

施氮水平对水稻氮肥利用率和径流负荷的影响^①

曹彦圣, 付子轼, 孙会峰, 陈桂发, 周 胜*, 宋祥甫

(上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403)

摘要: 氮肥的过量施用导致显著的氮素损失, 降低了环境质量。减少氮肥投入使其与作物需求相匹配对于保持农业生产的可持续发展具有至关重要的作用。为了评估不同施氮水平对水稻生产过程中的氮肥利用率和径流负荷的影响, 利用长期实验基地开展了相关研究, 实验共设置了 4 个施氮水平, 即 0、100、200 和 300 kg/hm²。结果显示, 随着施氮量的增加, 粮食产量显著提高, 而农学效率和偏肥生产力却呈相反趋势。作物地上部氮肥回收率则呈先增加后减少的趋势, 并在 200 kg/hm² 时达到峰值; 氮素径流损失随施氮量的增加而增加。

关键词: 施氮量; 水稻产量; 氮肥利用率; 地表径流

中图分类号: S19

20 世纪 80 年代以来, 随着我国居民生活水平的不断提高, 粮食需求逐年增加。为了满足不断增长的粮食需求, 我国政府过去一直鼓励农民增加氮肥投入^[1]。氮肥的大量投入显著增加了我国的粮食产量。但是, 不断增加的氮肥投入已经超过了作物的需求。例如, 在我国的一些主要粮食产区, 常规措施下典型两季作物体系氮肥年施用量高达 600 kg/hm²^[1-2]。但是, 在大田条件下, 只有 35% 甚至更少的氮肥可以被作物吸收利用^[2-3]。相当一部分氮肥通过不同途径损失至环境中, 造成了大气、水体和土壤环境质量的退化^[4-8]。在增加粮食产量下防止环境退化已经成为当前我国农业生产所面临的一个巨大挑战。为了应对这一挑战, 我们需要评估不同施氮水平对作物氮肥利用率和径流负荷的影响, 确定最佳施氮量, 以期同时增产增效。

华东地区是一个重要的粮食产区。冬小麦夏水稻轮作是这一地区最常见的轮作模式。为了确定水稻生产过程中的最佳施氮量, 本研究利用稻田长期实验基地, 设置 4 个施氮水平, 研究不同施氮水平条件下作物的氮肥利用率, 并采用氮素径流损失作为评价施氮量对环境影响的直接指标。

1 材料与方 法

1.1 试验站概况

田间试验在上海市庄行农业综合试验站内进行。站

内年平均气温为 15.8℃, 年平均降雨量为 1 178 mm。土壤类型为沟干泥(潴育型水稻土), 土质为黏壤土。0~20 cm 土壤的 pH 为 7.63, 土壤有机质含量 23.7 g/kg, 总氮含量 1.44 g/kg, 水解性氮含量 106 mg/kg, 总磷含量 0.82 g/kg, 有效磷含量 15.9 mg/kg, 速效钾含量为 159 mg/kg, CEC 为 17.5 cmol/kg。

1.2 试验设计和农业管理措施

研究采用长期定位试验, 从 2011 年开始, 试验周期为 50 年。本研究主要集中在 2013 和 2014 年两个水稻生育期。试验设置了 4 个处理, 分别为 N0(对照)、CF100、CF200 和 CF300。除了施氮量外, 各处理其余的管理措施均一致。每个处理重复 3 次, 采用完全随机区块设计, 共设置 12 个小区。小区长为 8.0 m, 宽为 7.0 m, 每两个小区间埋设防渗膜以防止侧渗。

稻秧移栽日期分别为 2013 年 6 月 18 日和 2014 年 6 月 19 日。小区水稻株行距为 20 cm × 25 cm。分别在 2013 年 10 月 30 日和 2014 年 10 月 31 日收获。处理 CF100、CF200 和 CF300 的氮肥(尿素)施用量分别为 100、200 和 300 kg/hm²。各处理磷肥(过磷酸钙)的施用量均为 100 kg/hm², 钾肥(氯化钾)的施用量均为 225 kg/hm²。氮肥分 3 次施用, 基肥占 50%, 分蘖肥占 30%, 穗肥占 20%。磷肥仅作为基肥施用。钾肥分两次施用, 基肥占 44%, 穗肥占 56%。基肥在稻秧移栽当日均匀混入表层土壤, 在 2013 年 6 月 29

基金项目: 上海市科委基础研究重点项目(12JC1407900)和上海市农委科技兴农推广项目[沪农科推字(2013)第 1-1 号]资助。

* 通讯作者(zhous@263.net)

作者简介: 曹彦圣(1981—), 男, 山西应县人, 博士, 主要从事土壤氮循环研究。E-mail: huda_128@163.com

日和 2014 年 6 月 30 日表施分蘖肥, 在 2013 年 7 月 29 日和 2014 年 7 月 30 日表施穗肥。各处理杀虫剂和除草剂等农药的施用均一致。除了分蘖末期排水烤田和季末排水外, 田面水基本维持在 5 cm 的深度。

1.3 植株样品的采集和分析

在作物成熟后, 采集作物的地上部。脱粒、称重。分取部分样品在 80°C 下烘干、称重。分取部分烘干样品, 粉碎, 利用元素分析仪测定总氮含量。作物氮肥利用率指标分为地上部氮肥回收率(RE)、农学效率(AE)和偏肥生产力(PFP), 按如下公式计算^[9]:

$$RE = \frac{U - U_0}{F} \times 100\% \quad (1)$$

$$AE = \frac{Y - Y_0}{F} \times 100\% \quad (2)$$

$$PFP = \frac{Y}{F} \times 100\% \quad (3)$$

式中: U 和 U_0 分别指收获时施氮和对照小区作物地上部氮素吸收量(kg/hm²); F 指氮肥施用量(kg/hm²); Y 和 Y_0 分别指施氮和对照小区水稻产量(kg/hm²)。

1.4 地表径流的收集和分析

在开展长期试验之前, 我们在小区安装了径流收集口, 并安装了地下管道, 用于把产生的径流排至收集池。每次径流产生后, 记录径流量, 收集径流样品。利用离子色谱测定径流中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的含量, 利用碱式过硫酸钾紫外分光光度法测定径流中总氮

的含量。径流量为小区(面积为 56 m²)径流总量。氮素径流损失量为径流量与径流中氮素浓度的乘积。

2 结果与分析

2.1 水稻产量与氮肥利用率

如表 1 所示, 氮肥施用显著影响作物地上部的生物量。2013 年稻季, 施用氮肥使秸秆和籽粒的产量分别增加 39%~88% 和 76%~157%。2014 年稻季, 氮肥的增产效应更为明显, 与不施氮的对照相比, 施氮处理秸秆和籽粒分别增产 71%~118% 和 80%~180%。而且, 在这两个稻季, 秸秆和籽粒的生物量均随施氮量的增加而增加。然而, 农学效率和偏肥生产力却呈完全相反的趋势。农学效率用以表征氮肥的增产效应, 而偏肥生产力是一个反映体系内各氮源总产出的指标^[10-11]。降低的农学效率和偏肥生产力表明氮肥收益随施氮量的增加而减少。这表明, 进一步增加氮肥投入并不能有效增加粮食产量。究其原因可能与华东地区土壤氮素肥力较高有关。在最近十几年, 当地氮肥投入一直高于作物氮素需求。通过大气沉降和灌溉输入作物体系的氮素也维持在较高的水平。例如, Ju 等^[1]发现, 这部分氮素每年可能高达 89 kg/hm²。在氮素供应充足的条件下, 氮素以外的其他因素可能已成为了产量限制因子^[12]。这也表明, 不能通过继续增加氮肥投入来提高粮食产量。

表 1 2013 和 2014 年稻季作物地上部生物量及氮肥利用率
Table 1 Aboveground biomasses and N use efficiency in the 2013 and 2014 rice seasons

| 年份 | 处理 | 生物量 | | 氮肥利用率 | | |
|------|-------|------------------------|------------------------|---------------|----------------|---------------|
| | | 秸秆(t/hm ²) | 籽粒(t/hm ²) | 氮肥回收率(%) | 农学效率(kg/kg) | 偏生产力(kg/kg) |
| 2013 | N0 | 5.02 ± 0.14 d | 3.46 ± 0.09 d | — | — | — |
| | CF100 | 6.98 ± 0.01 c | 6.09 ± 0.14 c | 28.0 ± 1.10 a | 26.3 ± 1.45 a | 60.9 ± 1.45 a |
| | CF200 | 8.75 ± 0.16 b | 7.88 ± 0.22 b | 33.3 ± 1.39 a | 22.1 ± 1.12 ab | 39.4 ± 1.12 b |
| | CF300 | 9.42 ± 0.18 a | 8.89 ± 0.35 a | 28.6 ± 4.16 a | 18.1 ± 1.17 b | 29.6 ± 1.17 c |
| 2014 | N0 | 4.67 ± 0.27 d | 2.93 ± 0.17 d | — | — | — |
| | CF100 | 8.00 ± 0.12 c | 5.27 ± 0.21 c | 33.0 ± 3.87 a | 23.4 ± 2.21 a | 52.7 ± 2.11 a |
| | CF200 | 9.90 ± 0.03 b | 6.81 ± 0.24 b | 38.1 ± 1.34 a | 19.4 ± 1.18 ab | 34.1 ± 1.18 b |
| | CF300 | 10.2 ± 0.09 a | 8.19 ± 0.45 a | 36.4 ± 3.09 a | 17.5 ± 1.48 b | 27.3 ± 1.48 c |

注: 数据表示为均值 ± 标准误差。同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下表同。

当施氮量从 100 kg/hm² 增加至 300 kg/hm² 时, 作物地上部氮肥回收率呈先增加后减少的趋势, 施氮量为 200 kg/hm² 时出现最大值。本研究的结果与 Qiao 等^[10]的研究结果基本一致。他们发现, 施氮量为 232~257 kg/hm² 时, 水稻产量最高, 为了提高氮肥利用率减少氮素损失, 应该在此基础上削减施氮量。Ju 等^[1]

也认为, 这一地区稻季最适施氮量可以减少至 200 kg/hm²。

2.2 地表径流

2013 和 2014 年稻季, 降雨分别引起了 3 次和 6 次地表径流(图 1)。2013 年, 单次地表径流量介于 1 067~10 967 L; 2014 年, 单次地表径流量介于 100~5 500 L。

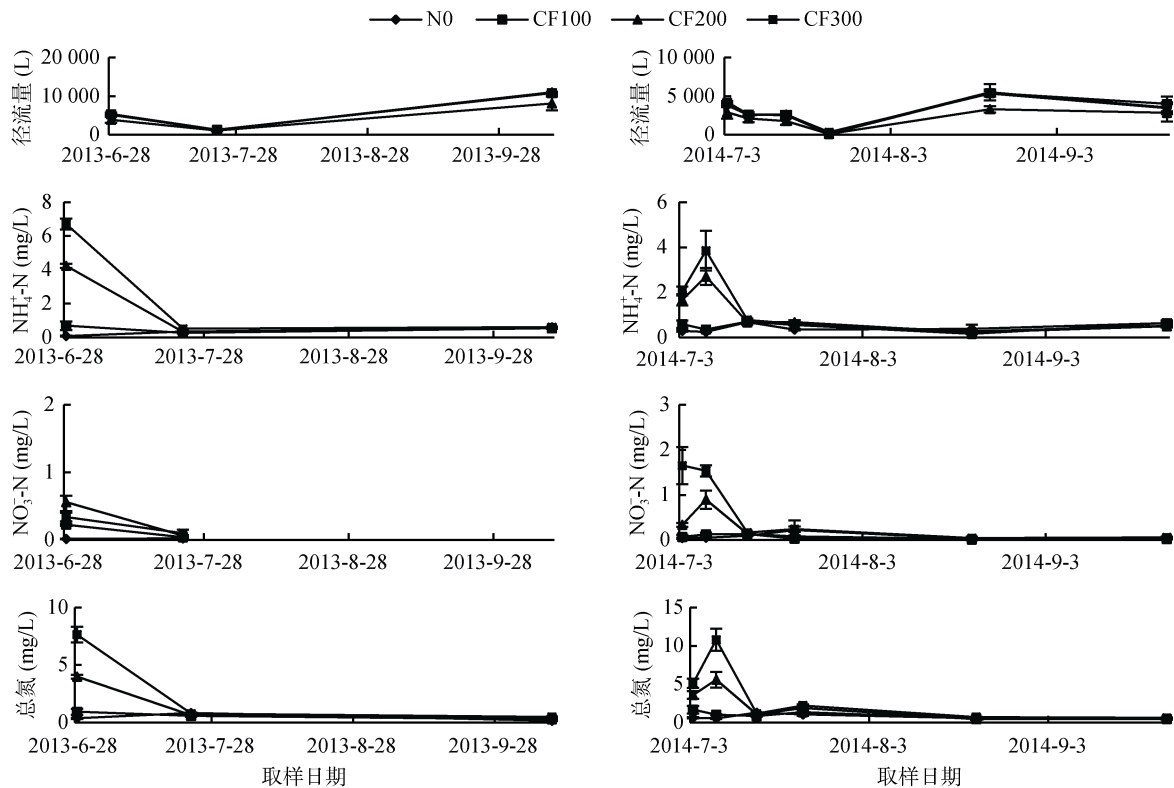


图 1 2013(左)和 2014(右)年稻季地表径流量及径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和总氮含量

Fig. 1 Amount of drainage and the concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and total N in surface runoff in the 2013 (left) and 2014 (right) rice seasons

2013 年的第一次径流及 2014 年的第一次和第二次径流均发生在氮肥施用后不久。这几次径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和总氮的浓度均显著较高(图 1)。Gao 等^[13]在氮肥施用后不久产生的径流中也观测到较高浓度的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。与这几次径流相比,在这两个稻季的其余几次径流中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和总氮的浓度均较低。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度一般不足 1 mg/L,而总氮一般低于 2 mg/L。2013 年的第一次及 2014 年的第一次和第二次径流中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和总氮的浓度一般按照 CF300、CF200、CF100 和 N0 的顺序逐渐降低。在其余几次径流中,各处理间一般不存在显著差异。Eghball 等^[14]观测到了类似

的结果。他们的研究结果显示,长期施肥并不影响径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量,但是在施肥后不久产生径流时,径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度将随施氮量的增加而增加^[14]。径流中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度一直维持在较低的水平。而且,各处理间 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的差异几乎可以忽略。径流中的氮素主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式存在。

2013 和 2014 年稻季氮素径流损失列于表 2。氮素径流损失取决于两个因素:径流量与径流中氮素的浓度^[15]。在 2013 和 2014 年水稻生育初期,径流量较大且径流中氮素浓度较高,从而导致了较高的径流损失,这与以前的研究结果一致^[16-17]。这些研究显

表 2 2013 和 2014 年稻季氮素径流损失
Table 2 N runoff losses in the 2013 and 2014 rice seasons

| 年份 | 处理 | 氮素径流损失 | | | 氮素损失占的比例 (%) |
|------|-------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|---------------|
| | | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (kg/hm ²) | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (kg/hm ²) | 总氮(kg/hm ²) | |
| 2013 | N0 | 0.51 ± 0.39 | 0.02 ± 0.01 c | 0.83 ± 0.06 d | — |
| | CF100 | 1.76 ± 0.28 c | 0.22 ± 0.01 b | 1.53 ± 0.34 c | 1.53 ± 0.34 b |
| | CF200 | 3.86 ± 0.83 b | 0.42 ± 0.16 a | 3.33 ± 0.59 b | 1.67 ± 0.30 b |
| | CF300 | 7.62 ± 0.71 a | 0.34 ± 0.07 a | 8.27 ± 0.82 a | 2.76 ± 0.27 a |
| 2014 | N0 | 1.37a ± 0.04 c | 0.04 ± 0.03 c | 2.08 ± 0.07 d | — |
| | CF100 | 1.55a ± 0.32 bc | 0.18 ± 0.06 c | 2.89 ± 0.54 c | 2.89 ± 0.54 a |
| | CF200 | 2.50a ± 0.71 b | 0.58 ± 0.22 b | 4.74 ± 1.16 b | 2.37 ± 0.58 a |
| | CF300 | 4.25b ± 0.42 a | 2.10 ± 0.28 a | 10.7 ± 1.44 a | 3.55 ± 0.48 a |

示,氮肥施用后不久产生的高于正常量的降雨可能引起显著的径流损失。2013 和 2014 年稻季施氮处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和总氮径流损失分别介于 1.55 ~ 7.62 kg/hm^2 和 1.53 ~ 10.7 kg/hm^2 (表 2),这与以前报道的结果相近^[18]。Zhang 等人^[18]测定了华东地区嘉兴、永康和余杭 3 地稻田的氮素径流损失,结果显示,常规措施下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 径流损失介于 1.30 ~ 1.99 kg/hm^2 ,总氮介于 2.46 ~ 7.98 kg/hm^2 。氮素径流损失随施氮量的增加而增加。管理措施是影响氮素径流损失的主要因素^[19]。氮肥施用水平影响田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,从而可能影响氮素径流损失^[17, 20]。

2.3 经济效益最佳施氮量

对本研究及本地区其他关于施氮量和粮食产量的研究进行综合分析^[21],结果显示,水稻产量与施氮量密切相关(图 2)。对数据进行曲线拟合,可得出粮食产量(Y)随施氮量(N)变化的方程为:

$$Y = -0.045N^2 + 24.835N + 4429.831 \quad (4)$$

如果水稻的价格以 2.5 元/kg 计,化肥的价格以氮 5.4 元/kg 计,假设环境成本等同于施肥成本,那么水稻生产的边际收益(B)和边际成本(C)分别为:

$$B = (-0.09N + 24.835) \times 2.5 \quad (5)$$

$$C = 10.8 \quad (6)$$

当边际收益和边际成本相等时,水稻生产的经济效益最高。此时的施氮量为 228 kg/hm^2 ,粮食产量为 7 753 kg/hm^2 。

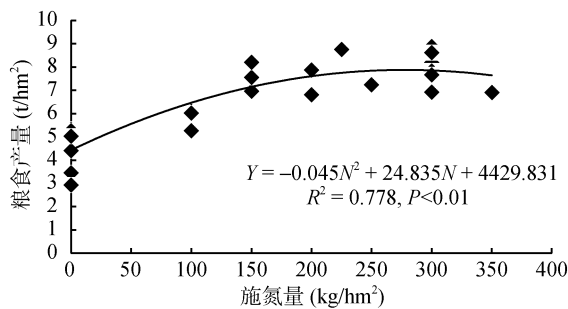


图 2 华东地区施氮量与粮食产量的相关性

Fig. 2 Relationship between N application rate and grain yield in East China

3 结论

优化施氮量以同时增产增效在保持我国农业生产的可持续发展方面起着至关重要的作用。本研究的目的在于评估不同施氮水平对水稻的氮肥利用率和径流负荷的影响,确定最佳施氮量。结果表明,水稻产量随施氮量的增加而增加,而农学效率和偏肥生产力却呈逐渐下降的趋势。水稻地上部氮肥回收率在施氮量从 100 增加至 300 kg/hm^2 时呈先增加后减少

的趋势,并在 200 kg/hm^2 时达到峰值。氮素径流损失随施氮量的增加而增加。对本研究和本地区其他研究进行综合分析,可以得出,在华东地区,施氮量为 228 kg/hm^2 时经济效益最佳。

参考文献:

- [1] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(9): 3 041-3 046
- [2] Zhu Z, Chen D. Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2/3): 117-127
- [3] Raun W R, Johnson G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(3): 357-363
- [4] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. Science, 2009, 324(5 934): 1 519-1 520
- [5] Guo J, Liu X, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5 968): 1 008-1 010
- [6] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7 438): 459-462
- [7] 敖玉琴, 张维, 田玉华, 等. 脲胺氮肥对太湖地区稻田氮挥发及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2): 248-253
- [8] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氮挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1 027-1 033
- [9] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 132-140
- [10] Qiao J, Yang L, Yan T, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 146(1): 103-112
- [11] Cassman K, Peng S, Olk D, et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. Field Crops Research, 1998, 56(1/2): 7-39
- [12] Krauss A, Isherwood K, Heffer P. Fertilizer best management practices[M]. France: International Fertilizer Industry Association, 2007
- [13] Gao C, Zhu J, Zhu J, et al. Nitrogen export from an agriculture watershed in the Taihu Lake area, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2): 199-207
- [14] Eghball B, Gilley J E, Baltensperger D D, et al. Long-term manure and fertilizer application effects on phosphorus and nitrogen in runoff[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(3): 687-694

- [15] Randall G W, Mulla D J. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 337–344
- [16] Karlen D L, Dinnes D L, Jaynes D B, et al. Corn response to late-spring nitrogen management in the Walnut Creek watershed [J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(4): 1 054–1 061
- [17] Kim J S, Oh S Y, Oh K Y. Nutrient runoff from a Korean rice paddy watershed during multiple storm events in the growing season[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1): 128–139
- [18] Zhang Z J, Yao J X, Wang Z D, et al. Improving water management practices to reduce nutrient export from rice paddy fields[J]. *Environmental Technology*, 2011, 32(2): 197–209
- [19] Delgado J. Quantifying the loss mechanisms of nitrogen[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6): 389–398
- [20] Cao Y, Tian Y, Yin B, et al. Assessment of ammonia volatilization from paddy fields under crop management practices aimed to increase grain yield and N efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2013, 147: 23–31
- [21] Xia Y, Yan X. Ecologically optimal nitrogen application rates for rice cropping in the Taihu Lake region of China[J]. *Sustainability Science*, 2012, 7(1): 33–44

Effects of N Application Rates on N Use Efficiency by Rice and N Runoff Loss

CAO Yansheng, FU Zishi, SUN Huifeng, CHEN Guifa, ZHOU Sheng*, SONG Xiangfu

(*Eco-Environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China*)

Abstract: Over-application of N fertilizers resulted in significant N loss and degradation in environmental quality. Reducing N inputs and increasing N use efficiency are crucial for the sustainable development of agricultural production. A long-term field experiment was conducted to investigate the effects of N application rates on N use efficiency by rice plants and N runoff loss. There are four N application rates, i.e. 0, 100, 200, and 300 kg/hm². The results showed that rice yields increased significantly with increasing N inputs, while N use efficiency as agronomic efficiency and partial fertilizer productivity followed the opposite trend. N recovery efficiency increased first and then decreased from 100 kg/hm² to 300 kg/hm² and reached the peak at 200 kg/hm². N losses through runoff increased with increasing N inputs.

Key words: N application rate; Rice yield; N use efficiency; Surface runoff