

两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用

雍太文, 杨文钰, 任万军, 樊高琼, 向达兵

(四川农业大学农学院, 四川雅安 625014)

摘要: 【目的】探讨“小麦/玉米/大豆”(以下简称麦/玉/豆)和“小麦/玉米/甘薯”(以下简称麦/玉/薯)两种三熟套作体系的氮素种间竞争促进作用和高效吸收利用特性。【方法】采用根系分隔盆栽试验和¹⁵N土壤稀释标记法,研究两种三熟套作体系的氮素转移及吸收利用情况。【结果】不分隔与分隔相比,两种体系中小麦的¹⁵N总吸收量和¹⁵N作物回收率提高,土壤残留¹⁵N%丰度及总N含量降低。“麦/玉/豆”中玉米的¹⁵N总吸收量、籽粒¹⁵N吸收量、¹⁵N作物回收率、土壤残留¹⁵N%丰度及总N含量提高17.62%、24.52%、17.63%、13.9%和10.1%。“麦/玉/薯”则降低50.19%、42.58%、33.42%、29.6%和5.2%;降低了大豆的¹⁵N总吸收量、籽粒¹⁵N吸收量和¹⁵N作物回收率,但土壤总N含量提高6.06%;提高了甘薯的¹⁵N总吸收量和¹⁵N作物回收率,但土壤残留¹⁵N%丰度和总N含量降低0.9%和4.95%。【结论】两种体系均存在氮素种间竞争促进作用和氮素转移,“麦/玉/豆”较“麦/玉/薯”更有利于肥料氮的吸收、土壤肥力的保持和周年作物的可持续生产。

关键词: 小麦/玉米/大豆; 小麦/玉米/甘薯; 套作; 氮素转移; 氮素利用; 同位素稀释法

Analysis of the Nitrogen Transfer, Nitrogen Uptake and Utilization in the Two Relay-Planting Systems

YONG Tai-wen, YANG Wen-yu, REN Wan-jun, FAN Gao-qiong, XIANG Da-bing

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, Sichuan)

Abstract: 【Objective】 The aim of this paper was to study the mechanisms of interspecific nitrogen facilitation and transfer in the relay-planting systems of wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato. 【Method】 The methods of root barrier and ¹⁵N-isotope dilution were used to investigate the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems. 【Result】 Comparing the no barrier with solid barrier, the results showed that the ¹⁵N total uptake and crop recovery rate of wheat were highly remarkable and ¹⁵N% abundance and N% content of soil was lower obviously than that of solid barrier. In the wheat/maize/soybean system with no barrier, the ¹⁵N total uptake, ¹⁵N grain uptake, ¹⁵N crop recovery rate, soil ¹⁵N% abundance and N% content of maize increased by 17.62%, 24.52%, 17.63%, 13.9% and 10.1%, respectively. But in the wheat/maize/sweetpotato system with no barrier, the value of above index reduced by 50.19%, 42.58%, 33.42%, 29.6% and 5.2%, respectively. For soybean, the ¹⁵N total uptake, ¹⁵N grain uptake, and ¹⁵N crop recovery rate reduced, but the soil N% content increased by 6.06%. For sweetpotato, the ¹⁵N total uptake and crop recovery rate increased, but soil ¹⁵N% abundance and N% content reduced by 0.9% and 4.95%. 【Conclusion】 There existed nitrogen interspecific competition and facilitation and nitrogen transfer in the two relay-planting systems. In the wheat/maize/soybean system, the nitrogen uptake from fertilizer, soil fertility remaining and sustainable crop production were better than the system of wheat/maize/sweetpotato.

Key words: wheat/maize/soybean; wheat/maize/sweetpotato; relay-planting; nitrogen uptake and utilization; nitrogen transfer; ¹⁵N-isotope dilution

收稿日期: 2008-11-12; 接受日期: 2009-03-05

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(nyhyzx07-004-10)、国家粮食丰产科技工程专项(2006BAD02A05)

作者简介: 雍太文(1976—),男,四川南部人,讲师,博士研究生,研究方向为多熟套作体系营养竞争及作物高产高效。Tel: 0835-2882346; E-mail: yongtaiwen@sicau.edu.cn. 通信作者杨文钰(1958—),男,四川大英人,教授,博士,研究方向为作物高产高效栽培。Tel: 0835-2882004; E-mail: wenyu.yang@263.net

0 引言

【研究意义】农作物间套种植在中国农作史上有悠久的历史，是中国传统精细农业的精华。西南地区间套作多熟种植技术发达，“小麦/玉米/甘薯”（以下简称麦/玉/薯）和“小麦/玉米/大豆”（以下简称麦/玉/豆）作为该地区两种主要的旱地三熟套作模式，自应用以来，对该区粮食增产农民增收起到了十分重要的作用，尤其是近年发展起来的旱地新三熟“麦/玉/豆”模式^[1-2]，有效解决了当前农村争地、争肥、争劳动力的矛盾，示范推广面积逐年扩大，正在成为中国南方多熟制地区推进现代农业发展的一项新型实用技术。该模式集禾本科与禾本科、禾本科与豆科套作为一体，改变了传统“麦/玉/薯”模式及豆科禾本科两熟间套作模式的种间作用关系，有效实现了土地的用养结合和养分互补。因此，以西南地区“麦/玉/豆”与“麦/玉/薯”三熟套作体系为对象，研究其营养的种间竞争促进关系及氮素吸收利用特性，对完善间套作增产机理及营养特征具有重要的理论意义；同时，对完善“麦/玉/豆”种植新模式的施肥技术具有重要的指导作用。【前人研究进展】近年来，众多研究者围绕间套作系统，尤其是豆科禾本科构成的间套作系统地上部光热资源的竞争、补偿，地下部水分、养分的吸收利用及转移进行了大量研究。结果发现，豆科与禾本科间作具有明显的间作优势，能显著提高禾本科作物的产量和氮素吸收量^[3-4]，其作用机理在于间套作物复合体在共同生长期，豆科作物向禾本科作物发生了氮素的转移^[5]，改善了禾本科作物的氮素营养，促进了间作禾本科作物的生长，如 Danso 等研究羽扇豆和燕麦间作系统时发现间作的燕麦比单作条件下的氮素吸收量和生物量分别增加了 26.3% 和 21.1%^[6]，另一些研究也发现有 2%~17% 的豆科体内氮素发生了氮素的转移^[7-10]。不仅如此，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]，并转移到豆科作物中去。褚贵新等^[12]用 ¹⁵N 叶片标记法和稀释法研究了旱作水稻与花生间作系统，发现该系统存在氮素的双向转移，在不同施氮水平下，标记花生体内的氮素中有 4.22%~9.93% 转移吸收到了水稻植株体内，标记水稻体内的氮素中有 1.38%~4.39% 转移吸收到了花生植株体内。【本研究切入点】尽管前人对豆科与禾本科间套作体系的增产机制、营养竞争和促进机制及氮素转移机理等进行了深入研究，但这些研究大多是在当地条件下选择当地

间套作物来进行的，且研究体系主要是二熟作物间的变化，对中国西南丘陵地区的三熟套作体系，尤其是针对近年来发展较快的“麦/玉/豆”套作体系的氮素吸收利用特性鲜有报道。【拟解决的关键问题】本文拟通过根系分隔和同位素示踪技术，来研究“麦/玉/豆”与“麦/玉/薯”两种三熟套作体系的氮素转移与吸收。并通过两种三熟套作体系对肥料 ¹⁵N 的吸收与转移和土壤氮素残效进行分析，进而阐明其种间氮素竞争关系、氮素营养的高效利用机制和土地可持续利用的优越性，为更好地利用“麦/玉/豆”模式的套作优势，提高该模式周年产量和科学施肥奠定理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本试验小麦品种为川农 18，由四川农业大学任正隆教授提供；玉米品种为川单 418，由四川农业大学玉米所提供；大豆品种为贡选 1 号，由自贡市农业科学研究所提供；甘薯品种为川薯 164，由四川省农业科学院作物研究所提供。

1.2 试验设计

采用根系分隔盆栽试验，2×2×2 三因素随机区组设计。A 因素为施氮水平，A₁：不施氮、A₂：300 kg¹⁵N·hm⁻²；3 季作物分别为：小麦 84 kg¹⁵N·hm⁻²、玉米 180 kg¹⁵N·hm⁻²、大豆（甘薯）36 kg¹⁵N·hm⁻²；采用 ¹⁵N 稀释标记法（ID），分 2 部分标记，第 1 部分为标记小麦、玉米（用 ¹⁵NW.C 表示），大豆（甘薯）施等量的普通尿素，第 2 部分为标记大豆（用 ¹⁵NS₁ 表示）、甘薯（用 ¹⁵NS₂ 表示），小麦和玉米施等量的普通尿素；施用方法为分别在播种前和开花期将 1/2 的 CO(¹⁵NH₂)₂ 溶于水，用注射器注入根区土壤中，注射深度为 10 cm，防止 ¹⁵N 污染植株叶片；¹⁵N% 丰度为 10.24%，由上海化工研究院生产。其它营养元素在播种前作底肥一次性施入，每公顷用量分别为小麦 67.5 kg P₂O₅、90 kg K₂O，玉米 105 kg P₂O₅、112.5 kg K₂O，大豆（甘薯）63 kg P₂O₅、52.5 kg K₂O。

B 因素为种植方式，B₁：小麦/玉米/大豆，B₂：小麦/玉米/甘薯。

C 因素为根系分隔方式，C₁：塑料膜分隔，水、肥、根不可通过，C₂：不分隔，水肥根均可通过；将塑料盆从中间分割开，用聚氯乙烯黏合剂将塑料膜粘在中间，并用密封胶密封使其不漏水，从而将盆分隔成 2 室。每个处理重复 3 次。

在整个生长过程中设置防雨篷，避免雨水的淋洗，

并不定期向各处理浇灌自来水, 以确保两个作物区的土壤湿度相同且在作物适宜范围内。试验用盆钵直径 34 cm, 高 55 cm, 土壤风干过 2 mm 筛后每室装土 7.5 kg, 每盆 15 kg。小麦 2006 年 11 月 4 日播种, 2007 年 5 月 7 日收获, 每盆播 2 穴, 留 6 株; 玉米 2007 年 3 月 20 日播种, 8 月 3 日收获, 每盆播 1 穴, 留 2 株; 大豆和甘薯 2007 年 5 月 22 日播种, 10 月 29 日收获, 每盆播 2 穴, 留 2 株。播种时, 小麦(或大豆、甘薯)与玉米各占一半, 大豆、甘薯于小麦收获后连茬种植。

1.3 试验样品的采集、分析与计算

1.3.1 试验样品的采集、分析 于成熟期分别采集各作物的植株样和土样, 植株样采集时按地上部秸秆、籽粒和地下根系分开, 在 105℃ 下杀青 30 min 后继续在 75℃ 烘至恒重, 测定干物质重, 样品粉碎后过 60 目筛测定总 N 含量和 ^{15}N 丰度; 土样采集时用土钻在各作物生长区取 0~20 cm 土层两个样点, 混匀后, 按四分之一法则取 20 g 土, 余下的倒入原盆中, 所取土样风干后测定总 N 含量和 ^{15}N 丰度。植株及土壤总 N 含量用凯式半微量蒸馏定氮法测定, 并将凯式定氮后的馏出液浓缩至 1 ml, 用 ZHT-03 质谱仪测定 ^{15}N 丰度, 由河北省农林科学院遗传生理研究所测定。氮原子百分超 (atom% ^{15}N excess) 等于标记样品的 ^{15}N 与未标记样品的 ^{15}N (0.3665%) 之差。

1.3.2 种间作用关系及氮素转移的计算方法

(1) 植株中来自于 ^{15}N 的百分数 $\% \text{Ndff} = (\text{植株的 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分超} / \text{肥料的 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分超}) \times 100$;

(2) 植株吸收 ^{15}N 的量 (mg) $\text{Ndff} = \text{植株吸氮量 (mg)} \times \% \text{Ndff} / 100$;

(3) 植株对施入 ^{15}N 标记肥料的回收率 $\% \text{NUR} = \text{植株 Ndff} / \text{标记 } ^{15}\text{N} \text{ 的量 (mg/盆)} \times 100$ 。

(4) 氮营养竞争比率^[13] $\text{NCR}_{\text{wc}} = (\text{N}_{\text{iw}} / \text{N}_{\text{sw}}) - (\text{N}_{\text{ic}} / \text{N}_{\text{sc}})$; $\text{NCR}_{\text{cs}} = (\text{N}_{\text{ic}} / \text{N}_{\text{sc}}) - (\text{N}_{\text{is}} / \text{N}_{\text{ss}})$

式中, NCR_{wc} 、 NCR_{cs} : 小麦相对于玉米的营养竞争比率、玉米相对于大豆(甘薯)的营养竞争比率; N_{iw} 、 N_{ic} 、 N_{is} : 小麦、玉米、大豆(甘薯)在不分隔时的吸氮量; N_{sw} 、 N_{sc} 、 N_{ss} : 小麦、玉米、大豆(甘薯)在完全分隔方式下的吸氮量。 $\text{NCR}_{\text{wc}} > 0$ 或 $\text{NCR}_{\text{cs}} > 0$, 表明小麦比玉米或玉米比大豆(甘薯)氮营养竞争能力强; $\text{NCR}_{\text{wc}} < 0$ 或 $\text{NCR}_{\text{cs}} < 0$, 表明小麦比玉米或玉米比大豆(甘薯)氮营养竞争能力弱。

1.4 数据处理

本试验所有数据均采用 Microsoft Excel 2000 进行

平均数的计算, 并利用 DPS 统计软件进行方差分析和 LSD 多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 根系分隔对不同套作体系下作物氮素吸收的影响

施氮与根系分隔处理对不同套作体系下各作物的吸氮量均有影响(表 1)。对小麦, 两种体系的不分隔与完全分隔相比, 不施氮时, 秸秆和籽粒吸氮量均增加; 施氮时, 秸秆吸氮量分别降低 7.62% 和 5.76%, 籽粒吸氮量分别增加 35.79% 和 34.65%, 且秸秆和籽粒的总吸氮量也增加 12.48% 和 13.33%。

施氮和根系分隔处理都显著影响了玉米秸秆和籽粒的吸氮量, 但不同套作体系下的影响规律不一致。在麦/玉/豆体系中, 无论施氮与否, 不分隔的秸秆和籽粒吸氮量均高于完全分隔。不施氮时, 分别提高 25.30% 和 54.69%; 施氮时, 分别提高 18.18% 和 32.91%。而麦/玉/薯体系中, 无论是否施氮, 不分隔的秸秆和籽粒吸氮量均降低, 不施氮时, 分别降低 18.57% 和 23.68%; 施氮时, 分别降低 12.2% 和 29.03%。从两种体系不分隔时的吸氮量对比关系来看, 无论施氮与否, 玉米秸秆和籽粒吸氮量均以麦/玉/豆最高, 不施氮时, 分别高 82.46% 和 241.38%; 施氮时, 分别高 20.74% 和 59.09%。

不分隔与完全分隔相比, 无论施氮与否, 显著降低了大豆籽粒和块根吸氮量, 其中, 大豆籽粒降低 16.43% 和 16.75%, 甘薯块根降低 8.75% 和 58.01%; 而大豆和甘薯的秸秆吸氮量则表现为不施氮时降低 14.63% 和 15.45%, 施氮时增加 43.33% 和 15.57%, 但秸秆与籽粒的总吸氮量仍降低 9.31% 和 16.94%, 并且甘薯总吸氮量比大豆低 53.11%。

2.2 根系分隔对不同套作体系下各作物土壤中的 ^{15}N 丰度及总 N 含量的影响

由表 2 可知, 根系分隔对两种套作体系下各作物土壤中的 ^{15}N 丰度和总 N 含量有一定影响, 且影响规律不一致。对小麦, 两种体系不分隔土壤中 ^{15}N 丰度及总 N 含量均低于完全分隔, 说明小麦与玉米的套作体系中表现出极强的养分竞争优势, 更好地利用了自身土壤和氮肥中的氮, 使土壤中残留氮含量降低。

玉米的土壤氮含量在两种体系中的变化规律不一致, 对麦/玉/豆体系, 不仅在标记小麦、玉米的土壤中 ^{15}N 丰度及总 N 含量以不分隔最高, 而且在仅标记大豆不标记小麦、玉米的不分隔处理中, 也检测到

表 1 根系分隔对各套作体系作物吸氮量的影响

Table 1 Effects of root barriers on nitrogen acquisition of relay-planting crops (g/pot)

处理 Treatments	秸秆 Straw			籽粒 Grain (块根 Earthnut)			
	完全分隔	不分隔	平均	完全分隔	不分隔	平均	
	Solid barrier	No barrier	Mean	Solid barrier	No barrier	Mean	
麦/玉/豆 Wheat/maize/ soybean	小麦 -N	0.142a	0.164a	0.153Bb	0.247a	0.279a	0.263Bb
	+ ¹⁵ N	0.551a	0.509a	0.530Aa	0.475Bb	0.645Aa	0.560Aa
	均值 Mean	0.346a	0.337a		0.361Bb	0.462Aa	
	玉米 -N	0.415b	0.520a	0.468a	0.640b	0.990a	0.815a
	+ ¹⁵ N	0.330a	0.390a	0.360b	0.790b	1.050a	0.920a
	均值 Mean	0.373b	0.455a		0.715b	1.020a	
大豆 Soybean	-N	0.793a	0.677b	0.735Aa	1.795Aa	1.500Bb	1.648a
	+ ¹⁵ N	0.270b	0.387a	0.328Bb	1.910Aa	1.590Bb	1.750a
	均值 Mean	0.532a	0.532a		1.852Aa	1.545Bb	
	小麦 -N	0.163a	0.191a	0.177Bb	0.231a	0.275a	0.253Bb
	+ ¹⁵ N	0.538a	0.507a	0.522Aa	0.482Bb	0.649Aa	0.565Aa
	均值 Mean	0.351a	0.348a		0.356Bb	0.462Aa	
玉米 Maize	-N	0.350a	0.285b	0.318b	0.380a	0.290b	0.34Bb
	+ ¹⁵ N	0.410a	0.360b	0.385a	0.930a	0.660b	0.79Aa
	均值 Mean	0.380a	0.323b		0.650a	0.470b	
	甘薯 -N	0.343a	0.290b	0.317Bb	0.080a	0.073a	0.077b
	+ ¹⁵ N	0.623b	0.720a	0.672Aa	0.493a	0.207b	0.350a
	均值 Mean	0.483b	0.505a		0.287a	0.14b	

-N 和 +¹⁵N 分别代表不施氮和施同位素氮。表中数据为 3 次重复的平均值，同一行中不同大小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平，平均列单独比较

-N=No nitrogen applied, +¹⁵N=¹⁵N applied. Data is mean of three replications. Values followed by a different lowercase or capital letter within each row are significantly different at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. Different letters within the mean column indicate a significant different at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

表 2 根系分隔对套作体系下各作物土壤中 ¹⁵N 残留的影响Table 2 Effects of root barriers on ¹⁵N left in soil of relay-planting crops

分隔处理 Root barriers treatments	¹⁵ N% 丰度 ¹⁵ N% abundance						总 N 含量 Total N content (%)						
	麦/玉/豆			麦/玉/薯			麦/玉/豆			麦/玉/薯			
	小麦	玉米	大豆	小麦	玉米	甘薯	小麦	玉米	大豆	小麦	玉米	甘薯	
	Wheat	Maize	Soybean	Wheat	Maize	Sweetpotato	Wheat	Maize	Soybean	Wheat	Maize	Sweetpotato	
¹⁵ NW.C 完全分隔 Solid barrier	不分隔	0.534a	0.734b	0.503	0.497a	0.858a	0.479	0.079a	0.069b	0.099	0.084a	0.077a	0.098
	No barrier	0.498a	0.836a	0.509	0.495a	0.709b	0.469	0.069b	0.076a	0.103	0.078a	0.073a	0.095
¹⁵ NS _{1,2} 完全分隔 Solid barrier	不分隔	-	-	0.474a	-	-	0.442a	-	-	0.099b	-	-	0.101a
	No barrier	-	0.409	0.453a	-	0.372	0.438a	-	0.077	0.105a	-	0.073	0.096a
	No barrier												

表中数据为 3 次重复的平均值。同一列中两种标记方式下不同字母分别表示在两种分隔处理下差异达 5% 显著水平。“-”表示未测定，下同
Data is mean of three replications. Values followed by a different letter within each column are significantly different at 0.05 probability levels, respectively. “-” is no mensuration, the same as below

了玉米土壤中含有 ¹⁵N，¹⁵N% 丰度达 0.41%，说明玉米在与小麦、大豆的共生体系中存在竞争与促进双重作用，一方面促进了小麦对氮素的吸收，另一方面自

身又吸收利用了大豆肥料和土壤中的氮，使自身氮素吸收量提高的同时，还保障了土壤有较高肥力。对麦/玉/薯体系，在标记小麦、玉米的土壤中 ¹⁵N 丰度及总

N 含量均以不分隔最低, 且比麦/玉/豆低 15.19% 和 3.95%; 尽管在标记甘薯的不分隔处理中也检测到了玉米土壤中含有 ^{15}N , 但丰度仅为 0.372%, 比标记大豆后的玉米土壤丰度低 9.05%; 说明玉米在与小麦、甘薯的套作体系中, 由于甘薯不具有根瘤固氮作用, 玉米在促进小麦氮素吸收的同时, 无法通过甘薯来补偿损失的氮, 更多的是利用自身土壤和肥料中的氮, 导致植株吸氮量和土壤残留氮均降低, 不利土壤肥力的保持。

对大豆, 不分隔虽降低了标记大豆土壤中的 ^{15}N % 丰度, 但增加了总 N 含量; 进一步对标记小麦土壤 ^{15}N 的残效利用分析也发现, 不分隔处理土壤 ^{15}N % 丰度及总 N 含量均高于分隔处理, 这一规律与种植大豆前的小麦土壤氮素含量规律正好相反, 说明大豆通过氮素竞争与促进不仅提高了肥料氮的利用效率, 还通过根瘤固氮作用保持了土壤肥力; 而甘薯无论是对自身标记还是对标记小麦土壤 ^{15}N 的残效利用, 其土壤的 ^{15}N % 丰度及总 N 含量均以不分隔时最低, 且低于大豆。

2.3 根系分隔对不同套作体系下各作物吸收 ^{15}N 的影响

从表 3 可以看出, 根系分隔方式对各作物秸秆、籽粒和根中的 ^{15}N % 丰度及 ^{15}N 吸收量均有影响, 其规律与植株的氮素吸收规律类似。对小麦, 两种体系的秸秆、籽粒和根的 ^{15}N % 丰度均以不分隔时最高; 从植株对 ^{15}N 的吸收量来看, 与完全分隔相比, 不分隔虽降低了秸秆和根的 ^{15}N 吸收量, 但提高了籽粒的 ^{15}N 吸收量, 达 63.31% 和 54.10%, 使植株对 ^{15}N 的总吸收量比完全分隔高 28.80% 和 26.07%, ^{15}N 植株总回收利用率比完全分隔高 28.80% 和 26.07%。结合其土壤中的 ^{15}N 残效分析结果可知, 小麦与玉米共生后, 玉米通过促进作用不仅提高了小麦的氮肥吸收利用效率, 甚至可能把自身根区的氮素通过根系交互作用转移给了小麦, 双重效果共同促使小麦氮素吸收量提高。

对玉米, 在麦/玉/豆体系中, 尽管不分隔处理 ($^{15}\text{NW.C}$) 的秸秆、籽粒和根的 ^{15}N % 丰度相对完全分隔降低, 但对 ^{15}N 的吸收量却增加了, 其中籽粒吸收量增加 24.52%, 使植株对 ^{15}N 的总回收利用率提高

表 3 根系分隔对套作体系下各作物 ^{15}N % 丰度及 Ndff 的影响

Table 3 Effects of root barriers on ^{15}N % abundance and Ndff of relay-planting crops

处理 Treatments			^{15}N % 丰度 ^{15}N % abundance			植株吸收 ^{15}N 的量 Ndff (mg/pot)		
			秸秆 Straw	籽粒 Grain	根 Root	秸秆 Straw	籽粒 Grain	根 Root
麦/玉/豆 Wheat/maize/ soybean	小麦 Wheat	完全分隔 Solid barrier	4.185	4.758	4.217	213.095	211.269	8.580
		不分隔 No barrier	$^{15}\text{NW.C}$ 4.351	5.648	4.312	205.409	345.021	7.193
	玉米 Maize	完全分隔 Solid barrier	5.291	6.071	4.003	164.591	456.429	11.786
		不分隔 No barrier	$^{15}\text{NW.C}$ 4.506	5.711	3.443	163.509	568.362	12.464
			$^{15}\text{NS}_1$ 2.119	1.667	0.554	79.873	123.155	0.646
	大豆 Soybean	完全分隔 Solid barrier	$^{15}\text{NW.C}$ 0.45	0.399	0.55	2.283	6.287	0.390
			$^{15}\text{NS}_1$ 0.989	1.11	0.729	22.067	132.909	0.661
		不分隔 No barrier	$^{15}\text{NW.C}$ 0.501	0.444	0.514	5.272	12.480	0.418
			$^{15}\text{NS}_1$ 0.761	0.737	0.832	17.580	57.038	0.943
	麦/玉/薯 Wheat/maize/ sweetpotato	小麦 Wheat	完全分隔 Solid barrier	4.264	4.998	3.957	212.372	226.098
不分隔 No barrier			$^{15}\text{NW.C}$ 4.403	5.667	3.816	207.273	348.410	4.891
玉米 Maize		完全分隔 Solid barrier	4.36	6.033	4.88	165.831	533.736	12.8
		不分隔 No barrier	$^{15}\text{NW.C}$ 4.665	4.951	4.151	156.729	306.454	11.116
			$^{15}\text{NS}_2$ 1.112	1.513	0.679	29.069	91.734	0.981
甘薯 Sweetpotato		完全分隔 Solid barrier	$^{15}\text{NW.C}$ 0.852	-	0.787	30.634	-	20.996
			$^{15}\text{NS}_2$ 1.833	-	1.028	101.000	-	28.139
		不分隔 No barrier	$^{15}\text{NW.C}$ 1.045	-	1.079	49.478	-	14.938
		$^{15}\text{NS}_2$ 2.183	-	2.586	139.823	-	42.711	

17.63%；结合玉米土壤中不分隔处理 ^{15}N % 丰度及总 N 含量增加的结论可知，玉米氮素吸收量的提高不仅仅是依靠自身肥料吸收的提高，还有来自土壤及共生作物中的氮源，极有可能发生了大豆向玉米氮的转移，为了验证此推论，笔者进一步通过标记大豆来检测玉米植株和土壤中是否含有 ^{15}N ，结果发现，玉米土壤（表 2）和植株均检测到了标记大豆的 ^{15}N （表 3），其中秸秆、籽粒和根对 ^{15}N 的总吸收量达 203.674 mg/pot，占玉米总吸氮量的 16.24%，对大豆 ^{15}N 的回收率达 29.73%。与麦/玉/豆体系不同，麦/玉/薯体系中不分隔的玉米秸秆、籽粒和根的 ^{15}N % 丰度及 Ndff 均低于完全分隔，其中籽粒的 Ndff 低 42.58%，使 ^{15}N 植株总吸收量降低 50.19%，植株对 ^{15}N 的回收利用率降低 33.42%；进一步从甘薯标记的结果来看，虽然也在玉米秸秆、籽粒、根和土中检测出了 ^{15}N % 丰度，表明玉米吸收利用了标记甘薯的 ^{15}N ，但植株对甘薯 ^{15}N 的总吸收量较低，仅有 121.78 mg/pot，对甘薯 ^{15}N 的回收率也仅占 17.31%。与麦/玉/豆体系相比，麦/玉/薯体系中的玉米无论是对自身 ^{15}N 的总吸收量，还是从甘薯中吸收的 ^{15}N 量均降低，分别为 36.28% 和 40.21%。

对大豆，由于玉米对氮的竞争吸收，不分隔处理（ $^{15}\text{NS}_1$ ）的秸秆、籽粒和根中的 ^{15}N % 丰度及 Ndff 均降低，其中籽粒的 Ndff 低 57.08%（表 3），使植株对

^{15}N 的总吸收量低 51.45%，对 ^{15}N 的回收利用率降低 51.45%（表 4）。进一步分析完全分隔时小麦 ^{15}N 的残效表明，大豆对小麦 ^{15}N 的总吸收量达 8.96 mg/pot，占大豆总吸氮量的 0.4%，占小麦 ^{15}N 回收率的 0.66%；为了说明玉米是否也向大豆转移氮，笔者测定了不分隔小麦玉米均标记后的大豆 ^{15}N % 丰度，结果表明，大豆对 ^{15}N 的总吸收量达 18.17 mg/pot，高于大豆对小麦 ^{15}N 的残效吸收量，说明大豆在向玉米转移氮的同时，也竞争吸收了玉米根区中的氮，玉米有可能也向大豆发生了氮的少量转移。对甘薯，不分隔提高了秸秆和块根的 ^{15}N % 丰度及 Ndff，使植株对 ^{15}N 的总吸收量也提高 41.35%，对 ^{15}N 的回收利用率提高 41.35%；与大豆一样，甘薯也对小麦 ^{15}N 的残效氮进行了吸收，总吸收量达 51.63 mg/pot，占甘薯总吸氮量的 4.63%，是大豆对小麦 ^{15}N 残效利用的 4.76 倍；同时，甘薯对不分隔处理小麦玉米均标记后的总吸收量达 64.42 mg/pot，高于对小麦 ^{15}N 的残效吸收量，说明甘薯也竞争吸收了玉米根区中的氮，玉米有可能也向甘薯发生了氮的少量转移。二者对比分析可知，大豆无论是对自身 ^{15}N 的吸收量，还是对小麦、玉米 ^{15}N 的吸收量均低于甘薯，但大豆植株的总吸氮量高于甘薯，说明大豆更多的是利用自身根瘤固氮，肥料氮则被玉米竞争吸收，而甘薯不仅吸收利用了自身肥料氮，还相对较多地吸收利用了小麦土壤残效氮和玉米肥料与土

表 4 根系分隔对套作体系下各作物 ^{15}N 回收率的影响

Table 4 Effects of root barriers on ^{15}N % recovery rate of relay-planting crops

处理 Treatments	麦/玉/豆 Wheat/maize/soybean				麦/玉/薯 Wheat/maize/sweetpotato				
	秸秆 Straw	籽粒 Grain	根 Root	总计 Total	秸秆 Straw	籽粒 Grain	根 Root	总计 Total	
小麦 Wheat	完全分隔 Solid barrier	15.554	15.421	0.626	31.602	15.502	16.504	0.451	32.456
	不分隔 No barrier	14.993	25.184	0.525	40.702	15.129	25.431	0.357	40.918
		$^{15}\text{NW.C}$							
玉米 Maize	完全分隔 Solid barrier	6.007	16.658	0.430	23.095	6.052	19.479	0.467	25.999
	不分隔 No barrier	5.967	20.743	0.455	27.166	5.72	11.184	0.406	17.31
		$^{15}\text{NW.C}$							
		11.66	17.979	0.094	29.733	4.24	13.392	0.143	17.779
大豆(甘薯) Soybean (Sweetpotato)	完全分隔 Solid barrier	0.167	0.459	0.028	0.654	2.236	-	1.533	3.769
		$^{15}\text{NS}_1$							
		3.221	19.403	0.096	22.721	14.744	-	4.108	18.852
	不分隔 No barrier	0.385	0.911	0.031	1.326	3.612	-	1.090	4.702
		$^{15}\text{NS}_1$							
		2.566	8.327	0.138	11.031	20.412	-	6.235	26.647

壤中的氮，使土壤肥力下降。

3 讨论

3.1 三熟套作体系中作物间氮的双向转移

关于豆科与禾本科间套作系统中是否存在氮素的转移，一直存在分歧和争论。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^[7-10,14-15]，也有一部分研究结果表明氮素转移很少或没有发生转移^[6,16-17]。

除豆科向禾本科单向转移外,褚贵新等^[12]研究发现,水稻与花生的间作系统中存在氮的双向转移,即禾本科也会向豆科转移氮素。本研究表明,两种体系均发生了氮素转移,且为双向,但作物间的转移强度不一致(表5)。从向小麦的转移量来看,两种体系中玉米的转移量差异不大,分别占小麦总吸氮量的10.64%和9.91%,但净转移量差异较大,麦/玉/豆为13.15 mg/pot,麦/玉/薯为115.92 mg/pot。两种体系向玉米的转移量差异较大,麦/玉/豆中既有小麦氮的转移,又有大豆氮的转移,二者转移量达315.20 mg/pot,占玉米总吸氮量的21.89%,其中以大豆向玉米转移为主,占转移总量的64.62%,净转移量为181.31 mg/pot;而

麦/玉/薯体系中只有甘薯向玉米发生了转移,转移量占总吸氮量的10.10%,比麦/玉/豆低61.36%,且净转移量为-6.92 mg/pot。两种体系中的玉米均向大豆和甘薯发生了少量氮素转移,但向甘薯转移量比大豆高38.82%。在本研究中,“麦/玉/豆”套作体系下小麦、玉米的氮素利用效率(¹⁵N回收率)均得到了提高,大豆则降低,而“麦/玉/薯”套作体系则表现为小麦和甘薯的氮素利用效率提高,玉米降低。这一现象与氮的转移规律类似,说明两种体系氮素利用效率的提高与氮素的大量转移密切相关,它们通过氮素转移作用,打破了体系中土壤原有的氮素形态,并改变氮的转化途径,这样就刺激或诱导了体系中作物对氮的竞

表5 套作体系下作物间的氮素转移

Table 5 The nitrogen transfer between crops in relay-planting system

转移路径 Transfer path	氮素转移的量		氮转移占总吸氮量的比例	
	Amount of N transferred (mg/pot)		N transferred as % of total N acquisition (%)	
	麦/玉/豆 Wheat/maize/soybean	麦/玉/薯 Wheat/maize/sweetpotato	麦/玉/豆 Wheat/maize/soybean	麦/玉/薯 Wheat/maize/sweetpotato
小麦向玉米转移 From wheat to maize	111.529	-	7.536	-
玉米向小麦转移 From maize to wheat	124.681	115.921	10.638	9.908
玉米向大豆转移 From maize to soybean	9.210	12.785	0.459	1.379
大豆(甘薯)向玉米转移 From soybean (sweetpotato)to maize	203.673	121.785	14.353	10.098

争吸收,达到氮肥利用效率的提高。

3.2 三熟套作体系对养分吸收的种间作用机制

已有研究表明,间套作有利于促进作物增产,提高氮素的吸收利用效率。李隆等^[18]认为,豆科与大多数禾本科作物间套作时,豆科通过根瘤固氮及氮素转移等作用促进禾本科氮素吸收和生物产量增加,表现出禾本科的间作优势,禾本科通过大量吸氮来刺激并提高豆科的根瘤固氮效率,缓解了间套作体系中豆科的劣势作用。如小麦与蚕豆间作可使小麦籽粒干重增加67%、籽粒吸氮量增加79%^[7],小麦和豆间作能使小麦产量增加28.00%~30.00%^[3],水稻与花生间作能使水稻生物量提高18.00%~30.00%、氮素吸收量增加32.81%^[12],玉米和豆类间作可使玉米增产54.00%、氮素吸收量增加57.53%^[19]。禾本科与禾本科间套作,虽不能向豆科与禾本科那样通过种间竞争促进作用与刺激诱导作用实现种间互惠互利,但间套作优势仍然存在。如小麦与玉米间作时,小麦对土壤和肥料氮的竞争能力强于玉米,小麦为优势作物,生物产量和吸氮量均增加,玉米为劣势作物,生物产量和吸氮量均降低^[20]。

本研究表明,“麦/玉/豆”与“麦/玉/薯”两种体系表现出不同的种间作用机制(表6)与氮素吸收利用特性。“麦/玉/豆”体系中,由于小麦、玉米、大豆3个作物占据不同生态位,且发生了氮的转移,改变了作物对氮的吸收特性,最终表现出不同的种间作用关系。对玉米而言,无论施氮与否,最终表现出套作优势($NCR_{wc} < 0$, $NCR_{cs} > 0$),对氮的竞争能力强于小麦与大豆。虽然在以往的报道中指出^[20],玉米与小麦间套作时,玉米通常处于相对竞争劣势。但本研究中玉米独特的生态位赋予了特殊的氮素竞争关系,在氮素吸收上不仅受到小麦的竞争,还得到了大豆的补偿与促进作用,共同形成了玉米对氮的竞争优势。一方面玉米与小麦套作时,极大促进小麦对共生土壤与肥料氮素的吸收,表现在不分隔处理小麦土壤中¹⁵N%丰度及土壤总N含量降低,¹⁵N的回收利用率提高28.78%;另一方面,与大豆套作后,大豆及时向玉米转移较多的氮素,转移量为203.67 mg/pot,最终促使玉米不分隔的总吸氮量和¹⁵N回收利用率大大提高。玉米的这种氮素吸收特性不仅是该模式小麦、玉

米籽粒产量均能增加的有力保障，也是新模式能得以大力发展的潜力所在。大豆作为自我牺牲型作物，通过固氮转移和玉米竞争吸收把自身肥料氮更多地转移给了玉米，转移量占施氮量的 64.6%，无论施氮与否，与玉米相比，氮营养竞争处于劣势 ($NCR_{cs} > 0$)，总吸氮量和氮肥利用率均降低；肖焱波等^[5]认为，小麦与蚕豆间作体系中，随着根系交互作用的加强，蚕豆固氮能力也得到增强。本研究也证实了这点，在“麦/玉/豆”套作体系中，随着大豆向玉米转移大量肥料氮的同时，自身土壤残留氮仍得到增加，且植株吸氮量降低程度 (9.31%) 远低于对 ^{15}N 吸收量的降低程度 (51.45%)，低 81.90%，间接证明了不分隔处理固氮能力得到增强，因氮素转移而损失的氮又得到一定补充。“麦/玉/薯”体系中，小麦的氮素吸收特性与前人报道一致，与玉米相比，处于竞争优势 ($NCR_{wc} > 0$)。而玉米则由于生长前期被小麦竞争吸收部分氮，生长后期与甘薯共生时，又无法通过种间促进作用来补偿损失的氮，使其一生均表现出竞争劣势，总吸氮量和氮肥利用率均降低，且低于“麦/玉/豆”体系。甘薯在此套作体系中，虽表现出相对竞争优势 ($NCR_{cs} < 0$)，但优势不明显，其优势是在玉米与小麦的极强竞争劣势下的相对结果，且无法向大豆那样通过固氮作用来缓解因竞争导致的氮素损失，净转移损失量占施氮量的 34.59%。

表 6 套作体系下种间氮的营养竞争比率

Table 6 Nutrition competition ratio of relay-planting

处理 Treatments	^{-15}N		^{+15}N	
	NCR_{wc}	NCR_{cs}	NCR_{wc}	NCR_{cs}
麦/玉/豆 Wheat/maize/soybean	-0.293	0.581	-0.166	0.374
麦/玉/薯 Wheat/maize/sweetpotato	0.421	-0.081	0.361	-0.064

4 结论

本文通过根系分隔和 ^{15}N 土壤稀释标记方法，较好地揭示了两种三熟套作体系中氮素的转移和吸收利用特性。研究表明，两种体系均存在氮素的转移和种间竞争作用，但转移强度与种间竞争强度不一致，“麦/玉/豆”体系通过大豆对氮素吸收的自我牺牲和对小麦、玉米的促进作用，以及大豆的固氮和氮素转移作用，改变了“麦/玉/薯”体系中作物间的氮素竞争规律与吸收利用特性，使“麦/玉/豆”体系中作物

间的氮素转移量、种间促进强度及氮素吸收利用效率均高于“麦/玉/薯”。“麦/玉/豆”中小麦、玉米表现为套作优势，大豆为套作劣势；“麦/玉/薯”中小麦、甘薯表现为套作优势，玉米为套作劣势。“麦/玉/豆”较“麦/玉/薯”套作体系更有利于提高周年氮素吸收量、氮素残效利用和土壤肥力的保持。

References

- [1] 杨文钰, 雍太文, 任万军, 樊高琼, 牟锦毅, 卢学兰. 发展套作大豆, 振兴大豆产业. 大豆科学, 2008, 27(1): 1-7.
Yang W Y, Yong T W, Ren W J, Fan G Q, Mu J Y, Lu X L. Develop relay-planting soybean, revitalize soybean industry. *Soybean Science*, 2008, 27(1): 1-7. (in Chinese)
- [2] 雍太文, 任万军, 杨文钰, 樊高琼, 牟锦毅. 旱地新三熟“麦/玉/豆”模式的内涵、特点及栽培技术. 耕作与栽培, 2006, (6): 48-50.
Yong T W, Ren W J, Yang W Y, Fan G Q, Mu J Y. Meaning and characteristic and cultivation technique of “wheat/maize/soybean” relay planting system. *Cultivation and Planting*, 2006, (6): 48-50. (in Chinese)
- [3] Li L, Sun J H, Zhang F S, Li X L, Rengel Z, Yang S C. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Research*, 2001, 71: 123-137.
- [4] Eaglesham A R J, Ayanaba A, Rao V R. Improving the nitrogen nutrition of maize by intercropping with cowpea. *Soil Biology & Biochemistry*, 1981, 13: 169-171.
- [5] Stern W R. Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. *Field Crop Research*, 1993, 34: 335-356.
- [6] Danso S K A, Palmason F, Hardarson G. Is nitrogen transfer between field crops? Examining the question through a sweet-blue lupin (*Lupinus angustifolius* L.) -oats (*Avena sativa*) intercrop. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25: 1135-1137.
- [7] 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转移研究. 中国农业科学, 2005, 38(5): 965-973.
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 965-973. (in Chinese)
- [8] Hamel C, Smith D L. Inerspecific N-transfer and plant development in a mycorrhizal field-grown mixture. *Soil Biology & Biochemistry*, 1991, 23: 661-665.
- [9] 华 璐, 韦东普, 白玲玉, 姚允寅. 氮钾磷肥配合施用对白三叶草的固氮作用与氮素转移的影响. 生态学报, 2001, 21(4): 588-592.

- Hua L, Wei D P, Bai L Y, Yao Y Y. Effect of application of nitrogen, zinc and selenium on fixation of nitrogen and transfer of nitrogen fixed in white clover. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 588-592. (in Chinese)
- [10] 褚贵新, 沈其荣, 张 娟, 肖龙云, 毕泽圣. 用 ^{15}N 富积标记和稀释法研究旱作水稻/花生间作系统中氮素固定和转移. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 385-389.
- Zhu G X, Shen Q R, Zhang J, Xiao L Y, Mao Z S. Comparison of two methods used to study the biological nitrogen fixation and nitrogen transfer from peanut to rice in aerobic soil of intercropping system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 385-389. (in Chinese)
- [11] Jensen E S. Rhizode position of N by pea and barley and its effect on soil N dynamics. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28: 65-71.
- [12] 褚贵新, 沈其荣, 李奕林, 张 娟, 王树起. 用 ^{15}N 叶片标记法研究旱作水稻/花生间作系统中氮素的双向转移. *生态学报*, 2004, 24(2): 278-284.
- Zhu G X, Shen Q R, Li Y L, Zhang J, Wang S Q. Researches on Bi-directional N transfer between the intercropping system of groundnut with rice cultivated in aerobic soil using ^{15}N foliar labelling method. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 278-284. (in Chinese)
- [13] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients. *Field Crops Research*, 1993, 34: 319-334.
- [14] Oforu-Budu K G, Fujita K, Gamo K. Nitrogen fixation and nitrogen release from roots of soybean cultivar brag and its mutants Nts1116 and Nts1007. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1993, 39: 497-506.
- [15] Johanson A, Jenson E S. Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley interconnected by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28: 73-81.
- [16] Trannin W S, Urquiaga S, Ibjibijen J. Interspecies competition and N transfer in a tropical grass-legume mixture. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32: 441-448.
- [17] Papastylianou I, Danso S K A. Nitrogen fixation and transfer in vetgh and vetgh-oats mixtures. *Soil Biology & Biochemistry*, 1991, 23: 447-452.
- [18] 李 隆, 杨思存, 孙建好, 李晓林, 张福锁. 小麦/大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用. *应用生态学报*, 1999, 10(2): 197-200.
- Li L, Yang S C, Sun J H, Li X L, Zhang F S. Interspecific competition and facilitation in wheat/soybean intercropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2): 197-200. (in Chinese)
- [19] 李少明, 赵 平, 范茂攀, 高世昌, 郑 毅. 玉米大豆间作条件下氮素养分吸收利用研究. *云南农业大学学报*, 2004, 19(5): 527-574.
- Li S M, Zhao P, Fan M P, Gao S C, Zheng Y. Nitrogen uptake and utilization in intercropping system of maize and soybean. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2004, 19(5): 527-574. (in Chinese)
- [20] 肖焱波, 李 隆, 张福锁. 豆科//禾本科间作系统中氮营养研究进展. *中国农业科技导报*, 2003, 5(6): 44-49.
- Xiao Y B, Li L, Zhang F S. An outlook of the complementary nitrogen nutrition in the legume//graminaceae system. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2003, 5(6): 44-49. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)