

控释氮肥对洞庭湖区双季稻田表面水氮素动态及其径流损失的影响*

纪雄辉^{1,2} 郑圣先^{1,2**} 鲁艳红^{1,2} 廖育林^{1,2}

(¹ 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; ² 农业部望城红壤水稻土生态环境重点野外观测试验站, 长沙 410125)

摘要 用渗漏池模拟洞庭湖区 2 种主要稻田土壤(河沙泥和紫潮泥),研究了施用尿素(CF)和控释氮肥(CRNF)对双季稻田表面水 pH、电导率(EC)、全氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)浓度变化规律及 TN 径流损失的影响。结果表明,双季稻田施用尿素后,表面水 TN、NH₄⁺-N 浓度分别在第 1、3 天达到高峰,然后迅速下降;NO₃⁻-N 浓度普遍很低;早稻表面水 pH 在施用尿素后 15 d 内(晚稻 3 d)逐渐升高;EC 与 NH₄⁺ 动态变化一致。与尿素相比,施用 CRNF 能显著降低双季稻田表面水 pH、EC、TN 和 NH₄⁺-N 浓度,70% N 控释氮肥的控制效果最显著;但后期 NO₃⁻-N 浓度略有升高。径流监测结果表明,洞庭湖区种植双季稻期间施用尿素的 TN 径流损失为 7.70 kg·hm⁻²,占施氮量的 2.57%。施肥后 20 d 内发生的径流事件对双季稻田 TN 径流损失的贡献极为显著;与施用尿素相比,施用控释氮肥显著降低了施肥后 10 d 内发生的第 1 次径流液中的 TN 浓度,施用 CRNF 和 70% N CRNF 的氮素径流损失分别降低 24.5% 和 27.2%。

关键词 控释氮肥 双季稻田 表面水 氮素 径流损失

文章编号 1001-9332(2007)07-1432-09 中图分类号 S143.1+5, S19 文献标识码 A

Effects of controlled release nitrogen fertilizer on surface water N dynamics and its runoff loss in double cropping paddy fields in Dongtinghu Lake area. JI Xiong-hui^{1,2}, ZHENG Sheng-xian^{1,2}, LU Yan-hong^{1,2}, LIAO Yu-lin^{1,2} (¹Human Institute of Soil & Fertilizer, Changsha 410125, China; ²Wangcheng Key Field Monitoring Experimental Station for Reddish Paddy Soil Eco-environment of Agriculture Ministry, Changsha 410125, China). *Chin. J. Appl. Ecol.* 2007, 18(7): 1432-1440.

Abstract: By using leakage pond to simulate the double cropping paddy fields in Dongtinghu Lake area, this paper studied the effects of urea (CF) and controlled release nitrogen fertilizer (CRNF) on the dynamics of surface water pH, electrical conductivity (EC), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH₄⁺-N) and nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) and the runoff loss of TN in alluvial sandy loamy paddy soil and purple calcareous clayed paddy soil, the two main paddy soils in this area. The results showed that after applying urea, the surface water TN and NH₄⁺-N concentrations reached the peak at the 1st and 3rd day, respectively, and decreased rapidly then. Surface water NO₃⁻-N concentration was very low, though it showed a little raise at the 3rd to 7th day after applying urea in purple calcareous clayed paddy soil. In early rice field, surface water pH rose gradually within 15 days after applying urea, while in late rice field, it did within 3 days. EC kept consistent with the dynamics of NH₄⁺-N. CRNF, especially 70% N CRNF, gave rise to distinctly lower surface water pH, EC, and TN and NH₄⁺-N concentrations within 15 days after application, but NO₃⁻ concentration rose slightly at late growth stages, compared with urea application. The monitoring of TN runoff loss indicated that during double cropping rice growth season, the loss amount of TN under urea application was 7.70 kg·hm⁻², accounting for 2.57% of applied urea-N. The two runoff events occurred within 20 days after urea application contributed significantly to the TN runoff loss. CRNF application resulted in a significantly lower TN concentration in runoff water from the 1st runoff event occurred within 10 days of its application, and thereafter, the total TN runoff loss

* 国家自然科学基金项目(30270770)、国家科技支撑计划项目(2006BAD05B09)和中加合作资助项目(HN-13)。

** 通讯作者。E-mail: sxzheng@ppi.caas.ac.cn

2006-06-27 收稿, 2007-04-09 接受。

for CRNF and 70% N CRNF application was decreased by 24.5% and 27.2%, respectively, compared with urea application.

Key words : controlled release nitrogen fertilizer ; double cropping paddy field ; surface water ; nitrogen ; runoff loss.

1 引 言

氮素径流损失作为水体富营养化的主要贡献者,是农业面源污染研究的重要内容^[2,10,22]。随着农业生产水平的提高,因农业土地利用引起的面源污染已成为影响水体的主要因子,其中施肥等因素对污染物迁移的影响已引起关注^[10,14]。地表径流水中的 NH_4^+ 浓度和地下水 NO_3^- 污染的增加与集约化生产中的氮肥用量增加有关^[1,5,13]。水稻 (*Oryza sativa* L.) 是我国南方主要种植作物之一。有研究表明,稻田泡田弃水和地表径流所损失的氮分别相当于氮肥施用量 ($345 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 2.7% 和 5.7%^[22]。

我国氮肥利用率较低,有相当部分氮素因降雨径流而损失。以往提高水稻氮肥利用率的研究主要集中在氮肥用量、方法和时间等方面,然而,即使根据土壤类型、作物生长季节进行长期氮肥管理和合理灌溉,但由于降雨的不可预测性,控制氮素径流损失仍然很困难。控释氮肥是一种能够调节或控制养分释放的天然或半天然高分子材料包膜尿素肥料^[17]。与普通尿素相比,控释氮肥具有可采取一次性全量基施而满足作物全生育期对氮素的需求^[19]、并提高氮素利用率^[4,18]、减少氮挥发损失^[12,20]和反硝化损失^[7]等优点。然而,关于控释氮肥对稻田表面水氮素动态特征和地表径流损失的影响研究较少。

本文通过比较施用控释氮肥和尿素的双季稻田表面水 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 变化规律以及氮素径流损失,探讨了洞庭湖区双季稻田施用控释氮肥控制氮素径流损失的效果和机理,以期为南方双季稻田施肥管理和控制氮素面源污染提供理论指导。

2 材料与方 法

2.1 供试材料

试验于 2005 年在湖南省土壤肥料研究所网室

进行,利用渗漏池模拟稻田土壤。试验地点位于 $28^\circ 12'00''\text{N}$ 、 $113^\circ 04'38''\text{E}$,海拔 47 m,年平均降雨量 1 400 mm,降雨量主要集中在春季和夏季。年平均温度 16.8°C ,最高和最低月平均温度分别为 28.9°C (7 月)和 4.7°C (1 月)。供试土壤取自洞庭湖区由河流冲积物发育的河沙泥和湖积物发育的紫潮泥。两种水稻土的主要理化性状见表 1。

供试水稻品种(组合)为早稻湘早粳 31 号,株行距 $17 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 4 月 28 日插秧,7 月 10 日收割;晚稻威优 46,株行距 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,7 月 16 日插秧,10 月 18 日收割。

2.2 渗漏池的构建

2003 年春季在湖南省土壤肥料研究所网室共建立 32 个渗漏池。渗漏池规格 $166 \text{ cm} \times 120 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$ 。渗漏池壁涂覆一层防水漆和一层油基漆并粉刷成粗糙表面,阻止水分侧漏及沿土壤和池壁间隙下渗。渗漏池底部出水口装上 1 mm 不锈钢丝网,并覆盖砾石,以改善排水和防止细土冲入 15 mm PVC 外流管。外流管的斜度为 100:5,保证渗漏水流向收集容器。在渗漏池上部安装直径为 50 mm 的 PVC 管,并使其底部与土壤表面保持 5 cm 高度,超过 5 cm 高度的表面水被认为是可产生径流的部分,通过该管收集于密闭容器内。在渗漏池中按原始土壤剖面层次填装土壤。2004 年对渗漏池中的土壤先用灌溉水饱和、反复沉降,并人工模拟制作犁底层,放置 6 个月至 2005 年春季用于试验。

2.3 试验设计

试验设置 4 个处理:1)对照(CK),不施肥料;2)施用化肥(CF);3)施用等氮量的控释氮肥(CRNF);4)施用 70% N 控释氮肥(70% CRNF)。CF 和 CRNF 处理每季水稻的氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)用量分别为 150、75 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,70%

表 1 两种供试土壤的理化性状

Tab. 1 The physical and chemical properties of two test paddy soils

土壤类型 Soil types	pH	有机质 OM ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Avail. N ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Avail. P ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Avail. K ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	CEC ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	<0.01 mm 粘粒 <0.01 mm clay (%)
河沙泥 Alluvial sandy loamy	4.92	23.8	1.87	185.7	20.2	91	9.96	36.42
紫潮泥 Purple calcareous clayey	7.67	44.2	3.02	255.3	27.7	115	14.54	77.64

CRNF处理的氮用量为 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷、钾肥与CF处理相同. 上述肥料用量是按照当前洞庭湖水稻种植区施肥水平设计的^[3]. 供试肥料品种为尿素(46% N)、过磷酸钙(17.5% P_2O_5)、氯化钾(60% K_2O)和湖南兴湘科技开发有限公司复合肥厂生产的控释氮肥(42% N). 施肥处理的所有肥料均于早晚稻插秧前1 d施入, 并立即用铁齿耙耖入5 cm深的土层中. 试验随机区组排列, 重复4次. 在水稻整个生育期内, 稻田始终保持约3 cm的淹水状态, 其它管理措施与洞庭湖水稻种植区保持一致.

2.4 水样的采集

表面水样于施肥后第1天开始采集, 早稻采样时间为第1、3、7、15、30、50、70天; 晚稻采样时间为第1、3、7、15、30、55、90天. 表面水采样方法参照文献^[20]于当日9:00—10:00进行. 取表面水样时, 用小塑料瓢, 不扰动土层, 随机小心采集小区内5~6处的中上层表面水, 混合后装入塑料瓶. 2005年双季稻种植期间共发生了8次径流, 其中早稻6次, 晚稻2次. 降雨前将密闭的塑料容器连接径流水接受管, 收集降雨过程中产生的径流水, 塑料容器与径流水接受管连接处用塑料薄膜遮盖以防止雨水直接流入. 每次降雨事件后立即取样, 装入塑料瓶中并送实验室测定TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度.

2.5 项目测定

表面水和径流水pH和EC原位测定, 用便携式多功能测量仪(上海三信仪表厂, PD-501型)分别连

接pH复合电极和铂黑电极, 采集化验样品后(10:00)直接在每个小区及径流水收集桶中测定, 记录随机4~5处的平均值. 水样中TN采用凯氏法测定^[8]; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用靛酚蓝比色法^[8]测定; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用镉柱还原-酚二磺酸分光光度法测定(GB 5750-85(29)). 每次降雨事件的降雨量用雨量器(天津气象仪器厂, SDM6A型)测量.

3 结果与分析

3.1 稻田表面水pH、EC及氮素动态

3.1.1 pH 由图1可知, 施用化肥后, 表面水pH升高较快, 然后迅速下降, 早稻在30 d、晚稻在15 d后逐渐趋于稳定. pH达到峰值时, 河沙泥和紫潮泥的早稻表面水pH分别为8.87和8.42, 比施肥前分别提高了1.10($P < 0.01$)和0.33; 晚稻两种土壤分别为8.39和8.37, 比施肥前分别提高了0.62($P < 0.05$)和0.28.

施用控释氮肥的表面水pH动态与施用尿素基本相似. 达到峰值时, 控释肥处理的表面水pH明显低于CF处理, 与CF处理相比, 河沙泥早稻CRNF和70% CRNF处理分别下降了0.47($P = 0.05$)和0.67($P < 0.01$), 晚稻分别下降了0.60($P < 0.05$)和1.08($P < 0.01$); 紫潮泥施用控释肥的表面水pH与施用尿素处理差异较小.

施肥后稻田表面水pH变化是土壤和表面水中酸、碱性离子交换达到平衡的结果. 施用尿素后, 表

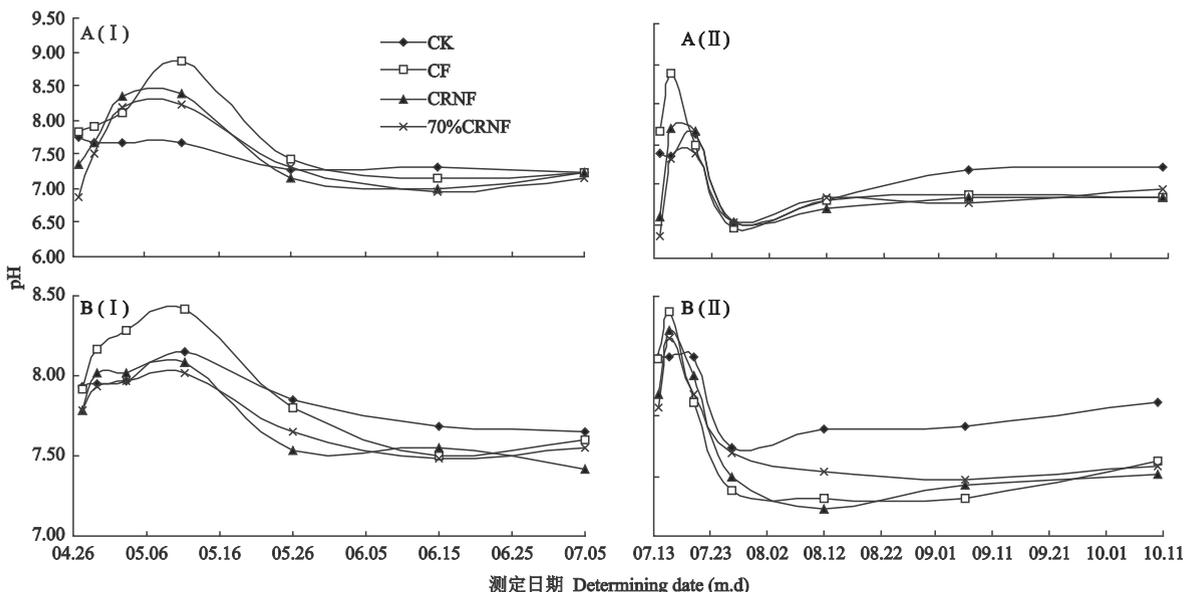


图1 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表面水pH动态

Fig. 1 Dynamics of surface water pH after applying urea and CRNF in paddy field of two cropping rice.

A: 河沙泥 Alluvial sandy loamy; B: 紫潮泥 Purple calcareous clayey. I: 早稻 Early rice; II: 晚稻 Late rice. 下同 The same below.

面水 pH 上升是尿素水解释放 OH^- 的缘故^[20], 而 CEC 及 $<0.01 \text{ mm}$ 粘粒比例低的河沙泥吸附能力弱, 施肥后表面水 pH 上升速度显著快于紫潮泥. 控释氮肥对氮素的控制释放, 降低了前期的 pH, 由于过磷酸钙中游离酸的作用, 其在施肥后第 1 天甚至低于不施肥处理. pH 的回落是由于氨挥发时接受水中的 OH^- 所致. 晚稻前期温度高, 尿素水解加快, 导致施肥后表面水 pH 迅速达到高峰, 但高温致使氨挥发显著增强^[19], 回落也快于早稻.

土壤淹水发生一系列反应, 包括铁锰还原反应、水解作用、交换作用、铁解作用等, O_2 、 Mn^{4+} 、 Fe^{3+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等离子态或(氢)氧化物被还原, 消耗介质中的氢离子, 导致 2~3 d 内 pH 升高, 10 d 后 pH 又急剧升高^[16]. 另外, 由于 CK 盐基离子补充少, 耕层土壤盐基离子淋洗而被 H^+ 取代^[9, 16], 导致表面水中 OH^- 增加, 水稻分蘖减少, 藻类繁殖快, 在水中光合作用消耗 CO_2 释放 OH^- , 造成其在水稻生长后期(约 50 d 后)高于所有施肥处理.

3.1.2 电导率(EC) 由图 2 可知, 所有施肥处理的表面水 EC 值在施肥后第 1~3 天达到高峰, 然后迅速下降, 至 30 d 后与 CK 接近. 达到峰值时, 与 CF 处理相比, 河沙泥早稻 CRNF 处理表面水 EC 降低了 $0.70 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ($P < 0.01$), 晚稻降低了 $0.62 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ($P < 0.01$); 紫潮泥早稻下降了 $0.40 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ($P < 0.05$), 晚稻下降了 $0.43 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ($P < 0.05$). 70% CRNF 处理的表面水 EC 峰值较 CRNF 略有下降.

EC 反映了溶液中盐基离子总量, 而控释肥和化肥处理的 P、K 肥施用量相同, 因此 CF 与 CRNF 处理的表面水 EC 差值反映了控释氮肥降低 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的效果. 对 CF 与 CRNF 处理在同一测定时间的表面水 EC 差值 ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, y) 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度差 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, x) 进行线性回归, 可得:

$$\text{河沙泥 } y = 0.0083x + 0.0372 \quad (r = 0.9465^{**}, n = 28) \quad (1)$$

$$\text{紫潮泥 } y = 0.0082x + 0.0531 \quad (r = 0.9002^{**}, n = 28) \quad (2)$$

可以看出, 2 种土壤的这两个参数均表现出极显著的线性相关, 且 b 值极为相近, 说明当其它离子相同时, 稻田表面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度与其 EC 呈极显著正相关.

3.1.3 总氮(TN) 施用尿素后表面水 TN 浓度在第 1 天即达到高峰(图 3), 然后迅速下降, 到第 15 天基本与 CK 接近. 河沙泥早稻施用尿素的表面水 TN 峰值 ($374.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 比紫潮泥 ($259.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 提高了 44.4% ($P < 0.01$), 但晚稻仅提高 12.8% ($P > 0.05$). 施肥后 15 d 内, 两个控释肥处理的表面水 TN 浓度均比 CK 明显提高, 却远低于 CF 处理, 15 d 后施用控释氮肥的 TN 浓度与尿素无明显差异. 达到峰值时, 与 CF 相比, 河沙泥早、晚稻 CRNF 的表面水 TN 浓度分别降低了 348.0 ($P < 0.01$) 和 275.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.01$); 紫潮泥早、晚稻分别降低了 241.5 ($P < 0.01$) 和 247.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.01$). 70% CRNF 处理的 TN 降低效果更为明显.

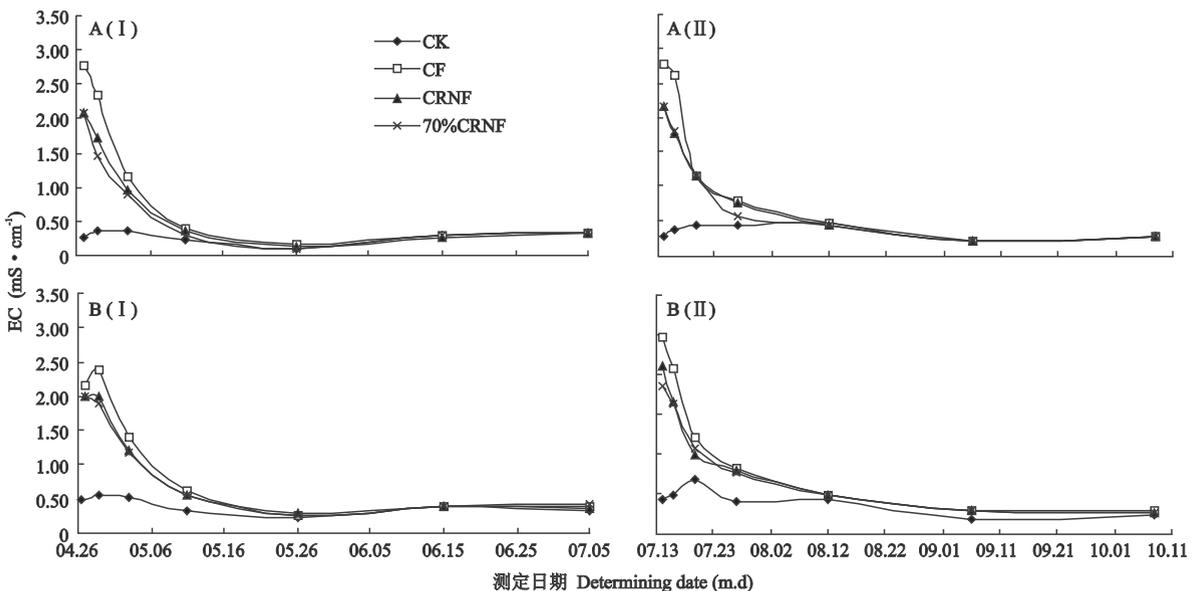


图 2 双季稻田施用尿素和控释氮肥的表面水 EC 的动态变化

Fig. 2 Dynamics of surface water EC after applying urea and CRNF in paddy field of two cropping rice.

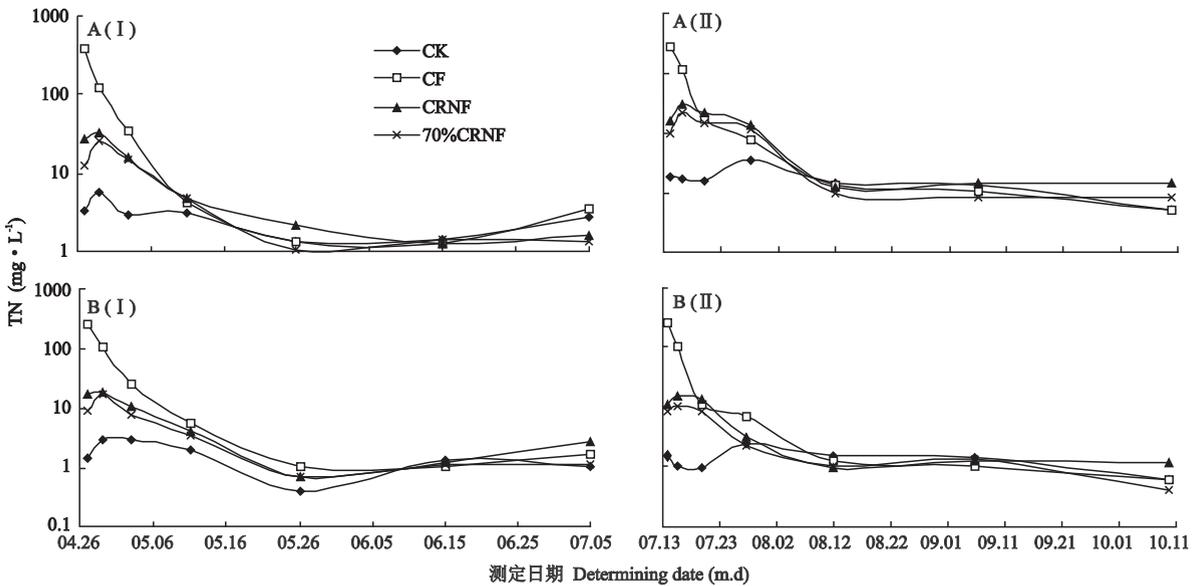


图3 双季稻田施用尿素和控释氮肥的表面水 TN 浓度的动态变化

Fig. 3 Dynamics of surface water TN concentrations after applying urea and CRNF in paddy field of two cropping rice.

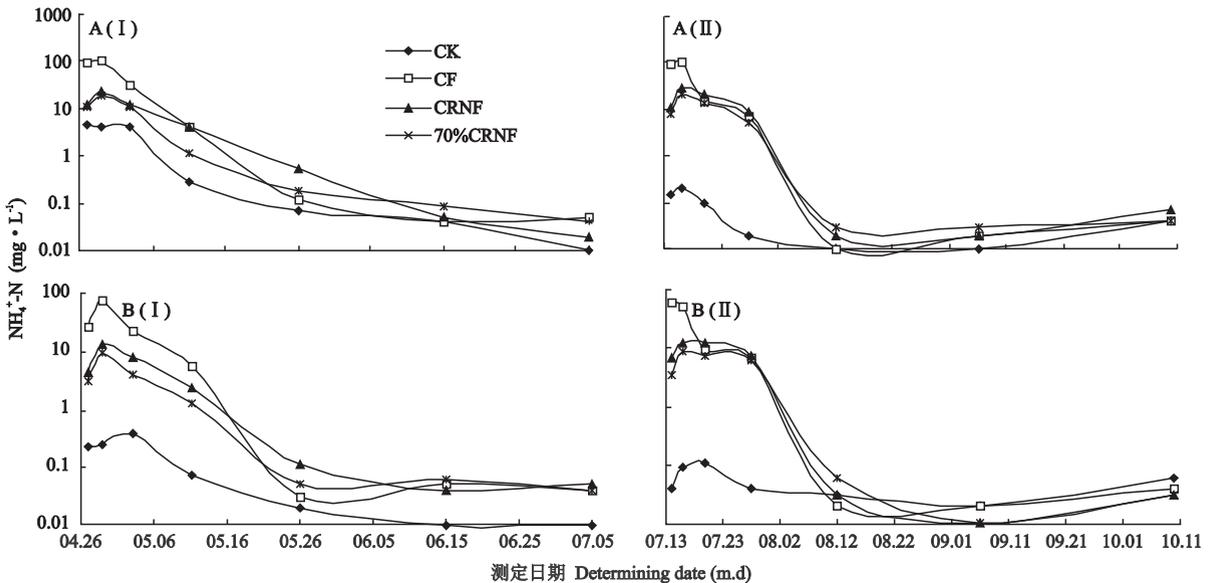


图4 双季稻田施用尿素和控释氮肥的表面水 NH_4^+ -N 浓度的动态变化

Fig. 4 Dynamics of surface water NH_4^+ -N concentrations after applying urea and CRNF in paddy field of two cropping rice.

尽管河沙泥土壤全氮和碱解氮低于紫潮泥,但由于河沙泥对尿素态氮和铵态氮的吸附能力低于紫潮泥,造成河沙泥施用尿素后释放到表面水中的 TN 浓度较高,也导致在河沙泥上施用控释氮肥的 TN 浓度降低幅度高于紫潮泥;但晚稻施用尿素的两种土壤之间的表面水 TN 浓度差异缩小,这是由于晚稻施肥期间气温高,尿素水解和氨挥发^[23]等过程加快,减弱了两种土壤之间的吸附差异。晚稻期间高温也有利于控释肥的氮素释放^[21],缩小了控释肥与尿素之间的 TN 差异。

3.1.4 铵态氮 施用尿素后,表面水 NH_4^+ -N 浓度

在第 3 天达到峰值,但晚稻在第 1、3 天的 NH_4^+ -N 浓度差异不明显。随后 NH_4^+ -N 浓度迅速下降,至第 30 天后接近 CK。达到峰值时,两种土壤类型及早晚稻间 CF 处理的表面水 NH_4^+ -N 浓度差异不显著。

早、晚稻两个控释肥处理的表面水 NH_4^+ -N 浓度峰值均远低于 CF 处理。与 CF 相比,施肥后第 1、3 天河沙泥 CRNF 处理 NH_4^+ -N 浓度(早、晚稻平均值)分别下降了 79.43 ($P < 0.01$)和 81.69 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.01$),紫潮泥分别下降了 40.33 ($P < 0.01$)和 47.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($P < 0.01$);而与 CRNF 相比,河沙泥 70% CRNF 处理(早、晚稻平均值)分别下降了

19.6%($P > 0.05$)和 25.1%($P < 0.05$),紫潮泥分别下降了 30.8%($P < 0.05$)和 35.2%($P < 0.05$),其降低的百分数与所减少的施氮量(30% N)基本一致。

由于尿素水解需要一个过程,导致表面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度最高值(第 3 天)较 TN 延迟。宋勇生等^[11]在太湖地区的研究表明,施尿素后 24~48 h 内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度很快达到高峰。金洁等^[6]报道,在施用尿素后第 1 天 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度即达最大。可见,表面水铵态氮浓度达到峰值时间存在一定的差异,主要是由于水稻施肥时温度影响了尿素的水解速度所致。

3.1.5 硝态氮 淹水稻田处于还原状态,土壤和表面水中 NO_3^- 浓度普遍较低。从图 5 可以看出,两种土壤施用化肥和控释氮肥的表面水硝态氮浓度最高值均在 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,远低于相应的铵态氮浓度。早、晚稻生育期内,河沙泥施用化肥和两个控释

肥处理的 NO_3^- 浓度与 CK 差异不明显。但到后期,尤其是晚稻,两个 CRNF 处理的 NO_3^- 浓度较 CF 和 CK 处理略有升高。这是因为控释氮肥在水稻生长后期释放的 NH_4^+ 由于作物吸收而减少,同时一部分被硝化为 NO_3^- 的缘故。紫潮泥在施用尿素后第 3~7 天 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度最高达 $1.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这可能是紫潮泥土壤 pH 偏碱性,适合硝化细菌活动^[15],致使土壤中少量的 NH_4^+ 被氧化。

3.2 氮素径流损失

对双季稻生长期间各次径流事件引起的 TN 损失量的监测结果表明,2 种土壤施用尿素和控释氮肥处理的 TN 径流损失均以早稻施肥后第 10 天(5 月 5 日)发生的径流事件最大,第 17 天(5 月 12 日)次之(表 2)。CF 处理两次径流的 TN 损失之和占全生育期总径流损失量百分比在河沙泥和紫潮泥上分别为 78.3% 和 66.4%(平均 72.4%),CRNF 处理分

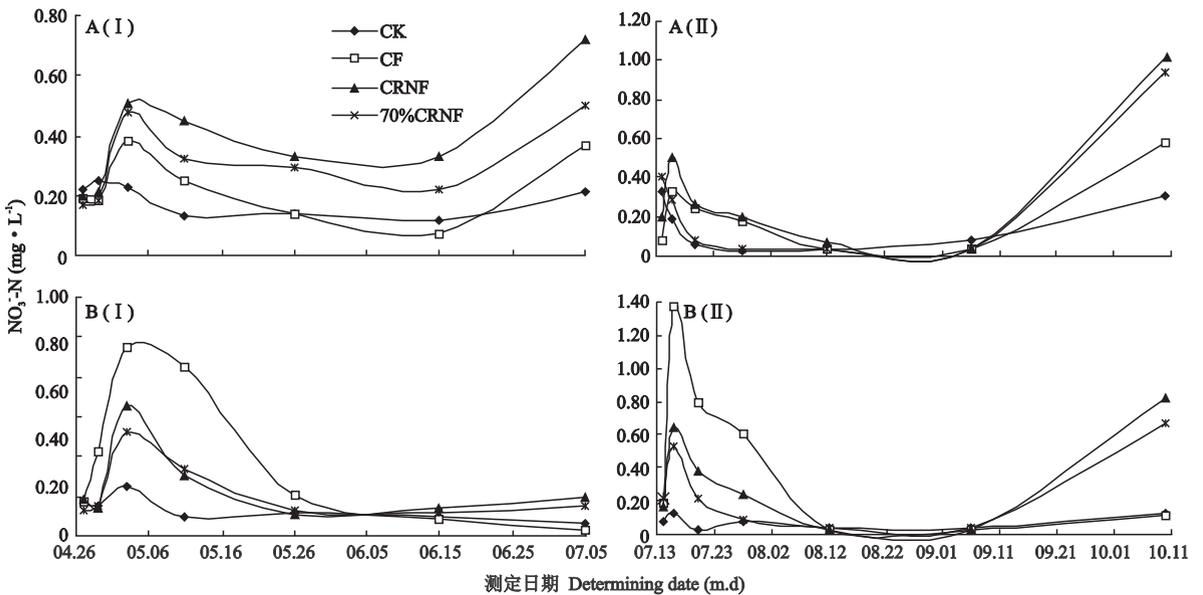


图 5 施用尿素和控释氮肥后的表面水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化动态

Fig. 5 Dynamics of surface water $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentrations after applying urea and CRNF in paddy field of two-cropping rice.

表 2 2005 年双季稻生长期间各次径流事件的径流量和 TN 损失量

Tab. 2 Rainfall amount and TN loss of each runoff event during two-cropping rice growth period in 2005 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	5.05	5.12	5.21	6.01	6.18	6.28	8.14	9.07	总计 Sum
河沙泥 Alluvial sandy loamy	CK	0.35	0.31	0.23	0.13	0.37	0.17	0.22	0.25	2.02 D
	CF	4.74	1.96	0.41	0.19	0.43	0.39	0.15	0.29	8.56 A
	CRNF	2.43	1.95	0.45	0.24	0.51	0.25	0.26	0.16	6.25 BC
	70% CRNF	2.36	1.74	0.48	0.19	0.43	0.35	0.20	0.20	5.96 BC
紫潮泥 Purple calcareous clayey	CK	0.41	0.33	0.25	0.17	0.41	0.22	0.26	0.14	2.19 D
	CF	3.70	0.84	0.76	0.22	0.61	0.25	0.33	0.13	6.84 B
	CRNF	2.33	0.79	0.71	0.17	0.48	0.36	0.33	0.17	5.34 C
	70% CRNF	2.29	0.67	0.63	0.30	0.59	0.24	0.33	0.15	5.20 C

数据后不同字母表示处理间差异显著(LSD 检验, $P < 0.01$) Values followed by different letters meant significant difference at 0.01 level by LSD test. 下同 The same below.

表 3 2005 年双季稻期间第 1 次径流液中氮素浓度及 TN 径流损失总量

Tab. 3 N concentrations and TN loss amount in runoff water at the 1st runoff event during two-cropping rice growth period in 2005

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	TN ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ (%)	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ (%)
河沙泥 Alluvial sandy loamy	CK	0.52d	0.45	86.54	0.23	44.2
	CF	7.01a	3.33	47.50	0.44	6.28
	CRNF	3.60c	1.90	52.78	0.29	8.06
	70% CRNF	3.49c	1.66	47.56	0.34	9.74
紫潮泥 Purple calcareous clayey	CK	0.60d	0.11	18.33	0.51	85.0
	CF	5.48b	3.00	54.74	0.48	8.76
	CRNF	3.44c	1.52	44.19	0.53	15.4
	70% CRNF	3.39c	1.08	31.86	0.50	14.8

别为 70.2% 和 58.3% (平均 64.2%), 70% CRNF 处理分别为 68.8% 和 57.0% (平均 62.9%)。施肥 20 d 后发生的径流 TN 损失逐渐接近 CK。

2 种土壤双季稻期间的 TN 径流损失总量均以 CF 处理最大, 然后依次分别为 CRNF、70% CRNF 和 CK。河沙泥、紫潮泥施用尿素的 TN 径流损失总量分别为 8.56 和 $6.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占总施氮量 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 2.85% 和 2.28%, 其中, 两种土壤早稻 TN 径流损失量分别为 8.12 和 $6.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占早稻施氮量 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 5.41% 和 4.25%。与 CF 处理相比, CRNF 和 70% CRNF 处理河沙泥的 TN 损失总量分别降低了 27.0% 和 30.4%, 紫潮泥分别降低了 21.9% 和 24.0%。

第 1 次径流事件中, 河沙泥和紫潮泥 CRNF 处理的 TN 径流损失分别比 CF 处理降低了 48.6% 和 37.2%, 70% CRNF 处理分别降低了 50.2% 和 38.1%; 第 2 次径流事件中, CRNF 与 CF 处理差异较小, 70% CRNF 处理的 2 种土壤分别降低了 11.1% 和 19.7%。

第 1 次径流事件的径流水中, 施氮处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 所占比例较大, 在 50% 左右, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 仅占 10% 左右, 有机氮 (TN 减去 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 占有一定的比例, 在 40% 以上 (表 3)。说明径流损失的氮素形态中以铵态氮和有机氮为主, 径流液中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度与 CK 相近, 主要来自于灌溉和降雨, 与施用的肥料关系较小。

农田氮素流失既是影响氮肥利用率提高的一个重要方面, 也是影响附近水体质量的主要农业污染源。有研究表明, 苏南太湖地区的径流损失占施肥量的比例为 5.7%^[22], 这与洞庭湖区双季稻早稻的 TN 径流损失比例较为接近, 而比双季稻 TN 损失比例要低得多。这与长江中下游地区的降雨主要集中在春末夏初和两个区域的种植制度及施肥水平有较大

的关系。另外, 不同土壤类型之间也存在一定的差异, 河沙泥 3 个施肥处理的 TN 径流损失均大于紫潮泥, 尤其施用尿素处理的 TN 径流损失比紫潮泥增加了 25.2% ($P < 0.01$)。

研究表明, 尿素分 3~4 次施用, 有利于提高肥料的利用率和籽粒含 N 量。金洁等^[6]研究也表明, 施用基肥、粪肥、花肥和粒肥的表面水 TN、铵态氮浓度与施肥量存在极显著相关, 其斜率 K 逐渐下降。因此, 分次施肥将有助于降低氮素表面水最高浓度, 减少单次径流的氮素损失量。但由于降雨事件的偶然性, 以及追肥采用表施的方式, 分次施肥使稻田表面水氮浓度产生多次峰值, 径流损失风险仍然难以控制。而且, 随着社会和经济的发展, 这种施肥方法已逐渐被农民所放弃, 目前生产上农民主要采用的是 70% 氮素基施、30% 氮素和除草剂于 7~10 d 后追施的施肥方式, 而且一次性基施的情况也越来越多。由于追肥时稻田表面水养分浓度仍然较高, 这种情况与一次性施肥的差异不大, 仅降低了表面水氮素的最高浓度, 但延长了表面水高氮素浓度的持续时间。

4 结 语

1) 尿素施入双季稻田后迅速水解导致表面水 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、EC 和 pH 迅速升高, 但随后的氮固定、氨挥发等使表面水 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 EC 迅速下降, 其中氨挥发时接受 OH^- , 使 pH 回落。然而, 由于表面水中的 NH_4^+ 除部分氨挥发外, 大部分被土壤胶体吸附, 使 OH^- 仍留在表面水中, 致使早稻 pH 在 15 d 内仍然较高, 滞后于表面水 NH_4^+ 的变化 (第 3 天达到高峰), 而且吸附能力低的河沙泥 pH 峰值高于吸附能力强的紫潮泥。由于稻田土壤的强还原条件, 表面水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度基本上处于较低的水平。

2) 控释氮肥对氮素的控制释放在双季稻田表

面水上表现出极显著的效果. 达到峰值时, 与 CF 处理相比, CRNF 处理的表面水 TN 浓度降低了 241.5 ~ 348.0 mg · L⁻¹, NH₄⁺-N 浓度降低了 40.33 ~ 81.69 mg · L⁻¹, EC 下降了 0.40 ~ 0.70 mS · cm⁻¹, 而 pH 在河沙泥上的效果较为显著, 下降了 0.47 ~ 0.60. 缓冲能力强的紫潮泥差异较小. 两个控释肥处理之间, 以 70% CRNF 处理的表面水各指标总体上略低于 CRNF 处理.

3) 洞庭湖区 2 种水稻土双季稻种植期间施用尿素的氮素径流损失量平均为 7.70 kg · hm⁻², 占施肥量的 2.57%. 双季稻生育期内的降雨量、降雨时期对 TN 径流损失起至关重要的作用, 早稻头 2 次径流事件发生的时间距施肥时间较近(第 9 ~ 10 天、第 16 ~ 17 天) 2 次径流引起的 TN 损失占全生育期的 60% 以上, 导致河沙泥和紫潮泥早稻 TN 径流损失分别占双季稻总损失量的 94.9% 和 93.3%. 而晚稻期间第 1 次径流发生在施肥后第 30 天(8 月 14 日), 各施肥处理的 TN 损失与 CK 相近.

4) 施用控释氮肥对双季稻田表面水氮素动态的影响与其削减稻田氮素径流损失的机理相吻合. 施用 CRNF 和 70% CRNF 的 TN 损失总量比 CF 处理降低了 24.5% 和 27.2%(2 种水稻土平均), 而且河沙泥施用控释氮肥的效果优于紫潮泥, 控释氮肥主要降低了施肥后 15 d 内发生的径流事件引起的径流损失, 而 15 d 后的径流损失与 CF 处理差异不明显.

参考文献

- [1] Babiker IS, Mohamed MA, Terao H, *et al.* 2003. Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. *Environment International*, **29**: 1009-1017
- [2] Chen LD, Fu BJ, Zhang SR, *et al.* 2002. A comparative study on nitrogen-concentration dynamics in surface water in a heterogeneous landscape. *Environmental Geology*, **42**: 424-432
- [3] Chinese Agricultural Almanac Editorial Committee (中国农业年鉴编委会). 2005. China Agricultural Almanac (2004). Beijing: Chinese Agricultural Press: 125-128 (in Chinese)
- [4] Dai P-A (戴平安), Nie J (聂军). 2003. Efficiency of nutrient utilization of controlled-release nitrogen fertilizer for rice at different soil fertility levels. *Chinese Journal of Soil Science (土壤通报)*, **34**(2): 115-119 (in Chinese)
- [5] Jin J (金洁), Yang J-P (杨京平). 2005. Farmland nitrogen loss and its control strategies from the view of water environment. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **16**(3): 579-582 (in Chinese)
- [6] Jin J (金洁), Yang J-P (杨京平), Shi H-X (施洪鑫), *et al.* 2005. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field. *Journal of Agro-Environment Science (农业环境科学学报)*, **24**(2): 357-361 (in Chinese)
- [7] Li F-M (李方敏), Fan X-L (樊小林), Liu F (刘芳), *et al.* 2004. Effects of controlled release fertilizers on N₂O emission from paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **15**(11): 2170-2174 (in Chinese)
- [8] Lu R-K (鲁如坤). 2000. Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- [9] Ma Y-J (马毅杰), Chen J-F (陈家坊). 1999. Change in Paddy Soil Materials and Its Effect on Eco-environment. Beijing: Science Press: 56-59 (in Chinese)
- [10] Ribaud MO, Heimlich R, Claassen R, *et al.* 2001. Least-cost management of nonpoint source pollution: Source reduction versus interception strategies for controlling nitrogen loss in the Mississippi Basin. *Ecological Economics*, **37**: 183-197
- [11] Song Y-S (宋勇生), Fan X-H (范晓晖), Lin D-X (林德喜), *et al.* 2004. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influencing factors. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, **41**(2): 265-269 (in Chinese)
- [12] Sun K-J (孙克君), Mao X-Y (毛小云), Lu Q-M (卢其明), *et al.* 2004. Mitigation effect of several controlled-release N fertilizers on ammonia volatilization and related affecting factor. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **15**(12): 2347-2350 (in Chinese)
- [13] Wang D-J (王德建), Lin J-H (林静慧), Sun R-J (孙锐娟), *et al.* 2003. Optimum nitrogen rate for a high productive rice-wheat system and its impact on the groundwater in the Tai Hu Lake area. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, **40**(3): 426-432 (in Chinese)
- [14] Yan W-J (晏维金), Yin C-Q (尹澄清). 1999. Phosphorus and nitrogen transfers and runoff losses from rice field wetlands of Chaohu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **10**(3): 312-316 (in Chinese)
- [15] Yu S (俞慎), Li Z-G (李振高). 1999. Biological reaction of nitrification and anti-nitrification and nitrogen losing in paddy ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **10**(5): 630-634 (in Chinese)
- [16] Yu T-R (于天仁), Ji G-L (季国亮), Ding C-P (丁昌璞), *et al.* 1996. Electrochemistry of Soils with Volatile Electric Charges. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- [17] Zheng S-X (郑圣先). 2001. Developmental current state and prospect of controlled release fertilizer in the world// Soil Science and Agricultural Sustainable Development. Changsha: Hunan Map Press: 9-15 (in Chinese)
- [18] Zheng S-X (郑圣先), Liu D-L (刘德林), Nie J (聂

- 军), *et al.* 2004. Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), **10**(2):137-142 (in Chinese)
- [19] Zheng SX, Nie J, Xiao J. 2002. Effect of film degraded rice controlled release fertilizer on the nitrogen uptake and yield of the hybrid rice. *Hunan Agricultural Science and Technology Newsletter*, (3):4-10
- [20] Zheng S-X (郑圣先), Nie J (聂军), Xiao J (肖剑), *et al.* 2001. Study on role of controlled release fertilizer in increasing the efficiency of nitrogen utilization and rice yield. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), **7**(1):11-16 (in Chinese)
- [21] Zheng S-X (郑圣先), Xiao J (肖剑), Yi G-Y (易国英). 2002. The kinetics and mechanism of nutrients releasing from controlled release fertilizer. Part 2. Effect of water vapor pressure on nutrients releasing from film-coated controlled release fertilizer. *Phosphate & Compound Fertilizer* (磷肥与复肥), **17**(5):22-25 (in Chinese)
- [22] Zhu Z-L (朱兆良). 2000. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction. *Soil and Environmental Sciences* (土壤与环境), **9**(1):1-6 (in Chinese)
- [23] Zou C-M (邹长明), Yan X-Y (颜晓元), Yagi K. 2005. Measurements of ammonia volatilization from paddy soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), **21**(2):167-170 (in Chinese)

作者简介 纪雄辉,男,1965年生,博士研究生,研究员.主要从事植物营养与农业环境方面的研究,已发表论文8篇.
E-mail:jixionghui@sohu.com

责任编辑 张凤丽
