

不同株型玉米套作大豆生长环境动态及群体产量研究

杨 峰,崔 亮,黄 山,刘卫国,雍太文,杨文钰

(四川农业大学 农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室,四川 成都 611130)

摘 要:为探明玉米-大豆带状套作下大豆生长环境动态规律及产量变化,选用不同株型玉米品种与大豆带状套作,分析了光强,光质,空气、土壤温湿度及产量变化规律。结果表明:大豆与紧凑型玉米套作下其冠层光合有效辐射和光谱辐照度在不同高度和不同时间都高于半紧凑和松散型。玉米-大豆带状套作群体土壤水分含量从大豆行间到玉米窄行间逐渐降低,大豆与紧凑型玉米套作群体不同空间位置土壤含水量变化幅度较小,而半紧凑和松散型玉米变化幅度较大。对于空气温湿度,紧凑型玉米套作下的大豆冠层空气温度最高,湿度最低。此外,大豆与紧凑型玉米套作下不同空间位置土壤0~10 cm温度高于半紧凑和松散型套作。大豆与紧凑型玉米套作下其产量显著高于与半紧凑和松散型玉米套作,但紧凑型玉米产量最低。因此,在玉米-大豆带状套作群体不同配置相关研究中应当考虑玉米株型对大豆生长环境及产量的影响。

关键词:光合有效辐射;光照辐照度;套作;土壤;株型

中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2015.03.0402

Soybean Growth Environment and Group Yield in Soybean Relay Intercropped with Different Leaf Type Maize

YANG Feng, CUI Liang, HUANG Shan, LIU Wei-guo, YONG Tai-wen, YANG Wen-yu

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China)

Abstract: Microenvironment dynamics directly affect the soybean yield in maize-soybean relay strip intercropping systems. Three different maize plant type varieties and one soybean variety were used as material in intercropping systems. Light intensity, light quality, temperature and humidity of soybean seedling growth were investigated. In addition, the yields of maize and soybean were analyzed in monoculture and intercropping conditions. The results showed that the canopy photosynthetic active radiation and spectral irradiance of soybean intercropped with compact plant type maize were higher than those intercropped with semi-compact and loose plant type maize. Soil water content decreased gradually from soybean rows to maize rows in a single strip under intercropping conditions. The changes of the soil water content at different place in soybean intercropped with compact plant type maize were smaller compared to those of soybean intercropped with semi-compact and loose plant type maize. The maximum value of soybean canopy air temperature appeared in compact plant type maize-soybean intercropping system. The opposite result was found in humidity of soybean canopy. In addition, the soil temperature of soybean intercropped with compact plant type maize in 0-10 cm was higher than those of soybean intercropped with semi-compact and loose plant type maize. The yield of soybean intercropped with compact plant type maize was significantly higher than those of intercropped with sime-compact and loose plant type maize, but the yield of maize was appeared the opposite result. Therefore, the effect of maize plant type on the growth environment and yield of soybean should be considered in maize-soybean relay strip intercropping systems.

Keywords: Photosynthetically active radiation; Spectral irradiance; Relay intercropping; Soil; Plant type

在全球人口急剧增加、耕地面积日益减少的背景下,我国粮食需求刚性增加,产需矛盾日益突出^[1]。玉米、大豆作为主要的粮、油、饲兼用作物,进口依存度逐渐增加,特别是大豆,北方主产区种植面积下降,缺口巨大,产业形势严峻^[2]。在玉米面积增加、稳产的同时,采用间套复种的方式,大力发展玉米-大豆带状复合种植模式对于提高土地利用效率,扩大大豆生产,实现玉米、大豆双赢等方面具有重要意义^[3-7]。

玉米-大豆带状复合种植模式作为禾本科和豆科、C₄和C₃作物带状间套作的主要模式,生态效益显著,是世界公认的最佳复合种植模式之一^[8]。该模式能够提高光能利用率,充分利用温度、水分、肥力等资源,提高单位面积产出率。同时,利用大豆生物固氮特性,培肥地力,减少氮肥施用量,实现农业可持续发展^[3]。加之,玉米采用宽窄行种植,边际效应明显,与单作相比,玉米产量增加,多收一季大豆,产量效益突出^[9]。因此,玉米-大豆带状

收稿日期:2014-08-27
基金项目:国家重点基础研究发展计划“973 计划”(2011CB100402);农业部公益性行业科研专项资金(201203096, 201103001)。
第一作者简介:杨峰(1981-),男,博士,副教授,主要从事作物生理生态及信息农业研究。E-mail:f. yang@ sicau. edu. cn。
通讯作者:杨文钰(1958-),男,博士,教授,主要从事玉米大豆带状复合种植理论与技术研究。E-mail:mssiyangwy@ sicau. edu. cn。

复合种植无论从理论角度还是生产实践都充分证实其对保障国家粮食安全具有重要意义。

目前,玉米-大豆带状复合种植是我国南北普遍实施的一种重要的种植方式^[2,6,9]。在复合种植中,不同的空间配置直接影响到群体微环境动态,进而影响作物的干物质积累及产量形成。高阳等报道玉米和大豆采用 1:3 和 2:3 间作对作物生物量影响的差异较大,主要是光环境的改变所导致^[9]。玉米-大豆带状间作前期群体微环境参数变化不大,后期不同空间位置光环境变化远大于其它参数,其中边行玉米每天收到光合有效辐射比内行玉米高 2%~38%,而远离玉米行的大豆行比靠近玉米行的大豆高 36%~140%^[10]。同样,不同株型对群体光环境影响较大,紧凑型玉米下大豆获得的光合有效辐射明显高于半紧凑和松散型玉米下的大豆^[11]。此外,玉米-大豆带状套作群体不同空间位置变化也直接影响光强和光质的变化,进而影响作物的生长和产量构成^[12]。这些研究主要集中于光环境的变化,而对其它微环境参数研究较少。因此,本研究旨在分析不同株型玉米-大豆带状套作群体土壤、空气温湿度、光环境的变化规律及其产量变化,以期对玉米-大豆带状复合种植微环境动态对作物生长发育、产量构成的影响研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验在四川仁寿县珠嘉乡四川现代粮食生产示范基地进行,试验地土壤有机质 $12.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $7.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $40.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $9.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $113.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH6.99。玉米选用登海 605(紧凑型,来源于山东登海种业),川单 418(半紧凑型,来源于四川农业大学玉米所),雅玉 13(松散型,来源于四川西南科联种业)3 个品种;大豆选用贡选 1 号(来源于自贡农科所),有限结荚习性。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,玉米于 3 月底采用宽窄行模式种植,窄行 50 cm,宽行 150 cm,株距 20 cm,7 月底收获;大豆于 6 月上旬播玉米宽行内(此时玉米处于喇叭口期),种植 2 行,行距为 50 cm,穴距 20 cm,每穴 2 株,10 月底收获。净作大豆行距 50 cm,穴距 20 cm,每穴 2 株;大豆净作和套作的播种时间一致。小区面积 24 m^2 ,每处理重复 3 次。玉米底肥穴施尿素 $330 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和氯化钾 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在大喇叭口期追施尿素 $330 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;大豆底肥施尿素 $65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 $420 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、氯化钾 $70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其它按照常规进行管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光强 采用美国 Li-Cor 公司的 Li-190SA 光量子传感器(点状)观测玉米冠层上方入射光合有效辐射,用 Li-191SA 光量子传感器观测套作大豆冠层光合有效辐射,使用 Li-1400 数据采集器记录数据。在玉米和大豆共生期间(大豆处于 V3 期),在晴朗无风的中午 12:00 测定不同株型玉米下大豆冠层上方 5 cm 处的光合有效辐射,重复观测 5 次。根据入射光和透射光数值计算获得透光率。

1.3.2 光谱特征 利用便携式光谱仪(AvaSpec-2048,Avantes,Netherlands)测定玉米大豆行间、大豆冠层及大豆行间不同波长下的光谱辐照度。光谱探头视场角 25° ,含余弦接收器。在同一个处理下重复测定 5 次,取其平均值作为大豆冠层光谱辐照度。

1.3.3 空气温湿度 利用 HOBO 空气温湿度记录仪在 7 月 15 和 25 日测定群体温湿度变化规律。在玉米窄行间,玉米和大豆行间以及大豆行间分别进行测定,重复 3 次,取其平均值为群体空气温湿度变化。

1.3.4 土壤含水量 采用土钻取土,烘箱烘干法。每次测定 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 共 4 个层次。每个处理重复 3 次。

1.3.5 土壤温度 利用曲管温度计测定套作条件下玉米窄行、玉豆行间以及大豆行间处 5,10,15,20 cm 处的土壤温度以及净作大豆行间土壤温度。每个处理重复测定 3 次。

1.3.6 产量 将各处理中完整的一带用于测定实产,待籽粒成熟时,完整收割这一带的所有玉米或大豆植株,并分处理全部脱粒,待籽粒风干后称重;同时,调查这一带的实际占地面积。在此基础上,计算每公顷产量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 数据处理,利用 SAS 8.2 进行方差和显著性分析,用 Origin 8.0 软件制图。

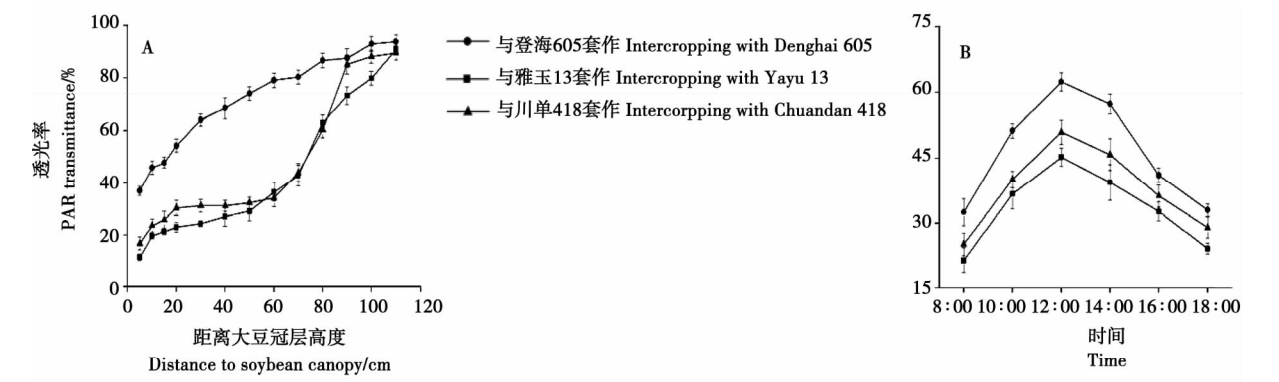
2 结果与分析

2.1 玉米-大豆套作群体共生期大豆冠层透光率变化规律

如图 1 所示,不同株型玉米下套作大豆的苗期(V3)冠层透光率随高度的增加总体呈现上升趋势,但登海 605 玉米品种套作大豆冠层上方 5~80 cm 高度范围内透光率比川单 418 和雅玉 13 套作大豆高 20% 以上。而川单 418 和雅玉 13 玉米套作大豆冠层 60 cm 以下透光率增长缓慢,随高度增加其透光率迅速增加。不同株型玉米品种下大豆冠层 110 cm 以上透光率基本一致,达到 90% 以上(图 1A)。此外,大豆冠层透光率一天的变化规律为先上升后

下降,与登海 605 套作下的大豆最高,川单 418 次之,雅玉 13 最低(图 1B)。因此,在套作条件下玉米和大豆共生期间光照强度对大豆整个冠层叶片的

影响较大,而玉米生长发育中后期的叶片部分会受到影响。



A 和 B 分别代表大豆冠层不同高度及一天不同时间段透光率的变化规律。
A and B stand for the PAR transmittance of different distance and different time in soybean canopy, respectively.

图 1 不同株型玉米下套作大豆冠层透光率变化规律

Fig. 1 PAR transmittance of the canopy of soybean intercropping with different plant types of maize

2.2 玉米-大豆套作群体共生期大豆冠层光谱特征变化规律

由图 2 可知,不同处理下大豆冠层光谱辐照度在不同的波长下差异明显,套作大豆光谱辐照度显著低于净作大豆。而在套作条件下,紧凑型玉米品种下的大豆冠层光谱辐照度值最高,而松散型

玉米品种下的大豆冠层光谱辐照度值最低。特别是从红光波长到远红光波长范围,净作大豆冠层光谱辐照度逐渐下降,而套作大豆出现相反的结果。这些结果表明太阳光通过玉米冠层到达套作大豆冠层后具有相对较高的远红光和较低的可见光。

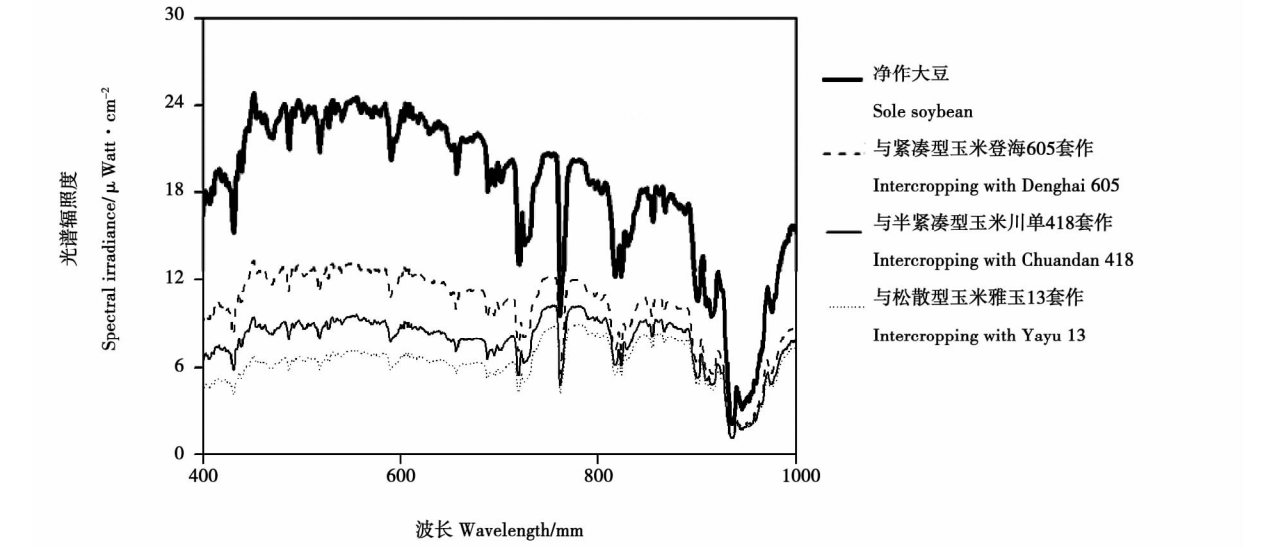


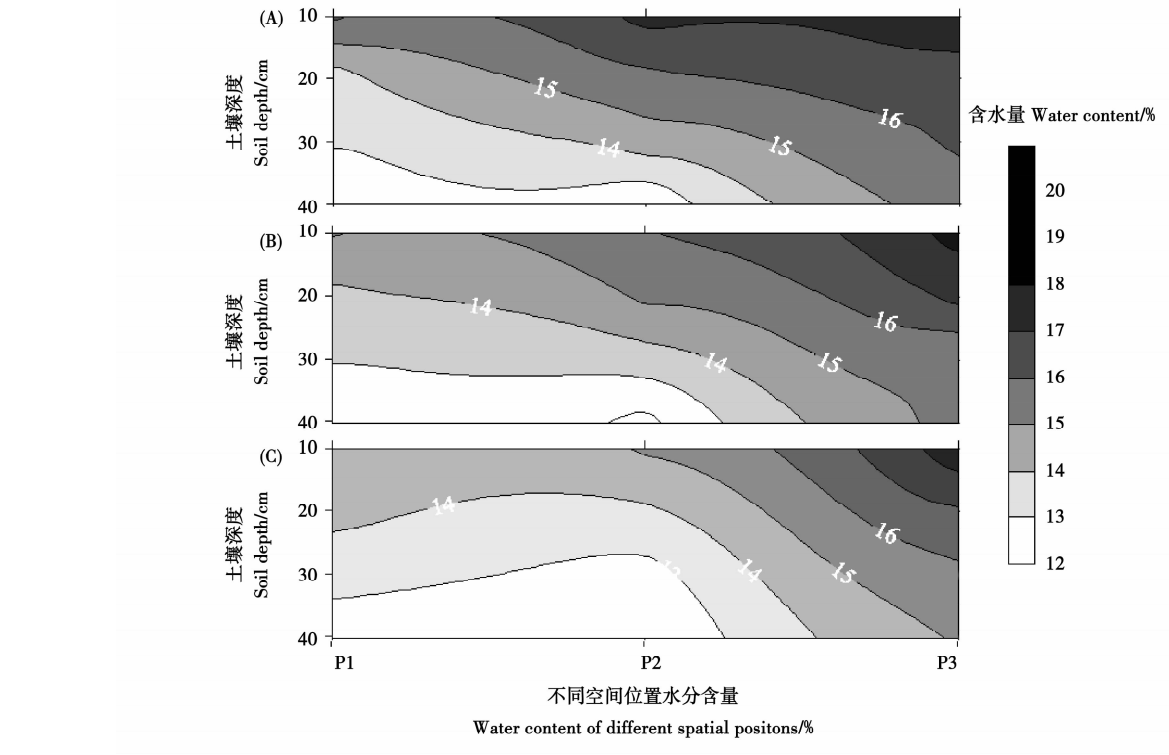
图 2 不同株型玉米下套作大豆冠层光谱辐照度变化规律

Fig. 2 Spectral irradiance of the canopy of soybean intercropping with different plant types of maize

2.3 玉米-大豆套作群体共生期土壤不同空间位置水分变化规律

由图 3 可知,不同株型玉米套作大豆群体土壤水分含量变化趋势一致,即从大豆行间到玉米窄行间水分含量逐渐降低,但不同株型玉米和不同深度的土壤含水量差异较大。紧凑型玉米群体不同空间位置土壤含水量变化幅度较小,但半紧凑和松散型玉米变化幅度较大(13% ~ 19%),特别是大豆行

间。对于不同深度土壤含水量,半紧凑和松散型玉米与大豆套作群体中,大豆行间 10 ~ 40 cm 水分变化梯度较大(16% ~ 19%),而紧凑型玉米下,水分变化梯度较小。但紧凑型玉米套大豆群体中玉豆之间水分变化梯度大于半紧凑和松散型玉米。在玉米窄行间 3 种玉米株型下土壤水分变化梯度基本一致。



A ~ C 分别代表大豆与紧凑型、半紧凑型及松散型玉米品种套作下不同深度土壤含水量;P1 ~ P3 分别表示玉玉间,玉豆间以及豆豆间的位置。
A-C stand for soybean relay intercropped with compact, semi-compact and loose plant type maize, respectively; P1-P3 mean the midway of maize rows, maize row and soybean row, and soybean rows, respectively.

图3 玉米-大豆带状套作群体土壤不同空间位置水分含量
Fig. 3 Soil water content of different spatial position in maize-soybean relay intercropping system

2.4 玉米-大豆套作群体共生期群体温湿度变化规律

由表1可以看出,不同株型玉米下大豆生长带的温度和湿度有显著差异,温度表现为紧凑型>半紧凑型>松散型,而相对湿度则是松散型>半紧凑型>紧凑型。在各测量时期,紧凑型/大豆套作群体的温度显著高于半紧凑型群体和松散型群体的温度,半紧凑型群体与松散型群体之间的温度差异不显著。相对湿度在各测量时期紧凑型 and 松散型群体差异都达到了显著水平,松散型玉米下大豆生长带的相对湿度维持在75%以上,平均比半紧凑型 and 紧凑型分别高出10%和15.6%。

2.5 玉米-大豆套作群体共生期土壤不同空间位置温度变化规律

由图4可以看出,净作大豆行间不同深度土壤温度高于玉米-大豆套作群体土壤不同空间位置的温度。在套作群体中,紧凑型玉米-大豆套作群体下不同位置0~10 cm 土壤温度高于半紧凑和松散型玉米-大豆套作群体的土壤温度,而在10~20 cm 范围差异不大。在玉玉、玉豆和豆豆间土壤温度差异也主要集中在0~10 cm,其中玉豆间土壤温度最高,而其它两个位置较低,可能与玉玉间和豆豆

间土壤遮阴强度和水分含量有关。

表1 玉米-大豆带状套作群体温湿度变化
Table 1 Temperature and humidity of maize-soybean relay strip intercropping system

参数 Parameter	玉米株型 Maize plant type	7月15日 July 15th	7月25日 July 25th
温度 Temperature/℃	紧凑型 Compact	27.8 a	30.2 a
	半紧凑型 Semi-compact	25.6 b	28.9 b
	松散型 Loose	24.7 b	27.3 b
	紧凑型 Compact	69.2 b	70.1 b
相对湿度 Relative humidity/%	半紧凑型 Semi-compact	73.4 ab	78.7 a
	松散型 Loose	79.5 a	84.2 a

同列数据后不同小写字母表示不同处理间在5%水平差异显著。下同。

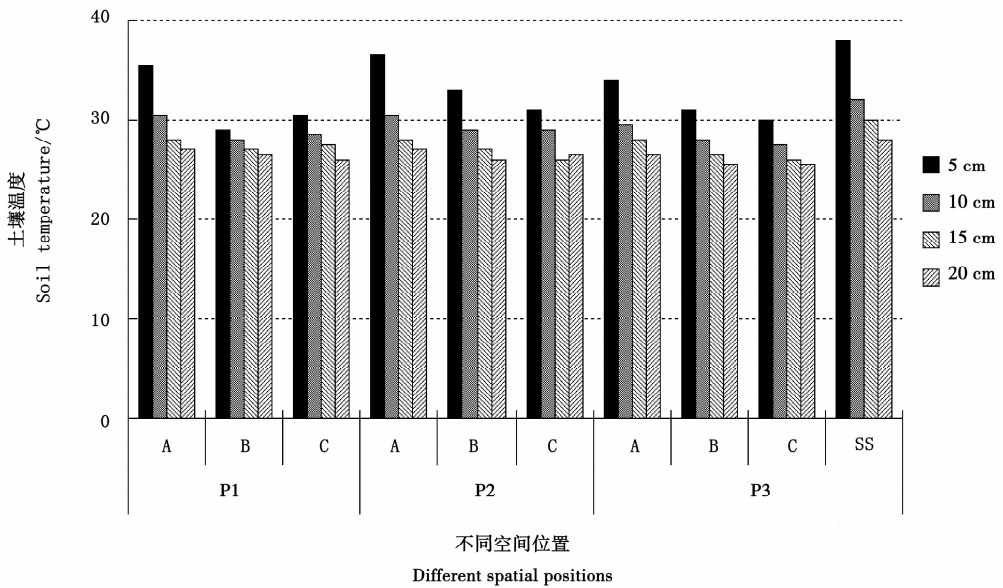
Values followed by different lowercase letters in a column are significant among treatment at the 5% level. The same below.

2.6 玉米和大豆产量

由表2可以看出,套作条件下3种不同株型的

玉米产量为雅玉 13 > 川单 418 > 登海 605, 即与大豆套作模式下, 紧凑型玉米的产量最低。雅玉 13 和川单 418 之间的产量无显著差异, 但两者与登海 605 的产量差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$)。对

于大豆产量, 净作条件下的产量高于套作条件下的产量, 而登海 605 下套作大豆 > 川单 418 下套作大豆 > 雅玉 13 下套作大豆, 但净作大豆产量和与登海 605 套作的大豆产量之间差异不显著。



A,B,C,SS 分别代表大豆与紧凑型、半紧凑型、松散型玉米品种套作以及净作大豆不同深度土壤温度;P1 ~ P3 分别表示玉玉间,玉豆间以及豆豆间的位置。
A,B,C,SS stand for soybean relay intercropped with compact, semi-compact, loose plant type maize, and sole soybean, respectively; P1-P3 mean the midway of maize rows, maize row and soybean row, and soybean rows, respectively.

图 4 玉米-大豆带状套作群体土壤不同空间位置温度变化

Fig. 4 Soil temperature of different spatial position in maize-soybean relay intercropping system

表 2 不同种植模式下玉米和大豆产量

Table 2 Yields of maize and soybean in different planting pattern (kg·hm⁻²)

种植模式 Planting pattern	玉米品种 Maize cultivar	大豆品种 Soybean cultivar	产量 Yield	
			玉米 Maize	大豆 Soybean
套作 Relay intercropping	雅玉 13 Yayu 13	贡选 1 Gongxuan 1	7767.5 ± 343.2 a	1632.4 ± 215.8 cde
	川单 418 Chuandan 418	贡选 1 Gongxuan 1	7612.3 ± 260.9 a	1718.5 ± 251.1 cd
	登海 605 Denghai 605	贡选 1 Gongxuan 1	6589.1 ± 287.6 b	2297.1 ± 203.6 ab
	—	贡选 1 Gongxuan 1	—	2536.7 ± 311.7 a
净作 Monoculture	—	—	—	—

3 结论与讨论

间套作是一种基于生物多样性的种植模式, 不仅充分发挥了不同作物之间的互利共生优势, 提高土地利用效率, 而且有利于保障粮食生产与环境保护的双赢格局^[14-15]。然而, 在玉米-大豆带状套作系统下, 由于高位作物玉米冠层结构特征的差异, 致使群体内光环境传输和分配不均匀, 限制大豆对有限光能的高效利用, 导致群体光合特性降低, 制约群体光合生产能

力的发挥^[16]。本研究表明, 不同株型玉米与大豆进行套种, 显著影响了大豆生长的光环境, 相对于单作大豆, 玉豆带状套作系统下大豆生长带的光强和光质均显著下降, 松散型雅玉 13 与大豆套作下最低, 可能由于紧凑型玉米叶片上挺, 直立的叶片使上层光较多地漏射到下层, 大豆叶片接受的光能较多, 对大豆条带的遮荫程度减弱。因此, 在玉米-大豆带状套作生产中, 合理的株型配置决定了合理的光分布, 满足低位作物大豆的生长发育。

大气降雨降落在植株上时会形成作物穿透降雨、树(茎)干径流和冠层截留三部分,而叶片冠层结构是影响穿透降雨的主要因素^[22]。穿透降雨量的多少是影响土壤含水量的重要因素之一,不同株型玉米-大豆套作下,玉米窄行叶片对降雨进行再分配可能是导致玉米窄行土壤含水量降低的主要原因之一,而宽行之间由于不同株型玉米叶片再分配的强度不同,玉豆间和豆豆间土壤含水量存在差异,紧凑型玉米品种最高,而松散型玉米品种最低(图3)。由于不同株型玉米叶片对宽行中间的地面形成有效遮挡不一致,同时落在玉米叶片上的雨水受玉米叶片的阻挡作用改变降落方向汇集到宽行中间的位置不同,继而形成宽行中间直接降雨量高于实际大气降雨量情况,达到降雨在农田中再分配,这与时忠杰^[22]和曹云^[23]等的研究结果相类似。

光环境和降雨的变化是导致土壤温湿度变化的主要因子。由于不同株型玉米对光的截获和降雨的再分配不同,到达不同空间位置土壤的光和水存在差异,直接影响到土壤的温度和含水量。在本研究中紧凑型玉米-大豆带状套作下土壤温度明显高于另外两个处理,与玉米株型密切相关(图4)。光照、温度、水分等因子是影响作物产量形成的重要生态因子。通过不同株型玉米和大豆进行带状套作,发现紧凑型玉米下大豆产量高于半紧凑和松散型,该结果与先前研究结果一致^[11, 13]。因此,在玉米-大豆带状套作生产过程中,宜选用紧凑型玉米品种,为套作大豆生长发育提供适宜的生长环境,在保证玉米稳产的前提下提高大豆产量。

参考文献

[1] He Z H, Xia X C, Peng S B, et al. Meeting demands for increased cereal production in China [J]. Journal of Cereal Science, 2014, 59(3): 235-244.

[2] 周新安, 年海, 杨文钰, 等. 南方间套作大豆生产发展的现状与对策(I) [J]. 大豆科技, 2010(3): 1-2. (Zhou X A, Nian H, Yang W Y, et al. Current situation and countermeasures of intercropping soybean in Southern China (I) [J]. Soybean Science & Technology, 2010(3): 1-2.)

[3] Knörzer H, Graeff-Hönniger S, Guo B, et al. The rediscovery of intercropping in China: A traditional cropping system for future Chinese agriculture-A review [M]. Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms. Springer Netherlands, 2009; 13-44.

[4] Zhu Y, Chen H, Fan J, et al. Genetic diversity and disease control in rice [J]. Nature, 2000, 406(6797): 718-722.

[5] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(27): 11192-11196.

[6] 杨文钰, 雍太文, 任万军, 等. 发展套作大豆, 振兴大豆产业 [J]. 大豆科学, 2008, 27(1): 1-7. (Yang W Y, Yong T W, Ren W J, et al. Develop relay-planting soybean, revitalize soybean industry [J]. Soybean Science, 2008, 27(1): 1-7.)

[7] 杨文钰, 杨峰, 雍太文. 我国间套作大豆研究方向和发展对策研讨会纪要 [J]. 大豆科技, 2011(1): 35-36. (Yang W Y, Yang F, Yong T W. Workshop summary of research direction and development countermeasures of intercropped soybean [J]. Soybean Science & Technology, 2011(1): 35-36.)

[8] Ofori F, Stern W R. Cereal-legume intercropping systems [J]. Advances in Agronomy, 1987, 41: 41-90.

[9] 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 Y, Duan A W, Liu Z G, et al. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1248-1254.)

[10] Jurik T W, van K. Microenvironment of a corn-soybean-oat strip intercrop system [J]. Field Crops Research, 2004, 90(2): 335-349.

[11] 杨峰, 黄山, 崔亮, 等. 玉米-大豆套作下作物叶片氮、磷动态特征及其相关性分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 781-789. (Yang F, Huang S, Cui L, et al. Dynamic changes and correlations of P and N concentrations in crop leaves under relay intercropping system of maize and soybean [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(4): 781-789.)

[12] Yang F, Huang S, Gao R, et al. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: far-red ratio [J]. Field Crops Research, 2014, 155: 245-253.

[13] 王竹. 栽培因子对套作大豆形态、碳氮代谢及产量的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2007. (Wang Z. Effect of cultural factors on morphological characteristics, carbon-nitrogen metabolism and yield of relay-cropping soybean [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2007.)

[14] Power A G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365(1554): 2959-2971.

[15] Shennan C. Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1492): 717-739.

[16] 王竹, 杨文钰, 吴其林. 玉/豆套作荫蔽对大豆光合特性与产量的影响 [J]. 作物学报, 2007, 33(9): 1502-1507. (Wang Z, Yang W Y, Wu Q L. Effects of shading in maize/soybean relay-cropping system on the photosynthetic characteristics and yield of soybean [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(9): 1502-1507.)

[17] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山华山松 (*Pinus armandii*) 林降雨再分配及其空间变异特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(1): 76-85. (Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, et al. Rainfall redistribution and its spatial variation in the stand of *Pinus armandii* in the Liupan Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 76-85.)

[18] 曹云, 黄志刚, 欧阳志云, 等. 长江防护林-樟树林对降雨再分配的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(5): 603-608. (Cao Y, Huang Z G, Ouyang Z Y, et al. Effects of *cinnamomum camphora* in the Yangtze river protection forest on rainfall redistribution [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(5): 603-608.)