

# 牛粪-化肥配施对水稻田氮磷迁移转化的影响

崔虎<sup>1,2</sup>, 王莉霞<sup>1\*</sup>, 欧洋<sup>1</sup>, 阎百兴<sup>1</sup>, 赵瑜佳<sup>3</sup> (1.中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2.中国科学院大学, 北京 101408; 3.长春师范大学, 吉林 长春 130031)

**摘要:** 在控制外源 N 输入量相同的前提下, 通过田间小区实验, 探讨有机肥与化肥不同施用量(牛粪施用量: 5, 10, 20 t/hm<sup>2</sup>)对稻田田间土-水界面氮磷迁移转化特征的影响。结果表明: 控制稻田水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN 和 TP 输出的最佳时期分别为施肥后的第 5, 30, 7, 20 d, 且 TN 和 TP 浓度随时间变化符合单指数衰减方程( $0.7444 \leq R^2 \leq 0.9724$ ;  $1.1 \times 10^{-6} \leq F \leq 0.0055$ )。采用牛粪部分代替化肥的施肥方式, 在一定范围内能降低稻田退水中 TN、TP 输出负荷(41.8%、36.0%、64.3%; 20.3%、39.1%、48.9%), 还可以降低稻田水中 N/P, 降低水体富营养化风险。同时, 牛粪的施用可提高土壤中脲酶和磷酸酶的含量, 促进氮磷向植物可吸收形态转化。综合经济成本和生态效益核算, 采用 10 t 有机肥代替无机肥的处理是相对经济环保的施肥方法, 该施肥方式下, 氮磷年输出负荷分别为 17.70, 1.26 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 牛粪; 田间水; 输出负荷; 氮磷比; 综合效益

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)06-2233-10

DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20180515.006

**Effect of combined application of manure and chemical fertilizer on transportation and transformation of nitrogen and phosphorus in paddy field water.** CUI Hu<sup>1,2</sup>, WANG Li-xia<sup>1\*</sup>, OU Yang<sup>1</sup>, YAN Bai-xing<sup>1</sup>, ZHAO Yu-jia<sup>3</sup> (1.Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun 130102, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3.Changchun Normal University, Changchun 130031, China). *China Environmental Science*, 2018,38(6): 2233~2242

**Abstract:** The manure (cattle dung) was applied instead of chemical fertilizer partially (the amount of manure: 5 t/hm<sup>2</sup>, 10 t/hm<sup>2</sup> and 20 t/hm<sup>2</sup>) to study the environmental behavior of nitrogen and phosphorus in the paddy field during the growth period. The results showed the optimum periods for controlling NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in paddy field were 5, 30, 7 and 20 days after fertilization. The changing in TN and TP concentrations with time were fit the first order reaction kinetic function ( $0.7444 \leq R^2 \leq 0.9724$ ;  $1.81 \times 10^{-6} \leq F \leq 0.0055$ ). Cow dung partly replacing the inorganic fertilizer fertilization can reduce TN and TP output load by 36.0%~64.3% and 20.3%~48.9% in the rice field water. The application of cow dung reduced the N/P in paddy field water, thus reducing the risk of water eutrophication. At the same time, the application of cow dung increased the contents of urease and phosphatase in the soil, which promoted the transformation of N and P into plant bioavailable forms. The best economical addition dose estimated was 10 t/hm<sup>2</sup> for manure. The annual output loads of nitrogen and phosphorus was 17.70 kg/hm<sup>2</sup> and 1.26 kg/hm<sup>2</sup>, respectively.

**Key words:** cattle dung; paddy field water; output; nitrogen/phosphorus; comprehensive benefit

随着我国农业集约化水平的不断提高, 化肥施用量大幅度增加。根据农业部对我国年化肥施用量统计显示: 我国农作物化肥施用量为 328.5 kg/hm<sup>2</sup>, 远高于世界平均水平 (120.0 kg/hm<sup>2</sup>), 分别是美国和欧盟化肥施用量的 2.6 和 2.5 倍<sup>[1]</sup>。然而农田中化肥利用率较低, 仅为 30%~35%<sup>[2]</sup>, 由此造成的面源污染问题日益严峻。“十二五”以来, 随着对点源污染的控制, 松花江流域面源逐

步替代点源成为主要的污染源, 尤其是由农业生产引起的面源污染贡献较大。水田 N、P 肥当季利用率较低, 大量的 N、P 素随着农田退水流入江湖湖泊。且研究发现, 单位面积稻田的面源污染输出

收稿日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41771505, 41571480); 吉林省科技发展计划资助项目 (20150204046SF)

\* 责任作者, 副研究员, lxwang@iga.ac.cn

负荷可达旱田的 5~21 倍<sup>[3]</sup>.因此,由农田退水导致的水体富营养化问题凸显,对生态环境安全产生潜在危害.

长期施用无机肥会导致土壤结构稳定性降低、破坏团聚体水稳性和微团聚体分散系数上升等问题,从而使土壤有机质含量下降、土块板结<sup>[4-5]</sup>.有机肥代替无机肥作为底肥可以改善土壤结构、增强微生物活性、加速土壤 C、N 累积、提高速效养分含量和促进土壤团聚体形成<sup>[6-9]</sup>.牛粪是我国比较丰富的有机肥料之一,牛粪还田不仅解决了牛粪堆积导致的环境污染问题,还能实现牛粪资源的循环利用.已有研究表明,牛粪施入农田后,对土壤腐殖质的组成和结构产生显著影响,具体表现为可提高土壤胡敏酸(HA)氧化度和降低其缩合度,导致 HA 中长链烷基基和酚基碳含量升高,而富里酸(FA)中支链和短链烷基碳比例增加.进而促进土壤微生物的生长和繁衍<sup>[10]</sup>.牛粪具有巨大的比表面积和发达的孔隙结构,能够大量的吸附稻田上覆水中各种形态的氮、磷离子,从而降低水体富营养化的生态风险<sup>[11-12]</sup>.本研究选取东北典型黑土区为研究对象,采用牛粪部分代替化肥的施肥方式,在保证各处理外源 N 输入量相同的前提下,研究水稻生长周期内 N、P 在土-水界面的迁移转化过程,估算稻田水体 N、P 的输出负荷,探寻有机肥和无机肥合适的配比,达到经济和环境效益共赢的目的.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

表 1 自然条件和土壤基本理化性质

Table 1 Meteorological parameters and soil chemical characteristics

| 实验区自然条件   |            | 供试土壤理化性质    |      |
|-----------|------------|-------------|------|
| 气候类型      | 北温带大陆性季风气候 | 土壤类型        | 稻田土  |
| 最高温度(℃)   | 39.5       | 有机质含量(g/kg) | 21.4 |
| 最低温度(℃)   | -39.8      | 总氮含量(g/kg)  | 1.5  |
| 年均气温(℃)   | 4.8        | 硝氮含量(mg/kg) | 7.3  |
| 日照时间(h)   | 2688       | 氨氮含量(mg/kg) | 7.9  |
| 年均降水量(mm) | 522~615    | 总磷含量(g/kg)  | 1.1  |

研究区设置在吉林省长春市中国科学院东北地理与农业生态研究所长春农业综合试验站(125°23'56.30"E,43°59'51.46"N).该试验站的自然条件和土壤基本理化性质如表 1 所示<sup>[13]</sup>.

1.2 实验设计

以长期耕作的水田为研究对象,根据牛粪和无机肥的不同配比设置 4 种处理.用不同方式处理的试验区各设置 3 个(4m×3m)平行实验小区,共计 12 个小区.为防止各小区之间水分窜流、侧渗,用塑料板将小区隔开.以该地区施肥常用类型及用量为依据,底肥采用牛粪部分代替无机化肥的方式,在外源 N 输入总量相同的前提条件下,设计不同的底肥处理方案(表 2).施用肥料为市场销售的化肥磷酸氢二铵(N=18%;P=23%)和牛粪(pH=7.32;有机质=14.5%;N=0.36%;P=0.16%).

稻田各项管理实施时间如下:5 月 31 日施肥泡田,6 月 5 日插秧,6 月 15 日施用除草剂丁草胺;为保证水稻正常生长,7 月 20 日在各小区追施钾肥(KCl)约 0.18kg(150kg/hm<sup>2</sup>);9 月 25 日收割水稻.其他田间管理方式与当地农户采用的模式相同.

表 2 稻田不同处理肥料施加量

Table 2 The amount of fertilizer in paddy field

| 处理                              | 施肥量(kg/hm <sup>2</sup> ) | 每小区施用量(kg) |    |      |      |      |
|---------------------------------|--------------------------|------------|----|------|------|------|
|                                 | 二铵+牛粪                    | 二铵         | 牛粪 | 钾肥   | 折纯 N | 折纯 P |
| N <sub>0</sub>                  | 750                      | 0.90       | 0  | 0.11 | 0.16 | 0.21 |
| N <sub>1</sub> +M <sub>5</sub>  | 650+5000                 | 0.78       | 6  | 0.11 | 0.16 | 0.19 |
| N <sub>2</sub> +M <sub>10</sub> | 550+10000                | 0.66       | 12 | 0.11 | 0.16 | 0.17 |
| M <sub>20</sub>                 | 20000                    | 0          | 24 | 0.11 | 0.16 | 0.04 |

注:氯化钾(K<sub>2</sub>O=60%).

1.3 样品采集与分析方法

1.3.1 水样采集 在水稻生长期长期内施加底肥后的第 2,4,8,10d 采集水样,之后以 15d 为间隔进行水样采集,共计 10 次.采样具体时间为采样日下午 17:00~18:00,用容积为 100mL 的医用注射器随机抽取小区内的稻田水,每个小区抽取 3 次,注入塑料瓶并带回实验室,测定各种形态的 N、P.

1.3.2 土壤采集 施肥后第 1,9,24d 采集土样,之后以 30d 为间隔进行土样采集,共计 6 次.采样

具体时间设置在采样日下午 17:00~18:00.为防止采集的土样受其他因素的干扰,将土样放置于样品袋中带回实验室,自然条件下风干,测定各形态 N、P 及脲酶和磷酸酶的含量.

**1.3.3 水稻产量估算** 水稻成熟后,应用 5 点取样法,按照对角线在各小区内分别采集 5 个面积为  $1\text{m}^2$  的植物样.之后将稻粒和稻秆分开,将稻粒放在烘箱里(恒温  $70^\circ\text{C}$ )杀青 20min,随后将温度升至  $105^\circ\text{C}$  烘干至恒重,计算水稻籽粒产量,并测定稻穗、穗粒数及干粒重等指标.

**1.3.4 测试方法** 水样中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  分别采用靛酚蓝比色法和硫酸肼还原法测定;水样和土样中 TN、TP 分别采用硫酸肼还原法和钼锑抗比色法测定;土样中脲酶和磷酸酶分别采用苯酚钠比色法和磷酸苯二钠比色法测定.

**1.3.5 数据处理** 实验数据采用 Excel 2007 进行相关计算,采用 SPSS 18.0 进行统计分析,采用 Origin 9.0 进行制图.

为探讨 TN、TP 在田间水中的迁移转化规律及水-土界面交换机制,本研究采用单指数衰减方程拟合 TN、TP 浓度变化趋势.单指数衰减方程:

$$y=A_1\exp(-x/t)+y_0 \quad (1)$$

式中: $x$  表示施肥后天数; $y$  表示指标浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $A_1$  表示衰减系数,可反映测试指标浓度衰减速率; $y_0$ 、 $t$  表示单指数衰减方程常数.

各种形态 N、P 对 TN、TP 输出负荷贡献率计算公式为:

$$\text{贡献率}=(\text{单项输出负荷}/\text{总输出负荷})\times 100\% \quad (2)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 牛粪-无机肥混施对田间水氮磷形态转化的影响

施用不同配比的底肥后,田间水中  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  和 TP 浓度随时间动态变化趋势如图 1 所示.配施牛粪  $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  和  $\text{M}_{20}$  处理田间水中可溶性磷浓度在施肥后第 1d 达到最大值,分别是仅添加二铵( $\text{N}_0$ )处理的 1.27、1.17 和 1.55 倍.4 种不同处理可溶性磷均在 55d 后达到施肥前水平,但下降趋势略有差异.由于牛粪具有较大的比表面积

和丰富的含氧官能团,对水中可溶性磷具有较强的吸附能力.同时,牛粪表面富含阴离子,可提高土壤阳离子交换量(CEC),促进水体阳离子向其表面迁移,降低因离子同质作用而导致的  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  释放风险.因此,随着牛粪施用量的增加,水体中可溶性磷浓度降低速率有所加快;而仅施加二铵的处理  $\text{N}_0$  前 3d 可溶性磷浓度处于平稳状态,浓度最小,为  $2.14\text{mg/L}$ ,然后迅速下降.因为施加二铵后,迅速溶解出  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ ,由于植物吸收和土壤吸附等作用,使其浓度降低.罗春燕等<sup>[15]</sup>研究发现:动物粪便中含有的可溶性磷占有机肥 TP 的比重较高,因此在施加有机肥后,有机肥中的可溶性磷会迅速扩散到水体中,使田间水可溶性磷含量增高,随着有机肥施用量的增加,农田退水中可溶性磷含量显著升高. $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  和  $\text{M}_{20}$  处理稻田水中 TP 浓度在施肥后第 1d 达到峰值,之后迅速下降,施肥第 5d 后,下降趋势明显减缓; $\text{N}_0$  处理 TP 浓度在施肥后第 3d 达到峰值,之后 2d 浓度水平稍有下降,基本处于稳定状态.4 种处理 TP 浓度变化趋势差异较大,这与 P 的添加量有关.各处理磷浓度均在 55d 左右降低至施肥前水平.通过比较  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  和 TP 的变化趋势图可以发现,两者稍有差异,这是因为 TP 是由可溶性磷和颗粒磷组成的,牛粪仅对可溶性磷有较强的吸附作用<sup>[13]</sup>.综上所述:施肥后 20d 是控制磷素流失的关键时期.

施用不同配比的肥料后,田面水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 浓度随时间变化趋势如图 2 所示.由于牛粪和二铵均含有大量的 N 元素,施肥 1d 后, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 浓度较初始水平均有明显提高.不同配比底肥施入水田后,稻田水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度均呈急剧上升趋势,且在第 3d 达到峰值,之后迅速下降.施肥 5d 后下降趋势明显减缓,至 55d 左右稻田中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度降至稳定水平;由于水体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  处于极不稳定状态,易形成  $\text{NH}_3$  挥发散失.同时,随着牛粪配施量的增加,稻田土壤对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的吸附能力逐渐增强.因而导致  $\text{M}_{20}$  处理田面水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度在施肥后第 1d 即呈急剧下降趋势.马晓焉等<sup>[16]</sup>在研究动物粪便对水稻土表层水氮磷动态的影响时曾证实

这一结论.牛粪部分代替无机化肥的处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度要比仅施加二铵处理的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度低,这是由于牛粪中的 N 主要是以有机态的形式存在,释放的速度比较慢.朱兆良<sup>[17]</sup>在研究农田中氮肥的损失与利用时发现:水稻吸收、氨挥发、硝化作用和 N 素下渗等因素会导致土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的损失.水稻在生长期,根系的输氧功能使周围形成了好氧环境,为微生物的代谢提供了良好的环境,有利于好氧细菌的氧化反应,从而造成  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度的迅速下降.这一结论和本实验结果一致.与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  相比,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度降至稳定水平的时间较慢,因为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  主要是  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在微生物的硝化作用下生成的,硝化反应需要一定的时间,且  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在水体中的稳定性比  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  高.

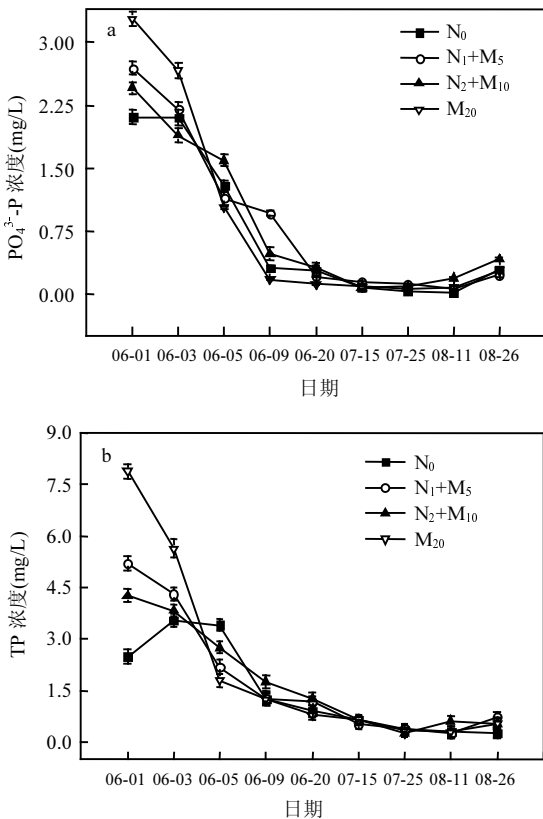


图1 牛粪-化肥配施对田间水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和 TP 的影响  
Fig.1 Concentrations of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  and TP in field water under combined application of dairy manure and chemical fertilizer

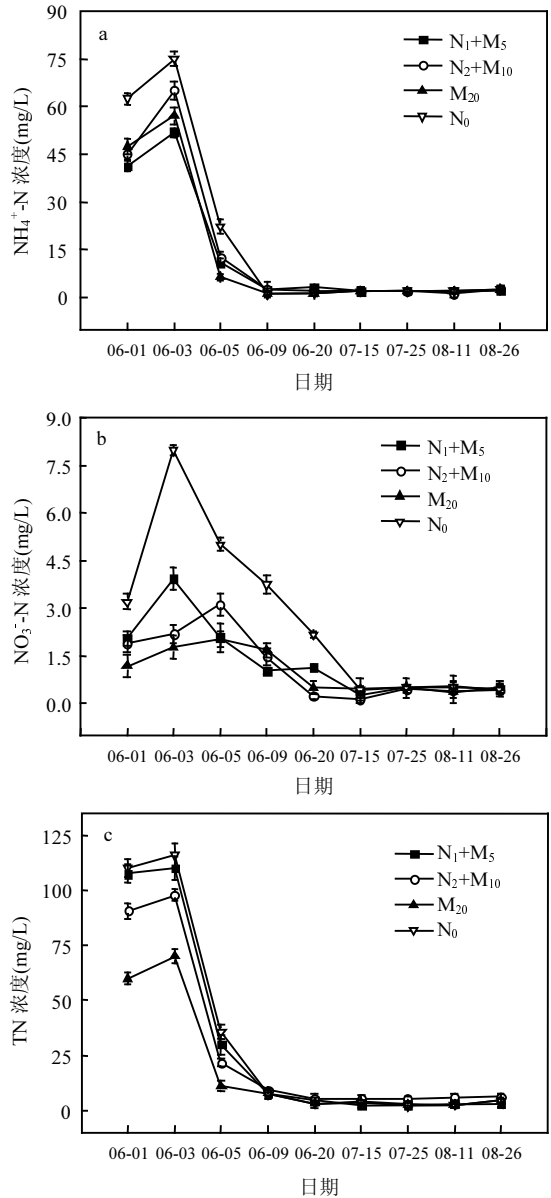


图2 牛粪-化肥配施对田间水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 的影响

Fig.2 Concentrations of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and TN in field water under combined application of dairy manure and chemical fertilizer

单指数衰减方程拟合结果如表 3 所示.除  $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  和  $\text{M}_{20}$  处理 TP 浓度随时间变化单指数衰减模型拟合处于极显著水平( $0.8 \leq R^2 \leq 1$ )外,其余处理均处于显著水平( $0.5 \leq R^2 \leq 0.8$ );但各处理方程参数拟合结果均处于极显著水平

( $F \leq 0.01$ ).王小治等<sup>[18]</sup>在利用单指数衰减模型探究施肥后稻田水中 N、P 浓度变化规律时,得出相似拟合结果( $0.641 \leq R^2 \leq 0.940$ ;  $F \leq 0.05$ ).单指数衰减方程是反映化学反应速率与反应物质条件(浓度)的动力学方程,衰减系数( $A_1$ )即表示反应物浓度变化速率.各处理对 TN 和 TP 浓度变化速率( $A_1$ )影响差异较大,TN 浓度变化速率以  $N_0$  处理最高( $A_1=150.628$ ), $M_{20}$  处理最低( $A_1=84.021$ ).说明施加牛粪可以减缓稻田水中 TN 浓度的变化速率,能降低 N 素流失的风险.马锋锋等<sup>[12]</sup>研究发现:TN 在牛粪上的吸附量随着平衡液中 TN 的浓度增加而增加,在低浓度时牛粪对 TN 吸附量增加较快,高浓度时吸附量增加较慢.TP 浓度变化速率以  $M_{20}$  处理最高( $A_1=10.403$ ), $N_0$  处理最低( $A_1=3.209$ ),随着牛粪施用量的增加,稻田水中 TP 浓度下降速率反而更快.综合比较而言,稻田水中 TN 浓度降低速率明显高于 TP.

表 3 不同处理 TN 和 TP 浓度变化单指数衰减方程拟合结果

| Table 3 The fitting results of TN and TP in different treatments using single exponential decay equation |              |                           |              |        |                       |
|--|--------------|---------------------------|--------------|--------|-----------------------|
| 类别   | 处理           | 单指数衰减方程                   | $A_1$ (衰减系数) | $R^2$  | $F$                   |
| TN   | $N_0$        | $y=1.311+150.628e^{-x/t}$ | 150.628      | 0.8992 | $3.88 \times 10^{-4}$ |
|  | $N_1+M_5$    | $y=1.034+150.101e^{-x/t}$ | 150.101      | 0.8545 | 0.0012                |
|  | $N_2+M_{10}$ | $y=3.877+124.979e^{-x/t}$ | 124.979      | 0.8040 | 0.0024                |
|  | $M_{20}$     | $y=2.200+84.021e^{-x/t}$  | 84.021       | 0.7444 | 0.0055                |
| TP   | $N_0$        | $y=0.282+3.209e^{-x/t}$   | 3.209        | 0.7756 | 0.0011                |
|  | $N_1+M_5$    | $y=0.556+5.995e^{-x/t}$   | 5.995        | 0.9459 | $2.38 \times 10^{-5}$ |
|  | $N_2+M_{10}$ | $y=0.534+4.299e^{-x/t}$   | 4.299        | 0.9724 | $1.81 \times 10^{-6}$ |
|  | $M_{20}$     | $y=0.484+10.403e^{-x/t}$  | 10.403       | 0.9529 | $3.03 \times 10^{-5}$ |

N/P 比值是影响藻类爆发性增长的重要因子,是水体中浮游藻类产生周期和产生量的重要反映<sup>[19]</sup>.稻田水中 N/P 随时间变化 Explinear 模型( $y=P_1e^{-X/P_2}+P_3+P_4X$ )拟合结果( $0.2337 \leq R^2 \leq 0.9424$ ;  $1.27 \times 10^{-4} \leq F \leq 0.0173$ )如表 4 所示,基本呈现先降低后增加趋势. $N_0$  处理 N/P 在施肥后第 1d 达到最大值(44.19), $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理 N/P 在施肥后第 3d 达到峰值(20.67、21.27、7.57),且  $N_0$  处理 N/P 显著高于  $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处

理.自然条件下,稻田水中 N/P 为 1.36,外源输入 N/P 分别为:0.76( $N_0$ )、0.84( $N_1+M_5$ )、0.94( $N_2+M_{10}$ )和 4( $M_{20}$ ).施加牛粪可影响稻田水中 N/P,因为牛粪中的磷主要以有机态形式存在,分解速率较慢,同时牛粪对稻田水中可溶性磷具有较强的吸附作用<sup>[20]</sup>.4 种处理 N/P 均在施肥后 20d 达到最低值,之后缓慢升高,造成这一现象的主要原因是微生物的作用下反硝化能力逐渐增强.施肥后 55d,稻田水中 N、P 降至稳定水平,  $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理 N/P 分别为:3.70、11.68 和 8.09,均低于处理  $N_0$ (17.68).因此,牛粪配施无机肥可降低稻田水中的 N/P.诸多研究表明,当 N/P 的比值在 10:1~25:1 时,藻类生长与氮、磷浓度存在直线相关关系,适宜藻类生长,容易发生富营养化<sup>[21]</sup>.当 N/P 为 12:1 左右时,水体中藻类产生周期最短,产生量最多<sup>[22]</sup>.因此在控制面源污染氮磷流失量、流失形态的同时,也应注意氮水体中输入的氮磷比例.稻田水中各指标趋于稳定水平后,与  $N_0$  处理相比, $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理 N/P 分别降低了:79.07%、33.94% 和 54.24%.且  $N_1+M_5$ 、 $M_{20}$  处理 N/P 比值在富营养化风险范围以下,因此牛粪-化肥配施可降低受纳水体富营养化的风险.

2.2 牛粪-无机肥混施对土壤氮磷形态转化的影响

施用不同配比的底肥后,土壤  $NH_4^+-N$  浓度呈单峰变化趋势, $NO_3^--N$ 、TN 浓度呈双峰变化趋势(图 3).土壤  $NH_4^+-N$  浓度在施肥后第 9d 达到峰值,以  $N_0$  处理最高,为 240.1mg/kg,分别是  $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理的 1.21、1.46 和 2.05 倍.说明随着牛粪配施量的增加,土壤  $NH_4^+-N$  浓度逐渐降低.其原因为,相对化肥而言,牛粪中 N 素主要富集于木质纤维素中,不易转化为植物可吸收形态<sup>[23]</sup>.配施牛粪  $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理土壤  $NO_3^--N$  浓度在施肥后第 9d 首次达到峰值,且土壤  $NO_3^--N$  浓度随着牛粪施用量的增加而降低;由于化肥中氮素为速效形态,单施化肥的  $N_0$  处理土壤  $NO_3^--N$  浓度施肥后即开始下降.施肥后第 55d,  $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理土壤  $NO_3^--N$  浓度第二次达到峰值,以  $N_2+M_{10}$  处理最高,为 6.5mg/kg,

分别是  $N_1+M_5$ 、 $M_{20}$  和  $N_0$  处理的 1.20、1.30 和 1.25 倍。 $N_2+M_{10}$ 、 $M_{20}$  处理土壤 TN 浓度在施肥后第 9d 首次达到峰值;而  $N_1+M_5$  处理土壤 TN 浓度在施肥后第 25d 首次达到峰值;其原因可能是, $N_1+M_5$  处理牛粪配施量较  $N_2+M_{10}$ 、 $M_{20}$  处理少,对土壤酶活性影响不显著,导致土壤对磷素的吸附能力较弱。单施化肥  $N_0$  处理土壤 TN 浓度施肥后即开始下降。 $N_0$ 、 $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理土壤 TN 浓度均在施肥后第 85d 第二次达到峰值,且土壤 TN 浓

度随着牛粪施用量的增加而升高。

施用不同配比的底肥后,土壤 TP 浓度呈单峰变化趋势(图 3)。 $N_0$ 、 $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理土壤 TP 浓度在施肥后第 9d 开始显著升高,于施肥后第 25d 达到峰值。配施牛粪  $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理土壤 TP 浓度分别是单施化肥  $N_0$  处理的 3.8、3.4 和 2.1 倍。说明配施牛粪可提高土壤 TP 含量,本实验结果与刘富春等<sup>[24]</sup>研究结论一致。

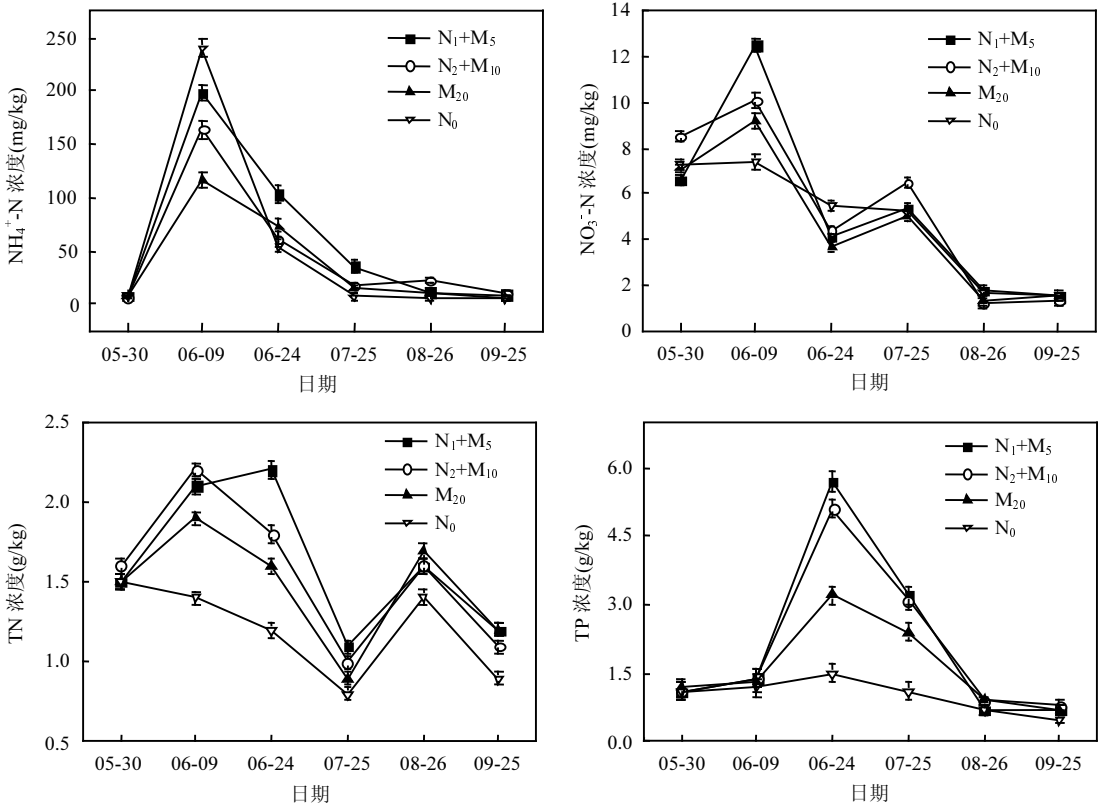


图3 牛粪-化肥配施对土壤  $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^--N$ 、TN 和 TP 的影响

Fig.3 Effects of combined application of dairy manure and chemical fertilizer on  $NH_4^+-N$ ,  $NO_3^--N$ , TN and TP in soil

土壤 N/P 是研究生物多样性、地球化学循环和生态系统营养结构的基础<sup>[25]</sup>。由土壤 N/P 随时间变化 Explinear 模型拟合结果 ( $0.3452 < R^2 \leq 0.9861$ ;  $0.0274 \leq F \leq 0.2852$ ) 可得(表 4):土壤 N/P 呈先下降后上升趋势。 $N_0$ 、 $M_{20}$  处理土壤 N/P 在施肥后第 1d 即开始下降, $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  处理土壤 N/P 在施肥后 1~9d 略有升高,之后开始下降,4 种处理均在施肥后第 55d 降低至最小值,此时, $N_0$  处

理 N/P 显著高于其他 3 种处理,随后开始迅速上升。待各种指标趋于稳定水平后,4 种处理土壤 N/P 分别为:1.8、1.71、1.38 和 1.71,与对照组( $N_0$ )相比, $N_1+M_5$ 、 $N_2+M_{10}$  和  $M_{20}$  处理土壤 N/P 分别降低了 5.0%、23.3%和 5.0%。土壤中 N/P 降低的原因是:一方面,稻田水中的  $NH_4^+-N$  处于不稳定状态,易发生水解反应,形成  $NH_3$  挥发至空气中,造成水体中  $NH_4^+-N$  浓度降低,加大了土壤与水

体之间的浓度差,使土壤中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  向水体移动;另一方面,土壤对 P 素的固定作用远高于 N 素,因此 N 素的淋溶量远高于 P 素.随着时间的推移,由于大气氮沉降作用,导致土壤中 N 素含量升高.习斌等<sup>[25]</sup>研究指出:土壤 N 素淋溶主要以  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为主,可占 TN 淋溶量的 80%以上.因此,微生物反硝化作用的增强是保持土壤 N 素的重要原因.而土壤中的有机磷在微生物的生化以及

化学作用下逐渐转化为植物可吸收形态,作为营养物质被植物利用,导致土壤 P 素含量降低.因此,土壤中 N/P 在施肥第 55d 后呈现急剧上升趋势.牛粪不但含有大量的有机磷,而且含有大量的活性微生物,能够促进无机磷向有机磷转化.同时,有机肥呈碱性,可提高土壤 pH 值,使难溶性磷酸化合物溶解度增大<sup>[26]</sup>.因此,配施牛粪处理的土壤 N/P 明显低于对照组( $\text{N}_0$ ).

表 4 田面水和土壤 N/P 比值 Explinear 方程拟合结果  
Table 4 The fitting results of N/P in the field water and soil usingexplinear equation

| 类别  | 处理                         | Explinear 拟合方程                             | $R^2$  | F      | 变化趋势 |
|-----|----------------------------|--|--------|--------|------|
| 田面水 | $\text{N}_1+\text{M}_5$    | $y=26.54\text{e}^{-x/6.86}+1.30+0.08x$     | 0.6159 | 0.0066 | “U”型 |
|     | $\text{N}_2+\text{M}_{10}$ | $y=27.01\text{e}^{-x/4.46}+2.78+0.14x$     | 0.2337 | 0.0173 | “U”型 |
|     | $\text{M}_{20}$            | $y=8.21\text{e}^{-x/9.94}+2.19+0.08x$      | 0.3415 | 0.0020 | “U”型 |
|     | $\text{N}_0$               | $y=61.82\text{e}^{-x/3.92}+3.09+0.21x$     | 0.9424 | 0.0001 | “U”型 |
| 土壤  | $\text{N}_1+\text{M}_5$    | $y=15.87\text{e}^{-x/107.63}-14.28+0.029x$ | 0.4881 | 0.2491 | “U”型 |
|     | $\text{N}_2+\text{M}_{10}$ | $y=7.01\text{e}^{-x/61.76}-5.13+0.05x$     | 0.3452 | 0.2825 | “U”型 |
|     | $\text{M}_{20}$            | $y=11.20\text{e}^{-x/94.72}-9.57+0.07x$    | 0.9423 | 0.0787 | “U”型 |
|     | $\text{N}_0$               | $y=5.92\text{e}^{-x/73.77}-4.57+0.04x$     | 0.3452 | 0.2825 | “U”型 |

2.3 牛粪-无机肥混施对土壤酶活性的影响

土壤施用不同配比的肥料后,脲酶和磷酸酶浓度随时间变化如图 4 所示.脲酶是尿素氨基水解酶的统称,可催化尿素水解成二氧化碳和氨,在有机氮的矿化中起关键作用<sup>[27]</sup>.采用牛粪-化肥配施方式( $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$ 、 $\text{M}_{20}$ )的稻田土壤中脲酶浓度在施肥后第 3d 达到峰值,其含量与牛粪施加量显著相关,且明显高于仅施加二铵处理( $\text{N}_0$ )的脲酶含量,分别提高了 102.9%、118.9%和 75.4%.之后迅速下降,施肥后 24d 达到施肥前水平.周俊国等<sup>[28]</sup>研究表明:动物粪便的施用可使土壤脲酶的活性提高 55%左右;且在一定范围内,脲酶活性随粪便施用量的增加而升高.脲酶浓度变化趋势和稻田水中各 N 素浓度变化趋势近似相同,因为脲酶是土壤酶中唯一对氮素肥料有重要影响的生物酶<sup>[27]</sup>.

磷酸酶是土壤中磷素变化的主导者,其含量水平反映了土壤中磷素新陈代谢的旺盛程度.各处理磷酸酶浓度呈波动变化,均在施肥后第 9d 达到峰值.且处理  $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  和  $\text{M}_{20}$  土壤磷酸酶浓度显著高于处理  $\text{N}_0$ ,分别是  $\text{N}_0$  的 1.27、1.26

和 1.15 倍.施肥 55d 后,土壤中磷酸酶浓度缓慢上升,这是因为磷酸酶的活性与土壤微生物呼吸量和总生物量显著相关<sup>[27]</sup>.水稻生长中期,呼吸能力明显增强,且 7 月中旬以后是东北平原的雨季,增强了土壤生物酶的活性.有机磷占土壤总磷的 30%~50%,土壤有机磷在磷酸酶酶促反应水解的作用下,可转化为能够被植物吸收利用的形态<sup>[28]</sup>.牛粪中含有丰富的有机磷,因此,添加牛粪处理土壤的磷酸酯酶活性显著较高.

2.4 稻田水氮磷输出负荷估算

参考祝惠等<sup>[29]</sup>研究三江平原水田氮输出负荷的计算方法(表 5),与仅施用二铵处理  $\text{N}_0$  相比,添加牛粪的处理  $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  和  $\text{M}_{20}$  单位面积水田  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP 年输出负荷分别降低了 20.4%、-22.3%、19.4%和 20.3%、39.1%、48.9%,单位面积水田  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 年输出负荷分别降低了 56.5%、37.6%、58.7%、52.1%、42.1%、75.1%和 41.8%、36.0%、64.3%. $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  处理单位面积水田  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  年输出负荷升高的原因是,二铵迅速释放的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  容易和土壤中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子结合生成沉淀<sup>[30]</sup>.配施牛粪后,牛

粪中的微生物会将部分  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  活化,重新释放至水体,从而导致田间水中  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度较高.三江平原  $\text{TP}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  年输出总量分别为  $0.19\text{t}/\text{km}^2$  和  $0.02\text{t}/\text{km}^2$ <sup>[3]</sup>;杨育红等<sup>[31]</sup>对第二松花江流域面源污染负荷的研究发现,流域多年平均输出的面源 N 输出负荷占 TN 总输出负荷的 44%;李卓瑞<sup>[32]</sup>等指出:动物粪便配施有机肥可显著影响水田中 N、P 输出负荷,2%、4%、6%和 8%添加量处理 TN、TP 输出负荷分别减少了 17.6%、24.7%、30.6%、37.7%和 26.0%、12.0%、15.7%、19.7%.通过比较发现,施加牛粪部分代替无机化肥的处理显著降低 N、P 输出负荷.因此,采用有机肥部分代替无机肥的施肥方式能降低田间水 N、P 输出负荷,从而达到水田面源污染田间消减的目的.

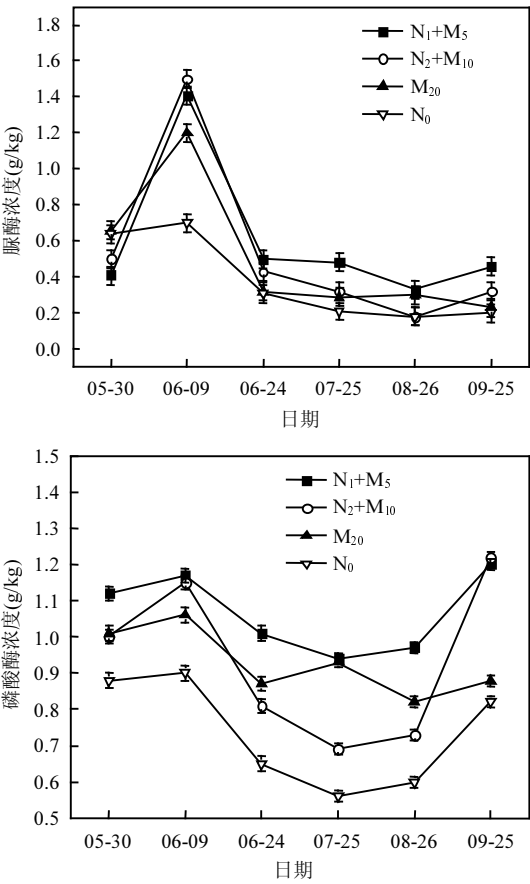


图 4 牛粪-化肥配施对土壤脲酶和磷酸酶的影响  
Fig.4 Effects of combined application of manure and chemical fertilizer on urease and phosphatase in soil

表 5 单位面积水田氮、磷素年输出负荷

Table 5 Output load of N、P in paddy field

| 处理                              | 输出负荷/(kg/hm <sup>2</sup> ) |                                 |                                 |      |      |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------|------|
|                                 | TN                         | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | TP   | 可溶性磷 |
| N <sub>0</sub>                  | 27.67                      | 17.06                           | 4.04                            | 2.76 | 1.03 |
| N <sub>1</sub> +M <sub>5</sub>  | 16.10                      | 8.17                            | 1.70                            | 2.20 | 0.82 |
| N <sub>2</sub> +M <sub>10</sub> | 17.70                      | 9.90                            | 2.52                            | 1.68 | 1.26 |
| M <sub>20</sub>                 | 9.89                       | 4.27                            | 1.67                            | 1.41 | 0.83 |

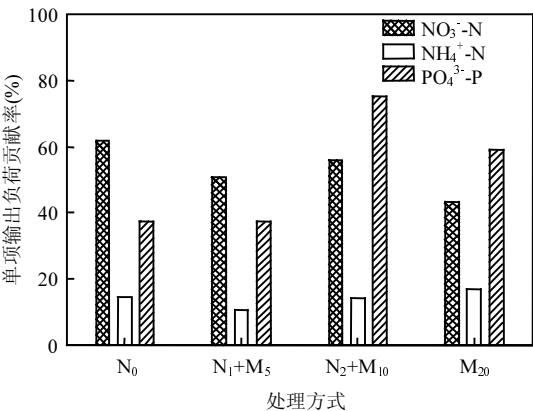


图 5 牛粪-化肥配施对各形态 N、P 输出负荷贡献率的影响  
Fig.5 Effects of dairy manure - fertilizer application on the contribution rate of N and P output loads

各种形态 N、P 对 TN、TP 输出负荷贡献率计算结果如图 5 所示. $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$ 、 $\text{M}_{20}$  处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  对 TN 输出负荷贡献率分别为 :14.60%、10.56%、14.24%、16.89% 和 61.66%、50.75%、55.93%、43.17%.分析可得:各处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  对 TN 输出负荷贡献率差异不大,稳定在 14.5%左右;随着牛粪施用量的增加, $\text{NO}_3^-\text{-N}$  对 TN 输出负荷贡献率虽仍处于较高水平,但呈现明显下降趋势.因此,控制稻田水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的损失,是提高其 N 含量的有效措施.且牛粪可促进稻田水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的固化,从而降低 TN 的输出负荷. $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  和  $\text{M}_{20}$  处理  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  对 TP 输出负荷贡献率分别为:37.3%、37.3%、75.0%和 58.9%.可见:随着牛粪施用量的增加, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  对 TP 输出负荷贡献率不但没有降低,反而呈增加趋势,以  $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  处理最为明显,造成这一现象的原因是,各处理磷酸氢二铵的施加



量有所不同,其含有大量的  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  在溶液中处于极不稳定状态,进而转化成  $\text{PO}_4^{3-}$ , 导致  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 在稻田水中的含量升高,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 占 TP 的比重加大.余进祥等<sup>[33]</sup>在研究鄱阳湖流域不同农业利用方式下的氮磷输出特征时表明:水田耕作方式下,有机肥和无机肥处理  $\text{NO}_3^{-}$ -N、 $\text{NH}_4^{+}$ -N 输出负荷分别占 TN 输出负荷的 7.1%、6.5%和 13.3%、11.2%.结果表明:相对无机肥而言,有机肥的施用可降低  $\text{NO}_3^{-}$ -N、 $\text{NH}_4^{+}$ -N 占 TN 输出负荷的百分比,和本研究在此方面结论一致.

2.5 有机肥部分替代化肥的经济效益评估

表 6 牛粪-化肥配施水稻效益评估

Table 6 Benefit evaluation on the combined application of manure - fertilizer

| 指标                        | $\text{N}_1+\text{M}_5$ | $\text{N}_2+\text{M}_{10}$ | $\text{M}_{20}$ | $\text{N}_0$ |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|--------------|
| 产量(kg/hm <sup>2</sup> )   | 8460                    | 9000                       | 8556            | 9024         |
| 实际收益(万元/hm <sup>2</sup> ) | 2.62                    | 2.79                       | 2.62            | 2.79         |
| 经济成本(元/hm <sup>2</sup> )  | 2930                    | 3416                       | 4000            | 2550         |
| 有机质(g/kg)                 | 21.6                    | 22.6                       | 22.1            | 20.5         |
| TP(g/kg)                  | 0.70                    | 0.79                       | 0.71            | 0.50         |
| TN(g/kg)                  | 1.19                    | 1.14                       | 1.19            | 0.90         |

注:二铵单价:3400元/t;牛粪单价:200元/t(主要为运输费用).

各处理水稻产量、收益和土壤质量评价指标如表 6 所示.施用牛粪部分替代化肥的处理稻谷产量并未增加,由于施加牛粪处理的经济成本较高,反而使水稻实际收益分别降低了 8.3%、3.2%和 11.1%.黄卉等<sup>[19]</sup>在研究牛粪配施无机肥对水稻产量的影响时,也得出相似结论.指出造成这一结果的原因是,牛粪中含有大量的木质性纤维素,营养成分分解成植物可利用形态的速率较慢,肥效远不及无机肥.但是配施牛粪处理可有效增加土壤有机质、TN 和 TP 含量,相对仅施用化肥处理( $\text{N}_0$ )而言,不同牛粪添加量土壤有机质含量分别提高了 5.4%、10.2%和 7.8%;TP 含量提高了 40.0%、58.0%和 42.0%;TN 含量提高了 32.2%、26.7%和 32.2%.因此牛粪和化肥的配施,对土壤肥力的提高具有促进作用.武玉等<sup>[6]</sup>研究发现:牛粪表面有大量的阴离子,从而使土壤阳离子交换量增加 40%左右,因此,牛粪配施无机肥可显著提高土壤碱性阳离子交换量,提高土壤养分,同时可

通过改变土壤 N 素的持留和转化,提高 N 素的有效性;与 N 素不同,牛粪本身就富含 P 素,可直接提高土壤有效 P 的含量,促进植物生长.综合经济效益和生态效益结果,在外源 N 输入量相等的情况下,采用 10t 有机肥部分替代二铵作为底肥的处理( $\text{N}_2+\text{M}_{10}$ )较为经济,同时还有利于削减田间面源污染物 N、P 的输出和提高田间土壤有机质、N 和 P 的累积.

3 结论

3.1 在控制施肥 TN 含量相同的条件下,牛粪配施无机肥,控制面源污染物  $\text{NH}_4^{+}$ -N、 $\text{NO}_3^{-}$ -N、TN 和 TP 输出的重要时期分别是施肥后的前 5d、30d、7d 和 20d;且田间水中 TN、TP 浓度随时间变化规律符合单指数衰减方程.牛粪配施无机肥可降低稻田水 N/P,从而降低受纳水体富营养化的风险.相对单施无机肥  $\text{N}_0$  处理,配施牛粪  $\text{N}_1+\text{M}_5$ 、 $\text{N}_2+\text{M}_{10}$  和  $\text{M}_{20}$  处理土壤有机质含量提高了 5.4%、10.2%、7.8%;TN、TP 含量分别提高了 32.2%、26.7%、32.2%和 40.0%、58.0%、42.0%;脲酶、磷酸酶活性分别提高了 100%、5.9%、70.6%和 60.7%、19.7%、34.4%.

3.2 采用 10t 的有机肥部分替代二铵作为底肥的处理( $\text{N}_2+\text{M}_{10}$ )TN、TP 面源污染的输出负荷分别降低了 36.0%和 39.1%,同时具有较好的经济效益,是比较适合东北地区水田肥料管理的方式.

参考文献:

[1] 杨 慧,刘立晶,刘忠军,等.我国农田化肥施用现状分析及建议 [J]. 农机化研究, 2014,36(9):260-264.

[2] 杨家曼,张士云.判断我国主要化肥污染区及其对策建议 [J]. 山西农业大学学报, 2014,13(1):65-68.

[3] 祝 惠,阎百兴.三江平原稻田磷输出及迁移过程研究 [J]. 湿地科学, 2010,8(3):266-272.

[4] 李晓刚.我国农业面源污染现状及综合治理 [J]. 农业灾害研究, 2015,5(6):32-34.

[5] 刘钦普,林振山,周 亮.山东省化肥使用时空分异及潜在环境风险评价 [J]. 农业工程学报, 2015,31(7):208-214.

[6] 武 玉,徐 刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014,29(1):68-79.

[7] Emteryd O, Lu D Q, Nykvist N. Nitrate in soil profiles and nitrate pollution of drink water in the loss region of China [J]. Ambio,

- 1998,27(6):441-443.
- [8] Sun B, Zhang L X, Yang L Z, et al. Agricultural non-point source pollution in China: Causes and mitigation measures [J]. *Ambio*, 2012,41(4):370-379.
- [9] Ongley E D, Zhang X, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. *Environmental Pollution*, 2010,158(5):1159-1168.
- [10] 孟安华,张振都,吴景贵.不同处理牛粪对大豆重茬土壤腐殖质组成和结构特征的影响 [J]. *西北农林科技大学学报*, 2016, 44(10):141-149.
- [11] 马锋锋,赵保卫,刁静茹,等.牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 [J]. *环境科学*, 2015,36(5):1678-1685.
- [12] 马峰峰,赵保卫,钟金魁,等.牛粪生物炭对磷的吸附特性及其影响因素研究 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(4):1156-1163.
- [13] 冯 珂,田晓燕,王莉霞,等.化肥配施生物炭对稻田面水氮磷流失风险影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016,35(2):329-335.
- [14] 王萌萌,周启星.生物炭的土壤环境效应及其机制研究 [J]. *环境化学*, 2013,32(5):768-777.
- [15] 罗春燕,冀宏杰,张维理,等.鸭粪和猪粪中易溶性磷含量特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2008,27(4):1320-1325.
- [16] 马晓焉,刘 明,李忠佩.不同猪粪施用量下红壤水稻土表层水氮磷动态 [J]. *土壤*, 2015,47(2):289-296.
- [17] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策 [J]. *环境与土壤*, 2000, 9(1):1-6.
- [18] 王小治,朱建国,封 克,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.
- [19] 侯 英,张园园,刘思博,等.草原土壤氮、磷元素对植物群落特征的影响 [J]. *畜牧与饲料科学*, 2017,38(1):47-49.
- [20] 纪雄辉,郑圣先,刘 强,等.使用猪粪和化肥对稻田土壤表面水氮磷动态的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2007,26(1):29-35.
- [21] 李如忠,刘科峰,钱 靖,等.合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 [J]. *环境科学*, 2014,(5):1718-1726.
- [22] Liang X Q, Zhu S R, Ye R Z, et al. Biological thresholds of nitrogen and phosphorus in a typical urban river system of the Yangtz delta, China. *Environmental Pollution*. 2014,192:251-258.
- [23] 黄 卉,王 波,朱利群,等.稻田处理养殖场粪便的氮磷动态效应与污染风险研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009,28(4): 736-743.
- [24] 刘富春,敖维琼.绿肥鲜草与牛粪还田对水稻产量及土壤理化性状的影响 [J]. *农技服务*, 2013,30(10):1063-1064.
- [25] 习 斌,翟丽梅,刘 申,等.有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015,21(2):326-335.
- [26] 王 斌,李蝉云.浅析化肥对土壤理化性质及三要素的影响 [J]. *陕西农业科学*, 2011,(3):110-111.
- [27] 李 芳,信秀丽,张从志,等.长期不同施肥处理对华北潮土酶活性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2015,24(6):984-991.
- [28] 周俊国,杨鹏鸣.不同肥料对土壤脲酶和碱性磷酸酶活性的影响 [J]. *西南农业学报*, 2012,25(2):577-579.
- [29] 祝 惠,阎百兴.三江平原水田氮的侧渗输出研究 [J]. *环境科学*, 2011,32(1):108-112.
- [30] 赵和文,柳振亮,刘建斌,等.无土栽培营养液 pH 值对黄连木幼苗生长及营养元素吸收的影响 [J]. *北京农学院学报*, 2004,19(4): 48-50.
- [31] 杨育红,阎百兴,沈 波,等.第二松花江流域非点源污染输出负荷研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009,28(1):161-165.
- [32] 李卓瑞,韦高玲.不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响 [J]. *生态环境学报*, 2016,25(2):333-338.
- [33] 余进祥,赵小敏,吕 菲,等.鄱阳湖流域不同农业利用方式下的氮磷输出特征 [J]. *江西农业大学学报*, 2010,32(2):0394-0402.

**作者简介:** 崔 虎(1991-),男,河南永城人,中国科学院大学硕士研究生,主要从事面源污染与控制研究。