

李奇松, 李家俊, 叶江华, 等. 玉米/豆科作物间作系统中不同互作因子对群体产量的影响 [J]. 福建农业学报, 2020, 35 (6): 582-590.  
LI Q S, LI J J, YE J H, et al. Crop-yields of Maize and Legume under Intercropping Cultivation [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35 (6): 582-590.

## 玉米/豆科作物间作系统中不同互作因子对 群体产量的影响

李奇松<sup>1,2</sup>, 李家俊<sup>1</sup>, 叶江华<sup>1,2</sup>, 罗晓棉<sup>2</sup>, 林文雄<sup>2\*</sup>

(1. 武夷学院茶与食品学院, 福建 武夷山 354300; 2. 福建省农业生态过程与安全监控重点实验室/  
福建农林大学生命科学学院, 福建 福州 350002)

**摘要:**【目的】明确在间作条件下不同互作因子(地上部互作、根系竞争、土壤环境改良)对不同复合群体的生态效应。【方法】以玉米/大豆和玉米/花生间作组合为研究对象, 设置了间作无隔、间作网隔、间作全隔和3种作物的单作处理, 比较分析不同间作处理的种间竞争关系和互作因子的产量贡献率。【结果】玉米/大豆和玉米/花生间作均能提高群体产量, 其中玉米增产起到主要作用, 不同作物的竞争力排序为玉米>大豆>花生; 地上部互作效应主要体现在提高了两种间作组合中玉米的产量, 其产量贡献率分别为15.83%(玉米/大豆)和15.98%(玉米/花生), 但却显著抑制了花生的产量(-11.42%); 根系竞争对玉米/大豆间作组合的单一作物和群体产量均起到负效应(玉米-2.87%、大豆-5.35%、群体-4.52%), 而对玉米/花生间作组合的玉米和群体产量起到正效应(5.88%和0.80%); 土壤环境改良对两种间作组合中各作物产量均表现出正效应, 可显著提高间作系统的产量和稳定性。【结论】不同间作组合之间, 由于作物在形态和生理上的差异, 各互作因子对间作群体产量的贡献率存在差异, 其中土壤环境改良对玉米/豆科间作系统的增产及稳产起到主要作用。通过量化不同互作因子对间作作物产量形成的生态效应, 可为优化间作的田间作物配置和管理提供依据。

**关键词:** 玉米; 大豆; 花生; 间作; 种间竞争; 产量贡献率

中图分类号: S 315

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2020) 06-0582-09

## Crop-yields of Maize and Legume under Intercropping Cultivation

LI Qisong<sup>1,2</sup>, LI Jiajun<sup>1</sup>, YE Jianghua<sup>1,2</sup>, LUO Xiaomian<sup>2</sup>, LIN Wenxiong<sup>2\*</sup>

(1. College of Tea and Food Science, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Agroecological Processing and Safety Monitoring/College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract:** 【Objective】To clarify the effects of different interaction factors (aboveground interaction, root competition, soil environment improvement) on crop-yields under maize and legumes intercropping systems. 【Method】Maize/soybean and maize/peanut were intercropped with no separation, with a net-barrier or with a physical barrier to completely separate the involved maize and legume plants. In addition, maize, soybean, and peanut were also planted as monocrop at the testing fields for comparison. Interspecies competition or synergy, such as the aboveground plant interactions and underground root competition, and soil improvements induced by the treatments on crop-yields of the two systems were analyzed.

【Result】Intercropping maize and legume plants increased the combined crop-yield over the monocropping, despite the treatment differences. In an intercropping system, maize was most competitive of the 3 crops with respect to the aboveground growth, while peanut the least. The maize yield under the maize/soybean system increased with a contribution rate of 15.83% by the aboveground interactions, and 15.98% under the maize/peanut cultivation. The peanut yield, meanwhile, was suppressed by 11.42% when intercropped with maize. In contrast to the aboveground plant interactions, the root competition exerted

收稿日期: 2019-08-16 初稿; 2020-01-29 修改稿

作者简介: 李奇松 (1987-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 作物生理与分子生态学 (E-mail: liqisong0591@126.com)

\* 通信作者: 林文雄 (1957-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 作物生理与分子生态学 (E-mail: lwx@fafu.edu.cn)

基金项目: 福建省农业生态过程与安全监控重点实验室 (福建农林大学) 开放课题项目 (NYST-2019-02); 武夷学院引进人才科研启动项目 (YJ201906)

negative effects on the yields of both species under the maize/soybean system that resulted in a reduction of 2.87% on maize, 5.35% on soybean, and 4.52% on total yield. For the intercropped maize and peanut plants, the root competition raised the maize yield by 5.88% and 0.8% on the combined yield. The intercropping improved soil conditions that facilitated crop-yield and production stability in both systems. 【Conclusion】 The morphology and physiology of the maize, soybean, and peanut plants appeared to cause the variations on the effects on crop-yield by the intercropping. Meanwhile, the soil eco-system was improved by the practice contributing significantly to the yield and production stability. A quantified relationship between intercropping and crop-yield as illustrated by this study could be applied to optimize other agricultural planning and management as well.

**Key words:** maize; soybean; peanut; intercropping; interspecific competition; yield contribution rate

## 0 引言

【研究意义】间作条件下, 2种作物的地上部和地下部的生长环境均发生改变, 相邻的不同作物间的竞争和互补作用同时存在, 对作物生长和产量的影响存在正效应或负效应<sup>[1-2]</sup>。明确和量化不同互作因子对间作作物产量的影响, 对进一步挖掘间作作物产量优势具有重要意义。【前人研究进展】前人对作物地上部互作的研究聚焦于间作对太阳辐射利用效率上。在高秆和矮秆作物的间套作组合中, 形成了光照在复合群体间的分配差异, 共生期中的矮秆作物往往因为遮荫作用导致生长劣势<sup>[3]</sup>。根据不同作物光合生理特性的差异性, 优化作物的间作配置, 能改善间作群体的透光状况, 提高矮秆作物的光截获量, 降低消光系数, 促进作物群体对光照的充分利用<sup>[4]</sup>。根系对地下部水资源和营养元素的利用是维持作物光合能力和同化作用的物质基础。间作条件下, 2种作物地下部互作的过程十分复杂, 首先是根系直接对土壤空间和营养元素的竞争<sup>[5]</sup>。有研究发现, 在不同间作组合中, 由于不同作物根系竞争力存在差异, 根系生长和空间分布受到不同程度的抑制或促进, 直接影响到作物对土壤营养的吸收, 进而影响作物产量<sup>[5-6]</sup>。间作作物的地下部互作不仅包括对有限土壤资源的竞争, 在不同作物根系分泌物互作下, 土壤环境也随之发生变化。植物生长过程中约17%的光合同化产物以根系分泌物形式释放到土壤中<sup>[7-8]</sup>。根系分泌物会影响和塑造土壤微生物群落<sup>[9-10]</sup>。间套作能通过根系分泌物对土壤微生物群落结构及多样性产生显著影响, 提高土壤酶活性和土壤速效养分供给能力, 同时对作物抗逆、抗病能力也具有积极的作用<sup>[11-12]</sup>。可见, 除了不同作物根系对水肥和空间的竞争, 这种由根系分泌物及微生物的互作引起的土壤环境改良对间作作物增产稳产具有积极意义。目前, 有关不同互作因子对间作作物产量影响的研究, 主要是比较地上部竞争和地下

部竞争的产量效应, 往往忽略了地下部土壤环境的变化对间作作物产量的影响<sup>[13-14]</sup>。吕越等<sup>[15]</sup>研究表明, 玉米/大豆间作的产量优势是地上部和地下部共同作用的结果, 其中地下部互作起到主要作用, 认为这2种作物的水肥竞争比光和热竞争对系统产量的影响更大。然而, 也有研究表明, 玉米/大豆间作产量优势主要来源于地上部的互作<sup>[4]</sup>。间作系统中, 品种<sup>[6]</sup>、田间配置<sup>[4]</sup>、覆膜<sup>[14]</sup>等因素均会影响到地下部的互作效应, 其中的根系竞争和土壤环境改良对群体产量形成的贡献率并不一致。因此, 研究地下部互作对群体产量的影响时, 应区别评价不同作物根系竞争和土壤环境改良的生态效应。【本研究切入点】前人研究结果表明, 间作条件下2种作物的地上部互作、根系竞争、土壤环境改良共同决定了间作作物的产量。但是, 不同的互作因子对间作作物产量优势形成的效应还未明确。因此, 本研究分别以两种间作组合的地上部互作、根系竞争、土壤环境改良作为互作因子, 探讨互作因子对作物间作系统的生态效应。【拟解决的关键问题】通过对不同间作处理的作物种间生态关系的评价, 探明不同互作因子对间作作物产量的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与栽培概况

1.1.1 供试材料 以玉米 (*Zea mays* L. cv. Zhengda 12)、花生 (*Arachis hypogaea* L. cv. Minhua 8)、大豆 (*Glycine max* L. cv. Pudou 8008) 作为研究材料。

1.1.2 试验设计与实施概况 试验于2014年在福建农林大学作物科学学院试验基地 (26°9'N, 119°23'E) 进行。田间土壤, 耕作层基础肥力为: 全氮 13.19 g·kg<sup>-1</sup>、全磷 0.57 g·kg<sup>-1</sup>、全钾 8.03 g·kg<sup>-1</sup>、速效氮 42.91 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 11.63 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 37.51 mg·kg<sup>-1</sup>。试验处理设: 正常间作无隔处理 (代号 NS, 包含了营养竞争、空间竞争、土壤微生物和根系分泌物转移, 体现地上部互作、根系竞争、土壤环境改

良);网隔间作处理(代号 HS,排除了根系空间竞争,但允许根系分泌物、土壤微生物和可溶性物质通过尼龙网,体现地上部互作和土壤环境改良);全隔间作处理(代号 CS,完全阻断了两种作物地下部根系的互作,体现地上部互作)。间隔处理小区在种植之前,采用 300 目尼龙网、塑料膜对大豆、花生与玉米间的边行进分隔处理,网膜埋入土壤中深 50 cm,可保证根系不能直接通过。同时,设置玉米、花生、大豆单作处理(代号 MS,其中玉米为 MS<sub>m</sub>、大豆为 MS<sub>s</sub>、花生为 MS<sub>p</sub>)。随机区组设计,每处理设置 3 个重复小区,小区面积 18 m<sup>2</sup>。田间小区种植模式为 3 行玉米与 8 行花生(或大豆)相互间作(行比 3:8)。

参考中国东南地区间作的研究报告<sup>[16]</sup>和福建当地常用种植方式,设计玉米种植行株距为 40 cm×30 cm,大豆、花生种植行株距均为 30 cm×20 cm,花生、玉米边行间距为 35 cm。大豆、花生、玉米同时播种,播种时每穴播 2 粒种子,出苗后进行定苗。田间试验播种时间为 2014 年 4 月 6 日。玉米于 2014 年 7 月 5 日收获,生长周期 90 d;大豆于 2014 年 7 月 31 日收获,生长周期 116 d;花生于 2014 年 8 月 6 日收获,生长周期 122 d。大豆和花生分别在玉米收获后继续生长 26 d 和 32 d。全生育期施纯氮 180 kg·hm<sup>-2</sup>(尿素)、纯磷 52 kg·hm<sup>-2</sup>(过磷酸钙)、纯钾 75 kg·hm<sup>-2</sup>(氯化钾),全量的磷钾肥及 50% 氮肥作基肥,另外 50% 氮肥在玉米拔节期施用。田间管理按常规高产栽培管理。

## 1.2 测定项目及方法

1.2.1 产量测定与计算 成熟收割前在田间小区中以行为单位,每行随机选择 5 株进行考种,获得各处理百粒重、株粒数、结实率,计算籽粒产量。

1.2.2 间作种间关系指数计算(以玉米/花生间作为例)

(1) 土地当量比(LE<sub>R</sub>)。为评价间作种植是否存在优势,国际上通常将获得与在单位面积上间作同等产量的作物,单作所需要的面积称为土地当量比<sup>[17]</sup>。LE<sub>R</sub>是同时将间作作物产量和种植比例纳入考量,如果 LE<sub>R</sub>>1 就表明存在间作优势,如果 LE<sub>R</sub><1 表明存在间作劣势。

$$LE_R = (Y_{im}/Y_m) + (Y_{ip}/Y_p)$$

式中:Y<sub>im</sub>和Y<sub>ip</sub>分别表示间作下玉米和花生所占的土地面积上的产量,即间作玉米或花生单位面积产量乘于玉米或花生的土地面积占比,Y<sub>m</sub>和Y<sub>p</sub>分别表示单作下玉米和花生的单位面积产量。

(2) 区域时间等价率(ATE<sub>R</sub>)。区域时间等价

率是在土地当量比(LE<sub>R</sub>)的基础上,将作物的生长周期纳入考量<sup>[18]</sup>。也就是在评价系统生长优势时,将作物占用农田的时间资源纳入计算,与 LE<sub>R</sub>相似,当 ATE<sub>R</sub>>1 时,表示相较于单作,间作种植具备农田区域时间资源利用优势;当 ATE<sub>R</sub><1 时,表示劣势。

$$ATE_R = \frac{\left(\frac{Y_{im}}{Y_m} \times T_m\right) + \left(\frac{Y_{ip}}{Y_p} \times T_p\right)}{T}$$

式中:T、T<sub>m</sub>和T<sub>p</sub>分别表示间作系统生长天数、玉米生长天数、花生生长天数。

(3) 农田利用效率(LUE)。农田利用效率用于评价农田的综合利用效率,同时将 LE<sub>R</sub>和 ATE<sub>R</sub>纳入评价<sup>[19]</sup>。当 LUE>1 时,表示间作种植的综合农田利用效率高于单作;当 LUE<1 时,表示间作种植的综合农田利用效率低于单作。

$$LUE = \frac{LE_R + ATE_R}{2}$$

(4) 实际产量损失指数(AYL)。实际产量损失指数有别于间作群体产量优势的评价,衡量的是间作种植中的某单一作物的产量相较于其单作产量优势的大小<sup>[20]</sup>。分别用 AYL、AYL<sub>m</sub>、AYL<sub>p</sub>表示群体、玉米、花生的实际产量损失指数,当 AYL、AYL<sub>m</sub>、AYL<sub>p</sub>>0 时,表示间作复合群体或其中某单一作物具有产量优势;当 AYL、AYL<sub>m</sub>、AYL<sub>p</sub><0 时,表示间作群体或其中某单一作物具有产量劣势。

$$AYL = AYL_m + AYL_p$$

$$AYL_m = \left(\frac{Y_{im}/R_m}{Y_m}\right) - 1$$

$$AYL_p = \left(\frac{Y_{ip}/R_p}{Y_p}\right) - 1$$

式中:R<sub>p</sub>和R<sub>m</sub>分别表示玉米和花生种植面积占比。

(5) 系统生产力指数(SPI)。系统生产力指数是用间作优势作物的产量结合弱势作物的产量来评价复合群体产量的稳定性<sup>[20]</sup>。在本研究中玉米为优势作物,大豆、花生为弱势植物。

$$SPI = \frac{\bar{Y}_m}{\bar{Y}_p} \times \bar{Y}_{ip} + \bar{Y}_{im}$$

式中:Y<sub>ip</sub>、Y<sub>im</sub>、Y<sub>p</sub>、Y<sub>m</sub>分别表示间作花生、间作玉米、单作花生、单作玉米的单位面积产量。

(6) 相对拥挤系数(RCC)。相对拥挤系数是用于评价间作系统中作物在竞争互作中的产量优势<sup>[21]</sup>。分别用 RCC、RCC<sub>m</sub>和 RCC<sub>p</sub>表示复合群体、

玉米、花生相对拥挤系数，当  $RCC$ 、 $RCC_m$ 、 $RCC_p > 1$  时，表示间作种间竞争对复合群体或某单一作物产量为正效应；当  $RCC$ 、 $RCC_m$ 、 $RCC_p < 1$  时，表示间作种间竞争对复合群体或某单一作物产量为负效应；当  $RCC_m > RCC_p$  时，表示间作中玉米比花生更具有优势。

$$RCC = RCC_m \times RCC_p$$

$$RCC_m = \frac{Y_{im}R_p}{(Y_m - Y_{im})R_m}$$

$$RCC_p = \frac{Y_{ip}R_m}{(Y_p - Y_{ip})R_p}$$

(7) 侵占力 ( $A$ )。侵占力评价的是间作种植中某一作物对另一作物竞争力的大小<sup>[21]</sup>。 $A > 0$  表示具有竞争优势。

$$A_m = \frac{Y_{im}}{Y_mR_m} - \frac{Y_{ip}}{Y_pR_p}$$

$$A_p = \frac{Y_{ip}}{Y_pR_p} - \frac{Y_{im}}{Y_mR_m}$$

式中： $A_m$  和  $A_p$  分别表示玉米与花生在间作群体中的竞争力。

(8) 间作产量贡献率 ( $YCR$ )。为明确导致大豆、花生间作玉米增产优势的主要原因，在田间小区设置了 4 个处理，分别为间作无隔、间作网隔、间作全隔和单作。无隔处理 (NS) 的互作包括地上部互作、土壤环境改良、根系竞争；网隔处理 (HS) 的互作包括地上部互作、土壤环境改良；全隔处理 (CS) 的互作是地上部互作。可通过计算获得不同互作因子对间作产量的贡献率。

$$UYCR_x = \frac{(Y_{CSx}/R_x) - Y_x}{Y_x} \times 100\%$$

$$RYCR_x = \frac{(Y_{NSx}/R_x) - (Y_{HSx}/R_x)}{Y_x} \times 100\%$$

$$SYCR_x = \frac{(Y_{HSx}/R_x) - (Y_{CSx}/R_x)}{Y_x} \times 100\%$$

$$UYCR = UYCR_m \times R_m + UYCR_p \times R_p$$

$$RYCR = RYCR_m \times R_m + RYCR_p \times R_p$$

$$SYCR = SYCR_m \times R_m + SYCR_p \times R_p$$

式中： $x$  代表间作中某单一作物，可取值  $m$  (玉米) 或  $p$  (花生)。 $Y_{CSx}$ 、 $Y_{HSx}$ 、 $Y_{NSx}$ 、 $Y_x$  分别代表  $x$  作物在间作全隔 (CS)、网隔 (HS)、无隔 (NS) 和单作 (MS) 处理中所占的土地面积上的产量，即单位面积产量乘于玉米或花生的土地面积占比； $UYCR_x$ 、 $RYCR_x$ 、 $SYCR_x$  分别表示地上部互作、根系竞争、土壤环境改良对  $x$  作物产量的贡献率； $UYCR$ 、 $RYCR$ 、 $SYCR$  分别表示地上部互作、根系竞争、土壤环境改良对间作复合群体产量的贡献率。

2 结果与分析

2.1 不同处理的产量与土地当量比

由表 1 看出，在玉米/大豆间作组合中，无隔处理 (NS) 和网隔处理 (HS) 玉米的产量均略高于全隔处理 (CS)；网隔处理 (HS) 大豆产量显著高于全隔处理 (CS)；3 种间作处理的土地当量比 ( $LER$ ) 均大于 1，表现出群体产量优势，其中全隔处理 (CS) 表现出略微优势并显著低于网隔处理 (HS)，不同处理间优势大小为：HS > NS > CS。在玉米/花

表 1 不同处理下两种间作组合的作物产量和土地当量比 ( $LER$ )  
Table 1 Crop-yields and LER of two intercropping systems with varied treatments

处理 Treatments	玉米/大豆间作产量 Maize/soybean intercropping yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )			玉米/花生间作产量 Maize/peanut intercropping yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )		
	$Y_{Im}$	$Y_{Is}$	$LER_1$	$Y_{2m}$	$Y_{2p}$	$LER_2$
NS	3 066.45±119.73 a	1 156.05±48.98 ab	1.10±0.06 ab	3 460.50±79.35 a	1 764.60±47.52 a	1.12±0.03 a
HS	3 141.15±138.66 a	1 214.40±27.63 a	1.15±0.03 a	3 311.40±99.47 a	1 795.35±31.69 a	1.11±0.01 a
CS	3 012.39±174.32 a	1 091.55±20.41 b	1.05±0.03 b	2 939.70±54.00 b	1 571.70±49.62 b	0.98±0.02 b
MS	7 802.10±229.85	1 635.00±42.38		7 604.10±342.91	2 661.30±50.70	

注：(1) NS表示无隔处理，HS表示网隔处理，CS表示全隔处理，MS表示单作处理； $Y_{Im}$ 、 $Y_{Is}$ 、 $LER_1$ 分别表示玉米/大豆间作组合中的玉米产量、大豆产量、土地当量比； $Y_{2m}$ 、 $Y_{2p}$ 、 $LER_2$ 分别表示玉米/花生间作组合中的玉米产量、花生产量、土地当量比；(2) 表中数值之后无相同小写字母者表示差异达显著水平 ( $LSD$  test,  $P < 0.05$ ,  $n=3$ ) (表2~5同)。  
Note: NS: non-separated treatment; HS: net-separated treatment; CS: completely separated treatment; MS: monoculture treatment.  $Y_{Im}$ ,  $Y_{Is}$  and  $LER_1$  respectively represent maize yield, soybean yield and land equivalent ratio in maize/soybean intercropping.  $Y_{2m}$ ,  $Y_{2s}$  and  $LER_2$  respectively represent maize yield, soybean yield and land equivalent ratio in maize/peanut intercropping. Different letters show significant differences determined by the  $LSD$  (least significant difference) test ( $P < 0.05$ ,  $n=3$ ) (the same as table 2-5) .



生组合中，全隔处理（CS）的玉米和花生的产量均低于其他处理，玉米产量在无隔处理（NS）中最高，花生的产量在网隔处理（HS）中最高；土地当量比，无隔处理（NS）和网隔处理（HS）中均高于1，而全隔处理（CS）低于1，不同处理间产量优势大小为：NS>HS>CS。

2.2 不同处理的区域时间等价率和农田利用效率

通过区域时间等价率（*ATER*）和农田利用效率（*LUE*）分析（表2），发现在2种间作组合中，无隔处理（NS）和网格处理（HS）的区域时间等价率

和农田利用效率均大于1，表现出具备农田区域时间资源利用优势，其中：玉米/大豆组合全隔处理（CS）的区域时间等价率（*ATER*<sub>1</sub>）小于1，相对于单作表现出劣势；农田利用效率（*LUE*<sub>1</sub>）为1.01，与单作相当，两指标均显著低于网隔间作处理（HS）。玉米/花生组合全隔处理（CS）的区域时间等价率（*ATER*<sub>2</sub>）和农田利用效率（*LUE*<sub>2</sub>）均小于1，相较于单作表现出劣势，且显著小于无隔处理（NS）和网格处理（HS）。

表2 不同处理下两种间作组合的区域时间等价率（*ATER*）和农田利用效率（*LUE*）

Table 2 *ATER and LUE of two intercropping systems with varied treatments*

处理 Treatments	玉米/大豆 Maize/soybean intercropping		玉米/花生 Maize/peanut intercropping	
	<i>ATER</i> <sub>1</sub>	<i>LUE</i> <sub>1</sub>	<i>ATER</i> <sub>2</sub>	<i>LUE</i> <sub>2</sub>
NS	1.01±0.05 ab	1.06±0.06 ab	1.02±0.02 a	1.07±0.02 a
HS	1.06±0.02 a	1.10±0.03 a	1.02±0.01 a	1.06±0.01 a
CS	0.97±0.03 b	1.01±0.03 b	0.89±0.03 b	0.94±0.03 b

2.3 不同处理的相对拥挤系数和竞争力

从2种间作组合的群体相对拥挤系数（表3）可以看出，除了玉米/花生间作全隔处理（CS）的*RCC*<sub>2</sub><1外，其余间作处理的群体均表现出互作正效应（*RCC*>1），玉米（m）的竞争正效应总体上高于大豆（s）和花生（p）。在玉米/大豆组合中，网隔处理（HS）的群体拥挤系数（*RCC*<sub>1</sub>）显著高于无隔处理（NS），无隔处理（NS）的群体拥挤系数显著高于全隔处理（CS）；只有地上部互作的全隔

处理（CS），其产量正效应主要来自玉米（*RCC*<sub>1m</sub>）；地下部互作处理（NS和HS）显著提高了大豆竞争正效应，其中网格处理（HS）提高幅度更大，略高于玉米。在玉米/花生组合中，无隔处理（NS）和网格处理（HS）的群体拥挤系数（*RCC*<sub>2</sub>）显著高于全隔处理（CS）；玉米的竞争正效应总体显著高于花生；地下部互作处理（NS和HS）显著提高了玉米和花生的竞争正效应。

表3 不同处理下两种间作组合的相对拥挤系数（*RCC*）

Table 3 *RCC of two intercropping systems with varied treatments*

处理 Treatments	玉米/大豆 Maize/soybean intercropping			玉米/花生 Maize/peanut intercropping		
	<i>RCC</i> <sub>1m</sub>	<i>RCC</i> <sub>1s</sub>	<i>RCC</i> <sub>1</sub>	<i>RCC</i> <sub>2m</sub>	<i>RCC</i> <sub>2p</sub>	<i>RCC</i> <sub>2</sub>
NS	1.30±0.04 a	1.21±0.11 b	1.57±0.12 b	1.67±0.07 a	0.99±0.08 a	1.69±0.19 a
HS	1.35±0.04 a	1.44±0.02 a	1.95±0.03 a	1.54±0.09 a	1.04±0.06 a	1.58±0.05 a
CS	1.26±0.06 a	1.00±0.02 c	1.26±0.03 c	1.26±0.04 b	0.72±0.06 b	0.91±0.10 b

间作作物种间竞争力评价结果表明（表4），玉米在2种间作组合中保持了对大豆和花生的竞争优势（*A<sub>m</sub>*>0）。相较于大豆，玉米对花生的竞争优势更大，3种作物竞争力大小表现为玉米>大豆>花生。在玉米/大豆组合中，网隔处理（HS）的种间竞争力显著小于全隔处理（CS）。说明在没有根系直

接竞争的前提下，地下部物质以及微生物的互作缓和了2种作物的竞争强度。在玉米/花生组合中，无隔处理（NS）的种间竞争力显著大于网隔处理（HS）和全隔处理（CS）。说明在玉米和花生间作中，根系直接互作显著提高了玉米的竞争力。

表 4 不同处理下两种间作组合的种间竞争力 (A)  
Table 4 Competitiveness (A) of two intercropping systems with varied treatments

处理 Treatments	玉米/大豆 Maize/soybean intercropping		玉米/花生 Maize/peanut intercropping	
	$A_{1m}$	$A_{1s}$	$A_{2m}$	$A_{2p}$
NS	0.12±0.04 ab	-0.12±0.04 ab	0.37±0.02 a	-0.37±0.02 b
HS	0.09±0.03 b	-0.09±0.03 b	0.29±0.05 b	-0.29±0.05 a
CS	0.16±0.03 a	-0.16±0.03 a	0.31±0.02 b	-0.31±0.02 a

表 5 不同处理下两种间作组合的实际产量损失指数 (AYL) 和系统生产力指数 (SPI)  
Table 5 AYL and SPI of two intercropping systems with varied treatments

处理 Treatments	玉米/大豆 Maize/soybean intercropping				玉米/花生 Maize/peanut intercropping			
	$AYL_{1m}$	$AYL_{1s}$	$AYL_1$	$SPI_1$	$AYL_{2m}$	$AYL_{2p}$	$AYL_2$	$SPI_2$
NS	0.18±0.02 a	0.06±0.03 b	0.24±0.03 b	575.91	0.37±0.03 a	-0.01±0.03 a	0.36±0.05 a	566.81
HS	0.21±0.02 a	0.11±0.00 a	0.32±0.02 a	599.62	0.31±0.04 a	0.01±0.02 a	0.32±0.03 a	562.74
CS	0.16±0.03 a	0.00±0.01 c	0.16±0.03 c	551.55	0.16±0.02 b	-0.11±0.03 b	0.05±0.05 b	495.37

2.4 不同互作因子对产量的贡献率

如表 5 所示，在玉米/大豆组合中，只体现地上部竞争的全隔处理（CS）的群体和玉米的实际产量损失指数（ $AYL_1$  和  $AYL_{1m}$ ）均达 0.16，而大豆的实际产量损失指数（ $AYL_{1s}$ ）趋于 0，表明地上部互作主要对玉米产量起到正效应；有地下部互作效应的处理（HS 和 NS）的群体和大豆的实际产量损失指数（ $AYL_1$  和  $AYL_{1s}$ ）均显著高于只体现地上部竞争的全隔处理（CS），而玉米在 3 种间作处理间没有表现出显著性差异，表明地下部互作主要是促进大豆产量，其中：有根系竞争的无隔处理（NS）的群体和大豆实际产量损失指数（ $AYL_1$  和  $AYL_{1s}$ ）均显著小于无根系竞争的网隔处理（HS），表明根系竞争对大豆产量产生负效应。在玉米/花生组合中，有地下部互作效应的处理（HS 和 NS），其群体和单一作物的实际产量损失指数（ $AYL_2$ 、 $AYL_{2m}$ 、 $AYL_{2p}$ ）均显著

高于只体现地上部竞争的全隔处理（CS），其中：CS 处理对玉米产量产生正效应（ $AYL_{2m}>0$ ），对花生产量产生负效应（ $AYL_{2p}<0$ ），表明地下部互作对 2 作物的产量均产生正效应，地上部互作促进了玉米的产量却抑制了花生的产量；同时，具有地上部互作和土壤环境改良的网隔处理（HS）同时促进了玉米和花生的产量（ $AYL_{2m}>0$ ， $AYL_{2p}>0$ ），表明土壤环境改良能促进玉米产量和抵消地上部互作对花生的产量负效应。系统生产力指数（SPI）在两种间作组合中的变化趋势与实际产量损失指数（AYL）和土地当量比（LER）一致，在玉米/大豆组合中均表现为 HS>NS>CS；在玉米/花生组合中系统生产力指数（SPI）表现为 NS>HS>CS。

基于以上分析，本研究进一步对不同互作因子的产量效应进行量化（表 6），结果表明：在玉米/大豆组合中，土壤环境改良（SYCR<sub>1</sub>）和地上部互作

表 6 不同互作因子对两间作组合的产量贡献率 (YCR)  
Table 6 Yield contribution rates (YCR) by various interacting factors on two intercropping systems

影响因子 Treatments	玉米/大豆间作 Maize/soybean intercropping/%			玉米/花生间作 Maize/peanut intercropping/%		
	$YCR_{1m}$	$YCR_{1s}$	$YCR_1$	$YCR_{2m}$	$YCR_{2p}$	$YCR_2$
土壤环境改良 Improvement of soil environment	4.96	11.27	9.17	14.66	12.61	13.29
根系竞争 Root competition	-2.87	-5.35	-4.52	5.88	-1.74	0.80
地上部互作 Aboveground interaction	15.83	0.13	5.36	15.98	-11.42	-2.28
综合作用 Comprehensive effect	17.92	6.05	10.01	36.52	-0.55	11.81

( $UYCR_1$ ) 对复合群体产量起到正效应 (9.17% 和 5.36%), 根系竞争起到负效应 (-4.52%); 玉米增产了 17.92%, 其中: 地上部分互作 ( $UYCR_{1m}$ ) 为主要贡献因子 (15.83%), 而根系竞争 ( $RYCR_{1m}$ ) 起到负效应 (-2.87%); 大豆产量优势 (6.05%) 主要归因于土壤环境改良 ( $SYCR_{1s}$ , 11.27%), 而根系竞争起到负效应 ( $RYCR_{1s}$ , -5.35%)。在玉米/花生组合中, 土壤环境改良 ( $SYCR_2$ ) 和根系竞争 ( $RYCR_2$ ) 对复合群体产量起到正效应 (13.29% 和 0.80%), 地上部互作 ( $UYCR_2$ ) 起到负效应 (-2.28%); 玉米增产了 36.52%, 其中: 地上部分互作 ( $UYCR_{2m}$ ) 和土壤环境改良 ( $SYCR_{2m}$ ) 均起到重要作用 (15.98% 和 14.66%), 根系竞争 ( $RYCR_{2m}$ ) 也起到正效应 (5.88%); 土壤环境改良 ( $SYCR_{2p}$ ) 为花生产量提供了 12.61% 的正效应, 但由于根系竞争 ( $RYCR_{2p}$ , -1.74%) 和地上部竞争 ( $UYCR_{2p}$ , -11.42%) 均起到负效应, 导致花生减产 (-0.55%)。

### 3 讨论

禾本科/豆科作物间作条件下对有限资源的互补利用能显著提高复合群体的产量<sup>[22]</sup>。Yang 等<sup>[4]</sup>通过不同地下部分隔和不同田间配置处理之间的比较分析, 发现玉米/大豆间作的产量优势与地下部互作无关, 主要是得益于地上部对太阳辐射的有效利用; 但也有研究表明, 玉米/大豆间作产量优势是地上部与地下部协同互作的结果, 而且根际的互作及土壤营养环境的变化起主要作用<sup>[23-24]</sup>。本研究结果显示, 在两种间作组合中具备地下部互作的无隔处理和网隔处理的产量优于全隔处理和单作处理; 在缺乏地下部互作时, 单凭地上部互作无法产生区域时间等价率和农田利用效率优势 (表 2)。在两种间作组合中, 不同间作组合处理的产量变化趋势并不一致, 说明不同互作因子对最终产量优势的贡献率并不一致。

在间作条件下, 相邻的不同作物间的竞争和互补对群体产量起到重要作用。Li 等<sup>[25-26]</sup>基于大田试验结果认为, 通过改变田间种植管理措施来增加种间生态位互补, 使得以种间竞争为主的间套作组合具备产量优势, 提出了种间竞争恢复生产原理和促进作用理论。本研究中, 从两种间作组合的竞争能力 ( $A$ ) 结果看, 3 种作物竞争力排序为: 玉米 > 大豆 > 花生。从相对拥挤系数 ( $RCC$ ) 结果看, 玉米的竞争正效应总体上高于大豆和花生, 玉米在地下部竞争中相对于大豆、花生处于强势地位, 根系竞争可进一步提高间作系统中玉米的竞争能力和产量正效

应; 而地下部土壤环境改良可以减小玉米对大豆、花生的竞争力, 提高了大豆、花生竞争产量正效应。有研究表明, 禾本科和豆科作物的间作, 除了对原有的水肥进行竞争利用外, 禾本科植物对氮素的吸收使土壤中速效氮浓度降低, 从而促进豆科植物的根部结瘤和固氮, 提高了整个群体的氮营养水平<sup>[27]</sup>; 此外, 地下部互作也可改善土壤微生物群落结构, 促进土壤营养循环, 改良土壤环境<sup>[11, 28]</sup>。在共生阶段, 玉米的地上部冠层相对于豆科植物具有显著竞争优势, 间作中的豆科植物的光合能力以及干物质积累量均显著低于单作<sup>[3]</sup>, 但是地下部互作为豆科植物提供了良好的土壤环境和营养储备, 在玉米收获后间作豆科植物能恢复和提高光合同化能力, 获得产量提高的效果<sup>[25]</sup>。农业生态系统中, 农田生物的多样性具有促进土壤微生物生态的多样性、控制田间杂草、改变作物群落冠层气候等功能, 最终保证了作物增产和稳产<sup>[29]</sup>。植物多样性可以通过根系分泌物改善和促进土壤微生物群落的结构和多样性, 提高土壤肥力和微生态稳定性<sup>[11, 30]</sup>。可见, 间作条件下, 地上部和地下部的互作不仅能实现对资源的有效利用, 同时对于提高农田系统稳定性具有重要作用。本研究中, 衡量间作系统稳定性的  $SPI$  值在玉米/大豆间作中表现为, 以避免了根系竞争的网隔处理的  $SPI$  值最高; 在玉米/花生间作中, 以具备所有互作因子的无隔处理最高。这或许可归因于这两种间作组合均具有地下部互作效应, 从而提高了土壤生态系统的稳定性。

前人已经从地上部互作<sup>[31]</sup>、根系竞争<sup>[32]</sup>、土壤环境改良<sup>[33]</sup>的角度对间作作物产量形成机制做了大量研究, 但是具体到不同互作因子之间对产量的贡献率的研究结果还鲜见报道。本研究通过不同分隔处理, 分析了两种常见禾本科和豆科作物间作组合的实际产量损失指数 ( $AYL$ ) 和互作因子产量贡献率 ( $YCR$ ), 结果发现: 土壤环境改良对两种间作组合中的单一作物和复合群体产量表现出正效应, 是两种间作组合群体产量优势的主要贡献因子。根系竞争对玉米/大豆间作中的单一植物和群体产量均起到负效应, 对玉米/花生中的玉米和群体产量起到正效应 (5.88% 和 0.80%), 而对花生起到负效应 (-1.74%)。地上部互作主要是提高了两种间作组合中玉米的产量, 其产量贡献率为 15.83% (玉米/大豆) 和 15.98% (玉米/花生), 对大豆产量的提高效果并不明显 (0.13%), 但是显著抑制了花生的产量 (-11.42%)。从该结果可得出, 竞争力最强的玉米在两种间作组合中均获得产量优势, 主要归因于土

壤环境改良和地上部互作。在玉米/花生组合中, 由于玉米的根系竞争和地上部遮荫, 使得花生的生长受到抑制, 但依靠土壤环境改良弥补竞争劣势, 可获得与单作相当的产量 ( $-0.55\%$ ); 在玉米/大豆组合中, 可能由于大豆比花生更具耐阴性, 对太阳辐射的利用与玉米形成互补<sup>[34]</sup>, 且地下部的根系比花生更发达更具竞争力<sup>[16]</sup>, 土壤环境改良和群体地上部互作对大豆均具有产量正效应, 在玉米收获后, 产量水平得到更大程度恢复, 表现出产量优势 ( $6.05\%$ )。由此可见, 不同作物间作组合, 由于作物在形态和生理上的差异, 不同的互作因子的生态效应存在差异; 间作种植的地下部互作过程中, 两种作物根系竞争对群体产量可能产生负效应, 而土壤环境改良对于保障群体产量优势及稳定性具有重要意义; 间作生产实践中, 在明确土壤环境改良、根系竞争、地上部互作对间作作物产量效应的基础上, 通过改善田间间作配置和管理水平, 提高或保持正效应因子的互作强度, 弱化负效应因子的互作强度, 将有利于充分发挥复合群体产量优势。

#### 参考文献:

- [1] MARIOTTI M, MASONI A, ERCOLI L, et al. Above- and below-ground competition between barley, wheat, lupin and vetch in a cereal and legume intercropping system [J]. *Grass and Forage Science*, 2009, 64 (4): 401–412.
- [2] TILMAN D. Plant interactions. (book reviews: plant strategies and the dynamics and structure of plant communities) [J]. *Science*, 1988, 241: 853–855.
- [3] WU Y S, GONG W Z, YANG F, et al. Responses to shade and subsequent recovery of soya bean in maize-soya bean relay strip intercropping [J]. *Plant Production Science*, 2016, 19 (2): 206–214.
- [4] YANG F, LIAO D P, WU X L, et al. Effect of aboveground and belowground interactions on the intercrop yields in maize-soybean relay intercropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 16–23.
- [5] 安颖蔚, 冯良山, 张鹏. 间作群体作物根系营养竞争与互作效应 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45 (5): 26–28.  
AN Y W, FENG L S, ZHANG P. Nutrient competition and interaction effect of root in intercropping system [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45 (5): 26–28. (in Chinese)
- [6] XIA H Y, ZHAO J H, SUN J H, et al. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 52–62.
- [7] KUZUYAKOV Y, DOMANSKI G. Carbon input by plants into the soil. Review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163 (4): 421–431.
- [8] JONES D L, NGUYEN C, FINLAY R D. Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface [J]. *Plant and Soil*, 2009, 321 (1/2): 5–33.
- [9] PHILIPPOT L, RAAIJMAKERS J M, LEMANCEAU P, et al. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, 11 (11): 789–799.
- [10] ZHALNINA K, LOUIE K B, HAO Z, et al. Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly [J]. *Nature Microbiology*, 2018, 3 (4): 470–480.
- [11] LI Q S, CHEN J, WU L K, et al. Belowground interactions impact the soil bacterial community, soil fertility, and crop yield in maize/peanut intercropping systems [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19 (2): 622.
- [12] LI L, TILMAN D, LAMBERS H, et al. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture [J]. *The New Phytologist*, 2014, 203 (1): 63–69.
- [13] ZHENG X Y, ZHAO L, NAN X U, et al. Interspecific Interaction of Below-ground and Above-ground Indices in Mulberry-soybean Intercropping System [J]. *Soils*, 2011, 43 (3): 493–497.
- [14] 刘广才, 杨祁峰, 李隆, 等. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32 (2): 477–484.  
LIU G C, YANG Q F, LI L, et al. Intercropping advantage and contribution of above- and below-ground interactions in wheat-maize intercropping [J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32 (2): 477–484. (in Chinese)
- [15] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 地上部与地下部作用对玉米/大豆间作优势的影响 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45 (1): 129–136, 142.  
LÜ Y, WU P T, CHEN X L, et al. Effect of above-and below-ground interactions on maize/soybean intercropping advantage [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45 (1): 129–136, 142. (in Chinese)
- [16] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 红壤旱地玉米对间作大豆和花生边行效应影响的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20 (8): 1010–1017.  
ZHANG X Q, HUANG G Q, BIAN X M, et al. Marginal effect of soybean and peanut intercropped with maize in upland red soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20 (8): 1010–1017. (in Chinese)
- [17] MEAD R, WILLEY R W. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping [J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16 (3): 217–228.
- [18] ALLEN J R, OBURA R K. Yield of corn, cowpea, and soybean under different intercropping Systems1 [J]. *Agronomy Journal*, 1983, 75 (6): 1005–1009.
- [19] HIEBSCH C K, MCCOLLUM R E. Area-Time Equivalency Ratio: A Method For Evaluating The Productivity Of Intercrops 1 [J]. *Agronomy Journal*, 1987, 79 (1): 15–22.
- [20] LITHOURGIDIS A S, VLACHOSTERGIOS D N, DORDAS C, et al. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems [J]. *European Journal of Agronomy*, 2011,



- 34 (4) : 287–294.
- [21] DHIMA K, LITHOURGIDIS A S, VASILAKOGLU I, et al. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio [J]. *Field Crops Research*, 2007, 100 (2) : 249–256.
- [22] XUE Y F, XIA H Y, CHRISTIE P, et al. Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: a critical review [J]. *Annals of Botany*, 2016, 117 (3) : 363–377.
- [23] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 玉米/大豆间作系统的作物资源竞争 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (1) : 139–146.
- LÜ Y, WU P T, CHEN X L, et al. Resource competition in maize/soybean intercropping system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (1) : 139–146. (in Chinese)
- [24] 陈伟, 薛立. 根系间的相互作用: 竞争与互利 [J]. 生态学报, 2004, 24 (6) : 1243–1251.
- CHEN W, XUE L. Root interactions: competition and facilitation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (6) : 1243–1251. (in Chinese)
- [25] LI L, SUN J H, ZHANG F, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping - I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients [J]. *Field Crops Research*, 2001, 71 (2) : 123–137.
- [26] LI L, SUN J H, ZHANG F, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting [J]. *Field Crops Research*, 2001, 71 (3) : 173–181.
- [27] YANG W T, WANG X W, WANG J W, et al. Crop-and soil nitrogen in legume-Gramineae intercropping system: Research progress [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32 (9) : 2480–2484.
- [28] TIAN X L, WANG C B, BAO X G, et al. Crop diversity facilitates soil aggregation in relation to soil microbial community composition driven by intercropping [J]. *Plant and Soil*, 2019, 436 (1/2) : 173–192.
- [29] 林文雄, 陈婷, 周明明. 农业生态学的新视野 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20 (3) : 253–264.
- LIN W X, CHEN T, ZHOU M M. New dimensions in agroecology [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20 (3) : 253–264. (in Chinese)
- [30] EISENHAUER N, LANOUE A, STRECKER T, et al. Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44641.
- [31] HUANG C D, LIU Q Q, GOU F, et al. Plant growth patterns in a tripartite strip relay intercrop are shaped by asymmetric aboveground competition [J]. *Field Crops Research*, 2017, 201: 41–51.
- [32] WANG Y F, QIN Y Z, CHAI Q, et al. Interspecies interactions in relation to root distribution across the rooting profile in wheat-maize intercropping under different plant densities [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 483.
- [33] LI Q S, WU L K, CHEN J, et al. Biochemical and microbial properties of rhizospheres under maize/ peanut intercropping [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15 (1) : 101–110.
- [34] 杨小琴, 王洋, 齐晓宁, 等. 玉米间作体系的光合生理生态特征 [J]. 土壤与作物, 2019, 8 (1) : 70–77.
- YANG X Q, WANG Y, QI X N, et al. Photosynthetic physiological characteristics of maize intercropping system [J]. *Soil and Crop*, 2019, 8 (1) : 70–77. (in Chinese)

(责任编辑: 杨小萍)