

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.03019

品种搭配对湖北省玉米–晚稻复种产量及资源效率的影响

刘志辉¹ 潘高峰² 陈文¹ 秦明广¹ 曹凑贵¹ 常昌龙³ 展茗^{1,*}

¹ 华中农业大学植物科学技术学院 / 农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 湖北武汉 430070; ² 襄阳市农业科学院, 湖北襄阳 441057; ³ 荆门市土壤肥料工作站, 湖北荆门 448000

摘要: 玉米–晚稻复种(M–R)能协同口粮与饲料用量生产, 近年来开始在长江中游地区发展, 其周年丰产高效技术还有待系统研究与完善, 而合理的前后季品种搭配是发挥玉–稻产量潜力的重要基础。因此, 本研究选取不同的玉米与晚稻品种, 于2015年与2017年在湖北省不同区域观测了不同品种搭配模式产量表现与资源利用效率。结果表明, 不同热量条件下品种搭配模式对M–R周年产量与资源生产效率影响显著。积温较多时以中熟玉米搭配晚籼稻品种周年产量与光、热、水资源效率具有明显优势; 反之则以早熟玉米品种搭配晚籼稻产量与资源生产效率较高。各品种搭配模式对周年有效积温($GDD_{\geq 10^{\circ}C}$)的利用率可达95.6%~100.0%, 且前后季积温分配比值(TR)与M–R周年相对产量呈显著的非线性关系; 当 $GDD_{\geq 10^{\circ}C}$ 利用率为97.0%~98.5%且TR为1.06~1.08时, M–R可获得较高的周年产量。因此, 可依据当地的热量资源条件及合理TR比值, 进行玉米、晚稻品种选择搭配。据此, 湖北省南部积温较高的区域宜选择生育期125 d以内的高产玉米品种与全生育期140 d以内的晚稻品种进行搭配; 而在积温相对偏少的中北部区域, 宜选择生育期120 d以内的高产玉米品种与全生育期130 d以内的晚稻品种进行搭配。

关键词: 玉–稻复种; 品种搭配; 产量; 气候资源季间分配; 资源生产效率

Effects of varieties collocation between crop seasons on the yield and resource use efficiency of maize–late rice cropping in Hubei province

LIU Zhi-Hui¹, PAN Gao-Feng², CHEN Wen¹, QIN Ming-Guang¹, CAO Cou-Gui¹, CHANG Chang-Long³, ZHAN Ming^{1,*}

¹ Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River Ministry of Agriculture and Rural Affairs / College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China; ² Xiangyang Academy of Agricultural Sciences, Xiangyang 441057, Hubei, China; ³ Jingmen Soil and Fertilizer Station Jingmen 448000, Hubei, China

Abstract: Maize-late rice cropping (M–R) is considered to coordinate the production of food and feed crop. In recent years, M–R has begun to develop in the middle reaches of the Yangtze River. However, technologies have not been systematically studied and improved for its higher yield and higher resources use efficiency. Especially, a reasonable collocation of varieties between maize and late rice seasons is an important basis to realize the yield potential of M–R, and still is under evaluation. In this study, different maize and late rice varieties were selected and collocated to different M–R modes. Their yield performance and use efficiency of resources were detected in different regions of Hubei province in 2015 and 2017. The results showed that under different heat conditions, the varieties collocation modes had significant effects on the annual yield of M–R and the production efficiency of resources. The modes of medium maturity maize-late *indica* rice cropping had obviously higher annual yield and resource production efficiency under higher accumulated temperature ($GDD_{\geq 10^{\circ}C}$); on the contrary, the annual yield and resource production efficiency of the modes of early maturity maize-late *indica* rice cropping were higher under lower $GDD_{\geq 10^{\circ}C}$. The utilization percentage of the annual effective $GDD_{\geq 10^{\circ}C}$ of each varieties combination mode could reach 95.6%–100.0%, and the distribution ratio of $GDD_{\geq 10^{\circ}C}$ between previous and subsequent season (TR) had a significant non-linear relationship with the relative annual yield of

本研究由国家重点研发计划项目(2016YFD0300308)和国家公益性行业(农业)科研专项(201503122)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300308) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503122).

* 通信作者(Corresponding author): 展茗, E-mail: zhanming@mail.hzau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 1766686187@qq.com

Received (收稿日期): 2020-03-24; Accepted (接受日期): 2020-07-02; Published online (网络出版日期): 2020-08-11.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200811.1554.004.html>

M-R. When the utilization percentage of $GDD_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$ was 97.0%–98.5% and TR was 1.06–1.08, M-R could obtain highest annual yield. Therefore, suitable varieties of maize and late rice could be selected according to the local heat resource and reasonable TR. In summary, high-yield maize varieties with a growth period of 125 days and late rice varieties with a growth period of 140 days should be selected for the southern regions with higher $GDD_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$, while high-yield maize varieties with a growth period of 120 days and late rice varieties with a growth period of 130 days should be selected for the middle and northern regions with relatively lower $GDD_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$ in Hubei province.

Keywords: maize-rice double cropping; varieties collocation; yield; seasonal distribution of climate resources; resource production efficiency

长江中游光热水资源丰富,是我国水稻主产区,也是我国重要的多熟制农作区^[1],在长期的发展中逐渐形成了以稻麦、稻油、双季稻、绿肥稻等多种不同作物搭配为主的种植模式^[2-4],其中水旱轮作已成为该区稻田的主要种植模式^[2]。因此,该区域也是其他粮食作物与油料作物的主要生产区,需要统筹考虑水稻与其他作物的协同发展问题。近年来,随着该区农业生产条件的变化,作物种植比较效益的差异等,导致早稻、油菜等种植面积下降,普遍存在种植结构单一、光热资源潜力发挥不足等生产问题^[5],亟须进行种植结构调整优化,提高该区光、热、水、温资源的利用效率。

长江中游地区不仅是粮食主产区,也是我国重要的畜牧业基地。长期以来作为主要饲料用粮的玉米供需矛盾突出,缺口近 50%^[6-7],因此进行该区玉米生产体系的革新、新技术的研发对于增强该区玉米生产、供应能力,保障畜牧业持续发展具有重要意义^[7-8]。近年来,随着水资源短缺,灌溉成本升高,以及对玉米等牲畜饲料需求的增加,促使农民从水稻连作种植转向春玉米-晚稻水旱复种^[7,9-10]。高光效的 C_4 作物进入稻田形成的玉稻轮作模式已引起国内外学者的关注^[9,11-14]。在亚洲地区玉米-水稻轮作系统种植面积超过了 $3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[13]。已有研究表明玉稻复种模式在产量和资源利用率上显著高于其他复种模式^[12-13],李小勇^[15]研究表明玉-稻周年产量可达 21.3 t hm^{-2} ,玉-稻和双季玉米产量均显著高于双季稻,但玉-稻和双季玉米产量差异不显著;与传统双季稻模式相比,玉-稻周年土地资源利用率,光、温、水资源生产效率和光能利用率分别提高了 9.75%、14.7%、20.4%、12.1%和 19.1%。在自然条件和生态适应性合适的情况下,玉-稻模式的光热资源利用效率,多产业综合效益等均高于双季稻模式与早稻-秋玉米模式^[9]。最新研究表明与双季稻模式相比,玉-稻模式能显著降低碳排放,具有更低的碳足迹^[16-17],被联合国粮农组织作为一种对农业集约化生产具有可持续性和战略意义

的模式^[18]。有研究表明玉-稻模式也有利于晚稻增产,与双季稻模式的晚稻相比,采用同一耕作方式下,玉稻模式的晚稻产量增幅为 2.13%~6.47%^[9,15]。从周年产量、综合效益、资源利用效率看,玉米-晚稻模式均优于早稻-秋玉米模式,因而被认为是玉米-水稻水旱轮作的适宜模式,可在长江中游区域推广应用^[9]。

玉-稻模式与传统双季稻相比,有利于粮饲二元结构的发展^[9];与传统的油-稻、麦稻模式相比,晚稻米质要优于中稻,对于调整稻米品质结构有积极意义。可见该模式在长江中游稻区具有一定的推广价值。已有研究表明玉-稻系统的产量潜力可达 $15 \sim 22 \text{ t hm}^{-2}$,而实际产量与此还存在 25%~50%的产量差异^[13]。如何进一步发挥其产量潜力,提高其光温资源利用效率,还有待从两季作物品种搭配、周年水肥统筹管理、作物群体调控等方面进行系统深入研究。此外,玉-稻水旱轮作周年安全积温的需求规律及其区域的适应性尚未见研究报道。因此,本研究选用不同春玉米与晚稻品种,组合不同的搭配模式,探明满足安全积温需求下,其产量及资源利用效率较优的品种组合模式,为该模式在长江中游的安全推广应用与合理品种搭配选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域及试验点概况

2015 年试验点设在湖北省荆门市漳河区 ($30^{\circ}94'N$, $112^{\circ}10'E$); 2017 年试验点设在荆门市屈家岭区 ($30^{\circ}53'N$, $112^{\circ}46'E$)、黄冈市梅家墩村 ($30^{\circ}27'N$, $114^{\circ}52'E$)。试验点均位于湖北省 200 m 海拔以下的低丘陵平原区,属于亚热带季风气候区,无霜期约 240~260 d, 10 以上持续期约 230~240 d。该区域为湖北省典型稻田两熟区。荆门市漳河及屈家岭试验点的土壤为黄棕壤,黄冈梅家墩村试验点的土壤为潮土,均为多年水旱轮作稻田,各试验点 0~20 cm 土壤理化指标见表 1。

表 1 各试验点土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil at the experimental plots

试验地 Experimental plots	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	可交换性钾 Exchangeable potassium (mg kg ⁻¹)
漳河 Zhanghe	22.8	1.27	0.69	4.96	13.38	88.80
屈家岭 Qujialing	25.2	1.44	0.59	18.02	9.83	179.60
梅家墩 Meijiadun	20.59	0.65	1.51	7.67	24.86	71.75

1.2 试验设计

各试验点春玉米选用不同生育期的品种, 晚稻选用不同的品种类型, 组合成不同的周年品种搭配模式, 主要包括早熟玉米与籼稻品种搭配(EM-IR)、中熟玉米与籼稻品种搭配(MM-IR)、早熟玉米与粳稻品种搭配(EM-JR)、中熟玉米与粳稻品种搭配(MM-JR) 4 种搭配模式。各年份试验点的品种组合

模式及选用品种见表 2。各试验点春玉米季均采用随机区组排列, 3 次重复; 晚稻季则在各玉米品种小区内安排种植各晚稻品种。漳河试验点玉米季小区面积为 240 m², 晚稻季小区面积为 60 m²; 屈家岭试验点小区面积为 156 m², 晚稻季小区面积为 78 m²; 梅家墩试验点小区面积为 174 m², 晚稻季小区面积为 87 m²。

表 2 各试验点选用的玉米与晚稻品种及其搭配模式

Table 2 Selected maize and late rice varieties and their collocation modes

试验年份及地点 Experimental years and plots	作物品种 Crop variety	早熟玉米-籼稻 EM-IR	早熟玉米-粳稻 EM-JR	中熟玉米-籼稻 MM-IR	中熟玉米-粳稻 MM-JR
2015 漳河 Zhanghe in 2015	春玉米品种 Varieties of spring maize	郑单 958 Zhengdan 958	郑单 958 Zhengdan 958	汉单 777 Handan 777	汉单 777 Handan 777
	晚稻品种 Varieties of late rice	天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17	天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17
		黄华占 Huanghuazhan	天源粳 036 Tianyuanjing 036	黄华占 Huanghuazhan	天源粳 036 Tianyuanjing 036
2017 屈家岭 Qujialing in 2017	春玉米品种 Varieties of spring maize	兴垦 6 号 Xingken 6	兴垦 6 号 Xingken 6	登海 618 Denghai 618	登海 618 Denghai 618
	晚稻品种 Varieties of late rice	天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17	天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17
		天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17	天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17
2017 梅家墩 Meijiadun in 2017	春玉米品种 Varieties of spring maize	兴垦 6 号 Xingken 6	兴垦 6 号 Xingken 6	登海 618 Denghai 618	登海 618 Denghai 618
	晚稻品种 Varieties of late rice	天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17	天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17
		天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17	天两优 953 Tianliangyou 953	鄂晚 17 Ewan 17

EM-IR: early maturity maize varieties cropping with *indica* rice varieties; EM-JR: early maturity maize varieties cropping with *japonica* rice varieties; MM-IR: medium maturity maize varieties cropping with *indica* rice varieties; MM-JR: medium maturity maize varieties cropping with *japonica* rice varieties.

1.3 田间管理

每年 3 月下旬播种春玉米。春玉米播种前结合施底肥旋耕整地, 然后按 1.8 m 开沟做厢, 厢宽为 1.5 m, 沟宽为 0.3 m。春玉米等行距种植, 行距为 60 cm, 株距为 22 cm, 种植密度为 75,757 株 hm⁻²。玉米季氮肥施用为 270 kg N hm⁻², 50%用做底肥, 于玉米播种前施用; 50%做穗肥于玉米大喇叭口期施用; P₂O₅ 施用量为 180 kg hm⁻², 全部做底肥; K₂O 施用量为 150 kg hm⁻², 50%做底肥, 50%做穗肥追施。氮

肥采用普通尿素, 磷肥为过磷酸钙, 钾肥为氯化钾。按当地常规方法进行病虫草害防治。每年 7 月 15 日至 30 日期间收获春玉米, 收获后秸秆粉碎还田, 灌水泡田, 准备移栽晚稻。

晚稻于 6 月 20 日至 25 日间播种育秧。玉米收获后, 按行距 25 cm、株距 13 cm 人工移栽水稻, 移栽密度为 30.8 万穴 hm⁻²。晚稻施纯氮 210 kg hm⁻², 30%做底肥, 水稻移栽前施用; 30%做促蘖肥, 移栽后返青时撒施; 25%做促花肥, 水稻拔节后 5~10 d 撒

施; 15%做粒肥, 水稻齐穗时撒施。施 K_2O 90 kg hm^{-2} , 50%做底肥、50%做促花肥。磷肥已前移到了玉米季作底肥深施。晚稻返青期间采用保持 $0.5\sim 1.0\text{ cm}$ 薄水层, 孕穗—齐穗期间采用浅水淹灌, 其余时期采用间歇湿润灌溉。按当地常规方法进行病虫害防治。

1.4 样品采集及指标测定

生育期调查及气象数据获取: 记录、调查玉米播种、出苗、吐丝、生理成熟等生育时期; 及晚稻播种期、移栽期、齐穗期、成熟期等。各年份气象数据均从当地气象部门获取, 包括日均温、日降水量、日照时数等日值气象数据。日太阳总辐射根据以下公式 $Q = Q_0(a + bS/S_0)$ 计算, 式中, Q 为太阳总辐射, Q_0 为天文辐射, S 为实测日照时数, S_0 为太阳可照时数, a 、 b 为待定系数^[19]。

玉米生物量及产量的测定: 玉米生理成熟期, 在各处理小区, 每一行每隔 $2\sim 3$ 株选择 1 株, 调查植株的穗位高及穗位叶长宽, 算出各小区平均值, 然后每小区取接近平均值的 3 株植株, 分解为茎、叶和籽粒 3 部分, 105°C 杀青 30 min, 80°C 烘干至恒重后称重。每个小区采用间隔连续法, 根据小区面积, 每个小区收取 $50\sim 80$ 株玉米果穗, 调查穗粒数, 风干后脱粒, 测定总重、含水量和千粒重, 计算实产(按 14%含水量换算)。

晚稻生物量及产量的测定: 晚稻成熟期, 先连续调查 50 穴, 计算每穴平均茎蘖数, 然后各小区选择 6 穴平均茎蘖数代表性样株, 分解为茎、叶和穗 3 部分, 105°C 杀青 30 min, 80°C 烘干至恒重后称重。同时各小区按对角线取 3 点 3 m^2 稻穗测产, 收后记录实际收割穴数, 调查穗数, 脱粒并晒干, 风选清除杂质后, 测定总重、含水量和千粒重, 计算实产(按 14%含水量换算)。

1.5 相关指标计算

相对产量(relative yield, RY) = 某模式周年产量 / 同试验点最高周年产量

潜在可生长期(d): 为玉米安全播种日期至晚稻安全成熟日期历时天数。其中用稳定通过 10°C 以上 (5 日滑动平均法)的初始日期作为玉米的安全播种期^[20], 用稳定通过 15°C 以上, 不连续出现 3 d 以上日均温低于 15°C 的终止日期作为晚稻的安全成熟期^[21]。

$$10^\circ\text{C 有效积温}(\text{GDD}) = \sum_0^n \left(\frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} - T_{\text{base}} \right)$$

积温利用率(TUE, %) = 玉—稻模式生长期有效积温 / 周年总有效积温 ($\text{GDD}_{10^\circ\text{C}} \times 100\%$)

前后季积温分配比值(TR) = 玉米季有效积温 / 晚稻季有效积温

光能生产效率($\text{g MJ}^{-1}\text{ hm}^{-2}$) = 单位面积籽粒产量 / 单位面积的太阳辐射

积温生产效率($\text{kg kg}^{-1}\text{ d}^{-1}\text{ hm}^{-2}$) = 单位面积籽粒产量 / 生育期间积温总量

降水生产效率($\text{kg hm}^{-2}\text{ mm}^{-1}$) = 单位面积籽粒产量 / 单位面积的降水量

氮肥偏生产力($\text{kg kg}^{-1}\text{ N}$) = 籽粒产量 / 施氮量

1.6 数据统计与分析

用 Microsoft Excel 2010 整理数据和作图, 用 DPS 统计软件进行方差分析, LSD 法进行多重比较, 显著性水平设定 $P = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 品种搭配对作物生育期的影响

由表 3 看出, 籼稻品种天两优 953 与早熟玉米品种及中熟玉米品种搭配均可在 9 月中旬前安全抽穗, 10 月底至 11 月初安全成熟; 籼稻品种黄华占齐穗期比天两优 953 晚 20 d 以上, 未能成熟, 不适宜作为与春玉米接茬的晚稻品种; 粳稻品种鄂晚 17 与早熟玉米品种和中熟玉米品种搭配也可在 11 月 10 日左右安全成熟, 但在鄂中北的荆门市屈家岭试验点抽穗较慢, 生育期推迟 $7\sim 12\text{ d}$ 左右, 搭配时安全成熟具有一定的风险; 天源粳 036 在荆门屈家岭抽穗比鄂晚 17 提早 $8\sim 9\text{ d}$, 生育期比鄂晚 17 缩短 2 d , 可以作为当地春玉米晚稻候选粳稻品种。周年潜在生长天数可作为玉—稻模式能安全成熟种植的条件, 对玉—稻种植模式而言, 湖北南部的黄冈地区(梅家墩)潜在生长天数要多于中北部的荆门地区(漳河和屈家岭) $9\sim 11\text{ d}$ (表 3)。本试验所选用的玉米—晚稻品种搭配模式基本充分利用了荆门地区的潜在生长天数, 达 $94\%\sim 100\%$; 而在黄冈地区潜在生长天数利用率为 $86\%\sim 94\%$ (表 3)。

可见, 在湖北东南部及中部区域玉米品种可选择 7 月 25 日之前成熟(全生育期 125 d 以内品种), 晚稻品种可选择 11 月 10 日之前成熟(全生育期 140 d 以内品种)进行搭配; 而在湖北省中北部选择 7 月 20 日之前成熟的玉米品种, 11 月 5 日之前成熟的晚稻品种进行搭配, 具有较高的成熟安全性。

表 3 不同品种搭配模式下春玉米、晚稻的生育期与周年生长期
Table 3 Growth stage of spring maize and late rice under different modes of varieties collocation and their growing period

试验地点 Experimental plots	品种搭配模式 Modes of varieties collocation		春玉米 Spring maize			晚稻 Late rice			周年生长期 Annual growing period (d)	
	玉米品种 Maize varieties	水稻品种 Rice varieties	播种期-吐丝期-成熟期 Sowing-silking-maturity (month/date)	全生育期 Whole growth period (d)	播种-移栽-齐穗期-成熟期 Sowing-transplanting-heading-maturity (month/date)	本田生长期 Growth days after transplanting (d)	潜在生长期 Potential growing days	实际生长期 Actual growing period	潜在生长期 Potential growing days	实际生长期 Actual growing period
2015 漳河 Zhanghe in 2015	郑单 958	鄂晚 17 Ewan 17	3/27-6/8-7/25	120	6/15-7/28-9/15-11/7	103	225	223	225	223
	Zhengdan 958	天源粳 036 Tianyuanyjing 036			6/15-7/28-9/7-11/5	101		221		221
		天两优 953 Tianliangyou 953			6/15-7/28-9/7-10/28	92		212		212
		黄华占 Huanghuazhan			6/15-7/28-9/27-immaturity	—		—		—
2017 屈家岭 Qujialing in 2017	汉单 777	鄂晚 17 Ewan 17	3/27-6/12-7/30	126	6/15-7/31-9/17-11/7	99		225		225
	Handan 777	天源粳 036 Tianyuanyjing 036			6/15-7/31-9/8-11/5	97		223		223
		天两优 953 Tianliangyou 953			6/15-7/31-9/8-10/28	88		214		214
		黄华占 Huanghuazhan			6/15-7/31-10/7-immaturity	—		—		—
2017 梅家墩 Meijiadun in 2017	兴垦 6 号 Xingken 6	鄂晚 17 Ewan 17	3/25-6/3-7/15	113	6/18-7/22-9/12-11/9	110		223		223
	登海 618 Denghai 618	天两优 953 Tianliangyou 953			6/18-7/22-9/2-11/4	105		218		218
		鄂晚 17 Ewan 17	3/25-6/10-7/22	120	6/24-7/26-9/12-11/9	106		226		226
		天两优 953 Tianliangyou 953			6/24-7/26-9/2-11/4	101		221		221
2017 梅家墩 Meijiadun in 2017	兴垦 6 号 Xingken 6	鄂晚 17 Ewan 17	3/28-6/7-7/16	111	6/19-7/24-9/9-11/3	102		222		222
	登海 618 Denghai 618	天两优 953 Tianliangyou 953			6/19-7/24-8/30-10/25	92		203		203
		鄂晚 17 Ewan 17	3/28-6/11-7/20	116	6/25-7/28-9/9-11/6	100		216		216
		天两优 953 Tianliangyou 953			6/25-7/28-8/30-10/27	90		206		206

2.2 作物生长期气象条件

由图 1-a 看出, 各试验点 7 月中旬至 8 月下旬日均温均在 25 以上, 屈家岭(QJL)与梅家墩(MJD)点日均温高于漳河(ZH)点。3 个试验点玉米主要生长季(3 月下旬至 7 月下旬) 10 有效积温($GDD_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$)明显高于晚稻主要生长季(8 月上旬至 11 月上旬)。从单个作物季来看, QJL 与 MJD 点玉米季 $GDD_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$ 明显高于 ZH 点, 而晚稻季 3 试验点差异不明显。

由图 1-b 看出, 各试验点降雨量变异较大。QJL、MJD 和 ZH 三个试验点作物主要生长季(3 月下旬至 11 月上旬)累积降雨量分别为 1049.2、933.0 和 800.5 mm。MJD、ZH 两试验点玉米主要生长季(3 月下旬至 7 月下旬)降水量多于晚稻主要生长季(8 月上旬至 11 月上旬), 而 QJL 点则相反。

由图 1-c 看出, 3 个试验点各月光辐射变化较大, 因受降水多的影响, 6 月光辐射普遍较低; 而 QJL 和 MJD 两个试验点在 9 月下旬至 10 月中旬光辐射也较低。QJL、MJD 和 ZH 三个试验点 3 月下旬至 11 月上旬累积光辐射分别为 4076.8、3702.8 和 3965.3 MJ m^{-2} 。总体来看, 3 个试验点玉米主要生长季的光辐射明显高于晚稻主要生长季。在晚稻季, ZH 点累积光辐射高于其他 2 个试验点。

2.3 品种搭配对玉米-晚稻复种干物质积累及产量的影响

由表 4 可知, 不同春玉米-晚稻品种搭配模式对生物量积累与产量均有显著影响。总体来看, 中熟玉米品种的生物量高于早熟玉米品种; 籼稻品种的生物量高于粳稻品种; 因此中熟玉米品种搭配晚籼稻品种周年生物量显著高于其他品种搭配模式, 早熟玉米品种与晚粳稻搭配周年生物量则最低。

屈家岭和梅家墩试验点中熟玉米品种登海 618 (DH)产量显著高于早熟品种兴垦 6 号(XK), 分别提高了 14.9%和 25.6%, 主要是 DH 的穗粒数显著高于 XK; 而漳河试验点 2 个品种产量无显著差异, 主要是两者在穗粒数与粒重上取得了平衡。4 个搭配模式晚籼稻品种产量显著高于粳稻品种, 漳河试验点天两优 953 (TLY)产量平均比鄂晚 17 (EW)增加 42.5%, 屈家岭和梅家墩试验点产量增幅为 8.0%~17.1%; 由产量构成看出, 3 个试验点籼稻的单位面积穗数显著高于粳稻; 在漳河点 TLY 粒重显著高于 EW, 而在屈家岭与梅家墩试验点 TLY 穗粒数显著高于 EW。

3 个试验点春玉米-晚稻周年产量总体上高于 15 t hm^{-2} (表 4), 中早熟玉米品种搭配晚籼稻周年产量显著高于春玉米-晚粳稻模式, 其中 DH-TLY 搭配模式周年产量最高, 在梅家墩试验点达到 18.97 t hm^{-2} , 显著高于其他几种搭配模式。总体来看, 在屈家岭与梅家墩试验点周年产量由高到低的品种搭配模式为: 中熟春玉米-晚籼稻>中熟春玉米-晚粳稻>早熟春玉米-晚籼稻>早熟春玉米-晚粳稻(表 4)。而漳河试验点 ZD-TLY 搭配模式周年产量最高, 为 18.27 t hm^{-2} , 且显著高于中熟春玉米品种 HD-TLY 模式; 但晚籼稻品种黄华占与 2 个玉米品种搭配时均未能成熟。可见玉-稻复种安全成熟及产量受品种生育期及品种类型影响较大, 在不同区域种植时, 应选择不同的适宜品种进行搭配。

2.4 季间积温分配比及积温利用率与周年产量的关系

由图 2 看出, 处于湖北南部的梅家墩试验点周年 $GDD_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$ 有效积温高于湖北中北部的屈家岭与漳河试验点。各试验点玉-稻两季对周年有效积温的利用较充分, 积温利用率(TUE)达 95.6%~100.0%, 偏湖北南部的梅家墩试验点 TUE 低于其他 2 个试验点。品种搭配模式不同, 前后季积温分配比值(TR)不同, 变化范围为 0.91~1.20 (图 2)。各试验点中熟玉米品种搭配晚稻的模式 TR 明显高于早熟品种搭配晚稻模式; 而对于同一个玉米熟性品种而言, 搭配籼稻或粳稻品种对于 TR 影响不明显。3 个试验点中熟玉米-晚稻模式均表现为玉米季积温分配量大于晚稻季; 而屈家岭和梅家墩试验点 2 个早熟玉米-晚稻模式晚稻季积温分配量大于玉米季(图 2)。

由图 3-a 可知, 春玉米-晚粳稻周年相对产量(y_{M-JR})、春玉米-晚籼稻周年相对产量(y_{M-IR})与前后季积温比值(x)均呈显著的非线性相关关系, 其数学模型分别为 $y_{M-JR} = -4.69x^2 + 9.95x - 4.28$ ($R^2 = 0.6077^{**}$), $y_{M-IR} = -4.99x^2 + 10.77x - 4.82$ ($R^2 = 0.5683^{**}$)。根据该模型可知春玉米-晚粳稻在前后季积温比值(TR)为 1.06 时相对产量最高; 春玉米-晚籼稻模式 TR 为 1.08 时相对产量最高。同时由图 3-b 看出, 两季作物对周年有效积温量($GDD_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$)的利用率明显影响周年产量, 两者之间呈显著的二次曲线关系。春玉米-晚粳稻模式积温利用率(TUE)为 98.5%时产量较高, 而春玉米-晚籼稻模式 TUE 为 97.0%时周年产量较高。据此可依据当地的周年有效积温量及玉米-晚稻积温分配比进行玉米与晚稻品种的筛选搭配。

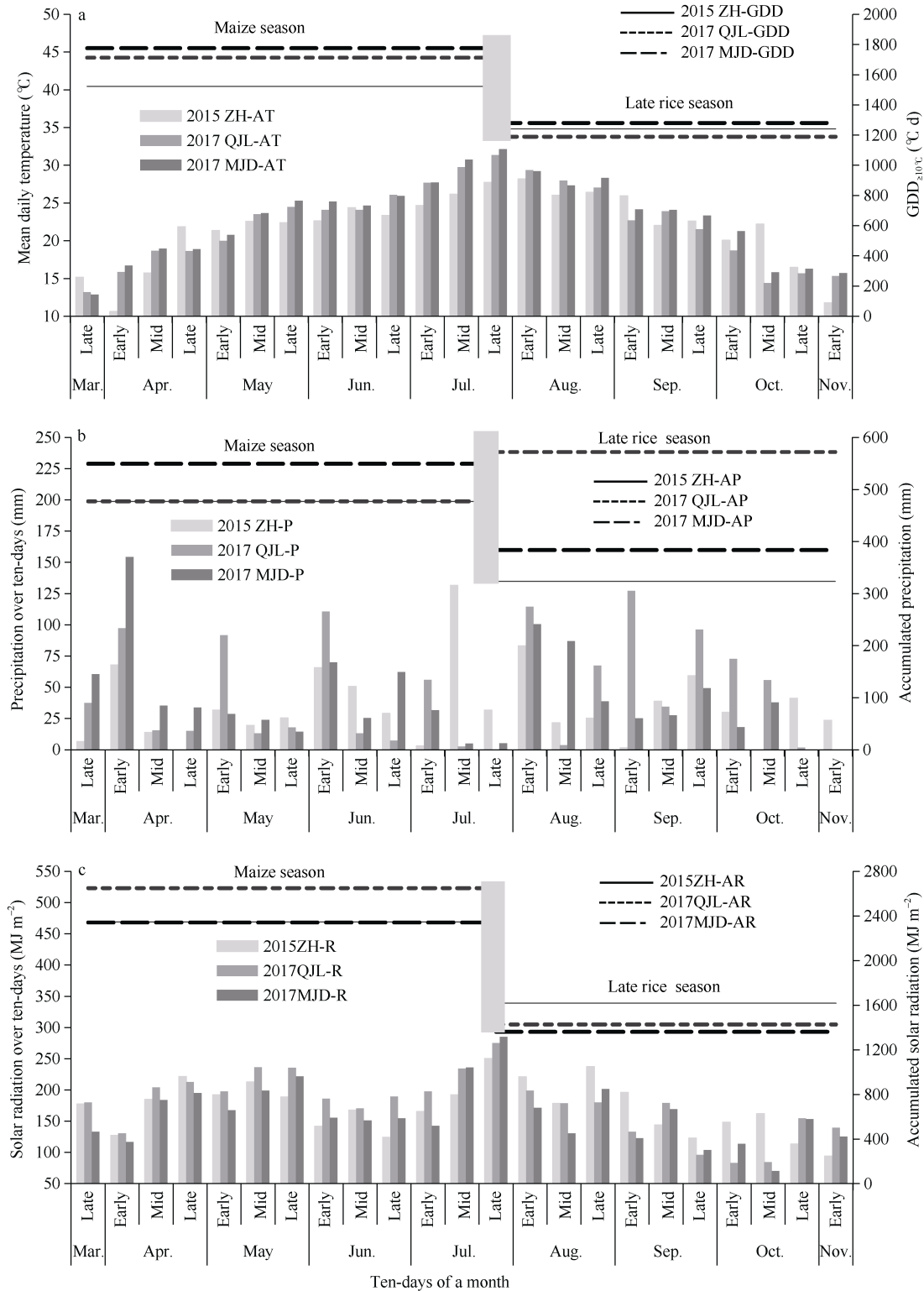


图 1 试验期间旬平均气温(a)、降水(b)、光辐射(c)动态及其在两作物季间的分配

Fig. 1 Dynamic variation of mean temperature (a), rainfall (b), and solar radiation (c) over ten-days and their distributions between two crops seasons during experimental period

ZH: 漳河; QJL: 屈家岭; MJD: 梅家墩; AT: 日均温; GDD: 10°C 有效积温; P: 旬累积降水量; AP: 作物季累积降雨量; R: 旬累积光辐射; AR: 作物季累积光辐射。

ZH: Zhanghe; QJL: Qujialing; MJD: Meijiadun; AT: averaged daily temperature; GDD: growing degree days over 10 ; P: precipitation within ten-day; AP: accumulated precipitation in crop seasons; R: solar radiation within ten-day; AR: accumulated radiation in crop seasons.

表 4 不同品种搭配模式下春玉米与晚稻的生物量、产量及其构成
Table 4 Dry matter accumulation, grain yield and yield components of spring maize and late rice under different modes of varieties collocation

Experimental plots	种搭配模式 Modes of varieties collocation			生物量 Biomass (t hm ⁻²)			产量构成 Yield components						产量 Grain yield (t hm ⁻²)	
	玉米品种 Maize varieties	水稻品种 Rice varieties	玉米 Maize	晚稻 Late rice	周年 Annual	玉米 Maize			晚稻 Late rice			玉米 Maize	晚稻 Late rice	
						EN (×10 ⁴ hm ⁻²)	GN (No.)	GW (g)	EN (×10 ⁴ hm ⁻²)	GN (No.)	GW (g)			
2015 漳河 Zhanghe in 2015	郑单 958	鄂晚 17 Ewan 17	18.94 a	13.72 a	31.66 ab	—	—	—	246.9 c	75.9 a	27.7 c	9.09 a	6.38 c	15.47 c
	Zhengdan 958	天源粳 036 Tianyuanjing 036	—	12.95 b	31.89 a	7.55 a	385.4 b	300.6 a	355.4 a	61.3 b	28.6 c	—	6.58 c	15.67 c
	—	天两优 953 Tianliangyou 953	—	13.13 ab	32.07 a	—	—	—	333.5 a	76.2 a	32.5 a	—	9.18 a	18.27 a
	—	黄华占 Huanghuazhan	—	11.67 c	30.61 b	—	—	—	—	—	—	—	—	9.09 e
	汉单 777	鄂晚 17 Ewan 17	19.42 a	8.92 e	28.34 d	7.28 a	491.7 a	241.4 b	238.7 c	70.8 ab	27.8 c	8.74 a	5.51 d	14.25 d
2017 屈家岭 Qujialing in 2017	Handan 777	天源粳 036 Tianyuanjing 036	—	10.64 d	30.06 bc	—	—	—	287.7 b	61.3 b	30.3 b	—	5.89 d	14.63 d
	—	天两优 953 Tianliangyou 953	—	13.36 ab	32.78 a	—	—	—	295.2 b	71.2 a	30.7 b	—	7.77 b	16.51 b
	—	黄华占 Huanghuazhan	—	10.56 d	29.98 c	—	—	—	—	—	—	—	—	8.74 e
	兴垦 6 号	鄂晚 17 Ewan 17	15.57 b	10.23 c	25.80 c	7.15 a	432.3 b	372.9 a	332.0 b	55.2 b	22.3 b	10.69 b	5.89 b	16.58 c
	Xingken 6	天两优 953 Tianliangyou 953	—	13.29 a	28.86 ab	—	—	—	446.1 a	89.2 a	22.5 ab	—	6.69 a	17.38 b
2017 梅家墩 Meijiadun in 2017	登海 618	鄂晚 17 Ewan 17	17.38 a	10.72 c	28.10 b	7.22 a	500.9 a	344.6 b	336.8 b	64.4 b	23.0 ab	12.28 a	6.03 ab	18.31 a
	Denghai 618	天两优 953 Tianliangyou 953	—	12.56 b	29.54 a	—	—	—	473.5 a	79.7 a	24.3 a	—	6.51 a	18.79 a
	—	鄂晚 17 Ewan 17	14.53 b	12.13 c	26.66 d	6.68 a	365.3 b	343.6 a	310.8 b	81.6 b	29.2 a	7.86 b	6.83 c	14.69 d
	兴垦 6 号	天两优 953 Tianliangyou 953	—	17.66 a	32.19 bc	—	—	—	439.7 a	100.3 a	25.0 b	—	8.00 b	15.86 c
	Xingken 6	鄂晚 17 Ewan 17	18.34 a	13.64 b	31.98 c	6.82 a	479.7 a	308.1 b	317.5 b	88.3 b	27.4 a	9.87 a	8.28 b	18.15 b
登海 618	天两优 953 Tianliangyou 953	—	17.53 a	35.87 a	—	—	—	397.1 a	113.8 a	25.3 b	—	9.10 a	18.97 a	

EN: 玉米穗数; PN: 水稻穗数; GN: 穗粒数; GW: 千粒重。同试验点同列不同的小写字母表示不同品种或不同品种搭配模式之间的差异显著性($P \leq 0.05$)。

EN: ears number; PN: panicles number; GN: grains number; GW: 1000-grain weight. Different lowercase letters within the same column indicate significant difference among different varieties or collocation modes at the same experimental site at $P \leq 0.05$.

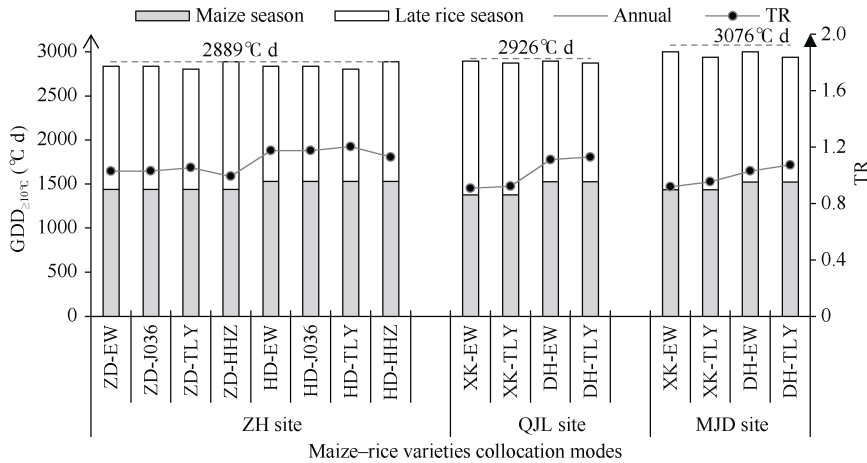


图 2 不同玉-稻品种搭配下有效积温($GDD_{\geq 10^{\circ}C}$)及其季间分配比(TR)

Fig. 2 Effective growing degree days ($GDD_{\geq 10^{\circ}C}$) in crop growing seasons and the ratio of GDD between maize and rice season (TR) under different varieties collocation modes of maize-late rice cropping

ZD: 郑单 958; HD: 汉单 777; XK: 兴垦 6 号; DH: 登海 618; EW: 鄂晚 17; TYG: 天源粳 036; TLY: 天两优 953; HHZ: 黄华占。
 ZD: Zhengdan 958; HD: Handan 777; XK: Xingken 6; DH: Denghai 618; EW: Ewan 17; TYG: Tianyuanjing 036; TLY: Tianliangyou 953; HHZ: Huanghuazhan.

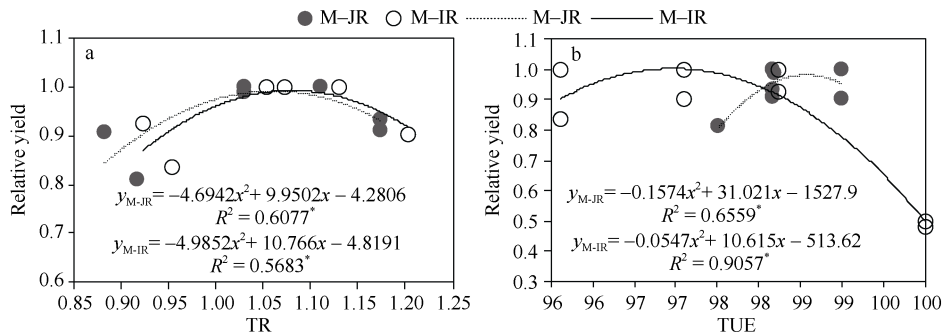


图 3 玉米-晚稻模式前后季积温比值(TR)及周年积温利用率(TUE)与周年相对产量的关系

Fig. 3 Relationship of GDD ratio between two crops seasons (TR) and its percentage of the total annual $GDD_{\geq 10^{\circ}C}$ (TUE) with the relative annual yield under maize-late rice cropping

M-JR: 玉米搭配粳稻品种; M-IR: 玉米搭配籼稻品种。*表示 $P \leq 0.05$ 。

M-JR: maize varieties cropping with japonica rice varieties; M-IR: maize varieties cropping with indica rice varieties. * indicates significant difference at $P \leq 0.05$.

2.5 不同品种搭配模式周年气候资源生产效率

由表 5 看出, 3 个试验点的 4 种搭配模式下晚稻季气候资源生产效率均表现出籼稻高于粳稻; 屈家岭和梅家墩试验点的玉米季积温生产效率、光能生产效率和降水生产效率表现为中熟品种高于早熟品种; 漳河试验点早熟品种郑单 958 气候资源生产效率高于中熟品种。另外, 屈家岭和梅家墩试验点的 4 种模式周年积温、光能和降水资源生产效率从高到低为: 中熟春玉米-晚籼稻、中熟春玉米-晚粳稻、早熟春玉米-晚籼稻、早熟春玉米-晚粳稻; 漳河试验点早熟春玉米-晚籼稻周年气候资源生产效率最高, 其次分别为中熟春玉米-晚籼稻、早熟春玉米-晚粳稻、中熟春玉米-晚粳稻。从氮肥偏生产力(PFPN)看, 屈家岭和梅家墩试验点中熟玉米 PFPN 要显著

高于早熟玉米, 而在漳河点则差异不显著; 3 个试验点籼稻的 PFPN 均显著高于粳稻; 屈家岭和梅家墩试验点中熟玉米-晚籼稻搭配 PFPN 显著最高, 而在漳河点早熟玉米-晚籼稻搭配 PFPN 显著最高。

3 讨论

随着农业生产的发展, 作为种植业优势区的长江中游形成了以水稻为主体的, 水稻与麦、油、蔬菜等多作物复种的多元种植模式^[22-23], 近年来新型的玉-稻种植模式在长江中游得到了较快的发展^[9,15,24]。已有研究表明玉米-水稻复种具有较高的产量潜力^[13,15]。本研究发现, 2017 年中熟玉米-晚籼稻搭配周年产量可达到 18 t hm^{-2} 以上, 这与我们的前期研究较一致^[9]。适宜的品种选择是作物增产

表 5 玉-稻系统不同品种搭配模式下资源生产效率的差异

Table 5 Production efficiency of resources under different modes of varieties collocation of maize-late rice cropping system

试验地点 Experimental plots	种搭配模式 Modes of varieties collocation	积温生产效率 Production efficiency of AT (kg hm ⁻² °C ⁻¹)			光能生产效率 Production efficiency of radiation (g hm ⁻² MJ ⁻¹)			降水生产效率 Production efficiency of precipitation (kg hm ⁻² mm ⁻¹)			氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity (kg kg ⁻¹ N)				
		玉米 Maize	晚稻 Late rice	周年 Annual	玉米 Maize	晚稻 Late rice	周年 Annual	玉米 Maize	晚稻 Late rice	周年 Annual	玉米 Maize	晚稻 Late rice	周年 Annual		
		2015 漳河 Zhanghe	EM-JR	6.32 a	4.64 c	5.49 c	0.43 a	0.37 b	0.41 b	19.22 a	20.64 c	19.78 c	33.68 a	30.40 c	32.24 b
			EM-IR		6.72 a	6.51 a		0.55 a	0.49 a		31.12 a	23.79 a		43.73 a	38.07 a
	MM-JR	5.71 b	4.37 c	5.09 d	0.39 b	0.35 b	0.38 c	18.48 a	18.15 c	18.35 c	32.38 a	26.25 d	29.69 c		
	MM-IR		6.10 b	5.89 b		0.51 a	0.44 b		26.34 b	21.50 b		37.00 b	34.40 b		
2017 屈家岭 Qujialing	EM-JR	7.75 a	3.88 c	5.72 c	0.49 a	0.32 c	0.41 c	22.99 b	10.26 b	15.96 c	39.59 b	28.03 b	34.53 c		
	EM-IR		4.47 ab	6.05 b		0.38 b	0.44 b		11.66 a	16.73 b		31.87 a	36.22 bc		
	MM-JR	8.06 a	4.40 b	6.32 a	0.51 a	0.37 b	0.45 ab	26.35 a	10.54 b	17.64 a	45.49 a	28.71 b	38.15 ab		
	MM-IR		4.83 a	6.54 a		0.42 a	0.47 a		11.38 a	18.10 a		31.02 a	39.15 a		
2017 梅家墩 Meijiadun	EM-JR	5.47 b	4.37 c	4.90 d	0.42 b	0.40 c	0.41 d	15.26 b	17.56 c	16.25 b	29.12 b	32.54 c	30.61 c		
	EM-IR		5.32 b	5.39 c		0.52 b	0.47 c		20.57 b	17.54 b		38.11 b	33.05 b		
	MM-JR	6.48 a	5.60 b	6.05 b	0.50 a	0.52 b	0.51 b	19.17 a	21.29 ab	20.08 a	36.54 a	39.41 b	37.81 a		
	MM-IR		6.41 a	6.45 a		0.64 a	0.56 a		23.39 a	20.98 a		43.33 a	39.52 a		

EM-JR: 早熟玉米搭配粳稻; EM-IR: 早熟玉米搭配籼稻; MM-JR: 中熟玉米搭配粳稻; MM-IR: 中熟玉米搭配籼稻。同试验点同列不同的小写字母表示不同品种或不同品种搭配模式之间的差异显著性($P \leq 0.05$)。

EM-JR: early maturity maize varieties cropping with *japonica* rice varieties; EM-IR: early maturity maize varieties cropping with *indica* rice varieties; MM-JR: medium maturity maize varieties cropping with *japonica* rice varieties; MM-IR: medium maturity maize varieties cropping with *indica* rice varieties. Different lowercase letters within the same column indicate significant difference among different varieties or collocation modes at the same experimental site at $P \leq 0.05$.

与资源高效利用的重要基础, 本研究表明不同玉-稻品种搭配显著影响到了周年作物产量与资源利用效率(表 4 和表 5)。但不同的热量条件下玉-稻品种搭配的物质生产与产量效应不同(图 1-a、图 2 和表 4)。在 $GDD_{\geq 10^{\circ}C}$ 较高的梅家墩与屈家岭试验点, 中熟玉米-晚籼稻搭配的干物质生产与产量明显优于其他品种搭配模式, 其优势主要来自于两个方面, 其一是中熟春玉米品种产量显著高于早熟品种; 其二是晚籼稻品种显著高于粳稻品种(表 4), 继而提高了对温、光、水的生产效率(表 5)。然而 2015 年的漳河试验点 $GDD_{\geq 10^{\circ}C}$ 相对较低(图 2), 早熟玉米搭配晚籼稻品种周年产量与资源生产效率要优于中熟玉米搭配晚籼稻品种(表 4 和表 5)。总体来看, 中熟玉米以其较长的生育期与较多穗粒数而具有产量潜力优势; 晚籼稻以较高的分蘖能力、穗数与穗粒数而具有较高的产量优势(表 4), 但能否通过栽培技术的优化缩小不同品种类型的产量差还有待研究。可见合理的玉-稻品种搭配可能与气候条件、品种适应性及其他栽培条件有密切的关系, 而对于如何进行玉-稻模式的品种选择与前后季作物品种合理搭配还需进一步探讨。

充分利用温光资源和保证生产安全是种植制度的根本要求, 因此, 充分利用生长季节, 延长光合时间是作物增产的有效途径^[25]。水稻安全成熟是保证水稻产量的基础条件, 水稻安全成熟日期的判断常被用于指导水稻播期确定和品种选择等生产环节^[18,26]。早稻安全播种期至晚稻安全成熟期的总天数, 常被用于评价双季稻安全生产天数^[26-27]。本研究利用玉米安全播种期至晚稻完全成熟日期的历时天数作为周年内玉-稻模式可潜在生长天数, 湖北南部与中北部试验点有明显差异, 可潜在生长天数相差 10 d 左右(表 3)。从研究结果看, 所采用不同品种搭配模式在不同试验点对可潜在生长天数的利用有明显差异(表 3), 湖北中北部的荆门地区(漳河和屈家岭)对潜在生长天数达 94%~100%, 甚至玉米搭配生育期较长的晚籼稻品种未能达到安全成熟; 而在南部黄冈地区(梅家墩)对潜在生长天数利用率为 86%~94%(表 3)。且试验期间黄冈地区试验点的年 10 有效积温(GDD)比中部荆门试验点的多 150 d (图 2)。可见在湖北中北部对玉-稻模式的热量资源的制约要大于南部区域, 因此有必要根据不同区域

的热量资源条件与潜在生长天数选择适宜生育期的玉米与晚稻品种。本研究认为在湖北南部地区可选择生育期较长的玉米与晚稻品种搭配, 以获得较高周年产量; 而在中北部地区生育期相对较短的品种进行搭配有利于安全生产。晚稻生育期较长的品种(如本试验采用的黄花占) 则无法安全成熟(表 3)。此外, 晚稻抽穗扬花期间易受“寒露风”或“低温阴雨”的影响导致结实率降低和减产, 因此在晚稻品种选择时, 还需注意晚稻的安全抽穗期^[28]。由表 3 可知, 本试验达到安全成熟的晚稻齐穗期出现在 9 月上中旬, 这与已有研究结果较一致^[18,28]。由此可见全生育期 140 d 以内、本田生长期 110 d 以内的晚稻品种在 6 月 20 日前后播种均可安全用于玉-稻模式。但随着水稻机械化生产的必然趋势, 玉-稻模式下晚稻的机插技术尚待研究与实践, 为适应玉米后接茬及机插对短秧龄的要求, 这必然需要推迟晚稻播种, 因此短生育期的晚稻品种适宜于机械化种植模式, 但其合理的迟播日期还有待研究。

协调两熟制作物对光温水等资源的利用是进一步提升周年产量和资源利用效率的重要措施, 明确两季作物间气候资源定量分配特征可为建立合理的周年气候资源优化配置方案提供定量依据^[29-30]。周宝元等^[31]提出了两熟制季节间资源分配率(DR)和分配比值(R)等定量指标, 用来对不同种植体系周年气候资源分配特征进行定量分析, 用于指导品种选择与播期调节具有参考价值。本研究发现不同的品种搭配对两季间的温、光、水资源分配影响较大(图 1 和图 2)。各试验点短生育期玉米品种搭配晚稻模式的前后季有效积温比值(TR)明显低于中熟玉米品种搭配晚稻模式, 而同一玉米品种类型下, 搭配不同晚稻品种对 TR 影响不明显(图 2)。热量条件(积温)是决定作物生长发育进程和产量形成的主要因素^[32]。本研究发现, 玉-稻模式对热量资源的利用率(TUE)要远高于对光与降水的利用率, 这意味着相较于光辐射与降水, 周年有效积温的利用程度及前后季的积温分配比值是制约玉-稻周年产量的主要限制因子。周宝元等^[33]研究发现积温比值 TR 对两熟制周年产量形成有重要影响, 将其作为气候资源分配的主要指标, 用以调整积温分配率和分配比值, 为适宜熟期品种和两季合理播种期和收获期的确定提供定量依据。我们进一步分析发现周年产量与 TR、TUE 有显著的非线性相关关系(图 3), 据此非线性模型, 推断出玉米-晚粳稻在前后季积温比值为 1.06 时, 玉米-晚籼稻在前后季积温比值为 1.08 时相对

产量最高(图 3-a)。但同时要综合考虑某地的周年总积温量, 争取较充分地利用热量资源, 在相对安全生产保证下, 玉-稻模式积温利用率达到 97%~98% 时, 可获得较高的周年产量(图 3-b)。随着气候的变化, 长江中游活动积温增加明显^[34], 玉-稻模式的 TR、TUE 与周年产量的关系还有待进一步深入研究与调整。同时品种搭配也改变了前后两季作物降水与光辐射的分配(图 1), 3 个试验点玉米季的光辐射要高于晚稻季, 可能有利于玉米产量潜力的发挥; 降水分配变化较大, 一般来看玉米季降水量要多于晚稻季, 玉米有渍害的风险。漳河点晚稻季光辐射高于其他 2 个试验点; 晚稻生育前期日均温低于其他 2 个试验点, 生育后期日均温高于其他 2 个试验点, 这可能是导致其低穗数、高粒重的原因之一。当然不同试验点土壤肥力的差异对此也有一定的影响。因此, 根据玉米-晚稻模式前后季气象条件的差异, 还有待加强适应性品种的筛选与栽培措施优化。

4 结论

长江中游地区气候资源丰富, 可进行春玉米-晚稻水旱轮作, 而进行合理的玉米-晚稻品种搭配是发挥玉-稻产量潜力、提高资源利用与生产效率的重要前提。合理的玉-稻品种搭配可依据当地的积温条件优化配置前后两季的热量资源。当周年 10 有效积温利用率达到 97%, 玉米季与晚稻季的积温比值为 1.06~1.08 时, 玉-稻模式可获得较高的周年产量。因此, 湖北省南部积温较高的区域宜选择生育期 125 d 以内的高产玉米品种与全生育期 140 d 以内的晚稻品种进行搭配; 而在积温相对偏少的中北部区域, 宜选择生育期 120 d 以内的高产玉米品种与全生育期 130 d 以内的晚稻品种进行搭配。

References

- [1] 陈阜, 梁志杰, 陈述泉. 多熟制的发展前景. 世界农业, 1997, (6): 18-20.
Chen F, Liang Z J, Chen S Q. The development prospects of multi-mature. *World Agric*, 1997, (6): 18-20 (in Chinese).
- [2] 徐琪, 杨琳章, 董元华. 中国稻田生态系统. 北京: 中国农业出版社, 1998. pp 172-190.
Xu Q, Yang L Z, Dong Y H. Rice Field Ecosystem in China. Beijing: China Agriculture Press, 1998. pp 172-190 (in Chinese).
- [3] 杨滨娟, 孙丹平, 张颖睿, 黄国勤. 长江中游地区水旱复种轮作模式资源利用率比较研究. 中国生态农业学报, 2018, 26: 1197-1205.
Yang B J, Sun D P, Zhang Y R, Huang G Q. Comparison of resources use efficiencies among paddy-upland multi-crop rotation systems in the middle reaches of Yangtze River. *Acta Eco-Agric*

- Sin*, 2018, 26: 1197–1205 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘闯, 陈防, 刘毅, 李志国, 张过师, 谢娟. 3 种水旱两熟轮作制养分运筹研究进展. *中国农学通报*, 2016, 32(36): 198–204.
Liu C, Chen F, Liu Y, Li Z G, Zhang G S, Xie J. Research progress of nutrient management in three paddy-upland rotating systems. *Agric Sci Bull Sin*, 2016, 32(36): 198–204 (in Chinese with English abstract).
- [5] 侯方舟, 屠乃美, 何康, 王靖渊, 付小红, 杨旭初, 张清壮. 南方双季稻区冬种绿肥对土壤质量的影响研究进展. *作物研究*, 2015, 29: 682–686.
Hou F Z, Tu N M, He K, Wang J Y, Fu X H, Yang X C, Zhang Q Z. Research progress in the effect of winter planting-green manure on double cropping rice system of south. *Crop Res Sin*, 2015, 29: 682–686 (in Chinese with English abstract).
- [6] 孙艳妮, 程林, 李昌新. 我国粮食安全的区域性和结构性差异. *江苏农业科学*, 2010, (5): 524–526.
Sun Y N, Cheng L, Li C X. Regional and structural differences of food security in China. *Jiangsu Agric Sci*, 2010, (5): 524–526 (in Chinese).
- [7] 展茗, 赵明, 刘永忠, 徐尚忠. 湖北省玉米产需矛盾及提升玉米生产科技水平对策. *湖北农业科学*, 2010, 49: 802–806.
Zhan M, Zhao M, Liu Y Z, Xu S Z. Enhance maize production technology, alleviate the contradiction between production and demand of maize in Hubei province. *Hubei Agric Sci*, 2010, 49: 802–806 (in Chinese with English abstract).
- [8] 袁建华, 颜伟, 陈艳萍, 张跃中. 南方丘陵生态区玉米生产现状及发展对策. *玉米科学*, 2003, (专刊): 29–31.
Yuan J H, Yan W, Chen Y P, Zhang Y Z. Production situation and development strategies of maize in southern hill ecological region. *J Maize Sci*, 2003, (special): 29–31 (in Chinese with English abstract).
- [9] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 葛均筑, 徐莹, 王梦影, 曹湊贵, 翟中兵, 凌霄霞, 展茗, 赵明. 长江中游不同玉稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究. *作物学报*, 2015, 41: 1537–1547.
Li S Y, Tian S Y, Yuan G Y, Ge J Z, Xu Y, Wang M Y, Cao C G, Zhai Z B, Ling X X, Zhan M, Zhao M. Comparison of yield and resource utilization efficiency among different maize and rice cropping systems in middle reaches of Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1537–1547 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李小勇, 唐启源, 李迪秦, 李维科, 李海林, 蔡庆红. 不同种植密度对超高产稻田春玉米产量性状及光合生理特性的影响. *华北农学报*, 2011, 26(5): 174–180.
Li X Y, Tang Q Y, Li D Q, Li W K, Li H L, Cai Q H. Effects of different plant densities on the photosynthetic-physiological characters and yield traits in spring maize grown on super-high yielding paddy field. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2011, 26(5): 174–180 (in Chinese with English abstract).
- [11] Ali M Y, Waddington S R, Timsina J, Hodson D, Dixon J. Maize-rice cropping systems in Bangladesh: status and research needs. *J Agric Sci Technol*, 2009, 3: 35–53.
- [12] 赵强基, 郑建初, 袁从, 卞新民, 李萍萍, 章熙谷. 中国南方稻区玉米-稻种植模式的建立和实践. *江苏农业学报*, 1997, 13: 215–219.
Zhao Q J, Zheng J C, Yuan C, Bian X M, Li P P, Zhang X G. Establishment and practice on maize-rice cropping model in Paddy Area of southern China. *Jiangsu J Agric Sci*, 1997, 13: 215–219 (in Chinese with English abstract).
- [13] Timsina J, Jat M L, Majumdar K. Rice-maize systems of South Asia: current status, future prospects and research priorities for nutrient management. *Plant Soil*, 2010, 335: 65–82.
- [14] Kadiyala M D M, Mylavarapu R S, Li Y C, Reddy G B, Reddy M D. Impact of aerobic rice cultivation on growth, yield, and water productivity of rice-maize rotation in semiarid tropics. *Agron J*, 2012, 104: 1757–1765.
- [15] 李小勇. 南方稻田春玉米-晚稻种植模式资源利用效率及生产力优势研究. 湖南农业大学博士学位论文, 湖南长沙, 2011.
Li X Y. Study on Resource Use Efficiency and Relative Advantage of Productivity in Spring Maize-Late Rice Planting Model on South China Paddy Field. PhD Dissertation of Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan, China, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [16] Sun M, Zhan M, Zhao M, Tang L L, Qin M G, Cao C G, Cai M L, Jiang Y, Liu Z H. Maize and rice double cropping benefits carbon footprint and soil carbon budget in paddy field. *Field Crops Res*, 2019, 243: 107620. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107620>.
- [17] 姜振辉, 杨旭, 刘益珍, 林景东, 吴杨潇影, 杨京平. 春玉米-晚稻与早稻-晚稻种植模式碳足迹比较. *生态学报*, 2019, 39: 8091–8099.
Jiang Z H, Yang X, Liu Y Z, Lin J D, Wu Y X Y, Yang J P. Comparison of carbon footprint between spring maize-late rice and early rice-late rice cropping system. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39: 8091–8099 (in Chinese with English abstract).
- [18] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Save and Grow in Practice: Maize, Rice, Wheat: a Guide to Sustainable Cereal Production. [2016-01-18]. <http://www.fao.org/publications/save-and-grow/maize-rice-wheat/en/>.
- [19] 杨羨敏, 曾燕, 邱新法, 姜爱军. 1960–2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究. *应用气象学报*, 2005, 16: 243–247.
Yang X M, Zeng Y, Qiu X F, Jiang A J. The climatic change of solar radiation over the yellow river basin during 1961–2000. *J Appl Meteorol*, 2005, 16: 243–247 (in Chinese).
- [20] 曲曼丽. 农业气候实习指导. 北京: 北京农业大学出版社, 1990. pp 1–8.
Qu M L. Agro-climate Practice Instruction. Beijing: Beijing Agricultural University Publishers, 1990. pp 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [21] 艾治勇, 郭夏宇, 刘文祥, 马国辉, 青先国. 长江中游地区双季稻安全生产日期的变化. *作物学报*, 2014, 40: 1320–1329.
Ai Z Y, Guo X Y, Liu W X, Ma G H, Qing X G. Changes of safe production dates of double-season rice in the middle reaches of the Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 1320–1329 (in Chinese with English abstract).
- [22] 梁红梅. 中国种植业优势区域及其耕地保护策略. 浙江大学博士学位论文, 浙江杭州, 2011.
Liang H M. Study on the Advantage Regions of Crop Farming in China and Their Arable Land Protection Tactics. PhD Dissertation of Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [23] 武兰芳, 陈阜, 欧阳竹. 种植制度演变与研究进展. *耕作与栽培*, 2002, (3): 1–5.
Wu L F, Chen F, Ou-Yang Z. Evolution and study progress of cropping system. *Cult Plant*, 2002, (3): 1–5 (in Chinese).

- [24] 刘建, 徐少安, 周根友, 沈锦根, 陆虎华. 沿江稻区多熟制春玉米两段覆膜种植技术. *江苏农业学报*, 2001, 17: 13-18.
Liu J, Xu S A, Zhou G Y, Shen J G, Lu H H. Cultivation techniques for multi-cropping spring maize with plastic film covered at two stages in paddy region along Yangtze River. *Jiangsu J Agric Sci*, 2001, 17: 13-18 (in Chinese with English abstract).
- [25] 高亮之, 郭鹏, 张立中, 林武. 中国水稻的光温资源与生产力. *中国农业科学*, 1984, 17: 17-23.
Gao L Z, Guo P, Zhang L Z, Lin W. Light and resources and potential productive of rice in China. *Sci Agric Sin*, 1984, 17: 17-23 (in Chinese with English abstract).
- [26] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 黄山, 商庆银, 谭雪明, 李木英, 胡水秀, 曾研华. 近 30 年江西双季稻安全生长期及温光资源变化. *中国水稻科学*, 2016, 30: 323-334.
Lyu W S, Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, Huang S, Shang Q Y, Tan X M, Li M Y, Hu S X, Zeng Y H. Changes in safe production dates and heat-light of resources of double cropping rice in Jiangxi province in recent 30 years. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30: 323-334 (in Chinese with English abstract).
- [27] 高亮之, 李林, 金之庆. 中国水稻的气候资源与气候生态研究. *农业科技通讯*, 1986, (4): 5-8.
Gao L Z, Li L, Jin Z Q. Climatic resources and climatic ecology research of Chinese rice. *Bull Agric Sci Technol*, 1986, (4): 5-8 (in Chinese with English abstract).
- [28] 邱霞, 冯新. 双季杂交晚稻直播栽培的不利气候分析. *湖北农业科学*, 2013, 52: 4594-4596.
Qiu X, Feng X. Analysis of unfavorable climate condition to direct-seeding culture of double-cropping hybrid late rice. *Hubei Agric Sci*, 2013, 52: 4594-4596 (in Chinese with English abstract).
- [29] Xu C L, Zhao H X, Zhang P, Wang Y Y, Huang S B, Meng Q F, Wang P. Delaying wheat seeding time and maize harvest improved water use efficiency in a warm temperature continental monsoon climate. *Agron J*, 2018, 110: 1420-1429.
- [30] 周宝元, 马玮, 孙雪芳, 高卓晗, 丁在松, 李从锋, 赵明. 播/收期对冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源分配与利用特征的影响. *中国农业科学*, 2019, 52: 1501-1517.
Zhou B Y, Ma W, Sun X F, Gao Z H, Ding Z S, Li C F, Zhao M. Effects of different sowing and harvest dates of winter wheat-summer maize under double cropping system on the annual climate resource distribution and utilization. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 1501-1517 (in Chinese with English abstract).
- [31] 周宝元, 马玮, 孙雪芳, 丁在松, 李从锋, 赵明. 冬小麦-夏玉米高产模式周年气候资源分配与利用特征研究. *作物学报*, 2019, 45: 589-600.
Zhou B Y, Ma W, Sun X F, Ding Z S, Li C F, Zhao M. Characteristics of annual climate resource distribution and utilization in high-yielding winter wheat-summer maize double cropping system. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 589-600 (in Chinese with English abstract).
- [32] Liu Y E, Xie R Z, Hou P, Li S K, Zhang H B, Ming B, Long H L, Liang S M. Phenological responses of maize to changes in environment when grown at different latitudes in China. *Field Crops Res*, 2013, 144: 192-199.
- [33] 周宝元, 葛均筑, 侯海鹏, 孙雪芳, 丁在松, 李从锋, 马玮, 赵明. 黄淮海平原南部不同种植体系周年气候资源分配与利用特征研究. *作物学报*, 2020, 46: 937-949.
Zhou B Y, Ge J Z, Hou H P, Sun X F, Ding Z S, Li C F, Ma W, Zhao M. Characteristics of annual climate resource distribution and utilization for different cropping systems in the south of Yellow-Huaihe-Haihe Rivers plain. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 937-949 (in Chinese with English abstract).
- [34] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响: VI. 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响. *中国农业科学*, 2011, 44: 1562-1570.
Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China: VI. Possible effects of future climate change on northern limits of cropping system in China. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 1562-1570 (in Chinese with English abstract).