



**农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响**

张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 夏颖, 张志毅, 程子珍, 吴茂前, 高红兵, 毛波, 孔祥琼

引用本文:

张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 等. 农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 858–866.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0171>

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

**聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响**

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>

**控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响**

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

**应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对——以宁夏引黄灌区为例**

张爱平, 高霁, 刘汝亮, 陈哲, 杨世琦, 杨正礼, 张晴雯

*农业资源与环境学报*. 2015(2): 175–184 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0334>

**稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响**

李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖

*农业资源与环境学报*. 2015(6): 559–564 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157>

**包膜尿素和普通尿素混施对夏玉米产量、氮肥利用率和土壤硝态氮残留的影响**

曹兵, 倪小会, 陈延华, 邹国元, 王甲辰, 杨友庆, 陈立娟, 刘杰, 王学霞

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(5): 695–701 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0428>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 等. 农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 858-866.

ZHANG F L, LIU D B, FAN X P, et al. Effects of agronomic deep application and combined application of controlled release nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen loss in a paddy field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 858-866.



开放科学 OSID

## 农艺深施及配施缓控释氮肥 对水稻产量及氮素损失的影响

张富林<sup>1</sup>, 刘冬碧<sup>1\*</sup>, 范先鹏<sup>1</sup>, 夏颖<sup>1</sup>, 张志毅<sup>1</sup>, 程子珍<sup>1</sup>, 吴茂前<sup>1</sup>, 高红兵<sup>2</sup>,  
毛波<sup>2</sup>, 孔祥琼<sup>3</sup>

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 国家农业环境潜江观测实验站, 湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心, 农业农村部潜江农业环境与耕地保育科学观测实验站, 农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室, 武汉 430064; 2. 荆州市农业技术推广中心, 湖北 荆州 434000; 3. 兴山县农业环境保护站, 湖北 兴山 443700)

**摘要:**为探讨基肥“干施湿混”(施基肥-泡田-旋耙整田)结合追肥“以水带氮”(先施追肥再灌水)的农艺深施技术及其配施缓控释氮肥对氮素损失及水稻氮素吸收利用的影响,采用田间小区试验,设置不施氮肥(N0)、常规施肥(Nc)、农艺深施(Nd)、农艺深施配施缓控释氮肥再减氮10%(Ns)4个处理,研究了农艺深施及其配施缓控释氮肥对稻田田面水中氮素形态和浓度、稻田氮素流失量、水稻氮素吸收与产量、氮盈余量、土壤有效氮含量的影响。结果表明:与Nc处理相比,Nd和Ns处理均能降低氮素损失高风险期(基肥后7 d内,分蘖肥后5 d内,穗肥后4 d内)稻田田面水中总氮(TN)浓度,降幅分别为18.5%和49.8%,且主要降低了可溶性总氮(DTN),尤其是铵态氮(NH<sub>4</sub>-N)的浓度;Nd和Ns处理稻田TN流失量分别降低了19.1%和47.6%,氮肥表观利用率分别提高了15.3、3.9个百分点,氮素盈余量分别降低了6.8%和38.1%,且土壤有效氮含量和水稻产量均有增加的趋势。研究表明,基肥“干施湿混”结合追肥“以水带氮”的农艺深施技术能降低稻田田面水中氮素浓度,提高氮肥利用率,减少氮肥损失,是一项值得推广的操作简便、绿色增效的施肥技术,再配施缓控释氮肥,能进一步降低田面水中氮素浓度和氮肥损失,同时能减少氮肥用量。

**关键词:**深施;缓控释氮肥;水稻;氮损失;产量

中图分类号:S511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)05-0858-09

doi: 10.13254/j.jare.2021.0171

### Effects of agronomic deep application and combined application of controlled release nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen loss in a paddy field

ZHANG Fulin<sup>1</sup>, LIU Dongbi<sup>1\*</sup>, FAN Xianpeng<sup>1</sup>, XIA Ying<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyi<sup>1</sup>, CHENG Zizhen<sup>1</sup>, WU Maoqian<sup>1</sup>, GAO Hongbing<sup>2</sup>, MAO Bo<sup>2</sup>, KONG Xiangqiong<sup>3</sup>

(1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, National Station for Qianjiang Agro-Environment, Hubei Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control, Qianjiang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China; 2. Jingzhou Agricultural Technology Extension Center, Jingzhou 434000, China; 3. Xingshan Agricultural Environmental Protection Station, Xingshan 443700, China)

**Abstract:** The study investigated the effect of agronomic deep placement of basal fertilizer (dry fertilization and wet mixing) and

收稿日期:2021-03-23 录用日期:2021-06-02

作者简介:张富林(1977—),男,山西河曲人,博士,研究员,从事面源污染监测与防控研究。E-mail:fulinzhang@126.com

\*通信作者:刘冬碧 E-mail:595049768@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800502, 2016YFD0800506);湖北省技术创新专项(2018ABA097);湖北省农业科技创新中心项目(2016-620-000-001-019)

**Project supported:** National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800502, 2016YFD0800506); Major Special Projects of Technological Innovation of Hubei Province (2018ABA097); Hubei Agricultural Science and Technology Innovation Center Project (2016-620-000-001-019)

topdressings (fertilization before irrigation), combined with application of control released nitrogen (N) fertilizer on N loss and uptake. A plot experiment was conducted with four treatments: no N fertilization (N0), conventional N fertilization (Nc), agronomic deep fertilization (Nd), and agronomic deep fertilization combined with slow controlled release N fertilizer (reduced 10% N rate, Ns). The effects of agronomic deep fertilization of N and its combination with controlled release N were studied concerning the speciation and concentration of N in surface water, N loss from the paddy field, apparent N use efficiency, N surplus, soil available N content, and rice yield. Compared with conventional fertilization, the Nd and Ns treatments reduced the total nitrogen (TN) concentration in surface water of the paddy field in the high-risk period (within 7 days after basal fertilizer, within 5 days after tiller fertilizer, and within 4 days after panicle fertilizer) by 18.5% and 49.8%, respectively. These treatments also mainly decreased the total dissolved nitrogen, especially  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ . TN loss from paddy fields treated by Nd and Ns decreased by 19.1% and 47.6%, apparent N use efficiency increased by 15.3 and 3.9 percentage points, and N surplus decreased by 6.8% and 38.1%, respectively. The available N contents and rice yields showed increasing trends. The findings verified that agronomic deep placement of N can reduce N concentrations in surface water and N loss from paddy fields and can increase N use efficiency. The simple, green, and efficient fertilization technology is worthy of promotion. If combined with slow controlled release N fertilizer, the technology can further reduce N concentration in surface water and N loss from paddy field, as well as N fertilizer use rate.

**Keywords:** deep fertilization; controlled release nitrogen fertilizer; rice; nitrogen loss; yield

水稻是我国65%人口的主食来源,对保障国家粮食安全具有极其重要的作用<sup>[1]</sup>。同时水稻对肥、水资源消耗量大,其耗水量约占农业用水总量的60%~70%,化肥用量占比超过20%。但由于水稻种植中水、肥管理粗放,水稻氮肥当季利用率低于世界平均水平,仅为30%左右<sup>[2-4]</sup>。盈余的氮会以多种途径进入大气或水体环境<sup>[5]</sup>,从而影响地表水、地下水和大气环境质量。因此,在保证水稻产量的同时,提高氮肥利用率、减轻稻田氮素损失对环境的负面影响,一直是我国科技工作者和各级政府部门追求的目标。

在提高水稻氮肥利用率、减少氮素损失方面,已有大量研究,也提出了系列技术措施,如分期施氮、前氮后移、施用缓控释氮肥等<sup>[6-13]</sup>。研究表明,氮肥深施对提高氮肥利用率、降低田面水中氮素浓度、减少氨挥发、降低氮素损失具有显著的作用<sup>[14-17]</sup>。但被广泛推广和应用的肥料深施技术较少,目前,比较受关注的稻田肥料深施技术仅有“侧条施肥”技术,但该技术还需解决农机和肥料品种配套等问题<sup>[18]</sup>,其更适合在平原地区和稻田连片的地区应用。因此研究开发操作简便、适应性广的肥料深施技术很有必要。

在20世纪八九十年代,出现一些关于水稻简便肥料深施技术的研究,如陈荣业等<sup>[19]</sup>1987年提出了追肥“以水带氮”深施技术,1991年朱兆良院士<sup>[20]</sup>提出了基肥“无水层混施”深施技术,并将基肥“无水层混施”和追肥“以水带氮”组合形成了“节水水肥综合管理技术”。研究表明,这些单项和组合深施技术都能显著降低稻田田面水中氮素含量和氨挥发,减少氮肥损失,提高氮肥利用率,并能实现增产<sup>[19-21]</sup>。

虽然这些简便的肥料深施技术可以增加作物产

量、提高氮肥利用率、降低氮损失,但随着农村劳动力的减少以及农民对生产工序简化的追求,一些技术难以适应当前生产实际。如基肥“无水层混施”深施技术,其操作工序为“施基肥-旋耕或翻耕-泡田-旋耙整田”,而实际生产中,农民通常在泡田后就旋耕耙田,很少会在泡田前进行旋耕或翻耕。这影响了该技术在当前的广泛推广应用。因此,有必要研究开发更符合当前生产习惯的简便深施技术。

本研究将基肥“无水层混施”技术进行优化,将其工序由“施基肥-旋耕或翻耕-泡田-旋耙整田”改为“干施湿混”,即“施基肥-泡田-旋耙整田”,并将其与追肥“以水带氮”技术组合,称之为“农艺深施”技术,探讨该技术以及该技术与缓控释氮肥配施对稻田氮素损失、水稻氮素吸收利用及产量的影响,以期为防控稻田氮素损失、促进水稻产业绿色发展提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

试验点位于湖北省江陵县三湖管理区清水口大队,该试验点处于江汉平原腹地,属亚热带季风湿润气候区,年均降雨量1 000 mm,年均气温16.2℃,全年无霜期约254 d,土壤为潮土型水稻土。试验田土壤的基本理化性质:pH 6.48,有机质27.2 g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.95 g·kg<sup>-1</sup>,全磷0.54 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮134 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷18.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾244 mg·kg<sup>-1</sup>,硝态氮5.66 mg·kg<sup>-1</sup>,铵态氮1.63 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验设置4个处理:①不施氮肥(N0);②常规施

肥(Nc,当地农技部门推荐的施肥模式),氮肥为尿素,用量为195 kg·hm<sup>-2</sup>(以N计),分成基肥、分蘖肥和穗肥,按40%、30%和30%比例施用,基肥在泡田后撒施于田面,再旋耕耙,2次追肥均在灌溉后撒施于田面;③农艺深施(Nd),氮肥品种、用量和分配时期与Nc处理相同,但泡田前先撒施基肥、再上水泡田和旋耕耙整田,2次追肥均在灌溉前先撒施于田面;④农艺深施配施缓控释氮肥再减氮10%(Ns),施氮总量比Nc处理减少10%,分成基肥和穗肥,按70%和30%比例施用,氮肥为普通尿素和包膜尿素(N 43.2%,释放期80 d),施氮量各占50%,且包膜尿素全部作基肥施用,施肥方式同Nd处理。各处理均配施等量磷肥和钾肥,磷肥为过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%),用量为67.5 kg·hm<sup>-2</sup>(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计),全部基施;钾肥为氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%),用量为90 kg·hm<sup>-2</sup>(以K<sub>2</sub>O计),分成基肥和穗肥,各50%施用。试验各处理每次施肥和灌溉均在同日完成,肥料用量和施肥方法见表1。每处理重复3次,小区面积30 m<sup>2</sup>,随机区组排列。各小区单排单灌,田埂用塑料膜包裹,防止肥水互串。

水稻品种为丰两优香1号,采用育苗人工移栽,移栽规格为16.7 cm×26.7 cm,每墩2株。试验于2019年5月10日播种,6月7日N0、Nd和Ns处理先施基肥,所有处理同时上水泡田后,Nc处理再施基肥,最后所有处理同时旋耕耙田,6月9日移栽水稻,6月15日施分蘖肥,群体80%够苗后晒田,7月29日施穗肥,收获前一周自然断水搁田,9月27日人工收获。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 田面水各形态氮含量

每次施肥后,在上午8:00—10:00采集各小区田面水样品,如果遇到降雨但不影响采样操作,则继续采样至施肥后7~9 d。每个小区采集8个样点,混合后测定总氮(TN)、可溶性总氮(DTN)、颗粒态氮(PN)、可溶性有机氮(DON)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)。TN采用碱性过硫酸钾消煮-紫外分光

光度法测定;DTN先用定性滤纸过滤,碱性过硫酸钾消煮-紫外分光光度法测定;NO<sub>3</sub>-N直接用紫外分光光度法测定;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用靛酚蓝比色法测定;PN用TN与DTN差减计算获得,DON用DTN与NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N差减计算获得。

#### 1.3.2 地表径流氮流失量和氮肥表观流失系数

降雨停止后立即打开小区排水口产流,人工测量产流前后田面水位,测算径流量;产流时,在小区排水口动态采集径流水样,测定径流水中氮含量,氮含量测定方法同“1.3.1”;用径流量与动态径流样品氮含量的平均值核算各次径流的氮流失量。

#### 1.3.3 水稻产量、吸氮量、氮肥表观利用率及氮素盈余量

水稻收获时,各小区单打单收,记录产量。收获前在每个小区定点调查30墩水稻的有效分蘖数,计算其平均有效分蘖数,然后在每个小区齐地采集与平均有效分蘖数接近的5墩水稻,制备籽粒和秸秆样品,分析全氮含量<sup>[22]</sup>,计算植株吸氮量、氮肥表观利用率及稻田氮素盈余量。氮素盈余量为施氮量与籽粒吸氮量的差值。

#### 1.3.4 土壤理化指标

土壤pH、有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、硝态氮和铵态氮等基本理化指标用常规方法测定<sup>[22]</sup>。

### 1.4 数据处理

数据分析和绘图采用Microsoft Office Excel,处理之间差异显著分析用SPSS 11.5最小显著性差异法(LSD)。

## 2 结果与分析

### 2.1 农艺深施及配施缓控释氮肥对田面水中氮素浓度和形态的影响

#### 2.1.1 农艺深施及配施缓控释氮肥对氮素损失高风险期田面水氮素浓度的影响

从图1可见,各施氮肥处理(Nc、Nd、Ns)稻田田面水中TN、DTN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N等主要形态氮素浓度都基本

表1 各处理施肥方式和养分用量

Table 1 Nutrients application rate and fertilization method in the field experiment

处理 Treatments	施肥方式 Fertilization method	养分施用量 Nutrients application rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )					
		基肥 Basal fertilization			分蘖肥 Tillering fertilization		穗肥 Panical fertilization
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	N	K <sub>2</sub> O
N0	先施基肥再泡田,先追肥再灌水	0	67.5	45.0	0	0	45.0
Nc	先泡田再施基肥,先灌水再追肥	78.0	67.5	45.0	58.5	58.5	45.0
Nd	先施基肥再泡田,先追肥再灌水	78.0	67.5	45.0	58.5	58.5	45.0
Ns	先施基肥再泡田,先追肥再灌水	122.8	67.5	45.0	0	52.7	45.0

在每次施肥后迅速达到最高,而后逐渐降低,在施基肥后第4天、分蘖肥后第5天、穗肥后第4天趋于稳定。各形态氮素浓度在施基肥后第3天、施分蘖肥后第3天和第7天、施穗肥后第5天,出现不同程度的升高,可能与上述日期分别发生的8.2、26.1、65.5 mm和

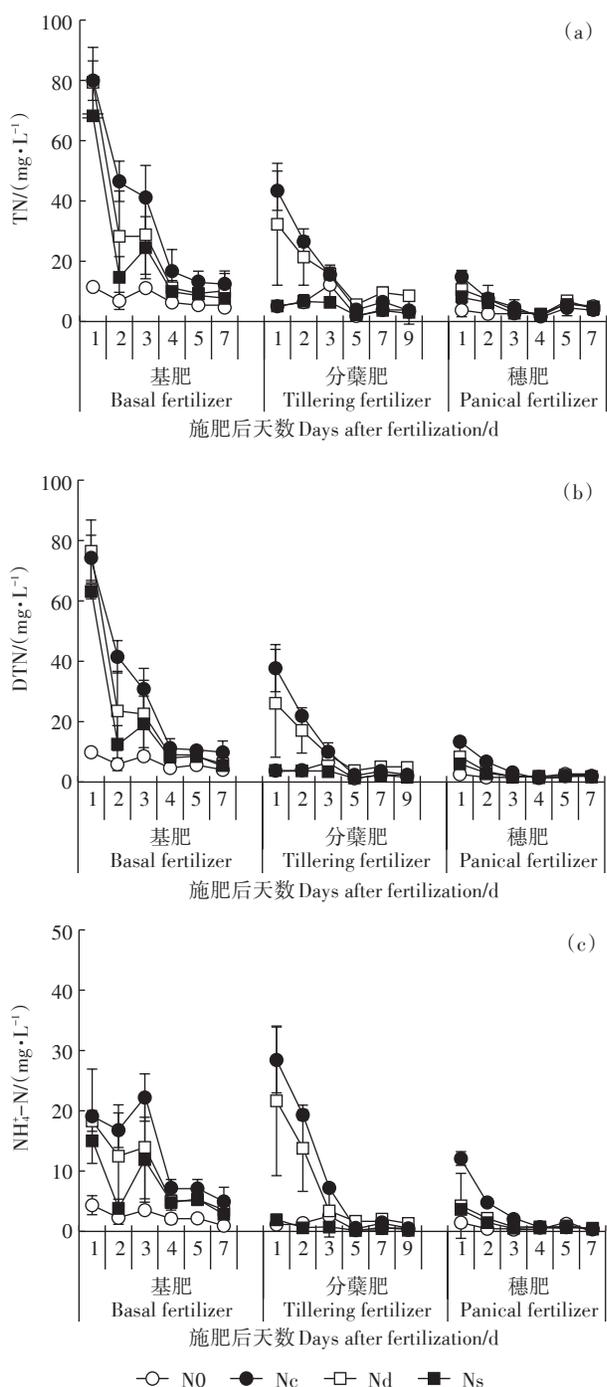


图1 农艺深施及配施缓控释氮肥对田面水中氮素浓度变化动态的影响

Figure 1 Effect of agronomic deep application and combined application of controlled release N fertilizer on dynamic changes of nitrogen concentrations in surface water

46.9 mm降雨对田面水的扰动有关(图1)。施基肥4 d后,田面水中氮素浓度虽然大幅降低,并趋于稳定,但其浓度仍然较高,即使到了第7天, $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_c$ 、 $\text{N}_d$ 和 $\text{N}_s$ 处理的TN浓度仍分别高达4.63、12.49、10.19  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和7.67  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,比施分蘖肥后第5天的TN浓度分别高150.4%、216.8%、82.5%和242.7%。田面水中氮素浓度的高低与氮素径流流失、氨挥发等密切相关。因此,施基肥后7 d内、施分蘖肥后5 d内、施穗肥后4 d内这三个时段都是稻田氮素损失的高风险期。

分析氮素损失高风险期稻田田面水中TN平均浓度(图2)可知,与 $\text{N}_c$ 相比, $\text{N}_d$ 和 $\text{N}_s$ 处理TN平均浓度显著降低,且 $\text{N}_s$ 处理也显著低于 $\text{N}_d$ 处理, $\text{N}_d$ 和 $\text{N}_s$ 处理TN平均浓度分别比 $\text{N}_c$ 低18.5%和49.8% ( $P < 0.05$ )。在形态上,DTN是TN浓度降低的主要贡献者, $\text{N}_d$ 和 $\text{N}_s$ 处理贡献分别高达98.5%和87.7%,而PN的贡献分别仅为1.5%和12.3%。在DTN中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低的贡献较大,分别高达82.9%和68.3%;其次是DON,分别为17.6%和17.2%;而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的贡献分别仅为-2.0%和2.2%(图3)。

#### 2.1.2 农艺深施及配施缓控释氮肥对氮素损失高风险期田面水氮素形态构成的影响

进一步对氮素损失高风险期氮素形态构成(各形态氮素占总氮的比例)进行分析(表2)可知,各施氮肥处理,田面水中氮素都是以DTN为主,其占TN的比例均超过70%,在DTN中,又以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和DON为主。与 $\text{N}_c$ 处理相比, $\text{N}_d$ 和 $\text{N}_s$ 处理的DTN占TN比例

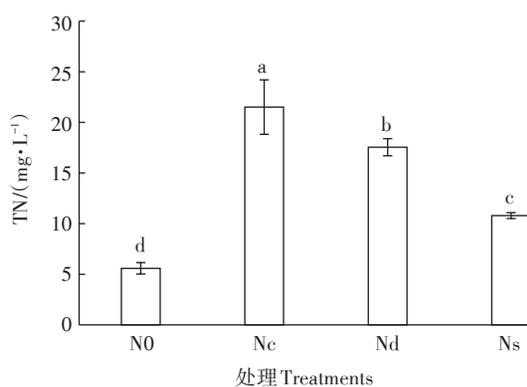


图2 农艺深施及配施缓控释氮肥对氮素损失高风险期田面水中TN浓度的影响

Figure 2 Effect of agronomic deep application and combined application of controlled release N fertilizer on TN concentrations in surface water during the period of high N loss

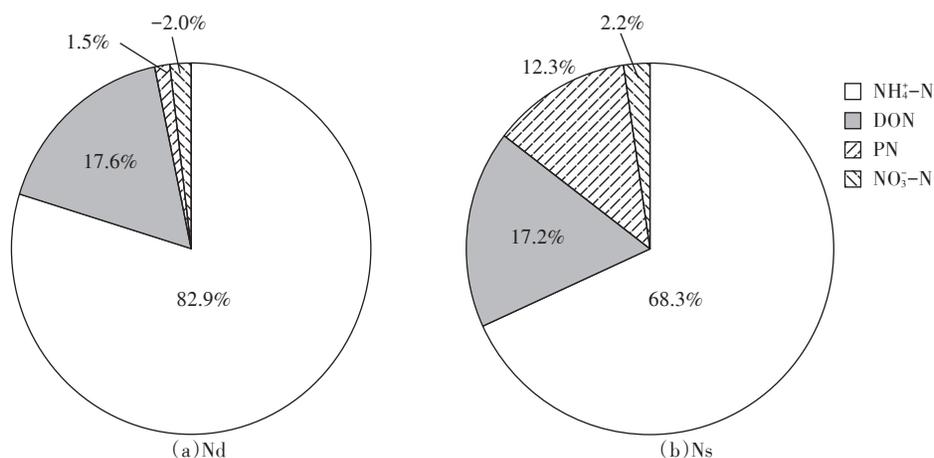


图3 氮素损失高风险期田面水中不同形态氮素在TN浓度变化中的贡献

Figure 3 Contribution of different forms of nitrogen to the changes of TN concentration in surface water during the period of high N loss

表2 各处理氮素损失高风险期田面水中氮素形态构成(%)

Table 2 Fractionation of N forms in surface water in different treatments during the period of high N loss(%)

处理 Treatments	DTN	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	DON	PN
N0	73.0±4.7b	24.8±0.9a	27.4±1.2c	20.8±3.0c	27.0±4.7a
Nc	83.6±2.1a	7.7±0.6d	49.1±0.9a	26.8±1.5b	16.4±2.1b
Nd	80.0±2.5a	9.9±1.3c	41.3±6.0b	28.8±3.4b	20.1±2.5b
Ns	79.2±2.0a	13.0±1.0b	29.9±1.5c	36.0±2.3a	20.8±2.0b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Notes: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at P<0.05 level. The same below.

降低,而PN占TN的比例增加,且DTN占比的降低是NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N占比降低所致,二者NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N占比分别比Nc处理显著降低7.8、19.2个百分点,而NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和DON占比则分别比Nc处理增加2.2、5.3个百分点和2.0、9.2个百分点(表2)。

### 2.2 农艺深施及配施缓控释氮肥对稻田地表径流氮素流失的影响

水稻季共产流3次,总径流量为51.2 mm。前2次产流(6月19日和6月22日)分别发生在施分蘖肥后第4天和第7天,虽然Nd和Nc处理的蘖肥施用量相同,但Nd处理两次产流径流水中TN浓度都低于Nc处理,其TN流失量分别比Nc处理低8.4%和24.0%;Ns处理因未施分蘖肥,其两次产流径流水中TN浓度显著低于Nc处理(P<0.05),也低于Nd处理,其TN流失量比Nc处理分别降低29.9%和56.6%。第三次产流(7月18日)发生在施分蘖肥后第33天,与施分蘖肥间隔时间较长,各处理径流水TN浓度之间无显著差异,TN流失量之间差异也不显著(P<0.05)。整个水稻季,与Nc处理相比,Nd和Ns处理TN流失量

分别显著降低19.1%和47.6%(表3)。

### 2.3 农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素吸收利用的影响

从表4可见,Nc处理水稻籽粒产量为10 267 kg·hm<sup>-2</sup>,吸氮量为192.9 kg·hm<sup>-2</sup>,氮肥表观利用率为20.4%。与Nc处理相比,Nd处理水稻籽粒产量和吸氮量略有增加,分别增加4.6%和15.6%,同时氮肥表观利用率也比Nc处理高15.3个百分点;Ns处理水稻籽粒产量和吸氮量与Nc处理持平,但氮肥表观利用率比Nc处理提高3.9个百分点。

### 2.4 农艺深施及配施缓控释氮肥对氮素残留损失的影响

由各处理氮素的盈亏情况(表5)可知,不施氮处理土壤氮素处于亏缺状态,亏缺量为95.4 kg·hm<sup>-2</sup>,各施氮处理均处于盈余状态。Nc处理土壤盈余量为76.4 kg·hm<sup>-2</sup>,Nd和Ns处理的氮素盈余量均较Nc处理有所降低,特别是Ns处理,其氮素盈余量比Nc处理低38.1%。而进一步分析各处理土壤氮素含量发现,与Nc处理相比,Nd和Ns处理的土壤有效氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和

表3 农艺深施及施用缓控释氮肥对稻田地表径流氮素流失的影响

Table 3 Effect of agronomic deep application and combined application of controlled release N fertilizer on runoff loss of N from paddy field

日期 Date	处理 Treatments	径流量 Runoff/mm	TN浓度 TN concentration/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TN流失量 TN runoff losses/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
6月19日	N0	10.0	4.30±0.39c	0.43±0.04c
	Nc	10.0	10.68±1.19a	1.07±0.12a
	Nd	10.0	9.75±1.81ab	0.98±0.18ab
	Ns	10.0	7.46±1.39b	0.75±0.14b
6月22日	N0	33.7	3.81±0.12c	1.28±0.04c
	Nc	33.7	8.54±0.30a	2.88±0.10a
	Nd	33.7	6.50±1.79b	2.19±0.60b
	Ns	33.7	3.70±0.64c	1.25±0.22c
7月18日	N0	7.5	1.30±0.31a	0.10±0.02a
	Nc	7.5	1.68±0.80a	0.13±0.06a
	Nd	7.5	1.75±0.18a	0.13±0.01a
	Ns	7.5	1.90±0.44a	0.14±0.03a
水稻季	N0	51.2	3.53	1.81±0.04c
	Nc	51.2	7.95	4.08±0.02a
	Nd	51.2	6.43	3.30±0.77b
	Ns	51.2	4.17	2.14±0.35c

注:同一日期同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: The different lowercase letters in a column on the same date indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$  level.

表4 农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素吸收利用的影响

Table 4 Effect of agronomic deep application and combined application of controlled release N fertilizer on grain yield and N utilization of rice

处理 Treatments	籽粒产量 Grain yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	植株吸氮量 Plant N uptake/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	氮肥表观利用率 N apparent efficiency/%
N0	8 200±448b	153.2±22.5b	—
Nc	10 267±178a	192.9±11.3a	20.4
Nd	10 737±203a	222.9±24.5a	35.7
Ns	10 320±383a	195.8±5.0a	24.3

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N之和)含量均有增加趋势,分别增加16.5%和20.9%(表5)。

### 3 讨论

#### 3.1 稻田田面水氮素浓度与形态

许多研究表明,施氮肥后田面水中氮素浓度迅速达到峰值,之后很快降低,在施基肥和分蘖肥后氮素浓度在一周左右降至与不施氮肥处理持平,施穗肥后3 d左右降至与不施氮肥基本接近<sup>[23-28]</sup>,而且田面水中

表5 农艺深施及配施缓控释氮肥对土壤氮素盈余与氮含量的影响

Table 5 Effect of agronomic deep application and combined application of controlled release N fertilizer on N surplus and N content of soil

处理 Treatments	施氮量 N application rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	氮素盈余量 N surplus amount/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	土壤有效氮含量 Soil available N content/(mg·kg <sup>-1</sup> )
N0	0	-95.4±10.4c	7.2±1.5b
Nc	195.0	76.4±2.3a	11.5±2.4a
Nd	195.0	71.2±12.1a	13.4±1.5a
Ns	175.5	47.3±5.3b	13.9±2.7a

注:氮素盈余量=施氮量-籽粒吸氮量。

Notes: N surplus amount=N application rate-grains N uptake.

氮素以DTN为主,在DTN中,又以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和DON为主<sup>[28]</sup>。本研究与以往研究类似,各施氮处理田面水中TN、DTN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N等主要形态氮素的浓度都基本在每次施肥后迅速达到最高,在施基肥后第4天、分蘖肥后第5天、穗肥后第4天趋于稳定。而且田面水中氮素都是以DTN为主,其占TN的比例均超过70%,在DTN中,又以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和DON为主。此外,虽然施基肥4 d后,田面水中氮素浓度大幅降低,并趋于稳定,但即使在施基肥后第7天,N0、Nc、Nd和Ns处理田面水中TN浓度仍分别比施分蘖肥后第5天高150.4%、216.8%、82.5%和242.7%。因此,施基肥后7 d内、施分蘖肥后5 d内、施穗肥后4 d内都是稻田氮素损失的高风险期。

全国多点联网研究发现“无水层混施”技术和“无水层混施”与“以水带氮”组合技术都能明显降低田面水中氨氮含量<sup>[21]</sup>,王德建等<sup>[29]</sup>运用大型原状土柱的研究也发现,水稻基肥干施会降低田面水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量。陈荣业等<sup>[19]</sup>的研究表明,追肥“以水带氮”技术可将表施的60%以上的化肥氮带入土层,从而降低田面水中氮素浓度。为了全面揭示农艺深施对田面水中氮素浓度的影响规律,本研究动态监测了各施肥处理每次施肥后不同形态氮的浓度,结果表明,在氮素损失高风险期(施基肥后7 d内,施分蘖肥后5 d内,施穗肥后4 d内),农艺深施处理(Nd)能降低田面水中氮素浓度,其TN浓度比常规肥水处理低18.5%(图2),与以往研究类似,农艺深施会使NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度降低,且NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度降低是导致田面水中TN浓度降低的主要原因,其贡献率高达82.9%(图3)。农艺深施配施缓控释氮肥再减氮10%不仅能进一步降低TN浓度(降幅高达49.8%,图2),还因省去分蘖肥的施用,缩短氮素损失高风险期时长。常规施肥和农艺深

施下,氮素损失高风险期时长为16 d(基肥后7 d、分蘖肥后5 d、穗肥后4 d),而农艺深施配施缓控释氮肥能使高风险期时长降到11 d(图1)。农艺深施降低稻田田面水中氮素浓度可能是由于先施氮肥再灌水的情况下氮素随水进入土层,被土壤吸附、固定,从而使田面水中氮素浓度降低。农艺深施之所以使 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度降幅较大,一是与 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 是稻田田面水中的主要存在形态有关,二是与 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 容易被土壤吸附固定有关。农艺深施配施缓控释氮肥进一步降低田面水中氮素浓度,这可能是由于施用缓控释氮肥降低了施氮量,且缓控释氮肥本身氮素释放缓慢。此外,两种施肥模式都有降低DTN、增加PN在TN中占比的作用,且DTN占比的降低是由 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 占比降低所致(表2)。

### 3.2 稻田氮素损失

氨挥发损失氮量占施氮量的8%~39%<sup>[30-31]</sup>,是稻田氮素损失的主要途径之一<sup>[32-34]</sup>,且田面水中的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度是氨挥发的决定因素之一<sup>[35]</sup>。以往研究表明,“无水层混施”或者“无水层混施”与“以水带氮”组合,都有降低田面水中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量、降低氨挥发量的作用<sup>[21,29]</sup>。本研究中,农艺深施以及农艺深施配施减量缓控释氮肥都能明显降低氮素损失高风险期田面水中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度,两种处理下 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度分别比常规施肥处理降低31.1%和69.4%,而且农艺深施配施缓控释氮肥还能缩短氮素损失高风险期时长。这意味着农艺深施技术能降低稻田氨挥发损失,再配施缓控释氮肥,降低效果更明显。

田面水中氮素浓度高低及其持续时间长短与稻田氮素径流流失量有直接关系。本研究发现,农艺深施及农艺深施配施缓控释氮肥都能降低氮素损失高风险期田面水中氮素浓度,而且农艺深施配施缓控释氮肥还能缩短高风险期时长,因而,两种施肥模式都有减少稻田氮素径流流失的作用。实际监测也表明,与常规施肥处理相比,农艺深施能使稻田TN流失量减少19.1%,再配施缓控释氮肥同时减氮10%能使TN流失量减少47.6%(表3)。

陈苇等<sup>[21]</sup>采用<sup>15</sup>N同位素示踪技术研究发现,追肥“以水带氮”技术能使氮素的回收率比常规方法提高7.9%,土壤残留率提高7.1%,进而能使氮素总体损失率降低14.9%。朱兆良<sup>[20]</sup>的研究表明,“无水层混施”或者“无水层混施”与“以水带氮”组合,都能提高氮肥利用率,降低氮素总体损失量。王德建等<sup>[29]</sup>的研究发现,水稻基肥“干耕施”虽然比“湿耙施”增加了氮素

的淋失量,但降低了氨挥发量、增加了水稻吸氮量,进而总体上降低了氮素的损失量。本研究表明,与常规施肥相比,农艺深施及农艺深施配施缓控释氮肥再减氮10%都有一定的降低氮素盈余量的作用,特别是后者能使氮素盈余量降低38.1%,而二者的土壤有效氮含量却均有增加趋势,表明农艺深施和农艺深施配施缓控释氮肥再减氮10%都会降低氮素的总损失量。

### 3.3 水稻产量及氮素吸收利用

以往关于“以水带氮”“无水层混施”的研究都发现,这些技术有促进水稻对氮素吸收进而增产的作用<sup>[20-21,29]</sup>。也有许多研究表明,施用缓控释氮肥同时减少一定施氮量,并不会使水稻减产。如石敦杰等<sup>[11]</sup>对湖南毛里湖中稻的研究表明,与普通尿素相比,施用包膜尿素同时减氮20%条件下,水稻产量未降低。刘红江等<sup>[12]</sup>在江苏苏州的研究表明,与施用普通尿素相比,氮肥减施18.2%的条件下施用脲酶抑制剂、脲醛尿素、草酰胺,水稻不会减产。肖雪玉等<sup>[13]</sup>在湖南浏阳的研究表明,与施用普通尿素相比,施用树脂包膜尿素且氮肥减施10%~30%时,水稻仍略有增产趋势。本研究中,与常规施肥处理相比,农艺深施促进了水稻对氮素的吸收,提高了氮肥利用率,进而使水稻增产;农艺深施配施缓控释氮肥处理中,虽然氮肥用量降低10%,但氮肥利用率提高了3.9个百分点,水稻产量略有增加。

综上,按“施基肥-泡田-旋耙整田”的方式施用基肥,并采用“以水带氮”技术追肥,能降低氮素损失高风险期稻田田面水中氮素浓度,减少稻田氮素径流流失及总损失量,提高氮肥利用率,使水稻增产。该农艺深施技术再配施缓控释氮肥,即使施氮量减少10%,也不会使水稻减产,反而能进一步降低田面水中氮素浓度,缩短氮素损失高风险期的时长,并能显著减少氮素损失。

## 4 结论

(1)农艺深施能降低稻田田面水中氮素浓度,提高水稻氮肥利用率,减少氮肥损失,且有一定的增产作用。

(2)农艺深施配施缓控释氮肥再减氮10%,能进一步降低稻田田面水中氮素浓度和氮肥损失量,且不会使水稻减产。

(3)农艺深施是一项值得推广的绿色施肥技术,再配施缓控释氮肥,效果更突出。

## 致谢:

郑煜鞭、聂玉莲、祝栋梁、余延丰、陈群华等同志也参加了部分工作,特此致谢。

## 参考文献:

- [1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414. ZHU D F, ZHANG Y P, CHEN H Z, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414.
- [2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924. ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [3] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881-888. XUE L H, YANG L Z, SHI W M, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888.
- [4] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 545-553. WANG W N, LU J W, LU M X, et al. Effect of nitrogen fertilizer application and nitrogen use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 545-553.
- [5] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方6省农田养分现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 1-9. LU R K, SHI Z Y, SHI J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 1-9.
- [6] 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, 100. ZHANG L J, MA Z W, MA Y H, et al. Dynamic variation of nitrogen and phosphorus under optimize fertilization and slow-release fertilizer in paddy field surface water[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 90-94, 100.
- [7] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 前氮后移对水稻产量形成和农田氮素流失的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(5): 82-87. LIU H J, GUO Z, ZHENG J C, et al. Effect of postponing N application on rice yield formation and nitrogen runoff losses from the field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(5): 82-87.
- [8] 段小丽, 张富林, 倪承凡, 等. 前氮后移对水稻产量形成和田面水氮素动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 255-261. DUAN X L, ZHANG F L, NI C F, et al. Effect of postponing nitrogen application on rice yield formation and nitrogen dynamics in surface water of paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 255-261.
- [9] 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. WANG X Z, ZHU J G, HOSEN Y, et al. Dynamic changes and modeling of nitrogen in paddy field surface water after application with different doses of urea[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 852-856.
- [10] 李莹, 司马小峰, 丁仕奇, 等. 控释肥对农田氮磷流失的影响研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(25): 12466-12470. LI K, SIMA X F, DING S Q, et al. Effects of controlled release fertilizer on loss of nitrogen and phosphorus from farmland[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(25): 12466-12470.
- [11] 石敦杰, 杨兰, 荣湘民, 等. 控释氮肥和氮磷减量对水稻产量及田面水氮磷流失的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 44-47. SHI D J, YANG L, RONG X M, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer and nitrogen and phosphorus reduction on rice yield and nitrogen and phosphorus loss from surface water[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(11): 44-47.
- [12] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 783-789. LIU H J, GUO Z, ZHENG J C, et al. Effects of different types of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen loss of surface runoff[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(4): 783-789.
- [13] 肖雪玉, 朱文博, 杨丹, 等. 施用控释氮肥对早稻田面水氮素动态变化和水稻产量的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2252-2257. XIAO X Y, ZHU W B, YANG D, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen dynamic characteristics in surface water and yield in early paddy field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(12): 2252-2257.
- [14] LIU T Q, FAN D G, ZHANG X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 80-90.
- [15] PAN S G, WEN X C, WANG Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in south China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 139-149.
- [16] 冯国禄, 龚军慧. 尿素深施条件下模拟稻田中氮磷的动态特征及其降污潜力分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(7): 114-119. FENG G L, GONG J H. Dynamics of nitrogen and phosphorus in paddy field under deep application condition of urea pill and its pollution-reducing potential[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(7): 114-119.
- [17] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 6-10. ZHU L Q, XIA X J, HU Q Y, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 6-10.
- [18] 段然, 王伟政, 李平, 等. 洞庭湖区水稻侧条施肥技术应用与展望[J]. 作物研究, 2013, 27(5): 503-506. DUAN R, WANG W Z, LI P, et al. Application and prospect of side bar fertilization technique for rice in Dongting Lake region[J]. *Crops Research*, 2013, 27(5): 503-506.
- [19] 陈荣业, 张建才, 郭望模, 等. 稻田以水带氮肥(尿素)深施技术研究[J]. 中国水稻科学, 1987, 1(3): 184-191. CHEN R Y, ZHANG

- J C, GUO W M, et al. Deep placement of N-fertilizer (urea) top-dressed to unsaturated paddy soil with reflooded water[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1987, 1(3):184-191.
- [20] 朱兆良. 稻田节氮的水肥综合管理技术的研究[J]. 土壤, 1991(5): 241-245. ZHU Z L. Study on integrated management technology of water and fertilizer for nitrogen-saving in rice field[J]. *Soils*, 1991(5): 241-245.
- [21] 陈苇, 陈荣业, 叶元林. 用<sup>15</sup>N标记来探讨水稻以水带氮追肥施用技术的氮肥利用率问题[J]. 浙江农业科学, 1990(6): 270-272. CHEN W, CHEN R Y, YE Y L. A <sup>15</sup>N marker was used to study the nitrogen use efficiency of topdressing technology of deep applying nitrogen fertilizer with irrigation[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 1990(6): 270-272.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2008. BAO S D. Soil agri-chemistry analysis[M]. 3<sup>rd</sup> Edition. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2008.
- [23] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 727-733. TIAN Y H, HE F Y, YIN B, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 727-733.
- [24] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 893-900. TIAN Y H, HE F Y, YIN B, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 893-900.
- [25] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 838-846. SHI Z S, XU Y B, LEI B K, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface waters of paddy soils in the northern area of Erhai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 838-846.
- [26] 金洁, 杨京平, 施洪鑫, 等. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 357-361. JIN J, YANG J P, SHI H X, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 357-361.
- [27] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 茗溪流域不同施肥条件下稻田田面水氮磷动态特征及产量研究[J]. 土壤, 2013, 45(2): 207-213. WU J, FAN J B, HE Y Q, et al. Study on rice yield and dynamics of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field under different fertilizations in Tiaoxi River basin[J]. *Soils*, 2013, 45(2): 207-213.
- [28] 张富林, 吴茂前, 夏颖, 等. 江汉平原稻田田面水氮磷变化特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1214-1224. ZHANG F L, WU M Q, XIA Y, et al. Changes in nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field in Jiangnan Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1214-1224.
- [29] 王德建, 张刚, 汪军, 等. 水稻基肥尿素干施与湿施对氮素损失及水稻氮素吸收的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 483-489. WANG D J, ZHANG G, WANG J, et al. Effects of dry deep-placement and wet broadcast of urea as basal in paddy field on nitrogen loss and plant N uptake[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 483-489.
- [30] CAI G X, FRENEY J R, HUMPHREYS E, et al. Use of surface films to reduce ammonia volatilization from flooded rice fields[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1988, 39(2): 177-186.
- [31] ZHU Z L, CAI G X, SIMPSON J R, et al. Processes of nitrogen loss from fertilizers applied to flooded rice fields on a calcareous soil in North-Central China[J]. *Fertilizer Research*, 1989, 18(2): 101-115.
- [32] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6. ZHU Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6.
- [33] Datta S K. Nitrogen transformations in wetland rice ecosystems[J]. *Nutrient Cycling in Agro-Ecosystems*, 1995, 42(13): 193-203.
- [34] FILLERY R P, DE DATTA S K. Ammonia volatilization from nitrogen volatilization as a N loss mechanism in flooded rice fields[J]. *Fertilizer Research*, 1986, 9: 78-98.
- [35] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 265-269. SONG Y S, FAN X H, LIN D X, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 265-269.