



玉米、花生及其间作茬口与施磷对冬小麦 光合特性及产量的影响机制

王 飞, 胡莎莎, 焦念元*, 马 超, 尹 飞, 刘 领

(河南科技大学 农学院/河南省旱地农业工程技术研究中心, 河南洛阳 471023)

摘 要: 该试验在玉米单作茬口、玉米-花生间作茬口(间作茬口)、花生单作茬口共 3 种茬口, 以及 0 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ (P_0) 和 180 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ (P_1) 2 个磷水平下, 研究了间作茬口与施磷对冬小麦分蘖、叶面积指数(LAI)、干物质积累、光合特性及产量的影响机制, 为玉米花生间作与小麦-玉米复种轮作提供理论依据。结果表明: (1) 间作茬口较玉米茬口显著提高了冬小麦有效分蘖数、LAI、净光合速率和干物质积累量, 并提高了冬小麦旗叶的 SPAD 值、 CO_2 饱和点、光饱和点及最大净光合速率(P_{nmax})、表观量子效率(AQY)、羧化效率(CE)、最大羧化速率(V_{cmax})、最大 RUBP 再生的电子传递速率(J_{max})和最大磷酸丙糖利用速率(V_{TPU}), 且 CE、 V_{cmax} 、 V_{TPU} 的增幅均达到显著水平($P < 0.05$), 有效改善了冬小麦产量构成, 显著提高籽粒产量($P < 0.05$)。 (2) 间作茬口较花生茬口提高了冬小麦乳熟期的 P_{nmax} 、AQY、CE, 增加了穗粒数和粒重, 提高了产量。 (3) 与不施磷相比, 施磷 180 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ 显著促进间作茬口冬小麦生长, 显著提高冬小麦旗叶的 SPAD 值、 P_{nmax} 、AQY、CE、 V_{cmax} 、 J_{max} 、 V_{TPU} 和籽粒产量($P < 0.05$)。研究发现, 间作茬口较玉米茬口能有效增强冬小麦旗叶表观量子效率和 CO_2 羧化能力, 显著提高小麦花后光合能力, 促进冬小麦生长, 从而增加穗粒数、粒重和籽粒产量, 且间作茬口结合施磷 180 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ 效果更好。

关键词: 冬小麦; 玉米-花生间作茬口; 施磷; 光合特性; CO_2 羧化能力

中图分类号: Q945.79; S344.2 **文献标志码:** A

Effect of Sole Maize, Sole Peanut, and Maize-Peanut Intercropping Crops for Rotation and Phosphate Fertilizer on the Photosynthetic Characteristics and Yield of Winter Wheat

WANG Fei, HU Shasha, JIAO Nianyuan*, MA Chao, YIN Fei, LIU Ling

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology/Dryland Agricultural Engineering Technology Research Center of Henan, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for a rotation between maize-peanut intercropping and wheat-maize multiple cropping, we studied the effects of maize intercropping peanut crops for rotation and phosphate fertilizer on tillering, leaf area index (LAI), dry matter accumulation, photosynthetic performance in flag leaves, and grain yield for winter wheat. A field experiment with three types of crops for rota-

收稿日期: 2018-01-24; 修改稿收到日期: 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(U1404315); 河南科技大学创新能力培育基金(2012ZCX020)

作者简介: 王 飞(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事间套作多熟种植理论与技术研究。E-mail: 1216677627@qq.com

* 通信作者: 焦念元, 博士, 教授, 主要从事间套作资源高效利用及生理生态研究。E-mail: jiaony1@163.com

tion including sole maize, maize-peanut intercropping, and sole peanut, and two phosphate fertilizer levels including application $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_0) and $180 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_1) was conducted. Results showed that: (1) compared with maize crops for rotation, maize-peanut intercropping crops for rotation (intercropping crops for rotation) significantly increased the effective tillering numbers, LAI, net photosynthetic rate, and dry matter of winter wheat; The SPAD value, CO_2 saturation point, light saturation point, maximum net photosynthetic rate ($P_{n\text{max}}$), AQY, carboxylation efficiency (CE), rubisco maximum carboxylation rate (V_{cmax}), maximum electron transfer rate (J_{max}) and triose phosphate utilization rate (V_{TPU}) of winter wheat flag leaves were also increased, CE, V_{cmax} and V_{TPU} enhanced to a significant level ($P < 0.05$), and significantly improved ($P < 0.05$) winter wheat grain yield and the composition. (2) Intercropping crops for rotation increased the $P_{n\text{max}}$, AQY and CE in wheat flag leaves at milk stage, enhanced the kernels per spike, kernel weight and yield of winter wheat compared with peanut crops for rotation. (3) Supplying phosphate fertilizer with $180 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ significantly improved winter wheat growth, and increased the SPAD value, $P_{n\text{max}}$, AQY, CE, V_{cmax} , J_{max} , and V_{TPU} in flag leaves, and grain yield ($P < 0.05$) in intercropping crops for rotation plots, compared with no phosphate fertilizer application. The study found that intercropping crops for rotation could effectively strengthen the apparent quantum efficiency and CO_2 carboxylation capacity in flag leaves of winter wheat, significantly enhance the photosynthetic capacity after flowering, and improve winter wheat growth. Thus, the kernels per spike, kernel weight and grain yield of winter wheat were increased, and intercropping crops for rotation combining with $180 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ phosphate fertilizer could get more effective to winter wheat.

Key words: winter wheat; maize-peanut intercropping crops for rotation; phosphate fertilizer; photosynthetic characteristics; CO_2 carboxylation capacity

茬口是指作物轮作或连作中,影响后茬作物生长的前茬作物及其迹地的泛称。轮作换茬较连作能调节地力,减轻田间病、虫、草害,缓解连作障碍,平衡作物产量或稳定作物品质^[1-3],也是中国实现“藏粮于地、藏粮于技”重大战略目标和农业领域供给侧改革战略的有效途径之一。不同作物轮作具有不同的茬口特性,对下茬作物产生不同的影响,因此,合理安排轮作换茬对农业持续生产至关重要。薛庆喜^[2]研究不同作物茬口缓解大豆连作障碍的结果表明,苜蓿茬口较玉米茬口和大豆茬口更能有效缓解大豆连作障碍;苜蓿茬口比葱茬口更能改善根际环境,有效缓解高粱连作障碍^[3]。合理的轮作制不仅能提高作物产量,还有良好的生态效应^[2-5]。因为轮作茬口能提高耕层土壤大团聚体和微团聚体的碳、氮含量,促进土壤稳定性结构的形成,增加土壤有机质^[6],减轻温室气体的排放^[4]。同时,在轮作体系中作物种类越多,更能增加土壤有效碳、水解酶活性,降低氧化合物酶活性,加速残茬分解,增强土壤生态系统功能潜力和有效维持农业系统土壤服务功能^[5];长期大豆-玉米轮作还有助于恢复侵蚀土壤生产力,提高作物产量^[7]。目前,黄淮海地区连年小麦-玉米复种连作造成土壤板结、土壤肥力下降^[8],地下水过多开采,形成地下漏斗^[9]和病虫害加重^[10],以及产量降低等一系列问题,急需探索与小

麦-玉米复种的适宜轮作茬口。

玉米、花生间作是黄淮海地区重要的一种豆科间作模式,与单作花生相比,可改善作物铁营养,促进共生固氮^[11];该模式较单作玉米能提高土壤微生物代谢活性和群落结构多样性,增加土壤中细菌、真菌、固氮菌等数量,改善土壤微生态环境^[12-14],提高土壤大团聚体和有机质含量^[15],培肥地力。同时,水旱轮作能提高水稻分蘖盛期叶片的叶绿素、类胡萝卜素含量和净光合速率^[16],轮作还能明显提高当归胞间 CO_2 浓度、气孔导度和光合速率^[17],即轮作换茬可以改善作物的光合特性。另外,磷素在作物的光合作用、呼吸作用、生物膜合成等生理代谢过程中发挥重要作用^[18],磷胁迫会降低电子传递速率,抑制光合关键酶活性,影响卡尔文循环,从而降低光合速率^[19]。施磷能增加小麦旗叶 CO_2 浓度、气孔导度和光合速率^[20]。那么,玉米花生间作茬口能否较单作茬口促进冬小麦生长发育、产量形成? 玉米花生间作茬口能否改善冬小麦光合特性? 玉米花生间作茬口结合施磷对冬小麦光合特性和产量会产生哪些影响? 为了弄清上述问题,本试验以玉米茬口为对照,在 2 个施磷水平上,主要研究了玉米花生间作茬口对冬小麦叶面积指数、干物质积累动态、有效分蘖数及成穗率、气体交换参数、光强-光合曲线、 CO_2 -光合响应曲线和产量的影响,为玉米花生间

作与小麦-玉米复种轮作提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本试验分别于 2011~2012 和 2016~2017 在河南科技大学试验农场进行。试验地地处温带,属于半湿润、半干旱大陆性季风气候,年平均气温 12.1~14.6℃,年平均降雨量约 600 mm,年平均蒸发量约 2 114 mm,年日照时 2 300~2 600 h,无霜期 215~219 d,年平均辐射量约 492 kJ·cm⁻²。试验地土壤为黄潮土,质地为中壤。试验开始时耕层土壤容重 1.35 g·cm⁻³,0~20 耕层含碱解氮 33.86 mg·kg⁻¹、速效磷 3.46 mg·kg⁻¹、有机质 10.72 g·kg⁻¹,土壤 pH 值为 7.56。

2011~2012 年以冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种‘中育 10 号’为试验材料,选用连续 2 年进行 P₀[0 kg (P₂O₅)·hm⁻²]和 P₁[180 kg (P₂O₅)·hm⁻²]施磷处理,且分别定位种植玉米单作和玉米花生间作 2 种茬口为试验地,设置玉米单作(玉米茬口)和玉米花生(间作茬口)2 种茬口,以及 P₀和 P₁2 个施磷水平,共组成 4 个处理,完全随机区组排列,各处理重复 3 次;冬小麦行距 20 cm,播种量 180 kg·hm⁻²。2016~2017 年以冬小麦品种‘矮抗 58’为试验材料,选用连续 6 年进行 P₀和 P₁施磷处理,分别定位种植单作玉米、单作花生和玉米花生间作等 3 种茬口为试验地,设玉米茬口、花生单作(花生茬口)和玉米花生间作(间作茬口)等 3 种茬口,以及 P₀和 P₁2 个磷水平,共组成 6 个处理,完全随机区组排列,各处理重复 3 次;冬小麦行距 20 cm,播种量 150 kg·hm⁻²。

两年度每个小区面积均为 60 m²(10 m×6 m),磷肥处理同前茬,分别定位基施,整地前撒施;各处理均施氮肥 180 kg N·hm⁻²,按基肥和追肥 2:1 两次施用,基肥 120 kg N·hm⁻²于整地前撒施,追肥 60 kg N·hm⁻²于冬小麦拔节期撒施,施肥后灌水。两年度冬小麦分别于 2011 年 10 月 15 日和 2016 年 10 月 15 日播种,分别于 2012 年 6 月 2 日和 2017 年 6 月 3 日收获。其他的管理同大田生产。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 分蘖数与成穗数 在小麦拔节期调查各小区 1 m 双行的小麦总蘖数,记为最大分蘖数;收获期调查各小区 1 m 双行的小麦总穗数,记为有效分蘖数;分蘖成穗率=有效分蘖数/最大分蘖数×100%。

1.2.2 干物质积累 分别在小麦拔节期、挑旗期、扬花期、灌浆期和成熟期,每个小区各取 50 cm 单行植株,分成叶、茎、穗 3 部分,105℃杀青 30 min,75℃烘至恒重,称重。

1.2.3 叶面积 在取样测定干物质质量同时,测量其叶面积。取小麦各处理 S1 定面积的绿色叶片,烘干称重为 M1,其他绿叶面积烘干称重为 M2,设总面积为 S,则根据公式 M1/S1=(M1+M2)/S 可求得 S;叶面积指数=绿色叶片总面积/土地面积。

1.2.4 叶绿素相对含量 使用 SPAD-502 型叶绿素仪进行测定。2012 年分别于花后 5 d、22 d 和 31 d 测定各处理冬小麦旗叶 SPAD 值,2017 年测定各处理扬花期旗叶的 SPAD 值,每个小区测 15 片冬小麦旗叶,取其平均值。

1.2.5 气体交换参数 2012 年,于冬小麦花后 5 d、22 d 和 31 d,在 9:30~12:00 使用便携式光合仪(LI-6400XT; LI-COR, 美国)测定各处理冬小麦旗叶的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度。

1.2.6 光强-光合响应曲线、CO₂-光合响应曲线及相关参数 2017 年,参照焦念元等^[15]方法,在小麦扬花期和乳熟期,选择晴天于 9:30~12:00,使用便携式光合仪(LI-6400XT; LI-COR, 美国),采用自动可调人工光源,分别测定自然 CO₂ 浓度(380 μmol·mol⁻¹)下,光强为 2 000、1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、0 μmol·m⁻²·s⁻¹时冬小麦旗叶的光强-光合响应曲线;以及 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹光强下,CO₂ 浓度为 1 000、800、600、400、350、300、250、200、150、100、50、0 μmol·mol⁻¹时的 CO₂-光合响应曲线。利用光合响应曲线数据借助 Photosyn assistant 软件分析计算表观量子效率(AQY)、光饱和时最大净光合速率(P_{max})、羧化效率(CE)、Rubisco 最大羧化速率(V_{max})、最大电子传递速率(J_{max})和磷酸丙糖利用率(V_{TPU})。

1.2.7 产量 2012 和 2017 年,在小麦成熟期,各小区选取具有代表性 1 m² 小麦植株手工收获后,调查总茎数和穗粒数,风干后测定生物产量、籽粒产量和千粒重,并折算其产量。

1.3 数据统计分析

用 Microsoft Excel 2010 整理数据和作图,SPSS 22.0 进行响应曲线的拟合和数据差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 玉米、花生及其间作茬口与施磷对冬小麦旗叶SPAD值的影响

叶绿素含量是光合作用的基础,也是衡量作物利用光能效率的指标。由图1可知,在2017年扬花期(花后0 d),冬小麦旗叶的SPAD值于2种磷水平下均表现为花生茬口>间作茬口>玉米茬口,相同茬口下又表现为施磷处理(P₁)高于不施磷对照(P₀),且处理间大多达到显著水平(P<0.05);在2012年,各处理冬小麦花后各时期旗叶的SPAD值的表现与2017年相似,即间作茬口高于玉米茬口,施磷处理(P₁)高于不施磷对照(P₀),其间差异也多达到显著水平,且后期表现得更为明显。可见,茬口和施磷能显著影响冬小麦旗叶的叶绿素含量和叶片衰老进程,并以花生茬口和间作茬口较佳,玉米茬口较差,且各茬口结合施磷的促进效果更好。

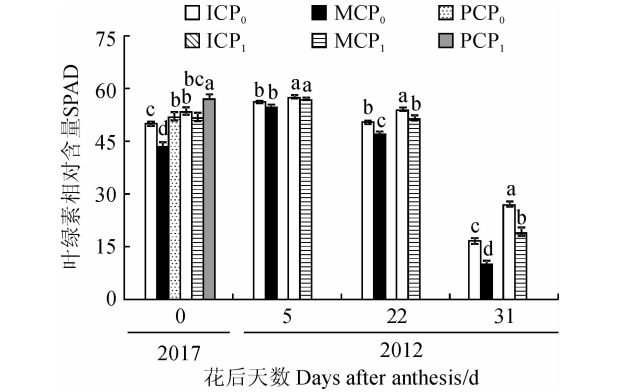
2.2 玉米及其间作茬口与施磷对冬小麦叶面积指数和干物质积累的影响

图2显示,各处理冬小麦干物质积累量随着生育期呈现逐渐升高的趋势,而叶面积指数都先升高后降低,并均在挑旗期达到最大值;玉米-花生茬口冬小麦各生育时期干物质积累量(图2,A)和叶面积指数(图2,B)始终高于同期玉米茬口,增幅分别为10.8%~46.1%和11.1%~69.2%,且在收获期等时期差异达到显著水平(P<0.05)。同时,与不施磷对照相比,施磷处理冬小麦干物质积累量和叶面积指数均不同程度提高。这表明间作茬口和施用磷肥都能有效促进冬小麦生长,增加叶面积指数,并能

保持生育后期较高的叶面积指数,且茬口和施磷配合效果更明显。

2.3 玉米及其间作茬口与施磷对冬小麦旗叶气体交换参数的影响

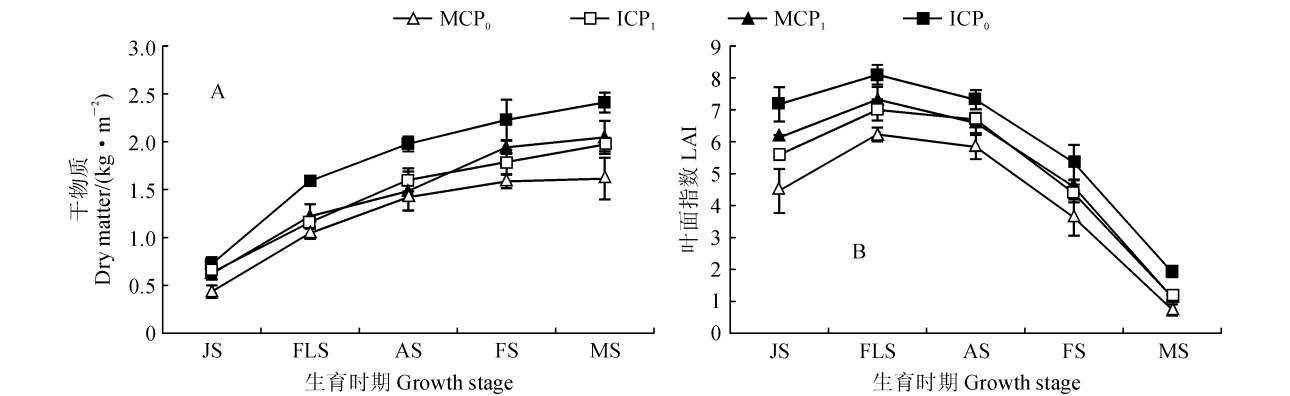
由表1可知,同一磷水平下,冬小麦旗叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)在花后



P₀. 施 0 kg P₂O₅ · hm⁻²; P₁. 施 180 kg P₂O₅ · hm⁻²;
IC. 玉米-花生间作茬口; MC. 玉米单作茬口; PC. 花生单作茬口;
同期不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异; 以下图表同

图1 2012和2017年玉米、花生及其间作茬口与施磷处理冬小麦花后旗叶SPAD值的变化
P₀. Application 0 kg P₂O₅ · hm⁻²; P₁. Application 180 kg P₂O₅ · hm⁻²;
IC. Maize intercropping peanut crops for rotation; MC. Maize sole cropping; PC. Peanut sole cropping;
The different normal letters within the same stage indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

The same as tables and figures below
Fig. 1 The SPAD value in flag leaves of winter wheat post anthesis with sole maize, sole peanut, and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer treatments in 2012 and 2017



JS. 拔节期; FLS. 挑旗期; AS. 扬花期; FS. 灌浆期; MS. 成熟期
图2 2012年玉米及其间作茬口与施磷处理冬小麦干物质积累(A)和叶面积指数(B)随生育期的变化
JS. Jointing stage; FLS. Flag leaf stage; AS. Anthesis stage; FS. Filling stage; MS. Maturity stage
Fig. 2 The changes of dry matter accumulation (A) and leaf area index (B) of winter wheat with sole maize and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer treatments in 2012

5 d、22 d 和 31 d 时均表现为间作茬口大于玉米茬口,并均以间作施磷组合最高;同期胞间 CO_2 浓度 (C_i) 均表现为玉米茬口大于间作茬口,并均以间作施磷组合最低。与玉米茬口相比,间作茬口冬小麦旗叶 P_n 、 G_s 、 T_r 分别提高了 5.03%~27.7%、2.48%~19.3%和 5.99%~67.1%, C_i 则降低了 3.83%~7.87%,且 P_n 在花后 5 d 差异达到显著水平 ($P<0.05$),甚至在花后 31 d 仍具有明显差异, G_s 在花后 31 d 差异达到显著水平, T_r 和 C_i 在花后差异大多不显著。与不施磷对照相比,冬小麦旗叶 P_n 、 G_s 、 T_r 在施磷条件下分别提高了 3.34%~

29.6%、18.6%~43.7%、8.29%~59.0%, C_i 降低了 1.0%~4.66%,且 P_n 、 T_r 在各生育时期差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。以上结果说明间作茬口和施磷均能有效提高冬小麦旗叶 P_n 、 G_s 、 T_r ,降低 C_i 值,从而提高光合能力,且茬口配合施磷的效果更好。

2.4 玉米、花生及其间作茬口与施磷对冬小麦旗叶光合响应曲线及其特征参数的影响

2.4.1 光强-光合响应曲线 各处理冬小麦扬花期和乳熟期旗叶的光强-光合响应曲线(图 3,A~D)显示,与玉米茬口相比,间作茬口和花生茬口均提高了

表 1 2012 年玉米及其间作茬口与施磷处理冬小麦花后旗叶气体交换参数的变化

Table 1 The gas exchange parameters in flag leaf of winter wheat post flowering with sole maize and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer treatments in 2012

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			气孔导度 Stomatal conductance/ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			蒸腾速率 Transpiration rate/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)		
	5 d	22 d	31 d	5 d	22 d	31 d	5 d	22 d	31 d	5 d	22 d	31 d
ICP ₀	18.1b	16.5b	10.5a	0.321ab	0.547a	0.210b	8.9ab	11.9b	7.2b	242bc	277b	290a
MCP ₀	16.8c	15.5b	7.0b	0.253b	0.490a	0.167c	7.5b	11.1b	6.9b	262ac	288a	303a
ICP ₁	21.9a	19.0a	11.6a	0.463a	0.592a	0.443a	11.4a	14.2a	10.0a	237a	268ab	277a
MCP ₁	17.3b	16.1b	9.1a	0.398a	0.559a	0.265b	10.7a	13.8a	9.0a	252b	285a	297a

注:同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著,下同
Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 levels. The same as below

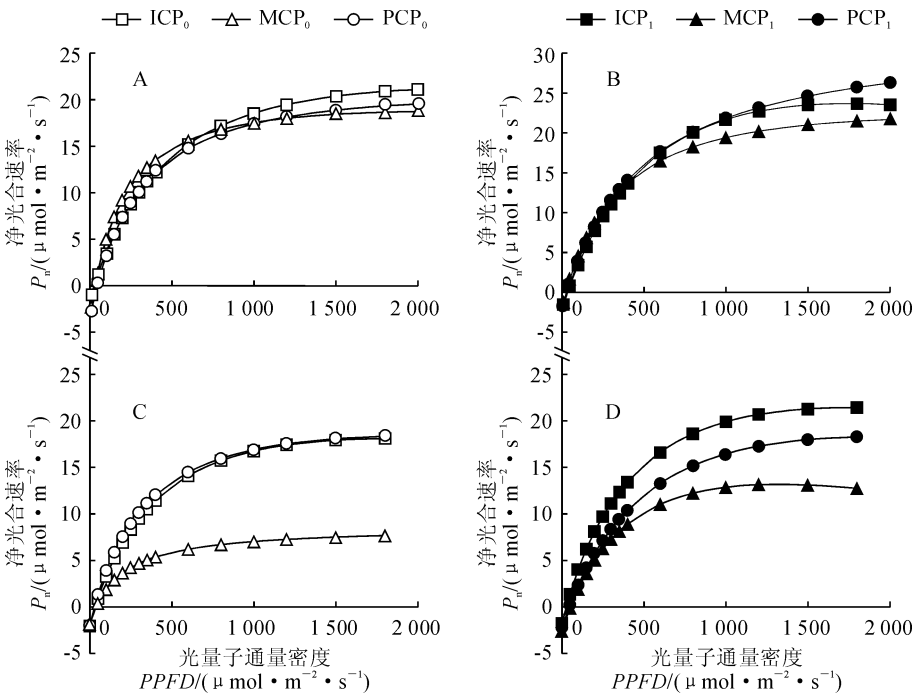


图 3 玉米、花生及其间作茬口与施磷处理冬小麦扬花期(A、B)和乳熟期(C、D)旗叶光强-光合响应曲线
Fig. 3 The photosynthetic response curves to light intensity in flag leaves of winter wheat at flowering stage (A,B) and milk stage (C,D) with sole maize, sole peanut, and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer treatments in 2017

冬小麦旗叶的光饱和点和最大净光合速率,尤其在小麦乳熟期表现得更为明显(图3,C、D)。不施磷时,间作茬口和花生茬口冬小麦旗叶的光强-光合响应曲线差异不明显;施磷后,花生茬口冬小麦旗叶的光饱和点和最大净光合速率在扬花期高于间作茬口,在乳熟期却明显低于间作茬口,此时3种茬口间的差异最明显。与不施磷相比,施磷均不同程度提高了3种茬口冬小麦旗叶的光饱和点和最大净光合速率。这表明间作茬口较玉米茬口能改善冬小麦旗叶的光强-光合响应曲线特点,提高最大净光合速率;施磷能提高各茬口冬小麦光饱和点和最大净光合速率。

2.4.2 CO₂-光合响应曲线 如图4,A~D所示,在扬花期,各茬口冬小麦旗叶的CO₂-光合响应曲线特点基本一致,间作茬口和花生茬口CO₂饱和点和最大净光合速率相近,但均高于相应的玉米茬口;在乳熟期,冬小麦旗叶的CO₂饱和点和最大净光合速率表现为间作茬口>花生茬口>玉米茬口,且施磷条件下差异表现得更明显;与扬花期相比,乳熟期冬小麦CO₂饱和点和最大净光合速率均显著降低。与不施磷相比,施磷提高了不同茬口冬小麦旗叶的CO₂饱和和最大净光合速率,在乳熟期的效果表现尤

其突出。可见,作茬口和施磷均能改善冬小麦旗叶的CO₂-光合响应曲线特点,减少后期光饱和点和最大净光合速率下降幅度,延长高光合功能期,且茬口和施磷配合效果更佳。

2.4.3 光强和CO₂光合响应曲线特征参数 从表2可知,各茬口冬小麦旗叶的表观量子效率(AQY)和最大净光合速率(P_{nmax})均表现为间作茬口>花生茬口>玉米茬口,且间作茬口均显著高于玉米茬口($P<0.05$),而与花生茬口差异不显著(除施磷时扬花期)。同时,各茬口冬小麦旗叶的羧化效率(CE)、Rubisco最大羧化速率(V_{cmax})、最大电子传递速率(J_{max})和磷酸丙糖利用速率(V_{TPU})在扬花期均表现为花生茬口>间作茬口>玉米茬口,在乳熟期均表现为间作茬口≥花生茬口>玉米茬口,且间作茬口和花生茬口冬小麦旗叶的CE、 V_{cmax} 和 J_{max} 均比玉米茬口显著提高($P<0.05$);与不施磷相比,施磷各茬口冬小麦旗叶的AQY、CE、 V_{cmax} 和 J_{max} 分别显著提高5.0%~40.7%、17.9%~90.2%、16.1%~35.5%和11.7%~39.5% ($P<0.05$);乳熟期冬小麦旗叶的CE、 V_{cmax} 、 J_{max} 和 V_{TPU} 均比扬花期显著降低,但间作茬口冬小麦旗叶能保持相对较高的CE、 V_{cmax} 和 J_{max} 。这说明同玉米茬口相比花生茬口和间

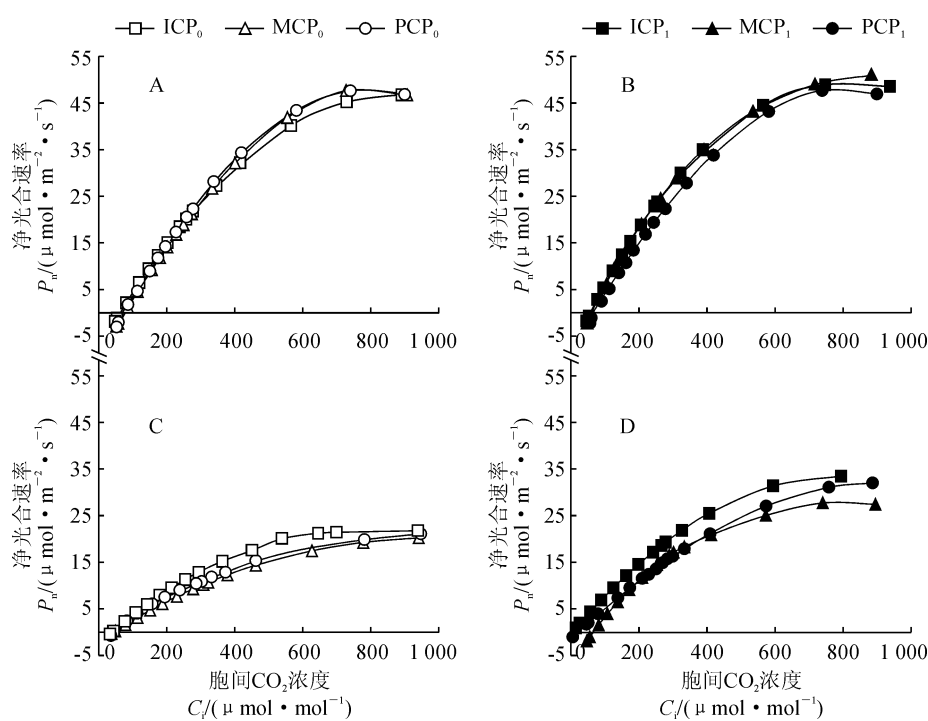


图4 玉米、花生及其间作茬口与施磷处理冬小麦扬花期(A、B)和乳熟期(C、D)旗叶CO₂-光合响应曲线
Fig. 4 The photosynthetic response curves to CO₂ concentration in flag leaves of winter wheat at flowering stage (A,B) and milk stage (C,D) with sole maize, sole peanut, and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer treatments in 2017

表 2 玉米、花生及其间作茬口与施磷处理冬小麦旗叶光强、CO₂—光合响应参数
Table 2 The relevant parameters of photosynthetic response of light intensity and CO₂ concentration in flag winter wheat leaf with sole maize, sole peanut, and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer treatments in 2017

处理 Treatment	表观量子效率 AQY $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$			最大净光合速率 P_{nmax} $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$			羧化效率 CE			Rubisco 最大羧化速率 V_{max} $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$			最大电子传递速率 J_{max} $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$			磷酸丙糖利用速率 V_{TPU} $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$		
	扬花期 Blooming stage	乳熟期 Milk stage	扬花期 Blooming stage	乳熟期 Milk stage	扬花期 Blooming stage	乳熟期 Milk stage	扬花期 Blooming stage	乳熟期 Milk stage	扬花期 Blooming stage	乳熟期 Milk stage	扬花期 Blooming stage	乳熟期 Milk stage	扬花期 Blooming stage	乳熟期 Milk stage	扬花期 Blooming stage	乳熟期 Milk stage		
ICP ₀	0.044c	0.042b	21.1cd	0.112b	0.051d	101.1cd	49.5c	131.8c	48.6c	16.9bc	8.27cd							
MCP ₀	0.040d	0.027d	18.7e	0.102c	0.043e	99.1d	39.7d	125.5d	43.1d	16.0c	6.95de							
PCP ₀	0.043cd	0.041b	19.5de	0.114b	0.051d	102.1c	48.5c	153.3b	47.9c	17.9b	7.41d							
ICP ₁	0.053a	0.047a	27.3a	0.133a	0.097b	119.4b	67.1a	155.1b	67.8a	17.6b	10.6a							
MCP ₁	0.042cd	0.038c	21.7c	0.125a	0.069c	102.9c	61.7b	138.9c	63.3b	17.3b	9.05bc							
PCP ₁	0.048b	0.046a	23.4b	0.139a	0.089a	123.7a	66.9a	171.9a	66.7a	18.5a	9.45b							

表 3 玉米、花生及其间作茬口与施磷处理冬小麦产量及构成的变化
Table 3 The yield and its composition of winter wheat with sole maize, sole peanut, and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer treatments in 2012 and 2017

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 Effective spikes (×10 ⁶ • hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	籽粒产量 Grain yield (t • hm ⁻²)	生物产量 Biological yield (t • hm ⁻²)	收获指数 Harvest index	成穗率 Percentage of earring-tillers/%
2012	ICP ₀	6.77b	41.1b	40.2ab	7.38b	16.8b	0.44a	52.5b
	MCP ₀	6.07c	35.0c	38.8c	6.37c	15.0c	0.42ab	49.7c
	ICP ₁	7.93a	45.8a	41.4a	8.25a	20.1a	0.41b	66.6a
	MCP ₁	7.14b	39.0b	39.5bc	7.33b	19.9a	0.37c	55.7b
2017	ICP ₀	3.09c	27.7b	50.7a	3.40c	7.95e	0.43a	—
	MCP ₀	2.84d	21.0c	43.6c	2.17d	6.90f	0.31c	—
	PCP ₀	3.07c	26.3b	50.0a	3.33c	8.48d	0.40a	—
	ICP ₁	4.90a	35.3a	51.2a	6.97a	18.9a	0.37b	—
	MCP ₁	4.32b	27.0b	47.8b	5.07c	14.5c	0.34c	—
	PCP ₁	4.92a	34.0a	50.9a	6.03b	16.4b	0.37b	—

作茬口明显提高冬小麦旗叶的光能利用效率和 CO_2 羧化固定能力,间作茬口较花生茬口延长了冬小麦高光合功能期;施磷有利于提高各茬口冬小麦旗叶的光合能力,且与适当茬口配合效果更好。

2.5 玉米、花生及其间作茬口与施磷对冬小麦产量及其构成的影响

由表 3 可以看出,在同一磷水平下,2012 年冬小麦的穗数、成穗率、穗粒数、千粒重、籽粒产量、生物产量和收获指数均表现为间作茬口高于玉米茬口,且差异大多达到显著水平($P < 0.05$),穗数、成穗率、穗粒数、千粒重、籽粒产量均以间作施磷处理组合最高,而收获指数以间作不施磷处理组合最高;2017 年冬小麦的穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量、生物产量和收获指数基本表现为间作茬口和花生茬口均显著高于玉米茬口,而除生物产量外间作茬口和花生茬口间差异不显著,并且收获指数以间作不施磷处理组合最高,其余指标仍以间作施磷处理组合显著最高;与 2012 年相比,2017 年间作茬口冬小麦籽粒产量比玉米茬口提高幅度更大。同时,与不施磷相比,施磷不同程度提高了冬小麦的穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量和生物产量,却降低了其收获指数,且除千粒重外大多达到显著水平($P < 0.05$)。以上结果说明间作茬口较玉米茬口能显著提高冬小麦的穗数、成穗率、穗粒数、千粒重等构成因素及收获指数,从而显著提高其籽粒产量,尤其在施磷条件下,并且随着间作茬口年限增加而提高幅度更大。

3 讨 论

在单一连作种植模式下,多种作物都表现出连作障碍,致使产量降低^[8-10]。合理的作物轮作换茬能增加农田生物多样性,协调作物与土壤的关系,改善农田生态环境^[5,16],促进作物生长、增加产量^[2,6-7]。本研究表明,与小麦生产惯用玉米茬口相比,玉米花生间作茬口显著提高了冬小麦的产量,这可能是由于玉米花生间作茬口比玉米茬口增加了土壤微生物代谢活性、群落结构多样性^[12-13],改善了土壤团粒结构^[15],从而提高了土壤酶活性和土壤肥力^[13-14]。而崔欢虎等^[21]研究认为玉米茬口的小麦产量最高,与本研究结果相反,这可能与其试验所处生态区和茬口体系不同有关。研究表明玉米大豆、豌豆玉米等间作模式较单作玉米提高了土壤含水量,降低了禾本科作物等高耗水作物对土壤水分的过度消耗,改善了土壤表层水分蒸发量^[22-26]。因此,间作茬口条件下能够保证后茬作物冬小麦对土

壤水分的需求,对提高冬小麦产量起到了至关重要的作用。叶面积指数、有效分蘖数、成穗率均为研究小麦群体结构的重要参数,叶面积指数是研究光合作用、蒸腾作用的基础^[27],有效分蘖数及成穗率是构成小麦产量的关键因素之一^[28]。在本研究发现间作茬口较玉米茬口明显增大冬小麦叶面积指数,提高净光合速率,促进干物质积累;同时显著提高冬小麦有效分蘖数,增加穗数,增加千粒重,这是否与玉米花生间作较玉米单作减少水分消耗有关,还需要进一步研究。另外,与花生茬口相比,仅在施磷时,间作茬口显著提高冬小麦产量,因为施磷时花生茬口分蘖多,群体大,后期光合能力降低快,衰老得早,造成穗粒数和粒重低于玉米花生间作茬口,具体机理还需进一步深入研究。

本研究表明,玉米花生间作茬口较玉米茬口提高冬小麦旗叶的 SPAD 值,具有较高光饱和点和 CO_2 饱和点及最大净光合速率,显著提高了冬小麦穗粒数和千粒重,这可能与玉米花生间作促进花生固氮^[11],增加土壤微生物和土壤酶活性,提高土壤养分含量^[12-15]密切相关。在本研究的扬花期,花生茬口冬小麦的 SPAD 值显著高于间作茬口,而表观量子效率和最大净光合速率低于间作茬口;在乳熟期,花生茬口冬小麦的表观量子效率和 CO_2 羧化固定能力均低于间作茬口,说明花生茬口冬小麦旗叶光合能力后期下降得比间作茬口快,究竟是什么原因,还需要深入研究。本研究中玉米花生间作茬口较玉米茬口显著提高了冬小麦旗叶的 CE 、 V_{cmax} 、 J_{max} 和 V_{TPU} ,尤其在乳熟期表现更明显。而最大羧化速率(V_{cmax})、最大 RuBP 再生的电子传递速率(J_{max})、最大磷酸丙糖利用速率(V_{TPU})被广泛认为是影响光饱和时最大光合速率的主要限制因素^[29],能反映光合作用暗反应过程的 CO_2 羧化固定能力。这表明玉米花生间作茬口较玉米茬口能有效提高冬小麦旗叶的 CO_2 羧化固定能力,延长叶片高光合功能期。这可能由于间作较大单作减少了土壤水分消耗^[22-25]、增加了土壤微生物活性和提高了土壤肥力^[12-14],改善农田生态环境^[5,16],而有效改善了后茬冬小麦后期光合特性。另外,间作茬口较花生茬口降低了冬小麦旗叶扬花期的 CE 、 V_{cmax} 、 J_{max} 和 V_{TPU} ,却提高了乳熟期的 AQY 、 LSP_n 、 CE 、 V_{cmax} 、 J_{max} 和 V_{TPU} ,尤其是施磷时的 $P_{n\text{max}}$ 和 CE ,差异达到显著水平,这可能是施磷条件下,花生茬口冬小麦群体大,光、养分等资源竞争激烈,造成高光合功能期短于间作茬口,因此降低了花生茬口下冬小麦千粒重。本

研究还表明,施磷能提高冬小麦旗叶光合能力,延长高光合功能期,改善产量构成,提高小麦产量,这与杨晴等^[30]研究结果一致。

综上所述,玉米花生间作茬口结合施磷较玉米茬口一方面显著促进冬小麦有效分蘖数、增大叶面积指数、提高干物质积累量,有效改善产量构成,另

一方面显著提高冬小麦花后旗叶的表观量子效率和CO₂ 羧化固定能力,提高其光合速率,延长高光合功能期,从而显著提高了冬小麦的籽粒产量,并随间作年限增加而增产幅度更大。该研究结果为玉米花生间作适宜与小麦-玉米复种进行轮作提供了理论依据。

参考文献:

[1] 王志强, 黄国勤, 赵其国. 新常态下我国轮作休耕的内涵、意义及实施要点简析[J]. 土壤, 2017, **49**(4): 651-657.
WANG Z Q, HUANG G Q, ZHAO Q G. Brief analysis on connotation, significance and implementing essentials of rotation fallow under new normal in China[J]. *Soils*, 2017, **49**(4): 651-657.

[2] 薛庆喜. 作物茬口对缓解大豆连作危害效果的研究[J]. 大豆科学, 2010, **29**(1): 68-71.
XUE Q X. Effects of crop stubbles on alleviating the damages by continuous cropping soybean[J]. *Soybean Science*, 2010, **29**(1): 68-71.

[3] 王劲松, 樊芳芳, 郭 珺, 等. 不同作物轮作对连作高粱生长及其根际土壤环境的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(27): 2 283-2 291.
WANG J S, FAN F F, GUO J *et al.* Effects of different crop rotations on growth of continuous cropping sorghum a its rhizosphere soil micro-environment[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2016, **27**(27): 2 283-2 291.

[4] BARTON L, MURPHY DV, BUTTERBACH-Bahl K. Influence of crop rotation and liming on greenhouse gas emissions from a semi-arid soil[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 167: 23-32.

[5] MCDANIEL M D, GRANDY A S, TIEMANN L K, *et al.* Crop rotation complexity regulates the decomposition of high and low quality residues[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 243-254.

[6] 张福韬, 乔云发, 苗淑杰, 等. 轮作对黑土团聚体有机质光谱特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(6): 208-214.
ZHANG F T, QIAO Y F, MIAO S J, *et al.* Effects of crop rotation on spectrum characteristics of organic matter in molli-sol aggregates[J]. *Journal of Soil and Water*, 2015, **29**(6): 208-214.

[7] ZHOU K Q, SUI Y Y, LIU X B, *et al.* Crop rotation with nine-year continuous cattle manure addition restores farmland productivity of artificially eroded mollisols in Northeast China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 171: 138-145.

[8] 张向前. 不同氮水平下玉米间作大豆和花生的效应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013.

[9] YANG X L, CHEN Y Q, PACENKA S, *et al.* Effect of diversified crop rotations on groundwater levels and crop water productivity in the North China Plain[J]. *Journal of Hydrol-ogy*, 2015, 522: 428-438.

[10] 王崇桃, 李少昆. 玉米生产限制因素评估与技术优先序[J]. 中国农业科学, 2010, **43**(6): 1 136-1 146.
WANG C T, LI S K. Assessment of limiting factors and techniques prioritization for maize production in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, **43**(6): 1 136-1 146.

[11] ZUO Y M, LIU Y X, ZHANG F S, *et al.* Studies on the improvement iron nutrition of peanut intercropping with maize on nitrogen fixation at early stages of growth of peanut on a calcareous soil[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2005, 50: 1 071-1 078.

[12] 何志刚, 汪 仁, 王秀娟, 等. 不同玉米/花生间作模式对土壤微生物量及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(33): 233-236.
HE Z G, WANG R, WANG X J, *et al.* The impact of inter-cropping on the yield and soil microorganism of different pea-nut and corn[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, **29**(33): 233-236.

[13] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(22): 7 082-7 090.
ZHANG Q Q, HUANG G Q, BIAN X M, *et al.* Effects of intercropping on quality and yield of maize grain microorganism quantity, and enzyme activities in soils[J]. *Acta Ecologi-ca Sinica*, 2012, **32**(22): 7 082-7 090.

[14] 章家恩, 高爱霞, 徐华勤, 等. 玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(7): 1 597-1 602.
ZHANG J E, GAO A X, XU H Q, *et al.* Effects of maize/peanut intercropping on rhizosphere soil microbes and nutri-ents content[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2009, **20**(7): 1 597-1 602.

[15] 姜玉超. 玉米花生间作对土壤肥力特性的影响[D]. 河南洛阳: 河南科技大学, 2015.

[16] 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): 1 469-1 476.
WANG F, LI Q H, LIN C, *et al.* Influence of paddy rice-up-land crop rotation of cold-waterlogged paddy field on crops production and soil characteristics[J]. *Chinese Journal Ap-pplied Ecology*, 2015, **26**(5): 1 469-1 476.

[17] 王惠珍, 张新慧, 李应东, 等. 轮作与连作当归光合特性和挥

- 发油的比较[J]. 草业学报, 2011, **20**(1): 69-74.
- WANG H Z, ZHANG X H, LI Y D, *et al.* Comparison of photosynthetic characteristic and the essential oils in crop rotation and continuous cropping of *Angelica sinensis*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, **20**(1): 69-74.
- [18] 吴 楚, 范志强, 王政权. 磷胁迫对水曲柳幼苗叶绿素合成、光合作用和生物量分配格局的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(6): 935-940.
- WU C, FAN Z Q, WANG Z Q. Effect of phosphorus stress on chlorophyll biosynthesis, photosynthesis and biomass partitioning pattern of *Fraxinus mandchurica* seedlings[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2004, **15**(6): 935-940.
- [19] JACOB J, LAWLOR D W. Dependence of photosynthesis of sunflower and maize leaves on phosphate supply, ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activity, and ribulose-1, 5-bisphosphate pool size[J]. *Plant Physiology*, 1992, **98**(3): 801-7.
- [20] 张岁岐, 山 仑. 土壤干旱条件下磷素营养对春小麦水分状况和光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 1997, (1): 20-27.
- ZHANG S Q, SHAN L. The effect of phosphorus nutrition on water status and photosynthesis of spring wheat under soil drought condition[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1997, (1): 20-27.
- [21] 崔敬虎, 王娟玲, 马步州, 等. 茬口和灌水对小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(3): 479-483.
- CUI H H, WANG J L, MA B Z, *et al.* Effect of crop rotation and irrigation on wheat yield and water-use efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, **17**(3): 479-483.
- [22] 叶优良, 肖焱波, 黄玉芳, 等. 小麦/玉米和蚕豆/玉米间作对水分利用的影响[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(3): 445-449.
- YE Y L, XIAO Y B, HUANG Y F, *et al.* Effect of wheat/maize and faba bean/maize inter cropping on water use[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, **24**(3): 445-449.
- [23] 李来祥, 刘广才, 李 隆. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, **32**(1): 74-80.
- LI L X, LIU G C, LI L. Intercropping advantage and contribution of above-ground and under-ground interactions in wheat-maize intercropping[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, **26**(1): 74-80.
- [24] ZHANG L, W VANDER W, ZHANG S, *et al.* Growth yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2007, **103**(3): 178-188.
- [25] 谢运河, 李小红, 王业建, 等. 玉米大豆间作行比对早熟春大豆农艺性状及产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2011, 5: 26-28.
- XIE Y H, LI X H, WANG Y J, *et al.* Influences of different intercropping row-ratios between maize and soybean on agronomic characters and yield of precocious spring soybean[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011, 5: 26-28.
- [26] 高视亮, 孙占祥, 白 伟, 等. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, **50**(19): 3 702-3 713.
- GAO Y L, SUN Z X, BAI W, *et al.* Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the Semi-Arid Region of Western Liaoning Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(19): 3 702-3 713.
- [27] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(5): 537-541.
- WANG X Q, MA L Y, JIA Z K, *et al.* Research and application advances in leaf area index (LAI)[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(5): 537-541.
- [28] 张 晶, 张定一, 王姣爱, 等. 小麦单株有效分蘖数与农艺性状的相关性研究[J]. 山西农业科学, 2009, **37**(6): 17-19.
- ZHANG J, ZHANG D Y, WANG J A, *et al.* The dependence study of the effective tillers per plant and agronomic characters in wheat[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2009, **37**(6): 17-19.
- [29] 杨淑巧, 许 琦, 刘跃鹏, 等. 冬小麦光合作用和叶绿素荧光特性的研究[J]. 农学报, 2015, **5**(3): 5-10.
- YANG S Q, XU Q, LIU Y P, *et al.* Research on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristic of winter wheat[J]. *Journal of Agriculture*, 2015, **5**(3): 5-10.
- [30] 杨 晴, 韩金玲, 李雁鸣, 等. 不同施磷量对小麦旗叶光合性能和产量性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(6): 816-821.
- YANG Q, HAN J L, LI Y M, *et al.* Effects of different phosphorus application on photosynthetic and yield characters of flag leaf of barley[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2006, **12**(6): 816-821.

(编辑:裴阿卫)