

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.021

地上部与地下部作用对玉米/大豆间作优势的影响^{*}

吕越¹ 吴普特² 陈小莉³ 王玉宝² 赵西宁²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过对不同分隔方式下玉米/大豆间作的养分吸收量、光合参数与产量等的测定, 分析地上部和地下部的资源竞争作用。试验设置4种间作分隔方式和2种单作处理: 地上地下均不分隔(T1), 地上地下均分隔(T2), 仅地下分隔(T3), 仅地上分隔(T4), 单作玉米(T5)与单作大豆(T6)。结果表明, 对于籽粒产量和生物学产量的土地当量比, T1为1.23和1.20, T2为0.97和0.91, T3为1.01和1.02, T4为1.10和1.08。玉米相对大豆的资源竞争能力, T1为0.79, T2为-0.08, T3为0.14, T4为0.39。玉米相对大豆的氮、磷、钾营养竞争比率, T1为1.63、1.92和1.50, T2为1.05、1.03和1.06, T3为1.28、1.32和1.27, T4为1.47、1.43和1.36。除拔节期外, T1玉米的净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 与细胞间隙 CO_2 浓度 C_i 最高; T4略低于T1, 但差异不显著; T2和T3均显著低于T1; 除分枝期外, T1大豆的 P_n 、 T_r 、 G_s 与 C_i 最低; T4略高于T1; T2和T3均显著高于T1。综上所述, 对于玉米/大豆的间作优势而言, 地上部与地下部的相互作用大于单一因素的作用, 其次, 地下部作用大于地上部作用。

关键词: 玉米/大豆间作 地上部作用 地下部作用

中图分类号: S344.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0129-08

引言

玉米/大豆间作是一种可以实现粮油增产的种植方式^[1-2]。已有大量研究证明, 与单作相比, 间套作因更能充分利用各种资源而增产^[3-4]。在间套作种植方式中存在的种间资源相互作用分为地上部和地下部两方面。目前, 隔根法是间套作研究中应用最为广泛的方法之一^[5-6], 从不同侧面证实了根系竞争是制约营养元素和水分竞争的主要因子^[7-8]; 根通过截获、质流等过程使作物根系吸收了养分^[9]。同时, 间作作物地上部分的相互作用使间作群体平面受光的状态发生改变, 从而使作物光合特性发生明显变化^[10]; 由于间作, 作物功能叶片叶绿素含量和光合速率提高, 使间作光热利用率提高20%左右^[11]; 同时, 在影响作物产量的很多因素中, 光能是光合作用的唯一能量来源, 其他资源的利用状况直接受光能的影响, 高效发展和利用光能可使间作作物增产^[12], 因此高光合速率是产生间作优势的最重要因素之一^[13]。

然而, 因为间套作的优势实际上是间作作物在

地上部和地下部共同作用的结果, 目前存在的问题是如何进一步明确种间地上部与地下部各自的相互作用对间作优势的影响, 以便更科学地调控地上部的光、热与地下部的水、肥等营养资源来实现更大的间作优势。为此本文通过设计玉米/大豆间作的地上部与地下部的不同分隔方式, 在遮雨条件下测定两作物的功能叶的生物量及产量、养分吸收量与光合参数, 分析地上部和地下部的资源竞争作用, 为复合群体资源利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2012年4~9月份在西北农林科技大学农作物标本区遮雨棚内进行。试验场位于陕西省杨凌区, 属暖温带半湿润偏旱型气候, 年蒸发量993.5 mm, 年平均降水量550 mm, 干旱指数为1.3~1.59, 年均气温12.9℃, 极端最高气温可达42℃, 极端最低气温可达-19.4℃, 年均日照时数为2 196 h, 无霜期220 d, 光照充足。试验场遮雨棚的棚高为6 m, 棚宽为16 m, 用透光塑材覆盖棚顶, 棚侧可以通风。

收稿日期: 2013-07-15 修回日期: 2013-08-12

^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B09)、高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)、西北农林科技大学青年学术骨干项目、基本科研业务费资助项目和旱区农业共性节水技术集成与示范项目(K303021301)

作者简介: 吕越, 博士生, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: 53048830@qq.com

通讯作者: 吴普特, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

使用粘壤土作为供试土壤,耕层(0~30 cm)有机质各组分含量(质量比)为:11.82 g/kg、全氮1.26 g/kg、全磷0.81 g/kg、全钾6.13 g/kg、速效氮51.02 mg/kg、速效磷20.17 mg/kg、速效钾95.32 mg/kg、pH值7.56,土壤深度为0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,60~80 cm,80~120 cm,120~160 cm,160~200 cm时,对应的土壤容重分别为1.20、1.25、1.27、1.29、1.30、1.31、1.32 g/cm³;田间持水量分别为21.2%、19.5%、19.2%、20.1%、20.8%、21.6%、22.6%;凋萎含水率分别为8.5%、9.2%、10.5%、11.5%、9.6%、9.6%、9.7%。

1.2 试验设计

试验采用种植方式与分隔方式2因素随机区组设计。种植方式为单作玉米、单作大豆、玉米/大豆间作;分隔方式只用于间作。间作采用玉米/大豆比例为1:1种植,共有4种分隔处理方式,分别是:T1(对照),地上地下均不分隔;T2,地上地下均分隔;T3,地上不分隔、地下分隔;T4,地上分隔、地下不分隔。单作共有2种处理,分别是:T5,单作玉米;T6,单作大豆。当地下分隔时,玉米和大豆根系的水分和养分竞争作用被消除;当地下不分隔时,两作物地下部相互作用强烈。当地上分隔时,可消除玉米叶片对大豆叶片的遮阴作用;当地上不分隔时,此遮阴作用仍存在(本试验地上分隔设计目的为将作物叶片控制在自己的行距内生长,而塑料膜不限制作物吸收利用行两侧的光)。每种分隔处理的小区面积为10.8 m²(4.0 m×2.7 m),每个小区用PVC板制成的无底箱子来区分,箱子的尺寸(长×宽×高)为4.0 m×2.7 m×1.0 m。在每个小区开挖1 m深的土坑,随后放入箱子,按试验地土壤容重分层填土,每20 cm为一层,以土壤的扰动模拟田间土壤翻耕过程。地下分隔材料也为PVC塑料板,隔板长2.7 m,深1.0 m,厚0.3 cm,间距为40 cm,即将4.0 m长的小区划分为10个隔断。地下的分隔板与PVC箱子的连接处用钉子固定,每隔5 cm一颗钉子(共100 cm)以确保连接处是密封处理。地上分隔材料为塑料膜,布置在地下隔板的正上方,塑料膜长2.7 m,高2.2 m,厚0.08 mm。其两端用图钉和铁丝与木桩绑扎,木桩位于隔板两端,底部扎入地面60 cm以保证其固定(图1)。试验共计6个处理,每个处理重复2次,共12个小区。

间作与单作的小区面积、行距与株距均相同。玉米与大豆行距为40 cm,株距为30 cm。间作玉米与单作玉米、间作大豆与单作大豆在净占地面积上播种密度相同,间作中玉米和大豆的占地面积各为50%。玉米和大豆的品种分别是郑单958和豫豆

22。玉米4月18日播种,8月2~13日收获;大豆4月18日播种,8月27日~9月10日收获,两作物共生期约105 d。供试土壤的磷与钾含量较丰富,并考虑当地施肥标准,因此设计底肥施氮125 kg/hm²,施磷45 kg/hm²,施钾65 kg/hm²。在玉米拔节期和抽雄期分别追施氮肥,用量为60 kg/hm²。播前均匀翻耕,人工除草,试验均在上述遮雨棚内进行,充分供水(采用地面灌溉,灌水量根据两次灌水之间的土壤水分变化确定,以使土壤水分达到田间持水量,实现充分灌溉)。田间管理措施按当地生产实践中常规方式进行,以充分保证作物生长发育需求为基础。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率

土壤含水率的取样深度为0~200 cm土层,在0~20 cm内每10 cm取1个土样,20~200 cm以下每20 cm取1个土样,取样位置分别为玉米一侧与大豆一侧,采用称量法测定,测定时间为玉米拔节期(大豆分枝期)、玉米抽雄期(大豆开花期)、玉米孕穗期(大豆鼓粒期),每次测定设3个重复,本文用到的均为质量含水率^[14]。

土壤储水量计算公式为^[15]

$$W = 10hpb \quad (1)$$

式中 W ——土壤储水量,mm

h ——土层深度,cm

p ——土壤容重,g/cm³

b ——土壤含水率,%

1.3.2 土壤速效养分

取样方法为0~20 cm每10 cm取1个土样,20 cm以下每20 cm取1个土样,测定深度为0~100 cm,取样位置分别为玉米一侧与大豆一侧。对所采土样进行充分混合。取样时间为收获的前一天,风干后的土样过1 mm筛,并及时测定。速效氮采用碱解扩散法,速效磷采用钼锑抗比色法,速效钾采用火焰光度法,有机质采用外加热法^[16]。

1.3.3 籽粒和秸秆的氮磷钾含量

将样品于105℃杀青30 min,70℃干燥至质量恒定,再将样品粉碎,用H₂SO₄-H₂O₂湿灰化法消煮,凯式定氮仪定氮;钼钒黄显色,岛津UV-120型分光光度计比色测定磷;火焰光度计测钾。具体方法参照文献[16]。均以净占地面积为基础比较间作与单作的养分吸收量。

1.3.4 光合参数

生育时期划分为:玉米拔节期(大豆分枝期)、玉米抽雄期(大豆开花期)、玉米孕穗期(大豆鼓粒期),本试验分别在进入某一生育时期后的7 d内,

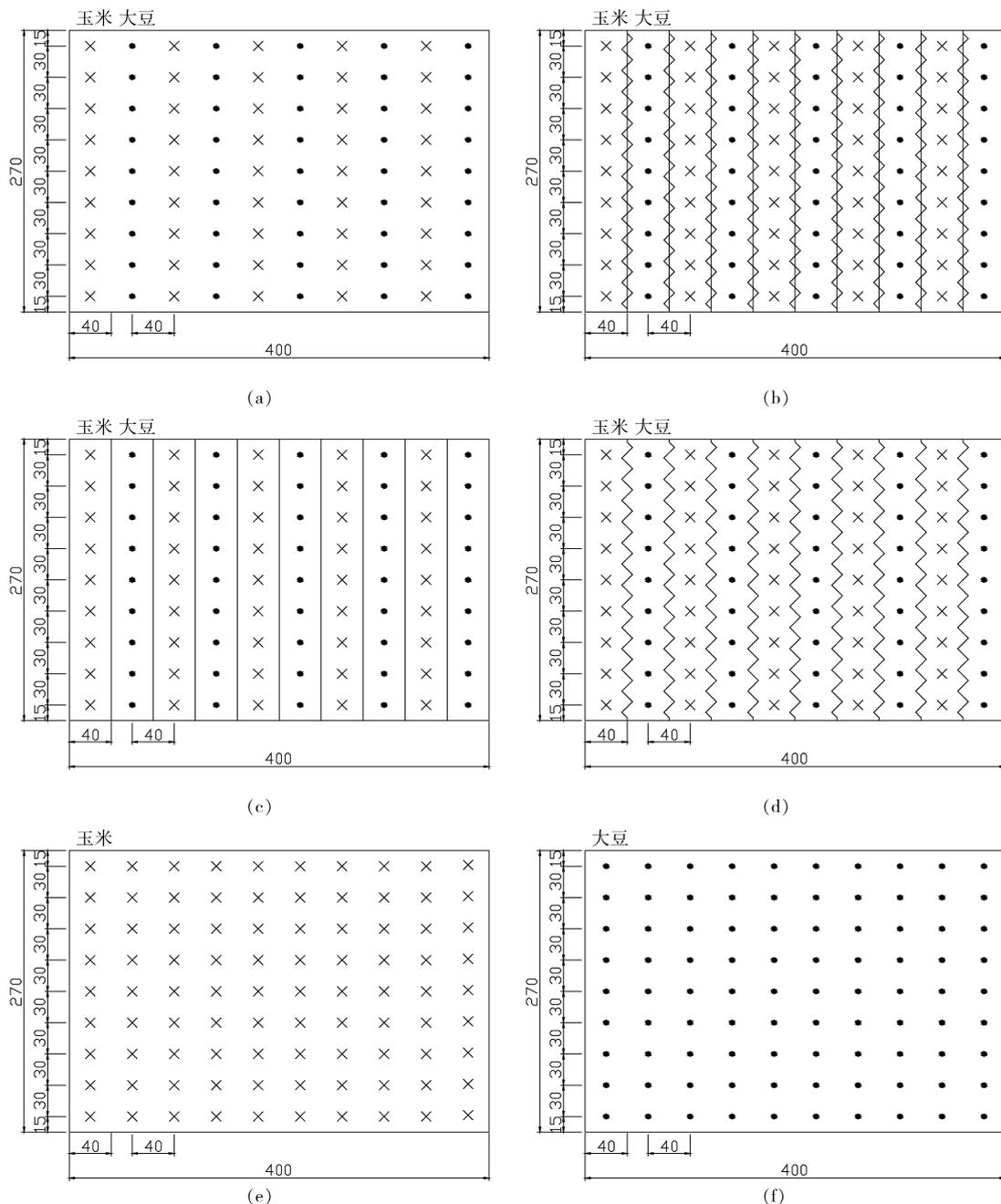


图 1 单作玉米、单作大豆与不同分隔方式下间作玉米/大豆的示意图

Fig. 1 Sketch maps of sole and maize-soybean intercrop in different separation methods

- (a) 间作玉米/大豆地上地下均不分隔 (b) 间作玉米/大豆地上地下均分隔 (c) 间作玉米/大豆地上不分隔、地下分隔
- (d) 间作玉米/大豆地上分隔、地下不分隔 (e) 单作玉米 (f) 单作大豆

选择晴天的 9:00 ~ 11:00 进行光合参数的测定。测定仪器使用美国产 LI-6400 光合仪, 在各生育时期分别测定功能叶片的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r) 和细胞间隙 CO_2 浓度 (C_i)。玉米的测定部位是大喇叭口期以前为第 1 片完全展开叶, 之后为棒三叶。大豆的测定部位(遮阴与不遮阴)均为第 4 片复叶全展^[17]。

1.3.5 产量

在玉米和大豆成熟后按行收获, 每行收获长度为 2.7 m(与隔板长度相等), 单收单打, 用于测定地

上部分的籽粒产量和生物学产量。均以净占地面积为基础比较间作与单作的产量。

1.3.6 间作优势 I

应用土地当量比 (L_{ER}) 作为衡量间作产量优势的指标^[18], 计算公式为

$$L_{ER} = L_{ERm} + L_{ERs} = Y_{im}/Y_{mm} + Y_{is}/Y_{ms} \quad (2)$$

式中 Y_{im} 、 Y_{is} ——间作内玉米、大豆的产量, kg/hm^2

Y_{mm} 、 Y_{ms} ——单作玉米、单作大豆的产量, kg/hm^2

当 $L_{ER} > 1$ 时为间作优势, $L_{ER} < 1$ 时为间作劣势。

1.3.7 种间相对竞争能力

该指标表示一种作物相对于另一种作物的资源竞争能力大小^[18]。本文以玉米相对大豆的资源竞争能力来计算,即

$$A_{ms} = Y_{im} / (Y_{mm} F_{im}) - Y_{is} / (Y_{ms} F_{is}) \quad (3)$$

式中 A_{ms} ——玉米相对大豆的资源竞争力

F_{im} 、 F_{is} ——间作中玉米、大豆所占面积比例, %

当 $A_{ms} > 0$ 时,表明玉米竞争能力强于大豆,当 $A_{ms} < 0$ 时,则反之。

1.3.8 营养竞争比率

该指标用于衡量一种作物吸收养分能力强弱的指标。本文用玉米相对大豆对养分的竞争比率来衡量养分竞争能力。根据文献^[19],以磷为例,计算公式为

$$C_{Rms} = (P_{uim} / P_{umm}) F_{is} / [(P_{uis} / P_{ums}) F_{im}] \quad (4)$$

式中 C_{Rms} ——玉米相对大豆对养分的竞争比率

P_{uim} 、 P_{uis} ——间作玉米、间作大豆的吸磷量, kg/hm^2

P_{umm} 、 P_{ums} ——单作玉米、单作大豆的吸磷量, kg/hm^2

当 $C_{Rms} > 1$ 时,玉米的营养竞争能力比大豆强,当 $C_{Rms} < 1$ 时,则反之。氮和钾的营养竞争比率用同法计算。

1.3.9 间作养分吸收优势

间作养分吸收优势计算公式为

$$N_{UAI} = N_{uim} + N_{uis} - (N_{umm} F_{im} + N_{ums} F_{is}) \quad (5)$$

式中 N_{UAI} ——间作养分吸收优势

N_{uim} 、 N_{uis} ——间作总面积上玉米、大豆的养分吸收量, kg/hm^2

N_{umm} 、 N_{ums} ——单作玉米、单作大豆的养分吸收量, kg/hm^2

1.3.10 间作优势 II

间作优势计算公式为^[19]

$$Y_l = Y_{im} + Y_{is} - (Y_{mm} F_{im} + Y_{ms} F_{is}) \quad (6)$$

1.4 数据分析

本试验数据均采用统计分析软件 DPSv3.11 专业版处理。有关试验结果图表中所列数据为 3 次重复的平均值;对测定结果进行 F 检验,并用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤储水量

由图 2 可知,在玉米生育期内, T1 中玉米一侧的土壤储水量显著低于 T2 和 T3,但与 T4 差异不显著。表层土壤水分变化较剧烈, 100 cm 土层以下,

土壤储水量变化已不明显,所以图 2 只列出了 0 ~ 120 cm 各土层水分状况。在玉米全生育期, T1 中玉米一侧 0 ~ 120 cm 的平均土壤储水量比 T2 和 T3 分别降低了 7.6% ~ 12.9%、6.9% ~ 11.2%,而只比 T4 降低了 3.1% ~ 4.6%。在大豆生育期内, T1 中大豆一侧的土壤储水量显著低于 T2 和 T3,但与 T4 差异不显著。T1 中大豆一侧 0 ~ 120 cm 的平均土壤储水量比 T2 和 T3 分别降低了 8.6% ~ 12.5%、5.7% ~ 10.2%,而只比 T4 降低了 2.8% ~ 3.9%。

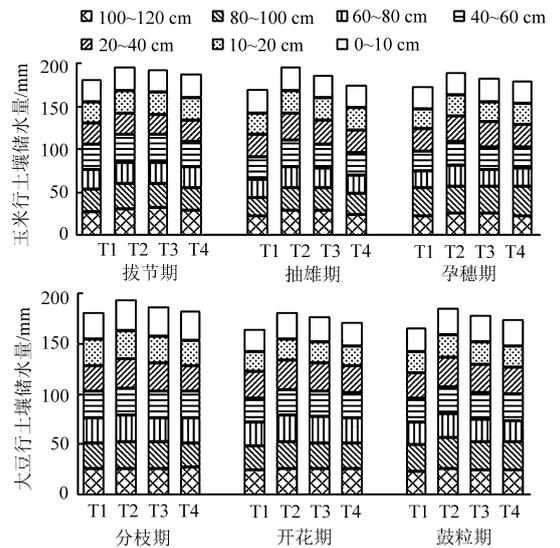


图 2 0 ~ 120 cm 各层土壤储水量

Fig. 2 Soil moisture storages at 0 ~ 120 cm soil layer

T1 中无地上地下分隔处理,地下部玉米根系已进入大豆根区,吸收了大豆根区土壤的水分^[4],说明玉米根系对土壤水分有强烈的竞争作用。同时,地上部作用使玉米叶片获得充足的光照,叶片升温增加了自身对水分的消耗量,间接促使玉米根系吸收更多的水分,因此玉米一侧和大豆一侧的土壤储水量下降幅度均最大,这是地上部和地下部相互作用的结果。T2 有地上地下分隔处理,两作物间基本不存在对水分和光照的竞争作用,与 T1 相比,玉米一侧和大豆一侧的土壤储水量下降幅度均最小。T3 仅有地下分隔,与 T1 相比,二者仅地下作用不同,地下部作用对玉米一侧和大豆一侧土壤水分竞争的影响显著。T4 仅有地上分隔,与 T1 相比,二者仅地上作用不同,地上部作用对作物土壤水分竞争的间接影响不显著。

2.2 土壤养分含量

表 1 给出了作物收获前间作处理 0 ~ 100 cm 土壤速效氮、磷和钾的平均含量(质量比)。由此可看出,玉米和大豆的土壤速效氮、磷和钾含量变化趋势一致,其中氮和磷降低幅度最大的为 T1, T4 略低于 T1,但差异不显著;T2 和 T3 均显著低于 T1,其中 T2 在 4 种间作中降低幅度最小。这是因为玉米属于乔

本科作物,对氮和磷营养需求大,而大豆作为豆科作物,其固定的氮素一部分可以通过根际转移到玉米中,改善了玉米的供氮条件,促进了玉米生长。同时,大豆相对与玉米具有更强的质子释放能力,能够显著地酸化根际,促使难溶性土壤磷的活化和吸收。此外,大豆根系释放更多的有机酸,也能促进难溶性磷的活化,从而有利于两种作物的磷营养供给。两作物从土壤中吸收氮和磷营养越多,土壤中氮和磷含量的下降幅度越大。同时,土壤本身钾的含量较高,作物对钾营养的需求不如对氮和磷的需求大,故4种间作中土壤速效钾的差异不显著。因此,在地上部和/或地下部作用下,玉米对养分的竞争和大豆对玉米养分吸收利用均有促进作用,从而使得土壤养分资源得到高效利用,表现出间作优势。

表1 玉米/大豆间作中0~100 cm 养分含量

Tab.1 Nutrient content in soil (0~100 cm) in the maize/soybean intercropping mg/kg

序号	速效氮		速效磷		速效钾	
	玉米	大豆	玉米	大豆	玉米	大豆
T1	24.9 ^c	25.2 ^c	10.6 ^c	10.7 ^c	71.5 ^a	72.2 ^a
T2	30.3 ^a	31.5 ^a	14.0 ^a	14.6 ^a	73.6 ^a	74.0 ^a
T3	27.3 ^b	28.2 ^b	12.9 ^b	13.2 ^b	72.5 ^a	72.6 ^a
T4	25.1 ^c	26.5 ^c	11.1 ^c	12.0 ^c	72.6 ^a	73.0 ^a

注:表中数据为每个处理重复3次的平均值,不同字母表示不同处理间差异显著,下同。

2.3 养分吸收

由表2可知,从净占地面积上间作与单作氮、磷、钾的吸收量分析,除T2外,其余3种间作玉米的氮、磷、钾吸收量均高于单作玉米;间作大豆的氮、磷、钾吸收量均低于单作大豆。这可能是由于大豆为固氮植物,具有改良土壤肥力的作用,同时两作物共生期玉米对氮、磷、钾营养竞争的能力比大豆强,可以吸收更多的养分。成熟期玉米相对大豆的氮、磷、钾营养竞争比率,T1分别为1.63、1.92和1.50,T2分别为1.05、1.03和1.06,T3分别为1.28、1.32和1.27,T4分别为1.47、1.43和1.36。而共生期大豆对氮、磷、钾营养的竞争均处于劣势,吸收量少于单作。

用间作相对于单作净增的养分吸收量(按间作中两作物的面积比例求得的加权平均值计算)作为间作优势来比较地上部和地下部种间相互作用对玉米/大豆间作养分吸收优势的影响大小关系。T1的氮、磷、钾养分吸收优势分别为16.6、9.6和19.3 kg/hm²,T2分别为-6.7、-1.0、-8.9 kg/hm²,T3分别为14.6、7.6和7.4 kg/hm²,T4分别为15.1、9.8和13.9 kg/hm²。由此可知,除T2外,其

余3种间作均具有氮、磷、钾养分吸收优势。采用百分比求得法,T1与T2相比,净增的氮、磷、钾等养分的吸收量分别提高136.1%、119.6%和156.0%,T1与T3相比,分别提高21.6%、40.7%和36.6%,T1与T4相比,分别提高19.2%、32.6%和23.6%。

表2 玉米/大豆间作和单作中各作物养分吸收量

Tab.2 Nutrient uptake by two crops in the maize/soybean

序号	intercropping and sole cropping kg/hm ²					
	氮		磷		钾	
	玉米	大豆	玉米	大豆	玉米	大豆
T1	332.8 ^a	80.0 ^b	122.8 ^a	26.0 ^b	299.5 ^a	82.9 ^b
T2	266.0 ^c	96.0 ^a	82.6 ^c	32.0 ^a	250.6 ^c	95.6 ^a
T3	312.6 ^b	92.1 ^a	105.5 ^b	31.6 ^a	283.7 ^b	90.2 ^a
T4	322.6 ^a	83.0 ^b	109.9 ^a	29.6 ^b	290.9 ^a	86.1 ^b
T5	272.5 ^c		85.9 ^c		256.1 ^c	
T6		103.0 ^a		34.3 ^a		103.1 ^a

结果表明在相同处理条件下,地上部与地下部的作用对间作氮、磷、钾养分吸收优势与产量优势的趋势类似,均是地下部相互作用的影响大于地上部分,且二者之间具有交互作用,这主要是由于大豆是固氮植物,能改善土壤肥力,由于养分扩散和玉米行根系对大豆行土壤空间的直接占用,玉米可以利用大豆行的土壤养分,因此与单作相比,间作玉米可以吸收更多的土壤养分,而T2与T3处理由于根系隔离,玉米在养分竞争中的优势没有得到充分发挥。

2.4 光合参数

2.4.1 间作玉米

由表3可知,在拔节期,各处理的玉米光合参数无显著差异;在其他时期,T1玉米的 P_n 、 T_r 、 G_s 与 C_i 在4种间作中最高;T4略低于T1,但差异不显著;T2和T3均显著低于T1,其中T2玉米的光合参数在4种间作中最低。说明两作物共生初期,不同分隔方式对玉米光合参数的影响极小,随生育进程的推进,则出现了明显的变化。T1的地上部与地下部共同作用使玉米吸收了充足土壤水分和养分,从而增加了玉米叶面积和截光量,充足的阳光能使气孔充分张开,CO₂进入叶内速度加快,光合速率增强,蒸腾速率加快,同时,气孔导度变大,胞间CO₂浓度变大。与T1相比,T2则反之。T3与T1间仅地下作用不同,表明地下作用也可显著影响玉米的光合参数。T4与T1间仅地上作用不同,而上部作用对玉米光合参数的影响不显著。

2.4.2 间作大豆

由表4可知,在分枝期,4种间作处理的大豆光合参数无显著差异;在其他时期,T1大豆的 P_n 、 T_r 、 G_s 与 C_i 最低;T4略高于T1,但差异不显著;T2和T3均显著高于T1,其中T2玉米的光合参数在4种间

表3 间作玉米的光合参数

Tab.3 Photosynthesis parameters of intercropped maize

序号	拔节期				抽雄期				孕穗期			
	P_n	T_r	G_s	C_i	P_n	T_r	G_s	C_i	P_n	T_r	G_s	C_i
	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$
T1	27.35 ^a	7.96 ^a	1.06 ^a	196.60 ^a	30.65 ^a	5.12 ^a	1.07 ^a	195.82 ^a	28.15 ^a	6.27 ^a	0.91 ^a	210.87 ^a
T2	26.69 ^a	7.61 ^a	1.04 ^a	191.41 ^a	26.81 ^b	4.68 ^b	0.85 ^b	117.64 ^b	22.39 ^b	5.39 ^b	0.75 ^b	125.83 ^b
T3	27.82 ^a	7.40 ^a	0.97 ^a	192.67 ^a	27.41 ^b	4.70 ^b	0.91 ^b	129.14 ^b	24.73 ^b	5.45 ^b	0.77 ^b	156.12 ^b
T4	27.72 ^a	7.94 ^a	1.01 ^a	204.50 ^a	30.09 ^{ab}	4.90 ^{ab}	0.99 ^{ab}	188.53 ^{ab}	26.66 ^{ab}	6.16 ^{ab}	0.87 ^{ab}	199.83 ^{ab}

表4 间作大豆的光合参数

Tab.4 Photosynthesis parameters of intercropped soybean

序号	分枝期				开花期				鼓粒期			
	P_n	T_r	G_s	C_i	P_n	T_r	G_s	C_i	P_n	T_r	G_s	C_i
	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$
T1	12.37 ^a	3.82 ^a	0.76 ^a	166.92 ^a	13.92 ^a	2.16 ^b	0.60 ^a	166.29 ^b	10.91 ^b	2.81 ^c	0.59 ^c	180.09 ^b
T2	12.56 ^a	4.05 ^a	0.81 ^a	168.88 ^a	16.91 ^a	3.49 ^a	0.84 ^a	191.34 ^a	13.65 ^a	3.98 ^a	0.79 ^a	199.58 ^a
T3	12.80 ^a	3.97 ^a	0.80 ^a	179.69 ^a	15.42 ^{ab}	2.83 ^{ab}	0.69 ^{ab}	179.07 ^{ab}	12.06 ^{ab}	3.81 ^{ab}	0.66 ^{ab}	186.98 ^{ab}
T4	12.59 ^a	3.90 ^a	0.78 ^a	161.85 ^a	14.55 ^b	2.35 ^b	0.63 ^b	170.28 ^b	11.25 ^b	2.83 ^b	0.62 ^b	182.96 ^b

作中最高。说明两作物共生初期,不同分隔方式对大豆光合参数的影响极小,随生育进程的推进,大豆受到了玉米的影响而处于光竞争劣势。在T1中,地下部作用使玉米对大豆根系吸收的水分与养分有强烈的竞争作用,地上部作用使玉米对大豆叶片存在遮阴现象,因此,大豆叶片接收到的光照强度在间作处理中最弱,光合作用效率最低。T1与T2、T1与T3、T1与T4间不同的作用对大豆光合参数的影响顺序同上述对玉米的影响顺序。这说明在玉米大豆间作体系中,地上部作用受到地下部作用的影响,同时也间接证明了地下部分在间作系统中起主导作用。

2.5 间作产量

由表5可知,T1籽粒产量的玉米、大豆的土地当量比与生物学产量的玉米、大豆的土地当量比分别为0.82、0.41与0.76、0.44;T2分别为0.47、0.49与0.48、0.47;T3分别为0.54、0.47与0.57、0.48;T4分别为0.66、0.44与0.63、0.47。从净占地面积

间作与单作的产量分析,除T2外,其余3种间作的玉米籽粒产量和生物学产量均高于单作玉米;而4种间作的大豆籽粒产量和生物学产量均低于单作大豆。这是由于玉米/大豆间作种间相互作用是强烈的种间竞争,其中,玉米对资源的竞争力比大豆的强。成熟期玉米相对大豆的资源竞争能力,T1为0.79,T2为-0.08,T3为0.14,T4为0.39。表明除T2外,玉米在竞争中作为优势种而增产,大豆属于劣势种而减产。同时,与单作相比,玉米的增产与大豆的减产幅度均表现为T1最大,依次为T4、T3与T2(T2中的玉米和大豆均减产)。因此,与T1相比,其余3种处理中玉米的土地当量比均有所降低,而大豆的土地当量比则增加。

对于不同处理间籽粒产量和生物学产量的土地当量比,T1分别为1.23和1.20,T2分别为0.97和0.91,T3分别为1.01和1.02,T4分别为1.10和1.08。同时,用间作相对于单作的增产量(按间作

表5 玉米/大豆间作各作物产量及其土地当量比

Tab.5 Yields of two crops and land equivalent ratios (LER) in the maize/soybean intercropping

序号	籽粒产量						生物学产量					
	玉米/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	大豆/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	总产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	玉米土地 当量比	大豆土地 当量比	土地 当量比	玉米/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	大豆/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	总产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	玉米土地 当量比	大豆土地 当量比	土地 当量比
T1	16562 ^a	1997 ^c	18559 ^a	0.82	0.41	1.23	32966 ^a	7024 ^c	39990 ^a	0.76	0.44	1.2
T2	9495 ^c	2413 ^a	11908 ^b	0.47	0.49	0.97	20615 ^c	7540 ^a	28155 ^b	0.48	0.47	0.91
T3	10987 ^b	2272 ^{ab}	13259 ^b	0.54	0.47	1.01	24457 ^b	7706 ^{ab}	32163 ^b	0.57	0.48	1.02
T4	13255 ^{ab}	2150 ^b	15405 ^{ab}	0.66	0.44	1.10	27356 ^{ab}	7466 ^b	34822 ^{ab}	0.63	0.47	1.08
T5	10086 ^c		10086				21602 ^c		21602			
T6		2438 ^a	2438					7971 ^a	7971			

中两作物的面积比例求得的加权平均值计算)作为间作优势来比较地上部和地下部种间相互作用对玉米/大豆间作产量优势的影响大小关系。可知,与T2、T3和T4相比,T1的籽粒产量和生物学产量分别提高74.4%和59.9%,50.7%和34.7%,25.0%和20.5%。结果表明,T1的土地当量比和产量在4种处理中最高,这种明显的间作优势来自于地上部和地下部种间的相互作用。T2的土地当量比和产量在4种处理中最低,若将玉米和地上与地下部分的相互作用取消,会产生间作劣势而导致减产。T3只有地上部相互作用时,虽能表现出间作优势,但不显著。因此与T1相比,减产程度显著。T4只有地下部相互作用时,仍能表现出明显的间作优势。因此与T1相比,减产程度不显著。

综上所述,对于玉米/大豆间作的产量而言,地上部与地下部的相互作用大于单一因素的作用(地上部作用或地下部作用),其次,地下部作用大于地上部作用。

3 讨论

大量研究^[3]已证实在多种间作体系中都存在间作优势,因而作物生长所需的各种资源可以得到更好地利用,如水、养分和能量辐射等^[20]。本试验表明,在T1中,地上部与地下部的共同作用使玉米具有强资源竞争力,在地上部扩大了光、热等资源的吸收空间,同时在地下部扩大了水分和养分等资源的吸收范围。这是因为玉米和大豆间作后,大豆通过生物固氮和活化土壤难溶性磷,为玉米提供了更多的养分,增加了作物叶片的增长速率,因此玉米对大豆有强烈的遮光影响,严重抑制了大豆的生长。同时,两作物共生期间,大豆根系进入玉米根区的数量不多,使大豆相对玉米的竞争作用较弱^[4]。因此,玉米在竞争中作为优势种而增产,大豆属于劣势种而减产。但间作总产量仍表现出明显的增长,所以地上部与地下部的相互作用使玉米/大豆间作表现出明显的间作优势。同时,在T3中的地上部相互作用和T4中的地下部相互作用,也分别能表现出间作优势。但并非所有间作都有优势,郝艳如^[21]等在采用隔根对小麦/玉米间作优势的影响研究中指出,不隔根间作处理比塑料膜隔根间作处理的产量和氮

磷钾养分吸收量均有所提高,表现出间作优势,而塑料膜隔根处理表现为间作劣势。肖炎波^[22]等对豆科与禾本科间作体系在盆栽根系分隔试验中也得出相近的研究结果。本研究得出,T2具有间作劣势。因此,不同分隔方式引起了不同的地上部与地下部相互作用才是决定间作是否有优势的关键因素。

张福锁等^[23]研究发现,在玉米/蚕豆间作时不隔根的条件下,地上部与地下部相互作用对间作优势的影响具有同等重要性。刘广才等^[24]在研究小麦/玉米间作系统不隔根的条件下,地上部作用大于地下部作用对间作优势的影响。这些与本文研究结果不一致,可能是因为作物组合与试验处理方式等条件均不同,使地上部与地下部作用对间作优势的影响不同。同时,也有研究表明,在一定条件下,对于间作优势而言,间作种间根系的相互影响及养分在土壤中的移动比地上部的相互影响更为重要^[5]。

因此,在间作群体中,如果通过人工对复合群体结构以及结构走向进行主动调控,利用间作作物存在时间和空间上的生态位差异以及对光资源需求的各自的特殊性,即可进一步认知地上部与地下部作用对间作资源竞争的作用机理。鉴于国内外鲜有此方面的报道,更多的作用机理尚待进一步深入探讨。

4 结论

(1)在T1中,这种明显的间作优势来自于地上部和地下部种间相互作用两个方面。在T2中,如果取消两作物间地上与地下部分的相互作用,反而会产生间作劣势。在T3中,只有地上部相互作用时,虽能表现出间作优势,但不显著。在T4中,只有地下部相互作用时,仍能表现出明显的间作优势。

(2)在相同处理条件下,地上部与地下部的作用对间作作物的土壤储水量、土壤养分含量、养分吸收优势、光合参数与产量优势的影响趋势类似。

(3)地上部与地下部作用对玉米/大豆间作优势的影响大小顺序为:地上部与地下部共同作用的影响最为显著;其次,地下部大于地上部相互作用。同时,地下部也对地上部的相互作用产生影响,从而表现出一定的交互作用。这可能是因为对玉米/大豆的间作优势而言,最大的影响为光、热、水与肥的同时竞争,其次,竞争水与肥比竞争光与热的影响更重要。

参 考 文 献

- 1 陈阜,逢焕成. 冬小麦/春玉米/夏玉米间套作复合群体的高产机理探讨[J]. 中国农业大学学报,2000,5(5):12~16.
Chen Fu, Pang Huancheng. Research on mechanism for maximum yield of intercropping pattern wheat/corn/corn [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(5):12~16. (in Chinese)
- 2 李增嘉,李凤超,赵秉强. 小麦玉米玉米间套作的产量效应与光热资源利用率的研究[J]. 山东农业大学学报,1998,29(4):419~426.

- Li Zengjia, Li Fengchao, Zhao Bingqiang. Studies on light and heat resource use efficiency and yield effect of wheat/corn/corn intercropping system [J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1998, 29(4):419~426. (in Chinese)
- 3 李淑敏. 间作作物吸收磷的种间促进作用机制研究[D]. 北京:中国农业大学,2004.
Li Shumin. Mechanism of interspecific facilitation on phosphorus uptake by crops in intercropping system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 4 Caldwell M M. Competition between root systems in natural communities in root development and function [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987: 167~185.
- 5 Donald C M. The interaction of competition for light and for nutrients [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1958, 9(4): 421~435.
- 6 Marting M P L D, Snaydon R W. Root and shoot interactions between barley and field bean when intercropped [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1982, 19(1): 263~272.
- 7 Thorsted M D, Weiner J, Olesen J E. Above-and below-ground competition between intercropped winter wheat *triticum aestivum* and white clover *Trifolium repens* [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(2): 237~245.
- 8 Jastrow J D, Miller R M. Neighbor influences on root morphology and mycorrhizal fungus colonization in tallgrass prairie plants [J]. *Ecology*, 1993, 74(2): 561~569.
- 9 Wilson J B. Shoot competition and root competition [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1988, 25: 279~296.
- 10 Berry J, Björkman O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, 31: 491~543.
- 11 高阳,段爱旺,刘祖贵,等. 玉米和大豆条带间作方式下的光环境特性[J]. *应用生态学报*,2008,19(6):1248~1254.
Gao Yang, Duan Aiwang, Liu Zugui, et al. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1248~1254. (in Chinese)
- 12 黄高宝. 集约栽培条件下间套作的光能利用理论发展及其应用[J]. *作物学报*,1999,25(1):16~24.
Huang Gaobao. Development of light utilization theory for wheat/corn intercropping in condition of intensive cultivation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(1): 16~24. (in Chinese)
- 13 张洁,李天来,徐晶. 昼间亚高温处理时期对日光温室番茄光合作用与产量的影响[J]. *农业工程学报*,2008,24(3): 193~197.
Zhang Jie, Li Tianlai, Xu Jing. Effects of sub-high temperature in daytime from different stages on tomato photosynthesis and yield in greenhouse [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(3): 193~197. (in Chinese)
- 14 陈俊英,吴普特,张智韬,等. 土壤赤水性对含水率的响应模型研究[J]. *农业机械学报*,2012,43(1): 63~67,82.
Chen Junying, Wu Pute, Zhang Zhitao, et al. Response models for soil water repellency and soil moisture [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(1): 63~67,82. (in Chinese)
- 15 徐玉英. 土壤含水量计算方法[J]. *东北水利水电*,2005,23(7):29~30.
Xu Yuying. Method of soil moisture [J]. *Water resources Hydropower of Northeast China*, 2005, 23(7): 29~30. (in Chinese)
- 16 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 2版. 北京:农业出版社,1986:68~69.
- 17 王竹,杨文钰,吴其林. 玉/豆套作荫蔽对大豆光和特性与产量的影响[J]. *作物学报*,2007,33(9):1502~1507.
Wang Zhu, Yang Wenyu, Wu Qilin. 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. (in Chinese)
- 18 Willey R W, Rao M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops [J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16: 117~125.
- 19 Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients [J]. *Field Crops Research*, 1993, 34(3~4): 319~334.
- 20 李来祥,刘广才,李隆. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献研究[J]. *干旱地区农业研究*,2008,26(1):74~80.
Li Laixiang, Liu Guangcai, Li Long. Intercropping advantage and contribution of above-ground and under-ground interactions in wheat-maize intercropping [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(1): 74~80. (in Chinese)
- 21 郝艳如,劳秀荣,赵秉强,等. 隔根对小麦/玉米间套种植生长特性的影响[J]. *麦类作物学报*,2003,23(1):71~74.
Hao Yanru, Lao Xiurong, Zhao Bingqiang, et al. Effect of separating root method on wheat and corn intercropping system [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(1): 71~74. (in Chinese)
- 22 肖焱波,李隆,张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮素转移研究[J]. *中国农业科学*,2005,38(5):965~973.
Xiao Yanbo, Li Long, Zhang Fusuo. The interspecific Nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean [J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2005, 38(5): 965~973. (in Chinese)
- 23 Zhang F S, Li L, Sun J H. Contribution of above-and below-ground interactions to intercropping [M]// Horst W J, Schenk M K, Bürkert A, et al. *Plant nutrition-food security and sustainability of agro-ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, 2001: 978~979.
- 24 刘广才,李隆,黄高宝,等. 大麦/玉米间作优势及地上部和地下部因素的相对贡献研究[J]. *中国农业科学*,2005,38(9): 1787~1795.
Liu Guangcai, Li Long, Huang Gaobao, et al. Intercropping advantage and contribution of above-ground and below-ground interactions in the barley-maize intercropping [J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2005, 38(9): 1787~1795. (in Chinese)

Abstract: Study on modified sandy loam soil and increased tomato yield by using biochar was conducted through the pot experiment. There were five installed treatments that sandy loam soil (CK), per kilogram sandy loam soil plus 10 g of biochar (C10), per kilogram sandy loam soil plus 20 g biochar (C20), per kilogram sandy loam soil plus 40 g of biochar (C40), and per kilogram sandy loam soil plus 60 g of biochar (C60). Results show that biochar can improve soil fertility and the effect of higher biochar application is remarkable. Compared with CK, the content of organic matter in treatment C60 increased by 560%. In treatments C60 and C40, both available N increases by 290% and 150% respectively; both available P increases by 410% and 290%, and both available K increases by 290% and 150% respectively. Soil water content in treatment C60 is 170% higher than CK. Using biochar can effectively improve tomato yield. Comparing with CK treatment, tomato yield increases 98% and 170% in treatments C60 and C40, respectively, and the largest increase is in treatment C40. Through correlation analysis, water and fertilizer are important factors affecting tomato yield, and correlation is more than 80%. In order to make full use of existing resources, reduce the use of chemical fertilizers, save water resources, improve agricultural land, water and ecological environment, application of biochar technology is a new idea.

Key words: Biochar Saving water Preserving fertility Tomato yields Sandy loam soil

(上接第 136 页)

Effect of Above-and Below-Ground Interactions on Maize/Soybean Intercropping Advantage

Lü Yue¹ Wu Pute² Chen Xiaoli³ Wang Yubao² Zhao Xining²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid regions of China, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Architecture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The nutrient uptake, photosynthesis and yield of different separation methods were measured to analyze resource competition from above-and below-ground interaction. The treatments included no shoot or root separation (T1), shoot and root separation (T2), root separation (T3), shoot separation (T4), sole maize (T5) and soybean (T6). The land equivalent ratios of grain yield and biomass were 1.23 and 1.20 for T1, 0.97 and 0.91 for T2, 1.01 and 1.02 for T3, 1.10 and 1.08 for T4, respectively. Competitiveness of maize relative to soybean was 0.79 for T1, -0.08 for T2, 0.14 for T3 and 0.39 for T4, respectively. The nutrient competitive ratios of maize relative to soybean were 1.63, 1.92 and 1.50 for T1; 1.05, 1.03 and 1.06 for T2; 1.28, 1.32 and 1.27 for T3; 1.47, 1.43 and 1.36 for T4, respectively. Except the jointing stage, the P_n , T_r , G_s and C_i of maize were the highest for T1; and the values for T4 were the second; and the values for T2 and T3 were remarkable lower than that for T1. Except the branching stage, the parameters of soybean were the lowest for T1, and the values for T2 and T3 were significantly higher than that for T1. In summary, as for maize/soybean intercropping advantages, the interactions of above- and below-ground parts was greater than that under the action of a single factor, and there was greater role from below-ground part than above-ground part.

Key words: Maize/soybean intercropping Shoot interaction Root interaction