

# 控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响

田昌<sup>1,2</sup>, 周旋<sup>3</sup>, 谢桂先<sup>1,2</sup>, 刘强<sup>1,2</sup>, 荣湘民<sup>1,2</sup>, 张玉平<sup>1,2</sup>, 谭力彰<sup>1</sup>, 彭建伟<sup>1</sup>

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128;  
2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128; 3. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

**摘要:** 为了探究双季稻田典型自然降雨径流过程中氮(N)的输出特点, 采用田间径流池法, 通过长期田间定位试验, 比较普通尿素(U)和控释尿素(CRU)减施稻田径流水中总氮(TN)、铵态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )的动态变化及 N 素径流流失量和流失率。结果表明: 稻田施肥初期出现 N 素径流峰值, 是防控 N 素径流损失的关键时期。早、晚稻季生育期间施 N 处理径流水中以  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为主要形态, 分别占 TN 径流损失量的 64.5%~66.3%, 61.0%~68.6%。早、晚稻季 U 处理径流水 TN 流失量(率)分别为 5.6(2.2%), 5.0(1.7%) $\text{kg}/\text{hm}^2$ ; CRU 处理较 U 处理径流水 TN 流失量分别降低 17.4%~34.1%, 17.3%~37.7%; 且随着 N 肥用量的减少, TN 流失量(率)逐渐降低。受降雨强度的影响, 早稻季 N 素径流损失较晚稻季高, 且晚稻季 CRU 处理 N 素径流损失减排效果优于早稻季。早、晚稻季及连作周期 CRU 处理 TN 径流累计流失量和籽粒产量与施 N 量呈显著线性关系, 随着 N 用量的增加而增加。总之, U 处理显著提高径流水中 N 素浓度以及  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  占 TN 的比例。CRU 处理有效减缓 N 素释放速度, 降低施肥初期 N 素径流流失量, 实现增产; 而 CRU 减施有利于进一步防控稻田 N 素流失风险, 促进农业面源污染减排, 且以减 N 10% 效果较好。

**关键词:** 双季稻; 控释尿素; 减量施肥; 径流损失; 产量

中图分类号: S145.6; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0021-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.004

## Effects of Controlled-release Urea Application on Dynamics and Loss of Nitrogen in Runoff and Yield in Double-rice Cropping Field

TIAN Chang<sup>1,2</sup>, ZHOU Xuan<sup>3</sup>, XIE Guixian<sup>1,2</sup>, LIU Qiang<sup>1,2</sup>,

RONG Xiangmin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuping<sup>1,2</sup>, TAN Lizhang<sup>1</sup>, PENG Jianwei<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Changsha 410128; 2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128; 3. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125)

**Abstract:** In order to explore nitrogen (N) output characteristics in double-rice cropping field during the process of the typical natural rainfall runoff, the long-term experiment with common urea (U) and reduction of controlled-release urea (CRU) was conducted to study the dynamics of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) and nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) loss and loss ratio of runoff in paddy field. The results showed that N loss peaked in the early time of fertilization, which was the critical period to control N loss.  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  was the main form of N-applied treatments to runoff during early and late rice season, accounting for 64.5%~66.3% and 61.0%~68.6% in TN loss, respectively. The TN loss and loss ratios of runoff in U treatment during early and late rice season were 5.6  $\text{kg}/\text{hm}^2$  (2.2%), and 5.0  $\text{kg}/\text{hm}^2$  (1.7%), respectively. Compared with U treatment, TN loss in CRU treatments were reduced by 17.4%~34.1% and 17.3%~37.7%, and the TN loss and loss rates of runoff decreased with the decrease of N fertilizer rate. N loss in early rice season was higher than that in late rice season, and the inhibition of CRU treatments in N loss in late season rice was better than that of early rice season as affected by rainfall intensity. TN loss and grain yield in CRU treatments

收稿日期: 2017-11-19

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201205); 省科技厅重点项目(2016NK2112); 省教育厅平台项目(16K040)

第一作者: 田昌(1986—), 男, 湖南浏阳人, 博士研究生, 实验师, 主要从事农业面源污染防控研究。E-mail: chtian12@126.com

通信作者: 谢桂先(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: xieguixian@126.com

for early season, late-season rice and the continuous cropping cycle had significant linear relationships with N fertilizer rate, which increased with the increasing N fertilizer rate. In conclusion, U treatment significantly increased N concentration and the ratio of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  to TN in runoff. CRU effectively reduced N release rate and N loss in the early time of fertilization, and thus increased grain yield. The findings indicate that the reduction of CRU is helpful for further control of N loss risk in paddy field, and promote the reduction of agricultural non-point source pollution, especially in reduction of 10% N treatment.

**Keywords:** double-cropping rice; controlled-release urea; reduction fertilization; surface runoff loss; grain yield

我国作为世界上最大的肥料消费国,化肥污染已成为农业面源污染的主要形式<sup>[1]</sup>;全国第一次污染源普查结果显示,农业氮(N)排放占总排放的 57.2%<sup>[2]</sup>。氮肥不合理施用导致 N 肥利用率低下,大量氮素通过径流、淋溶、氨挥发、硝化-反硝化作用等途径损失到环境中,从而对水体、大气造成污染,带来严重的环境问题<sup>[3]</sup>。地表径流是农田 N 流失的主要形式,我国农田生态系统中 N 年径流损失量约 131 万 t<sup>[4]</sup>,成为水体富营养化的主要污染源之一。N 素径流损失量与 N 肥施用量呈显著线性正相关<sup>[5]</sup>。随着施 N 量增加,田面水可溶性 N 浓度升高,从而增加地表径流损失的风险。梁新强等<sup>[6]</sup>研究发现,几次降雨事件中 TN 累积流失负荷约 0.2~0.8 kg/hm<sup>2</sup>;曹志洪等<sup>[7]</sup>研究发现,稻田 N 素径流损失量占施 N 量的 1.4%~6.3%;Zhao 等<sup>[8]</sup>研究发现,太湖流域稻季径流 TN 流失量分别为 2.7~21.8 kg/hm<sup>2</sup>;夏小江等<sup>[9]</sup>研究发现,太湖流域不同地点稻季径流 TN 流失量分别为 8.2,10.7 kg/hm<sup>2</sup>,分别占氮肥总投入量的 2.5%,3.3%。

降雨产生的径流排水是稻田系统 N 素流失的主要途径之一,在施肥后短期内产生的径流使大量的 N 素流失进入地表水<sup>[6]</sup>。然而,由于普通氮肥的速溶性和施肥后降雨量的不可预测性,控制 N 径流和淋溶流失的工作非常困难<sup>[10]</sup>。施 N 量、施肥时间和方式,以及肥料种类对 N 素流失量的影响显著<sup>[3]</sup>。通过优化施肥量和改变肥料种类,可以有效减少稻田 N 素径流损失<sup>[11]</sup>。因此,通过优化施肥模式,减少进入水体 N 素的量,对减轻环境负荷意义重大。

缓控释肥因具有养分释放与作物吸收同步、增产潜力大以及挥发、淋溶、硝化-反硝化损失少等优点成为提高肥料利用效率和减轻环境污染的有效途径之一<sup>[12-13]</sup>。其中,包膜控释尿素增产效果好,N 素利用率高,成为广泛研究的热点<sup>[10-14]</sup>。本文开展长期定位试验对普通尿素和控释尿素施用下稻田 N 素的径流损失特征进行系统研究,旨在了解长江中游双季稻区稻田 N 素径流流失浓度、流失量和流失形态,探究控释尿素及其减施对稻田 N 素径流损失的影响,以期合理施用氮肥、源头控制农业面源污染和防控

水体富营养化提供科学依据和技术途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

定位试验于 2013 年在湖南省浏阳市原种场沿溪镇花园村(28°19'N,113°49'E)开始进行(2016 年为第 4 年)。供试土壤为河流冲积物发育的潮沙泥,其 0—20 cm 耕作层的基本理化性状:有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 16.62,1.21,0.54,11.51 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 48.93,21.25,155.68 mg/kg,pH 5.61。

### 1.2 供试材料

供试早稻品种为中早 39,晚稻品种为泰优 390。供试氮肥为普通尿素(含 N 46%),控释尿素(山东金正大生态工程股份有限公司生产,树脂包膜,含 N 42%,控释期 3 个月);磷肥为过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%);钾肥为氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)。

### 1.3 试验设计

采用田间小区试验,共设置 6 个处理:(1)不施氮肥(CK);(2)普通尿素(U);(3)等 N 量控释尿素(CRU1);(4)控释尿素减 N 10%(CRU2);(5)控释尿素减 N 20%(CRU3);(6)控释尿素减 N 30%(CRU4)。小区面积 20 m<sup>2</sup>(4 m×5 m),随机区组排列,重复 3 次。小区间用水泥田埂(宽 20 cm,高 20 cm)隔开,以防串水串肥。

早稻栽插株行距为 16.7 cm×20.0 cm,每穴 2 苗;CK、U、CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 处理 N 用量分别为 0,150,150,135,120,105 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 用量均为 72,90 kg/hm<sup>2</sup>。晚稻栽插株行距为 20.0 cm×20.0 cm,每穴 2 苗;CK、U、CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 处理 N 用量分别为 0,180,180,162,144,126 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 用量均为 60,105 kg/hm<sup>2</sup>。所有磷肥全部作基肥(土层混施)一次性施用,氮肥、钾肥作基肥(60%)(土层混施)和分蘖肥(40%)(表层撒施)施用。早稻于 2016 年 3 月 27 日育种,4 月 28 日施基肥移栽,5 月 10 日追肥,7 月 23 日收获;晚稻于 2016 年 6 月 26 日育种,7 月 27 日施基肥移栽,8 月 6 日追肥,

11月5日收获。整个生育期的水肥管理、病虫害防治及其他管理与当地生产一致。

#### 1.4 测定项目与分析方法

1.4.1 水样采集及测定 每次降雨产流和排水晒田后,量取径流收集池(长、宽、高分别为2.0,1.0,0.5 m)内水位刻度的变化,求得径流量。将径流池内搅拌均匀后取500 mL水样,再关闭水阀洗净。分别于5月7日、5月30日、6月14日、7月23日、8月9日、9月11日、10月13日、11月4日取水样,测定径流水中TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量,并计算流失量。有机氮(Org-N)采用差减法(即TN减去无机N)求得。

1.4.2 水样测定方法 水样中TN含量采用碱性过硫酸钾—紫外分光光度法测定;水样中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量采用SmartChem 200全自动间断化学分析仪测定。

1.4.3 产量的测定及植株样品的采集和考种 水稻收获期按小区单打单晒,并计产。每小区采水稻地上部5穴进行室内考种,分别测定其株高、穗长、有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重等。

#### 1.4.4 计算公式

(1)N素径流流失量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )=(小区径流水N素浓度( $\text{mg}/\text{L}$ ) $\times$ 流失体积(L)/1000000) $\times$ 10000( $\text{m}^2/\text{hm}^2$ )/小区面积( $\text{m}^2$ )

(2)N素流失率(%)=(施N处理N素流失量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )-不施N处理N素流失量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ))/施N量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) $\times$ 100%

#### 1.5 数据分析

采用Excel 2003和SPSS 17.0软件进行数据处理和分析,处理间差异显著性分析采用LSD检验法。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨量和温度

由图1可知,2016年双季稻连作期间累计降雨量1270.7 mm,平均气温24.7 $^{\circ}\text{C}$ 。其中早稻季降雨量为1037.1 mm(81.6%),平均气温24.9 $^{\circ}\text{C}$ ,晚稻季为233.7 mm(18.4%),平均气温24.5 $^{\circ}\text{C}$ 。早稻季6—7月降雨752.7 mm,其中较大降雨发生在7月4日和7月18日,分别为128.7,115.4 mm。晚稻季较大降雨发生在9月29日,为82.7 mm。降雨是决定稻田径流发生次数和发生量的主要原因。早稻季较晚稻季增加径流发生次数和径流量,从而增加稻田N的输出负荷。

### 2.2 双季稻田径流水N素浓度动态变化

由图2可知,CK处理水稻生育期间径流水TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度最低。不同施肥处理早、晚稻季径

流水TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度变化趋势表现基本一致。稻田径流水TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度变化总体表现为施肥后(早稻:5月7日;晚稻:8月9日)达到高峰,随着时间的推移开始降低,这与N素释放速率、田间灌溉及降雨有关。可见,施肥后是控制N素径流损失的关键时期。U处理TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度峰值最高,早稻分别达9.9,7.0 mg/L,晚稻分别达11.4,7.8 mg/L;CRU处理TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度峰值早稻为5.4~6.2,3.8~4.1 mg/L,晚稻为5.8~7.8,3.8~4.7 mg/L,且随着控释尿素施N量的减少,径流水中浓度峰值出现逐渐降低的趋势;与U处理相比,CRU1、CRU2、CRU3和CRU4处理径流水TN浓度峰值早稻分别降低37.0%,38.2%,38.2%,45.3%,晚稻分别降低31.5%,45.1%,49.1%,40.0%;径流水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度峰值早稻分别降低40.9%,43.0%,40.6%,46.2%,晚稻分别降低40.3%,51.3%,49.1%,45.6%。说明速效氮肥施用显著增加径流水N素浓度,早、晚稻季基肥和蘖肥期N素具有较大的流失风险;且CRU减量施用能有效降低径流水TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度峰值,且减N10%处理效果尤其明显。早稻季6月14日CRU处理径流水TN和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度再次出现小峰,可能与CRU中N素稳定且释放缓慢,水稻生长前期植株较小且N素吸收量少有关。

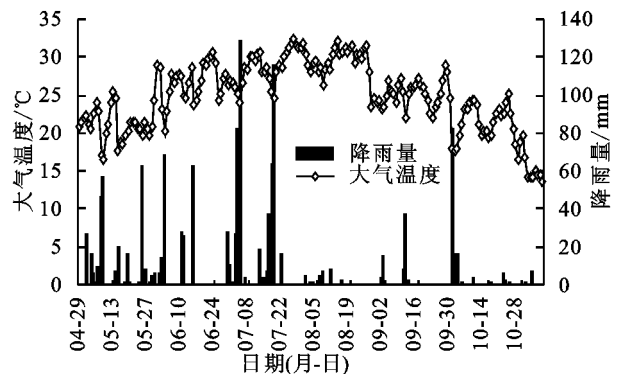


图1 双季稻期间降雨量和大气温度(2016年)

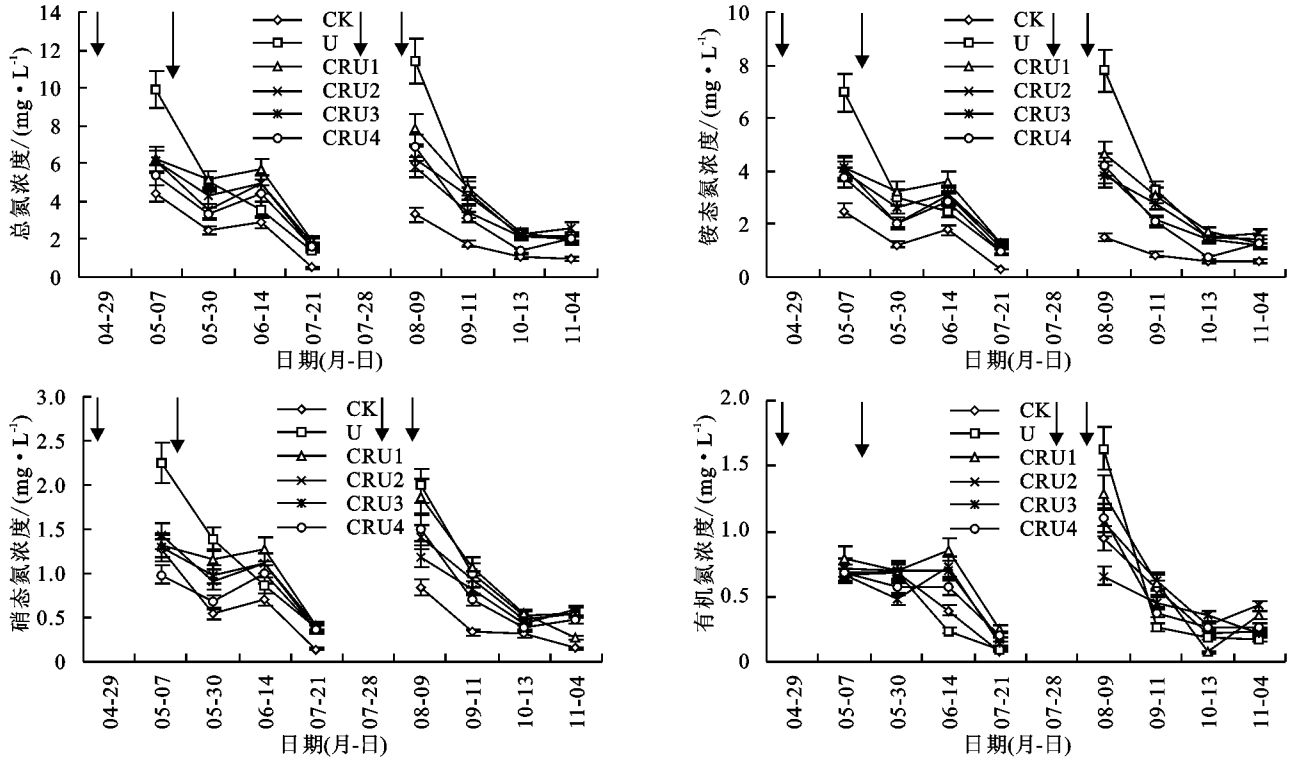
稻田径流水 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 浓度施肥前期同样出现高峰,U处理 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 浓度峰值最高,早、晚稻分别达2.3,2.0 mg/L;CRU处理 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 浓度峰值早稻为1.0~1.4 mg/L,晚稻为1.2~1.9 mg/L。可见,施肥后径流水 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 浓度峰值明显较 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 低,是由于稻田淹水条件下硝化作用微弱, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 难以转化为 $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,通过氨挥发、植物吸收等方式,降低径流水中 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 浓度。稻田径流水早、晚稻季Org-N浓度范围较低,且早稻季差异不大。

### 2.3 双季稻田径流水N素形态动态变化

由图3可知,水稻生育期内径流水N素主要以无机形态存在, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 是稻田施肥后径流水N素

的主要形态,也是稻田 N 素径流损失的主要成分。CK 处理早稻季  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、Org - N 占 TN 比例分别为 55.8%,26.1%,18.1%;晚稻季分别为 52.2%,21.9%,25.9%。U 处理早稻季  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、Org - N 占 TN 比例分别为 66.3%,25.3%,8.4%;晚稻季分别为 68.6%,22.2%,9.1%。说明速效氮肥施用会提高径流水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  占 TN 比例,降低 Org - N 占 TN 比例。CRU 处理早稻季

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、Org - N 占 TN 比例分别为 64.5%~64.9%,21.2%~23.6%,11.9%~14.0%;晚稻季分别为 61.0%~66.4%,20.9%~24.0%,12.7%~15.1%。与 U 处理相比,CRU 处理早、晚稻径流水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  占 TN 比例分别平均降低 2.3%,7.3%。说明 CRU 有效控制  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的释放,减少养分的流失,利于水稻的吸收。不同控释尿素用量处理径流水各形态 N 素占 TN 比例差异不大。



注:图中箭头标注为施肥时间。下同。

图 2 不同处理下双季稻田径流水中 N 浓度的动态变化

## 2.4 稻田 N 素径流流失量及流失率

由表 1 可知,早、晚稻季及双季稻连作期间 U 处理径流 TN 流失量(率)最高,分别为 5.6(2.2%),5.0(1.7%),10.6(2.0%) $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,且显著高于其他处理。说明氮肥施用显著增加稻田径流水 N 素损失量。CRU 处理径流水 TN 流失量(率)早稻为 3.7~4.7  $\text{kg}/\text{hm}^2$ (1.3%~1.6%),晚稻为 3.1~4.1  $\text{kg}/\text{hm}^2$ (1.0%~1.2%),双季稻为 6.8~8.8  $\text{kg}/\text{hm}^2$ (1.1%~1.4%),且随着控释尿素施 N 量的减少流失量(率)逐渐降低。与 U 处理相比,CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理径流水 TN 损失量早稻分别降低 17.4%,25.5%,30.1%,34.1%,晚稻分别降低 17.3%,22.6%,27.5%,37.7%,双季稻分别降低 17.3%,24.2%,28.9%,35.8%。各 CRU 处理径流水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  损失量与 TN 趋势表现一致,Org - N 流失量处理间差异不明显。说明 CRU 显著降低田间 N 素径流损失量,且减量施用效果更好。

早、晚稻季施肥后,径流水中 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和

$\text{NO}_3^- - \text{N}$  流失量明显增加出现峰值,随后径流损失量逐渐减少(图 4)。可见,稻田 N 素径流损失量主要集中在施肥初期。U 处理流失量高于 CRU 处理,变化规律与其浓度的动态变化基本一致。说明 CRU 能有效减少稻田 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  径流损失量,且稻田 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  径流损失量随着控释尿素施 N 量的减少而降低。说明 CRU 减施能有效减少 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  径流损失量,降低 N 素流失风险。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  径流损失量较  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  高,是由于尿素施入水田后在脲酶的作用下水解为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,使径流水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度增大,从而导致流失量增大。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  主要来源于尿素水解产生的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  通过硝化作用形成,而  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  通过植株吸收,挥发和淋失等损失,可以转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的数量已经很少,同时淹水条件下硝化作用较弱及反硝化作用的存在,导致稻田径流水中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度较低<sup>[14]</sup>。

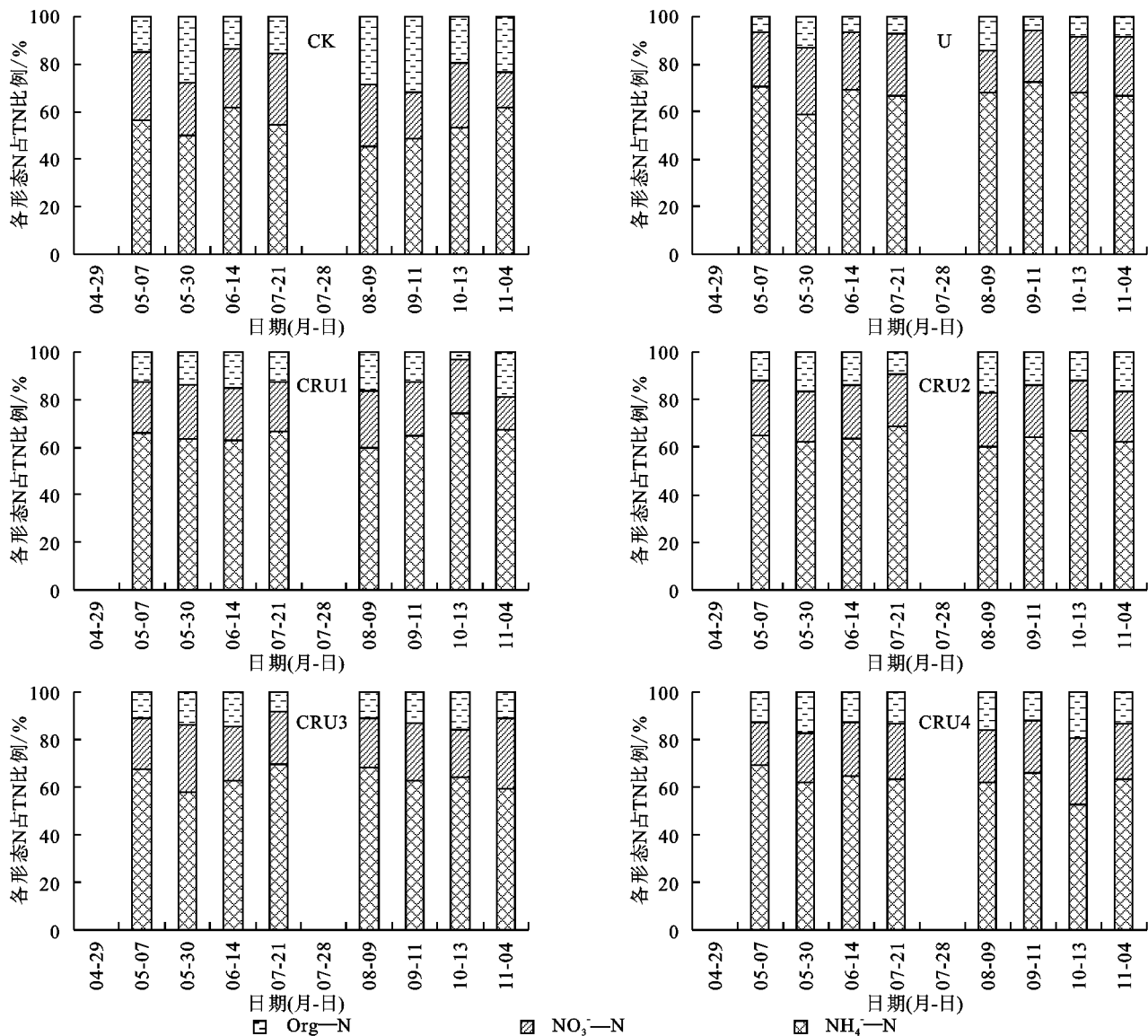


图 3 不同处理下径流水各形态 N 占 TN 比例的动态变化

表 1 不同处理下双季稻田径流水各形态 N 素流失量及流失率

稻季	处理	N 径流损失量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )				流失率/%
		总氮 TN	铵态氮 $\text{NH}_4^+-\text{N}$	硝态氮 $\text{NO}_3^--\text{N}$	可溶性氮 Org-N	
早稻	CK	2.3d	1.3c	0.6d	0.4c	
	U	5.6a	3.8a	1.4a	0.5bc	2.2a
	CRU1	4.7b	3.0b	1.0b	0.6a	1.6b
	CRU2	4.2bc	2.7b	0.9bc	0.6ab	1.4b
	CRU3	3.9bc	2.5b	0.9bc	0.5bc	1.4b
	CRU4	3.7c	2.4b	0.8cd	0.5abc	1.3b
晚稻	CK	1.9d	1.0d	0.4c	0.5ab	
	U	5.0a	3.4a	1.0a	0.5ab	1.7a
	CRU1	4.1b	2.7b	0.9ab	0.5ab	1.2b
	CRU2	3.9bc	2.5bc	0.8b	0.6a	1.2b
	CRU3	3.6bc	2.3bc	0.8b	0.5ab	1.2b
	CRU4	3.1c	1.9c	0.7b	0.5b	1.0b
双季稻	CK	4.2d	2.2d	1.0d	0.9a	
	U	10.6a	7.2a	2.4a	1.0a	2.0a
	CRU1	8.8b	5.7b	1.9b	1.1a	1.4b
	CRU2	8.1bc	5.2bc	1.8bc	1.1a	1.3b
	CRU3	7.6bc	4.9bc	1.7bc	1.0a	1.1b
	CRU4	6.8c	4.3c	1.5c	1.0a	1.1b

注:同列数值后不同小写字母分别表示差异达 5% 显著水平。下同。

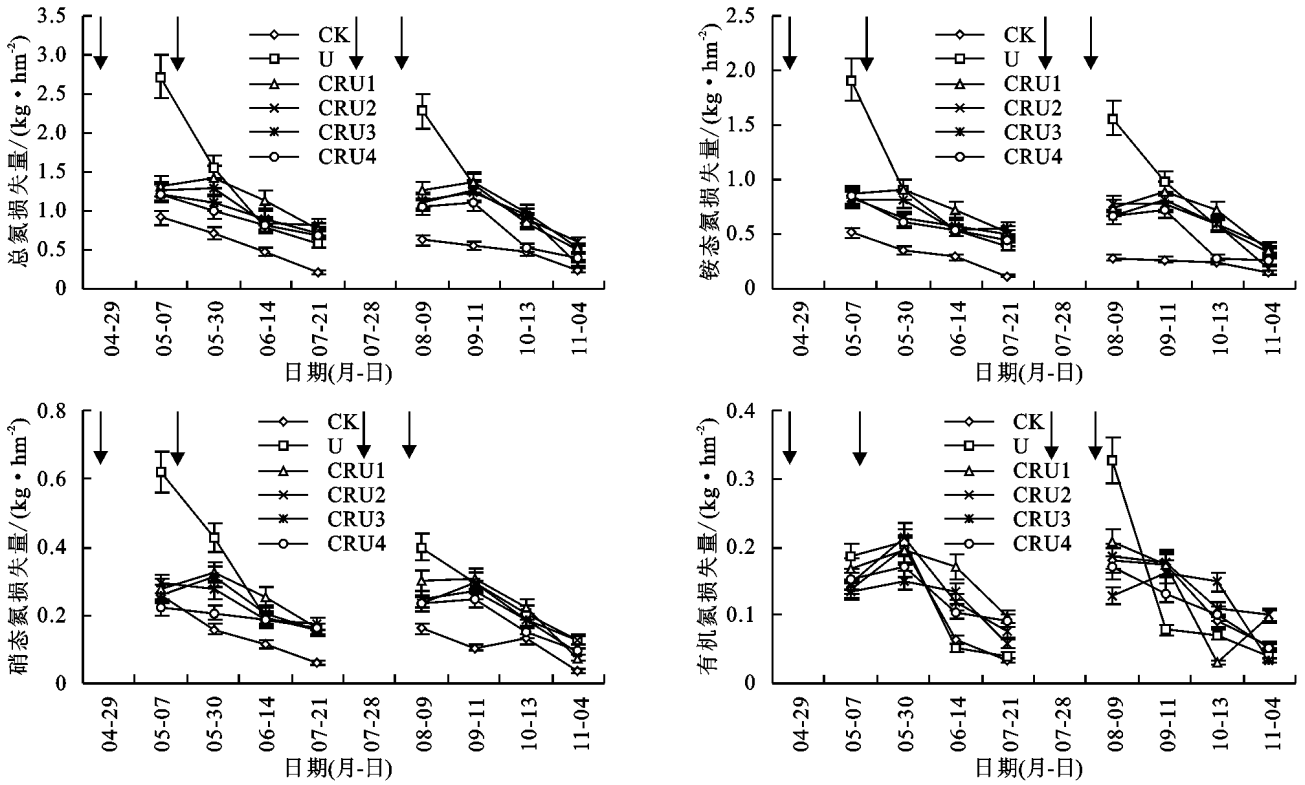


图 4 不同处理下双季稻田径流水 N 素流失量的动态变化

## 2.5 双季稻产量及其构成因素

由表 2 可知,早、晚稻产量均以 CK 最低,CRU2 最高。说明氮肥施用能显著增加双季稻产量。与 U 处理相比,CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理早稻产量分别提高 9.4%,14.9%,8.4%和 6.5%;晚稻产量分别提高 15.2%,20.9%,11.7%,6.6%。说明 CRU 养分释放缓慢,利于作物吸收,从而实现高产。

早、晚稻株高、穗长、千粒重差异不显著,CRU 处理结实率均较 U 处理高。与 U 处理相比,CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理早稻有效穗数分别提高 1.3%,1.8%,-3.7%,-7.8%;晚稻分别提高 3.5%,14.1%,10.3%,3.8%。相关性分析表明,双季稻有效穗数与产量呈显著正相关(早稻: $r=0.873^*$ ;晚稻: $r=0.947^{**}$ )。

表 2 不同处理下双季稻产量及产量构成因素

稻季	处理	株高/ cm	穗长/ cm	有效穗数/ (万穗·hm <sup>-2</sup> )	每穗 粒数/粒	千粒重/ g	结实率/ %	产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
早稻	CK	70.5a	19.6a	271.8b	89.4a	23.3a	81.9a	4.5c
	U	70.5a	19.0a	334.0ab	81.0a	22.4a	75.6b	5.5b
	CRU1	67.0a	18.9ab	338.3a	80.0a	22.9a	84.0a	6.0a
	CRU2	67.4a	19.1a	340.0a	74.4a	23.3a	84.5a	6.3a
	CRU3	67.7a	18.9ab	321.5ab	87.2a	23.5a	86.3a	5.9ab
	CRU4	66.8a	17.5b	308.0ab	77.2a	23.3a	84.5a	5.8ab
晚稻	CK	70.1ab	19.7ab	305.0b	73.8b	28.1b	76.7a	5.2e
	U	69.4b	18.8b	349.2ab	75.9ab	28.1b	78.8a	6.2d
	CRU1	73.8ab	20.4a	361.3ab	88.4a	29.6a	83.9a	7.1ab
	CRU2	79.0a	20.8a	398.3a	77.5ab	29.8a	81.9a	7.5a
	CRU3	71.5ab	19.8ab	385.0ab	73.5b	29.0ab	80.4a	6.9bc
	CRU4	73.4ab	20.2a	362.3ab	71.9b	30.1a	79.4a	6.6c

将双季稻连作期间 TN 径流损失总量及籽粒产量与 N 施用量进行拟合,发现 CRU 处理 TN 径流损失总量及籽粒产量均与施 N 量呈显著线性关系( $y_{\text{产量}} = 0.012x + 9.6836, R^2 = 0.9464^{**}$ ;  $y_{\text{TN}} = 0.0134x + 4.0766, R^2 = 0.9825^{**}$ ),随着氮肥施用

量的增加而增加(图 5)。

## 3 讨论

### 3.1 控释尿素减施对径流水 N 素浓度及形态变化的影响

施肥初期径流水 N 素浓度保持较高水平,是防

控稻田 N 素径流损失的关键时期。本研究中,施肥使得双季稻田径流水中 N 素浓度明显升高, TN 径流损失量增加,尤其在发生强降雨事件(如早稻)后,与降雨量、土壤类型、作物生长条件和田间水肥管理等<sup>[16]</sup>有关。施肥和降雨时间间隔是影响稻田养分径流流失的主要因素之一<sup>[9,17]</sup>;同时,径流排水发生的时间与施肥时间间隔越小, N 素的流失负荷越大<sup>[18]</sup>;稻田田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度在施肥后第 2 天达到峰值,之后快速下降,第 7 天后降至峰值的 15% 以下并趋于稳定<sup>[19-20]</sup>。因而,施 N 后 1 周是防控稻田 N 素大量径流流失的关键时期<sup>[9,17,21]</sup>。

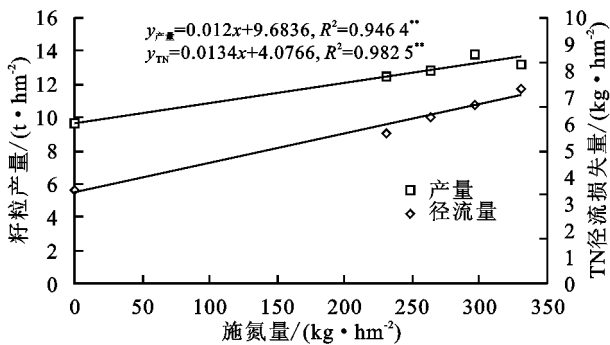


图5 双季稻施 N 量与籽粒产量、TN 径流损失总量的关系

无机 N 是田面水 N 素的主要形态<sup>[19,22]</sup>。本研究中,各处理径流水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度动态变化与 TN 的变化趋势相同(图 1),且  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  是径流水 N 素的主要形态;U 处理早、晚稻季径流水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  占 TN 比例分别为 66.3% 和 68.6%,且 N 肥施用会增加径流水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  占 TN 比例。这与相关研究<sup>[14,23]</sup>结果一致,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  最高约占 TN 径流总量的 2/3,增加施肥量能增加 TN 中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的比重,以  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为主的相对流失潜能也相应增大<sup>[18]</sup>。

控释 N 肥能控制 N 素释放,降低水稻生长前期稻田表面水 N 素浓度,减少其降雨径流损失风险<sup>[24]</sup>。本研究中,CRU 处理较 U 处理径流水 TN 浓度峰值早、晚稻分别降低 37.0%~45.3%,31.5%~49.1%;径流水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度峰值早、晚稻分别降低 40.6%~46.2%,40.3%~51.3%;CRU 减量施用有效降低田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度峰值,且减 N10% 处理效果尤其明显。与相关研究结果基本一致,施 N 显著增加田面水的 N 素质量浓度,且随施 N 量的减少而降低<sup>[19]</sup>;缓释肥处理较传统施肥平均 4 次径流中 TN 浓度降低 23.0%~42.9%<sup>[23]</sup>;减量施肥可以有效降低田面水 N 素浓度<sup>[20]</sup>。因此,控释尿素减量施用能达到显著降低 N 素径流损失的风险的效果。

### 3.2 控释尿素减施对稻田 N 素径流流失的影响

不同地区稻田 TN 流失负荷变异较大。本研究

表明,双季稻区早、晚稻季及双季稻连作期间 U 处理径流 TN 流失量(率)最高,分别为 5.6(2.2%),5.0(1.7%),10.6(2.0%)  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。这与其他区域的部分研究结果基本一致,洞庭湖区双季稻田 TN 流失负荷达 7.47  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,占施 N 量的 2.49%<sup>[14]</sup>;太湖流域稻田 TN 径流损失量为 1.0~17.9  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,占施 N 量的 0.3%~5.8%<sup>[5]</sup>;巢湖流域稻田 TN 流失负荷为 2.9~6.2  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,占施 N 量的 1.6%~3.5%<sup>[22]</sup>。同时,CRU 处理稻田径流 TN 流失量较 U 处理早、晚稻分别降低 17.4%~34.1% 和 17.3%~37.7%。

控释肥料施入土壤后,养分释放相对缓慢和持久,相对速效肥料降低肥料施入时土壤中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的浓度,避免土壤养分的饱和状态,从而降低 N 素损失<sup>[3,13]</sup>。前人<sup>[14,24]</sup>研究发现,洞庭湖区双季稻施用控释 N 肥 TN 径流损失量比尿素减少 24.5%,且等 N 量 CRU 和减 N 30% CRU 处理比 U 处理稻田 TN 径流损失量减少 24.5% 和 27.2%,与本研究结果基本一致。

N 素径流损失与施 N 量呈显著正相关<sup>[25]</sup>。研究表明,双季稻田 N 素径流损失与 N 肥施用量呈显著正相关,减量施肥能有效降低稻田径流水 N 素的流失量。同时,田发祥等<sup>[26]</sup>研究发现,减 N 20% 稻田 TN 径流损失降低 20.5%;李娟等<sup>[20]</sup>研究发现,化学 N 肥减量 10%~20% 减少 N 素径流损失量 22.1%~34.2%。

王静等<sup>[22]</sup>研究发现, N 素径流损失量因降雨量变化而年际差异较大。姚建武等<sup>[27]</sup>研究发现,53%~86% 的 TN 流失负荷发生在早稻季,与本地区降雨时间分布有直接关系。本研究中,稻田径流事件及 N 流失负荷受降雨强度的影响,主要发生在早稻季(4~7月),且晚稻季 CRU 处理 N 素径流损失减少效果优于早稻季。

## 4 结论

(1) 施肥初期径流水 N 素浓度保持较高水平,是防控稻田 N 素径流损失的关键时期。

(2)  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为稻田径流水主要形态,占施氮处理 TN 的 60% 以上;施用控释尿素可一定程度降低  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  比例,不同 N 用量对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  占比影响较小,且较 U 处理早、晚稻平均降低 2.3%,7.3%。

(3) 控释尿素减 N 施用,明显降低径流水中 TN 浓度峰值和 TN 流失量,且 TN 径流损失总量与控释尿素施 N 量呈显著正相关;不同用量控释尿素较普通尿素能减少早、晚稻径流水 TN 浓度峰值 37.0%~45.3%,31.5%~49.1%,减少早、晚稻 TN 流失量 17.4%~34.1%,17.3%~37.7%。

(4) 在本试验所设范围内,控释尿素减 N 10% 可

以在显著增加水稻产量的基础上,减少双季稻田 N 素径流浓度,防控 N 流失总量。

#### 参考文献:

- [1] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅲ. 中国农业面源污染控制中存在问题分析[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
- [2] 高懋芳,邱建军,刘三超,等. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析[J]. 中国农业科学,2014,47(6):1140-1150.
- [3] 周伟,吕腾飞,杨志平,等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报,2016,27(9):3051-3058.
- [4] 胡玉婷. 中国农田氮素径流、淋溶损失影响因素子分析与损失值估算[D]. 北京:中国科学院研究生院,2010.
- [5] 田玉华,尹斌,贺发云,等. 太湖地区稻季的氮素径流损失研究[J]. 土壤学报,2007,44(6):1070-1075.
- [6] 梁新强,田光明,李华,等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报,2005,19(1):59-63.
- [7] 曹志洪,林先贵,杨林章,等. 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[J]. 土壤学报,2006,43(2):256-260.
- [8] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake Region of China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156(1): 1-11.
- [9] 夏小江,胡清宇,朱利群,等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. 水土保持学报,2011,25(4):21-25.
- [10] 樊小林,刘芳,廖照源,等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2):463-473.
- [11] Xue L, Yu Y, Yang L. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(11): 115010-115020.
- [12] 杜建军,毋永龙,田吉林,等. 控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报,2007,21(2):49-52.
- [13] Chien S H, Prochnow L I, Cantarella H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts [J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 102(9): 267-322.
- [14] 纪雄辉,郑圣先,鲁艳红,等. 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[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1432-1440.
- [15] 官亮,隗英华,王建忠,等. 盘锦地区稻田田面水氮素动态变化及化学氮肥投入阈值研究[J]. 农业资源与环境学报,2013,30(6):96-100.
- [16] Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, et al. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu Lake Region of China [J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2013, 44(16): 2393-2407.
- [17] Yoshinaga I, Miura A, Hitomi T, et al. Runoff nitrogen from a large sized paddy field during a crop period [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(2): 217-222.
- [18] 吴俊,樊剑波,何园球,等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报,2012,21(9):1561-1566.
- [19] 赵冬,颜廷梅,乔俊,等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. 生态环境学报,2011,20(4):743-749.
- [20] 李娟,李松昊,邬奇峰,等. 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(5):23-28.
- [21] 张志剑,董亮,朱荫眉. 水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J]. 环境科学学报,2001,21(4):475-480.
- [22] 王静,郭熙盛,王允青,等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2010,29(6):1164-1171.
- [23] 张丽娟,马中文,马友华,等. 优化施肥和缓释肥对水稻田面水氮磷动态变化的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(1):90-94.
- [24] 鲁艳红,纪雄辉,郑圣先,等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3):490-495.
- [25] 王小治,朱建国,宝川靖和,等. 施用尿素稻田表层水氮素的动态变化及模式表征[J]. 农业环境科学学报,2004,23(5):852-856.
- [26] 田发祥,纪雄辉,石丽红,等. 不同缓控释肥料减氮对洞庭湖区双季稻田氮流失与作物吸收的影响[J]. 农业现代化研究,2010,31(2):220-223.
- [27] 姚建武,宁建凤,李盟军,等. 广东稻田氮素径流流失特征[J]. 农业环境科学学报,2015,34(4):728-737.