

论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能* · 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义

曹志洪 林先贵 杨林章 胡正义 董元华 尹 睿

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

摘 要 自然状态下灌溉稻田每年比旱地要多固氮 27 kg hm^{-2} ,可以减少氮肥用量,既节约农本和资源,又缓解对环境的压力。太湖流域不同类型稻田在水循环中可吸纳氮素 $\text{N } 2 \sim 20 \text{ kg hm}^{-2}$,是氮素的汇。该区平原稻麦轮作田氮素的径流失量平均小于当年施氮量的 5%,对苏南太湖地区面源污染的相对贡献率仅为 7.5%,不是该区氮素面源污染的主要组成。稻田氮素向下淋失迁移的量低于麦田;太湖地区井水中硝态氮的超标率自 20 世纪 80 年代中期至今没有变化,说明该区井水中硝态氮含量高低与农业上氮肥用量没有直接联系。尿素挥发损失量稻季达施氮量的 6%~21%,麦季为 3.1%~6.5%;稻季氮挥发损失高于麦季;湿沉降带入土壤或水体的氮也是夏(稻)季高于麦季。总体上看,稻田向环境输出的氮少,而固定、汇集的氮多,“稻田圈”是保护环境的重要生态单元。

关键词 生物固氮;径流氮;淋洗氮;氮循环;稻田圈
中图分类号 S153 **文献标识码** A

根据考古发现约一万年人类开始食用稻米,最近在太湖流域的发掘表明早在 6000 多年前已有先民在这里开辟稻田,创造了灌溉系统,以火耕水潴方法种植水稻^[1,2]。埋藏的古水稻土的肥力质量(有机质、氮、磷等养分含量)及其物理和化学性状的研究表明其与现代水稻土的肥力质量数据差异不大(数据未发表)。位于嘉兴市罗家角遗址的一片深灰色的水稻田——四周被桑园包围的“箱子田”,可能已连续利用 5 000a 左右,至今仍是稻麦两熟的高产稳产农田。

徐琪等^[3]、Greenland^[4]和龚子同等^[5]国内外专家早就论述的:水稻土及其稻田系统是环境友好、生态健康、可持续利用的人工湿地生态系统,已被大量的新研究成果和生产实践所证实。继前文^[6]稻田土壤磷素的迁移流失特征来讨论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能之后,本文将从稻田土壤氮素的累积、迁移、流失等特征进一步论述之。

诚然氮素不是温带地区水体富营养化的控制因子,但大量氮素进入水体对水质及水体不同功能的发挥显然不利。例如水中过高氨氮对水产养殖业有害,大量硝态氮渗入地下水目前仍认为是对人类健康有威胁,大量有机氮素的存在是水体散发异味

的原因之一等等。稻田生态系统氮素积累、迁移的数量和机制也与旱地生态系统有明显区别。

1 稻田生物固氮能力与环境风险

稻田系统中活跃着很多不同类型的固氮生物,固氮菌和固氮蓝绿藻是主要的两类。固氮菌的分布非常广泛,有存在于水稻根际及土壤中的,也有附着在稻株和水草上等等,而固氮蓝绿藻的分布更广泛,有生活在水土界面上的,水层中浮游的以及水气界面上的,也有附着在稻株上和与红萍共生的等等。原国际水稻研究所的 Greenland 对灌溉稻田与旱稻田的固氮能力做了比较(表 1)^[4],认为在自然条件下灌溉稻田每年比旱稻田要多固氮 32 kg hm^{-2} 。此外,灌溉稻田种植豆科绿肥一般要比旱稻或其他旱地上普遍;即使是同样品种的豆科绿肥,灌溉稻田因为有更多的固氮微生物而比在旱稻或其他旱地上多固氮 27 kg hm^{-2} ;套种或冬季轮种豆科植物(蚕豆,豌豆等)的灌溉稻田也比在旱地上能多固氮 20 kg hm^{-2} ;灌溉稻田还可养殖红萍,旱地是不能的,红萍可以每年固氮 40 kg hm^{-2} 。可见,灌溉稻田有很多生物固氮的途径来改善土壤的氮素

* 国家重点基金项目(D0115-40335047)资助

作者简介:曹志洪(1941~),研究员,浙江余姚人。主要从事土壤、植物营养与环境研究

收稿日期:2005-05-08;收到修改稿日期:2005-09-21

肥力,实现减少氮肥(有机和无机氮肥)用量的目标。既满足作物高产优质的需求,又减少农业投入,更主要的是降低了过量的土壤氮素累积对环境的负面影响。

综上所述,合理安排轮作复种,重视豆科作物和绿肥,灌溉稻田微生物固氮可提供的氮素比旱地多达 $N\ 133\ kg\ hm^{-2}\ a^{-1}$ 。这对减少肥料投入,节约自然资源,及社会可持续发展都有重大的意义。

表 1 灌溉稻田和旱稻的生物固氮量¹⁾Table 1 Nitrogen fixation in irrigated paddy and upland rice field ($N\ kg\ hm^{-2}\ a^{-1}$)

| 生物固氮类型 Type of N fixation | 灌溉稻田 Irrigated rice paddy | | 旱稻 Upland rice field | |
|---|---------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| | 范围 Range | 对水稻的贡献 Contribution to rice | 范围 Range | 对水稻的贡献 Contribution to rice |
| 自生、或与根系联合的固氮 By free-living and Root associated bacteria | 5 ~ 15 | 5 | 0 ~ 4 | 1 |
| 自生蓝绿藻 By free-living blue-green algae | 10 ~ 140 | 30 | 1 ~ 10 | 2 |
| 稻作前后的豆科作物 By legumes grown before or after the rice crop | 20 ~ 120 | 30 | 10 ~ 40 | 10 |
| 豆科绿肥 By leguminous green manure | 50 ~ 150 | 60 | 20 ~ 80 | 20 |
| 红萍 By Azolla / Anabaena azollae | 20 ~ 140 | 40 | 0 | 0 |

1) 引自文献[4] Reference [4]

2 太湖平原稻田是水循环中氮素的汇

灌溉稻田有田埂在四周围护,栽稻季节有田面水层覆盖,水稻和其他水生藻类、动物和植物活跃期间,是具有独特生物多样性的人工湿地系统。这个系统既有吸纳雨水、灌溉水或污水中所含的氮素等养分的作用,又有沉降进入水体中固体悬浮物和消解有毒物质等生态功能。多年来在太湖地区的调查测定表明,从稻田流出的径流水或排水中所含的氮素养分一般都比进入稻田的雨水、河水、池塘水等所含的氮素要低,说明该区域的稻田是水循环中氮素养分的汇。稻田能降低流经其中的雨水和灌溉水中氮素含量有利于水环境质量保护。表 2 是对太湖流

域各种类型的稻田所采的雨水、灌溉水、径流水和渗漏水样品中氮素含量的测定结果。圩田是离村镇较远的、产量中等的低洼地块,平田 - 1 是离城镇较近、产量较高的田块;平田 - 2 是离城镇稍远一些产量较高的地块;沿江平田是离村镇更远、靠近长江边,土壤质地较轻的低产田块;沿丘高田是平原与丘陵交接地带的中产田块;而丘陵梯田则是远离乡镇的丘陵坡地的低产田块。表 2 结果可见,从雨水及灌溉水输入稻田的氮素,减去从稻田流出的径流水和渗漏水中所含氮量,其差值都是正的,表明稻田截留了雨水和灌溉水中的氮素。太湖流域各种类型稻田在水循环中吸纳氮素 $N\ 2\sim\ 20\ kg\ hm^{-2}$ 之间,是氮素的汇。从氮素平衡的角度看,太湖流域稻田确实起着保护环境的重要作用。

表 2 稻田生态系统中水循环各分室携带的氮量及其平衡^[3]Table 2 Nitrogen brought in by waters different in source and balance in the rice paddy ecosystem^[3] ($N\ kg\ hm^{-2}$)

| 农田类型 Type of paddy | 雨水 Precipitation | 灌溉水 Irrigation | 径流水 Run off | 渗漏水 Leaching | 平衡 Balance |
|-----------------------|------------------|----------------|-------------|--------------|------------|
| 圩田 Low flat | 15.20 | 3.49 | 2.80 | 3.24 | + 14.65 |
| 平田 - 1 Plain flat - 1 | 18.23 | 6.45 | 2.86 | 1.86 | + 19.96 |
| 平田 - 2 Plain flat - 2 | 16.70 | 4.72 | 3.61 | 3.02 | + 14.79 |
| 沿江平田 Riverside flat | 10.88 | 5.72 | 4.42 | 3.78 | + 8.40 |
| 沿丘高平田 Hillside flat | 14.00 | 4.09 | 1.86 | 2.82 | + 13.04 |
| 丘陵梯田 Hill terrace | 3.31 | 4.64 | 3.28 | 2.70 | + 1.97 |

其中离城镇、村庄和公路较近和平田、圩田、以及沿丘高平田等吸纳的氮素多于远离城镇、村庄和

公路的沿江平田,更高于在丘陵山区中的梯田。这主要是由降水带入土壤的氮量(湿沉降氮)之多少所

决定的。降水中氮素的多寡是受乡镇工业和生活排放烟气、及车流扬尘中所含氮素的多少和大气中挥发的氨氮多少等影响的。

3 稻田生态系统中氮素的径流迁移量

稻麦轮作田土壤氮的径流损失量,约占施肥量的 1.4%~6.3%,平均小于当年施氮量的 5%。除施肥后一定时间(一般小于 10~15 d)外,农田径流中氮的浓度往往小于灌溉水也说明稻田生态系统具有吸收灌溉水和降雨中氮的作用。

根据江苏省农林厅李荣刚⁽¹⁾提供的数据及相应的换算系数,得到农田径流流失的氮素对苏南太湖地区面源污染的相对贡献率仅为 7.5%,而人、畜排泄物和生活废弃物的贡献率达 82.5%,其人群排泄物占 30.74%,生活污水和废弃物占 23.80%,畜禽排泄物占 27.85%,水产养殖业占 10.15%。

经测定,农田径流迁移流失的氮素中有机氮(来自当季使用的畜禽有机肥,矿化的土壤有机氮素,根系分泌物和土壤生物的代谢产物等)占有很大的比例。这与邢光熹等^[8]对太湖流域水体总氮中 80%以上的铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的 ^{15}N 自然丰度测定结果很高(+9.97~+23.8)对应,进一步证明其最可能的氮源是畜禽和人粪尿等。从而说明占地表水体总氮 80%以上的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的来源不以化学氮肥为主,因为化学氮肥的 $^{15}\text{NH}_4^+$ 自然丰度一般仅为 -1.48~+0.91。说明有机肥使用过量对水环境同样有害。

4 硝态氮的稻田渗漏淋洗与地下水污染

不同土壤类型稻田氮素的渗漏和淋洗量、不同季节的淋洗氮素的动态变化及其对地下水质量的影响等是土壤和环境科学研究的一个热点。目前多数采用固定的排水收集器或埋设不同深度的渗滤管两种形式在田间进行研究。

稻麦两季的测定结果表明,硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)麦季的淋洗量大于稻季的。与施肥时间、施肥量、水稻生育期有关,基肥>分蘖肥>穗肥,渗滤液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量随着氮肥用量的增加而增加。稻季收集的渗滤液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度范围在 0~7.14 mg L^{-1} ,不同层次呈现上低下高的趋势,净淋洗量在 2.34~5.78 kg hm^{-2} 之间,占总施氮(N)量的 1.04%~1.93%。麦季收集的渗滤液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在 0.12~9.94 mg L^{-1} 之间,净淋洗量在 1.03~14.23 kg hm^{-2} 之间,占总施 N 量的 1.40%~5.2%。可见,稻田氮素向地下水的迁移量也远低于麦田。太湖流域特殊的地形和气候条件下,为减少渍害对小麦生产的影响,要开深沟打破犁底层,促进排水畅通、确保“雨停田干”,降低地下水位,显然是导致淋洗量增加的原因之一。

无论是稻季还是麦季,各处理渗滤液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均低于 10 mg L^{-1} ,均小于 WHO(世界卫生组织)、USEPA(美国环保署)、EC(欧盟)等组织规定的饮用水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 10 mg L^{-1} 的最大允许值,目前不会对这项指标产生威胁。

当然稻田为主的农田生态系统的淋洗渗滤液中硝态氮浓度有时也可能超过这个标准,但并不会影响到周围村镇和城市饮用(井)水的卫生质量。因为太湖平原稻区地下水都是浅层(60~70 cm)的,并随季节降水和灌溉而上下波动,所含氮素可被作物再次利用。而且田间的地下水也不可能流向一般是地势较农田高的村庄、城镇的井水去。20 世纪 80 年代中^[9]、90 年代末^[8]、及 2002 年至 2003 年间,中国科学院南京土壤研究所 3 次调查了该区村镇中井水的硝态氮含量,结果见表 3。该区农业上的施氮量从 20 世纪 80 年代中期到现在已经提高了 2~3 倍(从 N 90 kg hm^{-2} 上升至 N > 300 kg hm^{-2}),但井水中硝态氮的超标百分数没有提高,根据目前的研究结果说明该区村镇井水中的硝态氮含量与农业施氮量的提高没有直接的关系,这与国外在印尼稻区^[9] 调查的报告结论是一致的。

表 3 三个时期太湖流域井水硝态氮含量的测定

Table 3 N content of well water in Taihu Lake region in 3 different periods

| 年代 Periods | 调查井数 No. of wells | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (N mg L^{-1}) | $\text{N} > 10 \text{ mg L}^{-1}$ (%) | 资料来源 Source |
|------------|-------------------|---|---------------------------------------|-------------|
| 1980~1995 | 51 | 0.25~32.7 | 31 | [9] |
| 1995~1997 | 40 | 0.31~43.5 | 28 | [8] |
| 2002~2003 | 45 | 0.27~35.8 | 25 | (2) |

(1) 李荣刚. 高产农田氮素肥效与调控途径——以江苏太湖稻麦两熟农区为例推及全省. 中国农业大学博士学位论文. 北京, 2000

(2) 973 项目(No. 19990118) 总结资料 973 Project (No. 19990118) Final Report

5 稻田氮素的氨挥发及其与大气和水体环境质量的关系

稻田表面覆盖的水层里生活着许多藻类,在阳光照耀的中午,因水藻生命活动导致田面水层的 pH 值可达到 10 或更高^[11,12]。在撒施碳酸氢铵或尿素的情况下,氨挥发损失可以高达施氮量的 20%~40%或更高。

近年在江苏省常熟市测定的结果表明,尿素施入稻田后的氨挥发高峰一般出现在施肥后的 1~3 d 内,尿素的挥发损失量达施氮量的 6%~21%,麦季氨挥发高峰一般出现在施肥后的 1~4 d 内,氨挥发过程持续时间较长,尿素麦季氨挥发量占总施氮量的 3.1%~6.5%;由此可见稻田的氨挥发量、损失率均高于麦季。显然是因为稻季的温度(气温和土壤温度)高、以及稻田水层的高碱度所至,而麦季的与其温度低和麦田土壤的 pH 低有一定的关系。

然而,稻季的雨量大,该区 6~8 月的降雨量占年总雨量的 41.8%~42.3%,挥发的氨和大气中原有的氮素随雨水一起沉降到田间或水体。稻季内湿沉降带入土壤或水体中的氮为 6.9~17.5 kg hm⁻²,其中 NH₄⁺-N 的比例为 35.8%~65.9%,湿沉降氮量与降雨量之间呈正相关;湿沉降动态变化主要受降雨量与农田施肥的影响;麦季内由湿沉降带入的氮为 7.0~14.6 kg hm⁻²,其中, NH₄⁺-N 的比例为 48.2%~75.8%。稻麦两季湿沉降氮中铵态氮平均值均占 60%左右。

上述结果阐明稻田虽然有较多的氮以氨气挥发,但同时又通过湿(干)沉降的形式有较多的氮素返回地面;冬麦季节氨挥发量较低,同期的湿(干)沉降的氮素也不多。总体上水稻生长季节由稻田向环境输出的氮素比较少而固定或者汇集的氮素比较多,因此对环境或生态系统的正面影响远大于负面的。

6 结 论

1) 稻田中活跃着更多的固氮生物,在自然条件下灌溉稻田每年比旱稻田要多固氮 32 kg hm²,合理安排稻田的轮作复种,重视豆科作物和绿肥的种植,那么灌溉稻田微生物固氮提供的氮素比旱地一些作物要多固氮 133 kg hm⁻² a⁻¹。因此,获得相同的产量,灌溉稻田比旱地可少用很多化肥氮,这对减少农民的成本,节约资源,缓解环境的压力,以及对

社会的可持续发展都有重大的意义。

2) 灌溉稻田是具有独特生物多样性的人工湿地系统,能吸纳雨水、灌溉水或经过初步处理的污水中所含的氮素等养分,太湖流域各种类型稻田在水循环中都起着吸纳氮素(N 2~20 kg hm⁻²)的作用,是氮素的汇。

3) 稻麦轮作田土壤氮的径流损失量,约占施肥量的 1.4%~6.3%,平均小于当年施氮量的 5%。稻田径流流失的氮素对苏南太湖地区面源污染的相对贡献率仅为 7.5%,不是氮素面源污染的主要来源。径流流失的氮素中有机氮(来自当季使用的有机肥,矿化的土壤有机氮素,根系分泌物和土壤生物的代谢产物等)占有很大的比例,因此过量使用有机肥对水体环境同样有害。

4) 稻季渗漏液中 NO₃⁻-N 的浓度范围在 0~7.14 mg L⁻¹,净淋洗量在 2.34~5.78 kg hm⁻²之间,占总施氮(N)量的 1.04%~1.93%。麦季渗漏液中 NO₃⁻-N 浓度在 0.12~9.94 mg L⁻¹之间,净淋洗量在 1.03~14.23 kg hm⁻²之间,占总施 N 量的 1.40%~5.2%。可见,稻田氮素向地下水的迁移量也远低于麦田。太湖地区农业施氮量自 20 世纪 80 年代中期至今已提高 2~3 倍,该区井水中硝态氮的超标率没有变化,说明井水中的硝态氮量与氮肥用量没有直接关系。

5) 稻季尿素氮肥的挥发损失量达施氮量的 6%~21%,而麦季则为 3.1%~6.5%;可见稻季氨挥发损失高于麦季。但稻季的湿沉降带入土壤的氮为 6.9~17.5 kg hm⁻²,其中 NH₄⁺-N 的比例为 35.8%~65.9%,麦季湿沉降带入土壤的氮为 7.0~14.6 kg hm⁻²,其中 NH₄⁺-N 的比例为 48.2%~75.8%。稻麦两季湿沉降氮中铵态氮的平均值均为 60%左右。总体上稻田向环境输出的氮素少而固定或者汇集的氮素多,稻田氮素循环对环境的影响正面大于负面。“稻田圈”是保护环境的重要生态单元。

致 谢 本文所综述的部分数据是国家重大基础研究发展规划项目(973, No. G19990118)支持下取得的成果,特别要感谢“土-水界面物质迁移规律与水环境质量关系”课题和“水稻土质量非均衡化机理及其调控”课题的同事们,没有他们的辛勤劳动和努力协作就不会有 973 项目 G19990118 的出色成果,也不会有这个重点基金的支持。

参 考 文 献

[1] 丁金龙. 长江下游新石器时代水稻田与稻作农业的起源. 东

- 南文化,2004,2:19~23. Ding J L. On the origin of irrigated rice field and rice culture at Neolithic period at lower to middle reaches of Yangtze River (In Chinese). Southeast Culture, 2004,2:19~23
- [2] 谷建祥. 埤墩遗址马家浜文化时期的水稻田. 东南文化,2003,1(增刊):43~45. Gu J X. Majibang periods irrigated rice fields at Chuodun site (In Chinese). Southeast Culture, 2003,1(Suppl.):43~45
- [3] 徐琪,杨林章,董元华,等. 中国稻田生态系统. 北京:中国农业出版社,1998. Xu Q, Yang L Z, Dong Y H, *et al.* Rice Field Ecological system of China (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998
- [4] Greenland D J. The Sustainability of Rice Farming. London: CAB International Publication in Association with the International Rice Research Institute, 1998. 110~113
- [5] Gong Z T. Wetland Soils in China. In: Wetland: Characterization, Classification and Utilization. IRRI, Philippines, 1985
- [6] 曹志洪,林先贵,胡正义,等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷径流迁移流失的特征. 土壤学报,2005,(5)42:799~804. Cao Z H, Lin X G, Hu Z Y, *et al.* Ecological function of “Paddy Field Ring” to urban and rural environment . Characteristics of soil P losses from paddy fields to water by runoff (In Chinese). Acta Pedologica Sinica. 2005, (5)42:799~804
- [7] 邢光熹,曹亚澄,施书莲,等. 太湖地区水体中氮的来源和反硝化作用. 中国科学(B),2001,3(2):130~137. Xing G X, Cao Y C, Shi S L, *et al.* On the sources of nitrogen and its a de-nitrification in water system of Taihu Lake region (In Chinese). Sciences of China (B), 2001, 3(2):130~137
- [8] 马立珊. 太湖地区水体氮素面源污染及其对策. 应用生态学报,1992,3(4):336~354. Ma L S. Nitrogen nonpoint pollution in water system of Taihu Lake region and its control practices (In Chinese). Acta of Applied Ecology 1992, 3(4):336~354
- [9] Wetselaar R, Fox J, Smith G D, *et al.* Groundwater nitrate in east Java, Indonesia. CSIRO, Journal of Australia Geology and Geophysics, 1993, 14(2/3):273~277
- [10] Mikkelsen D S, Dedatta S K. Ammonia volatilization from wetland rice soils. In: International Rice Research Institute. ed. Nitrogen and Rice. Manila Philippines, 1979. 135~156
- [11] Cao Z H, Dedatta S K, Feldepar VT, *et al.* Effect of placement methods on floodwater properties and recovery of applied (¹⁵N labeled urea) in wetland rice. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984,48:196~203

ECOLOGICAL FUNCTION OF “PADDY FIELD RING”

TO URBAN AND RURAL ENVIRONMENT

. CHARACTERISTICS OF NITROGEN ACCUMULATION, MOVEMENT IN PADDY FIELD ECOSYSTEM AND ITS RELATION TO ENVIRONMENTAL PROTECTION

Cao Zhihong Lin Xiangui Yang Linzhang Hu Zhengyi Dong Yuanhua Yin Rui

(State Key Lab. of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

Abstract In nature irrigated rice fields fix about $N\ 27\ kg\ hm^{-2}$ more than upland rice fields, which means that the crop needs less N fertilizer in irrigated rice paddy than in upland rice field and that growing rice in paddy fields may lower the production cost, save valuable resources and relieve environmental pressure. Results indicate that irrigated rice paddy is a sink of N because it gains $N\ 2\sim 20\ kg\ hm^{-2}$ in balance from N cycling with water flowing through the field in the Taihu Lake region. The N loss with runoff accounted for less than 5% of the N input as fertilizer, and only 7.5% of the non-point source N loading in South Jiangsu plain, suggesting that N runoff from rice paddy is not a major contributor of the problem. N leaching from irrigated rice paddy is less than from upland fields. Since the mid-1980s, the over-limit rate of nitrate N in well water has remained almost unchanged even though the N fertilizer application rate has dramatically increased, which implies that nitrate in well water is not directly related to N fertilization. N loss through ammonia volatilization accounted for about 6%~21% of the urea N applied in paddy field in the rice growing season, and only 3.1%~6.5% in the winter wheat season; On the other hand, N input through wet deposition was also much larger in the rice season than in the winter wheat season. Overall, irrigated rice paddy is a N sink, but not a N source to its surrounding environment. “Paddy field Ring” works as an artificial wetland and protects our environment from the view point of N cycling.

Key words Biological nitrogen fixation; N runoff; N leaching; N cycling; Rice field Ring