植物营养与肥料学报 2000,6(2):133～139
Plant Nutrition and Fertilizer Science

稻田农牧沼生态系统中氮的转化与循环研究

张美良[1],吴建富[2],刘经荣[2],郭成志[3],刘卫东[4]
(1. 江西农业大学农学院,南昌 330045;2. 江西农业大学国土资源与环境学院;
3. 江西农业大学生物技术研究开发中心;4. 江西农业大学食品科学系)

摘要:应用^{15}N示踪方法,研究了稻田农牧沼生态系统中N的储存、转化、流向及其利用效率。证明猪对紫云英青贮饲料中粗蛋白质的消化率为53.76%,猪粪和猪尿对青贮饲料中N的回收率分别为39.36%和24.71%,猪粪尿沼气发酵,N的回收率达97.9%,水解N含量为发酵前的2.6倍。绿肥和沼肥与化肥配合施用能促进N向稻谷转移,从而有利于产量的提高,且肥料N在土壤中的残留量相当于单施化肥的2～2.5倍,而气态损失N,后者为前者的2.6～8.2倍。整个系统的综合经济效益比单纯的肥稻稻增加3～4倍,生态效益和社会效益显著。

关键词:^{15}N;紫云英;生态系统;氮素流向
中图分类号:S181;S143.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2000)02-0133-07

紫云英是江西稻区的传统绿肥,为水稻的主要有机肥源,对粮食生产和培肥地力曾起过重要的作用。70年代以来,由于化肥用量增多,特别是绿肥的直接经济效益较低,导致紫云英种植面积严重滑坡,鲜草产量也相应下降,这对稻区农业可持续发展起着明显的负面效应。为此,本项研究在原有的肥-稻-稻农作制的基础上,实行"紫云英肥饲兼用-猪粪尿沼气发酵-沼肥还田",将"农牧沼"组成一个复合生态模式,通过食物链和沼气发酵循环,采用^{15}N示踪方法,着重研究该模式中N的储存、转化、流向及其利用效率,以达到提高绿肥和整个模式的功能和效益,为建立适应稻区的农业生态模式提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　^{15}N标记绿肥

用低肥力土壤种植紫云英,施以^{15}N丰度为50.5%的硫酸铵,于盛花期收割,得^{15}N丰度为11.85%的紫云英鲜草,部分用作水稻基肥,部分制成青贮饲料。

1.2　猪的饲养和猪粪尿沼气发酵

供试猪为2头月龄相同的三元杂交阉公猪,分别置于Dracher代谢笼饲养。分预试、试验和试后3期。预试期6天,饲喂一般青贮饲料和适量无N淀粉,使猪适应试验条件;试验期2天,日喂3次,每次喂^{15}N标记的青贮饲料750g(按干物计,其中青贮饲料占46.7%,无N淀粉占51.3%及少量食盐和糖),其^{15}N丰度为11.58%;试后继续饲喂4天,饲料同预试期。饲养过程中分别定时收集粪和尿,并进行测定。同时选取试验期猪粪尿在密闭容器内进行沼气发酵3个月,得^{15}N丰度为2.73%的沼肥。

收稿日期:1999-02-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(39560020)
作者简介:张美良(1962—),男,江西省余干县人,副教授,作物栽培教研室主任,主要从事作物栽培和生态研究。

1.3 盆栽试验

供试土壤为红粘土发育的潴育性水稻土，土壤 pH 6.2，有机质 27.9g/kg。全 N 1.42g/kg，有效 P 13mg/kg，速效 K 145mg/kg，碱解 N 127mg/kg。采用模拟的方法，于网室内用直径 28cm，高 33cm 的白铁筒，底部按容重 1.5g/cm^3 构筑犁底层 9cm(合干土 8.3kg)，上盛 17cm 土壤为耕作层(合干土 11.5kg)，筒上沿为 7cm，以保持水层。通过犁底层下渗的水视为渗漏水，并用盛有卵石的塑料盆承接导入盛有适量 0.5mol/L 硫酸液中。定时搜集水稻生长全过程的渗漏液。供试水稻品种为超丰早，以磷钾为肥底，每盆栽秧 3 穴，每穴 5 株。试验设计见表 1。

表 1 试验方案

Table 1 Design of experiment

Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ		Ⅳ	
		Ⅲ(1)	Ⅲ(2)	Ⅳ(1)	Ⅳ(2)
无氮肥(对照)	^{15}N 硫酸铵	1/2 ^{15}N 绿肥 N + 1/2 ^{14}N 硫酸铵	1/2 ^{14}N 绿肥 N + 1/2 ^{15}N 硫酸铵	1/2 ^{15}N 沼肥 N + 1/2 ^{14}N 硫酸铵	1/2 ^{14}N 沼肥 N + 1/2 ^{15}N 硫酸铵

其中，处理Ⅲ和Ⅳ采用交叉标记法各设两个分处理，每个处理和分处理均重复 3 次。施肥量按 N 945，P_2O_5 473，K_2O 945mg/盆，施于耕作层(无氮肥处理除外)。除绿肥提早 10 天施用外，其余肥料均于栽秧前一次性施用。所用标记肥料^{15}N的丰度(%)，硫酸铵为 12.51%，绿肥(紫云英)为 11.85%，沼肥为 2.73%。有机肥中不足的磷钾量用钙镁磷肥和氯化钾补足。水稻成熟期分别采取稻谷、稻草、稻根和耕层及犁底层土壤样品，供分析。

1.4 分析测定和计算

绿肥、沼肥、猪粪尿、水稻、饲料和渗漏水的 N 按常规分析方法[1]进行。测定^{15}N丰度样品预处理按陈子元、曹亚澄报道的方法[2]操作。^{15}N丰度，由中国农业科学院原子能研究所采用苏联 МИ1305 型质谱仪测定。

饲料消化率，按动物饲养学计算公式计算：

$$\text{饲料中某营养成分的消化率}(\%)=\frac{\text{食入的某营养成分}-\text{粪中的某营养成分}}{\text{食入某营养成分}}\times 100\%$$

2 结果分析

2.1 紫云英青贮饲料在猪体内的 N 素代谢

2.1.1 猪对紫云英青贮饲料粗蛋白质的消化利用 通过 2 天饲喂^{15}N标记的青贮饲料，根据^{15}N在粪中的排泄动态，择取^{15}N排泄高峰时段 2 天 的粪测定并计算出猪对紫云英青贮饲料中粗蛋白质(粗蛋白质＝N×6.25)的消化率(表 1)。

从粗蛋白质的消化率看，两头猪很接近，平均为 53.76%，达到正常水平，说明猪能很好消化吸收紫云英青贮饲料中的粗蛋白质。

猪体未能消化吸收的含 N 化合物及新陈代谢的废物则通过粪和尿排出体外，其排出数量及^{15}N回收量见表 2。两头猪排出的粪分别回收紫云英青贮饲料中的^{15}N为 39.53%和 39.06%；尿分别回收 23.49%和 25.93%。表明猪排出的粪尿含 N 量仍很高，达紫云英青贮饲料中 N 的 64%。这是农业生产上优质的有机肥源，应注意收集、保存和利用。

2.1.2 紫云英青贮饲料中^{15}N通过猪粪、尿排出的动态变化 在开始饲喂^{15}N标记的青贮饲

表 2　猪对紫云英青贮饲料中粗蛋白的消化率

Table 2　Crude protein digestibility of the ensilaged milk vetch by pigs

试验号 Code	食入饲料总量 Take forage (g)	食入 N 总量 N absorbed (g)	干粪重 Dry wt. of feces (g)	粪中 N 总量 Tot. N of feces (g)	粗蛋白质消化率 Digestibility of CP(%)
1	1050	13.62	189.6	6.378	53.17
2	1050	13.62	190.7	6.219	54.34
平均	1050	13.62	190.2	6.299	53.76

表 3　喂饲紫云英青贮饲料猪粪、尿中^{15}N的回收率

Table 3　The rates of ^{15}N recovery of feces and urine of pigs after feeding milk vetch labelled ^{15}N

试验号 Code	鲜粪 Feces			尿 Urine		
	粪排出(g) Feces excreted	^{15}N回收 Recovery mg	^{15}N回收 Recovery %	尿排出(g) Urine excreted	^{15}N回收 Recovery mg	^{15}N回收 Recovery %
1	3261.1	506.1	39.53	15031.1	300.7	23.49
2	3777.8	500.0	39.06	16758.2	331.9	25.93
平均	3523.5	503.1	39.30	15894.6	316.3	24.71

注:每头猪食入标记^{15}N青贮料 1050g,其中^{15}N富集量为 1280mg

Note: Take milk vetch lalelled ^{15}N 1050g and ^{15}N accumlated 1280mg per pig.

料后的 4～166 小时,每隔 12 小时分别收集全部猪粪和尿测定^{15}N丰度(%),结果见下图。

从图中可知,猪食用青贮饲料后 4～10 小时,1、2 号猪粪中 ^{15}N 丰度比本底丰度(0.375%)高出 0.012% 和 0.094%,说明此时青贮饲料中^{15}N已开始排出体外,不同猪体稍有差异,而排出高峰期基本趋于一致,即在食后 46～58 小时,其峰值为 7.5% ～8.3%之间,82 小时仍维持在最高峰值的一半左右,而后逐渐下降,至 166 小时仍高出本底值 40%左右。^{15}N通过尿开始排出猪体外的时间为食后至 4 小时,两头猪均已有相当数量^{15}N排出,其^{15}N丰度分别比本底丰度高出 0.833 和 0.591 百分点,高峰期出现在 34～46 小时,比通过粪排出约早 15 个小时,说明猪对青贮饲料能很快消化吸收;70 小时尿中^{15}N仍维持在高峰值一半左右,至 166 小时仍高出本底值 60%以上。说明尿中的 N 是经过猪充分

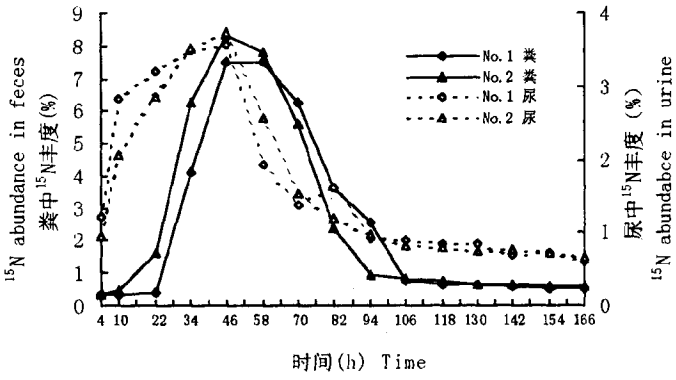

图:紫云英青贮饲料中^{15}N通过猪粪尿排出的动态变化

Fig.: Dynamic changes of ^{15}N in feces and urine feedling the ensilaged milk vetch

(^{15}N本底值为 0.375%　Background value of ^{15}N is 0.375%)

吸收以后参与血液循环再逐步排出体外。这一结果与有关报道[3]大体相同。

2.2 猪粪尿沼气发酵后N的变化

将试验期间的猪粪尿全部收集置于小型容器内,密闭进行沼气发酵3个月,但不利用沼气,所得沼肥对猪粪尿中N的回收率达97.9%,损失很少,这与前人研究结果[4]基本一致。但在实际运用沼气池发酵,并陆续抽取沼肥和利用沼气,经6个月后测得猪粪尿中N的回收率约为76%,N的损失达24%(表4)。其原因是否由于在沼气利用过程中有部分氨随沼气逸出,或因发酵期较长,池内物料C/N比值下降,促使氨的损失,有待进一步研究。从表4还看出,猪粪尿经沼气发酵,沼肥中水解N占总N的45.7%~52.3%,相当发酵前的2.2~2.6倍,提高了肥效。

表4 沼气发酵后猪粪尿中N的变化

Table 4 Change of N in excrements after biogas fermentation

肥料	小型容器密闭发酵(3个月) Fermentation in little container(3 months)			沼气池发酵(6个月) Fermentation in biogas pond(6 months)		
	总N量 Total N (g)	N的回收率 Recov. of N (%)	水解N占总N Alk. hydr.-N of tot. N (%)	总N量 Total N (kg)	N的回收率 Recov. of N (%)	水解N占总N Alk. hydr.-N of tot. N (%)
猪粪尿(发酵前)	28.5	—	20.1	5.64	—	21.2
沼肥	27.9	97.9	52.3	4.29	76.06	45.7

2.3 绿肥、沼肥对水稻产量和N转移的影响

2.3.1 对水稻产量和N累积量的影响 由表5可见,不同施肥的各个处理稻谷均比对照增产,说明在等N条件下,有机肥与化肥配合施用比单施化肥增产,其中又以沼肥配施化肥增产效果较好。对各处理的稻谷、稻草、稻根及全株干物质与N的累积量进行相关分析,其相关系数分别为0.9997**、0.9967**、0.9789**、0.9999**,说明不论经济产量或生物产量均与土壤和肥料供N状况密切相关。但从稻谷和稻草中N累积量的比值看,其顺序亦是处理Ⅳ(2.12)>处理Ⅲ(2.09)>处理Ⅱ(1.95),说明有机肥与化肥配合施用促进了氮素向稻谷转移,从而有利于水稻产量的提高,这与有关报道[5]相一致的。

表5 不同肥料对水稻产量和N累积量的影响(g/pot)

Table 5 Effect of different fertilizers on yield and N accumulation of rice

处理 Treatment	稻谷 Rice grain		稻草 Rice straw		稻根 Rice root		全株 Whole plant	
	产量 Yield	N累积量 N accum.	干物重 Dry wt.	N累积量 N accum.	干物重 Dry wt.	N累积量 N accum.	干物重 Dry wt.	N累积量 N accum.
Ⅰ	14.9	0.234	15.2	0.154	3.00	0.032	33.1	0.420
Ⅱ	36.5	0.725	36.1	0.372	7.16	0.081	79.8	1.178
Ⅲ	36.9	0.748	36.5	0.358	7.19	0.081	80.6	1.187
Ⅳ	37.6	0.762	37.0	0.360	7.22	0.084	81.8	1.206

注:处理Ⅲ和处理Ⅳ均为2个分处理的平均值,下同。

Note: Data of treatment Ⅲ and Ⅳ is average of Ⅲ 1、2 and Ⅳ 1、2, respectively.

表 6　水稻吸收的土壤 N、肥料 N 及其分布比例

Table 6　N amounts and ratio absorbed by rice from soil and fertilizer

处理 Treatment		吸 N 量 N absorbed							
		稻谷 Grain		稻草 Straw		稻根 Root		全株 Whole plant	
		mg/pot	%	mg/pot	%	mg/pot	%	mg/pot	%
Ⅱ	硫酸铵	249.2	35.36	137.3	38.11	12.9	16.13	399.4	34.88
	土壤	455.6	64.64	223.0	61.89	67.1	83.87	745.7	65.12
	绿肥	122.4	16.85	55.0	15.81	12.2	15.31	189.6	16.43
Ⅲ	硫酸铵	130.6	17.98	76.6	22.02	5.8	7.28	213.0	18.46
	土壤	473.4	65.17	216.3	62.17	61.7	77.41	751.4	65.11
	沼肥	132.4	17.88	60.0	17.14	12.4	15.23	204.8	17.47
Ⅳ	硫酸铵	134.2	18.12	75.8	21.66	6.2	7.62	216.2	18.45
	土壤	474.0	64.00	214.2	61.20	62.8	77.15	751.0	64.08

注:吸 N 量已扣除秧苗带入的 N 33.47mg

Notes: Amount of N absorbed has deducted 33.47mg N in seedlings of rice.

2.3.2　水稻吸收土壤 N 和肥料 N 的数量及分布状况　不同施肥对水稻吸收土壤 N 和肥料 N 总量虽有一定的影响,但吸收的土壤 N 和肥料 N 的比例却基本一致,均分别约为 64%～65%和 35%～36%(表 6),这与前人的研究结果相类似[6]。在有机肥与化肥配施的两处理中,水稻吸收的绿肥 N 占肥料 N 47.1%,吸收的沼肥 N 占 48.7%,后者略大于前者,这与沼肥中速效 N 较多有关。从土壤 N 和肥料 N 在水稻各个部位的分配比例看,各施肥处理间的趋势一致,即稻根累积的土壤 N 的比例(77%～84%)＞稻谷(64%～65%)＞稻草(61%～62%),而累积的肥料 N 的比例则与之相反。

2.4　农牧沼生态系统中 N 的去向

肥料施入土壤后,N 的去向包括:作物吸收、土壤残留、渗漏损失、气态损失等几个方面。运用^{15}N示踪法对前三者进行了测定,并用差减法求得气态 N 的损失。结果表明(表 7),在本试验条件下,水稻对肥料 N 的吸收率是处理Ⅳ＞处理Ⅲ＞处理Ⅱ,与前述的产量效应和 N 的累积量相互一致。在Ⅲ和Ⅳ两个处理中肥料 N 的吸收率比处理Ⅱ稍高,说明绿肥、沼肥与硫酸铵配合施用有提高 N 肥利用率的作用。肥料 N 在土壤中的残留率(含耕层和犁底层)亦是处理Ⅳ＞处理Ⅲ＞处理Ⅱ,差异显著。处理Ⅱ单施化学 N 肥土壤中残留 N 较少,

表 7　肥料 N 的去向

Table 7　Fate of fertilizer N

处理 Treatment	水稻吸收 Absorbed by rice		土壤残留 Residual in soil		渗漏损失 Percolation		气态损失 Volatilization	
	mg	%	mg	%	mg	%	mg	%
Ⅱ	399.4	42.26	206.2	21.82	1.04	0.11	338.4	35.81
Ⅲ	402.6	42.60	406.3	43.00	3.85	0.41	132.25	13.99
Ⅳ	421.0	44.55	480.9	50.89	1.65	0.17	41.45	4.39

仅及前二者的1/2或更低。有关资料证明,较多的残留N不仅有利于土壤N素储量的保持和提高,而且残留N的有效性一般显著高于土壤N,因而它还有利于保持和提高土壤N的有效性[7]。肥料N的气态损失率正好与土壤N残留率相反,即处理Ⅱ>处理Ⅲ>处理Ⅳ,三者分别为35.81%、13.99%、4.39%,前者为后二者的2.6和8.2倍。肥料N的渗漏,处理间虽有差别,但与前述数据相比则是极微小的。因此,可以认为有机肥与化肥配施不仅能提高肥料的利用率,有利于产量的提高,更重要的是其改土效果显著。

3 小结

根据以上数据,以相对数量(%)阐明N在系统中各库的储存、库间的转移和流向,系统向环境(大气、水体、社会)的输出以及环境(社会)向系统的输入(化肥)。可以看出:

1. 系统中参与构成水稻生物产量的N占35.26%,构成猪体的占11.47%[3];残留土壤的占37.45%,总回收率为84.18%,而水稻生产、养猪和沼气发酵过程中损失的N合计占15.82%,比单一种植水稻单施化肥的损失(35.81%)减少一半多。既开发了资源,提高了资源的利用率,又减少了资源的消耗和损失。

2. 充分进行了养分再循环,改资源一次性利用为多次利用。其中绿肥有一半被3次利用,猪粪尿被2次利用,既节约了近一半的化肥投入,又生产出更多产品,不仅有稻谷,且有生猪和沼气,综合经济效益增加3~4倍[8]。

3. 利用生物固氮机制开辟肥源、饲源和能源,既发挥了有机肥的增产改土的效应,又起到了节约饲料粮,改善环境卫生,保护森林资源的功效,使系统具有较高的生产力和多重生态社会效益。

参考文献

[1] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983.79~94.

[2] 陈子元,曹亚澄编.核技术及其在农业中的应用[M].北京:科学出版社,1983.179~193.

[3] 邢廷铣,廖先苓,方热军,等.饲用^{15}N标记绿肥在猪体内氮转化和代谢规律的研究[J].动物营养学报,1996,8(1):40~46.

[4] 刘更另,金维续.中国有机肥料[M].北京:农业出版社,1991.95~96.

[5] 吴珊眉,倪苗娟.有机-无机态氮肥在微型农业生态系统的转移和循环的研究[J].应用生态学报,1990,1(1):67~74.

[6] 黄东迈,高宗骅,朱培立.有机、无机肥料氮在水稻-土壤系统中的转化与分配[J].土壤学报,1981,18(2):107~119.

[7] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学技术出版社,1992.253~256.

[8] 吴建富,张美良,刘经荣,等.稻田紫云英肥饲兼用的技术与效益[J].江西农业大学学报,1997,17(2):53~56.

Study on the cycle and transformation of nitrogen in farming-stockbreeding-biogas ecosystem of rice areas

ZHANG Mei-linang[1], WU Jian-fu[2], LIU Jing-rong[2], GUO Cheng-zi[3], LIU Wei-dong[4]

(1. *College of agronomy, JAU, Nanchang* 330045; 2. *College of land Resource and Environment, JAU*; 3. *College of Biotechnology Research and Development, JAU*; 4. *Dep. Of Food Science, JAU*)

Abstract: ^{15}N-labeled technique was used to study the fixation, transformation, fate and utilized efficiency of N in the farming -stockbreeding -biogas ecosystem of rice areas. The results showed that the crude protein digestibility of the ensilaged milk vetch by pig was 53.76%, the recovery rates of ensilaged milk vetch N by the pig feces and urine were 39.36 % and 24.71 %, respectively. The recovery rate of N of pig feces and urine was 97.9% for biogas fermentation. The content of hydrolyzable N in biogas fertilizer was 2.6 times higher than before the fermentation. The combined application of milk vetch, biogas fertilizer and chemical fertilizer can promote N translocation to rice grain to increase the yield. The residual N of fertilizer in soil and gaseous loss N in combined application of milk vetch, biogas fertilizer and chemical fertilizer was 1.0～1.5 times higher and 1.6～7.2 lower than that in the treatment of chemical fertilizer alone, respectively. The comprehensive economic benefit in the farming -stockbreeding -biogas ecosystem increased by 300%～400%, compared to that of milk vetch -early rice -late rice system, and ecological and social benefit were also significant.

Key words: ^{15}N-labeled; milk vetch; ecosystem; fate of nitrogen