

藻类在稻田生态系统中的作用及其对氨挥发损失的影响

张启明^{1,2}, 铁文霞^{1,2}, 尹 斌^{1*}, 贺发云¹, 朱兆良¹

(1 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;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 本文在总结已有稻田藻类研究结果的基础上, 结合温室盆栽试验的初步结果, 阐述了藻类对稻田氨挥发损失过程的影响, 及其在稻田土壤 N 素转化、供应与调节中所起的重要作用。提出了减少 N 素氨挥发损失和合理利用稻田藻类的方法。

关键词: 藻类; 稻田; 尿素; 氨挥发

中图分类号: S154.2; S365

近年来的研究表明, 在诸多影响因素中, 微生物活动在稻田土壤 N 素转化和供应以及调节中起着至关重要的作用^[1]。作为组成土壤微生物主要类群之一的藻类, 在它们的生命过程中, 对于土壤养分的转化和土壤肥力的提高都具有直接或间接的影响。以前的有关研究主要集中在藻类的固 N 作用和对稻田 N 素损失的影响方面^[2-8], 而藻类对施入稻田的化肥 N 在稻田土壤中的转化、迁移、固定、损失等过程的影响程度与作用机理及其相关的影响因素还没有进行系统深入的研究。如今, 在稻田生产中, N、P 的大量施用, 使得水稻田中藻类大量繁殖, 已经成为一种普遍的现象。本文在总结已有稻田藻类研究的基础上, 结合温室盆栽试验的结果, 讨论了稻田藻类对化肥 N 的氨挥发损失过程的影响, 提出了减少 N 素氨挥发损失和合理利用稻田藻类的方法, 为提高 N 肥利用率、减少 N 素引起的环境污染提供科学依据。

1 藻类在水体环境与水稻田中的作用差异

富营养化已成为一个全球性的重大水环境问题, 藻类大量生长和繁殖是水体富营养化的标志。由此可造成水质恶化、水体功能下降、水生生物死亡等灾难性后果, 它不仅制约了地表水资源的可利用性, 而且直接影响人类的健康生存与社会经济的持续发展^[9]。水体富营养化的根本原因是水体中

N、P 等营养元素过量, 而这些过量的营养元素不外乎来源于工业废水、生活污水、农田流失的 N、P 以及水生养殖的饵料等^[10]。但是, 藻类生长在水稻田中却是很普遍的现象, 因为, 对稻田生产而言, 田面水富含 N、P 等营养元素是水稻生长必需的条件, 同时也会促进藻类的生长。藻类的生长可促进稻田养分的生物转化与循环, 最重要的是藻类能吸收固持 N、P, N、P 固持在稻田中有利于土壤肥力的提高, 而一旦流失到水环境中就会造成环境危害。总之, 藻类生长对水环境是灾害, 而对稻田则有其有利的一面。

2 藻类在稻田生态系统氮素循环中的作用

藻类对化肥 N 迁移与转化的重要性已被广泛认可, 藻类的光合放氧作用导致氧化还原电位的升高, 所以稻田白天的 Eh 比晚上要高得多^[11]。Eh 的变化必然引起土壤氧化层厚度的变化, 藻类生长前期氧化层的厚度增加, 而到后期由于藻类生长的衰老, 藻类的分解需要 O₂, 故氧化层会降低, 最后, 藻类死亡后覆盖在土壤表层, 成为 O₂ 进入土壤的物理障碍, 从而引起氧化层厚度的一系列变化^[11]。正是由于藻类的生长造成土壤性质的一系列变化, 从而对 N 素的转化也带来了许多的影响。藻类的光合作用导致稻田水体的 pH 上升, 而这又是化肥 N 的氨挥发损失最敏感的影响因素^[12-14]。同时光合

①基金项目: 国家自然科学基金 (40571077) 和中国科学院知识创新工程项目 (KZCX-413) 共同资助。

* 通讯作者 (byin@issas.ac.cn)

作者简介: 张启明 (1979—) 男, 河南西平人, 硕士研究生, 主要从事氮素植物营养和环境的研究。E-mail: qmzhang@issas.ac.cn

作用导致水体中 O_2 的浓度增加,使土壤氧化层增厚,从而促进化肥 N 的硝化-反硝化损失,因为硝化过程是反硝化的先决条件,这个过程主要是由土水界面的氧化层的厚度所控制的^[11]。另外,藻类的存在可加快尿素的水解^[15],而且,藻类也会吸收利用 N 素促进自身生长^[16-17],这又会影响到植物可利用 N 的数量以及气态损失的数量。除此之外,已有的研究表明,在稻田生态系统中,藻类还有以下几方面的作用。

2.1 藻类具有固 N 作用

De^[2-3]首先发现了固 N 蓝绿藻的重要性,他把热带稻田土壤 N 素的自我维持归功于固 N 蓝绿藻的生长。有研究表明,稻田土壤中植物可利用 N 的量由于固 N 蓝绿藻的生长而增加^[4-5]。田间试验也发现,在 $100 \sim 150 \text{ kg/hm}^2$ N 肥施用条件下,如果稻田再接种蓝绿藻,可以使水稻产量提高 $5\% \sim 25\%$ ^[18-19]。

2.2 藻类能增加土壤有机质含量

土壤有机质不仅是作物生长所需各种营养元素的重要来源,也是维持土壤结构、微生物活动的重要物质^[20]。早在 1950 年,De 和 Sulaiman^[21]就发现接种藻类能够增加土壤中有机质含量,后来有很多的研究者通过试验证明了这一观点^[22-23]。Nekrasova 和 Aleksandrova^[24]运用 ^{15}N 示踪技术证实,尽管藻体中缺乏木质素,藻类生物量对土壤中腐殖质的形成贡献很大。然而,关于蓝绿藻对土壤有机 C 量贡献的报道有很大的差异。据 Rao 和 Burns^[25]报道,蓝绿藻向土壤中输入的有机 C 量为 0.45 t/hm^2 ;而 Reynaud 和 Roger^[26]报道的量为 41.6 t/hm^2 ;Das 等^[23]报道的量则为 $3.2 \sim 6.8 \text{ t/hm}^2$ 。Roger 等^[27]总结了前人的一些研究结果,提出在适宜的条件下,稻田藻类生物量平均约为 $6 \sim 8 \text{ t/hm}^2$ 。藻类生物量在土壤中作为有机物质存在的时间取决于藻类的可降解性。

2.3 藻类能够改善土壤物理性状

研究发现,蓝绿藻在生长期间能够向胞外分泌多聚糖、油脂等化合物^[28-29],这些化合物可沿着土壤颗粒的边缘扩散,将土壤颗粒胶结起来,形成微团聚体。另外,这些化合物特别是多聚糖,是由纤维构成的,能够将粘土颗粒连在一起,形成黏粒聚集体,黏粒在团聚体的形成和稳定性中起了很重要的作用^[30]。这些微团聚体又结合在一起逐渐变大,最后形成较大的土壤团聚体。另外,具有交织作用

的活的藻体细丝和通过藻体生物量增加的有机 C 一同起到了胶结土壤颗粒的作用。这些化合物在土壤团聚体形成或土壤稳定方面的重要性已经被很多研究者所认同^[31-32]。由于藻类的存在促进了土壤团聚体的改善,在水稻收获后播种旱地作物,秧苗长势良好^[31]。

2.4 藻类能够提高 P 的有效性

Saha 等人^[33]研究表明,由于藻体的分解会增加土壤的还原条件,从而促使 $\text{Fe}^{3+}\text{-P}$ 向可溶性的 $\text{Fe}^{2+}\text{-P}$ 转化。同时,藻体分解还会生成各种形式的化合物,很多化合物具有螯合功能,能够螯合难溶性 Fe-P 、 Al-P 中的 Fe 和 Al,从而将其中的 P 释放出来,成为植物可利用的 P。利用藻类能够使结合态 P 变为可溶性 P 的特性,可以提高低品位(P 含量低)磷矿石肥料的利用效率。这些磷矿石通常用在酸性土壤中作为 P 肥,如果将磷矿石和藻类一起应用在酸性土壤中,磷矿石作为 P 肥的效率将会增加。Roychoudhury 和 Kaushik^[34]报道了接种蓝绿藻对磷矿石中 P 的有效性的增加。

2.5 藻类具有促进作物生长的作用

很多研究表明,在施用 N 肥条件下,蓝绿藻提高作物产量的作用归因于蓝绿藻能够产生生长促进物质^[35-36]。很多研究者发现,将粮食作物的种子同藻类或它们的提取物一起培养,种子萌发和长势比较好。他们中的很多人观察到藻类促进水稻种子的萌发、根和茎的生长,以及增加水稻籽粒干重和籽粒蛋白质含量的现象^[37-38]。然而关于这些生长促进物质的本质存在不同的观点,有些人认为这些物质是一些类似植物激素的化合物,如赤霉素^[38]、细胞分裂素^[39]、生长素^[40]或者脱落酸^[41];另外一些人认为这些生长促进物质是一些维生素,特别是维生素 B^[42],或者是一些氨基酸^[43-44],也可能是一些抗生素和毒素^[45]。

3 藻类对氨挥发过程的影响

很多关于藻类对稻田氨挥发影响的研究都揭示了藻类生长促进了稻田氨挥发损失。有研究表明,通过在稻田中使用杀藻剂,可以抑制白天田面水 pH 值的升高,从而增加田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度,降低氨的平衡蒸汽压 P_{NH_3} ,表明该措施可降低氨挥发量^[46]。Velk^[16]研究表明,使用杀藻剂可以稳定稻田田面水 pH 值,因此降低氨挥发损失^[16]。Simpson 等^[14]通过不种水稻的田间试验结果表明,使用杀藻

剂可以使肥料 N 的氨挥发损失率从 21% 降到 11%^[14], 所以通过使用杀藻剂杀死稻田藻类的措施可以减少一部分氨挥发损失。虽然这些研究都说明了藻类生长促进了氨挥发损失, 但是这些大田试验都没有无藻对照, 所以都不能说明藻类生长对氨挥发过程的影响, 同时盲目地施用杀藻剂不仅会带来稻田污染问题, 还会丧失藻类在稻田生态系统的重要作用。

为了有效地说明在其他条件相同的情况下, 藻类对加入水稻土中的化肥 N 的氨挥发损失过程的影响, 我们在中国科学院南京土壤研究所温室内进行了盆栽试验。试验所用乌栅土 (潜育水耕人为土) 采自江苏常熟市中国科学院常熟农业生态试验站。试验设置两个处理: 一个为藻自然生长 (不遮光) 处理, 另一个为藻限制生长 (遮光) 处理, 施肥量为 (N 1 g + P₂O₅ 1 g + KCl 1 g)/6 kg 土。N 肥分 3 次施用, 比例为 5:3:2, 第 1 次以基肥混施的方式施入, 第 2 次在拔节期以撒施的方式施入, 第 3 次在抽穗期以撒施的方式加入。实验于 2005 年 7 月份开始, 9 月份第 2 次施肥并测定氨挥发。其间, 温室内温度约 38~42℃。

由实验结果图 1 可知, 与无藻处理相比, 有藻处理的氨挥发量变化为前期高、后期低。由于有藻处理的 pH 值一直比无藻处理高 (图 2), 而有藻处理水体中 NH₄⁺-N 浓度的变化也是前期高, 后期低 (图 3), 即水体中 NH₄⁺-N 浓度的变化趋势与氨挥发变化趋势一致, 因此, 有藻处理与无藻处理之间氨挥发变化的差异是由于二者之间 NH₄⁺-N 浓度差异引起的。开始有藻处理水体中 NH₄⁺-N 浓度高, 且 pH 高, 故氨挥发处理较无藻处理高, 随着氨挥发的损失以及藻类对 NH₄⁺-N 的吸收同化作用 (Meyer 和 Vlek 等人^[16-17] 研究表明稻田藻类能吸收同化稻田中的 N 素供自己生长), 有藻处理水体中 NH₄⁺-N 浓度逐渐降低, 即使有藻处理 pH 还比对照高, 氨挥发损失也逐渐降低, 直至低于无藻处理。

近年在江苏省常熟市进行的研究结果表明, 尿素施入稻田后的氨挥发高峰一般出现在施肥后的 1~3 天内^[47-48]。同时, 宋勇生等^[49]大田试验也表明施肥前后 6 天是尿素水解为 NH₄⁺-N 和 N 素挥发损失的关键时期, 这 6 天内的氨挥发量占氨挥发总量的 80.7%~94.3%。因此, 可以通过采取一定的措施, 在施肥后前期 (通常为 1 周) 降低田面水中 NH₄⁺-N 的浓度, 降低前期的氨挥发, 随着水稻和

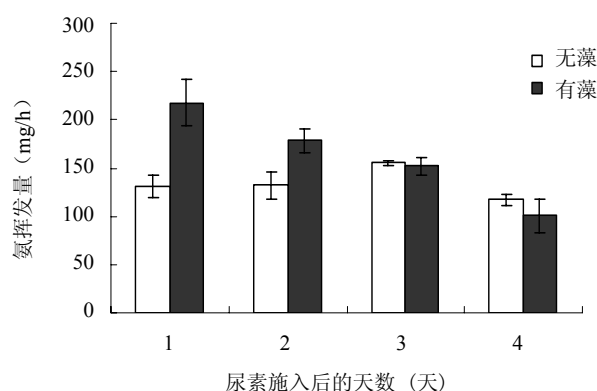


图 1 乌栅土尿素施入后藻类培养对氨挥发量的影响

Fig. 1 Algae effect on amount of ammonia volatilization after urea applied in Wushan soil

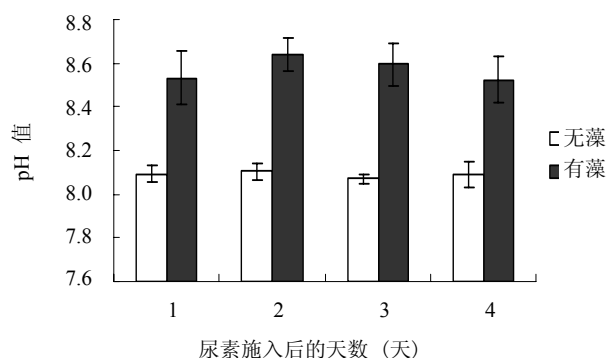


图 2 乌栅土尿素施入后藻类培养对表层水 pH 的影响

Fig. 2 Algae effect on floodwater pH after urea applied in Wushan soil

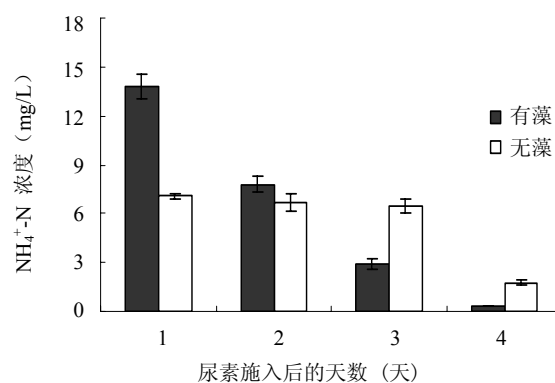


图 3 乌栅土尿素施入后藻类培养对表层水 NH₄⁺-N 含量的影响

Fig. 3 Algae effect on floodwater NH₄⁺-N content after urea applied in Wushan soil

藻类对 N 素的吸收利用, NH₄⁺-N 的浓度会进一步降低, 从而减少后期氨挥发损失, 这样既可以减少氨挥发损失, 也不必用杀藻剂去除稻田藻类, 可以充分发挥藻类在稻田生态系统中的作用。降低施肥

后田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的措施很多。Vlek 等人^[16] 研究发现,用脲酶抑制剂 PPD 可以有效地抑制尿素向水合氨的转变,于是提供了水稻和藻类与大气竞争作为 N 汇的机会,从而降低了氨挥发损失。另外,使用缓释尿素同样也可以达到降低氨挥发损失的目的^[50-51]。同时,使用控释尿素还可以有效地提高 N 肥利用率,提高作物产量^[52-53]。

在田面水表面喷洒抑氨膜以减少氨挥发损失^[54-58],是我们进行了二十多年的一项研究工作。目前,在试验中使用的抑氨膜为一种特制的液体乳剂,由高碳醇和一些水溶性高分子化合物,通过乳化作用而成,喷洒于稻田后,在水表面上迅速扩散并形成一层紧密稳定的液态分子膜。试验表明,该膜抑制氨挥发的作用一是简单的物理抑制;二是通过抑制稻田藻类前期的迅速生长,降低了日间田面水 pH 的增高,从而降低氨挥发的损失。在达到保肥、保水、保温的作用后,该膜逐渐地自然降解,作为植物和土壤的营养成分进入田面水和土壤中,不会带来二次污染,同时也不会影响藻类中后期的生长,可以发挥藻类的有益作用。该技术已经获得了两项国家发明专利和一项实用新型专利^[59-61],在已进行的示范性的大田实验和局部推广试验中,获得了很好的结果。

4 结论与建议

在今后的几十年中,中国的人口数量还将继续增加,我国人口增长与粮食需求的矛盾日益突出,为了缓解这一矛盾,就必须不断增加化肥施用量以维持高的生产力。随着稻田化肥施用量的不断增加,稻田藻类大量繁殖已经成为普遍现象,在关注由其引起的氨挥发损失的同时,也不能忽视其对稻田生态系统的重要作用。由于稻田藻类对氨挥发过程影响的特点是前期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高,氨挥发量大;后期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度低,氨挥发损失降低,因此,可以结合使用脲酶抑制剂或者缓释尿素,降低尿素水解的速率,降低前期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,从而减少氨挥发损失。另外也可以使用抑氨膜抑制前期藻类的生长,也可以达到降低氨挥发损失的目的。这样既可以减少由藻类引起的氨挥发损失,也可以发挥藻类在稻田生态系统中的重要作用。

参考文献:

[1] 张福锁. 养分资源利用的问题及其研究重点//李春俭

主编. 土壤与植物营养研究新动态. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 12-20

- [2] De PK. The problem of the nitrogen supply of rice. I. Fixation of nitrogen in the rice soils under waterlogged condition. *Indian J. Agric. Sci.*, 1936, 6:1237-1246
- [3] De PK. The role of blue-green algae in nitrogen fixation in rice fields. *Proc. R. Soc. London Ser. B.*, 1939, 127: 121-139
- [4] De PK, Mandal LN. Fixation of nitrogen by algae in rice soils. *Soil Science*, 1956, 81: 453-458
- [5] Stewart WDP, Fitzgerald GP, Burns RH. Acetylene reduction by nitrogen-fixing blue-green algae. *Arch Microbiol.*, 1968, 62: 336-348
- [6] Conway GR, Pretty JN. Fertiliser risks in the developing countries. *Nature*, 1988, 334: 207-208
- [7] Bowmer KH, Muirhead WA. Inhibition of algal photosynthesis to control pH and reduce ammonia volatilization from flooded rice. *Fertilizer Research*, 1987, 13: 13-29
- [8] Thind HS, Rowell DL. Transformations of nitrogen-15-labelled urea in a flooded soil as affected by floodwater algae and green manure in a growth chamber. *Biol. Fertil. Soils*, 2000, 31: 53-59
- [9] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制—技术、理论及应用. *湖泊科学*, 2002, 14 (3): 273-282
- [10] 朱兆良, 邢光熹编著. 氮循环—维系地球生命生生不息的一个自然过程. 北京: 清华大学出版社, 2002: 92-95
- [11] Thind HS, Rowell DL. Effects of algae and fertilizer-nitrogen on pH, Eh and depth of aerobic soil in laboratory columns of a flooded sandy loam. *Biol. Fertil. Soils*, 1999, 28: 162-168
- [12] Mikkelsen DA, De Datta SK, Obcemea WN. Ammonia volatilization losses from flooded soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1978, 42: 725-730
- [13] Bowmer KH, Muirhead WA. Inhibition of algal photosynthesis to control pH and reduce ammonia volatilization from flooded rice. *Fertilizer Research*, 1987, 13: 13-29
- [14] Simpson GR, Muirhead WA, Bowmer KH, Cai GX, Freney GR. Control of gaseous nitrogen losses from urea applied to flooded rice soils. *Fertilizer Research*, 1988, 18: 31-47
- [15] Savant NK, James AF, McClellan GH. Effect of soil

- submergence on urea hydrolysis. *Soil Science*, 1985, 140: 81–88
- [16] Vlek PLG, Stumpe JM, Byrnes BH. Urease activity and inhibition in flooded soil systems. *Fertilizer Research*, 1980, 1: 191–202
- [17] Meyer ML, Bloom PR, Grava J. Transformations and losses of applied N-15-labelled ammonia in a flooded organic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 79–85
- [18] Sprent JI, Sprent P. Nitrogen fixing organisms: Pure and applied aspects. London: Chapman and Hall, 1990: 256
- [19] Yanni YG. The effect of cyanobacteria and Azolla on the performance labile, soluble and algal available phosphorus in agricultural soils. *J. Environ. Qual.*, 1992, 14: 341–348
- [20] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧. 太湖流域土壤肥力演变及原因分析. *土壤*, 2006, 38(1): 106–109
- [21] De PK, Sulaiman M. Fixation of nitrogen in rice soils by algae as influence by crop, CO₂ and inorganic substances. *Soil Science*, 1950, 70: 137–151
- [22] Fuller WH, Roger RN. Utilisation of the phosphorus of algal cells as measured by the Neubauer technique. *Soil Science*, 1952, 74: 417–429
- [23] Das SC, Mandal B, Mandal LN. Effect of growth and subsequent decomposition of blue-green algae on the transformation of iron and manganese in submerged soils. *Plant Soil*, 1991, 138: 75–84
- [24] Nekrasova KA, Aleksandrova IV. Participation of Collembola and earthworms in the transformation of algal organic matter. *Sov. Soil. Sci.*, 1982, 14: 31–39
- [25] Rao DLN, Burns RG. Use of blue-green algae and bryophyte biomass as a source of nitrogen for oilseed rape. *Biol. Fertil. Soils*, 1990, 10: 61–64
- [26] Reynaud PA, Roger PA. Seasonal variations of algal flora and of N₂-fixing activity in a waterlogged sandy soil. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 1981, 18: 9–27
- [27] Roger PA, Grant IF, Reddy PM, Watanabe I. The photosynthetic aquatic biomass in wetland rice fields and its effect on nitrogen dynamics // IRRI. Efficiency of Nitrogen Fertilizers for Rice. Manila, Philippines, 1987: 43–68
- [28] Mehta VB, Vaidya BS. Cellular and extracellular polysaccharides of the blue-green alga Nostoc. *J. Exp. Bot.*, 1987, 29: 1423–1430
- [29] Bertocchi C, Navarini L, Cesaro A, Anastasio M. Polysaccharides from cyanobacteria. *Carbohydr Polym*, 1990, 12: 127–153
- [30] Li ZX, Cai CF, Shi ZH. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 129–136
- [31] Roger SL, Burns RG. Changes in aggregate stability, nutrient status, indigenous microbial populations and seedling emergence following inoculation of soil with Nostoc muscorum. *Biol. Fertil. Soils*, 1994, 18: 209–215
- [32] Schulten JA. Soil aggregation by cryptogams of a sand prairie. *Am. J. Bot.*, 1985, 72: 1657–1661
- [33] Saha KC, Panigrahi BC, Singh PK. Blue-green algae or Azolla addition on the nitrogen and phosphorus availability and redox potential of a flooded rice soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1982, 14: 23–26
- [34] Roychoudhury P, Kaushik BD. Solubilization of Mussoorie rock phosphates by cyanobacteria. *Curr. Sci.*, 1989, 58: 569–570
- [35] Brown F, Cuthbertson WFJ, Fogg GE. Vitamin B₁₂ activity of *Chlorella vulgaris* Beij and *Anabaena cylindrica* Lemm. *Nature*, 1956, 177: 188
- [36] Kopteva ZHP. Biosynthesis of thiamine, riboflavin and vitamin B₁₂ by some blue-green algae. *Mikrobiol Zh (Kiev)*, 1970, 32: 429–433
- [37] Shukla AC, Gupta AB. Influence of algae growth-promoting substance on growth, yield and protein contents of rice plants. *Nature*, 1967, 213: 744
- [38] Singh VP, Trehan T. Effect of extracellular products of *Aulosira fertilissima* on the growth of rice seedlings. *Plant Soil*, 1973, 38: 457–464
- [39] Rodgers GA, Bergman B, Henriksson E, Udris M. Utilization of blue-green algae as biofertilizers. *Plant Soil*, 1979, 52: 99–107
- [40] Ahmad MR, Winter A. Studies on the hormonal relationships of algae in pure culture. I. The effect of indole-3-acetic acid on the growth of blue-green algae. *Planta*, 1968, 78: 277–286
- [41] Mahasneh IA, Tiwari DN. The use of biofertilizer of *Calothrix* sp. M103, enhanced by addition of Fe and siderophore production. *J. Appl. Bacteriol.*, 1992, 73: 286–289
- [42] Grieco E, Desrochers R. Production de vitamine B₁₂ par une algue bleue. *Can. J. Microbiol.*, 1978, 24: 1562–1566

- [43] Watanabe A. Production in culture solution of some amino acids by the atmospheric nitrogen fixing blue-green algae. *Arch. Biochem. Biophys.*, 1951, 34: 50
- [44] Vorontsova GV, Romanova NI, Postnova TI, Selyakh IO, Gusev MV. Biostimulating effect of cyanobacteria and ways to increase it. Use of mutants –superproducers of amino acids. *Moscow. Univ. Biol. Sci. Bull.*, 1988, 43: 14–19
- [45] Metting B, Pyne JW. Biologically-active compounds from microalgae. *Enzyme. Microbial Technol.*, 1986, 8: 386–394
- [46] Muirhead WA, De Datta SK, Roger PA, Gusto RM. Effect of algicides on urea fertilizer efficiency in transplanted rice. 1. Flooded water chemistry and biota. *Fertilizer Research*, 1989, 21: 95–107
- [47] 曹志洪, 林先贵, 胡正义. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义. *土壤学报*, 2006, 43 (2): 256–260
- [48] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 朱兆良, 石孝均. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响. *土壤*, 2006, 38 (3): 263–269
- [49] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 杨林章, 周健民. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究. *土壤学报*, 2004, 42 (2): 265–269
- [50] Vlek PLG, Craswell ET. Effect of nitrogen source and management on ammonia volatilization losses from flooded rice-soil systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, 43: 352–358
- [51] Savant NK, De Datta SK. Nitrogen transformations in wetland rice soils. *Adv. Agron.*, 1982, 35: 241–302
- [52] Li JY, Hua QX, Tan JF, Zhou JM, Hou YL. Mineral coated fertilizer effect on nitrogen-use efficiency and yield of wheat. *Pedosphere*, 2005, 15 (4): 526–531
- [53] 宋付朋, 张民, 史衍玺, 胡莹莹. 控释氮肥的氮素释放特征及其对水稻的增产效应. *土壤学报*, 2005, 42 (4): 614–627
- [54] Cai GX, Freney JR, Humphreys E, Denmead OT, Samson M, Simpson JR. Use of Surface Films to Reduce Ammonia Volatilization from Flooded Rice Fields. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1987, 39: 177–186
- [55] 杨震, 朱兆良, 蔡贵信, 张宇. 表面成膜物质抑制水稻田中氨挥发的研究. *土壤学报*, 1995, 32 (增刊): 160–166
- [56] 尹斌, 沈仁芳, 朱兆良. 农田施氮对环境的影响和有效施氮的措施. *南京大学学报*, 1997, 33(专辑): 265–267
- [57] Yin B, Shen RF, Zhu ZL. Use of new water soluble surface film-forming material to reduce ammonia loss from water solution. *Pedosphere*, 1996, 6(4): 329–334
- [58] Zhuang S, Yin B, Zhu ZL. Model estimation of volatilization of ammonia applied with surface film-forming material. *Pedosphere*, 1999, 9 (4): 299–304
- [59] 尹斌. 混合反应器: 中国, ZL 99 2 30162.9. 2000–08–26
- [60] 尹斌, 朱兆良, 杨震, 蔡贵信, 沈仁芳, 彭光浩. 稻田抑氨膜: 中国, ZL 99 1 14589.5. 2004–08–25
- [61] 尹斌. 稻田抑氨膜的生产工艺: 中国, ZL 99 1 14590.9. 2005–01–26

Algae Function in Paddy Field Ecosystem and Its Effect on Reducing Ammonia Volatilization from Paddy Fields

ZHANG Qi-ming^{1,2}, TIE Wen-xia^{1,2}, YIN Bin¹, HE Fa-yun¹, ZHU Zhao-liang¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on comprehensive and systematical analysis of the research achievements of algae in paddy field and the results of our own greenhouse pot experiment, algae effect on the process of ammonia volatilization and algae function in nitrogen transforming, supplying and modulating in paddy field were elaborated in detail in this paper, and reasonable measures to reduce ammonia volatilization and utilize algae were also put forward.

Key words: Algae, Paddy field, Urea, Ammonia volatilization