

用¹⁵N 叶片标记法研究旱作水稻与花生 间作系统中氮素的双向转移

褚贵新^{1,2}, 沈其荣^{1*}, 李奕林¹, 张 娟¹, 王树起¹

(1. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095; 2. 新疆石河子大学农学院, 新疆 石河子 832000)

摘要:在盆栽条件下, 采用¹⁵N 叶片富积标记方法, 研究了旱作水稻与花生间作系统氮素的双向转移及供氮水平对氮素转移的影响。结果表明: 在 15 kg hm⁻²、75 kg hm⁻²、150 kg hm⁻² 等 3 个氮肥水平下, 间作水稻的干物质生物量和氮素吸收量分别为 9.41g 株⁻¹、12.06g 株⁻¹、13.53g 株⁻¹ 和 207.35mg 株⁻¹、241.81mg 株⁻¹、259.37mg 株⁻¹, 分别比单作水稻增加了 21%~29%、7%~29%、18%~30% 和 43.43%、45.72%、32.81%, 间作对水稻的干物质积累和氮素吸收量有显著促进作用。间作和单作系统中花生的干物质生物量和氮素吸收量间的差异均不显著; 用花生叶片标记¹⁵N 试验表明, 在 3 个氮肥水平下花生体内的氮素中分别有 9.93%、5.65%、4.22% 转移到了水稻植株体内, 其转移量随土壤氮素水平的提高而降低; 用水稻叶片标记¹⁵N 则分别有 4.39%、2.06%、1.38% 的水稻体内氮素转移到了花生植株体内, 其转移量也随土壤氮素水平的提高而降低; 用¹⁵N 叶片标记的方法证明花生与水稻旱作的间作系统中存在着氮素的双向转移, 但净转移方向是由花生植株向水稻的氮素转移。对豆科与禾本科间作系统中氮素转移的机理、途径也做了分析和讨论。

关键词:间作; ¹⁵N; 氮素转移; 水稻旱作; 花生

Researches on Bi-directional N transfer between the intercropping system of groundnut with rice cultivated in aerobic soil using ¹⁵N foliar labelling method

CHU Gui-Xin^{1,2}, SHEN Qi-Rong¹, LI Yi-Lin¹, ZHANG Juan¹, WANG Shu-Qi¹ (1. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Agricultural Science, Shihezi University, Xinjiang, Shihezi 832000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 278~284.

Abstract: Rice traditionally cultivated in water-logged soil consumes huge amounts of the water resources in China. As a novel water-saving technique, rice cultivated in aerobic soil could almost reach the same yield as that in water-logged soil. Furthermore, rice cultivation in aerobic conditions makes it possible to intercrop rice with legumes, which is regarded as an important part of sustainable agriculture and has a yield advantage expressed by land equivalent ratio (LER). But little information has been available so far about the new intercropping systems. Pot experiments were carried out to study the nitrogen transfer occurring in the system of groundnut intercropped with rice cultivated in aerobic soil at three different nitrogen fertilizer application rates (15 kg hm⁻², 75 kg hm⁻² and 150 kg hm⁻²) using ¹⁵N foliar labelling method. The results were as follows. The dry weight and total nitrogen accumulated in intercropped rice were 9.410 g plant⁻¹, 12.06 g plant⁻¹, 13.53 g plant⁻¹ and 207.35 mg plant⁻¹, 241.81mg plant⁻¹, 259.37 mg. plant⁻¹ at three nitrogen application rates, namely 15 kg hm⁻², 75 kg hm⁻², 150 kg hm⁻², respectively. Compared with monocropped rice cultivation, the dry weights of rice intercropped were increased by 21%~29%, 7%~29%, 18%~30% at the three N fertilizer application rates, respectively.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30070446, 30200036)

收稿日期:2003-05-11; **修订日期:**2003-10-14

作者简介:褚贵新(1969~), 男, 新疆霍城县人, 博士, 主要从事土壤及植物营养生理与生态学研究。E-mail: chuguixin@hotmail.com

* **通信作者** Author for correspondence. E-mail: Qrshen@njau.edu.cn

致谢:感谢英国洛桑试验站的 Dr. Tony Miller 对本研究给予的帮助和对英文摘要所做的修改

Thanks to Dr. Tony Miller (Rothamsted Experimental Station, UK) for his revision of the english abstract

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30070446, 30200036)

Received date: 2003-05-11 **Accepted date:** 2003-10-14

Biography: CHU Gui-Xin, Ph. D., mainly engaged in soil science, plant nutrition and plant ecology. E-mail: chuguixin@hotmail.com

while the total nitrogen increased by 43.43%, 45.72%, 32.81%, respectively. This result showed that intercropping could enhance significantly the dry weight and total nitrogen of rice crop, especially in the soil with low-N supply. There was no significant differences of the dry weight and total nitrogen of groundnut between the intercropped and monocropped. Using groundnut leaf label ¹⁵N as ¹⁵N donor plant, there was good evidence of nitrogen transfer from groundnut to rice, which accounted for about 9.93%, 5.65%, 4.22% of the N accumulated in groundnut at the three N application rates, respectively. The higher the fertilizer application rates, the less amounts of N was transferred from groundnut to rice. Nitrogen transfer from rice to groundnut was also observed in the experiment of rice as ¹⁵N donor plant, which represented about 4.39%, 2.06%, 1.38% of the N accumulated in rice in the three N application rates, respectively. By using ¹⁵N foliar labeling method a confident conclusion could be drawn that there existed a bi-directional N transfer in the intercropping system of groundnut with rice cultivated in aerobic soil. The possible mechanism and path-way of nitrogen transfer in the system of groundnut intercropped with rice were also discussed in detail in this paper.

Key words:intercrop; ¹⁵N; nitrogen transfer; rice; groundnut

文章编号:1000-0933(2004)02-0278-07 中图分类号:S158.3,S317 文献标识码:A

豆科与禾本科作物间作是我国传统农业的精髓,也是发展可持续农业的重要内容。很多研究证明,豆科与禾本科作物间作能显著提高禾本科作物的产量和氮素吸收量^[1,2]。从矿质营养的角度分析认为,间作作物复合体在共同生长期,豆科作物通过根系分泌氮素^[3]和VA菌根以及细小根系、根脱落物、根瘤在土壤中腐烂分解释放氮素^[4]被禾本科作物吸收,改善了禾本科作物的氮素营养,即发生了氮素的转移,从而促进了间作禾本科作物的生长。Danso等在研究羽扇豆和燕麦间作时发现,间作燕麦比其单作条件下氮素吸收量和生物量分别提高26.3%和21%^[5]。Fujita等人在研究豌豆与高粱间作系统中,发现高粱通过氮素转移获得的氮量占其吸收氮量的32%~58%^[6]。以及在野豌豆和燕麦的间作^[7]、在苜蓿和雀麦草或梯牧草间作^[8,9]、玉米和豇豆的间作^[2]、三叶草和黑麦草间作^[10]都发现了有2%~17%左右的豆科体内的氮素发生了转移。

但这些研究都集中在豆科向禾本科作物进行单向的氮素转移,而很少研究是否存在氮素由禾本科向豆科的转移。搞清楚氮素的双向转移对揭示间作系统中氮素的净流向和间作系统的氮素特征有重要的理论和现实意义。有关研究表明禾本科作物根系在生长期也可以通过根系分泌一定的氮素到土壤中去^[11],而它能否转移到豆科作物体内被利用,氮素在豆科/禾本科间作系统中是否能够双向转移的研究还不多见。水稻旱作是一种新型农业节水栽培^[12],不仅如此,水稻旱作还能使水稻得以与豆科作物进行间作,从而为水稻持续高产稳产提供另一途径。本文采用¹⁵N叶片富积标记法对水稻在旱作条件下与花生间作系统中氮素种间转移进行了¹⁵N同位素示踪研究,其目的:(1)验证两种作物间作的产量优势及其氮素营养;(2)研究不同供氮水平对间作系统氮素转移的影响,并对氮素在水稻与花生两种作物间的相互转移进行阐述。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与作物

试验在南京农业大学资源与环境学院温室进行,供试的水稻品种为武育梗99-15号,花生品种为郑远杂9102。土壤采自江苏省南通市搬经镇的高沙土,为0~20cm的表层土。前茬作物为花生。耕层土壤有机质含量6.9 g kg⁻¹,全氮0.56 g kg⁻¹,碱解氮47.25 mg kg⁻¹,全磷0.64 g kg⁻¹,有效磷(OlsenP)6.56 mg kg⁻¹,全钾9.7 g kg⁻¹,有效钾39.69 mg kg⁻¹,pH值(土:水=1:2.5)8.2。

1.2 实验设计和方法

试验设15 kg N hm⁻²、75 kg N hm⁻²和150 kg N hm⁻²3个氮肥水平,每个处理重复4次,并随机排列,试验中所用基肥氮肥为普通尿素。其他营养元素在播种前溶于水一次施入,以浓度计,分别施P(CaH₂PO₄)100 mg kg⁻¹,K(KCl)80 mg kg⁻¹,Fe(FeSO₄)10 mg kg⁻¹,Zn(ZnSO₄)10 mg kg⁻¹,Mo(MoSO₄)10 mg kg⁻¹。

¹⁵N标记方法:(1)以花生叶片为标记材料,把与水稻间作的花生植株套在一个两端开口的PVC柱形套子中,并在盆钵底部先用塑料膜衬垫,在其上面再垫3层吸水纸,然后向PVC柱形套中的花生植株叶片喷施浓度为1.5%的尿素CO(¹⁵NH₂)₂溶液(¹⁵N的丰度为10.32%,由上海化工研究院生产),施用完毕后用薄塑料袋将花生地上部套住,直到第2天叶片变干再把塑料袋去掉,以防止¹⁵N污染土壤。(2)以水稻叶片为标记材料,其方法同上。整个施用过程严格控制条件,在对花生叶片进行标记时,防止¹⁵N同位素对相邻的间作水稻及对土壤的污染,在对水稻叶片进行标记时,防止¹⁵N同位素对相邻的间作花生叶片及对土壤的污染。在花生的开花期前后分3次标记,在生长过程中设置防雨篷,避免雨水对叶片的淋洗。试验所用陶瓷盆钵高0.22m,内径15cm,盆底用10目筛网筛,每盆装土13 kg(以自然风干土计),每盆栽水稻4株,花生4株,种植比例1:1。水稻苗龄4叶1心时于2002年6月13日移植,花生于6月23日播种,6月30日出苗。同时设置对照,对照分别为水稻单作、花

生单作、水稻与花生间作。

1.3 试验的采样、样品分析及计算方法

盆栽试验的植株样在 10 月 5 日收获,并把各器官分开,水稻地上部分分为穗、叶片、茎秆、叶鞘和根系;花生分为叶片、茎秆、根系。在 105℃ 杀青 30min,在 75℃ 下烘干至恒重。分别称干物质重,粉碎测定全氮含量并用质谱仪(型号为 ZHT-03)测定 ¹⁵N 丰度。

1.3.1 分析方法 土壤全氮用凯氏半微量蒸馏定氮法,并进行质谱分析,测定 ¹⁵N 丰度。

1.3.2 计算方法

(1)试验中把施用 ¹⁵N 肥料处理的植株样品 ¹⁵N 的丰度(atom % ¹⁵N%)与不施 ¹⁵N 植株样品丰度差值计为该样品的 ¹⁵N 原子百分率(atom % ¹⁵N excess):

植株的 atom % ¹⁵N excess = 标记植株的 atom % ¹⁵N% - 对照植株的 atom % ¹⁵N% (1)

(2)标记花生向旱作水稻氮素转移百分率 % (% Nitrogen in groundnut transfer to rice) [4]:

%NT = (水稻氮素吸收量 × 水稻的 atom % ¹⁵N excess / (水稻氮素吸收量 × 水稻的 atom % ¹⁵N excess + 花生氮素吸收量 × 花生的 atom % ¹⁵N excess)) × 100 (2)

(3)标记水稻向花生氮素转移百分率 % (% Nitrogen in rice transfer to groundnut) [4]:

%NT = (花生氮素吸收量 × 花生的 atom % ¹⁵N excess / (水稻氮素吸收量 × 水稻的 atom % ¹⁵N excess + 花生氮素吸收量 × 花生的 atom % ¹⁵N excess)) × 100 (3)

2 结果与分析

2.1 间作对植株干物质生物量和氮素吸收的影响

2.1.1 间作对水稻、花生干物质积累量的影响 间作对水稻和花生两种作物的生物产量的影响见表 1(以花生植株 ¹⁵N 标记作为 ¹⁵N 供体为例)。试验表明,不论以花生植株作为 ¹⁵N 供体还是以水稻植株为 ¹⁵N 供体均可以看出种植方式对花生的生物量影响很小,经方差分析在 $p=0.05$ 的水平下,间作花生与在单作花生的生物量间无显著差异。同时,不同氮肥水平间花生生物量也没有显著的差异。其可能的原因是在土壤氮素水平低的条件下花生氮素营养主要来自于生物固氮作用,通过生物固氮满足了花生的氮素营养,对土壤氮素的依赖程度比较小;而当氮肥水平高的情况下,固氮酶活性受到抑制,花生主要通过吸收土壤中的氮素满足其氮素营养,因此对间作花生生物量的影响较小。对于水稻而言,在间作条件下其生物量比在单作条件下有明显的提高,经方差分析达到显著水平($P=0.05$),由此说明旱作水稻与花生间作对其生物量的积累有明显的促进作用,且土壤氮素水平较低时,间作水稻的受益越大,产量优势也越明显。如在 15 kg hm⁻²、75 kg hm⁻²、150 kg hm⁻² 等 3 个氮肥供应水平下,间作水稻的生物量分别比单作高 21%~29%、7%~29%、18%~30%。不论在单作还是间作条件下,氮肥水平对水稻的生物量也有较大的影响,其生物量随供氮水平的增加而增加,单作水稻生物量在供氮水平较低时,随氮素水平的增加比在间作条件下更为显著,如在 15 kg hm⁻²、75 kg hm⁻² 两个氮肥水平下,单作水稻和间作水稻随供氮水平其生物量的增加量分别为 22.41% 和 2.93%~21.57%。

表 1 间作和单作对水稻和花生干物质质量和氮素吸收量的影响(花生叶片作为标记对象)

Table 1 Dry matter and N yields of rice and groundnut in monocropping and intercropping system					
品 种 Species	氮素水平 N levels (kg · hm ⁻²)	干物质质量(g · 株 ⁻¹) Dry matter (g · plant ⁻¹)		氮素吸收量(mg · 株 ⁻¹) Total N yield (mg · plant ⁻¹)	
		地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root
单作花生	15	6.78 ± 0.87 a	5.99 ± 1.00 a	194.8 ± 17.74 b	497.32 ± 96.93 a b
Groundnut	75	8.21 ± 0.77 a	7.03 ± 0.68 a	236.6 ± 25.00 a b	637.44 ± 44.07 a
monocropped	150	7.23 ± 0.73 a	6.95 ± 1.45 a	227.9 ± 38.42 a b	601.65 ± 178.1 a
间作花生	15	7.60 ± 0.64 a	6.29 ± 1.05 a	204.9 ± 33.23 a b	481.51 ± 65.38 a b
Groundnut	75	8.69 ± 2.56 a	6.01 ± 1.82 a	258.0 ± 72.74 a	529.08 ± 186.7 a b
intercropped	150	7.22 ± 1.05 a	5.28 ± 0.68 a	185.0 ± 23.88 b	385.51 ± 54.65 b
单作水稻	15	6.96 ± 0.59 c	1.21 ± 0.149 c	117.3 ± 17.99 e	21.82 ± 2.70 c
Rice mono-	75	8.52 ± 0.94 b c	1.23 ± 0.19 c	131.2 ± 28.15d e	24.87 ± 5.72 c
cropped	150	9.41 ± 1.05 b	1.42 ± 0.13 b c	174.3 ± 8.325 c d	29.85 ± 2.57 b c
间作水稻	15	9.92 ± 0.91 b	1.78 ± 0.37 b	207.4 ± 10.79 b c	37.78 ± 10.1 b
Rice int-	75	12.06 ± 1.57 a	2.55 ± 0.27 a	241.8 ± 56.66 a b	60.44 ± 5.76 a
ercropped	150	13.53 ± 1.43 a	2.38 ± 0.43 a	259.4 ± 19.02 a	57.59 ± 12.7 a

* 平均数 ± 标准差,不同字母表示在 $p=0.05$ 的置信度有显著的差异(下同) Mean value ± standard error, values in a column followed by different letters indicated significant difference at $p=0.05$ probability (the same below); 花生叶片作为 ¹⁵N 供体, Groundnut foliar labeling CO (¹⁵NH₂)₂ was designed as ¹⁵N donor

2.1.2 间作对水稻、花生氮素吸收的影响 氮素吸收积累是作物产量形成的营养学基础,较好的满足氮素营养需求是作物获得高产的重要条件。从表1可以看出,在相同的氮素水平条件下,无论是在间作处理还是单作处理,花生的氮素吸收量均没有显著的差异,即间作处理对花生氮素吸收影响不大。在相同的栽培处理下,花生氮素吸收量随供氮水平的增加有升高的趋势,在15 kg hm⁻²和75 kg hm⁻²两个氮肥供应水平下吸氮量的差异不显著,但当氮肥水平增加到150 kg hm⁻²时,花生的氮素吸收量显著高于低氮肥水平。比较而言,间作对水稻的氮素营养的影响明显大于对花生氮素营养的影响(表1),在相同的氮肥水平条件下,间作水稻氮素吸收量均高于在单作条件的,如在15 kg hm⁻²的氮肥水平下,间作对水稻氮素吸收量有显著的促进作用,但随着土壤氮素水平的增加,这种促进效果降低。如在表1中15 kg hm⁻²、75 kg hm⁻²、150 kg hm⁻²等3个氮肥水平下间作水稻的氮素吸收量分别比单作水稻的高43.43%、45.73%、32.81%。从表1还可以看出氮素水平对水稻的氮素积累也有明显的促进作用,不论在单作还是在间作条件下水稻的吸氮量均随氮肥水平的增加而增加,经方差分析在P=0.05水平不同氮肥间水稻的氮素吸收量的差异显著。

2.2 ¹⁵N在不同标记材料中的分布

表2 不同氮素水平下¹⁵N在标记花生和水稻植株体的丰度及在对照植物的丰度
Table 2 Atom % ¹⁵N of plant components of ¹⁵N-donor and control plants in different N levels

品种 Species	N 水平 N levels (kg hm ⁻²)	¹⁵ N丰度(以花生为 ¹⁵ N供体植物) Atom % ¹⁵ N (Groundnut as ¹⁵ N donor plant)		¹⁵ N丰度(以水稻为 ¹⁵ N供体植物) Atom % ¹⁵ N (Rice ¹⁵ N donor plant)	
		地上部 Shoot	根部 Root	地上 Shoot	根部 Root
花生 Groundnut	15	1.445 ± 0.123 a	1.125 ± 0.170 a	0.420 ± 0.014 a	0.379 ± 0.006 a
	75	1.480 ± 0.434 a	1.219 ± 0.386 a	0.391 ± 0.004 a	0.381 ± 0.013 a
	150	1.135 ± 0.088 a	0.912 ± 0.101 a	0.381 ± 0.001 a	0.373 ± 0.000 a
水稻 Rice	15	0.490 ± 0.016 a	0.553 ± 0.005 a	2.867 ± 0.250 a	1.579 ± 0.579 a
	75	0.443 ± 0.020 b	0.524 ± 0.004 b	2.556 ± 0.366 a	1.649 ± 0.258 a
	150	0.399 ± 0.001 c	0.495 ± 0.001c	1.826 ± 0.109 b	1.394 ± 0.090 a
对照 Control					
花生 Groundnut		0.370 ± 0.004	0.370 ± 0.005		
水稻 Rice		0.375 ± 0.008	0.373 ± 0.003		

由表2可看出,对照花生和水稻的自然丰度分别为0.370%、0.373%~0.375%,其¹⁵N的丰度均高于大气中¹⁵N的自然丰度(0.3663%)。对照中花生的丰度低于水稻的¹⁵N%,其原因可能由于花生的生物固氮作用其体内的¹⁵N被大气中¹⁴N稀释的结果,Tomn等人于1994年在苜蓿和雀麦草的间作试验中也发现苜蓿的¹⁵N自然丰度低于雀麦草体内¹⁵N的自然丰度^[8]。表2还表明,在以花生叶片作为¹⁵N供体时,其植株体内¹⁵N的丰度分布均匀一致,没有显著性差异,而与花生间作在一起的水稻植株的¹⁵N%均高于对照水稻的自然丰度,这直接证明了有¹⁵N从花生向水稻的转移。随着供氮水平的提高,水稻体内¹⁵N的丰度降低,表明土壤氮素水平对花生体内¹⁵N向水稻的转移有影响,经分析差异显著,在以水稻叶片为¹⁵N供体时,与之间作的花生体内也发现有¹⁵N的富积,说明有部分氮素由水稻转移到了花生体内,但在花生体富积的¹⁵N在不同土壤氮素水平下差异不显著。此外,用花生或水稻叶片标记¹⁵N时,水稻植株体¹⁵N丰度显著高于以花生叶片标记的,分析造成这种结果的原因可能是花生通过共生固氮稀释了¹⁵N%的丰度,也由此说明整个¹⁵N标记试验氮素的浓度对花生的生物固氮影响较小,Tomn等人也发现以雀麦草为供体的¹⁵N丰度高于以苜蓿为供体¹⁵N丰度,他们在分析雀麦草植株体中¹⁵N的丰度总是高于苜蓿体内¹⁵N的丰度的原因时指出,由于苜蓿体内的氮素含量高,对¹⁵N的稀释作用有关系^[8],本研究也得出了相似的结果。

2.3 氮素在间作系统的转移

表3充分说明¹⁵N在花生和水稻间作系统中存在氮素的双向转移,以及氮肥水平对间作系统中氮素转移的影响。从表3中可以看出:在以花生植株叶片为¹⁵N标记材料时,在3个氮肥水平下均发现间作的水稻植株体内¹⁵N向水稻体内的转移,其转移量明显的随氮素水平的增加而减少,在15 kg hm⁻²、75 kg hm⁻²、150 kg hm⁻²3个氮肥水平下,其氮素转移量分别为9.93%、5.65%、4.22%,经方差分析,不同氮肥水平间的氮素转移量有显著的差异(P=0.05),说明氮肥素水平对间作系统中的氮素转移有影响。在以水稻叶片为¹⁵N标记材料时,也发现¹⁵N向花生体内的转移,其氮素转移量也和花生作为标记材料的一样,表现为随氮肥水平的增加而减少,在15 kg hm⁻²、75 kg hm⁻²、150 kg hm⁻²3个氮肥水平下,其氮素转移量分别为4.39%、2.06%、1.35%,经方差分析,转移量有明显的差异。总之,以任何一种间作植物作¹⁵N标记材料,都表明可以向间作的另一种作物转移氮素,而且氮素的转移受土壤氮素水平的影响。

表 3 不同氮素水平下花生和水稻的¹⁵N原子百分超及氮素在间作体系的双向转移

Table 3 ¹⁵N atom% excess in groundnut and rice and bi-directional nitrogen transfer between groundnut and rice intercropping system in different N fertilizer application levels

N 水平 N levels (kg hm ⁻²)	品种 Species	¹⁵ N的原子百分超 Atom% ¹⁵ N excess		供体作物向受体植物的 ¹⁵ N转移率 % Proportion of ¹⁵ N transferred	
		地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root
花生作为 ¹⁵ N供体植物 Groundnut as ¹⁵ N donor plant					
15	花生 Groundnut	1.074 ± 0.123	0.754 ± 0.170	9.932 ± 1.651 a	1.883 ± 0.478 b
	水稻 Rice	0.115 ± 0.016	0.180 ± 0.005		
75	花生 Groundnut	1.110 ± 0.434	0.849 ± 0.386	5.651 ± 0.619 b	2.297 ± 0.446 b
	水稻 Rice	0.068 ± 0.020	0.151 ± 0.004		
150	花生 Groundnut	0.765 ± 0.088	0.542 ± 0.101	4.223 ± 0.249 b	3.315 ± 0.659 a
	水稻 Rice	0.024 ± 0.001	0.122 ± 0.001		
水稻作为 ¹⁵ N供体植物 Rice as ¹⁵ N donor plant					
15	花生 Groundnut	0.050 ± 0.014	0.006 ± 0.002	4.390 ± 0.234 a	6.962 ± 1.661 a
	水稻 Rice	2.493 ± 0.250	1.206 ± 0.579		
75	花生 Groundnut	0.020 ± 0.004	0.011 ± 0.013	2.062 ± 0.635 b	5.117 ± 1.658 a b
	水稻 Rice	2.181 ± 0.366	1.276 ± 0.258		
150	花生 Groundnut	0.011 ± 0.001	0.002 ± 0.000	1.348 ± 0.212 c	2.944 ± 1.382 b
	水稻 Rice	1.451 ± 0.109	1.021 ± 0.090		

充分认识旱作水稻/花生间作系统中氮素的净转移方向以及氮素从一种作物向间作的另一种作物转移氮素的数量是揭示间作系统中作物的氮素营养和产量优势的矿质营养基础,也是客观评价间作系统的氮素供应特征不可缺少的一个环节。从表 4 可以看出,水稻向花生氮素转移量显著小于花生向水稻体内转移的氮素,说明净转移方向是由花生向水稻转移氮素。在 15、75 和 150 kg N hm⁻²等 3 个氮肥水平下,当以花生作为¹⁵N供体植物时,花生向水稻氮素转移量分别占水稻单株吸氮量的 10.1%、6.03%和 30.1%,氮肥水平越低,转移氮素占水稻氮素吸收量的比例越大,表明当间作系统在低氮素水平条件下氮素转移是间作水稻氮素营养的重要来源;当以水稻植株作为¹⁵N供体植物时,水稻向花生转移氮素在以上 3 个氮肥水平下分别占花生吸氮量的 4.34%、1.93%和 1.89%,在 15、75 和 150 kg N hm⁻²等 3 个氮肥水平下系统中花生向水稻净转移氮素的数量分别为 11.7、9.59 和 4.32 mg N 株⁻¹,间作系统中氮素转移对花生氮素营养的生态意义不大,但对于间作水稻的氮素营养则具有很大的意义,尤其是低氮素水平条件下,氮素的转移对于水稻在间作中的氮素养分优势以及间作产量的增加具有重要作用。

3 讨论

3.1 间作系统中氮素转移的可能机理及必要条件

关于豆科与禾本科作物的间作系统中是否存在着氮素的转移,一直存在着分歧和争论。多数的研究结果认为间作中存在着豆科向禾本科的氮素转移^[3,4,6~10],也有一部分研究结果表明氮素转移很少或没有发生转移^[5,13~15]。本研究近两年无论用¹⁵N土壤稀释标记法,还是植物叶片¹⁵N直接标记法,研究结果都表明,在花生与水稻的间作系统发生了氮素的转移,本文结果也证明花生与水稻间作系统存在氮素的双向转移。

表 4 不同来源的氮素对水稻和花生氮素吸收的影响及净转移量

Table 4 Proportions of N transferred from groundnut or rice and the net directional N transfer in groundnut/rice intercropping system

处理 Treat- ments	转移氮量 Amount of N trans- ferred (mg plant ⁻¹)	转移氮占 水稻吸氮量 N transferred as % of total N accumulated in rice plant (%)	转移氮占 花生吸氮量 N transferred as % of total N accumulated in groundnut plant (%)	净转移氮量 Amount of net N transferred (mg plant ⁻¹)
	花生为 ¹⁵ N供体 Groundnut as ¹⁵ N donor plant			
15	20.8 [†]		4.35 ^{†††}	11.7 ^{††††}
75	14.6		1.93	9.59
150	7.82		1.89	4.32
水稻为 ¹⁵ N供体 Rice as ¹⁵ N donor plant				
15	9.10	10.1 ^{††}		
75	4.98	6.03		
150	3.50	3.01		

† : 转移氮量 = %NT × 植株地上部吸氮量; †† : 转移氮量占水稻地上部吸氮量 % = (转移氮量 ÷ 水稻地上部吸氮总量) × 100; ††† : 转移氮量占花生地上部吸氮量 % = (转移氮量 ÷ 花生地上部吸氮总量) × 100; †††† : 净转移量 = 花生转移氮量 - 水稻转移氮量
† : Amount of N transferred = %NT × Above-ground N yield of plant; †† : N transferred as of total N accumulated in rice plant (%) = (Amount of N transferred ÷ Above-ground N yield of rice plant) × 100; ††† : N transferred as of total N accumulated in groundnut plant (%) = (Amount of N transferred ÷ Above-ground N yield of groundnut plant) × 100; †††† : Net N transferred = Amount of N transferred from groundnut - Amount of N transferred from rice

分析间作中氮素转移的机理可能有两种途径:其一为直接转移,即通过 VA (Vesicular-arbuscular) 菌根^[4,13]菌丝桥的连接作用转移氮素。豆科作物体内的氮素浓度一般高于禾本科作物,因此氮素通过菌丝体顺浓度梯度由豆科作物转移到禾本科作物体内,而且转移是单方向的。关于间作系统间菌根对磷素的研究较多,接种菌根对提高作物的吸磷量和作物的磷素营养的提高和改善有显著的促进作用已被众多的试验所证实^[16,17],如艾为党人等用³²P同位素的方法直接测定出三叶草体内的³²P可以通过根间菌丝桥传递给受体黑麦草^[18]。但关于 VA 菌根对间作系统中氮素转移的作用却一直存在着不同的结论,Johanson 和 Jensen 在研究豌豆/大麦间作系统的氮素转移中发现接种 VA 菌根对氮素转移有显著的促进作用^[4],在花生/玉米间作系统接种 VA 菌根的结果也表明菌根促进了花生向玉米的氮素转移^[19],而 Trannin 等人认为菌根对氮素转移的作用很小^[14]。由于氮素是在土壤中很活跃,其移动性远大于磷,因此对研究氮素转移的影响较大,易造成试验观察的不一致性,总之,多数的研究结果表明通过 VA 菌根转移氮素的量较小。其二是间接转移,存在两种方式:(1)豆科和禾本科作物根系一般都可以向土壤分泌小分子的有机物如氨基酸、多糖、以及无机氮素如 NH_4^+ 、 NO_3^- 等^[4],这些分泌物就可能被临近的间作作物吸收,即间作系统中发生了氮素的转移;(2)作物根系的脱落物、根瘤和细小根系的腐烂分解和矿化可以向根区附近释放大量的矿质氮素^[4,8,9,15],通过间作作物的吸收则可能发生转移。Tomn 等人在研究苜蓿与雀麦草间作系统氮素转移时也发现,用苜蓿作为¹⁵N供体,50d 和 79d 后氮素转移到雀麦草的量分别为 $0.0\sim 0.01\text{ mg plant}^{-1}$, 和 $0.01\sim 0.07\text{ mg plant}^{-1}$;当雀麦草为¹⁵N供体时,在 50d 和 79d 分别有 $0.01\text{ mg plant}^{-1}$ 、 $0.03\text{ mg plant}^{-1}$ 的氮素转移到了苜蓿体内^[8]。这两种情况的氮素转移是双向的。相比较而言,以分泌物的形式转移的氮素量小,而且短期实验可以测定出来,如 Tomn 等用叶片标记¹⁵N,在 64h 就测定出有¹⁵N在间作的苜蓿或雀麦草中富积^[8],推测短期被转移的氮素可能是根系分泌物,因为根系的腐烂分解则需要一个比较长期的过程,它取决于作物根系的结构、物质组成等。豆科作物一般比禾本科作物的 C:N 比窄,更容易在土壤中矿化分解。氮素的长期转移也包括了短期的转移,在长期转移中植物根系、根瘤的腐烂和净矿化可能是氮素转移的主要机制。Trannin 和 Urquiaga 等人在试验中把豆科作物地上部割除,测定出大量的氮素转移到了禾本科作物的体内^[15]。Ta 和 Faris 等人的研究表明在土壤无菌的条件下转移的氮量很少^[9],以上试验上都充分证明了以根系等物质的腐烂分解为主要氮源的间接转移是间作中氮素转移的主要途径。

3.2 间作系统中影响氮素转移的因素分析

影响间作中氮素转移的外在因素很多,包括不同物种根系的竞争能力、根系相互接触的程度等,土壤氮素水平也是影响氮素转移的一个重要因素。采用稀释法¹⁵N标记土壤研究氮素转移其假设条件是间作的禾本科作物在间作和单作条件下吸收同样多的¹⁵N;如果间作的禾本科作物体内¹⁵N的丰度低于单作条件下的,就表明间作禾本科体内的¹⁵N被豆科植物转移过来的¹⁴N稀释了^[20]。如果土壤氮素水平很低,则存在稀释的可能,即氮素发生了转移。但当氮素水平较高,禾本科吸收的土壤中¹⁵N氮素较多,而豆科作物的生物固氮作用受到抑制,其氮素吸收也主要通过吸收土壤氮素得到满足,这样即使通过根系的腐烂矿化或根系分泌物释放出来的仍然是¹⁵N,即使发生了氮素的转移,间作的禾本科作物体内¹⁵N也不会被稀释。这样就掩盖了 ID 法(Isotope Dilution Method)所计算的氮素转移,但氮素也一样发生了转移。其次,当土壤含氮量高,利于微生物活动和对根系的降解,促进了植物根系易腐解氮素的矿化和释放,在一定时期内提高了根系竞争吸收能力强的禾本科作物对该部分氮源的吸收量,也可能促进氮素的转移。

References:

- [1] Li Long, Sun J H, Zhang F S, *et al.* Wheat/maize or Wheat/soybean strip intercropping 1. Yield advantage and interspecific interactions on nutrient. *Field Crop Res.*, 2001, **71**: 123~137.
- [2] Eaglesham A R J, Ayanaba A, Rao V R, *et al.* Improving the nitrogen nutrition of maize by intercropping with cowpea. *Soil Biol. Biochem.*, 1981, **13**: 169~171.
- [3] Ofosu- Budu K G, Fujita K, Gamo K, *et al.* Dinitrogen fixation and nitrogen release from roots of soybean cultivar Bragg and its mutants Nts1116 and Nts1007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1993, **39**: 497~506.
- [4] Johanson A, Jensen E S. Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley interconnected by an Arbuscular Mycorrhizal fungus. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, **28**: 73~81.
- [5] Danso S K A, Palmason F, Hardarson G. Is nitrogen transfer between field crop? Examining the question through a sweet-blue lupin (*Lupinus angustifolius* L.)-oats (*Avena sativa*) intercrop. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, **25**: 1135~1137.
- [6] Fujita K, Ogata S, Matsumoto K, *et al.* Nitrogen transfer and dry matter production in soybean and sorghum mixed cropping system at different population densities. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1990, **36**: 233~241.
- [7] Papastylianou I, Danso S K A. Nitrogen fixation and transfer in vetch and vetch-oats mixtures. *Soil Biol. Biochem.*, 1991, **23**: 447~452.
- [8] Tomn G O, van Kessel C, and Alfred S E. Bi-directional transfer of nitrogen between alfalfa and brome grass: short and long term

evidence. *Plant and Soil*, 1994, **164**: 77~86.

- [9] Ta T C, Faris M A, and MacDowall F D H. Evaluation of ^{15}N methods to measure nitrogen transfer from alfalfa to companion timothy. *Plant and Soil*, 1989, **114**: 243~247.
- [10] Ledgard S F, Freney J R, Simpson J R. Assessing nitrogen transfer from legume to associated grass. *Soil Biol. Biochem.*, 1985, **17**: 575~577.
- [11] Jensen E S. Rhizodeposition of N by pea and barley and its effect on soil N dynamics. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, **28**: 65~71.
- [12] Shi Y, Shen Q R, Mao Z S, *et al.* Biological response of rice crop cultivated on upland soil condition and the effect of mulching on it. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, **7**: 271~277.
- [13] Hamel C, Furlan V and Smith D L. N_2 -fixation and transfer in a field grown mycorrhizal corn and soybean intercrop. *Plant and Soil*, 1991, **133**: 177~185.
- [14] Trannin W S, Urquiaga S, Ibijbijen J, *et al.* Interspecies competition and N transfer in a tropical grass-legume mixture. *Biol. Fertil. Soils*, 2000, **32**: 441~448.
- [15] Papastylianou and Danso S K A. Nitrogen fixation and transfer in vetgh and vetgh-oats mixtures. *Soil Biol. Biochem.*, 1991, **23**: 447~452.
- [16] Song Y C, Fen G, Li X L. Effect of different VAMF on red clover (*Trifolium pratense* L.) in utilizing organic phosphorus. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**: 1506~1511.
- [17] Xu B, Fen G, Pan J R, *et al.* Transferring of phosphorus between chestnut seedlings via ectomy-corrhizal hyphal links. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**: 765~770.
- [18] Ai W D, Zhang J L, Li L, *et al.* Phosphorus transfer via mycorrhial hyphal links between rye grass and red clover. *Acta Prataculturae Sinica*, 1998, **7**: 14~20.
- [19] Ai W D, Li X L, Zuo Y M, *et al.* Nitrogen transfers between maize and peanut by a common mycorrhizal fungi. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, **26**: 473~481.
- [20] Viera-Vargas M S, Souto C M, Urquiaga S, *et al.* Quantification of the contribution of N_2 fixation to tropical forage legumes and transfer to assoiated grass. *Soil Boil. Biochem.*, 1995, **27**: 1193~1200.

参考文献:

- [12] 石英, 沈其荣, 茆泽圣, 等. 旱作水稻的生物效应及表层覆盖的影响. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7**: 271~277.
- [16] 宋勇春, 冯固, 李晓林. 接种不同 VA 菌根真菌对红三叶草利用不同磷源的影响. *生态学报*, 2001, **21**: 1506~1511.
- [17] 徐冰, 冯固, 潘家荣, 等. 外生菌根菌丝桥在板栗幼苗间传递磷的效应. *生态学报*, 2003, **23**: 765~770.
- [18] 艾为党, 张俊伶, 李隆, 等. 黑麦草/红三叶草根系间菌丝桥传递磷的研究. *草业学报*, 1998, **7**: 14~20.
- [19] 艾为党, 李晓林, 左元梅, 等. 玉米、花生间菌丝桥对氮传递的研究. *作物学报*, 2000, **26**: 473~481.