

# 华北平原南部一年两熟区不同搭配作物光合性能比较研究

邵云<sup>1</sup>, 李晓波<sup>1</sup>, 崔景明<sup>1</sup>, 李春喜<sup>1</sup>, 马守臣<sup>2</sup>, 李静雅<sup>1</sup>, 马冠群<sup>1</sup>

(1.河南师范大学 生命科学学院,河南 新乡 453007;2.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院,河南 焦作 454000)

**摘要:**为了探寻华北平原南部一年两熟制中较适宜的搭配模式,研究了该区域广泛应用的:小麦-玉米、小麦-大豆、小麦-花生、小麦-甘薯 4 种搭配模式,分析了不同模式光合性能的变化规律,计算了其光资源利用效率及产量与产值.结果表明:小麦-甘薯模式在两季的总光资源积累量中表现出最高;但由于小麦-甘薯模式价格最低,所以其两季的总产值最低.另一方面,小麦-玉米、小麦-大豆、小麦-花生 3 种搭配模式由于生育期基本一致使得其光能积累几乎相等;而小麦-甘薯模式在除小麦-玉米模式的其他 3 种模式中光合作用强度较高,光能利用效率仅次于小麦-玉米模式,加之产品价格较高,故两季的总产值最高;此外,小麦-花生模式在光资源利用效率以及总产值方面也具有相对的优势.因此选择小麦-玉米模式作为华北平原南部两熟区最适宜的搭配模式,而小麦-花生模式可作为该地区的替代搭配模式.

**关键词:**华北平原南部;一年两熟区;不同搭配作物;光合性能;产量与产值

**中图分类号:**S512;S513;S529;S531

**文献标志码:**A

当前,随着我国经济和科技的快速发展,人口的数量持续波动上升,人民的生活水平不断提高,粮食的需求量也逐年增加<sup>[1]</sup>.因此,未来我国主要粮食生产区的生产能否始终保持稳定增长的趋势和潜力,与国家的粮食安全存在密切的关系<sup>[2]</sup>.面对人口的增加、粮食生产徘徊不前的严峻局面,将粮食生产的“高产”和“高效”相结合,持续提高作物单产,同时高效的利用当地的自然资源,即实现大面积高产高效成为我国乃至世界现代农业发展的唯一选择<sup>[3]</sup>.自然资源种类很多,光照为其中重要的一种,在不同种植模式下,光能资源利用效率存在明显差异,严重影响着作物的产量.目前大多数学者致力于同种作物在不同影响因素下光能资源的利用差异,少有将光能资源利用效率的研究在同一年内不同复种搭配模式下的作物中进行研究.河南省地处华北平原南部,作为我国 13 个粮食主产区的其中之一,在保障国家粮食安全上有举足轻重的地位<sup>[4]</sup>.相对于华北平原北部,华北平原南部的的光能资源较为充足,且华北平原南部的主要的农作物均为一年两熟制,因此本试验以华北平原南部区域广泛应用的 4 种搭配模式(小麦-玉米、小麦-大豆、小麦-花生、小麦-甘薯)为研究对象,通过对不同模式光合性能的研究,比较其光能资源的利用效率差异,以期华北平原南部农业生产实践提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本试验地点位于河南省获嘉县照镜镇西彰仪村,试验始于 2016 年 10 月,截止于 2017 年 11 月,该地土壤较为肥沃,质地属于轻壤土,灌溉方式为传统的井水漫灌.试验采取了大区对比设计,为小麦-玉米(麦-玉)、小麦-大豆(麦-豆)、小麦-花生(麦-花)、小麦-甘薯(麦-薯) 4 种搭配模式,不同作物的品种分别为:小麦为豫农 4023(YuNong 4023),大豆为驻豆(ZhuDou 11)11,玉米为洛单 248(LuoDan 248),甘薯为商薯 19(Shang-Shu 19),花生为鲁花 10(LuHua 10).4 种搭配模式具体的播种与收获时间见表 1.

收稿日期:2019-06-10;修回日期:2020-08-07.

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0300203-3;2018YFD0300708-4)

作者简介(通信作者):邵云(1973—),女,山东单县人,河南师范大学教授,博士,研究方向为作物生理生态,E-mail:shaoyun73@126.com.

表 1 不同搭配模式的作物播种时间与收获时间

Tab.1 Sowing time and harvest time of crops with different collocation patterns

搭配模式	播种时间				收获时间			
	麦-玉	麦-豆	麦-花	麦-薯	麦-玉	麦-豆	麦-花	麦-薯
前茬作物	—	—	—	—	2016.10.04	2016.10.04	2016.10.04	2016.11.04
小麦	2016.10.12	2016.10.12	2016.10.12	2016.10.12	2017.06.05	2017.06.05	2017.06.05	2017.06.05
夏播作物	2017.06.16	2017.06.16	2017.06.16	2017.06.16	2017.10.19	2017.10.19	2017.10.19	2017.11.09

其中麦-玉、麦-豆、和麦-花模式的小麦播量为  $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 麦-薯模式的小麦播量为  $192.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 夏播作物的播量分别为玉米  $37.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、大豆  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、花生  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、甘薯种植密度为  $6 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 小麦季底施纯 N  $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$   $37.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 拔节期追施纯 N  $69 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 夏播作物季大豆底施纯 N  $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{K}_2\text{O}$  均为  $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 玉米、花生、甘薯底施纯 N  $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{K}_2\text{O}$  均为  $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 试验期间, 当地的降水量和气温变化如图 1.

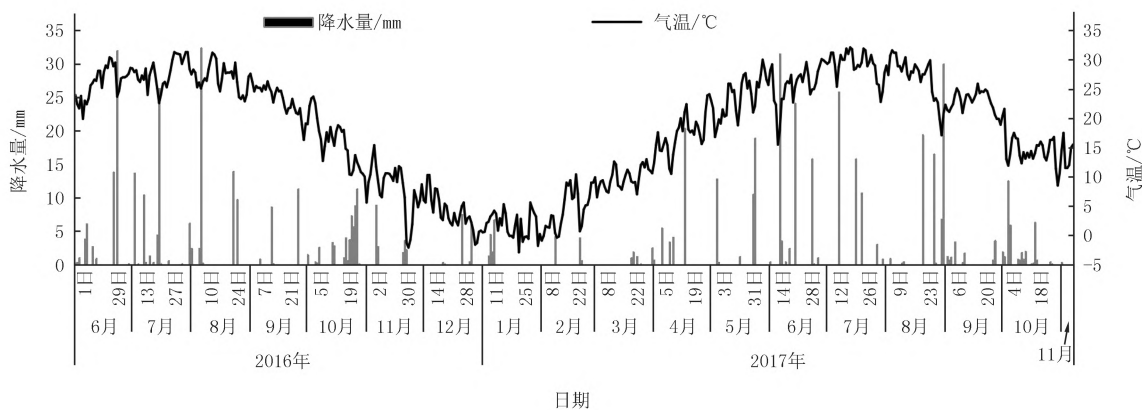


图1 日降水量和日平均气温变化

Fig.1 Changes of daily precipitation and daily mean temperature from October 1 2016 to November 7 2017

在小麦季的 2017 年 3 月 29 日(拔节期)、2017 年 4 月 21 日(开花期)、2017 年 5 月 5 日(灌浆期)、2017 年 6 月 2 日(成熟期), 在夏播作物季的 2017 年 8 月 6 日(营养生长期)、2017 年 8 月 21 日(开花期)、2017 年 9 月 7 日(生殖生长期)、2017 年 9 月 29 日(成熟期), 测定作物叶片的净光合速率、叶绿素荧光、冠层光合有效辐射, 计算不同搭配模式的单位面积太阳辐射逐日累加量和作物光能利用效率. 在作物成熟后计算产量, 并计算不同作物的产值.

## 1.2 测定指标及方法

### 1.2.1 光合作用特性

使用便携式光合作用测量系统(LI-6400, 美国), 在晴天上午 9 时到 11 时选择典型的小麦旗叶或者夏播作物的第二片完全展开叶, 测定植株的净光合速率(Net Photosynthetic Rate,  $P_n$ ); 同时期, 使用便携式植物荧光仪(Pocket PEA, 英国)测定叶片荧光参数, 以最大光化学效率  $F_v/F_m$  表示, 每个模式均 5 个重复.

### 1.2.2 冠层光合有效辐射

在相同的光合测定时间, 在不同种作物冠层顶部(冠层上部 5~10 cm 内)与近地部(地面上部 5~10 cm 内)使用冠层分析仪(SunScan, 美国)测定光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR), 每种模式 3 次重复.

作物冠层的 PAR 截获通量  $I_{\text{PAR}}$  (Interception of PAR) 采用 HIPPS 等<sup>[5]</sup> 提供的方法计算, 即

$$I_{\text{PAR}} = P_{\text{up}} - P_{\text{bottom}}, \quad (1)$$

式中  $I_{\text{PAR}}$  表示作物的冠层 PAR 截获通量,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $P_{\text{up}}$  为入射到植株冠层顶部的 PAR 辐射通量,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $P_{\text{bottom}}$  为通过植株的冠层而透射到达地面的 PAR 辐射通量,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ .

然后根据 RUIZ 等<sup>[6]</sup>的计算方法:单位面积的 PAR 的截获率(Fraction of PAR)是  $P_{up}$  和  $P_{bottom}$  之差与  $P_{up}$  之间的比值,即:

$$F_{PAR} = \frac{P_{up} - P_{bottom}}{P_{up}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中  $F_{PAR}$  为单位面积冠层 PAR 的截获率.

### 1.2.3 光能利用效率

根据以下公式计算光能利用效率( $R$ )<sup>[7]</sup>:

$$R = \frac{HW}{\sum Q_s} \times 100\%, \quad (3)$$

其中,  $H$  为每克干物质充分燃烧时释放出的热量( $MJ \cdot kg^{-1}$ ),其中小麦籽粒为  $16.3 MJ \cdot kg^{-1}$ ,茎叶为  $14.6 MJ \cdot kg^{-1}$ ;玉米穗为  $16.3 MJ \cdot kg^{-1}$ ,茎叶为  $14.6 MJ \cdot kg^{-1}$ ;大豆籽粒  $20.9 MJ \cdot kg^{-1}$ ,大豆茎叶  $15.1 MJ \cdot kg^{-1}$ ;花生籽粒  $23.0 MJ \cdot kg^{-1}$ ,花生茎叶  $15.1 MJ \cdot kg^{-1}$ ;甘薯块根  $15.9 MJ \cdot kg^{-1}$ ,甘薯茎叶  $14.6 MJ \cdot kg^{-1}$ <sup>[8]</sup>;  $W$  为不同作物成熟期干物质的平均增加量( $kg$ );  $\sum Q_s$  为试验期间整个生育期内不同作物单位面积太阳总辐射的逐日累加量.逐日日照时数( $h$ )资料于中国气象数据网收集下载.总辐射值( $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )根据埃斯屈朗方程<sup>[9]</sup>由日照时数估算得到,相关文献得出,在华北平原辐射估算的数值准确率高达 87% 以上<sup>[10]</sup>.

$$Q/(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}) = \frac{Q_0}{MJ \cdot m^{-2}} (a + b \frac{S}{S_0}), \quad (4)$$

其中,  $Q$  为日总辐射值,  $Q_0$  为天文辐射值(Angot 值),  $S/S_0$  为试验期间实际的日照时数总和与晴天时每日的最长日照时数的比值,  $a, b$  的数值大小与试验地所处的地理位置及季节相关,本试验地处河南省,春夏  $a, b$  为 0.23, 0.47, 秋冬  $a, b$  为 0.16, 0.55<sup>[11]</sup>.

### 1.2.4 产量与产值

作物成熟期时,在每种搭配模式中随机选取  $1 m^2$ ,人工收割,使用脱粒机进行脱粒,晒干后称重,计算产量( $kg \cdot hm^{-2}$ ),3次重复;并根据国家粮油信息中心统计<sup>[12]</sup>的小麦 2.5 元  $\cdot kg^{-1}$ 、玉米 1.68 元  $\cdot kg^{-1}$ 、大豆 3.62 元  $\cdot kg^{-1}$  的价格以及根据土流网<sup>[13]</sup>发布的花生 3.1 元  $\cdot kg^{-1}$ 、甘薯 0.6 元  $\cdot kg^{-1}$  的价格计算各种作物的产值.

## 1.3 数据处理与分析

本试验所涉及的所有数据均采用 Excel 2010 整理与计算与作图,SPSS17.0 软件进行 Duncan 法多重比较分析,文中图表不同小写字母表示不同处理在  $\alpha=0.05$  水平达到显著性差异.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同搭配模式作物的光合作用参数

#### 2.1.1 净光合速率( $P_n$ )

在图 2 不同搭配模式作物叶片净光合速率中,小麦季,从拔节期到灌浆期,除麦-薯模式外,其他 3 种模式均表现为先升高后降低.拔节期,麦-薯模式的  $P_n$  最低,麦-玉、麦-豆与麦-花模式间的  $P_n$  差异不显著.开花期的  $P_n$  表现为:麦-花显著高于麦-豆,但与麦-玉和麦-薯模式间的差异并不显著.灌浆期,麦-薯模式的  $P_n$  显著高于麦-玉、麦-豆和麦-花模式,而麦-玉、麦-豆和麦-花模式间差异并没有达到显著水平.成熟期,麦-玉与麦-花模式间的  $P_n$  显著高于麦-豆和麦-薯模式,但麦-玉与麦-花模式间的差异并不显著,麦-豆和麦-薯模式间的差异也不显著.

夏播作物季,不同作物的  $P_n$  表现出先降低,再略微升高,然后成熟期达到最低.营养生长期、开花期和生殖生长期 4 种模式的  $P_n$  率皆表现为:麦-玉模式最高,在营养生长期的  $P_n$  高达  $21.6 \mu mol CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;麦-豆、麦-花和麦-薯在营养生长期和生殖生长期没有显著差异,成熟期,各模式的  $P_n$  范围均在  $7.8 \sim 9.4 \mu mol CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  间.

### 2.1.2 叶绿素荧光

图 3 表示的为不同搭配模式作物叶绿素荧光参数( $F_v/F_m$ )的变化.在小麦季,除成熟期作物的  $F_v/F_m$  变化幅度较明显外,其他时期不同搭配模式间的  $F_v/F_m$  变化趋势较小.拔节期,各模式的  $F_v/F_m$  值在 0.80~0.82 间,差异均不显著.开花期,各模式的  $F_v/F_m$  值较拔节期下降了 0.01~0.05 左右.灌浆期,各模式的  $F_v/F_m$  值略有升高;其中,麦-豆与麦-花模式最高.成熟期,除麦-玉模式的  $F_v/F_m$  值为 0.76 外,麦-豆、麦-花与麦-薯模式间的  $F_v/F_m$  值均明显下降.

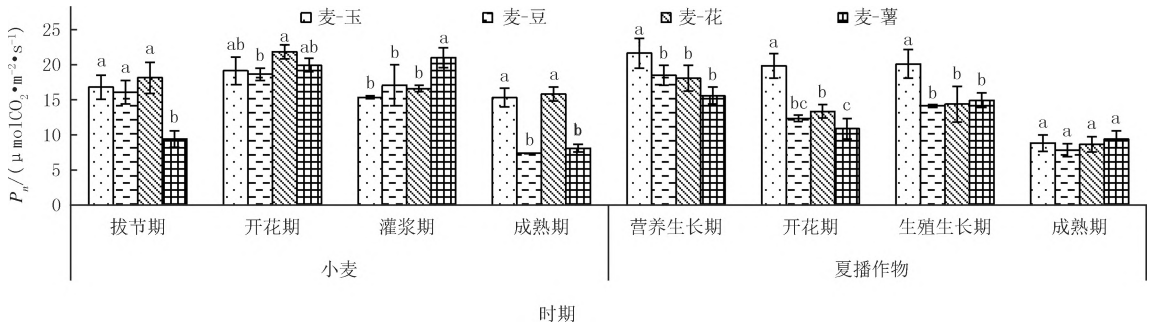


图2 不同搭配模式作物叶片的 $P_n$

Fig.2  $P_n$  of crops leaves in different collocation patterns

夏播作物季中,随着生育期推进,除麦-薯模式的  $F_v/F_m$  值呈缓慢增长趋势外,麦-玉、麦-豆、麦-花模式的  $F_v/F_m$  值在各个生育期变化均为先升高后降低;营养生长期,麦-花模式的  $F_v/F_m$  值最高,麦-玉模式显著高于麦-薯模式.开花期,麦-花模式的  $F_v/F_m$  显著高于麦-玉模式,3 种模式中,麦-薯模式的  $F_v/F_m$  最低.生殖生长期,麦-玉模式的  $F_v/F_m$  值显著低于麦-豆、麦-花和麦-薯模式,而麦-豆、麦-花和麦-薯模式间差异并不显著.成熟期,各种模式间的  $F_v/F_m$  值均差异显著,由大到小依次为麦-薯,麦-花,麦-玉,麦-豆模式.

### 2.2 作物在不同搭配模式的光能利用

#### 2.2.1 作物的冠层光合有效辐射截获率( $F_{PAR}$ )

不同搭配模式的作物  $F_{PAR}$  如图 4 所示.小麦季的  $F_{PAR}$  呈双峰趋势.在小麦季的各生长发育期内,麦-豆、麦-玉与麦-花模式间的  $F_{PAR}$  差异均未达显著水平;由于在麦-薯模式中前茬作物甘薯的生长期较长,导致其收获的最晚,因此,麦-薯模式的小麦种植的最晚,所以在苗期、返青期、拔节期和孕穗期麦-薯模式的  $F_{PAR}$  均最低.

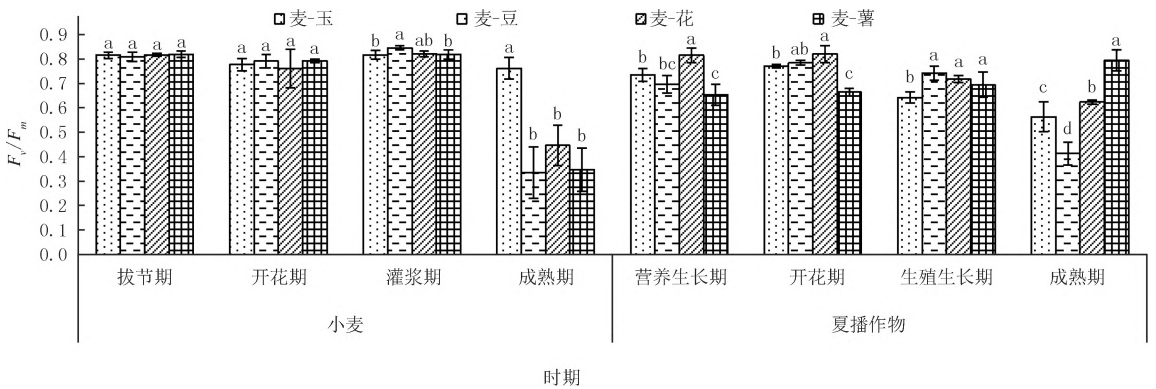


图3 不同搭配模式作物叶片的 $F_v/F_m$

Fig.3  $F_v/F_m$  of crop leaves in different collocation patterns

夏播作物季,总体来说, $F_{PAR}$  呈单峰趋势,并在生殖生长期达到峰值.营养生长期,麦-薯模式的  $F_{PAR}$  最高,麦-豆模式最低;但麦-玉、麦-花与麦-薯模式间差异不显著.开花期,4 个搭配模式间的  $F_{PAR}$  中,麦-豆模式最高,但其与麦-玉和麦-花间的差异并不显著.生殖生长期,麦-薯模式的  $F_{PAR}$  显著高于麦-玉和麦-豆模式,但与麦-花模式之间差异不显著.成熟期,麦-薯模式的  $F_{PAR}$  与其他 3 种模式差异性显著;麦-豆模式显著高于麦-玉模式,但与麦-花模式间差异并不显著.

### 2.2.2 光能利用效率( $R$ )

表 2 为不同搭配模式作物成熟期光能利用效率,在小麦季的成熟期,麦-薯模式的作物茎秆光能利用效率最高;麦-花模式与麦-薯模式显著高于麦-玉与麦-豆模式.成熟期可食部分的光能利用效率表现为:麦-玉模式最高,麦-薯模式最低,二者之间差异达到显著水平.夏播作物中,作物茎秆光能利用效率表现出:麦-豆与麦-花模式显著高于麦-玉与麦-薯模式,麦-玉显著高于麦-薯模式.在可食部分的光能利用效率中,麦-薯模式最高,是麦-玉模式的 3 倍,是麦-豆模式的 8.5 倍,是麦-花模式的 4 倍,4 个模式间差异均达到显著水平.

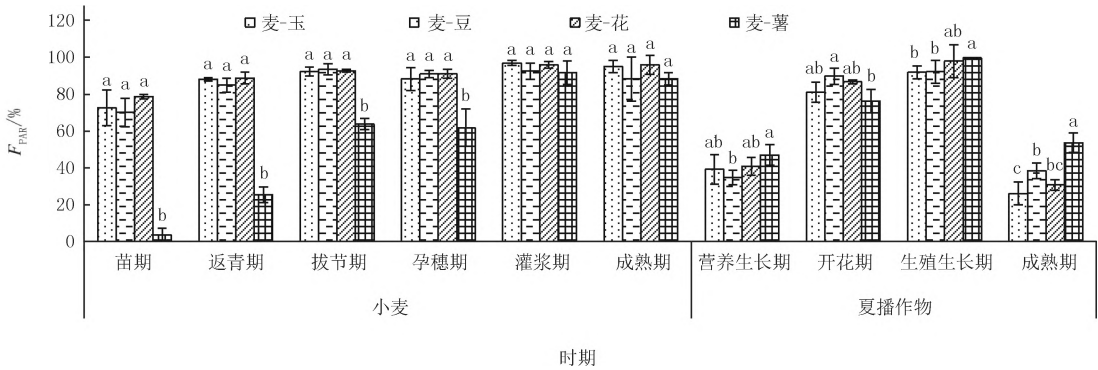


图4 不同搭配模式作物的冠层光合有效辐射截获率

Fig.4 Canopy photosynthetically active radiation interception rate of crops in different collocation patterns

表 2 不同搭配模式作物的光能利用效率(%)

Tab.2 Solar energy use efficiency of crops in different collocation patterns

模式	小麦		夏播作物	
	茎秆	可食部分	茎秆	可食部分
麦-玉	0.80±0.009 <sup>c</sup>	0.47±0.023 <sup>a</sup>	0.43±0.008 <sup>b</sup>	0.59±0.015 <sup>b</sup>
麦-豆	0.83±0.016 <sup>c</sup>	0.43±0.011 <sup>ab</sup>	0.50±0.005 <sup>a</sup>	0.21±0.016 <sup>d</sup>
麦-花	0.88±0.043 <sup>b</sup>	0.46±0.015 <sup>ab</sup>	0.52±0.036 <sup>a</sup>	0.45±0.004 <sup>c</sup>
麦-薯	0.97±0.016 <sup>a</sup>	0.40±0.051 <sup>b</sup>	0.24±0.010 <sup>c</sup>	1.79±0.067 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ).

### 2.3 不同搭配模式作物的产量与产值

表 3 为不同搭配模式的两季作物的产量与产值.在小麦季,麦-玉、麦-豆、麦-花间的产量与产值显著高于麦-薯模式,而三者间的差异未达到显著性水平;夏播作物季,4 种模式的产量差异均显著,表现为麦-薯最高,麦-豆最低,产值表现为麦-玉模式最高,并与其他 3 种模式差异达到显著水平,麦-花和麦-薯模式显著高于麦-豆模式;在两季总和中,总产量表现出:麦-薯模式的两季总产量最高,且为产量最低的麦-豆模式的 2.4 倍;两季总产值中,麦-玉和麦-花模式显著高于麦-豆和麦-薯模式,但麦-玉和麦-花模式间差异不显著,麦-豆和麦-薯模式间差异不显著.

表 3 不同搭配模式作物的产量与产值

Tab.3 Crop yield and Production value in different collocation patterns

模式	小麦		夏播作物		两季和	
	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产值/(元·hm <sup>-2</sup> )	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产值/(元·hm <sup>-2</sup> )	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产值/(元·hm <sup>-2</sup> )
麦-玉	10 933.33±496.45 <sup>a</sup>	27 333.33±1241.11 <sup>a</sup>	8 550.57±22.13 <sup>b</sup>	14 363.28±37.18 <sup>a</sup>	19 482.90±504.12 <sup>b</sup>	41 696.61±1 253.78 <sup>a</sup>
麦-豆	10 072.67±257.50 <sup>a</sup>	25 179.18±643.76 <sup>a</sup>	3 000.85±12.85 <sup>d</sup>	10 859.46±46.52 <sup>c</sup>	13 071.68±251.26 <sup>d</sup>	36 038.63±621.57 <sup>b</sup>
麦-花	10 683.33±392.95 <sup>a</sup>	26 708.33±982.37 <sup>a</sup>	4 500.78±31.45 <sup>c</sup>	13 949.30±94.36 <sup>b</sup>	15 183.11±361.53 <sup>c</sup>	40 657.63±888.13 <sup>a</sup>
麦-薯	8 658.33±457.34 <sup>b</sup>	21 645.83±1143.35 <sup>b</sup>	22 499.88±103.63 <sup>a</sup>	13 499.33±62.18 <sup>b</sup>	31 157.21±385.22 <sup>a</sup>	35 145.15±1097.20 <sup>b</sup>

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ).

### 3 讨论与结论

光合作用是作物赖以生存的基础,是作物的主要物质来源和能量来源,是生物界最基本的物质代谢和能量代谢。孙婴婴等<sup>[14]</sup>通过对旱地小麦的光合变化研究发现,开花期小麦的光合利用效率和水分利用效率均有显著的上升。在本研究中,整个生育期除了麦-薯模式的小麦,其他3种模式小麦的叶片净光合速率均在开花期达到最高;麦-薯模式的小麦由于播种较晚,该模式的生育期较其他模式有所推迟,因此叶片净光合速率的最大值也较其他3种模式出现的晚;而麦-玉模式的叶片净光合速率无论是在小麦的生长发育过程中还是在夏播作物的生长发育过程中均较高,麦-花模式次之。这表明在小麦的生长发育阶段中,开花期生理功能最活跃,且在4种模式中选择麦-玉和麦-花搭配模式有利于提高光能利用效率。

作物中主要截获光能的器官是叶片<sup>[15]</sup>,而叶片截获光能的能力和冠层的结构有着紧密的关系<sup>[16]</sup>。有研究已经明确显示,同种作物的种植密度能够显著影响植株冠层光截获率和光能利用效率<sup>[17-19]</sup>。毕常锐等<sup>[20]</sup>和 WAJID 等<sup>[21]</sup>的研究也表明,在一定范围内,如果种植密度加大,则叶片伸展快速,叶面积增大,导致光能透射率降低,加上叶面积指数衰减变缓,从而小麦的光能截获率得到了显著提高。对于本研究中的玉米、大豆、花生、甘薯4种作物,因为各种作物的冠层结构存在差异,因此各种作物的光合有效辐射截获率较小麦季存在的差异显著。并且在本试验中,对于麦-薯模式,由于前茬作物甘薯生长期较长,因此收获的时间较晚,导致其后茬的小麦晚播,由于当时温度的降低导致出苗率较其他模式有所降低,因而麦-玉、麦-豆、麦-花模式的小麦在营养生长期比麦-薯模式的小麦长势好,光能截获率相对较大。但这种趋势持续到小麦的生殖生长阶段后,麦-玉、麦-豆、麦-花模式的小麦冠层光合有效辐射截获率的优势开始减弱,这是由于甘薯的晚播效应,使其植株得长势逐渐优于其他3种搭配模式,并逐渐缩小了与其他模式间的差异。这与前人研究一致,由此表明,作物的冠层结构越复杂,叶片密度越大,其截获光能的能力越强。

不同搭配模式作物在整个生育期内光资源的分布表现出显著的差异。孟庆华等<sup>[22]</sup>对山东省小麦-玉米“双晚”栽培技术研究发现,晚收可以改变该地区资源的分配,提高光能的利用效率。刘少坤等<sup>[23]</sup>通过对4种不同成熟期的玉米品种进行研究发现,中晚熟的品种晚收不仅会增加籽粒的千粒质量,还能降低籽粒的含水量。在本研究中,除了小麦-甘薯模式,其他3种搭配模式的光资源积累并无很大差别,对于麦-薯模式,由于小麦季种植的时间有所推后,相对于其他模式其生育时期相对较慢,虽然在生长后期由于出苗率降低,种植密度不高,而光照又相对充足,所以植株得到较好的生长,但是由于其前期植株长势处在劣势,冠层发育不良,所以在小麦季的光资源积累最低;而后茬作物甘薯由于收获时间晚,其甘薯季的光资源积累量最高,导致其两季总的光资源积累量也最高。对于不同搭配模式的两季作物产量与产值,小麦季,麦-玉、麦-豆和麦-花为相同时间种植的同种小麦,因此3种模式间的产量与产值差异均不显著,麦-薯模式的小麦由于种植时间较晚,但与其他3种模式的小麦同一时间收获,且其价格最低,因此产量与产值均最低;夏播作物季,由于同一时间种植的夏播作物不同,因此产量存在明显的差异,其中,麦-薯模式的产量是其他模式产量的3至5倍。在两季总和中,由于麦-薯模式在甘薯季产量最高,因此麦-薯模式的总产量最高,但由于其价格低廉,其总产值为最低;麦-玉模式的总产量仅低于麦-薯模式,但其产值在4种模式中最高;4种搭配模式中总产量最低的为麦-豆模式,总产值最低的为麦-薯模式。

总之,在华北平原南部广泛应用的这几种搭配模式中,小麦-甘薯模式虽然在甘薯季冠层光合有效辐射截获率最高,成熟期的光资源利用效率也较高,但从整个两季来看,其产值表现较差,但相对于小麦-甘薯模式,不管是在光合作用强度、光资源利用效率还是在产值方面,小麦-玉米模式都表现得相对较好,所以选择小麦-玉米模式作为华北平原南部两熟区最适宜的搭配模式。而小麦-花生模式,因其具有较高的叶片净光合速率、较高的光合有效辐射截获率以及较高的经济效益,且有利于生态农业的健康可持续发展,因此是除小麦-玉米模式外另一种较为适宜的搭配模式。

### 参 考 文 献

[1] 赵鑫,张宝林,苏晓菲,等.气候变化对粮食安全的影响[J].农产品加工,2018(22):69-71.

ZHAO X,ZHANG B L,SU X F,et al.Impactions of climate change on food security[J].Farm Products Processing,2018(22):69-71.

- [2] LIU Z, HUANG F, LI B. Investigating contribution factors to china's grain output increase in period of 2003 to 2011[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 1-8.
- [3] 张福锁. 现代农业: 高产高效; 资源利用效率[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(1): 133-140.  
ZHANG F S. Modern agriculture: high yield and efficiency; resource utilization efficiency[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(1): 133-140.
- [4] 张松涛. 河南省粮食综合生产能力发展水平评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.  
ZHANG S T. Study on the evaluation of the development level of grain comprehensive production capacity in henan[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [5] HIPPS L E, ASRAR G, KANEMASU E T. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat[J]. Agricultural Meteorology, 1983, 28(3): 253-259.
- [6] RUIZ R, BERTERO H. Light interception and radiation use efficiency in temperate quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 29(2/3): 144-152.
- [7] 朱元刚, 董树亭, 张吉旺, 等. 种植方式对夏玉米光合生产特征和光温资源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1417-1424.  
ZHU Y G, DONG S T, ZHANG J W, et al. Effects of cropping patterns on photosynthesis characteristics of summer maize and its utilization of solar and heat resource[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6): 1417-1424.
- [8] 陈阜. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002.  
CHEN F. Agricultural ecology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002.
- [9] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 30-36.  
DAI M H, TAO H B, LIAO S H, et al. Estimation and analysis of maize potential productivity based on ceres-maize model in the north China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 30-36.
- [10] 常清, 王靖, 余卫东, 等. 河南省小麦-玉米轮作系统光能利用率时空分布及其变化原因分析[J]. 中国农业气象, 2016, 37(3): 316-325.  
CHANG Q, WANG J, YU W D, et al. Tempo-spatial characteristics and impact factors of radiation use efficiency of wheat-maize rotation system in Henan province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(3): 316-325.
- [11] 张黛静, 王真, 李雪梅, 等. 不同群体下小麦花期干物质转运和冠层光分布特性研究[J]. 河南农业科学, 2015, 44(10): 24-28.  
ZHANG D J, W Z, LI X M, et al. Study on dry matter transportation and light distribution in canopy of different wheat population in flowering stage[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(10): 24-28.
- [12] 国家粮油信息中心[EB/OL]. [2017-12-29]. <http://www.grain.gov.cn/>.
- [13] 土流网[EB/OL]. [2017-12-29]. <https://www.tuliu.com/>. Tuliu.com.
- [14] 孙婴婴, 韩霖昌, 张岁岐, 等. 陕西省不同年代旱地冬小麦光合与产量特征变化及其相互关系研究[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 308-315.  
SUN Y Y, HAN J C, ZHANG S Q, et al. Photosynthetic traits, yield and their relations of dryland winter wheat cultivars in different decades of shaanxi province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(3): 308-315.
- [15] 占东霞. 棉花冠层叶片与非叶绿色器官光合能力的空间变化及对水分响应的生理机制[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.  
ZHAN D X. The spatial distribution of cotton canopy photosynthesis and the physiological characteristics of leaf and non-leaf organs in response to water supply[D]. Shihezi: Shihezi Agricultural University, 2014.
- [16] 李华龙. 水分胁迫对冬小麦和夏玉米冠层受光特性、温度及湿度的影响[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2018.  
LI H L. Effects of water stress on the characteristic of light interception, temperature and humidity of canopies of winter wheat and maize [D]. Xian: Northwest A & F University, 2018.
- [17] 赵英善, 勾玲, 薛军, 等. 新疆不同种植密度下春玉米光能利用率变化[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(12): 2166-2172.  
ZHAO Y S, GOU L, XUE J, et al. Changes of radiation use efficiency of spring maize under different Plant densities in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(12): 2166-2172.
- [18] 邵立威, 王艳哲, 苗文芳, 等. 品种与密度对华北平原夏玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(3): 182-188.  
SHAO L W, WANG Y Z, MIAO W F, et al. Effect of cultivar and plant density on summer maize grain yield and water use efficiency in north China plain[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(3): 182-188.
- [19] 张永强, 方辉, 范贵强, 等. 遮阴和种植密度对南疆滴灌冬小麦旗叶生理特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(11): 1352-1358.  
ZHANG Y Q, FANG H, FAN G Q, et al. Effects of shading and planting density on the physiological characteristics of flag leaf and yield of winter wheat under drip irrigation in south Xinjiang[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(11): 1352-1358.
- [20] 毕常锐, 白志英, 杨詠, 等. 种植密度对小麦群体光能资源利用的调控效应[J]. 华北农学报, 2010, 25(5): 171-176.  
BI C R, BAI Z Y, YANG H, et al. Effects of planting densities on radiation resource utilization of the wheat colony[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(5): 171-176.
- [21] WAJID A, HUSSAIN A, AHMED A, et al. Effect of sowing date and plant density on growth, light interception and yield of wheat under semiarid condition[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2004, (6): 1119-1123.

- [22] 孟庆华,王信宝,王凤梅,等.山东省小麦-玉米一年两熟“双晚”栽培技术[J].耕作与栽培,2017(2):70-71.  
MENG Q H,WANG B X,WANG F M,et al.“Double Late” cultivation technology on two-cropping in one year for wheat and corn in Shandong province[J].Tillage and Cultivation,2017(2):70-71.
- [23] 刘少坤,贾春兰,唐世伟,等.晚收对不同熟期夏玉米产量的调控效应[J].山东农业科学,2016,48(9):36-39.  
LIU S K,JIA C L,TANG S W,et al.Effects of late harvest on yield of summer maize with different mature periods[J].Shandong Agricultural Sciences,2016,48(9):36-39.

## Comparative study on photosynthetic performance of different collocation patterns in the double-cropping area in the southern part of North China Plain

Shao Yun<sup>1</sup>,Li Xiaobo<sup>1</sup>,Cui Jingming<sup>1</sup>,Li Chunxi<sup>1</sup>,Ma Shouchen<sup>2</sup>,Li Jingya<sup>1</sup>,Ma Guanqun<sup>1</sup>

(1.College of Life Sciences,Henan Normal University,Xinxiang 453007,China;

2.School of Surveying and Land Information Engineering,Henan Polytechnic University,Jiaozuo 454000,China)

**Abstract:** In order to explore the suitable planting patterns in the southern region of the North China Plain, we studied the variation changes of light resources of different planting patterns through four widely used cropping patterns: wheat-maize, wheat-soybean, wheat-peanut, wheat-sweet potato. Based on the investigating the solar resource distribution and yield in different double-cropping, the solar utilization efficiency, and production value was calculated. The results showed that the distribution of solar resource in different collocation patterns was different due to the sowing and harvesting time. Because the interception rate of canopy photosynthetically active radiation in the late growth stage of sweet potato was significantly higher than other patterns, the total daily accumulation of wheat-sweet potato pattern was the highest among the four patterns, although which in wheat season was the lowest one due to the last harvesting time of fore-rotating sweet potato. However, since the price of sweet potato was much lower than other crops, wheat-sweet potato pattern got the lowest total production value of two seasons. On the other hand, the solar accumulation of wheat-corn, wheat-soybeans and wheat-peanuts were almost equal to each other. Furthermore, the photosynthetic rate and the solar utilization efficiency of wheat-maize pattern, as well as the price were higher than the other three planting patterns so that the production value of this pattern reached the top. Additionally, the wheat-peanut pattern ranked only second to the wheat-maize pattern on the solar utilization efficiency and total output value. Therefore, the wheat-maize pattern is chosen as the best suitable collocation pattern in this double-cropping area in the southern of North China Plain, and the wheat-peanut pattern could be used as an alternative collocation pattern in the region.

**Keywords:** south of the North China Plain; double cropping; different collocation patterns; photosynthetic performance; Yield and Production Value

[责任编辑 王凤产 杨浦]



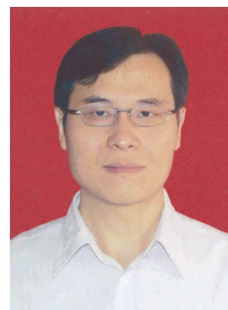


## 本期专家介绍



张丰收,博士,北京师范大学京师学者特聘教授,博士生导师.曾获中国科学院“引进国外杰出人才(百人计划)”择优支持、国家杰出青年基金,享受政府特殊津贴.现任北京师范大学核科学与技术学院院长,北京市辐射中心主任.兼任中国核学会射线束技术分会理事长、中国辐射防护学会放射生态分会理事长、北京核学会副理事长、中国核物理学会常务理事、中国辐射防护学会教育与科普分会常务理事、中国辐射防护学会电离辐射分会常务理事、中国生物物理学会辐射与环境生物物理专业委员会委员、教育部高等学校教学指导委员会“核工程类专业教学指导委员会”副秘书长、中国科学院核辐射与核能技术重点实验室学术委员会委员、中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室学术委员会委员、中国科学院重离子辐射生物医学重点实验室学术委员会委员、北京市放射生物学重点实验室学术委员会委员、意大利卡塔尼亚大学国际核与粒子天体物理博士研究生学术委员会委员.目前主要从事重离子核物理、重离子与物质相互作用微观机理、射线束辐射技术及应用、材料辐射损伤和离子辐射育种方面的研究.

汤清虎,河南师范大学教授,博士,硕士生导师.2004年毕业于厦门大学,获得博士学位.2007—2009年在新加坡南洋理工大学化学与生物医学工程学院从事博士后研究.为河南省高校科技创新人才支持计划和河南省高等学校青年骨干教师资助计划获得者.长期从事绿色催化材料合成、催化反应机理、精细化学品绿色制造等方面的研究.主持或作为主要成员参与完成国家自然科学基金、新加坡教育部项目、新加坡科技局项目等课题 10 余项,先后在 *Green Chem*, *Chem Commun*, *J Catal*, *Chem Mater*, *J Mater Chem*, *ChemCatChem*, *Small*, *J Power Sources* 等国际著名期刊发表 SCI 论文 50 余篇,获授权专利 8 件.



邵云,河南师范大学生命科学学院教授,博士,硕士生导师,河南省小麦研究会理事.研究领域为作物栽培生理生态与农业资源高效利用,多年来主要开展了麦田生态系统养分分配规律与碳氮循环、不同轮作种植模式资源高效利用、麦田重金属污染机制及减控技术等研究工作,曾在澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)访学开展作物生态系统模型研究.先后主持和参加“十五”、“十一五”、“十二五”国家科技支撑计划项目子课题、“十三五”国家重点研发计划项目子课题及省厅级科研项目近 20 项;在国内外期刊上发表学术论文 50 余篇;主编及参编著作 9 部,编译著作 1 部;获省科技进步三等奖 2 项.曾获“河南省高校优秀党员”、“河南师范大学青年教师课堂教学十佳教师”、“优秀教师”等荣誉称号.