

小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究

肖焱波^{1,2}, 李 隆³, 张福锁³

(¹云南民族大学化学与生物技术学院, 昆明 650031; ²西南农业大学资源环境学院博士后流动站, 重庆 400716;

³中国农业大学植物营养系/农业部植物营养学重点实验室/教育部土壤与植物相互作用重点实验室, 北京 100094)

摘要: 在小麦/蚕豆间作体系中通过根系分隔和标记¹⁵N的盆栽试验研究表明, 小麦相对于蚕豆对土壤氮和肥料氮的依赖更强, 蚕豆则更多依赖于空气中的氮。在根系完全分隔、尼龙网分隔和根系不分隔处理中小麦对¹⁵N的回收率分别为58%、73%和52%, 而蚕豆则分别为30%、20%和3%。小麦对肥料氮的竞争促进了蚕豆的固氮作用, 在根系完全分隔、尼龙网分隔和根系不分隔时, 蚕豆来源于固氮的百分数(%Ndfa)分别为58%、80%和91%。因此, 小麦/蚕豆中存在对氮的互补利用, 该体系中氮营养竞争和促进作用同时存在。在小麦/蚕豆间作体系中应用土壤标记同位素稀释法表明蚕豆固氮向间作小麦发生了转移, 转移的量相当于蚕豆吸氮总量的5%。

关键词: 小麦; 蚕豆; 间作; 氮转移; 同位素稀释法; 营养竞争

The Interspecific Nitrogen Facilitation and the Subsequent Nitrogen Transfer Between the Intercropped Wheat and Fababean

XIAO Yan-bo^{1,2}, LI Long³, ZHANG Fu-suo³

(¹School of Chemistry and Biotechnology, Yunnan Nationalities University, Kunming 650031; ²Post Doctor Station at Faculty of Resources and Environment, South West Agricultural University, Chongqing 400716; ³Department of Plant Nutrition, China Agricultural University/Key Laboratory of Plant Nutrition, Ministry of Agriculture / Key Laboratory of Plant-Soil Interaction, Ministry of Education, Beijing 100094)

Abstract: A pot experiment was carried out to investigate the interspecific nitrogen facilitation between the intercropped wheat and fababean. The results from the isotope dilution method showed that wheat competed more fertilizer N than fababean, and fababean depended more on biological nitrogen fixation. ¹⁵N recovery rate of wheat with solid barrier, mesh barrier and no barrier was 58%, 73% and 52%, respectively. Nevertheless, ¹⁵N recovery rate of fababean was 30%, 20% and 3%, respectively. The results in the mesh barrier also showed that due to competition from wheat for the soil available N, the percentage of fixed N in fababean was enhanced. The percentage of N absorbed by fababean from pots with solid barrier, mesh barrier and no barrier was 58%, 80% and 91%, respectively. Therefore, the complementary N use did exist in wheat-fababean intercropping, and both the interspecific nitrogen competition and facilitation occurred in wheat-fababean intercropping. At last but not the least, the isotope dilution method showed nitrogen transfer occurred from fababean to the associate wheat, and 5% of total N of fababean was transferred to wheat.

Key words: Wheat; Fababean; Intercropping; Nitrogen transfer; Isotope dilution method; Nutrient competition

间作套种是中国传统农业中的精华, 在全国 100 多种间作体系的组合中, 70%的组合有豆科作物参与, 其中麦/豆间作体系在中国西部地区被农民广为接受^[1, 2]。蚕豆具有适应性广和固氮量高的特点, 在世

界范围内种植面积高达 200 万公顷^[3], 近 20 年来对蚕豆的研究也较多^[3-5]。蚕豆在我国很多地区都有种植, 小麦/蚕豆间作也很普遍。然而, 对小麦/蚕豆间作体系中氮的竞争、互补利用及转移的研究不多; 尤其是

收稿日期: 2004-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(30070450)和云南省自然科学基金项目(2004C0059M)资助

作者简介: 肖焱波(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要从事农田生物多样性与养分资源高效利用方面的研究。张福锁为通讯作者, Tel:010-62732499; E-mail:zhangfs@cau.edu.cn

小麦能否通过对土壤氮、肥料氮的竞争影响蚕豆的固氮作用, 是否影响所固定的空气氮向小麦的转移, 进而提高资源利用效率等研究的报道也较少。Li 等^[6]在甘肃的玉米/蚕豆间作体系中观察到间作作物的总吸氮量高于相应单作的现象, 西南地区小麦/蚕豆是否存在这种互惠现象, 它们之间营养竞争和促进的机理是什么? 回答这些问题将有利于对间作体系中氮营养进行优化调控, 减少化肥氮的投入, 降低环境风险。

同位素 ^{15}N 技术为直接测定间作体系中豆科作物的固氮能力提供了切实可行的方法。应用该方法, 可以区分小麦、蚕豆氮营养中来源于土壤、肥料和大气氮的比例^[7]。引入根系分隔技术, 可以比较蚕豆、小麦氮素来源的差异, 了解小麦对氮营养的竞争强度和对蚕豆固氮的促进作用, 同时评价蚕豆、小麦根区土壤残留氮的差异。过去的研究表明, 非豆科作物可以通过氮转移从与之间作的豆科作物中受益^[7-12], 但受益程度在豆科作物品种间和作物组合间存在很大差异。本试验假设在小麦/蚕豆间作体系中, 小麦通过竞争土壤有效氮使蚕豆根区土壤有效氮维持相对较低的水平, 缓解过高浓度的土壤有效氮对豆科共生固氮的抑制, 从而促进豆科作物固氮。试验目的在于研究间作体系中蚕豆、小麦种间氮的营养竞争和促进, 通过研究氮的转移量, 评价豆科作物在间作体系中对氮营养的贡献, 为优化氮素营养调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在中国农业大学植物营养系温室进行。供试土壤取自北京市昌平区的石灰性壤土, 土壤有机质含量为 $11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 硝态氮 $5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Olsen-P $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, pH 8.0。土样风干后过 2 mm 筛备用。试验设计为 3×3 双因子试验, A 因素为 3 个水平, 即施氮 (+N)、施同位素氮 ($+^{15}\text{N}$) 和不施氮 (-N)。施氮量为每千克土施 N 100 mg; B 因素为 3 种根系分隔方式: 即小麦、蚕豆根系被完全分隔、尼龙网分隔和不分隔, 重复 4 次。为了充分满足作物对多种养分的需求, 每千克土中补充: P 100 mg, K 126 mg, Mg 50 mg, Fe、Mn、Cu、Zn、Mo 各 5 mg。每盆装混匀各种养分后的土壤 2.5 kg。播种 7 d 后接种根瘤菌 NM353, 每盆接种 10 ml 根瘤菌液体培养基 (根瘤菌数 3.0×10^7 个/ml), 保证充分结瘤固氮。蚕豆预先催芽, 3 月 19 日播种, 小麦 3 月 22 日播种。出苗

后每盆留蚕豆 3 株、小麦 10 株。6 月 4 日收获。

1.2 植株和土壤中的 ^{15}N 分析

两个试验中的样品只做最后一次收获, 测定地上部干重、小麦籽粒干重, 植物、土壤总氮和 ^{15}N 含量。籽粒、秸秆和土壤的称样量分别为 0.2、0.4 和 2 g, 在称好样品的消煮管中加入 5 ml H_2SO_4 、1.5 g K_2SO_4 和 0.15 g CuSO_4 摇匀后放置过夜, 消煮至清亮, 冷却后直接蒸馏。馏出液用硼酸指示剂收集, 稀硫酸滴定, 终点由绿色变为粉红色, 测定总氮。测定完总氮的滴定液加入几滴硫酸标准液酸化, 然后放在电热板上加热浓缩至 3 ml, 再用 MAT-251 质谱仪 (Finnigan, 德国) 测定 $^{15}\text{N}\%$ 。氮原子百分超 (atom% ^{15}N excess) 等于标记样品的 $^{15}\text{N}\%$ 与未标记样品的 $^{15}\text{N}\%$ (0.3665%) 之差。

1.3 计算方法

(1) 植物中来自于 ^{15}N 的百分数

$$\%N_{dff}(\text{植物}) = (\text{植物的 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分超/肥料的 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分超}) \times 100$$

(2) 植物吸收 ^{15}N 的量 (mg)

$$N_{dff} = \text{植物吸氮量 (mg)} \times \%N_{dff}/100$$

(3) 植物对 ^{15}N 的回收率

$$^{15}\text{N} \text{ 回收率 (\%)} = (\text{植物 } N_{dff}/\text{施氮量}) \times 100$$

(4) 蚕豆中来源于空气中的氮百分数

$$\%N_{dfa} = [1 - (\text{蚕豆 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分超/小麦 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分超})] \times 100\%$$

(5) 小麦中来源于蚕豆固氮转移的百分数

$$\%N_{tr(\text{wheat})} = (1 - \%N_{dff_{wh(\text{inter})}}/\%N_{dff_{wh(\text{sole})}}) \times 100\%$$

式中, $\%N_{tr(\text{wheat})}$ 表示小麦中来源于蚕豆固氮转移的量占其总氮量的百分数, $\%N_{dff_{wh(\text{inter})}}$ 、 $\%N_{dff_{wh(\text{sole})}}$ 分别代表与蚕豆根系相互接触的小麦中来源于 ^{15}N 的百分数和根系完全分隔的小麦中来源于 ^{15}N 的百分数。

(6) 小麦对氮的营养竞争比率^[13]

$$CR_{wf} = (N_{iw}/N_{sw}) - (N_{if}/N_{sf})$$

CR_{wf} : 小麦相对于蚕豆的营养竞争比率; N_{iw} , N_{sw} , 分别代表小麦在根系相互作用时和完全分隔时的吸氮量; N_{if} , N_{sf} 分别代表蚕豆在根系相互作用和完全分隔时的吸氮量。

2 结果与分析

2.1 生物量

不施氮处理, 根系完全分隔和完全不分隔处理的蚕豆生物量没有显著差异, 但尼龙网分隔的蚕豆生物量比完全分隔时的降低了 14%, 根系不分隔处理比尼龙网分隔的蚕豆生物量增加了 25%; 同时, 施氮缓解了尼龙网分隔处理中缺氮对蚕豆生长的抑制作用 (表 1)。

施氮 (+N) 时, 3 种分隔方式间蚕豆生物量没有差异; 但在施同位素氮 (+¹⁵N) 时尼龙网分隔处理的蚕豆生物量是 3 种分隔方式中最高的, 原因需要进一步探明。尼龙网分隔处理的蚕豆生物量比完全分隔处理的增加了 14%, 比不分隔处理的增加了 41%。无论施氮处理还是根系分隔处理对蚕豆生长的影响都不显著, 但根系分隔处理和施氮处理间存在显著交互作用, 说明间作体系中氮营养竞争和促进作用主要受氮的丰缺状况和种间根系相互作用的影响。

对于小麦来说, 分隔方式处理和施氮处理都显著影响了它的生物量 (表 2)。无论是否施氮, 根系不分隔处理小麦秸秆和籽粒干重都高于其它 2 种分隔方式; 同一种分隔方式下, 施氮与不施氮相比增加了小麦秸秆和籽粒干重。

施氮与不施氮相比小麦秸秆干重分别增加了 93% 和 88%; 籽粒重则分别增加了 126% 和 113%。不论施

表 1 根系分隔方式对蚕豆生物量的影响

Table 1 Effects of root barriers on biomass of intercropped fababeans (g/pot)

分隔处理	-N	+N	+ ¹⁵ N	平均 Mean
完全分隔	7.02ba	7.01a	6.46ba	6.83a
Solid barrier				
尼龙网分隔	6.07b	7.04a	7.39a	6.83a
Mesh barrier				
不分隔	7.61a	5.71a	5.25b	6.19a
No barrier				
平均	6.90a	6.58a	6.36a	6.61
Mean				

显著检验 Significance due to:

施氮 N application (N) NS

根系分隔 Root barrier (B) NS

施氮×根系分隔 N×B **

N、+N 和 +¹⁵N 分别代表不施氮、施氮和施氮同位素。各处理 4 次重复的平均值进行比较。同一列字母不相同表示差异显著; 最后一行单独比较 (LSD=0.80); NS 表示不显著; **表示 $P<0.01$ 显著; *表示 $P<0.05$ 显著。表 3 同

-N = No nitrogen applied, +N = 100 $\mu\text{gN}\cdot\text{g}^{-1}$ soil applied, +¹⁵N = 100 $\mu\text{gN}\cdot\text{g}^{-1}$ soil applied. Values are means of four replicate treatments. Different letters within the same column except the values in the mean row indicate a significant difference at the $P<0.05$ level; Different letters within the mean row indicate a significant difference at the $P<0.05$ level, by ANOVA; NS, not significant; **indicates significant at $P<0.01$ level, and *indicates significant at $P<0.05$ level. The same as Table 3

氮处理还是未施氮处理, 小麦在完全根系相互作用 (不分隔) 和部分根系相互作用 (尼龙网隔) 中生长都得到了改善, 表现在秸秆和籽粒干重都有所增加。在不施氮处理中, 与完全分隔处理相比, 尼龙网分隔处理的小麦秸秆和籽粒干重分别增加了 13% 和 27%; 不分隔的处理增加更多, 秸秆和籽粒干重分别增加了 71% 和 124%。施氮处理中, 与根系完全分隔处理相比, 不分隔处理的小麦秸秆和籽粒干重分别增加了 48% 和 67%; 小麦秸秆和籽粒干重在尼龙网分隔处理与完全分隔处理间的差异不显著。当小麦根系与蚕豆根系完全分开时, 秸秆和籽粒干重都是 3 种分隔方式中最低的。

2.2 吸氮量

施氮处理和根系分隔处理对蚕豆的吸氮量都没有显著影响 (表 3), 但施氮处理和根系分隔处理之间存在显著的交互作用。

不施氮 (-N) 处理: 不施氮处理对蚕豆吸氮量的影响与其对生物量的影响趋势一致, 即在 3 种分隔方式中尼龙网分隔方式下的蚕豆吸氮量最低, 显著低于不分隔方式中蚕豆吸氮量。在此方式下, 蚕豆吸氮量分别比完全分隔和不分隔方式时降低了 19% 和 31%; 根系不分隔方式的蚕豆吸氮量最高, 分别比尼龙网分隔方式和完全分隔方式时的蚕豆吸氮量增加了 45% 和 18%。

施氮 (+N) 处理: 蚕豆吸氮量在部分根系相互作用中显著高于根系完全相互作用的, 增加了 38%; 根系完全分隔方式中蚕豆吸氮量比根系不分隔方式中增加了 33%。

施同位素氮 (+¹⁵N) 处理: 尼龙网分隔方式中的蚕豆吸氮量在 3 种分隔方式中最高, 分别比根系完全分隔和根系不分隔中增加 37% 和 46%, 但完全分隔方式与不分隔方式比较, 蚕豆吸氮量差异并不显著。

施氮增加了尼龙网分隔方式中的蚕豆吸氮量但降低了根系在不分隔方式中的吸氮量。在尼龙网分隔下, 施氮处理 (+N, +¹⁵N) 蚕豆吸氮量比未施氮 (-N,) 处理分别增加了 32% 和 55%; 在根系不分隔时, 施氮 (+N, +¹⁵N) 处理的蚕豆吸氮量比未施氮处理的分别降低了 34% 和 27%。

与蚕豆的吸氮量不同, 施氮处理和根系分隔都显著地影响了小麦秸秆和籽粒的吸氮量 (表 4), 同时施氮处理和根系分隔方式间还存在着显著的交互作用。从 3 种根系分隔方式中的平均值看: 施氮处理的小麦秸秆吸氮量分别是不施氮处理的 2.86 倍和 3.09

表 2 根系分隔方式对间作小麦秸秆和籽粒干重的影响

Table 2 Effects of root barriers on the dry weight of straw and grain of intercropped wheat (g/pot)

处理 Treatments	秸秆 Straw				籽粒 Grain			
	完全分隔 Solid barrier	尼龙网隔 Mesh barrier	不分隔 No barrier	平均 Mean	完全分隔 Solid barrier	尼龙网隔 Mesh barrier	不分隔 No barrier	平均 Mean
-N	3.75c	4.24b	6.43a	4.80	1.59b	2.02b	3.56a	2.39
+N	7.88b	8.21b	11.70a	9.26	4.37b	4.58b	7.30a	5.41
+ ¹⁵ N	7.76c	8.84b	10.49a	9.03	4.60b	4.55b	6.12a	5.09
平均 Mean	6.46c	7.10b	9.54a	7.70	3.52b	3.71b	5.66a	4.30
<i>LSD</i> _{0.05}				0.44				0.47
显著检验 Significance due to :								
		秸秆 Straw			籽粒 Grain			
施氮 N application (N)		**			**			
根系分隔 Root barrier (B)		**			**			
施氮×根系分隔 N×B		*			NS			

各处理分别对小麦秸秆和籽粒中 4 次重复的平均值进行比较。行内字母不相同差异显著；平均列单独比较 ($LSD=0.44$; $LSD=0.47$)。表 4 同
Values are means of four replicate treatments. Different letters within the same row for straw and grain, respectively, indicate a significant difference at the $P<0.05$ level; The values within the mean column for straw and grain, respectively, are compared by LSD ($LSD=0.44$; $LSD=0.47$), by ANOVA. The same as Table 4

表 3 根系分隔对间作蚕豆吸氮量的影响

Table 3 Effects of root barriers on nitrogen acquisition of intercropped fababeans (mg/pot)

分隔处理 Root barriers	-N	+N	+ ¹⁵ N	平均 Mean
完全分隔 Solid barrier	150ba	156ba	138b	148b
尼龙网分隔 Mesh barrier	122b	161a	189a	157a
不分隔 No barrier	177a	117b	129b	141a
平均 Mean	150a	145a	152a	149a
显著检验 Significance due to:				
施氮 N application (N)		NS		
根系分隔 Root barrier (B)		NS		
施氮×根系分隔 N×B		**		

倍, 小麦籽粒吸氮量则是不施氮情况下的 2.77 倍。在尼龙网分隔方式中, 小麦通过尼龙网吸收的氮素来自以质流和扩散方式从蚕豆根区土壤迁移的有效氮, 这与完全分隔方式中相比, 小麦秸秆和籽粒吸氮量分别增加了 24% 和 19%; 根系不分隔时, 小麦根系与蚕豆根系完全相互作用, 与完全分隔处理相比小麦秸秆、籽粒吸氮量增幅更大, 分别达到 79% 和 89%。

施氮增加了小麦的吸氮量, 与不施氮相比在完全分隔、尼龙网隔和不分隔方式下, 小麦秸秆吸氮量依次增加了 188%、195% 和 180%; 小麦籽粒吸氮量依次增加了 230%、178% 和 149%; 小麦地上部总吸氮量依次增加了 215%、183% 和 158%。正如小麦秸秆、籽粒干重和生物量所表现的那样, 无论是施氮还是不施氮,

在根系不分隔时, 小麦秸秆和籽粒吸氮量都是 3 种根系分隔方式中最高的。以籽粒吸氮量为例, 不施氮时, 尼龙网隔方式下的小麦籽粒吸氮量与完全分隔方式下相比增加了 37%; 不分隔方式与完全分隔方式相比则增加了 137%。施氮处理中, 与完全分隔方式相比, 在尼龙网分隔方式和不分隔方式中小麦籽粒吸氮量分别增加了 15% 和 79%。因此, 小麦在不施氮情况下竞争吸收氮的能力强于施氮处理。间作体系中小麦获得较多的氮素, 一方面是竞争得到了更多的土壤氮, 另一方面是蚕豆固氮对小麦氮营养的贡献。

在评价间作中的某种作物吸收养分能力的强弱时, 营养竞争比率通常作为一项指标^[13]。根据公式(6)计算出小麦相对于蚕豆对氮的竞争比率 (CR_{wf}), 当 $CR_{wf}>1$ 时表明小麦比蚕豆对氮的营养竞争能力强; 当 $CR_{wf}<1$ 时表明小麦比蚕豆对氮的营养竞争能力弱。在不施氮情况下, 尼龙网分隔方式和不分隔方式中小麦相对于蚕豆对氮营养竞争的比率分别为 1.57 和 1.82。施氮处理中, 尼龙网隔方式中小麦相对于蚕豆对氮的竞争比率分别为 1.10 和 0.92, 表明施氮缓解了小麦与蚕豆对氮的竞争, 或者说与小麦的竞争促进了蚕豆固氮; 根系不分隔时, 小麦相对于蚕豆对氮的竞争比率分别为 2.20 和 2.03, 因此小麦通过扩大根系吸收面积的方式竞争得到了更多的土壤有效氮。

间作体系中小麦通过根系相互作用对蚕豆的影响还表现在蚕豆根瘤数和根瘤重方面(表 5)。

无论施氮还是不施氮, 在根系不分隔方式中, 蚕

表 4 根系分隔方式对间作小麦吸氮量的影响

Table 4 Effects of root barriers on nitrogen acquisition of intercropped wheat (mg/pot)

处理 Treatments	秸秆 Straw				籽粒 Grain			
	完全分隔 Solid barrier	尼龙网隔 Mesh barrier	不分隔 No barrier	平均 Mean	完全分隔 Solid barrier	尼龙网隔 Mesh barrier	不分隔 No barrier	平均 Mean
-N	17b	19b	30a	22	30c	41b	71a	47
+N	49b	56b	84a	63	99b	114b	177a	130
+ ¹⁵ N	47c	67b	91a	68	96b	113b	180a	130
平均 Mean	38c	47b	68a	51	75c	89b	142a	102
<i>LSD</i> _{0.05}				5				11
显著检验 Significance due to:			秸秆 Straw				籽粒 Grain	
施氮 N application (N)			**				**	
根系分隔 Root barrier (B)			**				**	
施氮×根系分隔 N×B			**				*	

豆的根瘤数和根瘤重都高于相应的其它 2 种根系分隔方式, 因此, 间作促进了蚕豆的根瘤形成将可能促进固定空气氮; 同一根系分隔方式中, 施氮降低了蚕豆的结瘤数和根瘤重, 对根瘤数的降低最为明显。不施氮时, 尼龙网分隔方式中的蚕豆结瘤数和根瘤重都低于其它 2 种分隔方式中的, 土壤有效氮缺乏时 (本试

验中有效氮仅为 $7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 小麦的竞争加剧了蚕豆起始氮缺乏。因此, 蚕豆在此情况下生长受阻, 结瘤减少最终导致固氮量降低。然而, 在根系不分隔中, 尽管小麦的竞争更为强烈, 但蚕豆根系可以通过扩大吸收空间缓解来自小麦对氮的竞争, 改善生长。

表 5 施氮和根系分隔对间作蚕豆结瘤的影响

Table 5 Nodule numbers and fresh weight of intercropped fababeans as affected by root barriers and N application

施氮处理 N application	根瘤 Nodule	分隔处理 Root barriers			<i>LSD</i> _{0.05}
		完全分隔 Solid barrier	尼龙网隔 Mesh barrier	不分隔 No barrier	
-N	结瘤数 Nodulation (number/pot)	80	55	104	57
	根瘤重 Nodule mass (g/pot)	1.07	0.76	1.52	0.46
+N	结瘤数 Nodulation (number/pot)	7	17	32	21
	根瘤重 Nodule mass (g/pot)	0.55	0.59	1.10	0.51
显著检验 Significance due to:	结瘤数 Nodulation	根瘤重 Nodule mass			
根系分隔 Root barrier (B)	*	**			
施氮 N application (N)	**	**			
根系分隔×施氮 (N×B)	NS	NS			

每个处理 4 次重复平均值进行比较。NS 表示差异不显著; **和*分别代表 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 显著

Values are means of four replicate treatments. NS, not significant; ** indicates significant at $P<0.01$ level, and * indicates significant at $P<0.05$ level

2.3 小麦/蚕豆间作体系中植株和土壤中 ¹⁵N%丰度

在完全分隔方式下, 种植蚕豆的土壤中 ¹⁵N%丰度比种植小麦的土壤中 ¹⁵N%丰度高, 土壤总氮也有相同趋势 (表 6)。由此可以推知, 小麦吸收的土壤氮和肥料氮比蚕豆多, 小麦更多依赖土壤和肥料中的氮。尼龙网分隔处理与完全分隔处理相比, 种植蚕豆的土壤中 ¹⁵N%丰度有所降低, 而种植小麦土壤中的 ¹⁵N%丰度则有所增加, 再次表明小麦竞争吸收了蚕豆根区

有效氮。根系完全分隔处理中土壤 ¹⁵N 残留在种植蚕豆的土壤中比种植小麦的土壤中多 28 mg, 在尼龙网隔中多 22 mg, 根系不分隔时土壤中 ¹⁵N 残留为每盆 130 mg (相当于每室 65 mg, 数据表中未列出)。

对植株中 ¹⁵N%丰度的测定结果表明, 蚕豆的地上部和地下部 ¹⁵N%丰度都低于小麦的相应部位 (表 7); 从根系完全分隔方式到根系不分隔方式, 随根系间相互作用程度的增强, 蚕豆植株体内的 ¹⁵N%丰度都逐

渐降低, 表明随种间根系相互作用程度的增加, 蚕豆从土壤和肥料中获得的氮降低。虽然小麦秸秆也有相同趋势, 但小麦籽粒在尼龙网隔时的 ¹⁵N%丰度是 3

种分隔方式中最高的, 表明小麦从蚕豆根区吸收的氮素向库中进行转移。

表 6 根系分隔对小麦/蚕豆间作土壤 ¹⁵N 残留的影响

Table 6 Effects of root barriers on ¹⁵N left in soil of intercropped fababeans and wheat

分隔处理 Root barriers	¹⁵ N 丰度 ¹⁵ N% abundance			总氮 Total N (g·kg ⁻¹)			土壤中 ¹⁵ N 残留 ¹⁵ N left in soil (mg/pot)		
	蚕豆 Fababean	小麦 Wheat	LSD _{0.05}	蚕豆 Fababean	小麦 Wheat	LSD _{0.05}	蚕豆 Fababean	小麦 Wheat	LSD _{0.05}
完全分隔 Solid barrier	0.766	0.600	0.070	1.008	0.917	0.088	57.6	29.2	8.01
尼龙网隔 Mesh barrier	0.744	0.629	0.054	0.991	0.956	0.062	55.2	33.7	8.33
不分隔 No barrier	0.100	0.033	0.080	0.080	0.096		13.7	7.2	

表 7 不同根系分隔方式对间作蚕豆小麦体内 ¹⁵N%丰度的影响

Table 7 ¹⁵N% abundance in the plant of intercropped fababeans and wheat grown on ¹⁵N-labelled soil as affected by root contact

分隔处理 Root barriers	蚕豆 Fababeans				小麦 Wheat					
	¹⁵ N% 丰度 ¹⁵ N% abundance		植株对 ¹⁵ N 的回收 ¹⁵ N recovery (mg/pot)		¹⁵ N% 丰度 ¹⁵ N% abundance			植株对 ¹⁵ N 的回收 ¹⁵ N recovery (mg/pot)		
	茎 shoot	根 Root	茎 Shoot	根 Root	秸秆 Straw	籽粒 Grain	根 Root	秸秆 straw	籽粒 Grain	根 Root
完全分隔 Solid barrier	2.337	2.239	27.25	10.98	5.014	5.214	3.795	21	48	3.6
尼龙网隔 Mesh barrier	1.304	1.480	17.35	8.05	4.827	5.322	4.086	30	57	3.8
不分隔 No barrier	0.842	0.955	5.70	1.88	4.797	5.042	3.334	41	86	3.1
LSD _{0.05}	0.239	0.180	5.72	1.87	0.128	0.177	0.587	6	11	0.8

表中从上到下 3 种分隔方式中, 蚕豆对 ¹⁵N 的回收率依次为 30%、17%和 2%, 小麦对 ¹⁵N 的回收率依次为 48%、60%和 43%。在根系不分隔中, 蚕豆吸氮量与根系完全分隔时相比并没显著降低(表 3), 结合蚕豆对肥料氮的回收只有 2%, 间接证明蚕豆从大气中固定的氮量显著增加。

2.4 种间根系相互作用对蚕豆固氮的促进作用

间作体系中豆科作物的贡献在于它能够有效固定空气氮, 因此禾本科/豆科间作体系中可以发挥氮的互补利用, 即禾本科作物利用土壤氮和肥料氮, 豆科作物固定大气氮。在本试验中, 不同根系相互作用下蚕豆中的氮有 60%~90%来源于对空气氮的固定。

不同根系分隔方式下小麦和蚕豆吸收肥料氮存在显著差异(图), 小麦蚕豆的根系相互作用影响了间作蚕豆的固氮。在蚕豆根系和小麦根系没有相互作用的处中(完全分隔), 蚕豆吸收肥料氮最多, 而蚕豆从大气中固定的氮比例仅有 58%; 随着根系交互作用的加强, 小麦吸收肥料氮增加, 蚕豆吸收肥料氮下

降。蚕豆固氮比例随之增加, 尼龙网分隔处理为 80%, 不分隔处理为 91%。

上述结果表明, 小麦/蚕豆间作中氮营养竞争和固氮促进机理同时存在, 即小麦通过竞争吸收土壤氮,

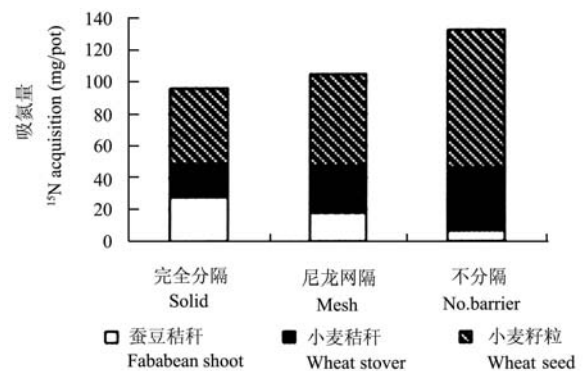


图 不同根系分隔方式对间作蚕豆小麦吸收肥料氮的影响
Fig. ¹⁵N acquisition of intercropped fababeans and wheat as affected by root barriers

使蚕豆根区土壤有效氮维持在较低的水平进而促进蚕豆固氮。

2.5 间作体系中蚕豆体内的氮向小麦的转移

根据小麦在与蚕豆根系发生相互作用中的 $^{15}\text{N}\%$

丰度比根系完全分隔时低的事实也可用于计算间作体系中的氮转移(表 8)。根系不分隔处理中氮转移的量是尼龙网分隔处理中的 3.1 倍, 表明氮转移主要是通过根系充分接触发生的。

表 8 间作中蚕豆向小麦转移氮的数量

Table 8 Nitrogen transferred from fababeans to intercropped wheat

分隔处理	氮转移的量	氮转移占蚕豆的总吸氮量的比例	氮转移占小麦的总吸氮量的比例
Root barriers	Amount of N transferred (mg/pot)	N transferred as % of fababeans nitrogen	N transferred as % of wheat nitrogen
尼龙网隔	2.09	1.25	1.18
Mesh barrier			
不分隔	6.40	4.90	2.35
No barrier			
$LSD_{0.05}$	1.27	1.72	0.50

3 讨论

3.1 间作对蚕豆固氮的促进作用

一般说来, 豆科作物生长初期由于根系尚未发育完全、根瘤也还未发育成熟, 很少固氮, 此时土壤有效氮供应可以促进豆科作物的生长发育。因此, 生产中常常在豆科生长初期补充一定数量的启动氮^[14], 但掌握不好施肥时期就有可能降低结瘤数和固氮能力^[15]。在本试验中, 尼龙网分隔处理中的小麦对土壤有效氮有较强的竞争能力, 造成蚕豆根区土壤有效氮以质流和扩散方式通过尼龙网向小麦根区土壤迁移, 使得已经较低的蚕豆根区土壤氮(播前土壤无机氮 $7.1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 进一步降低, 因此抑制了蚕豆的生长(表 1)、减少了结瘤(表 5)、进而减少了蚕豆固氮量(表 3)。尼龙网分隔处理中的小麦吸氮量比完全分隔处理增加了 37%, 蚕豆吸氮量则减少了 28 mg; 根系不分隔处理中蚕豆吸氮量比尼龙网分隔处理增加了 55 mg, 所以蚕豆在不分隔处理中由于扩大根系吸收面积其生长得到显著改善, 此外, 蚕豆的生长也可通过适当施氮得到改善。

在施氮情况下, 小麦根系的竞争作用还增加了间作蚕豆的根瘤数和根瘤重。本研究假设小麦对土壤有效氮有较强的竞争能力将导致与之间作的蚕豆固定更多的空气氮。研究结果显示, 小麦吸氮量在根系不分隔时最高, 依次是尼龙网分隔和不分隔(表 4)。因此, 该间作体系中小麦由于根系相互作用始终处于竞争优势。本研究结果认为, 小麦生长的改善一方面来源于土壤有效氮的质流和扩散。另一方面, 很大一部分来源于吸收空间的扩大。与 Li 等^[16]在玉米/蚕豆间

作的田间试验所观察到的结果一致, 小麦/蚕豆间作中也存在种间促进作用。

蚕豆吸收肥料氮比小麦少得多, 因此种植蚕豆的土壤中就有较多的肥料氮残留(表 6), 而种植小麦的土壤中肥料氮残留较少。此外在本试验中还发现种植蚕豆的土壤全氮含量比种植小麦高。有人认为种植豆科对土壤氮的增加一部分来源于“节约的氮”^[17], 即对土壤有效氮吸收少, 另一部分来源于豆科作物固氮的投入。本试验结果表明, 小麦/蚕豆间作体系中存在氮的互补利用, 与过去在豆科/非豆科间作体系中所观察到的结果相似^[16-20], 豆科作物通过共生固氮提供自己生长所需氮素, 非豆科作物由于竞争能力强, 可以吸收较大比例的土壤无机氮^[21]。在此试验中, 小麦是强的竞争者, 蚕豆对肥料氮的依赖小。因此, 种植小麦的土壤中 ^{15}N 残留比种植蚕豆的土壤低。

在 2 个施氮处理中, 尼龙网分隔处理中的蚕豆吸氮量是 3 种分隔方式中最高的。正如 Frey 和 Shüep^[9]所解释的那样, 在尼龙网分隔中, 一些含氮养分可以通过尼龙网发生扩散迁移。由于小麦的竞争吸收形成种植小麦和种植蚕豆的土壤中养分浓度梯度(表 6), 使得更多的氮化合物向小麦根区迁移, 蚕豆根区的土壤有效氮随之降低, 土壤有效氮的降低促进了蚕豆更多地固定空气氮(图)。由于种间根系相互作用的影响, 小麦的竞争作用增加了间作蚕豆共生固氮。在本研究中, 蚕豆的固氮比例在 60%~90%之间, 与其它研究中关于蚕豆固定大气氮的比例结果相一致^[4, 22]。蚕豆在间作中氮的高效利用的作用还在于其根中所保留的氮占植株总氮量不小的比例, 本试验中平均达到 24%。正如许多研究者所倡导的那样^[14, 23-25], 改进农

艺措施可以增加豆科作物的固氮能力, 进而提高豆科作物固氮量对农田生态系统中的贡献。因此, 该种植方式在资源高效利用中将发挥重要作用。

3.2 豆科作物氮营养的贡献

豆科/禾本科间作体系中氮高效利用的另一可能机制还在于豆科作物固定的氮向禾本科作物的转移。很早就有研究发现豆科通过根系分泌相当数量的氮化合物^[26], 这些化合物可能以 NH_4^+ 、 NO_3^- 、氨基酸、细胞溶解物和脱落物^[11, 27~30]形态在根际淀积。这些根际淀积物不稳定, 可以通过转移方式被与之间作的禾本科作物吸收, 或者损失掉。因此氮转移的途径应该包括氮从豆科作物根中渗漏及间作非豆科作物的吸收两方面。尼龙网分隔方式中氮转移的量比根系不分隔中转移的量小(表 8), 表明蚕豆向小麦的氮转移主要通过根系充分接触起作用, 因此大田研究中考虑小麦与蚕豆间合适的株行距就很有必要。

同位素稀释法计算的氮转移量有人把它称为“表观转移”, 这种情况下由于 ^{15}N 的加入启动了土壤中的氮矿化, 不可能把土壤中未标记的那部分氮的转移从蚕豆固定空气氮的转移区别开来^[30], 这样就可能高估了氮的转移。有研究认为^[31], 在植物相互作用中的养分转移发生的前提是植物间是否存在养分浓度差, 间作作物间养分转移的发生还与种间库源关系有关。Bethlenfalway 等认为大豆向与之相邻的玉米转移氮就存在着这样养分浓度差。因此在笔者的试验中, 小麦蚕豆植株间在含氮量上存在的差异足以建立起所谓的库源关系, 暗示了氮可以从蚕豆向小麦的转移。

4 结论

本试验研究结果表明在小麦/蚕豆间作体系中小麦有较强的竞争优势, 蚕豆则更多地依赖共生固氮; 小麦通过竞争吸收土壤氮和肥料氮而降低了土壤有效氮, 最终导致了蚕豆固氮进一步增加。本研究中的结果支持了关于“节约氮”和氮转移的假设, 由于氮转移的量比例较小, 对于改善作物生长意义不大。本研究是在温室条件下进行的盆栽试验, 在作为一项措施推荐之前还需进一步的田间验证工作。

References

[1] 郑如昌, 向宁, 杨淑艳. 大麦蚕豆间作试验示范初报. 大麦科学, 1995, 4: 17-18.
Zheng R C, Xiang N, Yang S Y. Field demonstration of intercropped barley and fababean. *Science of Barley*, 1995, 4: 17-18. (in Chinese)

[2] Bond D A, Lawes D A, Hawtin G C, Saxena M C, Stephens J H. Fababean (*Vicia faba* L.) In: Summerfield R J, Roberts E H, ed. *Grain Legume Crops*. Collins, London, 1985: 199-265.

[3] Unkovich M J, Pate J S. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N_2 fixation by annual legumes. *Field Crops Research*, 2000, 65: 211-228.

[4] Rochester I J, People M B, Constable G A, Gault R R. Fababeans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1998, 38: 253-260.

[5] Mayer J, Buegger F, Jensen E S, Schloter M, He J. Estimating N rhizodeposition of grain legumes using a ^{15}N in situ stem labeling method. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 21-28.

[6] Li L, Zhang F S, Li X L, Christie P, Sun J H, Yang S C, Tang C X. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and fababean. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2003, 65: 61-71.

[7] 朱树秀, 杨志忠. 紫花苜蓿与老芒麦混播优势的研究. 中国农业科学, 1992, 25 (6): 63-68.
Zhu S X, Yang Z Z. A study on superiorities in mixed cropping of alfalfa and Siberian wild rye. *Scientia Agricultura Sinica*, 1992, 25 (6): 63-68. (in Chinese)

[8] Giller K E, Ormesher J, Awah F M. Transfer of nitrogen from Phaseolus bean to intercropped maize measured using ^{15}N -enriched and ^{15}N -isotope dilution methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23: 339-346.

[9] Frey B, Schüepp H. A role of vesicular-arbuscular (VA) mycorrhizal fungi in facilitating interplant nitrogen transfer. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25: 651-658.

[10] Høgh-Jensen H, Schjoerring J K. Below-ground nitrogen transfer between different grassland species: Direct quantification by ^{15}N leaf feeding compared with indirect dilution of soil ^{15}N . *Plant and Soil*, 2000, 227: 171-183.

[11] Ledgard S F, Freney J R, Simpson J R. Assessing nitrogen transfer from legumes to associated grass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17: 575-577.

[12] Ta C, Faris M A. Effects of alfalfa proportions and clipping frequencies on timothy-alfalfa mixture. II. Nitrogen fixation and transfer. *Journal of Agronomy*, 1987, 79: 820-824.

[13] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients. *Field Crops Research*, 1993, 34: 319-334.

[14] van Kessel C, Hartley H. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crops Research*, 2000, 65: 165-181.

- [15] Eaglesham A R J, Hassouna S, Seegers R. Fertilizer-N effects on N₂ fixation by cowpea and soybean. *Journal of Agronomy*, 1983,75: 61-66.
- [16] Li L, Yang S C, Li X L, Zhang F S, Christie P. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and fababean. *Plant and Soil*, 1999, 212: 105-114.
- [17] Chalk P M. Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotations: a review. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1998, 49: 303-316.
- [18] Anil L, Park R H P, Miller F A. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass Forage Science*, 1998, 53: 301-317.
- [19] Carr P M, Martin G B, Caton J S, Poland W W. Forage and nitrogen yield of barley-pea oat-pea intercrops. *Journal of Agronomy*, 1998, 90: 79-84.
- [20] Carruthers K, Prithiviraj B, Smith D L. Intercropping corn with soybean, Lupin and forage: yield component response. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12: 103-115
- [21] Herridge D F, Marcellos H, Felton W L, Peoples M B. Chickpea increases soil N fertility in cereal systems through nitrate sparing and nitrogen fixation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27: 545-551.
- [22] Beck D P, Wery J, Saxena M C, Ayadi A. Dinitrogen fixation and nitrogen balance in cool-season food legumes. *Journal of Agronomy*, 1991, 83: 334-341.
- [23] Jensen E S. Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, 1996, 182: 25-38.
- [24] Peoples M B, Herridge D F, Ladha J K. Biological nitrogen fixation: An efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant and Soil*, 1995a, 174: 3-28.
- [25] Peoples M B, Herridge D F, Ladha J K. Enhancing legumes N₂ fixation through plant and soil management. *Plant and Soil*, 1995b, 174: 83-101.
- [26] Brophy L S, Heichel G H. Nitrogen release from roots of alfalfa and soybean grown in sand culture. *Plant and Soil*, 1989,116: 77-84.
- [27] Hale M G, Moore L D, Griffin G J. Methodology for the quantification of root and rhizosphere nitrogen dynamics by exposure of shoots to ¹⁵N-labelled ammonia. *Soil Biology and Biochemistry*, 1979, 21: 189-196.
- [28] Paynel F, Murray P J, Cliquet J B. Root exudates: a pathway for short-term N transfer from clover and ryegrass. *Plant and Soil*, 2001, 229: 235-243.
- [29] Johansen A, Jensen E S. Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley inter connected by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 73-81.
- [30] Vallis I, Henzell E F, Evans T R. Uptake of soil nitrogen by legumes in mixed swards. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1977, 28: 413-425.
- [31] Bethlenfalway G J, Reyes-Soils M G, Camel S K, Ferrera-Cerrato R. Nutrient transfer between the root zones of soybean and maize plants connected by a common mycorrhizal mycelium. *Plant Physiology*, 1991, 82: 423-432.

(责任编辑 李云霞)