

# 不同种植模式对土壤氮素转化及酶活性的影响\*

雍太文<sup>1,2</sup> 杨文钰<sup>1,2\*\*</sup> 向达兵<sup>1,2</sup> 陈小容<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>四川农业大学农学院, 四川温江 611130; <sup>2</sup>农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川温江 611130)

**摘要** 采用两年大田试验,研究了小麦-大豆(A<sub>1</sub>)、小麦-甘薯(A<sub>2</sub>)、玉米(A<sub>3</sub>)、小麦/玉米/大豆(A<sub>4</sub>)和小麦/玉米/甘薯(A<sub>5</sub>)5种植模式下,小麦/玉米/大豆套作体系的土壤酶活性变化特征及其对土壤氮素转化的影响.结果表明:与A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>和A<sub>5</sub>相比,A<sub>4</sub>提高了各作物在开花期(或吐丝期)和成熟期的土壤总氮含量及脲酶和蛋白酶活性,处理间表现为套作>单作、大豆茬口>甘薯茬口、边行>中行;降低了小麦、玉米土壤的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量及小麦土壤的硝酸还原酶活性.玉米土壤的硝酸还原酶活性在玉米、大豆共生前的拔节期为单作>套作,在玉米、大豆共生后的吐丝期和成熟期为套作>单作、大豆茬口>甘薯茬口;大豆土壤的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量及硝酸还原酶活性在分枝期为单作>套作,在开花期和成熟期为套作>单作、大豆茬口>甘薯茬口、中行>边行.

**关键词** 小麦/玉米/大豆套作 土壤氮含量 土壤酶活性 氮素转化

**文章编号** 1001-9332(2011)12-3227-09 **中图分类号** S151.9, S344.3 **文献标识码** A

**Effects of different planting modes on soil nitrogen transformation and related enzyme activities.** YONG Tai-wen<sup>1,2</sup>, YANG Wen-yu<sup>1,2</sup>, XIANG Da-bing<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-rong<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, Sichuan, China; <sup>2</sup>Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Southwest, Wenjiang 611130, Sichuan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(12): 3227-3235.

**Abstract:** A 2-year field experiment was conducted to study the dynamics of soil nitrogen content and urease, proteinase, and nitrate reductase activities in a wheat/maize/soybean relay strip intercropping system under effects of five planting modes, *i. e.*, wheat-soybean (A<sub>1</sub>), wheat-sweet potato (A<sub>2</sub>), maize (A<sub>3</sub>), wheat/maize/soybean (A<sub>4</sub>), and wheat/maize/sweet potato (A<sub>5</sub>). Among the five planting modes, A<sub>4</sub> increased the soil total nitrogen content and urease and protease activities at flowering (or spinning) and maturing stages, and the total nitrogen content and urease and protease activities were relay strip intercropping > single cropping, soybean > sweet potato, and fringe row > central row. A<sub>4</sub> decreased the NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents of wheat and maize soil, and the nitrate reductase activity of wheat soil. The nitrate reductase activity of maize soil was higher in single cropping than in relay strip intercropping at jointing stage but was in adverse at maize spinning and maturing stages, and the nitrate reductase activity of soybean soil was higher than that of sweet potato soil. At the branching stage of soybean, the soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents and nitrate reductase activity were higher in single cropping than in relay strip intercropping; whereas at flowering and maturing stages, the soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents and nitrate reductase activity were in the sequences of strip intercropping > single cropping, soybean > sweet potato, and center row > fringe row.

**Key words:** wheat/maize/soybean relay strip intercropping; soil nitrogen content; soil enzyme activity; nitrogen transformation.

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB100400)和大豆产业技术体系专项(CARS-04-PS19)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: wenyu.yang@263.net

2011-03-31 收稿, 2011-10-20 接受.

小麦/玉米/大豆套作是中国西南地区近几年发展的一种旱地新型高效多熟种植模式,相对于传统的小麦/玉米/甘薯套作,有利于增强作物对氮肥的吸收和利用,具有明显的增产节肥优势<sup>[1-2]</sup>. 但该模式中作物对氮素的高效利用机理尚不明确,尤其是植物-土壤系统的氮素循环特征及土壤氮素转化过程尚不清楚,不利于制定科学的低碳节肥技术,限制了该模式生态环保功能的充分发挥.

研究表明,土壤酶活性对作物养分的高效利用具有重要作用. 它参与土壤中重要营养元素的生物化学循环、土壤有机质及矿物质的转化过程等<sup>[3]</sup>,土壤酶活性高低可以反映土壤养分转化能力的强弱和土壤供应植物根系养分的潜在能力<sup>[4-5]</sup>,其中土壤脲酶、蛋白酶和硝酸还原酶活性对土壤氮素转化过程具有重要影响. 影响土壤酶活性变化的因素很多,作物间套作是重要因素之一. 张恩和<sup>[6]</sup>用盆栽法和根系栽培法对小麦/大豆和小麦/玉米 2 种植模式研究发现,间套作提高了作物根系酸性磷酸酶的分泌量. Ghosh 等<sup>[7]</sup>发现,大豆间作高粱使土壤中脱氢酶和硝酸还原酶活性均得到提高. 姜莉等<sup>[8]</sup>研究发现,玉米与向日葵、花生、红薯间作的根际土壤脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性均高于玉米单作.

氮素在土壤中主要以有机态存在,而作物吸收的氮素几乎全部是无机态氮,土壤的有机氮必需矿化为无机氮才能被作物吸收<sup>[9]</sup>. 土壤-肥料氮素的转化和去向在各种生态条件下显著不同,艾娜等<sup>[10]</sup>利用培养试验方法研究了灭菌与不灭菌条件下长期施用不同肥料及撂荒土壤对施入硝态氮及铵态氮等不同形态氮素的固持及转化特征;赵伟等<sup>[11]</sup>通过定位试验研究了不同培肥方式下黑土生态系统的氮素转化过程;Zhou 等<sup>[12]</sup>、Stuelpnagel<sup>[13]</sup>、Searle 等<sup>[14]</sup>、Li 等<sup>[15]</sup>、叶优良等<sup>[16]</sup>研究了间套作体系下土壤氮素转化特征及氮素损失途径,发现间套作通过调节根际土壤微生物,改善了硝化-反硝化作用,降低了 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 等无机氮在土壤中的富积,从而减少氮的损失,提高作物对氮的有效吸收.

尽管前人对间套作体系的土壤氮素形态、氮素转化过程及土壤酶活性进行了相关研究,但有关小麦/玉米/大豆三熟套作体系的研究尚未见报道. 因此,本文采用多年大田试验,结合不同种植模式的茬口效应研究了小麦/玉米/大豆与小麦/玉米/甘薯种植体系的土壤氮素含量和与土壤氮素转化相关的关键酶活性的动态变化特征及其差异性,以揭示小麦/

玉米/大豆套作体系对土壤氮素转化过程的调控机理,为该体系制定科学的施肥技术提供理论基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 作物品种及田间设计

供试小麦、玉米、大豆、甘薯品种依次为川农 18 (四川农业大学农学院)、川单 418 (四川农业大学玉米研究所)、贡选一号 (自贡市农业科学研究所) 和川薯 164 (四川省农业科学院作物研究所). 试验于 2006 年 11 月至 2008 年 10 月在四川农业大学教学农场进行. 采用单因素随机区组设计,设 5 种植模式:冬小麦-夏大豆轮作 ( $A_1$ )、冬小麦-夏甘薯轮作 ( $A_2$ )、春玉米单作 ( $A_3$ )、冬小麦/春玉米/夏大豆套作 ( $A_4$ ) 和冬小麦/春玉米/夏甘薯套作 ( $A_5$ ). 小区面积  $6 \text{ m} \times 7 \text{ m} = 42 \text{ m}^2$ ,3 次重复.  $A_4$ 、 $A_5$  各处理小区内套种 3 带,带宽 2 m,其中小麦 (或大豆、甘薯) 和玉米幅宽各 1 m,每幅小麦播种 5 行,幅内行距 0.2 m,穴距 0.1 m,穴留 4 株;每幅玉米播种 2 行,幅内行距 0.5 m,穴距 0.22 m,穴留 1 株;每幅大豆播种 3 行,幅内行距 0.33 m,穴距 0.33 m,穴留 3 株;每幅甘薯起双垄,垄宽 0.3 m,垄高 0.5 m,垄上单行,穴距 0.19 m,穴留 1 株. 小麦施肥量为  $\text{N } 84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 67.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;玉米施肥量为  $\text{N } 108 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;大豆 (或甘薯) 施肥量为  $\text{N } 36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 63 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 52.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,各作物的 P、K 肥与小麦的 N 肥全作底肥一次性施入,玉米、大豆 (或甘薯) 的 N 肥 1/2 作底肥,1/2 作追肥 (玉米大喇叭口期或大豆初花期).  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  各处理小区内各作物种植密度和施肥水平分别与对应的  $A_4$ 、 $A_5$  处理小区相同,即每小区单位面积的种植密度和施肥水平相同. 两年度试验中各作物的播种时间和收获时间大致相同,小麦 11 月 4 日播种,5 月中旬收获,玉米 3 月 20 日播种,8 月上旬收获,大豆、甘薯 5 月 22 日播种 (或栽插)、10 月下旬收获,大豆、甘薯于小麦收获后连茬套种于玉米空行中. 2007—2008 年度套作时换茬轮作,即小麦种在原玉米茬口上,玉米种在原大豆 (或甘薯) 茬口上.

### 1.2 土壤样品的采集

于小麦拔节期、开花期和成熟期,玉米拔节期、吐丝期和成熟期,大豆分枝期、开花盛期和成熟期,采用传统挖掘法取植株的土壤样品. 2006—2007 年度由于前茬相同,小麦拔节期尚未与玉米共生,未对该时期进行取样;甘薯采样时期与大豆相同. 小麦套

作处理分边 2 行和中 3 行分别取样,单作处理取中 3 行;大豆套作处理分边 2 行和中 1 行分别取样,单作处理取中 2 行;取样时,小麦和大豆在小区内各取样区随机取长势一致的样段两段,每段连续取 2 穴.玉米、甘薯套作与单作取样方法相同,每小区随机取长势一致的样段两段,每段取对称 2 行的连续 2 穴.从挖出土方(40 cm 深)中抖落与根系松散结合的土体作为待测土,将两个样段的土样混匀按 4 分法取样,过 0.45 mm 钢筛除去杂物,取 10 g 土保存在 4℃ 冰箱内,用于土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量的测定,剩下土样自然风干,用于土壤总氮含量和土壤酶活性的测定.

1.3 样品分析方法

土壤总氮含量采用凯氏定氮法<sup>[17]</sup>测定.称取 5.0 g 鲜土置于振荡瓶中,加 1 mol · L<sup>-1</sup> KCL 溶液 50 mL,于恒温气浴摇床在 120 r · min<sup>-1</sup> 振荡 60 min 后,取过滤液,保存在塑料瓶中,置于 4℃ 冰箱冷藏,1 周内用 INTEGRAL Futura 连续流动分析仪(ALLIANCE 公司,法国)测定土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量.参照《生态学常用试验研究方法与技术》<sup>[18]</sup>的测定方法,采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定土壤蛋白酶活性,苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性,酚二磺酸比色法测定土壤硝酸还原酶活性.

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据整理和作图.采用 SPSS 16.0 软件对数据进行方差分析(LSD 法),显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ .

2 结果与分析

2.1 不同种植模式土壤总氮含量变化

2.1.1 小麦土壤总氮含量 小麦土壤总氮含量随生育进程推进呈降低趋势,不同种植模式间表现为:与玉米共生前的拔节期单作高于套作,共生后的开花期和成熟期则为套作高于单作,尤其是 2007—2008 年度换茬轮作后,这种变化规律尤为明显(表 1).2007—2008 年度,套种玉米前,小麦土壤总氮含量为单作>套作、大豆茬口<甘薯茬口,其原因可能是该时期土壤中氮素矿化与硝化速度较慢,而大豆茬口在播种小麦前土壤总氮含量较高,促进了植株对土壤中氮素的吸收,使土壤总氮含量因植株的大量吸收而相对降低;随着小麦与玉米的套种共生,小麦开始竞争吸收玉米土壤中的氮,使套作小麦土壤中氮降低速度减慢,其土壤总氮含量开始表现为套作>单作、边行>中行、大豆茬口>甘薯茬口;成熟期,A<sub>4</sub>

表 1 不同种植模式对小麦土壤总氮含量的影响  
Table 1 Effects of different cropping patterns on soil total nitrogen content of wheat (g · kg<sup>-1</sup>)

处 理 Treat- ment	2006—2007		2007—2008		
	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
A <sub>1</sub>	2.15a	1.66b	2.86a	2.52a	2.34ab
A <sub>2</sub>	2.10a	1.60b	2.90a	2.45a	2.27b
A <sub>4-F</sub>	—	—	2.74a	2.61a	2.45a
A <sub>4-C</sub>	2.02a	1.90a	2.71a	2.57a	2.42a
A <sub>5-F</sub>	—	—	2.87a	2.52a	2.39ab
A <sub>5-C</sub>	2.01a	1.96a	2.49b	2.49a	2.29b

F:边行 Fringe rows; C:中行 Central rows. 同列中不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. 2006—2007 年度套作处理仅就中行取样 Wheat soils were sampled only from central rows in 2006—2007. 下同 The same below.

处理的边行比 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 和 A<sub>5</sub> 处理的边行和中行分别高 4.7%、7.9%、2.5% 和 7.0%.

2.1.2 玉米土壤总氮含量 对于玉米土壤总氮(图 1),2006—2007 年度,与大豆或甘薯套作共生前的拔节期,套作与单作间的土壤总氮含量差异不大;随着与大豆或甘薯的套作共生,套作处理的玉米因竞争吸收共生大豆或甘薯土壤中的氮,吐丝期和成熟期的土壤总氮含量有小幅度的上升,而单作处理则继续降低.2007—2008 年度,由于套作玉米轮种在大豆或甘薯茬口上,全生育期内土壤总氮含量均为套作>单作、大豆茬口>甘薯茬口;成熟期,A<sub>4</sub> 处理的土壤总氮含量分别比 A<sub>3</sub> 和 A<sub>5</sub> 处理高 24.7% 和 10.0%.

2.1.3 大豆、甘薯土壤总氮含量 由表 2 可知,大豆土壤总氮含量为套作显著高于单作,随生育进程的推进呈增加趋势;从边、中行效应来看,套作处理边行的土壤总氮含量高于中行;成熟期,A<sub>4</sub> 处理的边行比中行和 A<sub>1</sub> 处理分别高 3.1% 和 12.9%.对于甘薯,其土壤总氮含量为套作>单作,但随生育进程的推进逐渐降低.大豆与甘薯对比来看,除 2006—2007 年度分枝期大豆土壤总氮含量低于甘薯外,其他各生育时期均以大豆土壤总氮含量较高;2007—2008 年度成熟期,A<sub>4</sub> 处理边行的土壤总氮含量分别比 A<sub>2</sub> 和 A<sub>5</sub> 处理高 36.1% 和 27.4%.

2.2 不同种植模式土壤硝态氮和氨态氮含量变化

2.2.1 小麦土壤硝态氮和氨态氮含量 由表 3 可知,随生育进程的推进,小麦土壤中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量呈先增加再降低的趋势,开花期达到最高.不同种植模式间的变化规律为:套作<单作、大豆茬口<甘薯茬口、边行<中行,说明单作小麦从土壤中吸收  $\text{NO}_3^-\text{-N}$

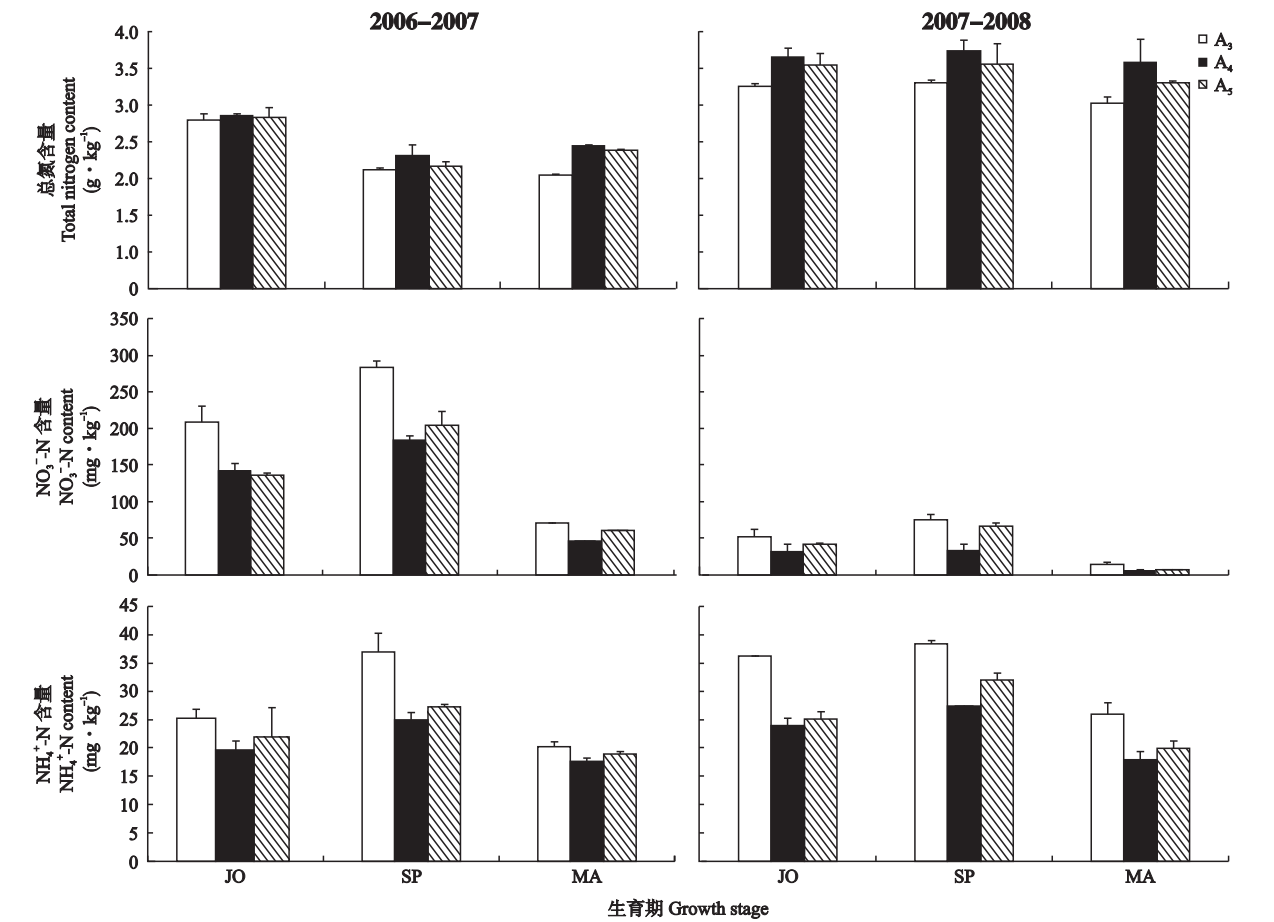


图1 不同种植模式对玉米土壤总氮、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的影响

**Fig.1** Effects of different cropping patterns on soil total nitrogen, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents of maize.

JO:拔节期 Jointing stage; SP:吐丝期 Spinning stage; MA:成熟期 Maturity stage. 下同 The same below.

表2 不同种植模式对大豆、甘薯土壤总氮含量的影响

**Table 2** Effects of different cropping patterns on soil total nitrogen content of soybean and sweet potato (g·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treat- ment	2006—2007			2007—2008		
	分枝期	开花期	成熟期	分枝期	开花期	成熟期
	Branching stage	Flowering stage	Maturity stage	Branching stage	Flowering stage	Maturity stage
A <sub>1</sub>	1. 73b	2. 14bc	2. 19ab	2. 54b	2. 59ab	2. 64ab
A <sub>2</sub>	2. 17ab	2. 06c	1. 99ab	2. 31c	2. 29b	2. 19b
A <sub>4-F</sub>	—	—	—	2. 68ab	2. 77a	2. 98a
A <sub>4-C</sub>	1. 96ab	2. 32a	2. 51a	2. 66ab	2. 71a	2. 89a
A <sub>5</sub>	2. 28a	2. 14bc	2. 08ab	2. 69a	2. 43ab	2. 34b

表3 不同种植模式对小麦土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的影响

**Table 3** Effects of different cropping patterns on soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents of wheat (mg·kg<sup>-1</sup>)

处 理 Treat- ment	2006—2007				2007—2008					
	开花期		成熟期		拔节期		开花期		成熟期	
	Flowering stage		Maturity stage		Jointing stage		Flowering stage		Maturity stage	
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N
A <sub>1</sub>	41. 61a	27. 34a	22. 89a	18. 58a	21. 00ab	27. 35abc	24. 30c	75. 25bc	14. 50b	13. 04ab
A <sub>2</sub>	44. 08a	26. 41a	24. 75a	19. 10a	23. 25a	30. 50a	32. 70a	95. 80a	18. 94a	14. 34a
A <sub>4-F</sub>	—	—	—	—	15. 95d	25. 15c	18. 95d	61. 15c	9. 80e	11. 46b
A <sub>4-C</sub>	37. 32b	20. 28b	12. 48b	16. 10a	17. 15ed	25. 95bc	20. 70d	72. 15bc	11. 18de	12. 10b
A <sub>5-F</sub>	—	—	—	—	19. 85bc	27. 70abc	24. 50c	80. 40ab	12. 06cd	11. 99b
A <sub>5-C</sub>	37. 20b	19. 04b	9. 76c	16. 16a	20. 60ab	29. 15ab	27. 30b	92. 35a	14. 01bc	12. 90ab



的量较低,而小麦/玉米/大豆套作有利于其对无机氮的吸收,降低了土壤中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的富积,既提高了氮肥利用效率,又减少了对环境的污染. 土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量与  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的变化规律一致,但  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量在各生育期的表现并不一致,在吸肥高峰的开花期含量最高,且差异最明显,其他生育期差异不显著(表 3),这可能与该时期矿化作用最强和蛋白酶活性最高有关. 可见小麦/玉米/大豆套作不仅提高了小麦土壤总氮含量,还降低了土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  等无机氮含量,减轻氮流失,提高了土壤中氮的有效性,从而有利于小麦植株对氮的高效吸收.

**2.2.2 玉米土壤硝态氮和氨态氮含量** 各生育期玉米土壤的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量变化规律比较一致,均为套作显著低于单作,大豆茬口显著低于甘薯茬口(图 1).

**2.2.3 大豆、甘薯土壤硝态氮和氨态氮含量** 由于固氮作用,大豆土壤的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  变化规律与小麦、玉米土壤不一致(表 4),在大豆固氮能力相对较弱的分枝期表现为:单作显著低于套作,大豆显著低于甘薯,2006—2007 年度  $A_1$  比  $A_2$  处理低 42.7%, $A_4$  比  $A_5$  处理低 35.2%,这可能与该时期大豆对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的吸收能力强于甘薯,减少了土壤中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的累

积有关;随着生育进程的推进,大豆固氮能力增强,土壤中有机氮增多,土壤氮的矿化与硝化作用增强,开花期与成熟期土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量表现为:大豆>甘薯、套作>单作、边行>中行,2007—2008 年度成熟期  $A_4$  处理边行的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量比  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_5$  处理分别高 10.1%、31.7% 和 7.7%. 由于大豆的固氮作用,各生育时期土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量均为大豆>甘薯;但单作与套作之间变化规律不一致,甘薯为单作>套作,而大豆除在 2007—2008 年度的分枝期为单作>套作外,其他时期均为套作>单作,边行>中行.

2.3 不同种植模式土壤脲酶活性

**2.3.1 小麦土壤脲酶活性** 由表 5 可知,种植模式对小麦土壤脲酶活性有显著影响,表现为套作显著高于单作,且随生育进程的推进,脲酶活性先升高再降低,以开花期最高,这一规律与土壤总氮含量的变化规律一致,但不同生育期处理间的变化规律不一致,尤其是 2007—2008 年度受茬口效应的影响,各生育期处理间的差异较大. 拔节期,处理间的变化规律为套作<单作、大豆茬口<甘薯茬口,边行<中行,这可能与该时期大豆茬口土壤肥力相对较高,促进了植株对土壤氮素的吸收,尿素水解速度慢,导致大豆茬口的脲酶活性偏低有关;随着生育进程的推进,

表 4 不同种植模式对大豆、甘薯土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量的影响  
Table 4 Effects of different cropping patterns on soil  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  and  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  contents of soybean and sweet potato ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

处理 Treat- ment	2006—2007						2007—2008					
	分枝期		开花期		成熟期		分枝期		开花期		成熟期	
	Branching stage		Flowering stage		Maturity stage		Branching stage		Flowering stage		Maturity stage	
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$
$A_1$	40.15c	28.26ab	26.31ab	44.04ab	22.08a	34.35a	29.33c	54.98a	51.02a	88.64ab	39.09ab	68.56a
$A_2$	70.03a	26.66b	25.62ab	42.71b	20.03b	30.65ab	42.96a	50.39ab	35.26b	83.74b	32.68bc	64.22ab
$A_{4\text{-F}}$	—	—	—	—	—	—	36.22abc	50.98ab	53.66a	94.55a	43.04a	69.08a
$A_{4\text{-C}}$	44.14b	30.67a	27.50a	45.36a	23.24a	34.18a	33.025bc	52.04ab	51.84a	92.09a	39.96a	64.27ab
$A_5$	68.16a	25.86b	21.44b	35.21c	18.18c	26.42b	39.14ab	47.88b	33.74b	82.55b	30.80c	59.84b

表 5 不同种植模式对小麦土壤脲酶 ( $\text{mg} \text{NH}_4^+ \text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 和硝酸还原酶 ( $\text{mg} \text{NO}_3^- \text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 活性的影响  
Table 5 Effects of different cropping patterns on soil urease ( $\text{mg} \text{NH}_4^+ \text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) and nitrate reductase ( $\text{mg} \text{NO}_3^- \text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) activities of wheat

处 理 Treat- ment	2006—2007				2007—2008					
	开花期		成熟期		拔节期		开花期		成熟期	
	Flowering stage		Maturity stage		Jointing stage		Flowering stage		Maturity stage	
	脲酶 Urease	硝酸还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸还原酶 Nitrate reductase
$A_1$	1.25b	131.5a	1.06b	113.3a	1.48b	64.5b	1.38b	86.2b	1.36b	66.7b
$A_2$	1.23b	130.6a	1.10b	114.3a	1.63a	82.0a	1.35b	93.2a	1.19c	71.8a
$A_{4\text{-F}}$	—	—	—	—	1.39b	42.0d	1.49ab	64.0e	1.52a	37.4e
$A_{4\text{-C}}$	1.56a	105.0b	1.25a	71.8b	1.46b	58.8bc	1.61a	68.5e	1.48a	46.3d
$A_{5\text{-F}}$	—	—	—	—	1.52ab	52.7c	1.43ab	71.4d	1.09c	47.5d
$A_{5\text{-C}}$	1.45a	109.9b	1.27a	75.0b	1.57a	61.2bc	1.56a	79.7c	1.36b	57.9c

土壤肥力逐渐降低,植株生长加速,加快了植株对肥料中氮素的吸收,土壤中留存尿素量减少,A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>和A<sub>5</sub>处理的脲酶活性持续降低,但A<sub>4</sub>处理仍因土壤总氮含量较高而表现出持续增高的趋势,导致大豆茬口高于甘薯茬口。

**2.3.2 玉米土壤脲酶活性** 各生育时期下,玉米土壤的脲酶活性为:套作>单作、大豆茬口>甘薯茬口,以需肥最多的吐丝期脲酶活性最高,该时期A<sub>4</sub>比A<sub>5</sub>和A<sub>3</sub>处理两年度平均高7.2%和16.5%(图2)。

**2.3.3 大豆、甘薯土壤脲酶活性** 由表6可知,大豆土壤的脲酶活性为套作>单作,随生育进程的推进呈升高趋势,这可能与大豆固氮能力增强后对肥料氮的吸收少,土壤中仍有较高浓度的尿素,使脲酶活性处于较高状态有关;其中边行的脲酶活性高于中行和单作,以成熟期差异最明显,A<sub>4</sub>处理的边行比中行和A<sub>1</sub>处理高15.6%和23.8%。甘薯土壤的脲酶活性也为套作>单作,但随生育进程的推进呈降低趋势,且各个时期单作或套作处理的脲酶活性均

低于相应大豆处理,在生育后期尤其明显,2007—2008年度成熟期A<sub>2</sub>比A<sub>1</sub>处理低31.4%,A<sub>5</sub>比A<sub>4</sub>处理的边行和中行分别低30.1%和19.2%。

2.4 不同种植模式土壤硝酸还原酶活性

**2.4.1 小麦土壤硝酸还原酶活性** 种植模式显著影响了小麦土壤硝酸还原酶活性(表5),两年度试验均为单作显著高于套作,随生育进程推进呈先增加再降低的变化趋势,以养分吸收高峰的开花期最高。进一步分析茬口效应和边、中行效应可知,各时期大豆茬口<甘薯茬口、边行<中行,以成熟期A<sub>4</sub>处理边行的硝酸还原酶活性最低,比A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>和A<sub>5</sub>处理的中行分别低25.7%、31.4%和19.8%。说明小麦/玉米/大豆套作通过降低土壤硝酸还原酶活性,有效抑制了小麦土壤中氮的反硝化过程,以提供更多的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N供小麦吸收,从而提高产量。

**2.4.2 玉米土壤硝酸还原酶活性** 种植模式对玉米土壤硝酸还原酶活性有显著影响,随生育进程推进呈先增加后降低的趋势,以吐丝期最高。各生育时期处

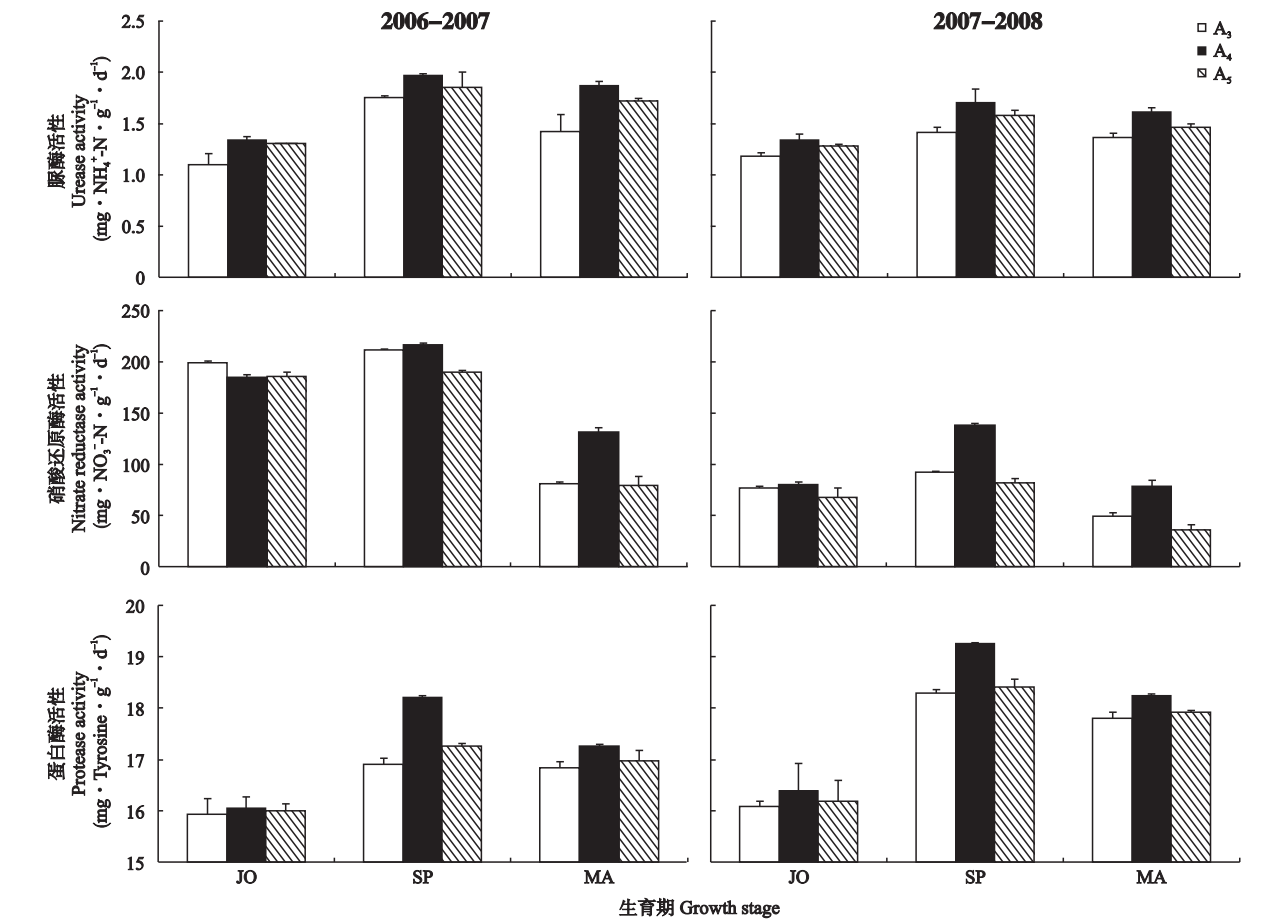


图2 不同种植模式对玉米土壤脲酶、硝酸还原酶和蛋白酶活性的影响  
Fig.2 Effects of different cropping patterns on soil urease, nitrate reductase and protease activities of maize.

表 6 不同种植模式对大豆、甘薯土壤脲酶( $\text{mg NH}_4^+-\text{N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )和硝酸还原酶活性的影响  
Table 6 Effects of different cropping patterns on soil urease ( $\text{mg NH}_4^+-\text{N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) and nitrate reductase ( $\text{mg NO}_3^--\text{N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) activities of soybean and sweet potato

处理 Treat- ment	2006—2007						2007—2008					
	分枝期		开花期		成熟期		分枝期		开花期		成熟期	
	Branching stage		Flowering stage		Maturity stage		Branching stage		Flowering stage		Maturity stage	
	脲酶 Urease	硝酸 还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸 还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸 还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸 还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸 还原酶 Nitrate reductase	脲酶 Urease	硝酸 还原酶 Nitrate reductase
A <sub>1</sub>	1. 11b	65. 7c	1. 17a	102. 9b	1. 25ab	125. 9b	1. 10b	30. 1b	1. 19bc	46. 0a	1. 23bc	46. 5b
A <sub>2</sub>	1. 07b	85. 5a	0. 99b	96. 2c	0. 86c	66. 5c	1. 18ab	33. 7a	1. 07c	44. 9a	0. 85d	29. 4d
A <sub>4-F</sub>	—	—	—	—	—	—	1. 35a	25. 6c	1. 42a	39. 9b	1. 53a	44. 0c
A <sub>4-C</sub>	1. 23a	61. 4d	1. 26a	130. 6a	1. 35a	143. 1a	1. 26ab	26. 0c	1. 27b	46. 2a	1. 32b	54. 0a
A <sub>5</sub>	1. 24a	70. 3b	1. 23a	81. 8d	0. 95bc	54. 5d	1. 21ab	32. 2ab	1. 18bc	35. 2c	1. 07c	27. 9d

理间的差异不一致,与大豆或甘薯共生前的拔节期为单作>套作,与大豆或甘薯套作共生后,随着共生大豆固氮能力的增强,A<sub>4</sub>处理的硝酸还原酶活性急剧增加,高于A<sub>3</sub>和A<sub>5</sub>处理,在2007—2008年度的吐丝期和成熟期,A<sub>4</sub>比A<sub>3</sub>处理分别高49.1%和58.7%,A<sub>4</sub>比A<sub>5</sub>处理分别高69.5%和119.1%(图2)。

**2.4.3 大豆、甘薯土壤硝酸还原酶活性** 种植模式显著影响了大豆和甘薯土壤的硝酸还原酶活性(表6)。大豆分枝期的土壤硝酸还原酶活性为单作>套作;之后,随着大豆固氮能力增强,土壤中累积的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 增多,土壤反硝化作用增强,A<sub>1</sub>和A<sub>4</sub>处理的硝酸还原酶活性逐步升高,且套作>单作,中行>边行,开花期和成熟期均以A<sub>4</sub>处理的中行硝酸还原酶活性最高。甘薯各生育期土壤硝酸还原酶活性均为单作>套作,随生育进程推进呈先增加再降低的趋势,其硝酸还原酶活性在开花期伴随着 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量的增高而出现峰值。大豆与甘薯对比来看,在大豆固氮能力较弱的分枝期,土壤硝酸还原酶活性为大豆<甘薯;之后,随着大豆固氮能力的增强,土壤硝酸还原酶活性为大豆>甘薯。

2.5 不同种植模式土壤蛋白酶活性

**2.5.1 小麦土壤蛋白酶活性** 种植模式对小麦土壤蛋白酶活性的影响规律与脲酶一致(表7),各生育期随植株吸肥量的增加而增加,开花期蛋白酶活性

最高。2007—2008年度还表现出较强的茬口效应与边际效应,由于大豆的固氮培肥作用,大豆茬口土壤有机氮增加,其蛋白酶活性也相应增强,各生育期均为大豆茬口>甘薯茬口、边行>中行;开花期,A<sub>4</sub>处理的边行比中行和A<sub>1</sub>处理分别高3.2%和3.2%。

**2.5.2 玉米土壤蛋白酶活性** 各生育期玉米土壤蛋白酶活性均为套作>单作、大豆茬口>甘薯茬口,且随生育进程的推进和吸肥量的增加,蛋白酶活性逐渐增强,吐丝期达到最高(图2)。

**2.5.3 大豆、甘薯土壤蛋白酶活性** 由表8可知,大豆和甘薯土壤蛋白酶活性受大豆固氮作用的影响,各生育期均为套作>单作、大豆茬口>甘薯茬口,且随生育进程的推进和吸氮量的增加而逐渐增强,以

表 7 不同种植模式对小麦土壤蛋白酶活性的影响  
Table 7 Effects of different cropping patterns on soil protease activities of wheat( $\text{mg Tyrosine} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )

处理 Treat- ment	2006—2007		2007—2008		
	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
A <sub>1</sub>	17. 7ab	16. 7ab	15. 1a	15. 9ab	14. 7a
A <sub>2</sub>	17. 5b	16. 4b	14. 5a	15. 6ab	14. 7a
A <sub>4-F</sub>	—	—	15. 4a	16. 4a	15. 1a
A <sub>4-C</sub>	18. 6ab	17. 1ab	15. 0a	15. 9ab	14. 8a
A <sub>5-F</sub>	—	—	15. 0a	15. 8ab	14. 6a
A <sub>5-C</sub>	19. 0a	17. 4a	14. 7a	15. 4b	14. 2a

表 8 不同种植模式对大豆、甘薯土壤蛋白酶活性的影响  
Table 8 Effects of different cropping patterns on soil protease activity of soybean and sweet potato( $\text{mg Tyrosine} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )

处理 Treat- ment	2006—2007			2007—2008		
	分枝期 Branching stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage	分枝期 Branching stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
A <sub>1</sub>	16. 41b	16. 92b	16. 39ab	14. 67ab	15. 69b	15. 07ab
A <sub>2</sub>	15. 79c	16. 32c	15. 73c	14. 54b	15. 06c	14. 66b
A <sub>4-F</sub>	—	—	—	14. 74ab	16. 07a	15. 32a
A <sub>4-C</sub>	16. 87a	17. 54a	16. 69a	14. 95a	15. 75b	15. 01ab
A <sub>5</sub>	16. 38b	16. 77b	16. 04bc	14. 49b	15. 06c	14. 96ab



开花期最高;从大豆的边中行效应来看,分枝期为边行<中行,但玉米收获后,大豆边行的蛋白酶活性逐渐增强,开花期和成熟期为边行>中行.

3 讨 论

3.1 套作与茬口效应对土壤酶活性的影响

与单作相比,间套作系统可以改变田间土壤温湿度、pH 及理化性质,从而影响土壤酶活性. 孟亚利等<sup>[19]</sup>研究了麦/棉套作对非根际与根际土壤酶活性的影响,结果表明,套作棉根际与非根际土壤的脲酶、蔗糖酶、蛋白酶及过氧化氢酶活性均高于单作棉. 柴强等<sup>[20]</sup>通过盆栽试验探讨了供水及间甲酚对小麦间作蚕豆土壤微生物多样性和酶活性的影响,结果表明,种植模式对土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性有极显著影响. 刘均霞等<sup>[21]</sup>研究表明,间作体系中玉米、大豆根际土壤中的脲酶和磷酸酶活性均显著高于相应单作,间作玉米、大豆的根际脲酶活性也分别比单作玉米、大豆增加 33. 5% 和 41. 3% .

本研究表明,套作与茬口对土壤酶活性有显著影响,小麦、玉米和大豆土壤脲酶和蛋白酶活性为套作>单作,大豆茬口>甘薯茬口;硝酸还原酶活性为套作<单作,大豆茬口<甘薯茬口. 不同种植模式间以小麦/玉米/大豆套作处理的土壤脲酶和蛋白酶活性最高、硝酸还原酶活性最低. 引起这一现象的原因可能有两方面. 第一,间套作通过作物根系次生物质产生的化感作用来调节田间土壤温湿度、pH、理化性质及微生物,从而影响土壤酶活性<sup>[22-23]</sup>. 笔者在前期研究中也发现,小麦/玉米/大豆套作有利于小麦根系分泌有机酸和可溶性糖<sup>[24]</sup>,在此作用下,小麦根际土壤湿度、pH 降低,根际土壤环境得以调节,从而影响土壤微生物数量,为土壤酶活性的调节奠定了基础. 第二,大豆茬口是小麦/玉米/大豆套作体系氮素转化关键酶活性调节的关键因素. 大豆的根瘤固氮作用提高了小麦/玉米/大豆套作体系各作物的土壤总氮含量,这就有可能改变土壤氮素平衡和作物对氮肥的吸收,从而影响土壤酶活性<sup>[25-26]</sup>.

3.2 套作与茬口效应对土壤氮素转化的影响

已有研究表明,间套作不仅能有效地改善土壤理化性质及温、湿度等环境条件,还能调节土壤中氮素的转化过程,使氮素形态向有利于作物吸收的方向进行. Wani 等<sup>[27]</sup>对不同种植模式下 9 个生长季节土壤有机氮矿化进行研究,结果表明,高粱+豇豆间作土壤有机氮矿化势、土壤供氮能力、植物总吸氮量和土壤-植物氮总量均明显高于高粱、豇豆单作和休闲地. Karpenstein-Machan 等<sup>[28]</sup>研究表明,豌豆与

黑麦间作时,由于发生了氮的固定,下季种玉米时需要的肥料氮高于相应单作.

本研究表明,相对于单作及小麦/玉米/甘薯套作,小麦/玉米/大豆套作有效调节了各作物的土壤氮素转化过程,使土壤氮素转化方向更有利于向作物吸收的形态进行. 小麦/玉米/大豆套作调节土壤氮素转化过程的作用机理可能有以下两个方面:一方面,小麦/玉米/大豆套作体系通过套作及茬口效应改善了作物根际微生态环境,使与土壤氮素转化过程有关的脲酶、硝酸还原酶和蛋白酶活性得到调节,从而调节土壤中的氮素矿化、氨化、硝化及尿素水解等过程. 即小麦/玉米/大豆套作体系通过增强各作物的蛋白酶和脲酶活性,促进了土壤中的氮素矿化和尿素水解作用,使土壤中的有机氮和人工施入的尿素更多地矿化和水解为  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  供作物吸收;同时又通过降低硝酸还原酶活性来抑制反硝化过程,以减少  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  因反硝化带来的损失和土壤残留,最终使植株对氮素的吸收速率和吸收量增加. 相关分析也表明,小麦植株吸氮量与土壤总氮含量(0. 648<sup>\*\*</sup>)、蛋白酶活性(0. 602<sup>\*\*</sup>)呈极显著正相关,与硝酸还原酶活性(-0. 727<sup>\*\*</sup>)、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (-0. 800<sup>\*\*</sup>)和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (-0. 858<sup>\*\*</sup>)含量呈极显著负相关;并且小麦土壤总氮含量与脲酶活性(0. 490<sup>\*</sup>)呈显著正相关,与硝酸还原酶活性(-0. 498<sup>\*</sup>)呈显著负相关. 因受大豆根瘤固氮作用的影响,玉米土壤中氮素反硝化作用增强,致使植株吸氮量与硝酸还原酶活性(0. 858<sup>\*\*</sup>)呈极显著正相关,与其他指标的相关性则与小麦类似. 大豆则因根瘤固氮作用,其相关性与小麦、玉米不一致,表现为大豆植株吸氮量与土壤酶活性和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (0. 902<sup>\*\*</sup>)、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (0. 770<sup>\*\*</sup>)含量均呈极显著正相关,其原因在于硝酸还原酶活性的提高促进了反硝化作用,而反硝化产物  $\text{N}_2$  与大豆根瘤结合实现生物固氮,增强了土壤有机氮含量,促进了土壤氮的有效转化. 另一方面,小麦/玉米/大豆套作通过氮素吸收的种间竞争作用和大豆根瘤固氮作用,打破了单作及小麦/玉米/甘薯套作体系的土壤氮素平衡,使有机氮和无机氮数量发生改变,从而影响土壤氮素转化过程. 但该体系的竞争作用如何影响土壤氮素转化过程还有待进一步研究. 此外,与小麦/玉米/大豆套作体系下土壤氮素转化过程有关的微生物群落特性,尤其是与硝化、反硝化等作用密切相关的细菌群落结构特性及功能还有待进一步研究,以便从根际微生态方面来深入研究小麦/玉米/大豆套作体系对土壤氮素转化的调控机理.



## 参考文献

- [1] Yong T-W (雍太文), Yang W-Y (杨文钰), Ren W-J (任万军), *et al.* Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(9): 3170–3178 (in Chinese)
- [2] Yong T-W (雍太文), Yang W-Y (杨文钰), Fan G-Q (樊高琼), *et al.* Study on the annual balance application of nitrogen fertilizer in the relay-cropping system of “wheat/maize/soybean”. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2009, **211**(3): 31–35 (in Chinese)
- [3] Dick WA. Influence of long-term tillage and crop rotation combination on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, **48**: 569–574
- [4] Jiang X-F (姜小凤), Wang S-Y (王淑英), Ding N-P (丁宁平), *et al.* Effect of different fertilization on soil enzyme activity and nutrients. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences* (核农学报), 2010, **24**(1): 136–141 (in Chinese)
- [5] Wang S-Q (王树起), Han X-Z (韩晓增), Qiao Y-F (乔云发), *et al.* Effects of land uses and fertilization systems on soil enzyme activities and nutrients. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(6): 1311–1316 (in Chinese)
- [6] Zhang E-H (张恩和). Effects of P application on root acid phosphates of crops in intercropping. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2001, **21**(1): 53–58 (in Chinese)
- [7] Ghosh PK, Manna MC, Bandyopadhyay KK, *et al.* Interspecific interaction and nutrient use in soybean/sorghum intercropping system. *Agronomy Journal*, 2006, **98**: 1097–1108
- [8] Jiang L (姜莉), Chen Y-Q (陈源泉), Sui P (隋鹏), *et al.* The rhizosphere soil enzyme activities of different corn intercropping system. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(9): 326–330 (in Chinese)
- [9] Peng L-F (彭令发), Hao M-D (郝明德), Lai L (来璐). Studies of long-term fertilization on soil organic N components. I. The variation of soil organic N components of N fertilizer and its mixture. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2003, **10**(1): 53–54 (in Chinese)
- [10] Ai N (艾娜), Zhou J-B (周建斌), Yang X-Y (杨学云), *et al.* Effects of long-term fertilization and fallow on the retention of different forms of nitrogen in different soils. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(12): 4109–4118 (in Chinese)
- [11] Zhao W (赵伟), Wang H-Y (王宏燕), Wang D-Q (王大庆), *et al.* Effects of manure and chemical fertilizers application on nitrogen transfer in black soil. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(2): 99–108 (in Chinese)
- [12] Zhou X, Mackenzie AF, Madramootoo CA, *et al.* Management practices to conserve soil nitrate in maize production system. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**: 1369–1374
- [13] Stuelpnagel R. Intercropping of faba bean (*Vicia faba* L.) with oats or spring wheat. Proceedings of International Crop Science Congress, Iowa, Ames, 1993: 14–22
- [14] Searle PGE, Comudom Y, Shedden DC, *et al.* Effect of maize+legume intercropping systems and fertilizer nitrogen on crop yields and residual nitrogen. *Field Crops Research*, 1981, **4**: 133–145
- [15] Li WX, Li L, Sun JH, *et al.* Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, **105**: 483–491
- [16] Ye Y-L (叶优良), Li L (李隆), Suo D-R (索东让). Effect of wheat/maize and faba bean/maize intercropping on soil nitrate nitrogen concentration and accumulation. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(1): 377–383 (in Chinese)
- [17] Bao S-D (鲍士旦). Analysis Methods for Soil and Agrochemistry. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 301–320 (in Chinese)
- [18] Zhang J-E (章家恩). Normal Methods and Technology of Ecological Experiment. Beijing: China Chemical Industry Press, 2007: 232–271 (in Chinese)
- [19] Meng Y-L (孟亚利), Wang L-G (王立国), Zhou Z-G (周治国), *et al.* Dynamics of soil enzyme activity and nutrient content in intercropped cotton rhizosphere and non-rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2076–2080 (in Chinese)
- [20] Chai Q (柴强), Huang G-B (黄高宝), Huang P (黄鹏). Effects of water supply and 3-methylphenol on soil microbial diversity and enzyme activity in wheat field intercropped with horse bean. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(9): 1624–1628 (in Chinese)
- [21] Liu J-X (刘均霞), Lu Y-G (陆引罡), Yuan H-W (远红伟), *et al.* Effects of intercrop maize and soybean on rhizosphere soil microbes and enzyme activity. *Guizhou Agricultural Sciences* (贵州农业科学), 2007, **35**(2): 60–61 (in Chinese)
- [22] Peng S-L (彭少麟), Shao H (邵华). Research significance and foreground of allelopathy. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(5): 780–786 (in Chinese)
- [23] Yan F (阎飞), Yang Z-M (杨振明), Han L-M (韩丽梅). Allelopathy in sustainable development of agriculture. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(4): 633–635 (in Chinese)
- [24] Yong T-W (雍太文), Chen X-R (陈小容), Yang W-Y (杨文钰), *et al.* Effect of different cropping systems on root exudates and above ground nitrogen uptake and soil nutrition of wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2010, **36**(3): 477–485 (in Chinese)
- [25] Sun YM, Zhang NN, Wang ET, *et al.* Influence of intercropping and intercropping plus rhizobial inoculation on microbial activity and community composition in rhizosphere of alfalfa (*Medicago sativa* L.) and Siberian wild rye (*Elymus sibiricus* L.). *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, **70**: 218–226
- [26] Inala A, Gunesa A, Zhang BF, *et al.* Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, **45**: 350–356
- [27] Wani SP, Rego TJ, Ito O, *et al.* Nitrogen budget in soil under different cropping systems// Ito O, Johansen C, Joseph J, eds. Roots and Nitrogen in Cropping Systems of the Semi-arid Tropics. Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki: Japan International Research Center for Agricultural Science, 1996: 481–492
- [28] Karpenstein-Machan M, Stuelpnagel R. Biomass yield nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop. *Plant and Soil*, 2000, **218**: 215–232

作者简介 雍太文,男,1976年生,博士,副教授。主要从事作物营养生理与生态研究。E-mail: yongtaiwen@sicau.edu.cn

责任编辑 张凤丽