植物营养与肥料学报 2014,20(6):1395-1402
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0609

玉米-大豆和玉米-甘薯套作对玉米生长及氮素吸收的影响

廖敦平,雍太文*,刘小明,杨峰,苏本营,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:【目的】利用根系分隔技术,研究不同需氮特性的旋花科、豆科作物与玉米套作后,玉米的生长特性与养分吸收差异及其增产机理。**【方法】**采用石英砂培盆栽试验,二因素完全随机试验设计。以玉米-大豆、玉米-甘薯两种套作模式为研究对象,设计不分隔、部分分隔、完全分隔三种隔根方式。分析不同套作模式下不同隔根方式对玉米地下根系活力、根系生物量及地上植株叶片光合特性、籽粒产量和吸氮量的影响。**【结果】**1)不同种植模式对玉米生长有显著影响,不分隔处理时,与大豆套作的玉米根系活力、籽粒重及地上植株总吸氮显著高于与甘薯套作的玉米,分别高6.25%、8.69%和18.89%;部分分隔或完全分隔时,两套作处理间差异不显著($P>0.05$)。2)隔根方式影响玉米的物质积累及籽粒产量,表现为不分隔>部分分隔>完全分隔。3)不分隔有助于促进共生玉米生长,但不同套作模式的影响效果不一致;玉米-大豆套作处理下,不分隔处理的玉米根系活力、净光合速率、籽粒产量和总吸氮量均高于隔根处理,比完全分隔处理的分别高25.65%、27.31%、64.69%和71.65%;玉米-甘薯套作下增加幅度为17.59%、19.83%、52.38%和46.21%,分别比玉米-大豆套作处理低31.44%、27.39%、19.03%和35.51%。4)相关分析表明,两种套作处理玉米地下根系干重与地上植株干物质重、叶片光合速率及籽粒重显著正相关,相关系数分别为0.984、0.927和0.986($P<0.01$);且地下根系活力与地上植株叶片净光合速率显著正相关,相关系数达0.929($P<0.01$)。**【结论】**种植模式和隔根方式显著影响了玉米的物质积累及氮素吸收。根系不分隔时,玉米-大豆套作处理下玉米的根系活力、净光合速率、生物量、籽粒产量及总吸氮量显著高于玉米-甘薯套作;隔根处理导致的生物量和吸氮量下降主要是由根系活力降低引起的。与玉米-甘薯套作相比,大豆促进了玉米根系活力的提高,有效调节了玉米地上部植株光合作用及干物质积累,实现产量和氮素吸收的增加。

关键词:套作;根系分隔;玉米;干物质积累;氮素吸收
中图分类号:S151.9;S314 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2014)06-1395-08

Growth and nitrogen uptake of maize relay intercropped with soybean or sweet potato

LIAO Dun-ping, YONG Tai-wen*, LIU Xiao-ming, YANG Feng, SU Ben-ying, 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:【Objectives】A root barrier technique was attempted to investigate the difference of growth and nitrogen uptake of maize which were relay intercropped with legume and convolvulaceae crops, the yield increase mechanism of intercropping system on maize would be explored.**【Methods】**Water culture experiment was carried out with 2×3 randomized complete block design. Maize were relay intercropped with soybean and sweet potato separately, three root partitions (no partition, partial root partition and complete root partition) were used. The root activity, root dry matter, leaf photosynthetic characteristics, grain yield and N uptake were investigated.**【Results】**1) The relay intercropping patterns significantly affected on maize growth ($P<0.05$). The root activity, grain weight and above-ground total N uptake of maize were 6.25%, 8.69% and 18.89% significantly higher when relay intercropped

收稿日期:2013-12-12 **接受日期:**2014-09-01
基金项目:国家现代农业大豆产业技术体系专项(CARS-04-PS19);公益性行业(农业)科研专项(201203096)资助。
作者简介:廖敦平(1990—),女,四川资阳人,硕士,主要从事作物高产理论与栽培技术研究。E-mail:liao_dunping@163.com
* 通信作者 Tel:028-86290960,E-mail:yongtaiwen@sicau.edu.cn;E-mail:wenyu.yang@263.net

with soybean than with sweet potato under without root barrier treatment, respectively. However, the differences were not significant under root barrier treatments ($P>0.05$). 2) The dry matter accumulation and grain yield of maize were affected by the root barrier treatments, showing order of no root partition > partial root partition > complete root partition. 3) No root partition treatment could improve the growth of intercropped maize. In maize-soybean intercropping, the root activity, photosynthetic rate, grain yield and total N uptake of maize was higher in treatments of without root partial than with barrier, their differences were 25.65%, 28.45%, 64.69% and 71.65%, respectively. In maize-sweet potato relay intercropping, their differences were 17.59%、19.83%、52.38% and 46.21%, respectively. 4) The root biomass are positive significantly correlated with the above-ground biomass, the photosynthetic rate and the grain yield, the correlation indexes are 0.984, 0.927 and 0.986, respectively ($P<0.01$). The root activity is positive significantly correlated with photosynthetic rate, the correlation index is 0.929 ($P<0.01$). **【Conclusions】**The root activity, photosynthetic rate, biomass, grain yield and total N uptake of maize can significantly increased, which contributed to the high yield and N uptake of maize. The increase effects are higher when maize are intercropped with soybean than with sweet potato.

Key words: relay intercropping; maize; dry matter accumulation; nitrogen uptake

旱地新三熟“麦－玉－豆”模式作为西南地区新型种植模式[1-2]，与传统的“麦－玉－薯”模式相比能更好地利用氮素，提高群体产量，具有明显的增产节肥优势[3-5]。前人对间套作增产机理的研究主要集中在作物地上部光、热资源的分配和利用方面[6-9]。随着根际研究方法的改进，关于作物地下部种间互作关系、根际效应及根系分布规律的研究越来越多。由于根系空间分布的异质性和根系间的交互作用导致根系生长状况发生改变，影响作物氮素的吸收与转移，进而影响作物的养分利用和产量[10-12]。叶优良等[13]探讨了小麦/玉米间作中根系互作对作物氮素吸收的影响，结果发现不分隔处理的作物吸氮量高于分隔处理的。雍太文等[2-5]研究了小麦－玉米－大豆与小麦－玉米－甘薯两种套作体系的氮素吸收利用，结果表明，两种体系下不分隔的生物产量与吸氮量均高于完全分隔的，并且利用^{15}N标记方法发现，大豆的^{15}N向玉米转移，玉米与甘薯之间的^{15}N从玉米向甘薯转移，表明玉米－大豆套作体系具有明显的节氮效应[6]。Xiao 等[14]用同样的方法证明了蚕豆向小麦发生了氮转移，并且不同隔根方式下转移量有差异。

玉米－大豆套作较玉米－甘薯套作模式具有增产节肥的优势已得到证实[3-4]，但关于作物间地下相互作用对植株地上物质积累和光合同化的影响方面来阐述其增产的机理尚未报道。因此，本文拟采用石英砂培盆栽试验，排除土壤环境的干扰，利用根系分隔技术来研究不同吸氮特性的作物与玉米搭配对玉米生长及氮素吸收的差异，为揭示两套作模式的增产及养分吸收机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于2012年在四川农业大学教学农场干旱棚内进行，研究区位于四川省雅安市雨城区(29°59′N，103°00′E)。玉米(*Zea maize*)品种为川单418(四川农业大学玉米所供种)、大豆(*Glycine max*)品种为南豆12(四川省南充市农业科学研究所供种)、甘薯(*Ipomoea batatas*)品种为川薯164(四川省农业科学院作物研究所供种)。

1.2 试验设计

利用根系分隔盆栽试验，采用二因素完全随机试验设计。因素一为套种作物，玉米－大豆套作(M1)、玉米－甘薯套作(M2)；因素二为根系分隔处理，设不分隔(N1)、不完全分隔(N2)和完全分隔(N3)，共6个处理，3次重复。玉米、大豆种子催芽前用自来水浮选，去除瘪粒。剩下饱满的种子用10%双氧水灭菌1 h左右，然后在饱和$CaSO_4$溶液中通气浸泡4～5 h，在培养皿中催芽后播到粗石英砂中萌发。待玉米、大豆出苗后，挑选生长一致的幼苗移栽到细石英砂内培养。甘薯苗直接从甘薯蔓上剪取，放入细石英砂中培养。移苗后，开始每2～3天浇半营养液100 mL/盆，2周后改为每隔一天浇全营养液150 mL/盆，1个月后，改为每天浇营养液200 mL/盆，两个月后将营养液浓度增加一倍，三个月后增加两倍，保证每个处理养分水分环境一致。使用塑料桶直径为34 cm、高40 cm，大豆每桶4株(2穴)，玉米、甘薯每桶2株(2穴)。石英砂用0.5%硫酸浸泡2天，然后用水冲洗数次，每桶装砂

12 kg。玉米 4 月 12 日移栽、8 月 3 日收获，大豆、甘薯 6 月 2 日移栽、10 月 25 日收获。根系部分分隔采用尼龙网（Ø30 μm），完全分隔处理采用塑料膜。

改良 Hoagland's 营养液配方：KNO_3 506 mg/L、NH_4NO_3 80 mg/L、$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 945 mg/L、KH_2PO_4 136 mg/L、$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 493 mg/L、H_3BO_3 1×10^{-6} mmol/L、$MnSO_4 \cdot 7H_2O$ 1×10^{-6} mmol/L、$CuSO_4 \cdot 7H_2O$ 1×10^{-7} mmol/L、$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 1×10^{-6} mmol/L、$(NH_4)_6Mo_2O_4 \cdot 4H_2O$ 5×10^{-9} mmol/L、$FeSO_4$ 1×10^{-4} mmol/L，pH 6.0。

1.3　测定指标与方法

1.3.1 玉米叶片光合参数　于玉米吐丝期，采用便携式光合系统测定仪 LI-6400（LI-CORLincoln，USA）在晴天上午 9～11 点，测定每株玉米穗位叶的净光合速率（Pn）、气孔导度（Gs）、胞间二氧化碳浓度（Ci）、蒸腾速率（Tr）等光合参数。

1.3.2 生物量及全氮含量　于成熟期取样，按地上部分秸秆、籽粒和地下部根系分开，地上部植株在 105℃下杀青 30 min 后，在 70℃下烘干至恒重，用百分之一的电子天平称取干物质重。烘干后的茎叶及籽粒粉碎过 0.3 mm 筛后，用凯式定氮法测定全氮含量。

1.3.3 根系活力和根系干重　于玉米喇叭口期、吐丝期，称取所有样段的根系鲜重，混匀后一部分根用 TTC 法测定根系活力[15]，另一部分用于测定水分含量，计算出根系干重。

1.4　统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 进行试验数据的整理，利用 SPSS 17.0 进行统计分析。

2　结果和分析

2.1　两种套作模式对玉米干物质积累的影响

表 1 表明，套种显著提高玉米生物量，套种大豆好于套种甘薯，尤其是籽粒重和总生物量。套种作物根系不分隔处理（N1）下，套种大豆的玉米籽粒重和总生物量较套种甘薯分别提高 8.69% 和 13.72%；根系部分分隔和全部分隔后，两种套种作物处理差异不显著，但部分分隔（N2）下套种大豆较套种甘薯仍然表现为优势，玉米籽粒重和总生物量分别提高 5.67% 和 6.39%；根系分隔显著影响玉米生物量，两套种作物不分隔处理的干物质积累量显著高于部分分隔，又显著高于完全分隔。套种大豆的玉米不进行根系分隔时，秸秆重及籽粒重较完全分隔分别高 56.1% 与 64.69%，套种甘薯的分别高 35.89% 与 52.38%。

表 1　套作模式及隔根方式对玉米生物量的影响（g/pot）

Table 1　The effect of planting patterns and root partition on biomass of maize

处理 Treatment	根干重 Root dry matter			秸秆干重 Straw dry matter			籽粒重 Grain weight			总生物量 Total biomass		
	M1	M2	平均 Means	M1	M2	平均 Means	M1	M2	平均 Means	M1	M2	平均 Means
N1	34.20 a	30.75 a	32.48 a	133.00 a	112.65 b	122.83 a	88.85 a	81.75 b	85.30 a	256.05 a	225.15 b	240.60 a
N2	24.85 a	22.75 a	23.80 b	95.40 a	89.90 a	92.65 b	59.65 a	56.45 a	58.05 b	179.90 a	169.10 a	174.50 b
N3	21.05 a	19.30 a	20.18 b	85.20 a	82.90 a	84.05 b	53.95 a	53.65 a	53.80 c	160.20 a	155.85 a	158.03 c
显著性检验 Significance test												
种植模式（M） Cropping pattern	ns			*			*			* *		
根系处理（N） Root treat	* *			* *			* *			* *		
M×N	ns			ns			ns			ns		

注（Note）：M1—玉米－大豆套作 Maize-soybean relay intercropping；M2—玉米－甘薯套作 Maize-sweet potato relay intercropping；N1—根系不分隔 No root partition；N2—根系部分分隔 Partial root partition；N3—根系完全分隔 Complete root partition. 同行数值后不同字母表示相同隔根处理下 M1 和 M2 模式间比较差异显著（$P<0.05$）；平均值后不同字母表示不同根系处理间差异显著（$P<0.05$）Values followed by different letters within the same row except the values in the means indicate a significant difference between M1 and M2 in the same root partition（$P<0.05$）；Means followed by different letters in a column are significant among different root partition treatments（$P<0.05$）；ns—No significance；*— $P<0.05$；* *— $P<0.01$.

2.2 两种套作作物对玉米氮素吸收的影响

表2表明,玉米吸氮量与玉米干物质积累规律一致,在没有进行根系分隔时,与大豆套种的高于与甘薯套种(M1 > M2),其中M1模式籽粒吸氮量和总吸氮量较M2模式分别高9.74%和18.89%;隔根处理下两模式玉米吸氮量差异不显著。隔根方式同样显著影响玉米氮素吸收,不进行根系分隔时,玉米籽粒吸氮量和总吸氮量显著高于部分隔根和完全隔根,与大豆套种的玉米籽粒吸氮量和总吸氮量比根系完全分隔时分别高38.82%和71.65%,与甘薯套种的玉米仅高27.53%和46.21%,比与大豆套种的增幅降低29.08%和35.51%。

表2 套作作物及隔根方式对玉米吸氮量的影响(mg/pot)

Table 2 The effect of relay intercropping crops and root partition on nitrogen uptake of maize

处理 Tretment	根吸氮量 Root N uptake			秸秆吸氮量 Straw N uptake			籽粒吸氮量 Grain N uptake			总吸氮量 Total N uptake		
	M1	M2	平均 Means	M1	M2	平均 Means	M1	M2	平均 Means	M1	M1	平均 Means
N1	44.97 a	40.13 a	42.55 a	235.55 a	183.57 b	209.56 a	170.59 a	155.45 b	163.02 a	451.10 a	379.43 b	415.27 a
N2	30.31 a	28.21 a	29.26 b	149.46 a	142.47 a	145.97 b	133.95 a	127.07 a	130.51 b	316.20 a	297.77 a	306.99 b
N3	22.26 a	22.20 a	22.23 b	114.58 a	115.42 a	115.00 c	122.89 a	121.89 a	122.39 b	262.80 a	259.51 a	261.16 c
显著性检验 Significant test												
种植模式(M) Cropping pattern	ns			ns			ns			*		
根系分隔(N) Root treat	*			* *			* *			* *		
M×N	ns			ns			ns			ns		

注(Note): M1—玉米-大豆套作 Maize-soybean relay intercropping; M2—玉米-甘薯套作 Maize-sweet potato relay intercropping; N1—根系不分隔 No root partition; N2—根系部分分隔 Partial root partition; N3—根系完全分隔 Complete root partition. 同行不同字母比较表示相同隔根处理下M1和M2模式间比较差异显著($P<0.05$);平均值列不同字母表示不同根系处理间差异显著($P<0.05$) Values followed by different letters within the same row except the values in the means indicate a significant difference between M1 and M2 in the same root partition($P<0.05$); Means followed by different letters in a column are significant among different root partition treatments ($P<0.05$); ns—No significance; *—$P<0.05$; **—$P<0.01$.

2.3 种植套种作物对玉米叶片光合参数的影响

由图1可知,套种作物对玉米叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)有显著影响。N1条件下,M1处理的Pn、Gs、Tr较M2处理分别高7.21%、12.96%和11.01%,而N2、N3条件下两模式差异较小。玉米叶片Pn受到隔根方式的影响,N1处理显著高于N2、N3处理,两模式增加幅度不一致;M1模式下,N1处理的玉米Pn和Gs较N3处理分别高27.31%和69.44%,而M2模式下,N1处理仅比N3处理分别高19.83%和48.62%。胞间二氧化碳浓度(C_i)在两模式的各隔根条件下未表现出显著差异($P>0.05$)。

2.4 套种作物对玉米根系活力的影响

图2表明,在玉米喇叭口期(共生前期),两套种作物差异不显著,隔根处理间也无显著差异。在玉米吐丝期(共生期),两套种作物玉米根系活力差异显著,不进行根系分隔,套种大豆的玉米根系活力较套种甘薯的提高6.25%。两种套种作物玉米根系活力均表现为不进行根系分隔的显著高于根系部分分隔和完全分隔,套种大豆的玉米根系活力分别提高15.96%和25.65%,套种甘薯的仅分别高12.28%和17.59%。

2.5 玉米根系活力与各指标相关性分析

由表3可知,根干重与秸秆重、籽粒重呈极显著相关关系,相关系数分别达0.984($P<0.01$)和0.986($P<0.01$),不同套种作物玉米根系生长的差异是导致地上部干物质积累与产量形成差异的主要原因。玉米干物质积累与吸氮量也呈显著正相关关系,具体表现为:籽粒吸氮量和籽粒重存在显著相关关系,相关系数为0.993($P<0.01$)。说明不同模式及隔根方式间,玉米吸氮量的差异与干物质积累紧密相关。玉米根系活力与Pn、Gs存在显著相关关系,

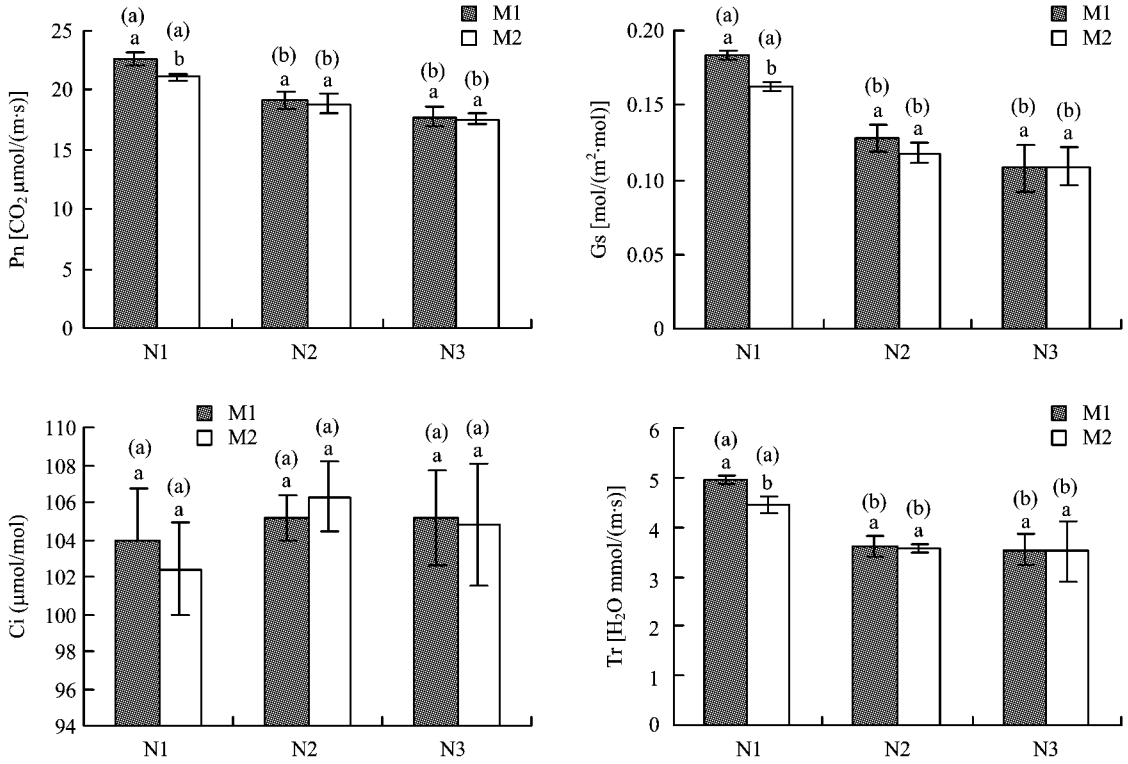

图 1　套种作物及隔根方式对玉米叶片光合参数的影响

Fig. 1　The effect of relay intercropping crops and root partition on photosynthesis of maize

[注(Note):M1—玉米-大豆套作 Maize-soybean relay intercropping;M2—玉米-甘薯套作 Maize-sweet potato relay intercropping; N1—根系不分隔 No root partition; N2—根系部分分隔 Partial root partition;N3—根系完全分隔 Complete root partition. 同一隔根方式下,方柱上不同字母表示 M1 与 M2 模式间差异显著($P<0.05$);同一种植模式下,括号内不同字母表示 N1、N2、N3 隔根处理间差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate a significant difference between M1 and M2 under the same root partition pattern ($P<0.05$); Different letters in parentheses indicate a significant difference among root partition treatments in the same planting pattern ($P<0.05$).]

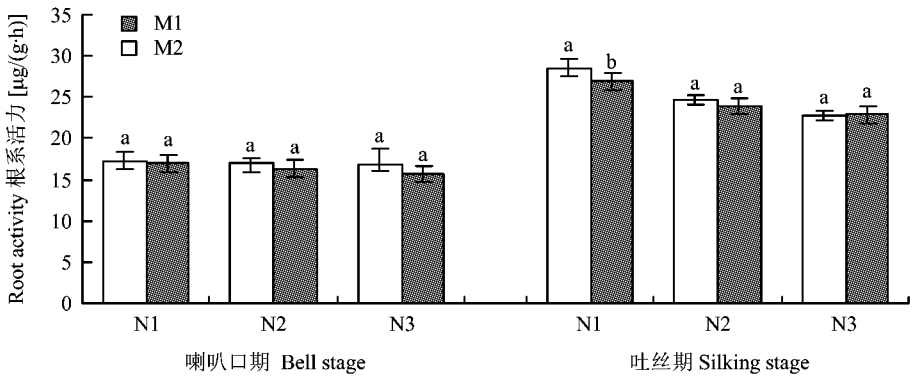

图 2　不同套种作物及隔根方式对玉米根系活力的影响

Fig. 2　Effect of relay intercropping crops and root partition treatments on root activity of maize

[注(Note):M1—玉米-大豆套作 Maize-soybean relay intercropping;M2—玉米-甘薯套作 Maize-sweet potato relay intercropping; N1—根系不分隔 No root partition; N2—根系部分分隔 Partial root partition;N3—根系完全分隔 Complete root partition. 方柱上不同字母表示相同隔根处理下 M1 与 M2 模式间差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate a significant difference between M1 and M2 under the same root partition pattern ($P<0.05$).]

相关系数为 0.929($P<0.01$)和 0.997($P<0.01$);籽粒重也与光合指标 Pn、Gs 显著相关,相关系数分别为 0.869($P<0.05$)和 0.993($P<0.01$)。隔根处理导致玉米 Pn、Gs 也下降,最终表现为籽粒重下降。

表3 不同套种作物玉米各参数值及其相关性分析

Table 3 Root activity, biomass, N uptake and photosynthetic rates and their correlations when intercropped with different crops

相关系数 Coefficient	根系活力 Root activity	根干重 Root dry biomass	秸秆重 Straw dry biomass	籽粒重 Grain weight	籽粒吸氮量 Grain N uptake	总吸氮量 Total N uptake	Pn	Gs	Ci	Tr
根系活力 Root activity	1									
根干重 Root dry biomass	0.993**	1								
秸秆重 Straw dry biomass	0.989**	0.984**	1							
籽粒重 Grain weight	0.984**	0.986**	0.979**	1						
籽粒吸氮量 Grain N uptake	0.994**	0.991**	0.995**	0.993**	1					
总吸氮量 Total N uptake	0.996**	0.989**	0.996**	0.976**	0.992**	1				
Pn	0.929**	0.927**	0.884*	0.869*	0.885*	0.919*	1			
Gs	0.997**	0.991**	0.991**	0.993**	0.99**	0.993**	0.898*	1		
Ci	-0.648	-0.665	-0.618	-0.742	-0.689	-0.600	-0.462	-0.693	1	
Tr	0.967**	0.963**	0.982**	0.988**	0.987**	0.970**	0.810	0.982**	-0.71	1

注(Note): Pn—表示净光合速率 Photosynthetic rate; Gs—表示气孔导度 Conductance; Ci—表示胞间二氧化碳浓度 Intercellular CO_2 concentration; Tr—表示蒸腾速率 Transpiration rate. 皮尔逊积矩相关系数检验 Pearson's correlation test, *—$P<0.05$, **—$P<0.01$.

3 讨论

3.1 玉米与大豆和甘薯的种间作用

同一高位作物与不同低位作物搭配,群体产量表现差异[4-5,10,16]。不同物种生理生态、养分需求的差异使得种间互作必然发生,这种作用既包括种间竞争也包括种间互惠[17],竞争与互惠的结果共同决定间套作优势[6-10]。禾本科作物与氮素竞争力不同的作物搭配,其物质积累和氮素吸收有显著差异[1-2]。小麦与蚕豆间作可使小麦生物量增加48%、吸氮量增加29.94%,而小麦与大豆间作其生物量仅增加27%、吸氮量仅增加15.13%[16]。小麦与蚕豆表现为种间互惠,与大豆表现为种间竞争。本研究中,套种作物显著影响了玉米的物质积累和养分吸收。不分隔处理下两模式籽粒重、总生物量和总吸氮量均差异显著,与大豆套作的玉米籽粒重、总生物量及总吸氮量较与甘薯套作的玉米分别高8.69%、13.72%和18.89%。表明与大豆套作更能促进玉米生长和氮素吸收,这与王小春[18]、雍太文[4]等人的研究结果一致。玉米-大豆属于禾本科与豆科套作,玉米-甘薯属于禾本科与旋花科套作。^{15}N标记试验发现[3],玉米-大豆套作中玉米对氮素大量消耗促进了大豆的固氮作用,使得更多的氮化合物向玉米根区迁移,从而使玉米的吸氮量显著提高;而甘薯不仅吸收利用自身肥料氮,还较多地吸收利用了土壤残茬和玉米的肥料氮,造成土壤肥力下降[4-5]。

3.2 玉米与不同作物搭配的化感作用

作物竞争主要是通过根系对土壤及其溶液的选择吸收来实现的,根系特点、形态分布和活力大小是群体高产的基础[10-11,19-23]。根系活力与光合速率密切相关[24-27],且根系生长状况改变对气孔开闭状况也有一定的影响[28]。本研究中,不分隔处理下,玉米-大豆模式较玉米-甘薯模式显著提高了玉米的根系活力(图2);与前人研究结果不同的是,本试验采用砂培盆栽且保证相同的养分环境。三种隔根方式相比,虽然部分根系分隔处理玉米的籽粒吸氮量与完全分隔差异不显著,但籽粒重和总生物

量和总吸氮量显著高于完全分隔。说明玉米生长差异的原因除了作物间竞争与互补,还可能来自于作物间的"化感作用"。有研究发现,种植模式会影响作物根系分泌特性和化感效应。单作小麦主要分泌苹果酸和柠檬酸,间作小麦则分泌草酸和柠檬酸[29]。用根系分泌物处理种子[30],发现混播能够弱化高浓度化感物质的负效应。活性炭处理显著影响了玉米的产量和吸氮量,玉米-大豆模式促进了玉米生长[31-32]。小麦-玉米-大豆和小麦-玉米-甘薯模式中,大豆茬口小麦根系分泌有机酸总量和可溶性糖含量明显高于甘薯茬口,大豆茬口显著提高小麦根系干重和根系活力[3]。甘薯和大豆分泌特性不同,与玉米互作时的化感效应就不同。豆科作物根系能分泌一定数量的氮化合物[33],这些化合物可被禾本科作物吸收。此外,大豆根系分泌物能显著提高玉米根系活力,对植株高度和干重表现促进作用[34],为禾本科作物创造了良好的根际环境。本研究相关性分析表明,根系活力与净光合速率、气孔导度、生物量和产量存在极显著的正相关关系(表3)。玉米-大豆套种,大豆改善了玉米根系环境,大豆的化感促进作用使玉米根系活力提高,从而引起气孔导度和光合速率的提高[24-25],最终显著地提高了玉米生物量和产量。

4 结论

与大豆套作模式下,玉米的根系活力、净光合速率、生物量、籽粒产量及总吸氮量显著高于与甘薯套作;隔根处理阻碍了大豆根系分泌的含氮化合物和有益化感作用对玉米根系环境的影响,反映为玉米根系活力降低,生物量和吸氮量下降,进而影响地上部物质积累与氮素吸收。与玉米-甘薯套作相比,与大豆套作,可以更有效地促进玉米根系活力的提高,调节玉米地上部植株光合作用及干物质积累,实现产量和氮素吸收的增加。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 雍太文,杨文钰,樊高琼,等. "麦/玉/豆"套作种植模式氮肥周年平衡施用初步研究[J]. 中国土壤与肥料,2009,(3):31-35.
Yong T W, Yang W Y, Fan G Q *et al*. Study on the annual balance application of nitrogen fertilizer in the relay-cropping system of "wheat/maize/soybean"[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009, (3): 31-35.

[3] 雍太文,陈小容,杨文钰,等. 不同种植方式对小麦根系分泌物、地上部氮素吸收及土壤养分的影响[J]. 作物学报,2010,36(3):477-485.
Yong T W, Chen X R, Yang W Y *et al*. Effect of different cropping systems on root exudates and above ground nitrogen uptake and soil nutrition of wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(3): 477-485.

[4] 雍太文,杨文钰,任万军,等. 两种三熟套作体系的氮素转移及吸收利用[J]. 中国农业科学,2009,42(9):3170-3178.
Yong T W, Yang W Y, Ren W J *et al*. Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3170-3178.

[5] 雍太文,杨文钰,王小春,樊高琼. 两种三熟套作体系中氮素吸收利用及种间相互作用[J]. 四川农业大学学报,2009,27(2):167-172.
Yong T W, Yang W Y, Wang X C, Fan G Q. Nitrogen uptake and utilization and interspecies reciprocity in the two relay-planting systems[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2009, 27(2): 167-172.

[6] 李隆,李晓林,张福锁,等. 小麦大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(2):140-146.
Li L, Li X L, Zhang F S *et al*. Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in wheat/soybean intercropping[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 140-146.

[7] Li L, Sun J H, Zhang F S *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.

[8] Li L, Sun J H, Zhang F S *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.

[9] Li L, Zhang F S, Li X L *et al*. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65(1): 61-71.

[10] Li L, Sun J H, Zhang F S *et al*. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. Oecologia, 2006, 147(2): 280-290.

[11] 唐劲驰,Mbotrha I A,佘丽娜,等. 大豆根构型在玉米/大豆间作系统中的营养作用[J]. 中国农业科学,2005,38(6):1196-1203.
Tang J C, Mbotrha I A, She L N *et al*. Nutritional effects of soybean root architecture in a maize/soybean intercropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6): 1196-1203.

[12] 刘广才. 不同间套作系统种间营养竞争的差异性及其机理研究[D]. 兰州:甘肃农业大学博士学位论文,2005.
Liu G C. Difference of nitrogen utilization and distribution of mineral nitrogen in soil profile by competitive abilities of intercropping systems[D]. Lanzhou: PhD dissertation, Gansu Agricultural University, 2005.

[13] 叶优良,孙建好,李隆,张福锁. 小麦/玉米间作根系相互作

用对氮素吸收和土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 33-37.
Ye Y L, Sun J H, Li L. Zhang F S. Effect of wheat/maize intercropping on plant nitrogen uptake and soil nitrate nitrogen concentration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(11): 33-37.

[14] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ^{15}N techniques[J]. Plant and Soil, 2004, 262: 45-54.

[15] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2010.
Xiong Q E, Plant Physiology[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2010.

[16] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦//蚕豆间作中的种间氮营养差异比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 396-400.
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Nitrogen complementary use in intercropped wheat and faba bean [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(4): 396-400.

[17] Vandermeer J H. The Ecology of Intercropping[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

[18] 王小春, 杨文钰, 任万军, 等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作体系中玉米产量及养分吸收的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 803-812.
Wang X C, Yang W Y, Ren W J *et al*. Study on yield and differences of nutrient absorptions of maize in wheat /maize / soybean and wheat/maize/sweet potato relay intercropping systems[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 803-812.

[19] 宋海星, 李生秀. 玉米生长空间对根系吸收特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(8): 899-904.
Song H X, Li S X. Effect of root growing space on its absorbing characteristics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(8): 899-904.

[20] Craine J M, Wedin D A, Chapin F S, Reich P B. Relationship between the structure of root systems and resource use for 11 North American grassland plants[J]. Plant Ecology, 2003, 165(1): 85-100.

[21] Li Q Z, Sun J H, Wei X J *et al*. Over yielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. Plant and Soil, 2011, 339: 147-161.

[22] Hauggaard N H, Ambus P, Jensen E S. Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops a field study employing P-32 technique[J]. Plant and Soil, 2001, 236(1): 63-74.

[23] 张永清, 苗果园. 根土空间对高粱根系生理特性及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 635-639.
Zhang Y Q, Miao G Y. Effects of soil root growing space on root physiological characteristics and grain yield of sorghum [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 635-639.

[24] Shi K, Ding X T, Dong D K *et al*. Root restriction-induced limitation to photosynthesis in tomato (*Lycopersicon esculentum Mill.*) leaves [J]. Scientia Horticulturae, 2008, 117: 197-202.

[25] 王志芬, 陈学留, 余美炎, 等. 冬小麦群体根系^{32}P吸收活力与群体光合速率关系的研究[J]. 作物学报, 1999, 25: 458-465.
Wang Z F, Chen X L, Yu M Y *et al*. Study on the relationship between ^{32}P absorption vigour of root population and canopy apparent photosynthetic rate in winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 1999, 25: 458-465.

[26] 赵全志, 乔江方, 刘辉, 田志强. 水稻根系与叶片光合特性的关系[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 1064-1068.
Zhao Q Z, Qiao J F, Liu H, Tian Z Q. Relationship between root and leaf photosynthetic characteristic in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(5): 1064-1068.

[27] 李鑫, 崔菁菁, 徐克章, 等. 不同生育期人参根系伤流液质量与叶片光合的关系[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(3): 362-365.
Li X, Cui J J, Xu K Z *et al*. Relationships between mass of root bleeding sap and photosynthesis in leaves of *Panax ginseng*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(3): 362-365.

[28] Jacobese S E, Liu F L, Jensen C R. Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122: 281-287.

[29] 郝艳茹, 劳秀荣, 孙伟红, 彭少麟. 小麦/玉米间作作物根系与根际微环境的交互作用[J]. 农村生态环境, 2003, 19(4): 18-22.
Hao Y R, Lao X R, Sun W H, Peng S-L. Interaction of roots and rhizophere in the wheat-maize intercropping system [J]. Journal of Ecology and Rural Enviroment, 2003, 19(4): 18-22.

[30] 柴强, 黄宝高. 根系分泌物在不同播种模式中的化感效应研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(2): 163-167.
Chai Q, Huang B G. Allelopathic effect of root exudates in different cropping patterns [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2004, 39(2): 163-167.

[31] 刘小明, 雍太文, 廖敦平, 等. 不同种植模式下根系分泌物对玉米生长及产量的影响[J]. 作物杂志, 2012, (2): 84-88.
Liu X M, Yong T W, Liao D P *et al*. The effect of root exudates under different planting patterns on growth and yield of maize [J]. Crops, 2012, (2): 84-88.

[32] 刘小明,雍太文,廖敦平, 等. 不同种植模式下根分泌物对玉米生物量及氮素吸收的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(33): 151-155.
Liu X M, Yong T W, Liao D P *et al*. Effect of root exudates on biomass and nitrogen uptake of maize under different cropping patterns[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(33): 151-155.

[33] Brophy L S, Heichel G H. Nitrogen release from roots of alfalfa and soybean grown in sand culture[J]. Plant and Soil, 1989, 116(1): 77-84.

[34] 张顺捷,马凤鸣,王玉波,石振. 大豆根系分泌物化感作用的初步研究[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(10): 1-5.
Zhang S J, Ma F M, Wang Y B, Shi Z. Study on allelopathy of soybean root exudates [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(10): 1-5.