

北方稻田生态系统养分平衡研究*

罗良国** 闻大中 沈善敏 (中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

摘要 1994~1996年研究了5种不同模式水稻田生态系统养分平衡及养分效率。结果表明,不同模式的水稻田生态系统中,N输入输出基本相抵,处于平衡状态;K输入输出稍有盈余,唯P施用量较输出高1倍,使土壤中P有所积累。通过合理水肥调控措施,使水稻单产有所提高,肥料和养分利用率也得到不同程度的提高。

关键词 单作水稻 稻田生态系统 养分平衡 养分效率

Nutrient balance in rice field ecosystem of northern China. Luo Liangguo, Wen Dazhong and Shen Shanmin (Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015). Chin. J. Appl. Ecol., 1999, 10(3): 301~ 304. The nutrient balance and efficiency in five rice field ecosystems were studied at the lower reach plain of Liaohe River from 1994~ 1996. The results show that the N input and output in various patterns of rice ecosystem were basically balance, little more for K input than output, and P input as twice much as its output. With rational management measures of fertilization and water saving, the rice yield would be increased, and the nutrient efficiency would be enhanced to some extent.

Key words Single cropping rice, Rice field ecosystem, Nutrient balance, Nutrient efficiency.

1 引言

随着农业的迅速发展,大量使用化学农药和不合理田间水肥管理对资源和生态环境产生的负效应,已受到世界各国关注^[1,6]。辽河平原作为东北地区重要的农业高产区和商品粮基地,农业快速发展所带来的资源、生态和环境问题^[7]也已成为该地区农业持续发展的主要限制因子。本文选取位于十里河镇的沈阳生态实验站为其代表区域和研究基地,开展水稻田生态系统的养分平衡研究,旨在为发展当地水稻生产、推进农业可持续发展提供科学依据。

2 试验地概况与方法

2.1 自然条件

下辽河平原地跨锦州、鞍山、盘锦、营口、辽阳、铁岭及沈阳7市,是东北平原农业生产条件最好、生产力水平最高的区域。中国科学院沈阳生态实验站位于41°31'N,123°24'E,处于下辽河平原中部偏东,属暖温带半湿润大陆性季风气候。四季分明,雨热同期,夏季炎热多雨,冬季干燥寒冷,年均温7~8℃,7月平均气温24℃左右,1月平均气温-11~-13℃,>10℃的活动积温3300~3400℃,年总辐射量5397~5648 kJ·cm⁻²,无霜期147~164d,年降水量650~700mm。下辽河平原地势平坦,土地连片,主要土壤类型为潮棕壤和草甸土。本试验地为潜育性潮棕壤土,有机质含量22.1 g·kg⁻¹。水耕熟化过程处于初期阶段,其剖面发育除上部各层次外,下部土层基本保持潮棕壤特征。

2.2 田间试验设计

该试验是以5种不同模式的水田生态系统为对象,设A、B两区进行,A区试验为测定5种不同水田模式的水量平衡、养

分平衡及其水分、养分利用效率的小区实验;B区用作田间蒸发散量的测定。A区试验是5种水田模式3次重复,共15个小区,小区之间留有1m宽的隔离带,每小区1m土层深度四周用油毡纸围隔,以控制小区之间1m土层内水分的横向流动,小区面积45.5m²。B试验区是3种水田模式,即常规模式、稻萍结合模式和节水模式(从水分角度可代表5种水田模式),各设固定式Lysimeter桶一个进行蒸发散量测定,小区面积71.7m²。Lysimeter桶内插秧密度和水、肥调控与桶外一致。

常规模式(N):田间单种水稻,插秧穴行距为10cm@30cm。泡田时不用大水,仅使土壤松软膨松,便于插秧即可。插秧至分蘖初期,田间保持3.0~5.0cm深水层,而后一直保持田间水层深1.5~3.0cm;孕穗抽穗中期(8月上旬开始)至乳熟初期(8月下旬),田间恢复3.0~5.0cm深水层,以后又保持1.5~3.0cm水层;收获前15d撤水晒田。采用常规除草剂和农药防治杂草和病虫害。肥料分基肥和3次追肥(返青肥、分蘖肥和穗肥)进行,基肥是泡田后撒施肥料而后耘田,追肥是在田间有水层情况下进行,均为传统施肥方式。改进施肥模式(O):除施肥方式外,其余田间结构特征及田间调控管理均与常规模式相同。该模式基肥采用全层深施肥法(即泡田前撒施而后旋耕耘田);追肥皆采用以水带氮方式,即在田间水层落去之后,土壤含水处于非饱和状态时撒施尿素,然后再缓缓灌小水,令氮肥随水下渗入土,追肥用量和时间与常规模式相同。稻萍结合模式(O):插秧采用大垅双行40cm@20cm@10cm形式。6月初放萍于田间,放湿萍量为375 kg·hm⁻²。水分调控与常规模式同。基肥和追肥采用常规模式施肥方式,用量和时间也与之一致。田间繁殖的细绿萍于7月中旬翻压于土壤中作绿肥。用除

* 中国科学院/八五〇重点项目(KJ850620202)。

** 通讯联系人。

1998-11-08收稿,1998-12-23接受。

草醚、草草胺以及对萍低毒性的农药防治杂草和病虫害。节水模式($\bar{0}$): 田间结构、养分调控和病虫害防治与常规模式同。但水分管理从水稻返青至分蘖初期田间保持 3. 0~ 5. 0cm 深水层; 分蘖中期采取干湿交替灌水(即每次田间灌水至 5cm 深, 当土壤逐渐落干, 土壤表层含水量为田间持水量 70%~ 80% 时, 再灌下一次水); 分蘖末期晒田 1 周, 保持土壤含水量为田间持水量 70%~ 80%; 孕穗抽穗期田间保持水层 3. 0~ 5. 0cm 深, 乳熟期田间保持干湿交替, 收获前 15d 撤水晒田。节水节肥模式($\bar{0}$): 其田间结构特征和病虫害防治均与常规模式一致, 而水分、养分调控则是节水模式与改进施肥模式的结合。

2.3 固定式土壤渗水采集器(Lysimeter)

渗水采集器桶由 3mm 厚钢板焊制而成, 桶的上口为 1m @ 1m, 桶高 1.2m。桶埋入土里 100cm, 外露于土表 20cm。在桶底一角占 1/4 的区域内开有多个小孔组成的网状渗水孔, 其下焊接体积为 0. 5m @ 0. 5m @ 0. 5m 的盛水箱, 盛水箱底部一侧也开一孔与桶外垂直插入土壤中的长 2. 0m、直径 4cm 的导水钢管相接, 钢管高出地面 50cm, 用以在必要时抽取桶内的水分。在桶内填入原层次土壤, 当土体填至距桶上口 40cm 处时, 从桶上缘紧靠桶壁铺垫 2 层塑料薄膜, 并在 40cm 深处紧贴桶内外壁, 将薄膜折向土表水平方向延伸 15cm, 然后填原层次土, 以阻挡直接沿桶壁的渗漏。各渗水采集器桶内紧靠桶壁固定一标尺, 用以观察桶内水层深度。

2.4 田间渗漏液采集装置

水田渗漏液采集系统由 3 部分组成, 包括取样管、吸样器(100ml 的注射器) 及 300ml 的贮样塑料瓶。

在春季进行田间整地的同时, 于试验小区靠中间处, 用直径为 4cm 的土钻分别钻出深度为 40、60 和 100cm 的 3 个垂直圆孔, 分别插入外径与圆孔直径相当, 长度为 80、100 和 140cm 的塑料取样管, 管下端约 5cm 的管壁上均匀分布着直径为 0. 5cm 的渗水小孔, 其外用塑料纱网紧贴管壁将渗水小孔和管底包住, 以阻隔淤泥进入管中。为防止田间表层水溶液沿管壁下渗, 分别在 60 和 100cm 深的取样管距地表 30 和 40cm 深处, 沿管外壁四周, 紧贴管壁, 缠上一片塑料薄膜, 并使薄膜水平向外延伸约 20cm, 然后在其上回垫原层次土。采样时, 用 100ml 的医用注射器接 150cm 长的细塑料管, 先将积存在管中的水抽出放掉, 待 10min 后, 将刚刚渗入到管中的水抽出作为样品, 注入贮样瓶, 用浓硫酸酸化样品至 pH 为 2~ 4 后, 带回实验室备测。

2.5 田间观测及采样

田间及渗水采集器桶内水层深度用米尺直接测定。田间灌溉水量用水表测定。降水量由站内气象观测场测定。蒸发散量用向渗水采集器桶内灌溉的水量加同期降水量来计量; 渗水采集器桶内灌溉水量标准遵循各模式的水分管理要求。渗漏量则根据水量平衡方程计算测定。一般水量平衡方程为:

$$P + I = ET + D + Ro + Psd - vH \text{ (或 } vS \text{)}$$

式中, P 为降水量, I 为灌溉水量, ET 为田间蒸发散量, D 为田间排水量, Ro 为地表径流量, Psd 为田间渗漏量, vH 为田间水层变化量, vS 为田间土壤水分变化量。由于该地区水田无排水和径流产生, 因而水量平衡分量 D、Ro 均为零。

田间灌溉水的采样是每次灌水时, 用贮样瓶收集约 300ml 左右。渗漏水每 10 天从前述的取样管中抽取 40、60、100cm 各深度层次的水样一次, 此外, 在每次施肥后的第二天、第四天和第六天也从 3 个深度的取样管中采取水样。雨水采样于每次降雨后将收集的雨水样酸化处理后保存。水稻籽实和秸秆的采集于收获时进行, 在不同模式各试验小区以 3 点重复取样, 每样点面积为 1m²。水田地上部生物产量和经济产量的测量于水稻成熟时抽样测地上部风干重、烘干重, 并测定各小区总产量, 稻萍结合小区中还抽样测定翻压前萍的湿重和烘干重。1m 土层的土壤含水量分别在作物生长季前后用土钻取不同层次土样测定, 据此计算水稻生长期前后土壤水量变化。

2.6 样品室内分析

灌溉水、渗漏水 and 降雨样品中的 NH₄⁺2N 和 NO₃⁻2N 采用 MgO2Devarda 氏合金还原蒸馏法, 速效 P 和速效 K 分别用钼蓝比色法和火焰光度法测定; 植株和籽实中的全 N、全 P 采用 N2 P 联合消煮后用蒸馏法测 N、钼蓝比色法测 P, 全 K 用 3 酸(硝酸、硫酸和高氯酸) 硝煮后用火焰光度法测定。

3 结 果

3.1 不同水稻田模式的养分输入

3.1.1 施肥养分输入 本实验养分平衡的研究是在水量平衡研究^[4]的基础上进行并于 1994 年开始, 因稻田系统中养分 P、K 通过 1994~ 1995 年实验研究, 它们在系统中相对比较稳定, 因而 1996 年仅对系统中的 N 素养分继续进行了实验研究。1994~ 1996 年不同水稻田模式施肥量相同, 整个生育期施入尿素(纯 N) 187. 1 kg#hm⁻² (含基肥和 3 次追肥分别为 71. 1、50. 4、35. 2 和 30. 4kg#hm⁻², 过磷酸钙作基肥(纯 P) 55. 1kg#hm⁻² 和氯化钾作追肥(纯 K) 55. 1kg#hm⁻²。

3.1.2 灌溉水带入养分 实验田所用灌溉水来自试验区 60m 深的井水。实测结果表明, 井水中可溶性 N、P、K 养分浓度在整个生育期是随时变化的, 且由于各水田模式灌溉水量的差异, 通过灌水带入各水田生态系统的养分量亦不同(表 1)。通过灌溉水带入稻田的养分主要是 N, 其次是 K, P 极少, 可忽略不计。

表 1 1994~ 1996 不同水田模式随灌溉水输入系统的养分量
Table 1 Nutrient input from irrigation water in different rice field patterns from 1994 to 1996(kg#hm⁻²)

年份 Year	水田模式 Patterns					
		N	0	0	0	0
1994	灌水量 ¹⁾ (mm)	1604. 1	1537. 7	1486	1363. 2	-
	N	28. 2	26. 7	25. 2	23. 25	-
	P	0. 495	0. 465	0. 45	0. 45	-
	K	11. 85	11. 4	11. 1	10. 35	-
1995	灌水量(mm)	1503. 5	1436. 3	1399. 9	1228. 9	1218. 5
	N	25. 95	24. 75	24. 15	20. 55	20. 25
	P	0. 075	0. 075	0. 075	0. 06	0. 06
	K	17. 1	16. 2	15. 9	13. 65	13. 65
1996	灌水量(mm)	1669. 2	-	1521. 8	1350. 5	1341. 3
	N	33. 75	-	30. 9	27	27. 15

1) Irrigation water.

3.1.3 雨水带入养分 由表 2 可见,雨水带入稻田系统的养分主要是 N、P、K 很少. 实验地区全年 70% 以上的降水过程是在水稻生长季,特别是 7、8 月. 因此,降雨所含养分对稻田系统养分的贡献主要是在孕穗抽穗期和乳熟期.

表 2 1994~1996 年水稻生长季随降雨输入系统的养分量
Table 2 Nutrient input from rainfall during rice growth stage from 1994 to 1996

项目 Item	1994			1995			1996
	N	P	K	N	P	K	N
养分浓度	2.09	0.008	0.63	2.11	0.007	0.49	2.6
Nutrient conc. (mg#kg ⁻¹)							
养分量	15.75	0.06	4.8	19.05	0.06	4.5	16.5
Nutrient(kg#hm ⁻²)							
降雨量	753.3			901.5			635
Rainfall(mm)							

3.1.4 秧苗带入养分 按该地区稻田插秧穴距 10cm @30cm 计,移栽秧苗每株以 5 叶为准,计算秧苗带入的纯 N、P、K 量分别为 3.75、0.45 和 0.6(kg#hm⁻²).

表 3 1994~1996 随农田地上部分收获物所输出系统的养分量
Table 3 Nutrient output for grain and straw in different rice field patterns from 1994 to 1996(kg#hm⁻²)

年份 Year	水田模式 Patterns	地上部分生物量(干重) Biomass of above2 ground part(DW)			收获物中养分量 Nutrient output from grain and straw								
		籽实 Grain	稻草 Straw	合计 Total	N			P			K		
					籽实 Grain	稻草 Straw	合计 Total	籽实 Grain	稻草 Straw	合计 Total	籽实 Grain	稻草 Straw	合计 Total
1994	N	6754.5	5538	12292.5	83.3	47.9	131.1	19.2	8.7	27.9	15	44.1	59.1
	0	6330	5190	11520	78	44.9	122.9	18	8.1	26.1	14.1	41.4	55.5
	0	7452	6111	13563	91.8	52.8	144.6	21.3	9.6	30.9	16.7	48.8	65.4
	0	7021.5	5757	12778.5	86.6	49.8	136.4	20	9	29	15.6	45.9	61.5
1995	N	8374.5	6864	15238.5	93.5	58.7	152.1	22.4	8.7	31.1	20.7	44.7	65.4
	0	8377.5	6867	15244.5	93.5	58.7	152.1	22.4	8.7	31.1	20.9	44.7	65.6
	0	8470.5	6943.5	15414	94.5	59.3	153.8	22.7	8.9	31.5	21	45.3	66.3
	0	8586	7038	15624	95.9	60.2	156	23	9	32	21.3	45.9	67.2
1996	0	8508	6978	15492	95	59.6	154.5	22.7	8.9	31.5	21.2	45.5	66.6
	N	6981	6423	13404	76.8	47.1	123.9	15.9	7.2	23.1	20.1	58.4	78.5
	0	7279.5	6697.5	13977	80.1	49.2	129.5	16.5	7.5	24	21	60.8	81.8
	0	7417.5	6823.5	14241	81.6	50.1	131.7	16.8	7.7	24.5	21.3	62	83.3
	0	7525.5	6924	14449.5	82.8	50.9	133.7	17.1	7.8	24.9	21.6	62.9	84.5

注: 1994 年收获物籽实的养分浓度为 N212.32g#kg⁻¹, P22.85g#kg⁻¹, K22.23g#kg⁻¹. 秸秆的养分浓度为 N28.65g#kg⁻¹, P21.56g#kg⁻¹, K27.97g#kg⁻¹; 1995 年收获物籽实的养分浓度为 N211.16g#kg⁻¹, P22.67g#kg⁻¹, K22.48g#kg⁻¹. 秸秆的养分浓度为 N28.54g#kg⁻¹, P21.27g#kg⁻¹, K26.52g#kg⁻¹; 1996 年收获物籽实的养分浓度为 N211.01g#kg⁻¹, P22.27g#kg⁻¹, K22.88g#kg⁻¹. 秸秆的养分浓度为 N27.34g#kg⁻¹, P21.13g#kg⁻¹, K29.08g#kg⁻¹. 收获物籽实与秸秆重量之比: 1994~1995 为同一品种 1 0 0.82; 1996 年为另一品种 1 0 0.92.

但养分 K 则主要随秸秆输出, 约占 75%.

3.2.2 随渗漏水带走的养分 养分渗漏损失是水田生产过程不可避免的, 其量取决于渗漏水量与土壤渗漏水中的养分平均浓度. 本文以距地表 40cm 土层作为确定系统养分随渗漏带走量的边界(表 4). 实验表明, 1994 年不同水田模式随渗漏可能带走的 N 量并无明显规律性, 1995~1996 年各水田模式均以常规水田模

表 4 1994~1996 年不同模式水田通过 40cm 处渗漏损失的养分量
Table 4 Leaching loss of nutrient in different rice field patterns from 1994 to 1996(kg#hm⁻²)

年份 Year	N				0				0				0				0			
	NH ₄ ⁺ 2N	NO ₃ ⁻ 2N	P	K	NH ₄ ⁺ 2N	NO ₃ ⁻ 2N	P	K	NH ₄ ⁺ 2N	NO ₃ ⁻ 2N	P	K	NH ₄ ⁺ 2N	NO ₃ ⁻ 2N	P	K	NH ₄ ⁺ 2N	NO ₃ ⁻ 2N	P	K
1994	15.5	20.7	0.09	5	11.4	19.7	0.09	4.1	9.6	31.7	0.06	3.9	11.1	21.3	0.08	4.1	-	-	-	-
1995	12.2	59	0.03	6.3	13.1	51.9	0.03	7.2	12.8	54.9	0.02	5.1	12.6	51.2	0.03	5.1	12.3	55.7	0.03	4.7
1996	13.5	44.6	-	-	-	-	-	-	12.6	38.1	-	-	11.3	31.5	-	-	11	38	-	-

3.1.5 细绿萍生物固氮 实验中的稻萍模式有细绿萍的生物固氮输入. 每年 5 月底放入萍种 375kg#hm⁻² (湿重), 至 7 月中旬时萍生物量干重可达 505.5kg#hm⁻² (1994 年) 和 901.5kg#hm⁻² (1995 年). 本文按细绿萍的实际含 N 率 3.51% 计, 由萍带入水田的 N 量为 17.7kg#hm⁻² (1994 年) 和 31.65kg#hm⁻² (1995 年). 萍体中 P 和 K 量是萍从水稻田吸收的, 翻压时则返回稻田土壤中.

3.1.6 干沉降及非共生固氮输入 据资料报道^[2,5], 干沉降(包括尘埃)和非共生固氮对农田养分的贡献不容忽视. 考虑到该项输入均为估计值, 在本区尚无实测资料, 因此, 养分输入项中暂不将其列入计算.

3.2 不同水稻田模式的养分输出

3.2.1 收获物带走的养分 由表 3 可见, 各水田模式地上部分收获物带走的 N、P 主要随籽实输出系统, 分别占输出总 N 的 60% 以上和输出总 P 的 70% 左右;

式渗漏淋失的 N 最高, 而改进施肥模式、节水模式和节水节肥模式其田间淋失养分都有不同程度降低. 如 1996 年节水模式较常规模式可减少 N 素渗漏损失达 26.4%. 水田渗漏淋失的 N 主要是 NO₃⁻2N, NH₄⁺2N 的淋失量不大. 各模式中 P 的渗漏淋失极小, K 的渗漏淋失量也不大.

3.3 不同水稻田生态系统的养分平衡

表 5 1994~ 1996 不同水田模式的养分平衡

Table 5 Nutrient balance of different rice field patterns from 1994 to 1996(kg#hm⁻²)

年份 Year		Ñ			Ò			Ó			Ô			Ö		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
1994	IN	234.8	56.1	72.3	251	56.1	71.9	231.8	56.1	70.7	229.8	56.1	70.7	-	-	-
	OUT	167.3	28.1	64.1	153.9	26.3	59.6	185.9	30.9	69.3	168.8	29.1	65.6	-	-	-
	v	67.5	28	8.2	97.1	29.8	12.3	45.9	25.2	1.4	61	27	5.1	-	-	-
1995	IN	236.6	55.7	77.3	266.3	55.7	76.4	234	55.7	76.1	230.4	55.7	73.8	230.1	55.7	73.8
	OUT	223.2	31.1	70.8	217.1	31.1	72.8	221.4	31.5	71.4	219.8	32	72.3	222.5	31.5	71.1
	v	13.4	24.6	6.5	49.2	24.6	3.6	12.6	24.2	4.7	10.6	23.7	1.5	7.6	24.3	2.7
1996	IN	241.2	-	-	-	-	-	238.2	-	-	234.3	-	-	234.5	-	-
	OUT	182	-	-	-	-	-	180.2	-	-	174.5	-	-	182.6	-	-
	v	59.2	-	-	-	-	-	58	-	-	59.8	-	-	51.9	-	-

IN: 输入系统养分 Input nutrient, OUT: 输出系统养分 Output nutrient, v : 养分变化量 Nutrient change.

根据上述结果可获得 1994~ 1996 不同水田模式生态系统的养分输入输出总量及其变化量, 即养分平衡表(表 5). 通过养分平衡表不难看出: N 的收支平衡有盈余. 由于各模式投入系统的 N 几乎全部是化肥(稻萍模式除外), 同时考虑到该实验田在每次实验阶段都采取同样的处理, 每年收获后留在土壤中的有机氮(主要是根茬)年度间的变化也很小, 且该农田土壤中的有机质含量已多年处于较稳定的水平, 可以推测盈余额中来自化肥的部分不可能在土壤中保存, 因此必定损失于 NH₃ 挥发和反硝化损失, 对于来自绿萍的有机氮则有相当部分留存于土壤中. 而 P 的收支平衡中, 其盈余量约占输入量的一半, 说明当前施 P 水平使土壤中积累有相当的 P. 但 K 的输入总量和输出总量基本接近, 反映系统中 K 基本处于平衡状态.

4 讨 论

通过本次实验不难发现, NO₃⁻ 淋失是本类型稻田 N 的重要损失项, 控制 N 肥用量、采用合理的施肥技术和减少稻田水分渗漏可有效减少此类 N 损失. 实验中的节水、节水节肥和改进施肥模式较常规模式不同程度地减少了稻田 N 的渗漏损失便有力地证明了这一点. 而反硝化和氨挥发也是 N 的重要损失项, 改进施肥技术, 控制 N 肥用量则可更有效减少此项损失. 试验中, 泡田前采用/ 全层深施 0N 肥, 追肥期的/ 以水带 N0 施肥方式, 以及生育期的合理调控田间水分, 可有效降低水稻田间 N 的挥发和反硝化损失, 这是因为采用基肥深施, 减少了尿素暴露于大气中的机会, 减少了 NH₃ 的挥发; 肥料埋入土层, 也减少了田面水层中 NH₄⁺ 的浓度, 从而减少了 NH₃ 的挥发损失. 而以水带 N 的施肥方式, 是在田面没有明水, 土壤处于非饱和态时及时施肥到田间并以小水漫灌, 这样有助于将溶解于水的养分随水下渗进入根层, 并较长时间滞留根作层不至于因灌大水而很快向深层渗漏, 有利于根

系对养分的吸收利用. 因此, 在该类型稻田区推行节水、节肥技术对减少水稻田 N 的损失有着重要意义. 同时, 从养分平衡试验中可知本类型稻田, K 有少量淋失, P 几乎无损失, 因此, 残留肥料 P 可在土壤中留存, 从而扩大了该稻区土壤 P 库.

比较 5 种稻田模式, 以实施田间水肥调控的模式较传统模式在单产上有所提高, 其肥料和养分利用效率也得到不同程度提高, 但各模式产量之间并无显著差异性. 节肥模式增产效果不显著可能与 N 肥用量过高(187kg#hm⁻²) 有关, 而稻萍模式也并未实现预期的增产效果. 但据陈炳焕等^[3] 研究指出: 稻田养萍不仅没出现萍稻争肥, 而且养萍能抑制藻类生长, 降低水层 pH 值和 NH₄⁺ 2N 浓度, 减少 NH₃ 挥发以及减少蓝藻反硝化反应释放的 N₂O, 还可排除体内 12% 以上的氮素, 提高肥料利用率, 增加土壤肥力, 促进水稻产量的提高. 显然, 绿萍在北方稻区大田养殖的节肥增产作用值得进步研究.

参考文献

1 王家玉、王胜佳等. 1996. 稻田土壤中氮素淋失的研究. 氮素产量环境. 北京: 中国农业出版社.
2 朱兆良、陈德立、张绍林等. 1986. 稻田非共生固氮对当季水稻吸收氮的贡献. 土壤, 18: 225~ 229.
3 陈炳焕等. 1994. 红萍在稻田氮素平衡中作用. 核农学报, 8(2): 97~ 102.
4 罗良国、许健民等. 1996. 北方稻田生态系统水分平衡及水分效率研究. 应用生态学报, 7(4): 371~ 376.
5 Goulding, K. W. T. 1990. Nitrogen deposition to land from the atm@ sphere. Soil Use and Man., 6(2): 61~ 63.
6 Singh, M. P. et al. 1993. Water percolation dynamics as influenced by submergence levels and depth of puddling in rice fields. J. Ind. Soc. Soil Sci., 41(2): 213~ 217.
7 Wen Dazhong and Pimetel, D. 1992. Ecological resource management to achieve a productive sustainable agricultural system in nothest Ch2na. Agric. Ecosyst Environ., 41: 215~ 230.

作者简介 罗良国, 男, 1966 年生, 博士, 主要从事农业生态学
研究, 发表论文多篇. E2mail: luoliangguo@263. net