

玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响

王雅梅, 许彦骁, 王亚露, 李静, 张海芳, 杨殿林, 赵建宁, 轩清霞

引用本文:

王雅梅, 许彦骁, 王亚露, 等. 玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2587-2595.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0348>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重金属Pb与抗生素对发光菌的联合毒性研究

李孟涵, 贺子琪, 苗家赫, 王风贺

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1925-1936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0103>

生物炭对矿区农田土壤及大豆安全种植的影响研究

蒋少军, 刘峻光, 刘玲玲, 刘悦弘, 黄仁龙, 舒月红

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 124-131 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0257>

玉米芯生物炭对大豆的生物学效应

张伟明, 管学超, 黄玉威, 孙大荃, 孟军, 陈温福

农业环境科学学报. 2015(2): 391-400 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.025>

DNA-SIP鉴定甘蔗/大豆间作土壤¹⁵N-DNA富集位置的氮循环功能基因qPCR方法

苟永刚, 余玲玲, 许霞, 王建武

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 140-147 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0343>

不同铜浓度下玉米间作豌豆对土壤铜的吸收效应研究

徐健程, 王晓维, 聂亚平, 罗杰, 杨潇一, 杨文亭

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1508-1514 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.011>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王雅梅, 许彦骁, 王亚露, 等. 玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2587–2595.

WANG Ya-mei, XU Yan-xiao, WANG Ya-lu, et al. Effects of maize-soybean intercropping with different widths on photosynthetic characteristics of soybean and population yield[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(11): 2587–2595.



开放科学 OSID

玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响

王雅梅¹, 许彦骁², 王亚露¹, 李静¹, 张海芳¹, 杨殿林¹, 赵建宁^{1*}, 轩清霞³

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 农业农村部产地环境污染防控重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 3. 山东省齐河县农业局, 山东 251100)

摘要:为探究不同农机作业宽幅条件下玉米-大豆间作对大豆光合特性及群体产量的影响,于2018—2019年采用大田试验,以单作玉米(SM)和单作大豆(SSB)为对照,在玉米-大豆2:1播幅(I₂₁)、2:2播幅(I₂₂)、2:3播幅(I₂₃)间作模式下,测定大豆光合指标、生理生长指标以及群体产量。2年的结果表明:各处理大豆冠层上方的光合有效辐射(PAR)日变化呈现先增后降的单峰曲线变化趋势,随着大豆宽幅的增加,各间作处理大豆冠层上方的光合有效辐射逐渐增加,但均小于单作。相较于单作,间作处理降低了大豆植株的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)以及地上部生物量,各指标均随着大豆播幅的增加而增加,其中I₂₁处理显著低于I₂₃和SSB处理,I₂₂处理与I₂₃处理之间差异不显著;增加了大豆植株的胞间CO₂浓度(Ci)、叶绿素含量以及株高,各指标均随着大豆播幅的增加而减小,其中I₂₁处理显著高于I₂₃和SSB处理。与单作相比,基于处理总面积的间作玉米产量显著增加,大豆产量显著降低,3种间作处理以籽粒产量为基础的LER(土地当量比)随着大豆播幅的增加而增加。研究表明,玉米-大豆2:2、2:3播幅种植具有间作生产优势。

关键词:宽幅间作;大豆;光合特性;产量

中图分类号:S513;S565.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)11-2587-09 doi:10.11654/jaes.2020-0348

Effects of maize-soybean intercropping with different widths on photosynthetic characteristics of soybean and population yield

WANG Ya-mei¹, XU Yan-xiao², WANG Ya-lu¹, LI Jing¹, ZHANG Hai-fang¹, YANG Dian-lin¹, ZHAO Jian-ning^{1*}, XUAN Qing-xia³

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Original Agro-Environmental Quality of Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-Environmental and Agro-product Safety, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. Qihe Agricultural Bureau in Shandong Province, Shandong 251100, China)

Abstract: We conducted field experiments in 2018 and 2019 to explore the effects of maize-soybean intercropping, laid out at different widths based on the agricultural machinery used, on the photosynthetic characteristics of soybean and population yield. We measured the photosynthetic and physiological growth indices of soybean and population yield, under maize-soybean intercropping modes in a 2:1 (I₂₁),

收稿日期:2020-03-27 录用日期:2020-06-01

作者简介:王雅梅(1995—),女,河北邢台人,硕士研究生,从事农业环境保护研究。E-mail:wangyamei0325@163.com

*通信作者:赵建宁 E-mail:zhaojn2008@163.com

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业农村部环境保护科研监测所);中国农业科学院创新工程项目;农业生态环境保护专项(2110402)

Project supported: The Central Public Research Institutes Basic Funds for Research and Development (Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs); The Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences; Special Project for Agricultural Ecological Environment Protection(2110402)

2:2(I_{22}), and 2:3(I_{23}) ratio, with fields of single maize(SM) and single soybean(SSB) as the controls. The results after two years showed that the diurnal variation in photosynthetic active radiation(PAR) above the canopy of the soybean showed a single-peak curve trend that increased first and then decreased. As the ratio of the soybean planting increased, the PAR above the canopy of intercropping soybean increased gradually, however, all their values were smaller than that of the monoculture. The net photosynthetic rate(Pn), stomatal conductance(G_s), transpiration rate(Tr) and aboveground biomass of soybean decreased in the intercropping systems compared with the monoculture. All indices increased as the ratio of soybean planting increased, among the treatments, the values for I_{21} were significantly lower than those for I_{23} and SSB, and there was no significant difference between I_{22} and I_{23} . The intercellular CO_2 concentration(C_i), chlorophyll content and height of soybean plants increased in the intercropping systems compared with the monoculture. All the indices decreased with the increase in the ratio of soybean planting, with the values for I_{21} being significantly higher than those for I_{23} and SSB. The maize yield increased and soybean yield decreased, both significantly, in the intercropping systems—compared with the monocultures—based on total treatment area. The LER(land equivalent ratio) based on grain yield of the three intercropping treatments increased with the increase in the ratio of soybean planting. The maize-soybean planting ratios of 2:2 and 2:3 demonstrated the advantages of intercropped production.

Keywords: wide intercropping; soybean; photosynthetic characteristics; yield

华北地区小麦、玉米长期大面积的集约化单一种植,在提高粮食作物产量的同时,伴随着农药、化肥等的高强度投入,破坏了生物多样性和生态平衡,引起了土壤质量下降、温室气体排放增加、地下水污染等一系列环境问题^[1-2]。面对资源、粮食、环境的严峻挑战,种植业结构调整成为现代农业发展的必然趋势^[3]。而农作物间作作为一种能够提高农业资源利用效率和土壤质量的重要手段,对农业种植结构调整以及农业可持续发展有着重要意义^[4]。

间作是一种在同一块土地上成行或成带状间隔种植两种或两种以上生长周期相同或相近作物的种植方式^[5]。与单作相比,间作最明显的特点是能够集约利用光、热、肥、水等自然资源,提高单位土地面积的生产力,提升农田生态系统稳定性,具有高效、高产优势^[6],其中玉米-大豆带状间作种植是我国大部分地区采用的比较典型的作物组配类型^[7]。然而,难以实现农事操作的机械化成为当前间作模式大规模生产应用的关键性限制因素^[8]。

目前,研究人员已对玉米-大豆间作展开了大量的研究,结果表明,大豆作为喜光作物,光合产物积累占其干物质的91.31%^[9-10]。光环境影响着植物的光合特性,玉米-大豆间作系统中,高位作物玉米对低位作物大豆的遮荫作用,使得间作大豆处于光能截获的劣势,降低了间作大豆的光合速率以及光能利用率,制约了大豆的产量优势^[11-13]。但是,这些研究大部分基于玉米-大豆行比为1:3、2:2、2:3、2:4等的窄条间作研究,并不适用于常规农业机械大规模作业的宽幅间作模式。

此外,有研究人员对间作机械化种植也展开了相

应的研究。四川农业大学在国内外率先开展了玉米-大豆带状复合种植全程机械化研究,山东省农科院和山东棉花研究中心也分别自2010年和2014年起开始推进花生-玉米宽幅间作高效生态种植技术和棉花-玉米宽幅间作栽培技术研究^[14-15]。探索出适应小型特种农业机械化生产需求的技术模式,为作物宽幅间作提供了技术指导,但是这些研究都是基于项目本身研制的特种配套设备展开,现有的常规农机具并不适用。

因此,本研究基于现有常规农业机械,设计开展不同农机作业宽幅条件下的玉米-大豆间作研究,探究玉米-大豆不同宽幅间作条件对大豆光合特性和玉米、大豆产量的影响,以明确不同农机作业宽幅下大豆光合特性、生理生长特性以及群体产量的变化特征,旨在为区域种植业结构调整以及提高作物的资源利用率提供理论依据及参考。

1 材料与方法

1.1 试验地与材料

试验于2018年和2019年在山东省德州市齐河县焦庙镇宋坊农场(36°38′36″N, 116°34′39″E)进行。试验区属于暖温带半湿润季风气候区,年平均温度13.9℃,降水量604.1 mm,年日照时数2 636 h,无霜期216 d,是华北典型的小麦玉米轮作区。试验地土壤基本理化性质:有机质20.51 g·kg⁻¹,全氮1.30 g·kg⁻¹,全磷0.86 g·kg⁻¹,pH 7.99,含水率19.22%,速效磷26.09 mg·kg⁻¹,铵态氮2.03 mg·kg⁻¹,硝态氮35.08 mg·kg⁻¹。2018年供试玉米品种为“登海605”,大豆为“早熟一号”,2019年供试玉米品种为“登海605”,大豆为

“荷豆12”。

1.2 试验设计

试验共设置5个处理,分别为单作大豆(SSB)、单作玉米(SM)、玉米-大豆2:1播幅种植(I_{21})、玉米-大豆2:2播幅种植(I_{22})、玉米-大豆2:3播幅种植(I_{23}),各处理3次重复(玉米播种机一个播幅为4行玉米,大豆播种机一个播幅为5行大豆)。其中,单作小区长50 m、宽20 m,单作大豆行距40 cm、株距16 cm,单作玉米行距60 cm、株距25 cm。间作小区长60 m, I_{21} 、 I_{22} 和 I_{23} 处理小区宽分别为6.8、8.8 m和10.8 m,间作大豆、玉米株行距与单作相同,玉米与大豆行间距60 cm。

试验地前茬作物均为小麦,并统一施肥。播种日期分别为2018年6月14日和2019年6月15日,玉米和大豆同时播种,2018年大豆和玉米的收获日期分别为9月23日和9月28日,2019年大豆和玉米收获日期分别为10月4日和10月5日。作物生育期间的农事管理措施均按当地常规生产进行,其中各处理玉米播种的同时施用底肥控释掺混肥料(N、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为28%、6%、6%) $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在大喇叭口期追施尿素(N含量为46%) $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各处理的大豆不施肥。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 光合有效辐射的测定

将球状光量子传感器(3668I,美国Spectrum公司)固定在大豆植株上方10 cm处进行测定(图1)。SSB处理在每个小区内选取中间行的大豆进行测定; I_{21} 处理测定3个点,分别为第1、3、5行的大豆; I_{22} 处理在每个小区内测定5个点,分别为第1、3、5、8、10行的大豆; I_{23} 处理测定7个点,分别为第1、3、5、8、11、13、15行的大豆;每个处理2次重复。2018年和2019年均于8月及9月(玉米的大喇叭口期至成熟期,大豆的开花期至成熟期)连续测定,每日5:00—20:00,每隔1 h自动测定一次。

1.3.2 光合参数的测定

每个处理选取与光合有效辐射(PAR)测定的相同行测定净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)等光合参数,每个小区在相同行内随机选取2株大豆,均在晴天的9:00—11:00使用LI-6400便携式光合仪测定选定植株的主茎倒三叶的中间叶片的光合参数。2018年和2019年均于播种后的第8、10、12周进行测定,每年共计测定3次。

测定光合参数的同时,每个小区在光合有效辐射测定行随机选取6株大豆植株,使用叶绿素仪测定非

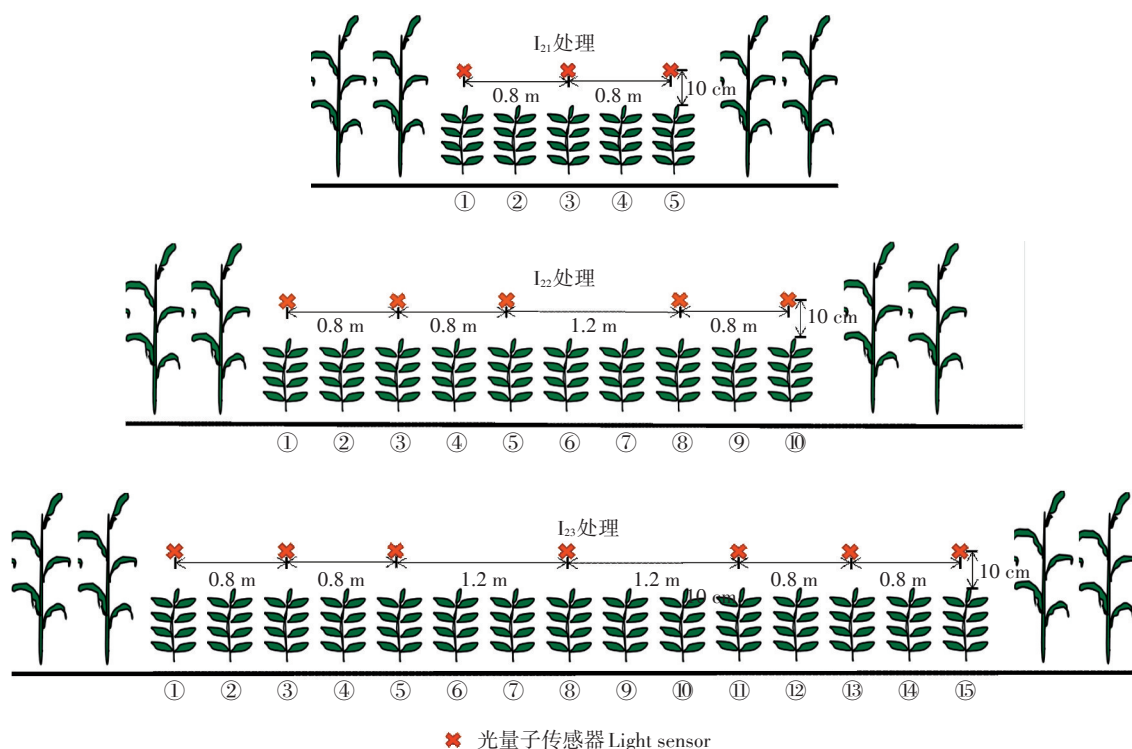


图1 光量子传感器分布示意图

Figure 1 Schematic diagram of light sensor distribution

离体叶片(主茎倒三叶的中间叶片)叶绿素相对含量(SPAD),选取方式及测定时间与光合参数相同。

1.3.3 株高及植株地上部生物量的测定

选取测定光合参数和叶绿素含量的同一植株,测定植株株高,并且在测定完株高后采集地上部植株带回实验室,105℃杀青30 min后,80℃烘干至恒质量,并测定植株干质量。

1.3.4 产量及土地当量比的测定

大豆收获时在每个小区选取与光合有效辐射测定相同行,每行随机选取连续13株大豆植株进行收获,每个小区2次重复,脱粒测定产量;玉米收获时于每个处理的第1、3、5行各选取20穗玉米,设定4次重复,脱粒测定产量。间作处理中玉米和大豆产量是基于间作总占地面积的产量,间作玉米和大豆净面积产量是基于间作带中各自实际占地面积的产量。

土地当量比(LER)的计算公式:

$$LER=LER_{SB}+LER_M=(Y_{SBI}/Y_{SBS})+(Y_{MI}/Y_{MS})$$

式中:LER_{SB}、LER_M分别表示间作中大豆、玉米的相对土地当量比;Y_{SBS}和Y_{MS}分别为单作条件下大豆和玉米的籽粒产量,kg·hm⁻²;Y_{SBI}和Y_{MI}分别为间作条件下大

豆和玉米的净面积籽粒产量,kg·hm⁻²。其中,LER>1表明间作有优势,LER<1表明间作劣势。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2016整理试验数据,SPSS 17.0进行数据分析,各个指标均使用单因素方差分析法(One-way ANOVA),采用LSD法进行处理间显著分析,P<0.05表示差异显著,使用OriginPro 9.1绘图。

2 结果与分析

2.1 大豆冠层上方光合有效辐射的变化

各处理大豆冠层上方光合有效辐射的日变化呈现先增后降的单峰曲线变化趋势(图2)。上午随着太阳高度角的增加,光合有效辐射强度增大,各处理均在中午11:00—13:00达到光合有效辐射最大值,此后逐渐减小,9月各处理的光合有效辐射明显低于8月。各处理边行到中间行大豆接收到的光合有效辐射逐渐增加。

总体来说,I₂₁处理各个时间段的光合有效辐射明显低于其他处理,这是由于I₂₁处理只有5行大豆,其受到玉米的遮蔽作用更加明显。I₂₂和I₂₃处理的光合

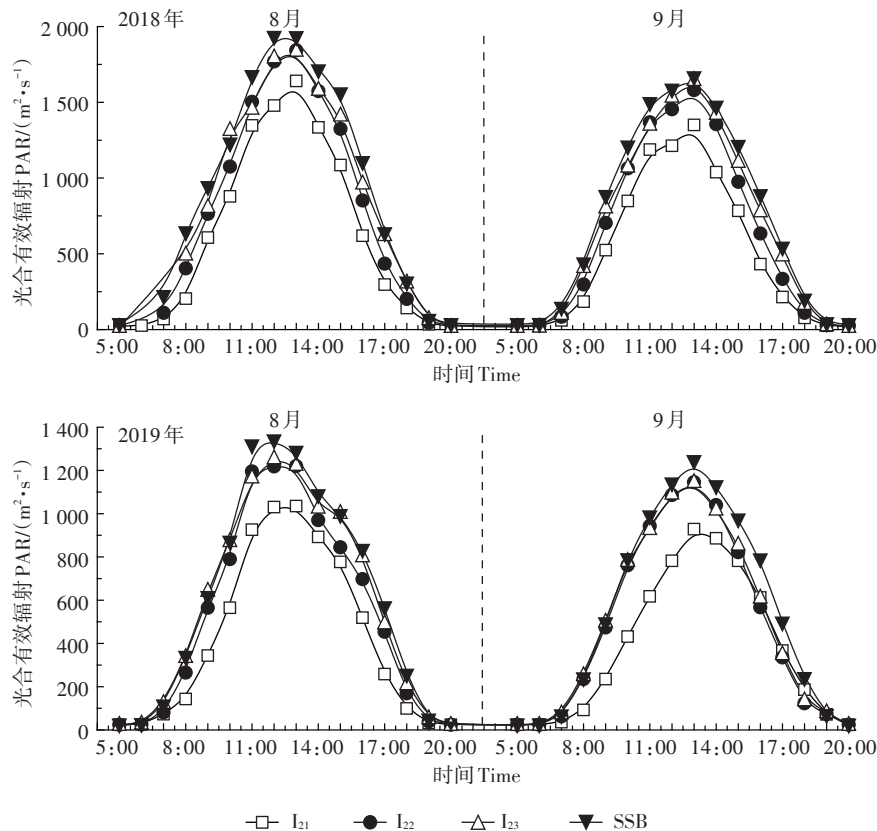


图2 2018年和2019年各处理大豆冠层上方的光合有效辐射的变化

Figure 2 Changes of PAR above soybean canopy in 2018 and 2019

有效辐射变化曲线基本没有差异,均略低于SSB处理,说明 I_{22} 和 I_{23} 处理的间作玉米对大豆的遮蔽作用远小于 I_{21} 处理。

2.2 大豆功能叶片叶绿素相对含量的变化

由两年的不同处理下大豆功能叶片叶绿素相对含量变化可以看出(图3),随着测定时间的推进,2018年各处理大豆功能叶片的叶绿素相对含量呈下降趋势,2019年呈先增加后下降趋势。同一时期,各处理的大豆功能叶片的叶绿素相对含量表现为 $I_{21}>I_{22}>I_{23}>SSB$,并且 I_{21} 处理显著高于其他3个处理, I_{22} 、 I_{23} 处理差异不显著,除2018年第10周外, I_{22} 、 I_{23} 处理与SSB处理均差异不显著。

2.3 大豆光合特性的变化

在3个测定时间内,随着植株生育时期的推进,各处理大豆植株的净光合速率、气孔导度逐渐降低(表1)。随着大豆宽幅的增加,植株的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率逐渐增加,但均低于单作处理,其

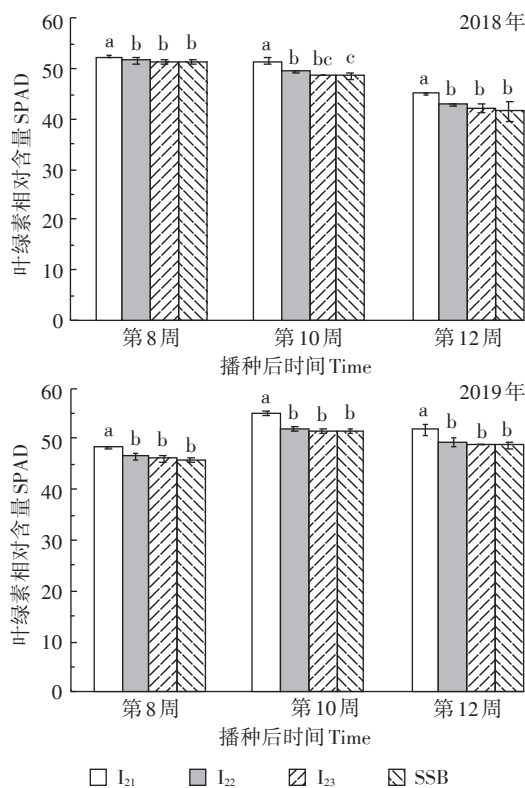
中 I_{21} 处理显著低于 I_{23} 和SSB处理, I_{22} 、 I_{23} 处理之间差异不显著,间作处理中, I_{23} 处理参数值最高;植株的胞间 CO_2 浓度逐渐降低,与净光合速率、气孔导度、蒸腾速率等相反,其中 I_{21} 处理显著高于 I_{23} 和SSB处理, I_{22} 、 I_{23} 处理之间差异不显著。

2.4 间作对大豆株高的影响

随着生育期的推进,大豆植株株高逐渐增加,在各测定时期,大豆株高表现为 $I_{21}>I_{22}>I_{23}>SSB$,其中 I_{21} 处理的大豆株高显著高于其他3个处理(图4), I_{23} 处理的大豆株高高于SSB处理,但差异不显著, I_{22} 处理的大豆株高高于 I_{23} 处理和SSB处理,但仅在第8周差异显著。另外,各间作处理大豆边行株高均显著高于SSB处理,且呈现由边行到中间行大豆株高逐渐降低的趋势,说明玉米-大豆宽幅间作主要影响与玉米靠近的大豆行,随着大豆播幅的增加,玉米对大豆株高的影响逐渐减少。

2.5 大豆植株地上部生物量的变化

随着大豆生育期的推进,各处理大豆植株地上部生物量逐渐增大(表2)。同一时期,各处理大豆植株地上部生物量表现为 $I_{21}<I_{22}<I_{23}<SSB$,其中 I_{21} 处理显著



不同小写字母表示同一年份、同一时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same period in the same year ($P<0.05$). The same below

图3 2018年和2019年各处理大豆功能叶片叶绿素相对含量的变化

Figure 3 Changes of SPAD of soybean functional leaves in 2018 and 2019

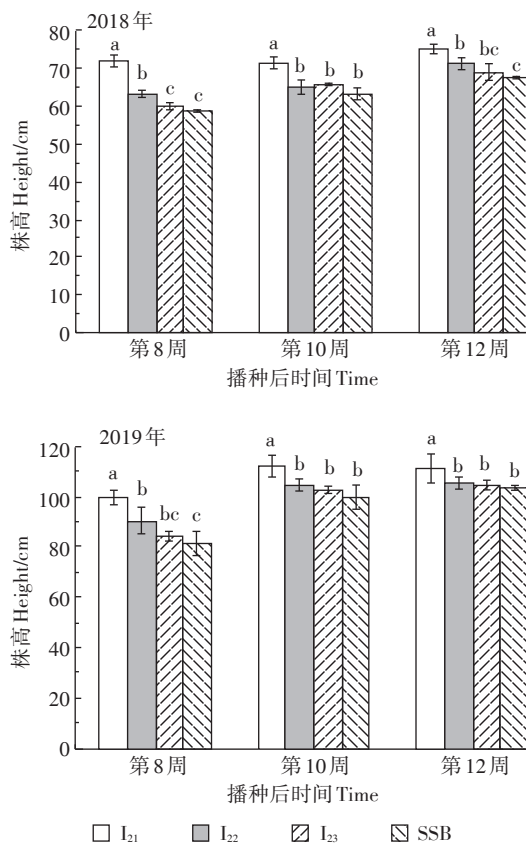


图4 2018年和2019年各处理大豆株高的变化

Figure 4 Plant height changes of soybean in 2018 and 2019

表1 2018年和2019年不同处理大豆功能叶片的光合特性

Table 1 Photosynthetic characteristics of soybean functional leaves under different treatments in 2018 and 2019

年份 Year	播种后时间 Time	处理 Treatments	净光合速率 Pn/ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 Gs/ ($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 Ci/ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr/ ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
2018	第8周	I ₂₁	34.18±1.05c	1.01±0.06c	267.64±6.82a	7.61±1.11c
		I ₂₂	35.75±1.21b	1.07±0.08bc	252.95±8.59b	8.05±0.50bc
		I ₂₃	36.84±0.84ab	1.10±0.02ab	248.76±15.36bc	8.94±0.26b
		SSB	37.25±0.87a	1.16±0.04a	237.92±6.96c	10.17±0.3a
	第10周	I ₂₁	24.83±0.39c	0.82±0.06c	320.22±1.19a	8.7±0.16b
		I ₂₂	26.45±1.05bc	1.01±0.05b	315.49±12.07ab	9.07±0.07ab
		I ₂₃	27.11±1.02ab	1.06±0.06ab	307.49±8.87ab	9.14±0.45ab
		SSB	28.39±1.17a	1.12±0.06a	293.66±22.77b	9.31±0.21a
	第12周	I ₂₁	15.45±1.63b	0.62±0.13b	334.19±12.20a	6.29±0.71b
		I ₂₂	16.25±1.22ab	0.71±0.10ab	329.69±9.41ab	6.72±0.3ab
		I ₂₃	17.01±1.27ab	0.74±0.04ab	325.53±14.92ab	6.87±0.42ab
		SSB	17.78±1.19a	0.81±0.10a	318.19±3.9b	7.03±0.15a
2019	第8周	I ₂₁	34.57±1.51c	1.16±0.07c	277.64±8.11a	7.77±0.65c
		I ₂₂	36.19±0.94bc	1.23±0.05b	261.69±5.82b	9.29±0.26b
		I ₂₃	37.76±1.50b	1.27±0.04b	258.73±2.82b	9.65±0.39ab
		SSB	39.88±2.41a	1.37±0.04a	244.65±6.08c	10.24±0.28a
	第10周	I ₂₁	30.57±1.51c	0.73±0.09c	232.51±8.45a	7.34±1.07b
		I ₂₂	32.91±0.96b	0.88±0.14bc	224.32±3.32ab	8.81±0.13a
		I ₂₃	33.77±1.16b	0.90±0.03b	219.71±7.96bc	9.07±0.04a
		SSB	36.40±1.39a	1.08±0.05a	208.56±9.97c	9.36±0.18a
	第12周	I ₂₁	24.90±2.27b	0.56±0.04b	290.84±9.03a	5.59±0.31c
		I ₂₂	27.35±1.26a	0.64±0.08ab	274.58±14.722b	5.66±0.22bc
		I ₂₃	28.2±1.11a	0.67±0.09ab	262.05±9.92bc	6.14±0.23ab
		SSB	29.64±1.45a	0.73±0.11a	253.15±4.64c	6.20±0.66a

注:同列不同小写字母表示同一年份、同一时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant difference among different treatments in the same period in the same year at $P<0.05$. The same below.

表2 2018年和2019年不同处理大豆植株的地上部生物量(g)

Table 2 Aboveground biomass of soybean plants under different treatments in 2018 and 2019(g)

年份 Year	处理 Treatments	播种后时间 Time		
		第8周	第10周	第12周
2018	I ₂₁	26.98±3.44c	37.33±0.96c	41.60±0.79c
	I ₂₂	33.56±0.45b	43.77±1.41b	49.77±3.54b
	I ₂₃	38.37±0.81ab	46.79±1.62b	51.08±6.52b
	SSB	40.06±5.47a	55.89±4.14a	65.08±2.14a
2019	I ₂₁	21.62±0.60c	33.32±1.07c	45.34±1.13c
	I ₂₂	23.84±1.46bc	37.57±2.11b	50.26±3.58bc
	I ₂₃	24.77±1.83b	38.88±2.30b	51.47±3.16b
	SSB	33.03±1.04a	44.58±3.02a	66.03±2.33a

低于 I₂₃ 和 SSB 处理, I₂₂ 与 I₂₃ 处理间差异不显著, 但均显著低于 SSB 处理。

2.6 产量及土地当量比的变化

除了2019年 I₂₁ 处理外, 各间作处理的百粒质量均显著低于单作处理(表3)。I₂₂ 和 I₂₃ 处理的玉米产量均显著高于 SM 处理, 且随着大豆宽幅的增加, 玉米产量也相应增加。大豆的产量均表现为间作处理显著低于 SSB 处理, 而且也随着大豆宽幅的增加而增加。2018年 I₂₁、I₂₂、I₂₃ 处理的玉米产量较 SM 处理分别增加了4%、17%、18%, 大豆产量较 SSB 处理分别减少了25%、4%、1%; 2019年 I₂₁、I₂₂、I₂₃ 处理的玉米产量较 SM 处理分别增加了2%、11%、14%, 大豆产量较 SSB 处理分别减少了28%、9%、5%。I₂₁ 处理以籽粒产量为基础的 LER 小于1, I₂₂、I₂₃ 处理以籽粒产量为基础的 LER 均大于1(表3), 说明玉米-大豆2:2、2:3种植具有间作生产优势, 其中2018年试验的 LER 在0.95~1.08 范围内, 2019年在0.93~1.03 范围内, 并且以玉

米-大豆2:3间作系统的LER最大。

3 讨论

3.1 不同宽幅玉米-大豆间作对大豆冠层上方光合有效辐射的影响

太阳辐射是植物生长发育以及作物产量形成的重要因子,其在冠层内的空间分布会影响间作作物的产量形成^[13]。本研究发现各处理大豆冠层上方的光合有效辐射日变化呈现先增后减的单峰曲线变化趋势,最大值出现在11:00—13:00时间段内,这与吕书财等^[16]对大豆冠层光合有效辐射的研究结果一致。随着大豆播幅的增加,光合有效辐射也增加,各间作处理的光合有效辐射均低于单作。这是由于大豆作为低位作物,受到了作为高位作物玉米的遮蔽作用,随着大豆宽幅的增大,遮蔽作用减弱,增加的空间会使更多的光从玉米带间投射到大豆冠层上方,这与刘鑫^[17]的研究结果一致。

3.2 不同宽幅玉米-大豆间作对大豆叶绿素及光合特性的影响

叶绿素作为植物体内的光合色素,负责光合作用中光能的吸收、转化和传递,在光合作用过程中起着非常关键的作用^[18]。本研究结果显示,大豆植株的叶绿素含量随着播幅的增加而降低,其中I₂₁处理植株的叶绿素含量显著高于其他3个处理,I₂₂、I₂₃处理与SSB处理之间差异不显著,这与崔亮等^[19]不同套作组合的大豆叶片叶绿素含量随着遮荫程度的增加而增加的研究结果一致。这是由于随着弱光胁迫的加剧,叶绿体的光合羧化活性增高,有利于提高植

物的叶绿素含量,增强其对光能的捕获能力,提高植物对有限的光能的利用效率,对光强的降低产生一定的补偿作用。

光合作用影响植物的物质代谢和能量转化,是光环境对植物的直接作用^[12]。已有研究表明,群体光分布造成光合作用的差异远大于其他因素造成的差异,是导致作物光合特性变化的主要原因^[19]。本试验发现,随着大豆播幅的增加,间作大豆植株的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率逐渐增加,但均低于单作处理,而植株的胞间CO₂浓度逐渐降低,但均高于单作,这与苏本营等^[20]和范元芳等^[12]的研究结果一致。这是因为同单作相比,大豆作为间作系统中的低位作物受到玉米的遮蔽作用,冠层光环境变差,不利于大豆对光能的截获,使得间作大豆植株的光合速率随着光强减弱而下降,这可能是光合电子传递速度随着光合有效辐射减少变慢导致的,而幅宽的增加会减弱玉米对大豆光环境产生的不利影响。

3.3 不同宽幅玉米-大豆间作对大豆株高及地上部生物量的影响

在间作系统中,至少一种作物的生长或发育会由于种间竞争而受到抑制,高位作物通常会对低位作物的营养生长造成抑制^[6]。本研究发现I₂₁、I₂₂、I₂₃3个间作处理大豆的株高均高于SSB处理,这是由于作物的形态具有可塑性,对自然环境的改变会在其形态上产生相应的响应机制^[21]。玉米-大豆间作系统中,大豆作为矮秆作物受到高秆玉米的遮蔽作用较大,从而会对光照有更强的竞争作用,促使植株伸长生长以脱离隐蔽逆境,这与刘洋等^[22]及范元芳等^[12]的研究结果一

表3 2018年和2019年单作与间作条件下的产量和土地当量比

Table 3 Yield and LER under monoculture and intercropping in 2018 and 2019

年份 Year	处理 Treatments	百粒质量100-seeds weight/g		产量Yield/(kg·hm ⁻²)		玉米偏土地 当量比LER _M	大豆偏土地 当量比LER _{Sb}	土地当量比 LER
		玉米	大豆	玉米	大豆			
2018	SM	39.19±0.07a	—	15 145.1b	—	—	—	—
	SSB	—	21.91±0.22a	—	3 562.8a	—	—	—
	I ₂₁	36.46±0.36c	20.37±1.04b	15 793.2ab	2 660.6b	0.72	0.23	0.95
	I ₂₂	36.16±0.62c	19.93±0.46b	17 654.3a	3 431.0b	0.62	0.45	1.07
	I ₂₃	37.86±0.69b	19.49±0.58b	17 876.6a	3 539.8b	0.52	0.56	1.08
2019	SM	37.82±1.53a	—	15 459.9b	—	—	—	—
	SSB	—	28.31±0.21a	—	3 873.1a	—	—	—
	I ₂₁	38.65±0.76a	27.46±0.69b	15 796.7b	2 792.6c	0.72	0.21	0.93
	I ₂₂	36.02±0.83b	26.77±0.58b	17 123.1a	3 514.4b	0.60	0.41	1.02
	I ₂₃	35.15±1.12b	26.90±0.63b	17 612.7a	3 666.1b	0.51	0.53	1.03

注:间作处理玉米、大豆的产量是基于间作总占地面积的产量。

Note: The yield of corn and soybean in intercropping is based on the total area of intercropping.

致。本研究还发现,随着大豆播幅的增加,遮蔽作用也相应减弱,大豆株高逐渐降低,这是由于大豆受到的遮荫程度越大,干物质向茎中的分配比例越大,主要表现为茎节伸长^[23]。此外,间作荫蔽光环境下,大豆茎秆内维持一定水平的赤霉素 GA₄ 含量,影响到了细胞伸长生长,进而引起节间伸长,这也可能是间作对大豆株高产生影响的原因^[24]。

相对充足的光照条件是保证作物干物质积累的基础,大豆干物质的生产特性是光合产物在植株不同器官中积累与分配的结果,间作大豆截获的光照多是侧面光,受光环境发生明显改变,而光环境的改变直接影响大豆光合产物的合成与分配^[25]。本试验研究表明,各间作处理大豆植株地上部生物量随着大豆播幅的增加而增大,而且均显著低于单作处理,这是由于同单作种植相比,间作玉米的遮荫作用制约了间作大豆的生长,大豆植株的物质积累和物质转运过程受到不利影响,转换率也相应降低,最终导致植株生物量的降低,而幅宽的增加能减少玉米对大豆的荫蔽程度,提高大豆田间透光率和净光合速率,从而保证干物质的积累^[26-27]。

此外,玉米、大豆的施肥差异也会对间作大豆的生长发育产生一定的影响,大豆株高以及地上部生物量也可能由于间作大豆从玉米处获得一定的养分而产生变化。

3.4 不同宽幅玉米-大豆间作对群体产量的影响

作物产量干物质中的 90%~95% 来源于光合作用,而光环境的改变会影响间作群体的光合作用,进而影响作物的籽粒产量^[28]。本研究结果表明,玉米-大豆间作显著增加了玉米的产量,而大豆产量由于间作系统中玉米的遮蔽作用而显著降低,这与许多研究结果一致^[12,16,19]。这是由于高秆作物玉米与矮秆作物大豆间作体系内,玉米是优势作物,能有效利用地上空间优势,促进其生长发育及干物质积累,进而增加籽粒产量。而间作大豆为劣势作物,由于玉米的遮蔽作用,其生育后期植株的光合作用受到影响,导致光合物质积累减少,从而影响到大豆的产量。另外,间作系统中大豆冠层光环境恶劣,可能会导致大豆植株授粉受精不良,进而使得大豆产量降低。本研究发现,玉米和大豆的产量均随着大豆播幅的增加而增加,可能是由于幅宽增加后,玉米、大豆冠层通风透光环境变好,叶片的光合作用增强,使得植株干物质的积累增加,最终导致籽粒产量的增加^[12,29]。试验结果还表明,3种宽幅间作处理以籽粒产量为基础的 LER

表现为 $LER(I_{21}) < 1 < LER(I_{22}) < LER(I_{23})$, 说明玉米-大豆 2:2、2:3 种植具有间作生产优势,即此两种间作模式群体较作物单作能够提高农田生产能力。

4 结论

随着大豆宽幅的增加,间作处理中大豆植株的光合有效辐射、净光合速率及地上部生物量逐渐增加,且均低于单作,而株高及叶绿素含量则逐渐降低,且均高于单作。与单作相比,间作均显著提高了玉米产量,并显著降低了大豆产量,其中玉米-大豆 2:2、2:3 播幅种植具有间作生产优势。

参考文献:

- [1] Liu X, Zhang X, Wang Y, et al. Soil degradation: A problem threatening the sustainable development of agriculture in northeast China[J]. *Plant Soil Environ*, 2010, 56(2): 87-97.
- [2] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [3] 刘静, 连煜阳. 种植业结构调整对化肥施用量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2544-2552.
LIU Jing, LIAN Yu-yang. Effect of planting structure adjustment on chemical fertilizer applications in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2544-2552.
- [4] Du J B, Han T F, Gai J Y, et al. Maize-soybean strip intercropping: Achieved a balance between high productivity and sustainability[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 747-754.
- [5] Ofori F, Stern W R. Cereal-legume intercropping systems[J]. *Advances in Agronomy*, 1987, 41: 41-90.
- [6] 高莹. 小麦/玉米间作系统生产力与养分光热资源利用研究[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2015.
GAO Ying. Productivity and resource use of nutrient, light and heat in wheat and maize intercropping system[D]. Yangling: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2015.
- [7] Liu X, Rahman T, Song C, et al. Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent ratio in maize-soybean strip intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2018, 224: 91-101.
- [8] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403-415.
LI Long. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 403-415.
- [9] 黄亚萍, 海江波, 罗宏博, 等. 不同种植模式及追肥水平对春玉米光合特性和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(9): 43-50.
HUANG Ya-ping, HAI Jiang-bo, LUO Hong-bo, et al. Effects of different planting patterns and top dressing levels on photosynthetic characteristics and yield of spring maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(9): 43-50.
- [10] 董钻. 大豆产量生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- DONG Zuan. Physiology of soybean yield[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [11] Liu X, Rahman T, Song C, et al. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2017, 200: 38-46.
- [12] 范元芳, 刘沁林, 王锐, 等. 玉米-大豆带状间作对大豆生长、光合荧光特性及产量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(5): 972-978.
- FAN Yuan-fang, LIU Qin-lin, WANG Rui, et al. Effects of shading on growth, photosynthetic fluorescence characteristics and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(5): 972-978.
- [13] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1248-1254.
- GAO Yang, DUAN Ai-wang, LIU Zu-gui, et al. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1248-1254.
- [14] 杨文钰, 杨峰. 发展玉豆带状复合种植, 保障国家粮食安全[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3748-3750.
- YANG Wen-yu, YANG Feng. Developing maize-soybean strip intercropping for demand security of national food[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3748-3750.
- [15] 孟庆华, 赵逢涛, 王凤梅, 等. 棉花玉米宽幅间作高产高效栽培技术[J]. 耕作与栽培, 2017(6): 72-74.
- MENG Qing-hua, ZHAO Feng-tao, WANG Feng-mei, et al. The high-yield and efficiency cultivation techniques of cotton in wide space intercropping with maize[J]. *Tillage and Cultivation*, 2017(6): 72-74.
- [16] 吕书财, 徐瑶, 陈国兴, 等. 大豆冠层光合有效辐射、叶面积指数及产量对种植密度的响应[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 68-72.
- LÜ Shu-cai, XU Yao, CHEN Guo-xing, et al. Effects of plant densities on canopy photosynthetic radiation, leaf area index and yield of soybean[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(18): 68-72.
- [17] 刘鑫. 玉豆带状间作系统光能分布、截获与利用研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.
- LIU Xin. Study of light distribution, interception and use efficiency in maize-soybean strip intercropping system[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [18] 焦念元, 杨萌珂, 宁堂原, 等. 玉米花生间作和磷肥对间作花生光合特性及产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(11): 1010-1017.
- JIAO Nian-yuan, YANG Meng-ke, NING Tang-yuan, et al. Effects of maize-peanut intercropping and phosphate fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of intercropped peanut plants[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(11): 1010-1017.
- [19] 崔亮, 苏本营, 杨峰, 等. 不同玉米-大豆带状套作组合条件下光合有效辐射强度分布特征对大豆光合特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1489-1501.
- CUI Liang, SU Ben-ying, YANG Feng, et al. Effects of photo-synthetically active radiation on photosynthetic characteristics and yield of soybean in different maize/soybean relay strip intercropping systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(8): 1489-1501.
- [20] 苏本营, 宋艳霞, 陈圣宾, 等. 大豆幼苗对套作玉米遮荫环境的光合生理生态响应[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3298-3308.
- SU Ben-ying, SONG Yan-xia, CHEN Sheng-bin, et al. Photosynthetic responses of soybean (*Glycine max*) seedlings to shading caused by maize in an intercropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(10): 3298-3308.
- [21] Gong W Z, Jiang C D, Wu Y S, et al. Tolerance vs. avoidance: Two strategies of soybean (*Glycine max*) seedlings in response to shade in intercropping[J]. *Photosynthetica*, 2015, 53(2): 259-268.
- [22] 刘洋, 孙占祥, 白伟, 等. 玉米大豆间作对辽西地区作物生长和产量的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(2): 224-228.
- LIU Yang, SUN Zhan-xiang, BAI Wei, et al. Effect of maize and soybean interplanting on crops growth and yield in western Liaoning Province[J]. *Soybean Science*, 2011, 30(2): 224-228.
- [23] 吴其林, 王竹, 杨文钰. 苗期遮荫对大豆茎秆形态和物质积累的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(6): 868-872.
- WU Qi-lin, WANG Zhu, YANG Wen-yu. Seedling shading affects morphogenesis and substance accumulation of stem in soybean[J]. *Soybean Science*, 2007, 26(6): 868-872.
- [24] 罗玲, 于晓波, 万燕, 等. 套作大豆苗期倒伏与茎秆内源赤霉素代谢的关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(13): 2528-2537.
- LUO Ling, YU Xiao-bo, WAN Yan, et al. The relationship between lodging and stem endogenous gibberellins metabolism pathway of relay intercropping soybean at seedling stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13): 2528-2537.
- [25] 王竹, 杨文钰. 玉米株型和幅宽对套作大豆碳氮代谢及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(2): 206-212.
- WANG Zhu, YANG Wen-yu. Effects of plant-types of maize and planting width on carbon-nitrogen metabolism and yield of relay-cropping soybean[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2014, 36(2): 206-212.
- [26] Gao Y, Duan A W, Qiu X Q, et al. Distribution and use efficiency of photosynthetically active radiation in strip intercropping of maize and soybean[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(4): 1149-1157.
- [27] 代希茜, 詹和明, 赵银月, 等. 玉/豆间作模式下幅宽和玉米密度配置优化研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(1): 39-43.
- DAI Xi-xi, ZHAN He-ming, ZHAO Yin-yue, et al. Research of optimization for planting width and density in maize/soybean intercropping model[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(1): 39-43.
- [28] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 单作和间作对玉米和大豆群体辐射利用率及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 7-12.
- GAO Yang, DUAN Ai-wang, LIU Zu-gui, et al. Effect of monoculture and intercropping on radiation use efficiency and yield of maize and soybean[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 7-12.
- [29] 王甜, 庞婷, 杜青, 等. 田间配置对间作大豆光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 107-116.
- WANG Tian, PANG Ting, DU Qing, et al. Effects of different field collocation patterns on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and yield in intercropping soybean[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(2): 107-116.