

不同施肥处理对连续三季作物氮肥利用率及其分配与去向的影响

鲁彩艳¹, 马建^{1,2}, 陈欣¹, 张旭东¹, 史奕¹, 赵牧秋¹, 迟光宇^{1,2}

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所 陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:采用室外盆栽试验系统研究了不同施肥处理对连续3个生长季作物生长状况、标记¹⁵N利用率及其分配与去向的影响。结果表明, 高量氮肥的施用能显著提高作物的生长和产量, 而化肥配施玉米秸秆在第1生长季表现为抑制, 第2、第3生长季则相反。作物体内来自标记氮肥的含量和比例随生长季的增加显著下降, 高量氮肥和玉米秸秆的施用能显著提高其含量和比例($P<0.05$)。标记氮肥在土壤中的残留率随作物生长季的增加而降低, 而标记氮肥的累积作物利用率和总损失率随着生长季的增加而增加, 经过连续3季作物的吸收利用, 标记氮肥在土壤中的残留率、累积作物利用率和总损失率分别平均为15.82%、61.11%和23.07%。标记氮肥的作物利用率和损失率主要发生在第1生长季内, 高量氮肥的施用降低了标记肥料氮在土壤中的残留率, 增加了氮素损失率; 与单施化肥处理相比, 化肥配施玉米秸秆能明显增加标记肥料氮在土壤和作物中的回收率, 降低氮素损失率, 提高比例为21.74%, 从而说明在施肥当季, 通过施入高C/N比有机物料玉米秸秆合理调节土壤中C源和N营养的施用比例, 可以达到增加氮肥在土壤中的残留率, 提高氮肥利用率的目的。

关键词:施肥措施; ¹⁵N利用率; 标记氮肥的分配与去向

中图分类号: S147.34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)02-0400-07

Effect of N-fertilization on the Use Efficiency, Distribution and Fate of Labeled ¹⁵N Fertilizer in Soil-plant Systems Over Three Continuous Crop Cultivations

LU Cai-yan¹, MA Jian^{1,2}, CHEN Xin¹, ZHANG Xu-dong¹, SHI Yi¹, ZHAO Mu-qiu¹, CHI Guang-yu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A labeled ¹⁵N fertilizer pot experiment was conducted to study the effect of single application of chemical fertilizer, and combination of chemical fertilizer and maize straw on the plant growth, ¹⁵N use efficiency, distribution and fate of labeled ¹⁵N fertilizer. The results showed that high application rate of labeled ¹⁵N fertilizer significantly elevated the growth and yield of crop, however, the combination of chemical fertilizer and maize straw behaved restrain at the first crop cultivation, and accelerated at the second and third crop cultivations. The content and distribution proportion of plant ¹⁵N obviously decreased with increase of crop cultivations, high application rate of labeled ¹⁵N fertilizer and maize straw addition remarkably enhanced the content and distribution proportion of plant ¹⁵N ($P<0.05$). The residual rate of labeled ¹⁵N in soil decreased gradually with increase of crop cultivations, however, the accumulative N use efficiency of crops and overall loss rate of labeled ¹⁵N increased with increase of crop cultivations. After absorption of crops in three continuous crop cultivations, its soil residual rate, accumulative N use efficiency of crop and overall loss rate of labeled ¹⁵N was averagely 15.82%, 61.11% and 23.07% at maturity stage of the third crop cultivation, respectively. The use and loss of labeled ¹⁵N fertilizer occurred at the first crop cultivation. In single chemical fertilizer treatments, high application rate of N fertilizer decreased residual rate of labeled ¹⁵N in soil and increased its loss rate, combination application of chemical fertilizer and maize straw could obviously increase the N recovery rate by soil and plant, and decrease the loss rate of fertilizer N by 21.74%, which suggested that reasonable accommodating the application proportion of carbon source and nitrogen nutrition in soil

收稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40535028); 辽宁省博士启动基金项目(20091090)

作者简介: 鲁彩艳(1976—), 女, 内蒙古赤峰人, 助理研究员, 主要从事农田土壤-植物系统氮素循环过程研究。

通讯作者: 陈欣 E-mail: chenxin@iae.ac.cn

by application of organic material (maize straw) could increase residual rate of chemical N fertilizer in soil and advance N use efficiency of crop.

Keywords: fertilization practice; ^{15}N use efficiency; distribution and fate of labeled ^{15}N fertilizer

土壤氮素是土壤肥力中最活跃的因素,也是农业生产中限制作物产量的主要因子,施用 N 肥是当前提高农作物产量最有效的手段之一^[1-4]。但过量施用氮肥和不合理的施肥措施等已在一些国家或地区造成大量氮素损失,致使氮肥利用率降低,农田土壤氮素损失严重,不仅影响作物的生产,增加农业生产成本,同时还通过各种途径造成严重的环境污染问题,如地下水硝酸盐污染、地表水富营养化和温室效应等^[5-9]。因此,如何提高土壤的供氮能力,减少养分流失,实现肥料氮素的高效利用仍是亟待解决的一个重要问题,成为当今世界各国土壤学、肥料学、生态学和环境学等研究领域共同关注的热点问题之一。我国现阶段氮肥的平均利用率只有 30%~41%,但是变化幅度较大(在 9%~72%之间),说明减少氮肥损失、提高其利用率和增产效果的潜力还很大^[10]。

朱兆良院士指出,土壤中的交换性铵和硝态氮,既是作物可直接吸收的速效氮,又是各种氮素损失过程的共同的源。土壤中适量速效氮的存在无疑是必要的,但是,过量存在将增加氮素的损失。因此,在保证植物正常生长的条件下,通过合理调整 C 源与 N 素营养的施用比例,尽量避免土壤中矿质氮的过量积累,增加微生物和粘土矿物对土壤无机氮素的固定量,使其转化为有机氮素或矿物固定态铵而暂时储存在土壤中,减少氨挥发和硝化反硝化损失,是提高氮肥利用率的有效手段之一^[11-15]。而调控过渡状态有机氮或固定态铵的释放过程,又可以不断地满足作物生长对氮素养分的需求,协调土壤氮素供应^[16-19]。

黑土是东北地区农田的主要土壤类型,其最显著的特点是有机质含量高且土层深厚,一直是我国最重要的粮食生产基地之一。但长期以来,由于人类对耕地的不合理开发和过度利用,致使土壤有机质含量迅速下降,活性降低,土壤退化非常严重,其最突出的表现之一就是土壤对氮素养分的调控能力减退,最终导致氮肥利用率和土壤供氮能力下降、环境污染严重^[20-21]。因此,提高氮素利用率对于黑土农业的可持续发展具有重要的意义,而开展东北地区主要旱田土壤氮素转化过程及调控研究是解决这一问题的关键^[2,22-23]。为此,本研究以东北旱田黑土为研究对象,采取 ^{15}N 稳定同位素示踪技术和室外盆栽试验相结合

的方法,系统研究化肥硫酸铵配施有机物料条件下,不同施肥处理对连续三季作物生长状况、标记氮肥利用率及其在植株体内分配的影响;不同施肥处理标记氮肥在土壤-作物系统中的分布去向,为黑土区肥料的合理施用,进一步采取措施调控土壤氮素循环与供应,提高氮肥利用率,减少氮素损失提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

本试验在中国科学院沈阳生态试验站(41°32' N, 122°23' E)进行,该站是中国生态系统研究网络台站之一,建于 1987 年,位于辽宁省沈阳市苏家屯区十里河镇,地处下辽河平原,属暖温带湿润-半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同季。年平均气温 7~8℃,最高月(7 月)平均气温 24℃,最低月(1 月)平均气温-13℃,平均 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温为 3 300~3 400℃,太阳总辐射为 5 410~5 600 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,无霜期 147~168 d,年降雨量约 700 mm。

1.2 试验设计

供试土壤采自吉林省公主岭市农业科学院土壤肥料研究所“国家黑土肥力与肥料效益长期定位监测基地”,土壤为中层黑土。采取玉米地 0~20 cm 表层土壤,过 5 mm 筛,去除植物残体,将鲜土装入大塑料袋,扎紧备用。

室外盆栽试验根据密氏方法进行,花盆内径 25 cm,高 16 cm,每盆装入混合均匀的鲜土 6.5 kg,同一组盆栽试验连续进行 3 个生长季,即春小麦(辽春-9)-荞麦(辽荞-2)-春小麦(辽春-9),春小麦每盆为 15 株,荞麦每盆为 8 株。试验设以下 6 个处理,即: N_0 (CK); N_1 ; N_2 ; 玉米秸粉(M); N_1 +玉米秸粉(N_1 +M); N_2 +玉米秸粉(N_2 +M),每个处理 4 次重复。试验期间用重量法定期补充蒸馏水,使其含水量维持在 25%左右。

供试磷肥为重过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,有机物料为粉碎过 0.5 mm 筛的成熟玉米秸秆。磷钾肥和玉米秸秆作为底肥与土壤混匀施用,用量分别为 60 $\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、100 $\text{kg K}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 5 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。氮肥作为追肥在作物分蘖期施用(2006 年 5 月 9 日,2006 年 7 月 28 日和 2007 年 5 月 4 日),用量分别为 N_0 0 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 N_1 100 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 N_2 200 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,第 1 生长季施用

氮肥为标记硫酸铵 $[(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, 丰度为 50.12%, 购自上海化工研究院, 第 2、第 3 生长季施用氮肥为普通尿素。供试土壤和有机物料的物理化学性质见表 1。

1.3 样品采集与分析

在作物生长的关键时期, 即第 1 生长季的分蘖后期(2006 年 5 月 19 日)、扬花期(2006 年 6 月 5 日)和成熟期(2006 年 7 月 3 日)及第 2、第 3 生长季的成熟期(2006 年 10 月 1 日, 2007 年 6 月 29 日), 通过破坏性采样方法分别采取土壤和作物植株样品。鲜土样品过 2 mm 筛, 混合均匀, 部分鲜土带回实验室用于无机 N 及土壤含水量的测定, 部分鲜土风干磨碎, 过 0.15 mm 筛, 用于土壤全 N 的测定。分蘖后期和扬花期采取小麦植株后, 立即进行 105 ℃杀青 10 min, 之后 65 ℃烘干至恒重, 成熟期样品直接 65 ℃烘干至恒重, 粉碎, 过 0.25 mm 筛, 用于全 N 及其丰度的分析。

总有机 C 采用 TOC-5000A 总有机 C 分析仪测定(Shimadzu Corporation, Japan), 全 N 采用凯氏定氮法测定^[24]。测定土壤、植株全 N 的所有滴定液用 1 滴 3 mol·L⁻¹ 的硫酸进行酸化, 然后将滴定液在 80 ℃水浴蒸干至 2~3 mL, 转移至梨形瓶中, 用 MAT251 同位素比例质谱进行 ¹⁵N 丰度的分析测定^[24]。

1.4 计算方法与数据分析

原子百分超=丰度(实测值)-自然丰度(对照值)

肥料 N 的植物利用率(%)=(植株干重×植株全 N%×植株全 ¹⁵N 原子百分超)/(施标记肥量×肥料 N%×肥料 ¹⁵N 原子百分超)×100%

肥料 N 的土壤残留率(%)=(土样干重×土壤全 N%×土壤全 ¹⁵N 原子百分超)/(施标记肥量×肥料 N%×肥料 ¹⁵N 原子百分超)×100%

植物吸收自肥料中的氮量占植株总氮量的百分率(Ndff%)=(样品中 ¹⁵N 原子百分超)/(肥料中 ¹⁵N 原子百分超)×100%

植物吸收自土壤中的氮量占植株总氮量的百分率(Ndfs%)=100%-Ndff%

所有图表中的试验数据均采用 Microsoft Excel 2003 进行整理分析, 不同处理间参数的差异显著性通过 SPSS13.0 软件中的 three-way variance(ANOVA) 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对作物生物学性状、干物质量及吸氮量的影响

表 2 列出了不同生长季、不同施肥处理成熟期作物的生物学性状。由表中数据可知, 氮肥的施用对作物生育性状具有良好的作用。在第 1 生长季, 与 CK 相比, 单施氮肥处理能增加作物的株高、穗长和千粒重, 且千粒重随氮肥施用量的增加而增加, 但高量氮肥对株高和穗长没有影响。与单施化肥处理相比, 化肥配施玉米秸秆处理春小麦株高、穗长及千粒重均表现为不同程度的下降, N₂+M 处理对春小麦株高、穗长和千粒重的影响低于 N₁+M 处理。第 2、第 3 生长季, 无论施用玉米秸秆与否, 作物的株高、穗长、千粒重均随氮肥施用量的增加而增加。与单施化肥处理相比, 玉米秸秆与化肥配施处理也增加了作物的株高、穗长和千粒重, 这说明玉米秸秆添加对第 2、第 3 季作物的生长具有促进而不是抑制作用。

由表 3 可知, 第 1 生长季, 各处理春小麦秸秆干物质的变化趋势是分蘖后期干物质累积较慢, 自分蘖后期至扬花期干物质累积较快, 至小麦成熟期由于养分向籽实中转移, 其秸秆中干物质累积量下降。与低量氮肥相比, 高量氮肥的施用增加了秸秆和籽实中的干物质量。与单施化肥相比, 化肥配施玉米秸秆处理降低了春小麦秸秆和籽实中干物质的累积量, 并随小麦生长期的延长, 其影响更加明显。产生这一现象的原因是由于玉米秸秆为高 C/N 比有机物料, 施入土壤后会刺激微生物的活性, 产生微生物与春小麦植株共同竞争土壤氮素的现象, 使植株的吸氮量降低, 从而影响小麦的生长, 秸秆干物质累积量降低。第 2、第 3 生长季作物秸秆和籽实中干物质累积量仍随氮肥施用量增加而增加, 添加玉米秸秆处理作物秸秆和籽实中的干物质量也表现为增加, 说明玉米秸秆添加对第 2、第 3 季作物的生长具有促进而不是抑制作用。

为了进一步了解标记氮肥施入土壤后不同施肥处理对作物生长发育及氮素吸收规律的影响, 本试验对不同生长季作物植株体内标记氮素的吸收进行了

表 1 供试土壤和玉米秸秆的理化性质

Table 1 Physical and chemical characters of tested soil and maize straw

Test material	TC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹	TK/g·kg ⁻¹	Avail N/mg·kg ⁻¹	Avail P/mg·kg ⁻¹	Avail K/mg·kg ⁻¹	Fixed NH ₄ /mg·kg ⁻¹	pH
Soil	15.56	1.47	0.47	26.81	30.8	15.8	244.5	172.1	6.1
Maize straw	428.23	7.14							

表 2 3 个生长季成熟期作物各生物学性状的变化

Table 2 Biological characteristics of plant at maturity over three continuous crop cultivations

treatments	The 1st crop cultivation			The 2nd crop cultivation		The 3rd crop cultivation		
	株高/cm Plant height	穗长/cm Spike length	千粒重/g 1 000 kernel weight	株高/cm Plant height	千粒重/g 1 000 kernel weight	株高/cm Plant height	穗长/cm Spike length	千粒重/g 1 000 kernel weight
CK	62.92±1.34	6.46±0.13	28.07±0.53	42.25±0.59	24.76±1.39	36.93±0.73	2.98±0.47	24.98±0.63
N ₁	65.21±1.01	7.39±0.07	31.13±0.42	43.67±2.30	27.86±2.26	47.81±1.21	4.53±0.50	30.90±0.59
N ₂	65.31±1.73	7.78±0.32	33.77±1.27	45.53±1.37	28.86±0.20	50.88±1.56	6.05±0.17	34.80±1.28
M	55.61±1.62	5.18±0.09	26.54±0.63	43.80±2.22	25.99±1.57	39.08±1.93	2.84±0.10	25.16±0.32
N ₁ +M	61.72±0.82	6.20±0.19	29.85±0.42	44.69±0.77	27.81±1.55	51.20±1.31	5.27±0.54	31.40±1.15
N ₂ +M	62.92±1.34	6.46±0.13	28.07±0.53	48.67±2.75	27.60±1.55	50.25±1.43	5.66±0.49	34.05±0.62

表 3 3 个生长季作物秸秆和籽实中干物质重(g·pot⁻¹)

Table 3 Dry matter weight of straw and grain over three continuous crop cultivations(g·pot⁻¹)

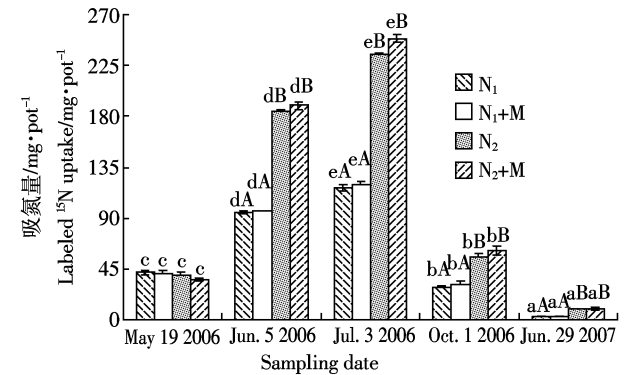
treatments	Straw				Grain			
	May 19 2006	Jun. 5 2006	Jul. 3 2006	Oct. 1 2006	Jun. 29 2007	Jul. 3 2006	Oct. 1 2006	Jun. 29 2007
CK	8.24±0.39	22.94±0.86	14.75±0.51	6.23±0.59	5.39±0.12	10.05±0.25	6.59±0.19	3.72±0.09
N ₁	8.30±0.22	26.57±0.97	16.95±0.60	8.71±0.66	11.52±0.44	13.13±0.83	9.83±0.54	11.03±0.41
N ₂	8.33±0.13	27.02±0.48	18.49±0.88	12.12±0.20	16.23±1.23	16.22±0.87	10.88±0.45	16.95±0.83
M	6.63±0.27	16.52±0.94	9.33±0.25	6.50±0.53	5.91±0.21	6.04±0.58	6.76±0.45	4.22±0.22
N ₁ +M	6.86±0.17	22.21±0.24	12.84±0.79	10.38±0.83	12.76±0.37	10.03±0.41	10.32±0.27	12.16±0.44
N ₂ +M	7.08±0.01	23.95±0.94	15.22±0.14	12.84±0.24	15.32±0.97	13.04±0.21	11.66±0.55	16.17±0.53

测定(图 1)。结果表明,第 1 季春小麦对标记氮肥的吸收量最高,变化为 116.9~248. 8 mg·pot⁻¹;第 2、第 3 生长季显著下降($P<0.05$),变化分别为 29.1~60.7 mg·pot⁻¹ 和 2.8~9.2 mg·pot⁻¹。这主要是因为第 2、第 3 生长季作物的氮素营养主要来源于当季所施用的未标记氮肥,而第 1 生长季残留的标记氮肥只是小部分被释放出来供第 2 和第 3 生长季作物吸收利用。不同施肥处理作物对标记氮肥的吸收量不同,与低量氮肥处理相比,高量氮肥处理显著提高了作物对标记氮肥的

吸收量($P<0.05$),这是因为高量氮肥处理中作物的生长较低量氮肥处理旺盛,因此其对氮素营养的需求就相对较高,故氮素吸收量高于低量氮肥处理;与单施化肥处理相比,化肥配施玉米秸秆处理也能增加作物体内标记肥料氮含量,但差异不显著($P>0.05$)。在第 1 生长季的分蘖后期,不同施氮量间作物对标记氮肥的吸收量基本相同,这主要是因为此时小麦对氮素的需求较低,低量氮肥处理中的氮素足以满足其正常生长需求并达到最大氮素吸收量。因此,高量氮肥的施用并不会提高作物对标记氮肥的吸收量。

2.2 不同施肥处理对作物体内氮素来源及分配比例的影响

已有研究表明,植物体内的氮素主要有两个来源,即肥料氮和土壤氮^[25]。图 2 显示了 3 个生长季成熟期作物体内氮素来源及其分配比例的变化。结果表明,第 1 生长季作物体内来自标记氮肥的比例最高,平均为 33.12%;第 2 生长季次之,为 11.23%;第 3 生长季最低,为 1.62%。第一生长季内,无论是否施用玉米秸秆,高量氮肥处理作物体内来自标记肥料氮的比例明显高于低量氮肥处理($P<0.05$),与 N₁ 和 N₁+M 相比,N₂ 和 N₂+M 处理作物体内来自标记肥料氮的比例分别提高了 57.96%和 47.76%;与单施化肥处理相比,化肥配施玉米秸秆处理也能显著提高作物体内来



注:a, b, c, d 和 e 代表不同采样日期的统计分析结果,A 和 B 代表每个采样日期不同处理间的统计分析结果,不同字母代表差异显著。

图 1 3 个生长季作物植株体内标记肥料氮的含量变化

Figure 1 Changes of labeled ¹⁵N uptake of plant over three continuous crop cultivations

自标记肥料氮的比例($P<0.05$), N_1+M 和 N_2+M 处理作物体内来自标记肥料氮的比例平均提高 31.16% 和 21.86%, 这是因为玉米秸秆的施用能为土壤微生物提供丰富的能源和碳源, 促进标记肥料向新合成有机氮的转化, 而这种有机氮活性较高, 能被快速矿化释放供作物利用。第 2 生长季内高量氮肥处理作物体内来自标记肥料氮的比例也明显高于低量氮肥处理 ($P<0.05$), 但添加玉米秸秆没有显著影响 ($P>0.05$)。第 3 生长季各施肥处理差异均不显著 ($P>0.05$)。

植株体内的氮素除来自于肥料氮外, 另一部分来自于土壤中原有的氮素, 3 个生长季内不同施肥处理作物体内来自土壤氮的比例显著高于来自标记肥料氮的比例, 均在 50% 以上, 这与前人的研究结果完全一致, 说明即使在施入高量氮肥的情况下, 作物植株体内的氮素主要还是来源于土壤中的氮素^[25-26]。

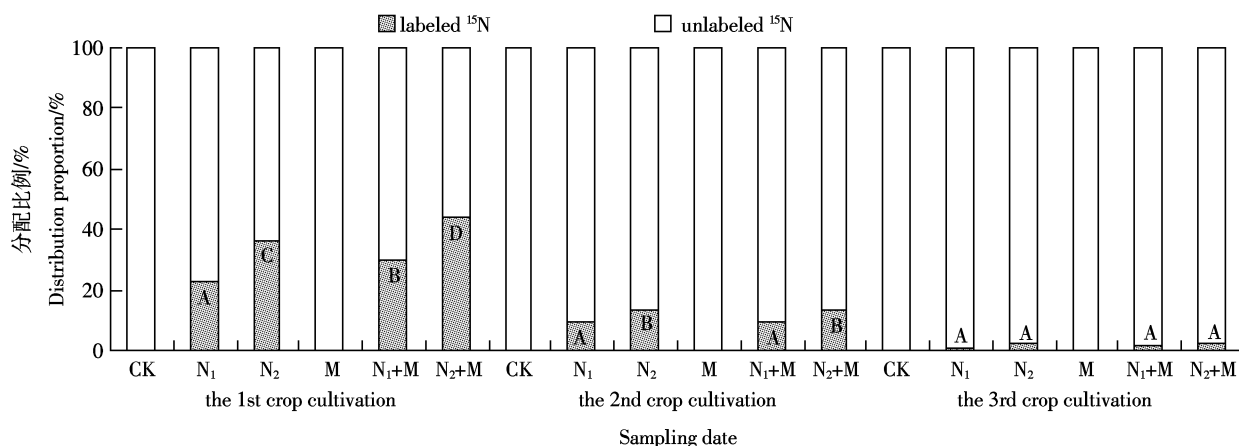
2.3 不同施肥处理对标记氮肥作物利用率、土壤残留率和氮素损失率的影响

在农田生态系统中, 标记氮肥施入土壤后, 一部分会被作物吸收利用, 一部分会残留在土壤中, 另一部分会发生氮素损失。本研究结果表明(表 4), 标记肥料氮在土壤中的残留率随作物生长季的延长而显著降低, 3 个生长季分别为 34.87%、20.23% 和 15.82% ($P<0.05$)。不同施肥处理标记肥料氮在土壤中的残留率明显不同, 与低量氮肥处理相比, 高量氮肥显著降低了标记肥料氮在土壤中的残留率, 平均降低比例为 7.81% ($P<0.05$); 相反, 添加玉米秸秆明显提高了标记氮肥在土壤中的残留率, 提高比例为 10.28% ($P<0.05$)。

作物对标记氮肥的利用率也随时间的延长而显著降低, 3 个生长季分别为 47.74%、11.87% 和 1.50%

($P<0.05$)。第 3 季春小麦对标记氮肥的利用率小于 2%, 说明经过 3 季作物对标记氮肥的持续吸收利用后, 其在下茬作物中的利用率已经很小, 主要是以有机氮的形式存在于土壤中, 从而增加了土壤的氮素含量, 进而提高了土壤的供氮能力(此数据未给出)。高量氮肥处理与低量氮肥处理对标记氮肥的作物利用率没有显著影响 ($P>0.05$), 然而, 添加玉米秸秆可显著提高作物对标记氮肥的利用率, 提高比例为 5.03% ($P<0.05$), 这是因为添加玉米秸秆可提高土壤新合成有机氮的含量, 而这种有机氮活性高, 可被矿化分解供作物吸收利用, 因此提高了作物对标记氮肥的利用率。

氮素损失率也随时间的延长而显著降低, 3 个生长季分别为 17.40%、2.76% 和 2.91% ($P<0.05$)。第 2 和第 3 生长季标记氮肥的损失率基本相同, 均在 3% 左右, 说明标记氮肥施入土壤后其损失主要发生在第 1 季作物生长期, 在下茬作物生长期仍有一定的损失, 但比例较小。高量氮肥处理标记氮肥的损失率高于低量氮肥处理, 但差异不显著 ($P>0.05$)。然而, 添加玉米秸秆可显著降低标记氮肥的损失率, 降低比例为 21.74% ($P<0.05$)。综合 3 个生长季数据可知, 添加玉米秸秆可以提高标记氮肥的土壤残留率和作物利用率, 降低氮素损失。这主要是因为玉米秸秆为高 C/N 有机物料, 能提供丰度的能源物质, 施入土壤后会刺激微生物活性, 产生微生物对可交换性铵态氮和硝态氮的固持作用, 使其转化为有机氮的形式保存在微生物体中, 从而避免了土壤中可交换性铵态氮和硝态氮的大量积累所造成的氮素损失^[27-30]。Xu 等的研究也表明, 与单施化肥相比, 化肥和稻秸的混合施用能明



注: A, B, C 和 D 代表每个作物生长季内不同处理间的统计分析结果, 不同字母代表差异显著。

图 2 3 个生长季成熟期作物体内氮素来源及分配比例

Figure 2 Source and proportion of plant N at maturity over three continuous crop cultivations

表 4 3 个生长季标记肥料氮在土壤-作物系统中的回收率与损失率

Table 4 Recovery and loss of labeled ^{15}N in soil-crop systems over three continuous crop cultivations

Treatments	The 1st crop cultivation			The 2nd crop cultivation			The 3rd crop cultivation		
	Use efficiency	Residual proportion	Loss proportion	Use efficiency	Residual proportion	Loss proportion	Use efficiency	Residual proportion	Loss proportion
CK	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
N ₁	46.70±1.62aA	34.14±1.53aAC	19.15±1.22aA	11.62±0.34bA	19.36±0.44bA	3.17±0.34bA	1.13±0.01cA	15.98±0.89cA	2.24±0.96cA
N ₂	46.82±0.73aA	32.71±1.86aA	20.47±2.42aA	11.18±0.02bA	18.72±1.27bA	2.81±0.23bA	1.78±0.07cB	13.97±0.71cB	2.97±0.23cA
M	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
N ₁ +M	47.72±0.75aB	37.76±2.21aB	14.52±1.94aB	12.57±0.13bB	22.44±2.82bB	2.75±0.95bA	1.24±0.01cC	17.84±1.21cC	3.35±0.62cA
N ₂ +M	49.70±0.86aB	34.86±1.30aC	15.44±2.14aB	12.13±0.62bB	20.39±1.29bAB	2.34±0.47bA	1.84±0.14cB	15.46±0.91cAD	3.08±0.53cA

注: a, b 和 c 代表作物不同生长季的统计分析结果, A, B, C 和 D 代表每个作物生长季内不同处理间的统计分析结果, 不同字母代表差异显著。

显的增加肥料氮的回收^[31]。

3 结论

(1) 在 3 个生长季中, 氮肥的施用对作物生育性状和干物质量均具有良好的作用, 能增加作物的株高、穗长、千粒重及干物质量。与单施化肥处理相比, 第 1 生长季内化肥配施玉米秸秆处理对小麦株高、穗长、千粒重及干物质量均表现为不同程度的抑制作用, 而第 2、第 3 生长季相反。

(2) 作物体内来自标记氮肥的含量和比例随作物生长季的增加而显著降低。高量氮肥处理作物体内来自标记肥料氮的含量和比例明显高于低量氮肥处理, 添加玉米秸秆也能显著提高作物体内来自标记肥料氮的比例。

(3) 标记氮肥在土壤中的残留率随作物生长季的增加而降低, 而标记氮肥的作物利用率和损失率随作物生长季的增加而增加, 至第 3 季作物成熟期, 标记肥料氮的残留率、累积作物利用率和总损失率平均分别为 15.82%、61.11% 和 23.07%。

(4) 标记氮肥的作物利用率和损失率主要发生在第 1 生长季内, 单施化肥处理中, 高量氮肥的施用降低了标记肥料氮在土壤中的残留率, 增加了氮素损失率。与单施化肥处理相比, 化肥配施玉米秸秆能明显增加标记肥料氮在土壤和作物中的回收率, 降低氮素损失率, 从而说明在施肥当季, 通过施入高 C/N 比有机物料玉米秸秆合理调节土壤中 C 源和 N 素营养的施用比例可以达到增加氮肥在土壤中的残留率, 提高氮肥利用率的目的。

参考文献:

[1] 沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失[J]. 土壤

学报, 2002, 39: 12-25.

SHEN S M. Contribution of nitrogen fertilizer to the development of agriculture and its loss in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39: 12-25.

[2] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境[J]. 土壤学报, 2002, 39: 3-11.

ZHU Z L. Nitrogen management in relation to food production and environment in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39: 3-11.

[3] 张福锁. 对我国持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识[J]. 土壤学报, 2002, 39: 41-55.

ZHANG Fu-suo. Discussion on nitrogen management and environment in agro-ecosystems of sustained development of agriculture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39: 41-55.

[4] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2002, 63: 117-127.

[5] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24-28.

JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Nitrate accumulation and its implication to environment in North China [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 24-28.

[6] Dunn S M, Vinten A J, Lilly A, et al. Modelling nitrate losses from agricultural activities on a national scale[J]. *Water Sci Technol*, 2005, 51: 319-327.

[7] Jordan C, Smith R V. Methods to predict the agricultural contribution to catchment nitrate loads: designation of nitrate vulnerable zones in Northern Ireland[J]. *J Hydrol*, 2005, 304: 316-329.

[8] Vallejo A, Skiba U M, Garcia T L, et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts[J]. *Soil Bio Biochem*, 2006, 38: 2782-2793.

[9] Abril A, Baleani D, Casado-Murillo N, et al. Effect of wheat crop fertilization on nitrogen dynamics and balance in the Humid Pampas, Argentina[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2007, 119: 171-176.

[10] 朱兆良. 中国土壤的氮素肥力与农业中的氮素管理[C]//沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 农业出版社, 1998: 160-211.

ZHU Zhao-liang. Soil nitrogen fertility of China and nitrogen management in agriculture[C]//Shen S M. (Eds.), *Soil fertility of China*. Beijing: China Agricultural Press, 1998: 160-211.

- [11] 姚槐应, 何振立, 黄昌勇. 矿质氮素和有机碳源配合使用提高氮素利用效率的机制[J]. 浙江农业大学学报, 1998, 24(6): 617-618.
YAO Huai-ying, HE Zhen-li, HUANG Chang-yong. Effect of nitrogen fertilizer in combination with organic carbon on nitrogen availability[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1998, 24(6): 617-618.
- [12] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 52-56.
JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Dynamics of various nitrogen forms in soil and nitrogen utilization under application urea and different organic materials[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(3): 52-56.
- [13] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
ZHU Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6.
- [14] Hillin C K, Hudak P F. Nitrate contamination in the seymour aquifer, north-central texas, USA[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2003, 70: 674-679.
- [15] Lin D X, Fan X H, Hu F, et al. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake Region, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17: 639-645.
- [16] 黄东迈, 朱培立, 王志明. 耕作土壤有机态氮内循环中几个问题的商榷[J]. 土壤学报, 2002, 39: 100-108.
HUANG Dong-mai, ZHU Pei-li, WANG Zhi-ming. Discussion on several aspects of internal cycling of organic nitrogen in cultivated soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39: 100-108.
- [17] 仇少君, 等. 盆栽条件下红黄泥微生物量氮和固定态铵的动态变化[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 524-531.
QIU Shao-jun, et al. Dynamics of soil microbial biomass nitrogen and fixed Ammonium in reddish clayey soil during pot experiment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(3): 524-531.
- [18] 张杨珠, 等. 湖南几种耕地土壤固定态铵释放的动力学研究 [J]. 生态环境, 2007, 16(3): 994-999.
ZHANG Yang-zhu, et al. Kinetics of release of fixed ammonium from several types of cultivated upland soils and paddy soils in Hunan Province, China[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 994-999.
- [19] Schneiders M, Scherer H W. Fixation and release of ammonium in flooded rice soils as affected by redox potential[J]. *Eur J Agron*, 1998, 8: 181-189.
- [20] Hu G, Wu Y Q, Liu B Y, et al. Short-term gully retreat rates over rolling hill areas in black soil of Northeast China[J]. *Catena*, 2007, 71: 321-329.
- [21] Ma Q, Yu W T, Zhao S H, et al. Relationship between water-stable aggregates and nutrients in black soils after reclamation[J]. *Pedosphere*, 2007, 17: 538-544.
- [22] Peng X L, Liu Y Y, Luo S G, et al. Effects of site-specific nitrogen management on yield and dry matter accumulation of rice from cold areas of Northeastern China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6: 715-723.
- [23] 韩晓增, 等. 黑土区水田化肥氮去向的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1859-1862.
HAN X Z, et al. Fate of fertilizer nitrogen in paddy field of black soil region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1859-1862.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Chemical analysis in farming soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [25] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen in soils of China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
- [26] Smith J I. Cycling of nitrogen through microbial activity[M]//Hatfield J I, Stewart B A (Eds.). Soil biology: Effects on soil quality. CRC Press Inc. U. S. A, 1994: 91-120.
- [27] Wagner G H, Wolf D C. Carbon transformations and soil organic matter formation[C]//Sylvia D M, Fuhrmann J J, Hartel P G, et al. (Eds.). Principles and applications of soil microbiology. Prentice Hall, NJ, 1999: 218-258.
- [28] Khalil M I, Hossain M B, Schmidhalter U. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 1507-1518.
- [29] Mungai N W, Motavalli P P. Litter quality effects on soil carbon and nitrogen dynamics in temperate alley cropping systems[J]. *Appl Soil Ecol*, 2006, 31: 32-42.
- [30] Nayak D R, Babu Y J, Adhya T K. Long-term application of compost influences microbial biomass and enzyme activities in a tropical Aerobic Endoaquept planted to rice under flooded condition[J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, 39: 1897-1906.
- [31] Xu Y C, Zhang Y L, Shen Q R, et al. An innovative method for the treatment of rice straw to improve nitrogen uptake efficiency[J]. *Biol Fertil Soils*, 2005, 41: 291-294.