

绿肥轮作还田对稻田土壤溶液氮素变化及水稻产量的影响^①

卢萍¹, 单玉华², 杨林章¹, 韩勇¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

摘要: 通过研究利用绿肥等改变轮作制度及 N 素管理后稻田土壤溶液中溶解性 N 素的动态变化及水稻产量的变化, 评价了利用绿肥参与水稻轮作系统, 减少无机 N 肥的施用量, 促进水稻生长的同时降低环境负荷的可行性。研究表明, 在总 N 量相当的情况下, 冬绿肥还田或冬季休闲稻季土壤溶液中 NH_4^+ -N 浓度均比稻麦轮作单施化肥的处理低。溶液 NO_3^- -N 浓度随还田有机物料的 C/N 增加显著降低。利用豆科紫云英轮作还田, 可降低 44% 的无机 N 肥用量, 溶解性 N 浓度显著降低, 是减小稻季 N 肥流失环境风险的有效途径。

关键词: 绿肥; 无机 N 肥; 土壤溶液; 产量

中图分类号: S153.5, S157.4

土壤溶液是提供作物有效养分最基本的途径, 也是土壤与环境间物质交换的载体。土壤溶液中养分的浓度是养分的强度因素, 它比土壤中有有效养分的数量 (容量因子) 更能反映土壤养分的供应状况^[1], 同时也是评价稻田系统对水环境污染潜在风险的指标。

施肥是提高作物产量的重要措施。我国农业生产上单纯依赖化肥, 忽视投入有机肥的现象十分严重, 但近年来化肥的过量施用对浅层地下水硝酸盐污染和地表水富营养化的影响已引起广泛关注。关于施用无机 N 肥后土壤溶液中无机 N 的动态变化及对径流、渗漏等的影响已有较多研究, 发现土壤溶液中 N 素浓度在施肥一段时间后显著提高, 环境风险大^[2]。而有机肥在改土培肥、提高作物产量和改善作物品质等方面的作用已被国内外不少研究所证实^[3-4]。在充分利用有机肥的基础上减少无机 N 肥的施用量, 减小环境污染的风险, 具有重要的现实意义。但水田系统中有机肥施用后对土壤溶液中溶解性 N 素的影响尚不很明了。施用有机物料能否降低溶液中 N 的浓度尚是个未知数。

太湖地区是我国化肥用量最高的地区之一, 也是我国地表水污染和富营养化严重的地区之一。由于其经济较发达, 劳动力紧缺, 且种植小麦经济效益不高, 冬季农田闲置已成为该地区常见现象。此

外, 由于麦季肥料淋失会污染地下水, 压缩小麦种植面积已受到专家提倡^[5-6]。此时引入种植成本较低的冬绿肥参与轮作具有很高的可行性。本文重点研究了不同绿肥-水稻轮作系统下稻田土壤溶液中 N 素浓度的动态变化, 以及确保产量的前提下减少化肥用量, 降低环境负荷的可行性。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

试验地位于江苏宜兴市大浦镇渭渎村 (31°17.494'N, 119°54.018'E), 濒临太湖。土壤属于黄泥土, 其耕层土壤 (0~15 cm) 含有机 C 12.6 g/kg, 全 N 1.3 g/kg, 全 P (P_2O_5) 1.1 g/kg, 全 K (K_2O) 13.9 g/kg, 速效 P 22.38 mg/kg, 速效 K 49.61 mg/kg, pH 6.23。

1.2 试验处理及方法

试验采用裂区设计, 主区面积为 160 m², 设置 3 种轮作方式: 紫云英 + 水稻, 黑麦草 + 水稻及冬季休闲 + 水稻, N 肥用量处理为副区, 稻季将主区分别分隔成面积相等的 4 块, 作 4 种施肥处理。试验重复 3 次, 共 36 (3×3×4) 个小区。试验具体实施方法见表 1。为了便于比较, 另增设稻麦轮作 M1 作 CK, N 肥用量设 N270、N200、N0 三个水平, M1 N270 为该地区现行耕作制度下的常规施肥处理。

①基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-413) 和 863 项目 (2002AA601012) 资助。

* 通讯作者

作者简介: 卢萍 (1981—), 女, 江苏靖江人, 博士研究生, 主要从事农业生态系统物质循环方面的研究。E-mail: luping@issas.ac.cn

表1 试验处理及实施方法
Table 1 Scheme of the experiment

处理及代号	实施方法
主区	M2 水稻紫云英轮作, 紫云英还田
	M3 水稻黑麦草轮作, 黑麦草还田
	M4 冬季休闲, 无绿肥还田
副区	N270 施 N 量为 270 kg/hm ² , 基、蘖、穗肥分别为 132、69、69 kg/hm ²
	N200 施 N 量为 200 kg/hm ² , 基、蘖、穗肥分别为 76、55、69 kg/hm ²
	N150 施 N 量为 150 kg/hm ² , 基、蘖、穗肥分别为 41、40、69 kg/hm ²
	N0 不施 N 肥
对照	M1

紫云英、黑麦草于 10 月 28 日播种, 黑麦草不施肥, 为保证紫云英的生长, 在播种前施少量的 P、K 肥。在第 2 年的 4 月将两种绿肥收割, 翻埋入土层 10 cm 处。同时采样、计算两种绿肥生物量, 测定其含 N 量 (表 2)。各处理总施 N 量见表 3。M2N150、M3N200、M4N270 与 M1N270 处理施入

有机、无机 N 总量基本相当。

水稻基肥用“15-15-15”的复合肥及碳铵, 分蘖肥及穗肥使用尿素。基、蘖、穗肥分别于 6 月 10 日、6 月 20 日及 8 月 1 日施用。不施 N 肥的 N0 处理, 基肥施普钙及氯化钾, 使 P、K 用量与其余施 N 肥处理相同。

表2 还田绿肥生物量及养分含量

Table 2 Biomass and nutrients of green manure crops returned to the soil

绿肥	还田绿肥干重 (kg/hm ²)		N (kg/hm ²)	C (kg/hm ²)	C/N
	地上部	地下部			
紫云英	4125	8313	110	1619	14.8
黑麦草	3125	4875	70	2484	36

表3 各处理有机无机 N 总施入量

Table 3 Total inputs of organic and inorganic nitrogen in various treatments

总施 N 量 (kg/hm ²)	M1	M2	M3	M4
N270	270	380	340	270
N200	200	310	270	200
N150	-	260	220	150
N0	0	110	70	0

供试水稻为优质水稻新品系“优粳 5356”, 为中熟粳稻品种。5 叶期移栽, 每穴 3 苗。株距 × 行距为 13.3 cm × 26.7 cm, 密度为 28 穴/m²。

在水稻生长过程中各小区均确保独立灌排, 适期防止病、虫、草害。

1.3 样品采集与处理

在田间 0 ~ 15 cm 深度土壤耕层埋入长约 8 cm 的聚四氟乙烯多孔抽滤管 (suction cup), 抽滤管周围包裹尼龙网纱, 再在纱上敷一层细小的石英砂, 以使抽滤管与周围土壤紧密接触。抽滤管与取样瓶间用管道相连。另在田间铺设管道连接取样瓶和抽气泵, 取样时打开泵及管道阀门抽取土壤溶液。约

每周采集 1 次。得到的溶液样品, 除部分测定 pH 外, 立即用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤, 用流动注射分析仪 (荷兰 Skalar 公司产) 测定 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量。收获后各小区采集土壤样品, 测定土壤速效 N。土壤速效 N 用 2 mol/L KCl 提取, 流动分析仪测定。

水稻收获时, 在普查穗数的基础上, 各小区采 10 穴稻株测定每穗粒数、结实率及千粒重; 每小区割 2 m² 稻株测定实际产量。

2 结果与讨论

2.1 不同轮作方式下土壤溶液中 N 素浓度的动态变化

2.1.1 土壤溶液 NH₄⁺-N 浓度的变化 NH₄⁺-N 是供试 N 肥施入水田土壤最初的分解产物, 是无机态 N 在上层水田土壤中的主要存留形态。图 1 是 M2 处理紫云英还田时不同施 N 量下稻田土壤溶液 NH₄⁺-N 浓度的变化。试验结果表明, 减少无机 N 肥用量对土壤溶液 NH₄⁺-N 浓度的影响较明显。土壤溶液中 NH₄⁺-N 浓度随施肥量的增加而增加, 差

异达极显著水平 ($P < 0.01$)。在其余各还田处理中均表现出相同的趋势,即减少 N 肥施用量能显著降低土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,由此可能会减小对环境的影响。

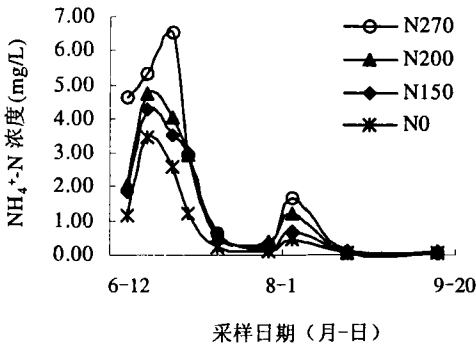


图 1 紫云英还田无机 N 肥用量对稻田土壤溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的影响

Fig. 1 Effect of fertilizer N application rate on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in soil solution of paddy field with milk vetch returned

相同施 N ($\text{N}270$) 水平下,不同轮作方式中 M2、M3 处理稻季土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度显著高于冬季休闲 + 水稻的 M4 处理 ($P < 0.01$) (图 2a),紫云英还田提高土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的作用尤为明显。有机物料还田带入额外 N 素,可能是土壤溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增高的主要原因。而在无 N 肥输入时 ($\text{N}0$),土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度以 $\text{M}2 > \text{M}4 > \text{M}3$ (图 2b)。M3 处理由于黑麦草 C/N 高,分解时消耗土壤无机态 N 而使土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低。

改变轮作制度后,与常规 $\text{M}1\text{N}270$ 相比, $\text{M}2\text{N}150$ 、 $\text{M}3\text{N}200$ 及 $\text{M}4\text{N}270$ 处理土壤溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均显著 ($P < 0.01$) 降低,高峰期降幅达 64% 以上 (图 3)。本试验中 $\text{M}1\text{N}270$ 施肥后土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高约 11 mg/L,与资料报道结果相近,但改变轮作制度的处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 却大大降低。说明尽管施 N 总量相同,冬绿肥还田或冬季休闲却能显

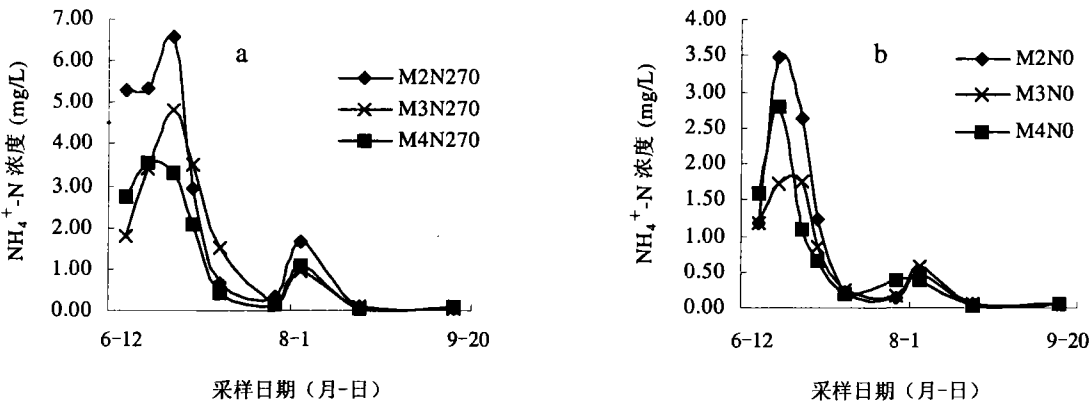


图 2 两施 N 水平下不同轮作方式对土壤溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的影响

Fig. 2 Effect of crop rotation on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in soil solution of farmland with two N levels

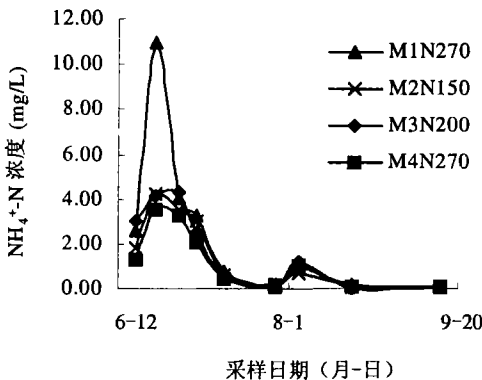


图 3 总施 N 量相当时土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 3 Change in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in soil solution when total N application rates were similar

著降低稻季 N 素浓度峰值,减小环境负荷。土壤溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降低原因可能有:配施绿肥减少了无机 N 肥的用量,降低了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度;其次是绿肥还田或冬闲养地造成土壤有机质增加^[7],碳源刺激微生物活动,加强了对矿质 N 的固定。

2.1.2 土壤溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是土壤转化、迁移过程中最活跃的 N 素形态。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失不仅会造成土体中 N 素的损失,而且还会恶化环境,影响人体健康^[8]。N 肥的过量施用常被认为是地下水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量增高的重要原因^[8-9]。

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在施肥后达到高峰的时间比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 略为滞后 (图 4),表现出这种变化规律是由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

是尿素的最初分解产物, 水稻苗期吸收养分少, 多余 N 转化为 NO_3^- -N。其后, 随 NH_4^+ -N 浓度降低, NO_3^- -N 浓度相应降低。

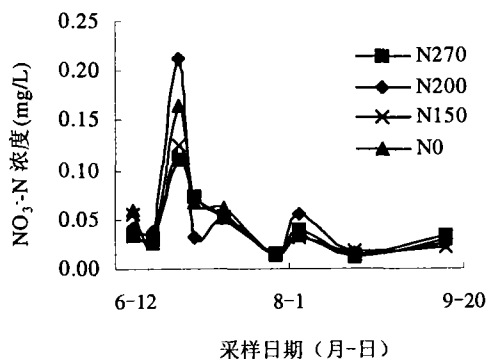


图 4 不同施 N 量下土壤溶液中 NO_3^- -N 浓度动态变化

Fig. 4 Effect of N application rate on NO_3^- -N concentration in soil solution

与绿肥提高土壤溶液 NH_4^+ -N 浓度的效果相反, 增施绿肥显著抑制了施肥后 NO_3^- -N 浓度的增加 ($P < 0.01$) (图 5)。土壤溶液中 NO_3^- -N 浓度随还田物料 C/N 的增加而减小。 NO_3^- -N 浓度虽低, 但却是随水体下渗、污染地下水的主要形态^[9]。水田系统中有机物还田可能影响了土壤的通透性, 且微生物分解有机物的过程中消耗土壤中的矿质 N, N 素的硝化作用减弱, 可能降低 NO_3^- -N 随水体渗漏污染地下水的风险。有研究发现, 在旱地土壤中添加有机物, 利用有机物固定一部分多余的 N, 可减少 NO_3^- -N 的淋失^[8]。本试验证明在水田土壤添加有机物料, 土壤溶液 NO_3^- -N 浓度降低, 可能也有相似的效果。

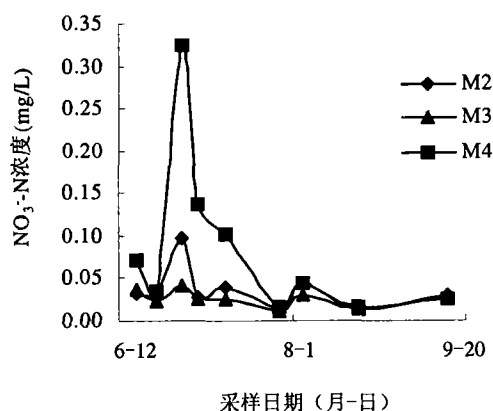


图 5 施用有机物料对土壤溶液中 NO_3^- -N 浓度影响

Fig. 5 Effect of organic manure on NO_3^- -N concentration in soil solution

减少无机 N 肥施用量, 土壤溶液 NO_3^- -N 浓度降低, 而施用有机物料, 对 NO_3^- -N 会产生相同的影响, 即在总施 N 量相当的情况下, 配施绿肥的处理, 其土壤溶液中 NO_3^- -N 的浓度显著降低 ($P < 0.01$) (图 6)。

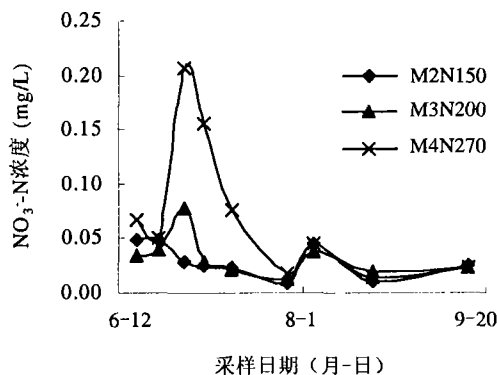


图 6 总施 N 量相同时土壤溶液中 NO_3^- -N 浓度变化

Fig. 6 Change in NO_3^- -N concentration in soil solution when total N application rates were similar

2.2 不同轮作方式及 N 素管理对水稻产量的影响

由表 4 可见, 稻麦轮作时, 施用 N 肥对水稻的增产效果显著, 水稻产量随 N 肥用量的增加而增加, 可见 N 270 的 N 肥用量确实是保证该地区现行稻麦轮作制度下水稻高产稳产所必需的用量, 符合王德建等^[9]推荐的太湖地区 N 肥适宜用量。在试验所设轮作制度下, 最高产量均出现在较低的施 N 量处理, 说明采用冬季休闲或种植冬绿肥还田的方法均能在一定程度上减少无机 N 肥的用量, 而不会对水稻产量产生显著影响。

从产量结果看, 由于冬季休闲养地, 施 N 为 150 kg/hm^2 时, 产量已达到最高水平, 甚至高于黑麦草还田的 N 150 处理。这可能与黑麦草不是固 N 植物, 不会增加土壤 N, 而且有可能将无机 N 固定到植株体中, 使 N 有效性一定程度地降低有关。

改变轮作制度后, 总施 N 量不变的情况下, 绿肥还田主要是增加了水稻穗数及每穗粒数 (表 5), 说明绿肥还田尤其是紫云英还田经过预先翻埋腐熟后能在水稻生长的前、中期释放大量的 N 素, 促进分蘖的形成, 为水稻后期的生长搭好了丰产架子, 但千粒重降低, 可能是由于在后期 N 素供应强度不够。因此, 绿肥还田应该注重后期 N 肥的使用, 以保证后期养分的供应。

在总施 N 量相当的情况下, 紫云英及黑麦草还田每千克 N 的增产效果显著提高 ($P < 0.05$)。在紫

云英还田的情况下, 无机 N 的适宜用量约为 N 150 kg/hm², 水稻产量比常规处理(M1N270)增产 7.6%, 而无机 N 肥用量则减少了 44%。

2.3 改变轮作方式水稻收获后土壤养分状况

水稻收获后试验地土壤速效 N 含量也各有差异。总施 N 量相当的情况下, 水稻收获后绿肥 + 水

表 4 不同试验处理水稻产量 (kg/hm²)

Table 4 Rice yields in different treatments of the experiment

处理	N270	N200	N150	N0
M1	7241 ± 576 A	7181 ± 168 A	-	5564 ± 68 B
M2	7300 ± 366 A	7507 ± 342 A	7797 ± 469 A	6086 ± 422 B
M3	7244 ± 308 A	7489 ± 1206 A	7304 ± 604 A	5776 ± 106 B
M4	7171 ± 125 A	7367 ± 88 A	7399 ± 159 A	5624 ± 401 B

注: 同一行不同字母表示处理间差异显著 (LSD, P<0.01)。

表 5 改变轮作系统对水稻产量构成因素的影响

Table 5 Effect of crop rotation on composition of rice yield

	M1N270	M2N150	M3N200	M4N270
穗数 (穗/穴)	10.5	10.7	10.7	11.5
每穗粒数 (个/穗)	108.2	111.8	106.7	104.7
结实率 (%)	79.9	80.2	80.4	82.5
千粒重 (g)	26.2	25.6	25.8	24.6
实际产量 (kg/hm ²)	7241.3	7796.8	7367.3	7243.8
1 kg N 增产稻谷量 (kg)	26.8b	30.1a	27.4ab	26.8b

注: 同一行不同字母表示处理间差异显著 (LSD, P<0.05)。

稻轮作土壤速效 N 含量 (NH₄⁺-N + NO₃⁻-N) 低于稻麦轮作处理, 紫云英还田处理尤为明显, 速效 N 含量为 5.98 mg/kg, 比稻麦轮作降低 2.05 mg/kg, 可能由于有机无机配施促进了水稻对 N 素的吸收。土壤速效 N 减少, 降低了冬季旱地 N 素淋失的风险, 且由于豆科作物的固 N 作用, 不会对下季紫云英生长产生影响。

2.4 太湖地区的适宜耕作制度

改变耕作制度需要综合考虑生产、经济与环境三方面的效益。我国人多地少, 保证粮食高产, 满足人口不断增长对粮食的需求是首要目标; 其次, 要有经济效益与资源的高效利用, 同时还要考虑施肥对环境的污染。

太湖流域小麦产量不高, 面粉质量差, NO₃⁻-N 淋失对水环境威胁大, 冬季压缩小麦种植面积受到专家提倡^[6]。且该区域经济发达, 受劳动力等因素制约, 冬季荒地现象普遍, 利用冬绿肥参与轮作还田或冬季休闲均可以减少稻季无机 N 肥施用量, 显著降低稻季土壤溶液中无机 N 的浓度, 减小稻季大量施肥对环境的污染风险。豆科作物紫云英由于其

固 N 能力强, 含 N 量高、易分解, 利用紫云英参与轮作还田, 至少可节约无机 N 肥 N 120 kg/hm², 大大降低了成本投入, 提高了“产/投”比, 单位 N 量的增产效果也显著提高。黑麦草由于不是固 N 作物, 不易分解, 减肥效应不及紫云英。而冬季休闲水稻产量略低, 且可能会有较大量的无机 N 通过淋溶或径流进入水体。因此, 紫云英还田这种种植制度在产量、经济与环境的三方面能获得更好的效益。

太湖流域是经济发达的地区, 水稻 N 肥施用量大, 环境风险增加, 由于过量施肥所引起的水体富营养化严重。据 Roelcke 等^[10]研究, 要保持水稻产量, 太湖地区 N 肥施用量仅能降低约 10%^[10]。另一方面, 该地区劳动力紧缺, 冬季小麦的产量也较低, 经济效益不高, 如能在该地区推广此种种植制度, 既可保证水稻的产量, 也可减少稻田的施肥量, 从而从源头控制农田面源污染的发生, 具有经济和生态环境效益。

3 结论

(1) 在无机 N 肥用量相等的情况下, 增施有机

物料, 土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增加, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度降低。在总施 N 量相当的情况下, 配施绿肥或冬季休闲, 显著降低了施肥后土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的峰值, 减小了稻季 N 素随水体迁移的量, 降低了环境污染的风险。

(2) 紫云英或黑麦草参与轮作还田, N 肥增产效果显著提高, 促进了水稻对 N 素的吸收利用。水稻收获后, 绿肥还田处理土壤速效 N 降低, 且冬季种植绿肥无需施用 N 肥, 减小了冬季旱地土壤的 N 素损失, 降低了环境负荷。

总之, 利用冬绿肥还田是减少无机 N 肥施用量的有效途径, 与现行的稻麦轮作系统比较, 能有效地降低稻季土壤溶液中 N 素的浓度, 避免麦季 N 素淋洗对地下水的污染。在经济发达的太湖流域, 如推广此种种植制度, 并在稻季保证 N $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 左右的 N 肥使用量, 是保证水稻高产、减小环境风险行之有效的措施。

参考文献:

- [1] 孙明德, 刘宝存, 吴静, 倪小会. 原位土壤溶液采样技术的应用. 北京农业科学, 2001 (4): 31-33
- [2] 高效江, 胡雪峰, 王少平, 贺宝根, 沈铭能. 淹水稻田中氮素损失及其对水环境影响的试验研究. 农业环境保护, 2001, 20 (4): 196-198, 205
- [3] 周卫军, 王凯荣, 张光远. 有机无机结合施肥对红壤稻田土壤氮素供应和水稻生产的影响. 生态学报, 2003, 23 (5): 914-921
- [4] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 郝艳如, 张昌爱. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. 土壤学报, 2003, 40 (4): 618-623
- [5] 王德建, 林静慧, 夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点. 中国生态农业学报, 2001, 9 (1): 16-18
- [6] 曹志洪. 施肥与水体环境质量—论施肥对环境的影响 (2). 土壤, 2003, 35 (5): 353-363
- [7] 高亚军, 朱培立, 黄东迈, 王志明, 李生秀. 水旱轮作地区土壤长期休闲与耕种的肥力效应. 中国生态农业学报, 2001, 9 (3): 67-69
- [8] 郭胜利, 余存祖, 戴鸣钧. 有机肥对土壤剖面硝态氮淋失影响的模拟研究. 水土保持研究, 2000, 7 (4): 123-126
- [9] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 夏立忠, 连刚. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响. 土壤学报, 2003, 40 (3): 426-432
- [10] Roelcke M, Han Y, Schleaf KH, Zhu JG, Liu G, Cai ZC, Richter J. Recent trends and recommendations for nitrogen fertilization in intensive agriculture in eastern China. *Pedosphere*, 2004, 14 (4): 449-460

Influence of Green Manure Crop on Nitrogen Concentration in Soil Solution of Paddy Field and Rice Yield

LU Ping¹, SHAN Yu-hua², YANG Lin-zhang¹, HAN Yong¹

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *College of Environment Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)*

Abstract: Effects of green manure crops on concentration of inorganic nitrogen in soil solution of paddy fields and rice yield were studied to explore feasibility of reducing chemical fertilizer application through incorporating green manure crops into soil. Results showed that when the total N application rates were kept the same, compared with application of chemical fertilizer, combined application of organic material (green manure crops) and chemical fertilizer can significantly reduce $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration in soil solution. Incorporating Chinese Milk Vetch into soil can reduce the chemical N fertilizer application rate by 44%, and also diminish the environmental risk of N runoff.

Key words: Green manure, Inorganic nitrogen fertilizer, Soil solution, Yield