

生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季田面水及 渗漏液氮素动态变化的影响^①

周旋^{1,2,3}, 吴良欢^{2,3*}, 戴锋⁴, 董春华¹

(1 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 2 教育部环境修复与生态健康重点实验室/浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 3 浙江省农业资源与环境重点实验室/浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 4 浙江奥复托化工有限公司, 浙江上虞 312300)

摘要:采用二因素随机区组设计, 研究生化抑制剂组合 (N-丁基硫代磷酰三胺 (NBPT)、N-丙基硫代磷酰三胺 (NPPT) 和 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶 (CP)) 与施肥模式(一次性施肥和分次施肥)互作对黄泥田稻季田面水和渗漏液氮(N)素浓度动态变化特征的影响。结果表明, 黄泥田稻季田面水和渗漏液中 N 素形态分别以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主。基肥施用后, 稻田田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和总氮(TN)浓度于第 1 天达到峰值后降低, 第 6 天分别降为峰值的 57.9% ~ 69.1%、41.9% ~ 59.0%(一次性施肥)和 29.9% ~ 60.7%、60.9% ~ 69.7%(分次施肥) 稻田渗漏液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度于第 1 ~ 3 天达到峰值后降低, 第 6 天分别降为峰值的 51.4% ~ 56.5%、56.6% ~ 61.6%(一次性施肥)和 45.3% ~ 57.5%、51.1% ~ 59.6%(分次施肥)。不同施肥模式下, 硝化抑制剂 CP 会提高田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, 而脲酶抑制剂 NBPT/NPPT 或配施 CP 有效抑制脲酶活性, 降低田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值; CP 显著降低渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度, 且 CP 或配施 NBPT/NPPT 有效抑制硝化作用, 降低渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 峰值。新型脲酶抑制剂 NPPT 单独施用及与 CP 配施的稻田田面水和渗漏液 N 素浓度动态变化特征与 NBPT 相似。总之, 生化抑制剂与适宜的氮肥运筹相结合更能有效延缓黄泥田中尿素水解, 抑制硝化作用, 减少 N 素径流和渗漏损失。

关键词: 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 黄泥田; 田面水; 渗漏液

中图分类号: X522; S181 文献标识码: A

氮(N)素是农作物从土壤中吸收的主要营养元素, 施用氮肥是获得作物高产的主要措施。氮肥施用过量不仅降低 N 素利用效率, 而且会通过氨挥发、硝化/反硝化、淋溶及地表径流等途径损失, 危及大气、地下及地表水体环境等^[1-4]。我国稻田单季氮肥用量平均为 $\text{N } 180 \text{ kg/hm}^2$, 较世界稻田平均氮肥施用高 75% 左右^[5]; 太湖地区稻季化学氮肥投入量高达 $\text{N } 300 \text{ kg/hm}^2$, 以尿素为主^[6]。

黄泥田是广泛分布于南方省份的一种典型渗育型水稻土^[7], 通常水分供应不足, 磷、钾养分缺乏, 属于中低产水稻田^[8]。张宣等^[9]研究认为, 黄泥田地区漏肥现象较为严重, 需实行分期施肥。此外, 水稻生育前期重施氮肥, 肥料利用效率低, 浪费农业资源、增加生产成本, 易造成面源污染^[10-11]。

近年来, 随着农田氮磷流失引起的环境污染问题日益加重, 环境友好型新型肥料的研发与施用成为研究热点^[12]。脲酶抑制剂与尿素一起施用可以延缓酰胺态氮向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化进程 7 ~ 14 d, 从而减少 N 素损失, 提高氮肥利用率^[13-15]。施用硝化抑制剂可以延缓 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化, 显著降低 N 素的硝化/反硝化损失、径流与淋溶损失等^[16-18]。

我们前期室内研究结果表明, 脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)对黄泥田土壤中尿素转化具有显著的协同抑制效果^[19]。浙江奥复托化工公司经多次筛选发现一款有良好应用前景的脲酶抑制剂: N-丙基硫代磷酰三胺(NPPT), 具有一定的抑制作用^[20]。此外, 由于普通氮肥的速溶性和施肥后降雨量的不可

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800500)、苕溪流域农村污染治理技术集成与规模化工程示范项目(2014ZX07101-012)、国家重点基础研究发展计划项目(2015CB150502)、浙江省“三农六方”科研协作计划项目和浙江大学-浙江奥复托化工有限公司合作项目资助。

* 通讯作者(finm@zju.edu.cn)

作者简介: 周旋(1986—), 男, 四川攀枝花人, 博士研究生, 主要从事肥料与养分资源综合管理研究。E-mail: zhouxuan_123@126.com

预测性,控制稻田 N 素径流和淋溶流失的工作较为困难^[21-22]。因此,开展脲酶抑制剂(NBPT/NPPT)和硝化抑制剂(CP)配施结合不同施肥模式对黄泥田稻季田面水和渗漏水 N 素动态变化特征的影响研究,旨在揭示黄泥田上合理的尿素与 NBPT/NPPT 和 CP 配施组合,寻找适合该地区水稻高产高效的施肥方式,为生化抑制剂直接配施农用、防控农业面源污染提供科学依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015 年 5—10 月在浙江省金华市婺城区琅琊镇金朱村(29°01'19"N, 119°27'96"E)进行。该区地处金衢盆地东缘,属于中亚热带季风气候,海拔 86 m,年均降雨量 1 424 mm,年均气温 17.5 °C。供试土壤为黄泥田水稻土,前茬为冬闲田。耕层土壤基本理化性质为 pH(H₂O) 5.31(土:水=1:1),有机质 25.60 g/kg,全氮 1.87 g/kg,碱解氮 118.40 mg/kg,有效磷 7.21 mg/kg,速效钾 93.00 mg/kg。

1.2 供试材料

供试水稻品种为杂交籼稻“两优培九”。供试肥料品种氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%)。N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、N-丙基硫代磷酰三胺(NPPT)和 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)24% 乳油剂型为分析纯,由浙江奥复托化工有限公司生产。

1.3 试验设计

试验采用生化抑制剂组合×施氮模式两因素随机区组设计,设置两种施氮模式(一次性施肥和分次施肥)和 6 种生化抑制剂组合及不施氮处理(CK),共 13 个处理(表 1)。氮肥与抑制剂配施前将二者混合均匀。磷(P₂O₅)、钾(K₂O)用量分别为 90 kg/hm²和 120 kg/hm²。磷肥和钾肥全部用作基肥于移栽前一次性施入。栽插密度为 19.8 cm×19.8 cm,25 万穴/hm²,每穴 2 苗。单季稻于 2015 年 5 月 28 日播种,6 月 21 日移栽,10 月 14 日收获。小区面积 30 m²(5 m×6 m),重复 3 次。每小区之间筑埂并用塑料薄膜包裹,区组间设排灌沟,单灌单排。田间其他管理按常规进行。

表 1 氮肥施用方式
Table 1 Nitrogen application methods

处理	施 N 量 (kg/hm ²)	抑制剂类型	抑制剂添加量 (kg/hm ²)	施肥方式
CK	-	-	-	-
U	180	-	-	一次性基施
U+NBPT	180	NBPT	0.9	一次性基施
U+NPPT	180	NPPT	0.9	一次性基施
U+CP	180	CP	0.54	一次性基施
U+NBPT+CP	180	NBPT+CP	0.9+0.54	一次性基施
U+NPPT+CP	180	NPPT+CP	0.9+0.54	一次性基施
U3	180	-	-	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U3+NBPT	180	NBPT	0.9	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U3+NPPT	180	NPPT	0.9	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U3+CP	180	CP	0.54	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U3+NBPT+CP	180	NBPT+CP	0.9+0.54	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U3+NPPT+CP	180	NPPT+CP	0.9+0.54	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2

注:分次施肥(基肥、分蘖肥、穗肥)时间分别为 6 月 21 日、7 月 8 日、8 月 10 日。

1.4 田面水样采集方法

参照文献[23],每次施肥后,从第 2 天起早晨 7:00 左右用 100 ml 医用注射器,不扰动水层,按照对角线取样法,各小区取 5 点上层田面水混合水样约 300 ml。采样时间为施肥后的 1、3、6、12 d。采样结束后,迅速带回实验室分析,未能当日分析的水样保存在 4 °C 冰箱中,于次日分析。

1.5 渗漏水样采集方法

参照文献[24],各小区埋设一根 PVC 管(直径为 20 cm,长度为 80 cm),每根管底部钻两排小孔。埋

设深度为 50 cm,渗水孔距表土 25~35 cm,所收集渗漏水视为 30 cm 处混合水样。底部用尼龙布将小孔包好,以防土壤堵塞而影响水分渗漏。顶部盖盖,以防雨水和灰尘进入。采样时间为施肥后的 1、3、6、12 d。采样结束后,迅速带回实验室分析,未能当日分析的水样保存在 4 °C 冰箱中,于次日分析。

1.6 测定项目与方法

水样 NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法测定,水样 NH₄⁺-N 采用靛酚蓝比色法测定,水样总氮(TN)采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定。

1.7 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行统计分析,处理间差异显著性比较采用邓肯氏新复极差检验法。

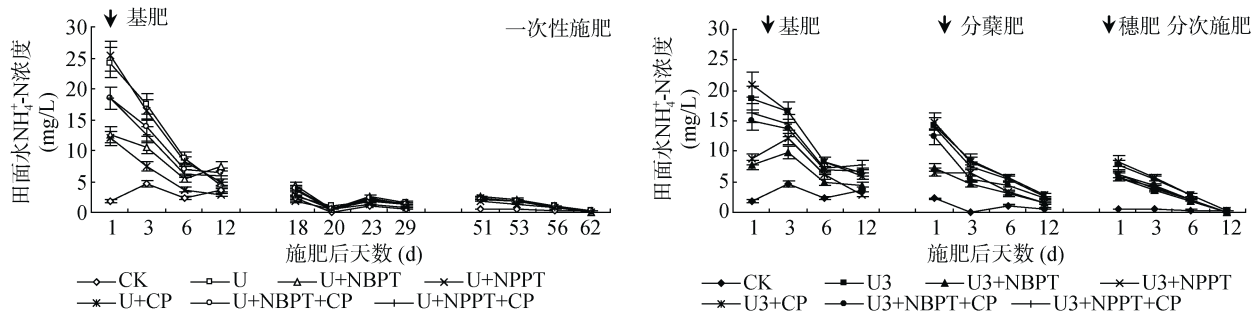
2 结果与分析

2.1 稻田田面水 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TN 浓度动态变化

由图 1、2、3 可知,黄泥田稻季田面水中 N 素形态以 NH₄⁺-N 为主。每次施 N 后稻田田面水 NH₄⁺-N 和 TN 浓度总体呈下降趋势;基肥施用后第 6 天分别降为峰值的 57.9%~69.1%、41.9%~59.0%(一次性施肥)和 29.9%~60.7%、60.9%~69.7%(分次施肥)。

而田面水 NO₃⁻-N 浓度远低于 NH₄⁺-N 浓度,呈先升后降趋势,于第 3 天达到峰值;基肥施用后第 6 天降为峰值的 43.5%~56.5%(一次性施肥)和 38.5%~53.7%(分次施肥)。分次施肥中,基肥施用后田面水 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TN 浓度下降较缓,而后两次施肥下降迅速,可能与水稻吸收利用及田面水温度高、挥发损失快有关。

不同施肥模式下,基肥施用后第 1 天施 N 处理稻田田面水 NH₄⁺-N 浓度均显著高于 CK(图 1)。生化抑制剂组合和施肥模式分别对田面水 NH₄⁺-N 浓度效应极显著($P < 0.001$),两者交互效应不显著($P > 0.05$) (表 2)。U3 处理基肥施用后第 1 天田面水 NH₄⁺-N 浓度较 U 处理降低 22.5%。一次性施肥中,施 N 处理



(一次性施肥处理后两次数据分别对应分次施肥中分蘖肥和穗肥施用后同时间采样分析,下同)

图 1 不同处理下稻田田面水 NH₄⁺-N 浓度动态变化

Fig.1 NH₄⁺-N concentrations in surface water of paddy fields under different treatments

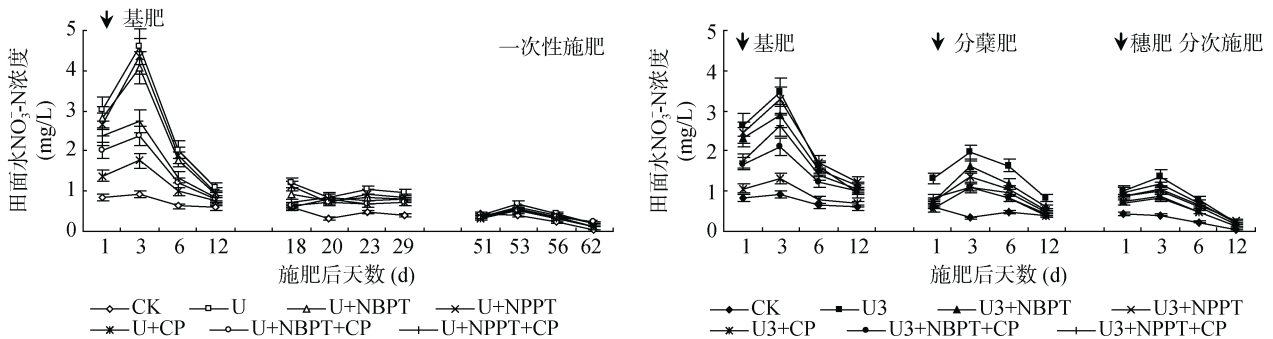


图 2 不同处理下稻田田面水 NO₃⁻-N 浓度动态变化

Fig.2 NO₃⁻-N concentrations in surface water of paddy fields under different treatments

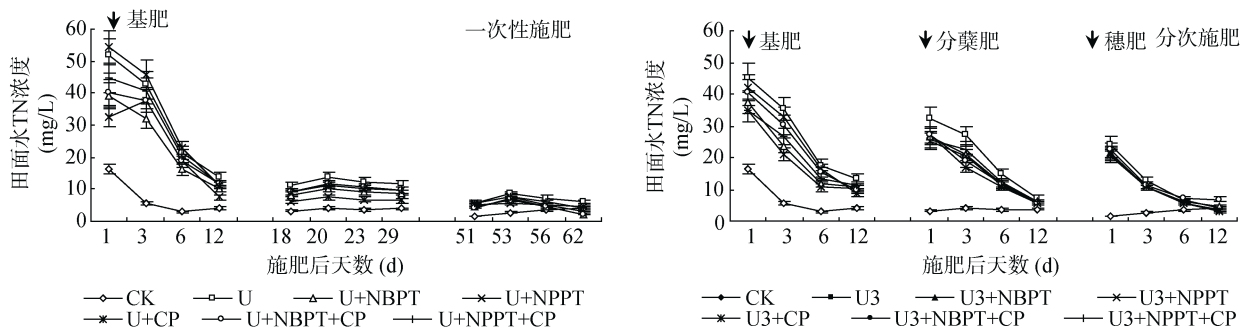


图 3 不同处理下稻田田面水 TN 浓度动态变化

Fig.3 TN concentrations in surface water of paddy fields under different treatments

较 CK 处理增幅为 10.2 ~ 23.4 mg/L；与 U 处理相比，U+NBPT、U+NPPT、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别降低 48.1%、50.4%、23.4% 和 24.0%，而 U+CP 处理增加 4.4%。分次施肥中，施 N 处理较 CK 处理增幅为 5.9 ~ 19.2 mg/L；与 U3 处理相比，U3+NBPT、U3+NPPT、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别降低 58.5%、53.5%、20.5% 和 13.1%，而 U3+CP 处理增加 12.0%。说明黄泥田添加 NBPT/NPPT 可以有效延缓尿素水解，降低田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度，而单独添加 CP 抑制水相 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形态的转化，会提高田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度，增大 N 素径流损失风险。

表 2 基肥施用后第 1 天稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的方差分析

Table 2 Variance analysis of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in surface water of paddy field on 1st day after basal fertilization

变异来源	平方和	自由度	F 值	P 值
施肥模式 (F)	138.062 5	1	29.251	0.000 1
抑制剂 (I)	884.297	5	37.47	0.000 1
F × I	10.511 9	5	0.445	0.812 3
误差	113.28	24		
总变异	1 146.151	35		

2.2 稻田渗漏液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度动态变化

由图 4、5、6 可知，黄泥田稻季渗漏液中 N 素形态以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主。每次施 N 后稻田渗漏液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度总体呈先升后降趋势，于第 1 ~ 3 天达到峰值，且渗漏液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度低于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度。基肥施用后第 6 天，各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度分别降为峰值的 59.0% ~ 61.1% (一次性施肥)、56.3% ~ 60.0% (分次施肥)，51.4% ~ 56.5% (一次性施肥)、45.3% ~ 57.5% (分次施肥) 和 56.6% ~ 61.6% (一次性施肥)、51.1% ~ 59.6% (分次施肥)。

不同施肥模式下，基肥施用后第 1 天施 N 处理稻田渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均显著高于 CK 处理 (图 5)。生化抑制剂组合和施肥模式分别对渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度效应极显著 ($P < 0.001$)，两者交互效应不显著 ($P > 0.05$) (表 3)。U3 处理基肥施用后第 1 天渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较 U 处理降低 21.4%。一次性施肥中，施 N 处理较 CK 处理增幅为 2.4 ~ 5.8 mg/L；与 U 处理相比，U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别降低 15.3%、7.1%、38.7%、22.9% 和 32.5%。分次施肥

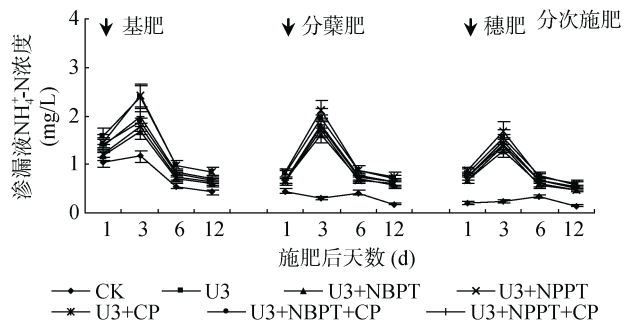
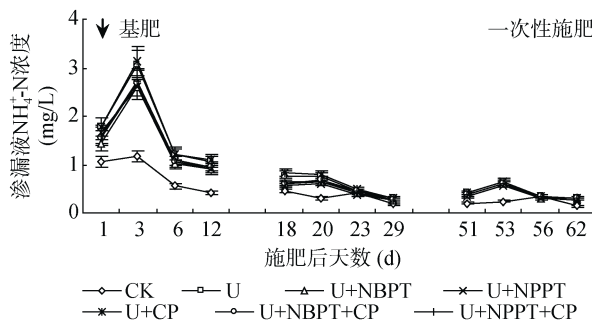


图 4 不同处理下稻田渗漏液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度动态变化
Fig.4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in leachates of paddy fields under different treatments

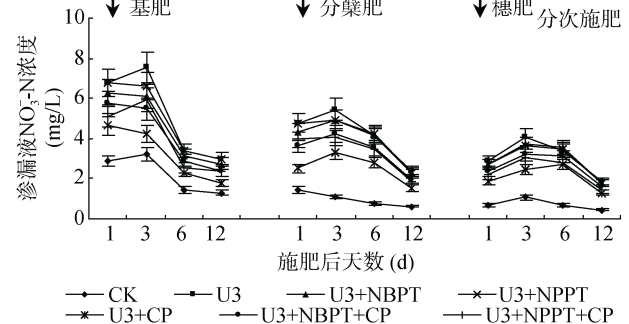
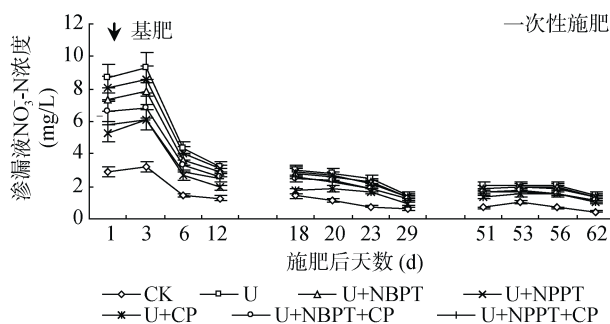


图 5 不同处理下稻田渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度动态变化
Fig.5 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations in leachates of paddy fields under different treatments

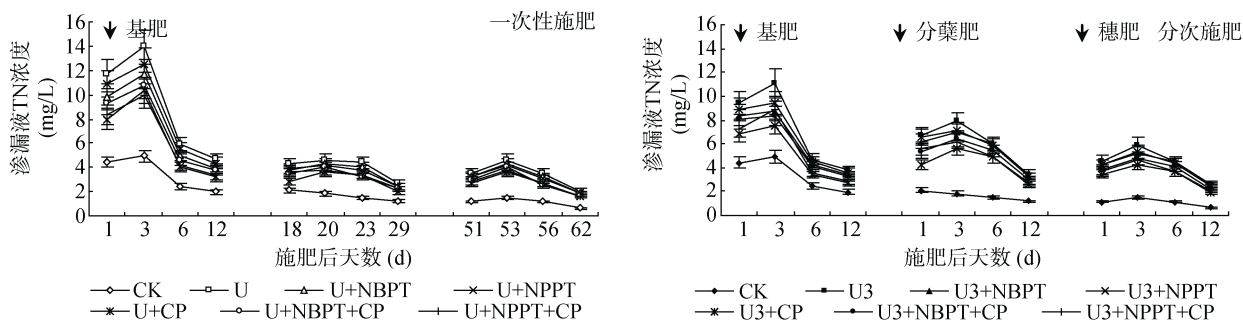


图 6 不同处理下稻田渗滤液 TN 浓度动态变化

Fig. 6 TN concentrations in leachates of paddy fields under different treatments

中, 施 N 处理较 CK 处理增幅为 4.7 ~ 6.8 mg/L; 与 U3 处理相比, U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理渗滤液 NO_3^- -N 浓度分别降低 7.5%、0.8%、31.5%、14.7% 和 25.7%。说明黄泥田添加 CP 或配施 NBPT/NPPT 可以有效抑制尿素水解后的硝化作用, 降低稻田渗滤液 NO_3^- -N 浓度, 减少 N 素渗漏损失, 而单独添加 NBPT/NPPT 对渗滤液 NO_3^- -N 生成具有一定的抑制效果。

表 3 基肥施用后第 1 天稻田渗滤液 NO_3^- -N 浓度的方差分析Table 3 Variance analysis of NO_3^- -N concentration in leachate of paddy field on 1st day after basal fertilization

变异来源	平方和	自由度	F 值	P 值
施肥模式 (F)	10.476	1	15.72	0.000 6
抑制剂 (I)	35.099 3	5	10.534	0.000 1
F × I	1.439 8	5	0.432	0.821 7
误差	15.994	24		
总变异	63.009	35		

3 讨论

3.1 生化抑制剂组合与施肥模式对稻田田面水 N 素动态变化的影响

相关研究表明, 施肥后田面水中 TN 量随着时间的推移逐渐降低, NH_4^+ -N 量也逐渐降低, 致使硝化作用形成的 NO_3^- -N 量随之减少, 且 NO_3^- -N 峰值滞后于 NH_4^+ -N^[25]。王小治等^[26]研究表明, 稻田田面水 NO_3^- -N 是由尿素水解产生的 NH_4^+ -N 经硝化作用形成, 淹水时硝化作用较弱, 经水稻吸收、反硝化作用和 N 素淋失等途径后, 田面水中 NO_3^- -N 浓度较低。本研究所得结果一致。 NH_4^+ -N 是尿素施用 3 ~ 5 d 后稻田田面水中 N 素的主要形态^[27-28]。潘圣刚等^[23]研究发现, 不同氮肥水平和施肥比例下稻田田面水 NH_4^+ -N 和 TN 浓度在施肥后第 1 天达到最大值后降低, 第 7 天分别降为峰值的 7.88% ~ 17.84% 和 29.71% ~

45.55%。本研究中, 基肥施用后, 稻田田面水中 NH_4^+ -N 和 TN 浓度于第 1 天达到峰值后降低, 第 6 天分别降为峰值的 57.9% ~ 69.1%、41.9% ~ 59.0% (一次性施肥) 和 29.9% ~ 60.7%、60.9% ~ 69.7% (分次施肥)。

田面水 N 素浓度过高, 在一定程度上会增加 N 素径流流失风险。氮肥施用水平会影响田面水中 NH_4^+ -N 浓度, 从而影响 N 素径流损失^[29]。潘圣刚等^[23]研究发现, 相同氮肥水平下, 基: 蘖: 穗 = 30% : 20% : 50% 可以显著降低田面水 NH_4^+ -N 和 TN 浓度。本研究中, U3 处理基肥施用后第 1 天田面水 NH_4^+ -N 浓度较 U 处理降低 22.5%。分次施肥较一次性施肥能将施 N 量与水稻对 N 素的需求密切结合^[30], 降低田面水 N 素峰值, 显著减少 N 素流失的几率, 同时降低 NH_3 的挥发损失^[31]。此外, 本研究中前期田面水 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 浓度下降较缓, 后两次施肥迅速下降, 可能是由于苗期植株对 N 素吸收量低, 而水稻后期生长快、根系发达, 对 N 素吸收急剧增加, 导致水相中 NH_4^+ -N 含量下降较快^[23]。相关研究表明, 施肥后短期内稻田 N 素转化较剧烈, 控制 N 素田面流失主要时期为施肥后一周内^[32-35], 本研究结果与此一致。

硝化抑制剂施用后会使得田面水中 N 素更多地以 NH_4^+ -N 形式存在^[36-37], 水稻作为喜 NH_4^+ -N 的作物, 足量的 NH_4^+ -N 能促进水稻对 N 素的吸收和利用^[18,39]。俞巧钢等^[36]利用小粉土和青紫泥进行水稻盆栽试验发现, 添加 3,4-二甲吡唑磷酸盐 (DMPP) 的田面水 NH_4^+ -N 浓度分别增加 24.8% 和 16.7%, NO_3^- -N 浓度分别降低 47.7% 和 70.9%, 总无机 N 浓度分别下降 13.5% 和 23.1%。李华等^[28]研究表明, 抑制脲酶活性可能是降低稻田 N 素流失的主要途径之一。本研究结果表明, 添加 CP 能抑制黄泥田土壤水相 NH_4^+ -N 的形态转化, 使田面水 NH_4^+ -N 浓度增加, 存在较大的 N 素流失风险, 且易造成 NH_3 的挥发损失。而添加 NBPT/NPPT 能有效抑制脲酶活性, 使田面水

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度显著降低, 减少 N 素流失风险。

3.2 生化抑制剂组合与施肥模式对稻田渗漏液 N 素动态变化的影响

相关研究表明, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是稻田渗漏液 N 素的主要形式, $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{TN}$ 的比值均在 0.50 以上^[35,40], 且在土壤剖面的不同深度向下递增^[41]。潘圣刚等^[42]研究发现, 稻田渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度在施肥后第 3 天达到最大后降低, 第 7 天分别降为峰值的 5.6% ~ 16.9%、13.8% ~ 22.5% 和 22.5% ~ 34.5%。本研究中, 基肥施用后, 稻田渗漏液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度第 1 ~ 3 天达到峰值后降低, 于第 6 天分别降为峰值的 51.4% ~ 56.5%、56.6% ~ 61.6%(一次性施肥)和 45.3% ~ 57.5%、51.1% ~ 59.6%(分次施肥)。

潘圣刚等^[42]研究发现, 氮肥后移稻田渗漏液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 TN 浓度分别降低 8.9% 和 4.8%, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度影响不显著。本研究中, U3 处理基肥施用后第 1 天渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较 U 处理降低 21.4%。稻田渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度均呈先升后降趋势, 且施肥后 1 周内是稻田 N 素渗漏流失的关键时期。

左海军等^[43]研究表明, 控释氮肥能控制养分释放, 将田间条件下 N 素释放与作物吸肥的高峰期相吻合, 显著地降低其淋失率, 从而提高肥料利用率。Li 等^[38]研究发现, DMPP 与尿素混施较单施尿素的农田 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量两年分别减少 44.9% 和 47.3%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别增加 20.5% 和 19.1%。费频频等^[44]研究发现, 添加抑制剂会提高稻田根层土壤渗透水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度, 降低根层土壤渗透水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度, 减小施氮肥后稻田土壤渗透水的 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{TN}$ 比值, 且氢醌(HQ)+双氰胺(DCD)配施较单独添加效果更明显。洪瑜等^[45]通过水稻土柱模拟渗滤试验研究发现, 整个水稻生育期增施 DCD 的全氮淋失量降低 23.68% ~ 37.94%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失量降低 30.94% ~ 46.69%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失量降低 25.46% ~ 39.77%。本研究结果表明, 添加抑制剂 CP 或配施 NBPT/NPPT 有效抑制黄泥田土壤中硝化作用, 降低渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度, 使 N 更多地以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式保持在土壤中, 减轻 N 素流失风险。

4 结论

抑制剂组合在黄泥田田间对 N 素流失的作用效果优于仅添加 NBPT/NPPT 或 CP。新型脲酶抑制剂 NPPT 单独施用及与 CP 配施的稻田田面水和渗漏液 N 素浓度动态变化特征与 NBPT 相似。不同施肥模式

下, CP 会提高黄泥田稻季田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, 而 NBPT/NPPT 或配施 CP 有效抑制脲酶活性, 降低田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的峰值, 可以有效调控施肥前期田面水 N 素转化过程, 减少 N 素径流损失风险。CP 显著降低黄泥田稻季渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度, 且 CP 或配施 NBPT/NPPT 有效抑制硝化作用, 降低渗漏液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的峰值, 可以有效调控施肥后期渗漏液 N 素转化过程, 减少 N 素渗漏损失风险。

参考文献:

- [1] Erisman J W, Bleeker A, Galloway J, et al. Reduced nitrogen in ecology and the environment[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150(1): 140-149
- [2] 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 & Environment*, 2012, 146(1): 103-112
- [3] 陈贵, 陈莹, 施卫明. 氮肥对水稻不同生长期土壤不同深度氮素渗漏的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(5): 809-814
- [4] Hofmeier M, Roelcke M, Han Y, et al. Nitrogen management in a rice-wheat system in the Taihu Region: Recommendations based on field experiments and surveys[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 60-73
- [5] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103
- [6] 周杨, 司友斌, 赵旭, 等. 太湖流域稻麦轮作农田氮肥施用状况、问题和对策[J]. *土壤*, 2012, 44(3): 510-514
- [7] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒品质性状与土壤肥力因子的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2): 283-290
- [8] 林诚, 王飞, 李清华, 等. 不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, 2009(6): 24-27
- [9] 张宣. 南方中低产黄泥田科学施肥技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
- [10] 唐启源, 邹应斌, 米湘成, 等. 不同施氮条件下超级杂交稻的产量形成特点与氮肥利用[J]. *杂交水稻*, 2003, 18(1): 44-48
- [11] 吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 757-764
- [12] 李敏, 叶舒娅, 刘枫, 等. 稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(6): 559-564
- [13] Trenkel M E. Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture[C]. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA). 2010
- [14] Alberto S C, Thomash M, Augusto A, et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean

- conditions[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 126: 243–249
- [15] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 189(2): 136–144
- [16] Aulakh M S, Singh K, Doran J. Effects of 4-amino 1,2,4-triazole, dicyandiamide and encapsulated calcium carbide on nitrification inhibition in a subtropical soil under upland and flooded conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 33(3): 258–263
- [17] Malla G, Bhatia A, Pathak H, et al. Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the Indo-Gangetic plain with nitrification and urease inhibitors[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(2): 141–147
- [18] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 917–924
- [19] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 生化抑制剂组合对黄泥田土壤尿素态氮转化的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 95–100
- [20] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 新型磷酰胺类脲酶抑制剂对不同质地土壤尿素转化的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 4003–4012
- [21] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 426–432
- [22] 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
- [23] 潘圣刚, 黄胜奇, 曹凑贵, 等. 氮肥运筹对稻田田面水氮素动态变化及氮素吸收利用效率影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 1000–1005
- [24] 董作珍. 水稻氮磷钾肥料长期施用效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015
- [25] 汪华, 杨京平, 金洁, 等. 不同氮素用量对高肥力稻田水稻-土壤-水体氮素变化及环境影响分析[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 50–54
- [26] 王小治, 高人, 朱建国, 等. 稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(5): 600–604
- [27] 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
- [28] 李华, 陈英旭, 梁新强, 等. 土壤脲酶活性对稻田田面水氮素转化的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 55–58
- [29] 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(3): 23–31
- [30] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96: 37–47
- [31] Cai Z C. Ammonium transformation in paddy soils affected by the presence of nitrate[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 267–274
- [32] 张志剑, 董亮, 等. 水稻田面水氮素的动态变化特征、模式表征及排水流失研究[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(4): 475–480
- [33] 王强, 杨京平, 陈俊, 等. 非完全淹水条件下稻田表面水体中三氮的动态变化特征研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1182–1186
- [34] 王强, 杨京平, 沈建国, 等. 稻田田面水中三氮浓度的动态变化特征研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 51–54
- [35] 金洁, 杨京平. 高肥力稻田分次施氮对氮素淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 98–101
- [36] 俞巧钢, 陈英旭. DMPP 对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(9): 1274–1280
- [37] Li H, Liang X, Chen Y, et al. Effect of nitrification inhibitor DMPP on nitrogen leaching, nitrifying organisms, and enzyme activities in a rice-oilseed rape cropping system[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(2): 149–155
- [38] Li H, Chen Y, Liang X, et al. Mineral-nitrogen leaching and ammonia volatilization from a rice-rapeseed system as affected by 3,4-dimethylpyrazole phosphate[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(5): 2131–2137
- [39] 许超, 吴良欢, 郑寨生, 等. 含硝化抑制剂(DMPP)氮肥对水稻产量及氮素吸收的影响[J]. *浙江农业科学*, 2003, 1(2): 75–78
- [40] 黄明蔚, 刘敏, 陆敏, 等. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(4): 629–636
- [41] 闻轶, 张翰林, 谢剑炜, 等. 不同施肥处理对稻田系统氮素流失的影响[J]. *科技通报*, 2011, 27(4): 549–553
- [42] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 氮肥运筹对水稻氮素吸收和稻田渗漏液氮素浓度影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10): 2145–2150
- [43] 左海军, 张奇, 徐力刚, 等. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(12): 83–89
- [44] 费频频. 脲酶/硝化抑制剂对稻田生态系统氮素流向的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011
- [45] 洪瑜, 刘锦霞, 刘越, 等. 不同双氰胺用量对稻田土壤氮素淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015(1): 116–120

Effects of Combined Biochemical Inhibitors and Fertilization Models on Nitrogen Dynamics in Surface Water and Leachate from Yellow Clayey Paddy Field

ZHOU Xuan^{1,2,3}, WU Lianghuan^{2,3*}, DAI Feng⁴, DONG Chunhua¹

(1 Hunan Institute of Soil and Fertilizer, Changsha 410125, China; 2 Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, Ministry of Education, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4 Zhejiang Aofutuo Chemical Co., Ltd, Shangyu, Zhejiang 312300, China)

Abstract: An experiment was conducted to study the interaction effects of biochemical inhibitor combinations (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT), N-(n-propyl) thiophosphoric triamide (NPPT) and 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine (CP)) and fertilization models (one-off and three-time fertilization) on nitrogen (N) dynamic change characteristics in the surface water and leachate from yellow clayey paddy field using two factor randomized block design. The results showed that N losses of surface water and leachate from yellow clayey paddy field were given priority to $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$, respectively. The peak values of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN concentrations in the surface water from paddy field appeared within one day after basal application, and then decreased by 57.9% – 69.1% and 41.9% – 59.0% (one-off), 29.9% – 60.7% and 60.9% – 69.7% (three-time) till the 6th day, respectively. The peak values of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN concentrations in the leachates from paddy field appeared within 1 – 3 days after basal application, and then decreased by 51.4% – 56.5% and 56.6% – 61.6% (one-off), 45.3% – 57.5% and 51.1% – 59.6% (three-time) till the 6th day, respectively. Under different fertilization modes, CP increased $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration of surface water, and NBPT/NPPT or combined with CP effectively inhibited the activity of urease, and reduced the peak value of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the surface water. On the other hand, CP significantly decreased $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration of the leachate, and CP or combined with NBPT/NPPT effectively inhibited nitrification, and reduced the peak value of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the leachate. Application of a new urease inhibitor NPPT alone or combined with CP had the same effect on N dynamic change characteristics in the surface water and leachate from paddy field with NBPT. In conclusion, the integration and optimization of fertilization technique and combined inhibitors application can more effectively delay urea hydrolysis, inhibit nitrification, and reduce the runoff and leakage loss of N in yellow clayey paddy field.

Key words: Urease inhibitor; Nitrification inhibitor; Yellow clayey field; Surface water; Leachate