

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

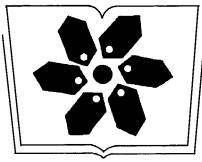
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第14期 Vol.33 No.14 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 14 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

石鸡属鸟类研究现状..... 宋 森,刘迺发 (4215)

个体与基础生态

不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响.....
..... 闫 慧,吴 茜,丁 佳,等 (4226)

低温胁迫时间对 4 种幼苗生理生化及光合特性的影响..... 邵怡若,许建新,薛 立,等 (4237)

不同施氮处理玉米根茬在土壤中矿化分解特性..... 蔡 苗,董燕婕,李佰军,等 (4248)

不同生育期花生渗透调节物质含量和抗氧化酶活性对土壤水分的响应.....
..... 张智猛,宋文武,丁 红,等 (4257)

天山中部天山云杉林土壤种子库年际变化..... 李华东,潘存德,王 兵,等 (4266)

不同作物两苗同穴互作育苗的生理生态效应..... 李伶俐,郭红霞,黄耿华,等 (4278)

镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响..... 周相玉,冯文强,秦鱼生,等 (4289)

CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、运输和分配的影响 庄明浩,陈双林,李迎春,等 (4297)

pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及根表 Fe、Cd 吸附行为的影响 刘丹青,陈 雪,杨亚洲,等 (4306)

弱光胁迫对不同耐荫型玉米果穗发育及内源激素含量的影响..... 周卫霞,李潮海,刘天学,等 (4315)

玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响..... 焦念元,宁堂原,杨萌珂,等 (4324)

不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型..... 黄晶晶,井家林,曹德昌,等 (4331)

植被年际变化对蒸散发影响的模拟研究..... 陈 浩,曾晓东 (4343)

蝇蛹金小蜂的交配行为及雄蜂交配次数对雌蜂繁殖的影响..... 孙 芳,陈中正,段毕升,等 (4354)

西藏飞蝗虫粪粗提物的成分分析及其活性测定..... 王海建,李彝利,李 庆,等 (4361)

不同水稻品种对稻纵卷叶螟生长发育、存活、生殖及飞行能力的影响..... 李 霞,徐秀秀,韩兰芝,等 (4370)

种群、群落和生态系统

基于 *mtCOII* 基因对山东省越冬代亚洲玉米螟不同种群的遗传结构分析
..... 李丽莉,于 毅,国 栋,等 (4377)

太湖湿地昆虫群落结构及多样性..... 韩争伟,马 玲,曹传旺,等 (4387)

西江下游浮游植物群落周年变化模式..... 王 超,赖子尼,李新辉,等 (4398)

环境和扩散对草地群落构建的影响..... 王 丹,王孝安,郭 华,等 (4409)

黄土高原不同侵蚀类型区生物结皮中蓝藻的多样性..... 杨丽娜,赵允格,明 姣,等 (4416)

景观、区域和全球生态

基于景观安全格局的建设用地管制分区..... 王思易,欧名豪 (4425)

黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析..... 赵锐锋,姜朋辉,赵海莉,等 (4436)

2000—2010 年青海湖流域草地退化状况时空分析 骆成凤,许长军,游浩妍,等 (4450)

基于“源”“汇”景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究 李海防,卫 伟,陈 瑾,等 (4460)

农业景观格局与麦蚜密度对其初寄生蜂与重寄生蜂种群及寄生率的影响 ... 关晓庆,刘军和,赵紫华 (4468)

CO₂ 浓度和降水协同作用对短花针茅生长的影响..... 石耀辉,周广胜,蒋延玲,等 (4478)

资源与产业生态

城市土地利用的生态服务功效评价方法——以常州市为例..... 阳文锐,李 锋,王如松,等 (4486)

城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门市为例..... 王慧娜,赵小锋,唐立娜,等 (4495)

研究简报

间套作种植提升农田生态系统服务功能..... 苏本营,陈圣宾,李永庚,等 (4505)

矿区生态产业评价指标体系 王广成,王欢欢,谭玲玲 (4515)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-07



封面图说: 古田山常绿阔叶林景观——亚热带常绿阔叶林是我国独特的植被类型,生物多样性仅次于热带雨林。古田山地处中亚热带东部,浙、赣、皖三省交界处,由于其特殊复杂的地理环境位置,分布着典型的中亚热带常绿阔叶林,是生物繁衍栖息的理想场所,生物多样性十分突出。中国科学院在这里建立了古田山森林生物多样性与气候变化研究站,主要定位于研究和探索中国亚热带森林植物群落物种共存机制,阐释生物多样性对森林生态系统功能的影响,以及监测气候变化对于亚热带森林及其碳库和碳通量的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201207311087

焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 付国占, 尹飞, 徐国伟, 李增嘉. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响. 生态学报, 2013, 33(14): 4324-4330.

Jiao N Y, Ning T Y, Yang M K, Fu G Z, Yin F, Xu G W, Li Z J. Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4324-4330.

玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响

焦念元^{1,2,*}, 宁堂原², 杨萌珂¹, 付国占¹, 尹飞¹, 徐国伟¹, 李增嘉²

(1. 河南科技大学农学院, 洛阳 471003; 2. 山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 为了进一步揭示玉米花生间作体系中玉米间作产量优势的光合机理, 于 2010—2011 年在河南科技大学试验农场研究了间作玉米功能叶的光-光响应曲线和光-CO₂ 响应曲线特点、荧光参数、叶绿素含量与构成、干物质积累及灌浆速率。结果表明: 间作提高了玉米功能叶片的叶绿素含量, 改变了叶绿素构成, 显著提高了净光合速率, 延缓衰老; 间作提高了玉米光补偿点、光饱和点、光饱和时的最大净光合速率、表观量子效率和羧化效率, 显著降低了 CO₂ 补偿点; PS II 的实际光化学效率、PS II 的最大光化学效率和光化学猝灭系数变化不明显。间作明显提高玉米生育后期单株干物质, 主要在于促进了籽粒的生长, 显著提高玉米产量, 偏土地当量 (PLER-M) 高于其所占面积比例的 106.6%—120.3%, 表现出明显的间作产量优势。这说明间作玉米产量间作优势主要来源于其生育后期净光合速率的提高, 促进光合物质向籽粒的分配, 净光合速率的提高是通过羧化效率和表观量子效率的提高, 增强 CO₂ 的固定能力实现的, 而非是光能传递、转化效率的提高。

关键词: 间作玉米; 光合特性; 羧化效率; 产量形成

Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize

JIAO Nianyuan^{1,2,*}, NING Tangyuan², YANG Mengke, FU Guozhan¹, YIN Fei¹, XU Guowei¹, LI Zengjia²

1 College of Agronomy, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, Henan, China

2 The State Key Laboratory of Crop Biology, College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China

Abstract: Intercropping is a popular cropping system in high-yielding production of food and feed in the world, which is more productive than monocropping because of the intensive utilization of natural resources, such as sunlight, heat, water and fertilizer. As a component crop in most intercropping systems, maize can be intercropped with a variety of crops, such as common bean, faba bean, soybean and peanut, showing an important role, and an obvious intercropping yield advantage. Maize || peanut intercropping as an important cultivation pattern expanded rapidly in Sichuan Province and Huang Huai Hai Plain, China. We found maize || peanut intercropping enhanced the efficient utilization of strong sunlight by maize and weak sunlight by peanut, thus leading to intercropping advantages. To elucidate the photosynthetic mechanism of intercropping yield advantage of maize, that is, whether the better utilization of strong sunlight results from higher absorption and transmission of sunlight or enhanced photosynthetic CO₂ assimilation, a field experiment was conducted to investigate the effects of maize || peanut intercropping on the characters of response curves of *P_n* to *PFD* and to CO₂, fluorescence, and chlorophyll content and component of intercropped maize function leaves, dry matter accumulation and filling rate in 2010—2011 year at Henan University of Science and Technology Farm. Results showed that intercropping

基金项目: 农业部公益性行业科研专项 (201103001); 作物生物学国家重点实验室开放课题基金 (2011KF05); 河南科技大学自然科学领域创新能力培育基金 (2012ZCX020) 资助

收稿日期: 2012-07-31; 修订日期: 2012-12-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaony1@163.com

increased chlorophyll content of maize function leaves, altered chlorophyll component, significantly enhanced the net photosynthetic rate of maize function leaves, and delayed senescence in maize || peanut intercropping system. Intercropping significantly enhanced light compensation point, light saturation point, the maximum net photosynthetic rate of light saturation point, apparent quantum yield and carboxylation efficiency, but didn't obviously affect the F_v/F_m , Φ_{PSII} and qP of intercropped maize function leaves. Increased dry matter accumulation per plant of intercropped maize in the late growth stage was mainly attributed to the better growth of kernels, and significantly enhanced yield compared with sole-cropped maize. The partial land equivalent ratio (PLER) of maize was greater than the maize area ratio of maize || peanut intercropping system by 106.6%—120.3%, displaying a significant intercropping yield advantage. It suggested that the intercropping yield advantage of maize mainly from the rise of net photosynthetic rate of function leaves in the late growth stage, and more allocation photosynthetic products to grains, which was due to the increase of carboxylation efficiency and apparent quantum yield, and strengthening of the ability to fix CO_2 , but not the increase of sunlight energy transmission and conversion efficiency.

Key Words: intercropped maize; photosynthetic characters; carboxylation efficiency; yield formation

合理的间套作能高效利用光、热、肥、水等自然资源,降低风险,减少杂草竞争,提高单位耕地面积的产量^[1-2],在我国以及世界农业中发挥着重要作用。随着世界人口急剧增长和耕地面积的减少,不断满足世界粮食增长的需求已刻不容缓,间套作多熟种植越来越受到世界各国农业生产的重视。在纵多间套作种植体系中,玉米处于非常重要的地位^[2]。已有研究表明,在玉米菜豆^[3]、玉米蚕豆^[4]、玉米大豆^[5]、玉米花生^[6-8]等间作体系中,间作玉米产量均明显高于单作,表现出明显的间作产量优势。

在玉米与其他作物间套作体系中,全田群体高矮相错,形成伞状群体结构,改变了玉米生育后期单一群体的平面受光状态,受光条件得到改善,提高了功能叶片的叶绿素含量、蒸腾速率、气孔导度和光合速率^[8-9]。玉米花生间作是东亚和非洲常见的种植体系,近年来在我国四川、广东以及黄淮海等地区发展较快,种植面积不断扩大,间作提高玉米对强光利用^[6-7],表现出显著的间作产量优势^[8]。间作玉米提高对强光的利用,是光能吸收传递效率的提高,还是光合作用 CO_2 的同化过程增强引起? 还需进一步研究,同时间作玉米产量形成特点发生哪些适应性变化? 对此,本试验以玉米花生 2:4 间作模式为研究对象,主要研究了间作玉米光-光响应曲线和光- CO_2 响应曲线特点、叶绿素含量与构成、干物质积累、灌浆速率及间作玉米偏土地当量比(PLER-M),探讨间作玉米光合特性,进一步揭示玉米间作产量优势的光合机理,为协调玉米花生间作后期间光竞争,实现其高产高效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验于 2010—2011 年在河南科技大学试验农场(33°35'—35°05'N, 111°8'—112°59'E)进行。试验地属温带半湿润半干旱大陆性季风气候,年均气温 12.1—14.6 °C,年均降水量 600 mm,年均辐射量 491.5 kJ/cm²,年日照 2300—2600 h,无霜期 215—219 d。试验地土壤为黄潮土,质地中壤,0—20 cm 耕层含速效氮 80.09 mg/kg,速效磷 3.31 mg/kg,有机质 14.5 g/kg, pH 值 7.08。

2010 年选用玉米(*Zea mays* L.)郑单 958、登海 661,花生(*Arachis hypogaea* L.)花育 16 为试验材料。设郑单 958 单作、登海 661 单作、郑单 958 花生间作和登海 661 花生间作,共 4 个处理,各处理重复 3 次,共 12 个小区,每个小区宽 6 m,包含 3 个带宽,长 10 m,面积 60 m²,随机排列,南北行向种植。单作玉米行距 60 cm,株距 25 cm,密度 67500 株/hm²;间作体系 2:4(2 行玉米 4 行花生)间作模式,玉米宽窄行种植,宽行行距 160 cm,窄行行距 40 cm,株距 20 cm,花生播种于宽行中,行距 30 cm,株距 20 cm,每穴 2 粒;玉米花生间距 35 cm。基施氮肥 75 kg N/hm²,磷肥 180 kg P₂O₅/hm²,在玉米大口期追施 150 kg N/hm²。6 月 13 日播种,9 月 30 日收获。

2011 年玉米只选郑单 958,6 月 15 日播种,10 月 7 日收获,其他同 2010 年。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 干物质

分别于玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、授粉后 10 d、授粉后 20 d、授粉后 30 d 和收获期取样,分茎、叶、穗轴、籽粒四部分,105 °C 下杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重称重。

1.2.2 灌浆速率

在吐丝期,选择吐丝日期相同的植株进行标记,分别于授粉后 10 d、20 d、30 d、40 d 和收获期取 3 个果穗,105 °C 下杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重,测定穗干重。

1.2.3 收获测产

在玉米成熟期,各处理均取具有代表性的 4m 双行果穗和植株,测定其风干质量,计算产量。

1.2.4 光合参数测定

用英国 PP-systems 公司生产的 CIRAS-2 型便携式光合系统在玉米灌浆期和乳熟期测定穗位叶 9:00—11:00 时净光合速率;在乳熟期 9:00—11:00 时,采用自动可调光源,分别测定自然 CO₂ 浓度下光强为 1800、1500、1200、1000、800、600、500、400、300、200、150、100、50 μmol·m⁻²·s⁻¹ 的光合速率 (*P_n*);在光强 1200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 下,分别测定 CO₂ 浓度为 400、350、300、250、200、150、100、50、400、400、600、800、1000、1200 μmol/mol 时的光合速率 (*P_n*),应用 photosyn assistant 软件分析计算光补偿点 (LCP)、光饱和点 (LSP)、光饱和时净光合速率 (LSP_n)、表观量子效率 (AQY)、CO₂ 饱和点 (CSP)、羧化效率 (CE)。

1.2.5 叶绿素荧光参数测定

在玉米乳熟期用英国 Hansatech 公司生产的 FMS2 脉冲调制式荧光仪测定光适应下最大荧光 (*F_m*)、光适应下的稳态荧光 (*F_s*) 和暗适应 30min 后的最大荧光 (*F_m*)、初始荧光 (*F_o*)。计算 PS II 的最大光化学效率 (*F_v*/*F_m*)、实际光化学效率 (*Φ_{PS II}*) 和光化学猝灭系数 *qP* 公式分别为:

$$\frac{F_v}{F_m} = \frac{(F_m - F_o)}{F_m}, \Phi_{PS II} = \frac{(F_m' - F_s)}{F_m'}, qP = \frac{(F_m' - F_s)}{(F_m' - F_o')}$$

1.2.6 叶绿素含量

采用 Arnon 法^[9],在乳熟期取玉米的穗位叶测定。

1.2.7 偏土地当量比

$$PLER-M = Y_{im}/Y_{mm}$$

式中,*Y_{im}* 和 *Y_{mm}* 分别表示间作玉米和单作玉米产量。PLER-M>*F* (间作体系中玉米所占面积比例)为间作产量优势,PLER-M<*F* 为间作产量劣势。本试验中 *F* 为 0.4。

1.3 数据统计分析 采用 DPS7.5 软件对数据进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 玉米花生间作对玉米光合特性影响

2.1.1 间作玉米功能叶片的叶绿素含量及构成

叶绿素在植株体内负责光能的吸收、传递和转化,类胡萝卜素具有光能捕获和光破坏防御两大功能,在光合作用中起着非常重要的作用^[10]。由表 1 可以看出,与单作玉米相比,间作玉米穗位叶的叶绿素 a 含量、类胡萝卜素含量、叶绿素 a/b 和类胡萝卜素/叶绿素分别增加了 3.69%、6.52%、2.67% 和 4.17%,差异均达到

表 1 间作对玉米穗位叶叶绿素含量的影响

Table 1 Effect of intercropping on chlorophyll content of maize ear leaves

处理 Treatment	叶绿素 a Chl a/(mg/g)	叶绿素 b Chl b/(mg/g)	类胡萝卜素 Car/(mg/g)	叶绿素 a/b Chl a/b	类胡萝卜素/叶绿素 Car/Chl
SM	2.98 bB	0.88 aA	0.46 bB	3.36 bB	0.120 bB
IM	3.09 aA	0.86 aA	0.49 aA	3.45 aA	0.125 aA

同列数据后不同大、小写字母分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$); SM: 单作玉米; IM: 间作玉米

极显著水平。这说明间作玉米通过提高叶绿素 a 含量和叶绿素 a/b 促进光能的吸收,同时增加类胡萝卜素含量和类胡萝卜素/叶绿素增强光破坏防御能力,提高光合速率。

2.1.2 间作玉米功能叶片的荧光特性

F_o 是植物叶片暗适应后光合系统 PS II 中心完全开放时的荧光强度,反映了 PS II 天线色素受激发后的电子密度; F_v 是植物在暗适应过程中的最大可变荧光强度,反映了 QA 的还原情况^[11-12]; F_v/F_m 是 PS II 最大的(潜在)光化学量子效率,反映开放的 PS II 反应中心的能量捕获效率; Φ_{psII} 是作用光存在时 PS II 实际的光化学量子效率,反映了被用于光化学途径激发能占进入 PS II 总激发能的比例,植物光合能力的一个重要指标; qP 为光化学淬灭系数,反映 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额。由表 2 可得,与单作玉米相比,间作降低了玉米功能叶片的初始荧光、可变荧光和实际光化学效率,但差异均不显著;间作对玉米功能叶片的最大光化学效率和光化学淬灭系数影响不明显。这表明,间作玉米光合速率的提高并不是由于其功能叶片对光能传递、转化效率提高而引起的。

表 2 间作对玉米荧光参数的影响

Table 2 Effect of intercropping on fluorescence parameters of maize leaves					
处理 Treatment	初始荧光 Minimal fluorescence F_o	可变荧光 Variable fluorescence F_v	PS II 最大光化学效率 Maximal photochemical efficiency of PS II F_v/F_m	PS II 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS II Φ_{psII}	光化学淬灭系数 Photochemical quenching coefficient qP
SM	155.3 a	285.0 a	0.784 a	0.607 a	0.742 a
IM	153.7 a	275.3 a	0.784 a	0.581 a	0.745 a

2.1.3 间作玉米功能叶的光合特性

图 1 表明,间作明显提高了玉米功能叶片的净光合速率,在灌浆期和乳熟期分别提高了 27.7% 和 49.8%,差异均达到显著水平,由灌浆期到乳熟期,单作玉米和间作玉米光合速率均降低,其降低幅度分别为 35.5% 和 24.3%。这表明玉米花生间作显著提高了玉米净光合速率,减缓玉米叶片衰老,延长其高光合功能期。

由表 3 可以看出,与单作玉米相比,间作提高了玉米功能叶片的光补偿点、光饱和点、光饱和时的最大净光合速率、表观量子效率和羧化效率,分别提高了 26.7%、53.1%、33.1%、61.3%、8.5% 和 22.5%,差异达到显著或极显著水平,极显著降低了 CO_2 补偿点。这表明间作玉米光合速率的提高是由于提高了其对强光的利用能力和 CO_2 的羧化能力。

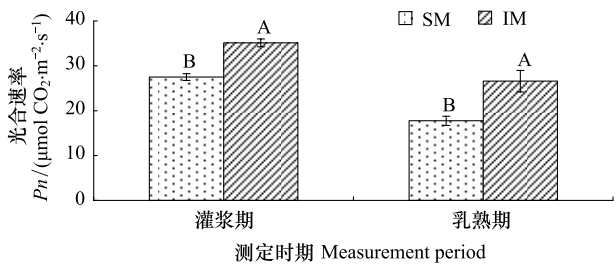


图 1 间作对玉米功能叶片光合速率的影响

Fig. 1 Effect of intercropping on photosynthetic rate of maize leaves

表 3 间作对玉米光合参数的影响

Table 3 Effect of intercropping on photosynthetic parameters of maize leaves							
处理 Treatment	光补偿点 LCP $/(\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	光饱和点 LSP $/(\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	光饱和和光合速率 LSPn $/(\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	光呼吸速率 Pr $/(\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	量子效率 AQY	CO_2 补偿点 CSP($\mu mol/mol$)	羧化效率 CE
SM	54.0 bB	1144.8 bB	22.21 bB	-2.12 bB	0.047 bA	28.73 aA	0.227 bB
IM	68.4 aA	1753.2 aA	29.57 aA	-3.42 aA	0.051 aA	16.29 bB	0.278 aA

2.2 玉米花生间作对玉米产量形成的影响

2.2.1 间作玉米单株干物质

单株干物质是衡量玉米生长状况的重要指标之一。从图 2 可得,在玉米大喇叭口期之前,间作玉米的单株干物质质量与单作相差不明显,之后间作玉米单株干物质质量逐渐高于单作玉米,平均高出 7.64%—

30.9%。尤其2011年,生育后期的间作玉米比单作玉米高出20.9%—30.9%,差异达到显著水平。从单株茎叶质量来看,间作玉米与单作玉米差异不明显。

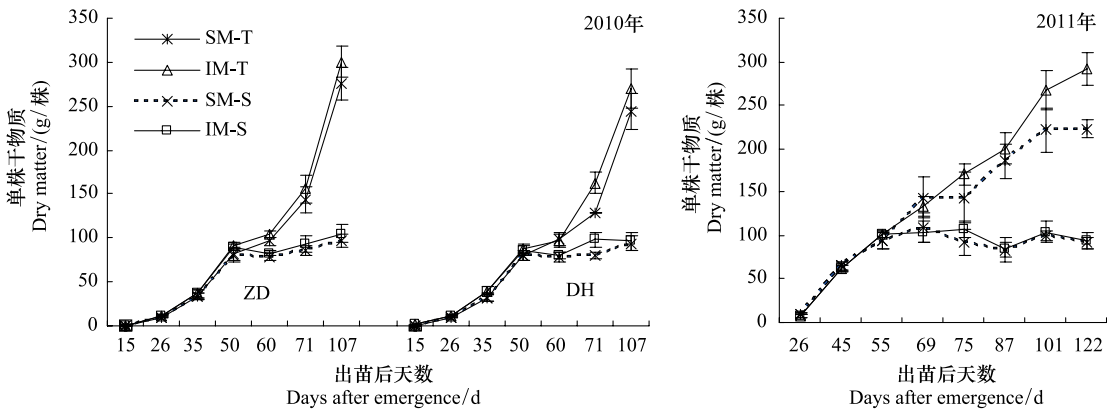


图2 间作玉米单株干物质积累
Fig.2 Dry matter accumulation of intercropped maize

SM-T、IM-T 分别代表单作玉米和间作玉米单株总干重,SM-S、IM-S 分别代表单作玉米和间作玉米单株茎叶干重;ZD 代表郑单 958,DH 代表登海 661

2.2.2 间作玉米灌浆速率

玉米穗重变化是衡量玉米灌浆速率指标之一。从图3可以看出,自玉米授粉之后,间作玉米单穗质量逐渐高于单作玉米,随灌浆进程,其差异越来越明显,授粉20 d后,间作玉米的单穗质量比单作玉米高出8.8%—32.8%,在收获期差异达到显著水平。这表明,间作玉米与单作玉米单株质量差异主要来源生殖器官即单穗籽粒质量的提高,其营养器官即茎叶质量差异不明显。

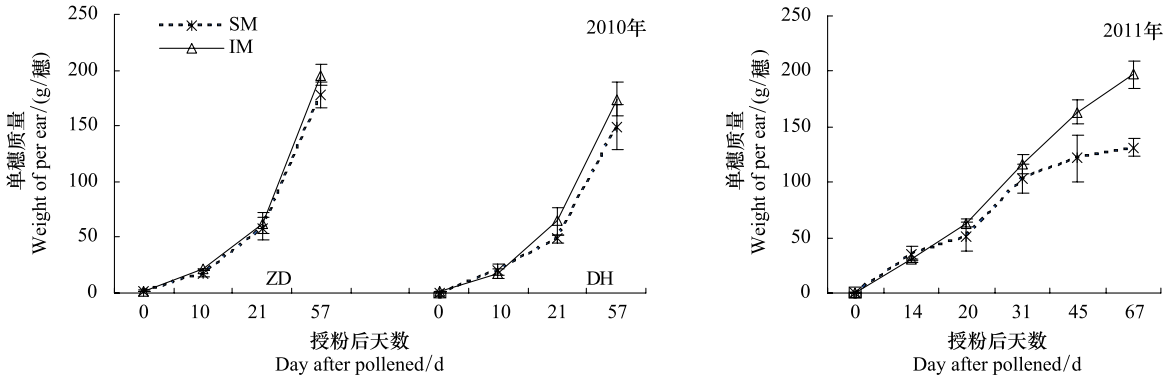


图3 间作玉米灌浆速率
Fig.3 Filling rate of intercropped maize

2.2.3 间作玉米产量与偏土地当量比

从表4可以看出,与单作相比,间作极显著提高了玉米产量,间作玉米的收获指数显著或极显著高于单作

表4 间作玉米产量与偏土地当量比

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield/(kg/hm ²)		收获指数 Harvesting index		偏土地当量比 PLER-M
		单作	间作	单作	间作	
		Sole-cropping	Inter-cropping	Sole-cropping	Inter-cropping	
2010	ZD	9879.2 B	20409.4 A	0.562 B	0.591 A	0.826
	DH	9451.5 B	19870.8 A	0.545 b	0.554 a	0.841
2011	ZD	7706.8 B	16979.8 A	0.526 B	0.592 A	0.881

同一指标同行数据后不同大、小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)

玉米,其偏土地当量比(PLER-M)比其所占土地面积比($F=0.4$)高出 106.6%—120.3%。这表明在玉米花生间作体系中,促进了光合物质向籽粒的运输、分配,表现出明显的间作产量优势。郑单 958 的 PLER-M 低于登海 661,但是,郑单 958 收获指数和产量均高于登海 661。

3 讨论

干物质是作物产量形成的基础。本研究发现,间作玉米单株干物质仅在生育后期明显高于单作玉米,并且其茎叶等营养器官干物质在各个生育时期均差异不大,但其生殖器官——单穗质量差异明显。这主要因为间套作有利于改善高位作物生育后期冠层光照条件^[6,13-14],提高了功能叶片净光合速率,促进籽粒灌浆和光合物质向籽粒运输与分配,因此,间作玉米具有高的收获指数,PLER-M 比间作玉米所占间作体系中面积比例($F=0.4$)高出 106.6%—120.3%,表现出明显的间作产量优势。这与多数研究具有一致的结论,与其他作物间作时,玉米具有明显间作产量优势^[3-7]。

叶绿素在植株体内负责光能的吸收、传递和转化,类胡萝卜素则行使光能捕获和光破坏防御两大功能,它们在光合作用中起着非常重要的作用,其含量及组成受光照条件的影响^[15]。本研究表明,在玉米花生间作体系中,间作改善玉米生育后期光照条件,不仅提高叶绿素含量,还改变了叶绿素构成,主要表现在叶绿素 a 和类胡萝卜素含量均显著增加,叶绿素 a/b 和类胡萝卜素/叶绿素的比值均显著增加。因此,在强光下,间作玉米通过提高叶绿素 a、类胡萝卜素含量来增加光反应中心,促进将吸收较多光能进行光反应,提高净光合速率。类胡萝卜素具有光能捕获和光破坏防御两大功能,其含量增加有助于提高光破坏防御能力,延缓衰老。

光环境影响着植物的光合特性^[16],在玉米花生间作体系中,间作玉米功能叶片接受的光照强度高于单作玉米,其净光合速率提高了 27.7%—49.8%,光饱和点、光饱和时最大光合速率、羧化效率显著提高,但是间作玉米功能叶片 PS II 的最大光化学量子效率和实际光化学量子效率没有提高,也就是说 PS II 反应中心的被用于光化学途径激发能占进入 PS II 总激发能的比例并没有提高。间作玉米光合效率的提高是由于呼吸速率提高为固定 CO₂ 提供能量,降低 CO₂ 补偿点,极显著提高了羧化效率、表观量子效率,提高了 CO₂ 的固定能力,这与朱文旭^[17]的研究具有相同结论,间作提高高位作物的羧化能力。这可能与光照条件影响叶绿体超微结构^[18]、光合酶活性和光合基因表达^[19]有关,但对间作条件下作物功能叶的叶绿体超微结构、光合酶活性和光合基因表达发生适应性变化还需进一步研究。

4 结论

在玉米花生间作体系中,间作玉米具有明显间作产量优势,是由于间作增强了玉米对强光利用能力,提高了玉米生育后期功能叶片的净光合速率,促进了光合物质向籽粒分配。间作玉米净光合速率的提高是通过羧化效率和表观量子效率的提高,促进 CO₂ 的固定实现的,而非是光能传递、转化能力的提高。

References:

- [1] Liu X H, Han X L, Zhao M Z, Kong Y Z. Studies on solar energy utilization, crop competition and yield analysis in double cropped wheat fields in the North China Plain. *Acta Agronomica Sinica*, 1981, 7(1): 63-72.
- [2] Seran T H, Brintha I. Review on maize based intercropping. *Journal of Agronomy*, 2010, 9(3): 135-145.
- [3] Hugar H Y, Palled Y B. Effect of intercropped vegetables on maize and associated weeds in maize-vegetable intercropping systems. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(2): 159-161.
- [4] Li L, Li S M, Sun J H, Zhou L L, Bao X G, Zhang H G, Zhang F S. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(27): 11192-11196.
- [5] Tsubo M, Walker S, Ogindo H O. A simulation model of cereal-legume intercropping system for semi-arid regions: II. Model application. *Field Crops Research*, 2005, 93(1): 23-33.
- [6] Jiao N Y, Ning T Y, Zhao T C, Wang Y, Shi Z Q, Hou L T, Fu G Z, Jiang X D, Li Z J. Characters of photosynthesis in intercropping system of maize and peanut. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(6): 917-923.
- [7] Jiao N Y, Zhao T C, Ning T Y, Hou L T, Fu G Z, Li Z J, Chen M C. Effects of maize-peanut intercropping on economic yield and light response of photosynthesis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 981-985.
- [8] Banik P, Sharma R C. Yield and resource utilization efficiency in baby corn-legume- intercropping system in the eastern plateau of India. *Journal of*

- Sustainable Agriculture, 2009, 33(4): 379-395.
- [9] Huang J Y, Li X P, Sun D L. Ecophysiological effects of multiple cropping of winter wheat-spring corn summer corn in Huanghuaihai Plain. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 51-56.
- [10] Zhang J H, Ma Y Y, Wang Z N, Qi J. Research on the improvement of photosynthesis indices of maize in the intercropping system. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(4): 104-106.
- [11] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1-15.
- [12] Li X, Feng W, Zeng X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [13] Wang Z X, Zhu J M, Wang J, Wang Y, Lu Y X, Zheng Q R. The response of photosynthetic characters and biomass allocation of *P. bournei* young trees to different light regimes. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3841-3848.
- [14] Sun X L, Xu Y F, Ma L Y, Zhou H. A review of acclimation of photosynthetic pigment composition in plant leaves to shade environment. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(8): 989-999.
- [15] Gao Y, Duan A W, Liu Z G, Shen X J. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1248-1254.
- [16] Gao Y, Duan A W, Liu Z G, Shen X J, Liu Z D, Chen J P. Effect of monoculture and intercropping on radiation use efficiency and yield of maize and soybean. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 7-12.
- [17] Zhu W X, Zhang H H, Xu N, Wang P, Wang S D, Mu S N, Liang M, Sun G Y. Effects of *Morua salba* and *Setaria italica* intercropping on their plant growth and diurnal variation of photosynthesis. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(7): 1817-1824.
- [18] Du C F, Li C H, Liu T X, Zhao Y L. Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6633-6640.
- [19] Bi H G, Wang M L, Jiang Z S, Dong X B, Ai X Z. Impacts of suboptimal temperature and low light intensity on the activities and gene expression of photosynthetic enzymes in cucumber seedling leaves. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2894-2900.

参考文献:

- [1] 刘巽浩, 韩湘玲, 赵明斋, 孔杨庄. 华北平原地区麦田两熟的光能利用、作物竞争与产量分析. 作物学报, 1981, 7(1): 63-72.
- [6] 焦念元, 宁堂原, 赵春, 王芸, 史忠强, 侯连涛, 付国占, 江晓东, 李增嘉. 玉米花生间作复合体系光合特性的研究. 作物学报, 2006, 32(6): 917-923.
- [7] 焦念元, 赵春, 宁堂原, 侯连涛, 付国占, 李增嘉, 陈明灿. 玉米-花生间作对作物产量和光合作用光响应的影响. 应用生态学报, 2008, 19(5): 981-985.
- [9] 黄进勇, 李新平, 孙敦立. 黄淮海平原冬小麦-春玉米-夏玉米复合种植模式生理生态效应研究. 应用生态学报, 2003, 14(1): 51-56.
- [10] 张建华, 马义勇, 王振南, 齐晶. 间作系统中玉米光合作用指标改善的研究. 玉米科学, 2006, 14(4): 104-106.
- [12] 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [13] 王振兴, 朱锦懋, 王健, 汪滢, 卢钰茜, 郑群瑞. 闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应. 生态学报, 2012, 32(12): 3841-3848.
- [14] 孙小玲, 许岳飞, 马鲁沂, 周禾. 植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应. 植物生态学报, 2010, 34(8): 989-999.
- [15] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 申孝军. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1248-1254.
- [16] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 申孝军, 刘战东, 陈金平. 单作和间作对玉米和大豆群体辐射利用率及产量的影响. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 7-12.
- [17] 朱文旭, 张会慧, 许楠, 王鹏, 王师丹, 牟世南, 梁明, 孙广玉. 间作对桑树和谷子生长和光合日变化的影响. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1817-1824.
- [18] 杜成凤, 李潮海, 刘天学, 赵亚丽. 遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响. 生态学报, 2011, 31(21): 6633-6640.
- [19] 毕焕改, 王美玲, 姜振升, 董绪兵, 艾希珍. 亚适温弱光对黄瓜幼苗光合酶活性和基因表达的影响. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2894-2900.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 14 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

A review of the researches on *Alectoris* partridge SONG Sen, LIU Naifa (4215)

Autecology & Fundamentals

Effects of precipitation and nitrogen addition on photosynthetically eco-physiological characteristics and biomass of four tree seedlings in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China YAN Hui, WU Qian, DING Jia, et al (4226)

Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species SHAO Yiruo, XU Jianxin, XUE Li, et al (4237)

Decomposition characteristics of maize roots derived from different nitrogen fertilization fields under laboratory soil incubation conditions CAI Miao, DONG Yanjie, LI Baijun, et al (4248)

The responses of leaf osmoregulation substance and protective enzyme activity of different peanut cultivars to non-sufficient irrigation ZHANG Zhimeng, SONG Wenwu, DING Hong, et al (4257)

Interannual variation of soil seed bank in *Picea schrenkiana* forest in the central part of the Tianshan Mountains LI Huadong, PAN Cunde, WANG Bing, et al (4266)

Physiological & ecological effects of companion-planted grow seedlings of two crops in the same hole LI Lingli, GUO Hongxia, HUANG Genghua, et al (4278)

Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat ZHOU Xiangyu, FENG Wenqiang, QIN Yusheng, et al (4289)

Effects of increased concentrations of gas CO₂ on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis* ZHUANG Minghao, CHEN Shuanglin, LI Yingchun, et al (4297)

Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice LIU Danqing, CHEN Xue, YANG Yazhou, et al (4306)

Effects of low-light stress on maize ear development and endogenous hormones content of two maize hybrids (*Zea mays* L.) with different shade-tolerance ZHOU Weixia, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (4315)

Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize JIAO Nianyuan, NING Tangyuan, YANG Mengke, et al (4324)

Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis HUANG Jingjing, JING Jialin, CAO Dechang, et al (4331)

Impact of vegetation interannual variability on evapotranspiration CHEN Hao, ZENG Xiaodong (4343)

Mating behavior of *Pachycrepoides vindemmiae* and the effects of male mating times on the production of females SUN Fang, CHEN Zhongzheng, DUAN Bisheng, et al (4354)

Component analysis and bioactivity determination of fecal extract of *Locusta migratoria tibetensis* (Chen) WANG Haijian, LI Yili, LI Qing, et al (4361)

Effects of different rice varieties on larval development, survival, adult reproduction, and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) LI Xia, XU Xiuxiu, HAN Lanzhi, et al (4370)

Population, Community and Ecosystem

Genetic structure of the overwintering Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) collections in Shandong of China based on *mtCOII* gene sequences LI Lili, YU Yi, GUO Dong, TAO Yunli, et al (4377)

The structure and diversity of insect community in Taihu Wetland HAN Zhengwei, MA Ling, CAO Chuanwang, et al (4387)

Annual variation pattern of phytoplankton community at the downstream of Xijiang River WANG Chao, LAI Zini, LI Xinhui, et al (4398)

Effect of species dispersal and environmental factors on species assemblages in grassland communities WANG Dan, WANG Xiao'an, GUO Hua, et al (4409)

- Cyanobacteria diversity in biological soil crusts from different erosion regions on the Loess Plateau: a preliminary result YANG Lina, ZHAO Yunge, MING Jiao, et al (4416)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern WANG Siyi, OU Minghao (4425)
- Fragmentation process of wetlands landscape in the middle reaches of the Heihe River and its driving forces analysis ZHAO Ruifeng, JIANG Penghui, ZHAO Haili, et al (4436)
- Analysis on grassland degradation in Qinghai Lake Basin during 2000—2010 LUO Chengfeng, XU Changjun, YOU Haoyan, et al (4450)
- Research on soil erosion based on Location-weighted landscape index (LWLI) in Guanchuanhe River basin, Dingxi, Gansu Province LI Haifang, WEI Wei, CHEN Jin, et al (4460)
- Effects of host density on parasitoids and hyper-parasitoids of cereal aphids in different agricultural landscapes GUAN Xiaoqing, LIU Junhe, ZHAO Zihua (4468)
- Effects of interactive CO₂ concentration and precipitation on growth characteristics of *Stipa breviflora* SHI Yaohui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (4478)
- Resource and Industrial Ecology**
- Eco-service efficiency assessment method of urban land use: a case study of Changzhou City, China YANG Wenrui, LI Feng, WANG Rusong, et al (4486)
- Changes in phosphorus consumption and its environmental loads from food by residents in Xiamen City WANG Huina, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (4495)
- Research Notes**
- Intercropping enhances the farmland ecosystem services SU Benying, CHEN Shengbin, LI Yonggeng, et al (4505)
- Assessment indicator system of eco-industry in mining area WANG Guangcheng, WANG Huanhuan, TAN Lingling (4515)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 骆世明

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 14 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 14 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元