模式生育天数较其他模式长,且第 2 季 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温较低。RF 模式全生育期天数明显少于其他模式,其生育期内总积温和总辐射量分别比其他模式减少 610~723 $^{\circ}\text{C}$ 和 1 013~1 952 g/MJ ,这主要是由于 RF 模式第 2 季为冬闲,生育期较其他模式减少了 77~196 d,故而降低了总积温和总辐射量。前人研究结果表明,水旱复种轮作模式的冬季、晚季和周年的光能利用率和积温利用率均高于冬闲连作模式^[33]。该研究表明,与 RF 模式相比,RW、RR 模式的周年光能生产效率和积温生产效率分别提高 36.20%、31.55% 和 27.86%、23.66%,这主要是由于 RF 模式第 2 季没有种植作物,没有充分利用当地的光温资源,造成了光温资源的浪费。

4 结论

3 种植模式中,稻油模式周年经济效益最高,为 18 051 $\text{元}/\text{hm}^2$,周年辐射分配也最高,为 95.18%。稻麦模式周年积温生产效率最高,为 5.12 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{d})$,周年产

量也最高,为 11.32 t/hm^2 。水稻-空闲模式由于第 2 季为冬闲,因此产量和温光资源利用效率显著低于其他模式。与其他模式相比,稻油模式经济效益最高,环境风险更小。选育高抗高产品种是扩大油菜种植面积的关键。冬闲田严重浪费温光资源,因此需进一步筛选环境友好的冬季作物。

参考文献

- [1] 朱德峰,程式华,张玉屏,等.全球水稻生产现状与制约因素分析[J].中国农业科学,2010,43(3):474-479.
- [2] 中稻宜.2015 年全国及各省(市、区)粮食及水稻播种面积和产量[J].中国稻米,2017,23(6):110.
- [3] 陈柏槐.湖北省优质水稻现状与发展思路[J].中国稻米,2004,10(5):12-15.
- [4] LIU S W, ZHANG L, JIANG J Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice seedling nurseries under flooding and moist irrigation regimes in Southeast China [J]. Science of the total environment, 2012, 426: 166-171.
- [5] 马颢楠,盛浩,潘博,等.双季稻-油菜耕作制对土壤肥力质量长期演变的影响[J].土壤与作物,2019,8(4):453-461.
- [6] 孟宇辉,金文俊,董召荣,等.江淮地区不同水旱轮作模式的资源利用效率与经济效益比较[J].生态学杂志,2019,38(11):3357-3365.
- [7] 李成芳,胡红青,曹凑贵,等.中国再生稻田土壤培肥途径的研究与实践[J].湖北农业科学,2017,56(14):2666-2669,2721.
- [8] 李铁球,戴力,夏胜平,等.湖南省稻区种植结构调整研究Ⅲ——水稻改旱作[J].湖南农业科学,2019(7):105-109.
- [9] ZHANG X X, ZHANG R J, GAO J S, et al. Thirty-one years of rice-rice-green manure rotations shape the rhizosphere microbial community and enrich beneficial bacteria [J]. Soil biology and biochemistry, 2017, 104: 208-217.
- [10] 卢胜,张振华.长期稻油轮作改良土壤结构提高水稻产量[J].土壤通报,2018,49(2):409-414.
- [11] 纪龙,乔领璇.扎实推进种植结构调整 助力我国农业提质增效和转型升级[J].中国农技推广,2019,35(10):10-13.
- [12] 武维华.农作物种植结构调整事关我国农业现代化和农业可持续发展[J].民主与科学,2017(1):13-15.
- [13] 王美云,任天志,赵明,等.双季青贮玉米模式物质生产及资源利用效率研究[J].作物学报,2007,33(8):1316-1323.
- [14] 张占琴,魏建军,杨相昆,等.北疆“一年两作”冬小麦-复播青贮玉米模式物质生产及资源利用率研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):28-33.
- [15] 侯连涛,江晓东,韩宾,等.不同覆盖处理对冬小麦气体交换参数及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2006,22(9):58-63.
- [16] 曾家玉,熊楚国,吴平,等.稻田免耕水旱轮作对作物产量及土壤生态效应的影响[J].湖南农业科学,2009(8):34-36.
- [17] 王建国,路战远,程玉臣,等.轮作休耕对小麦和油菜水分利用效率和产量的影响[J].北方农业学报,2018,46(4):29-34.
- [18] 张维乐,戴志刚,任涛,等.不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J].中国农业科学,2016,49(7):1254-1266.
- [19] 戴水莲,王智课,张立,等.中稻和双孢蘑菇轮作效益研究[J].安徽农业科学,2017,45(16):49-51,140.
- [20] 朱练峰,江海东,金千瑜,等.不同复种方式的生产力和效益研究[J].西南农业大学学报(自然科学版),2006,28(6):917-921.
- [21] 王飞,李清华,林诚,等.冷浸田水旱轮作对作物生产及土壤特性的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1469-1476.
- [22] 李清华,王飞,林诚,等.水旱轮作对冷浸田土壤碳、氮、磷养分分化的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):113-117.
- [23] 张士云,郑晓晓,万伟刚.销售渠道和收储设施对销售价格的影响:以安徽省种粮大户为例[J].农业现代化研究,2017,38(4):623-631.
- [24] 胡茂辉,张海清.不同种植模式下秸秆还田对水稻生长发育和产量的影响[J].江西农业学报,2012,24(3):61-63,65.
- [25] 叶文培,谢小立,王凯荣,等.不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J].中国水稻科学,2008,22(1):65-70.
- [26] 黄佑岗,冯跃华,许桂玲,等.不同冬种模式对后茬杂交水稻干物质积累、分配及产量形成的影响[J].南方农业学报,2017,48(8):1402-1408.
- [27] 王兰,黄国勤,孙丹平,等.稻田水旱复种轮作对作物产量及土壤养分的影响[J].生态学杂志,2018,37(11):3284-3290.
- [28] 王勋.不同生态环境下水稻产量、品质和氮素利用特性的比较研究[D].南京:南京农业大学,2004.

因编辑技术对红果番茄杂交种“京番 501”“京番 501”和“京番 602”定向快速创制了粉果番茄杂交种,并能保持原始红果材料的优异农业性状。该研究仅重点研究了樱桃番茄类胡萝卜素的变化规律,关于其类胡萝卜素组分、代谢、分子机制,以及如何快速高效地定向培养不同成熟果色的樱桃番茄还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 徐昌杰,张上隆.柑橘类胡萝卜素合成关键基因研究进展[J].园艺学报,2002,29(S1):619-623.
- [2] HUGHES D A.Dietary carotenoids and human immune function[J].Nutrition,2001,17(10):823-827.
- [3] FRASER P D,BRAMLEY P M.The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids[J].Progress in lipid research,2004,43:228-265.
- [4] DI MASCO P,KAISER S,SIES H.Lycopene as the most efficient biological carotenoid singlet oxygen quencher[J].Archives of biochemistry and biophysics,1989,274(2):532-538.
- [5] MCGHIE T K,AINGE G D.Color in fruit of the genus *Actinidia*: Carotenoid and chlorophyll compositions[J].Journal of agricultural and food chemistry,2002,50(1):117-121.
- [6] 熊作明,周春华,陶俊.不同类型枇杷果着色期间果肉类胡萝卜素含量的变化[J].中国农业科学,2007,40(12):2910-2914.
- [7] 李赫,陈敏,马文平,等.不同成熟期枸杞中类胡萝卜素含量的变化规律[J].中国农业科学,2006,39(3):599-605.
- [8] 王伟杰,徐建国,徐昌杰.宫内伊予柑果实发育期间色泽和色素的变化[J].园艺学报,2006,33(3):461-465.
- [9] MOEHS C P,TIAN L,OSTERYOUNG K W,et al.Analysis of carotenoid biosynthetic gene expression during marigold petal development[J].Plant molecular biology,2001,45(3):281-293.
- [10] FRASER P D,TRUESDALE M R,BIRD C R,et al.Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development(evidence for tissue-specific gene expression)[J].Plant physiology,1994,105(1):405-413.
- [11] RÖMER S,HUGUENEY P,BOUVIER F,et al.Expression of the genes encoding the early carotenoid biosynthetic enzymes in *Capsicum annuum* [J].Biochemical and biophysical research communications,1993,196(3):1414-1421.
- [12] RUIZ D,ECEA J,TOMÁS-BARBERÁN F A,et al.Carotenoids from new apricot(*Prunus armeniaca* L.) varieties and their relationship with flesh and skin color[J].Journal of agricultural and food chemistry,2005,53(16):6368-6374.
- [13] GIL M I,TOMÁS-BARBERÁN F A,HESS-PIERCE B,et al.Antioxidant capacities,phenolic compounds,carotenoids, and vitamin C contents of nectarine,peach, and plum cultivars from California[J].Journal of agricul-

tural and food chemistry,2002,50(17):4976-4982.

- [14] CHEN J P,TAI C Y,CHEN B H.Effects of different drying treatments on the stability of carotenoids in Taiwanese mango(*Mangifera indica* L.)[J]. Food chemistry,2007,100(3):1005-1010.
- [15] IKOMA Y,KOMATSU A,KITA M,et al.Expression of a phytoene synthase gene and characteristic carotenoid accumulation during citrus fruit development[J].Physiologia plantarum,2001,111(2):232-238.
- [16] 王蕾,岳英,鲁晓燕,等.不同色泽番茄品种类胡萝卜素含量的 HPLC 分析[J].石河子大学学报(自然科学版),2011,29(4):442-447.
- [17] 李京,惠伯棣,裴凌鹏.番茄果实成熟过程中类胡萝卜素含量的变化[J].中国食品学报,2006,6(2):122-125.
- [18] 吕鑫,侯丽霞,张晓明,等.番茄果实成熟过程中番茄红素含量的变化[J].中国蔬菜,2009(6):21-24.
- [19] 吴浪,刘婧仪,梁燕.番茄绿果与红果颜色性状遗传的研究[J].园艺学报,2016,43(4):674-682.
- [20] 阮美颖,叶青静,周国治,等.不同颜色樱桃番茄果实成熟过程中色素的变化[J].浙江农业科学,2013(5):526-528.
- [21] BARTLEY G E,SCOLNIK P A.Plant carotenoids:Pigments for photoprotection,visual attraction,and human health[J].The plant cell,1995,7(7):1027-1038.
- [22] SAPIR M,OREN-SHAMIR M,OVADIA R,et al.Molecular aspects of *Anthocyanin* fruit tomato in relation to *high pigment-1*[J].Journal of heredity,2008,99(3):292-303.
- [23] 曲瑞芳,梁燕,巩振辉,等.番茄不同品种间番茄红素含量变化规律的研究[J].西北农业学报,2006,15(3):121-123.
- [24] 常培培,梁燕,张静,等.5 种不同果色樱桃番茄品种果实挥发性物质及品质特性分析[J].食品科学,2014,35(22):215-221.
- [25] CORONA V,ARACRI B,KOSTURKOVA G,et al.Regulation of a carotenoid biosynthesis gene promoter during plant development [J].The plant journal,1996,9(4):505-512.
- [26] PECKER I,GUBBAY R,CUNNINGHAM F X JR,et al.Cloning and characterization of the cDNA for lycopene β -cyclase from tomato reveals a decrease in its expression during tomato ripening [J].Plant molecular biology,1996,30:806-819.
- [27] RONEN G,COHEN M,ZAMIR D,et al.Regulation of carotenoid biosynthesis during tomato fruit development: Expression of the gene for lycopene epsilon-cyclase is down-regulated during ripening and is elevated in the mutant *Delta* [J].The plant journal,1999,17(4):341-351.
- [28] YAN S S,CHEN N,HUANG Z J,et al.*Anthocyanin* fruit encodes an R2R3-MYB transcription factor,SIAN2-like,activating the transcription of *SIMYBATV* to fine-tune anthocyanin content in tomato fruit[J].New phytologist,2020,225(5):2048-2063.
- [29] YANG T X,DENG L,ZHAO W,et al.Rapid breeding of pink-fruited tomato hybrids using the CRISPR/Cas9 system[J].Journal of genetics and genomics,2019,46(10):505-508.

(上接第 36 页)

- [29] 王玉梅,杨广,赵春容,等.不同播种量对直播杂交稻产量及干物质生产的影响[J].杂交水稻,2017,32(3):66-69,78.
- [30] 赵强基,郑建初,卞新民,等.中国南方稻区玉米-稻种植模式的建立和实践[J].江苏农业学报,1997,13(4):215-219.
- [31] LIU Y E,XIE R Z,HOU P,et al.Phenological responses of maize to chan-

ges in environment when grown at different latitudes in China[J].Field crops research,2013,144:192-199.

- [32] 周宝元.黄淮海两熟制资源季节间优化配置及季节内高效利用技术体系研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- [33] 孙丹平.稻田水旱复种轮作对作物生长、资源利用及土壤生态环境的影响[D].南昌:江西农业大学,2016.