

王春雪, 舒正文, 李敏, 等. 水稻种植在牛粪化肥配施条件下消纳氮磷的作用[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1578–1588.

WANG Chun-xue, SHU Zheng-wen, LI Min, et al. Effects of nitrogen and phosphorus uptake by rice planting with dairy manure and fertilizer applied together in a pot experiment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1578–1588.

## 水稻种植在牛粪化肥配施条件下消纳氮磷的作用

王春雪<sup>1,2</sup>, 舒正文<sup>1</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 李元<sup>1\*</sup>, 陈建军<sup>1</sup>, 祖艳群<sup>1</sup>, 王昭<sup>1</sup>, 张克强<sup>3</sup>

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南元谋 651300; 3. 农业农村部环境保护科研监测所大理综合实验站, 云南大理 671004)

**摘要:**为研究水稻作为湿地植物在防治面源污染方面的作用, 本研究采用盆栽试验的方式, 设置了4个施肥处理[100%化肥(100%F)、70%化肥+30%牛粪(70%F+30%M)、50%化肥+50%牛粪(50%F+50%M)、30%化肥+70%牛粪(30%F+70%M)], 在每个施肥处理中又分别设定水稻种植和无水稻种植(UN)两种处理, 以探讨种植水稻对整个体系中的碳(C)、氮(N)、磷(P)的消纳作用。结果表明, 水稻种植能够降低盆面水的pH值、化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)浓度, 尤其是在70%F+30%M处理下, 水稻对COD、TP、TN的减低效果最显著, 与无水稻种植相比, 其水稻种植条件下分别降低58.16%、65.50%和72.92%。100%F的水稻籽粒和茎叶的P含量最高; 70%F+30%M各部分的N含量最高; 50%F+50%M各部分的P含量最高; 30%F+70%M籽粒的N含量最高, 而茎叶的P含量最高。因此, 在配施牛粪的情况下, 水稻种植可以显著降低盆面水的pH值、COD、TP、TN, 稳定土壤中的N含量, 同时增加水稻植株中N、P的含量, 其中以70%F+30%M处理下水稻的水处理能力及植株N含量最佳。

**关键词:**水稻; 氮; 磷; 鲜牛粪; 土壤; 盆面水

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)07-1578-11 doi:10.11654/jaes.2018-1139

### Effects of nitrogen and phosphorus uptake by rice planting with dairy manure and fertilizer applied together in a pot experiment

WANG Chun-xue<sup>1,2</sup>, SHU Zheng-wen<sup>1</sup>, LI Min<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1\*</sup>, CHEN Jian-jun<sup>1</sup>, ZU Yan-qun<sup>1</sup>, WANG Zhao<sup>1</sup>, ZHANG Ke-qiang<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Institute of Tropical Eco-Agriculture Science, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou 651300, China; 3. Dali Experimental Station of Agro-Environmental Protection Institute, MOA, Dali 671004, China)

**Abstract:** In order to study the role of rice as a wetland plant in preventing non-point source pollution, four fertilization treatments were set up in a potted experiment [which were 100% chemical fertilizer (100%F), 70% chemical fertilizer + 30% dairy manure (70%F+30%M), 50% chemical fertilizer + 50% dairy manure (50%F+50%M), 30% chemical fertilizer + 70% dairy manure (30%F+70%M)], and in each fertilization treatment, rice planting and non-rice planting (UN) were set respectively in this study were used to investigate the absorption of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) from the whole system by rice planting. The results showed that rice cultivation could reduce the pH, chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (TP), and total nitrogen (TN) concentrations of basin surface water, especially under the 70%F+30%M treatment. Rice had the most significant effects on reducing the COD, TP, and TN. Compared with non-rice, COD, TP, and TN were reduced by 58.16%, 65.50%, and 72.92%, respectively, under rice planting conditions. P content of grain, stems and leaves of rice with 100% F was the highest. The N content of each part of the 70%F+30%M treatment plants was the highest. The P

收稿日期: 2018-09-04 录用日期: 2019-04-02

作者简介: 王春雪(1984—), 女, 河北涿鹿人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事农业生态学研究。E-mail: rouwz@163.com

\*通信作者: 李元 E-mail: liyuan@ynau.edu.cn

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金产业化培育项目(2016CYH11); 云南省农田无公害生产科技创新团队项目(2017HC015)

Project supported: Yunnan Provincial Department of Education Scientific Research Fund Industrialization Cultivation Project (2016CYH11); Yunnan Province Farmland Pollution-free Production Technology Innovation Team (2017HC015)

content of each part of the 50%F+50%M treatment plants was the highest. The seed grain N content of the 30%F+70%M treatment was the highest, whereas the P content of stems and leaves was the highest. Therefore, under the condition of the use of fresh dairy manure use with chemical fertilizer, rice plantings could significantly reduce the pH, COD, TP, TN of basin surface water, and stability of soil TN content, while at the same time increasing the N and P content in rice plants. The water treatment capacity and N content of rice were the best under the 70%F+30%M treatment.

**Keywords:** rice; nitrogen; phosphorus; fresh dairy manure; soil; water of pot

根据《湿地公约》,稻田是一种人工湿地,现有研究也表明,稻田与湿地的特征相似,水稻本身和稻田土壤对N、P的吸附固定可以有效降低农田排水中的N、P流失<sup>[1]</sup>。稻田人工湿地在承载粮食生产任务的同时,还有维持土壤肥力、净化水土、固碳减排、气候调节等生态系统服务功能,尤其对水体中的外源N、P的消减效果显著<sup>[2]</sup>。稻田湿地既是消纳N、P污染的“汇”,又是农业面源污染的“源”,只有合理构建和应用稻田湿地,才能发挥其“汇”的功能<sup>[2]</sup>。然而,在生产实践中,稻田管理一直以追求经济效益为主,而忽视了其湿地的生态功能,不合理的施肥和灌溉导致了稻田排水成为农业面源污染的主要来源之一<sup>[2]</sup>。基于此,如果能够充分利用稻田的湿地功能,将在改善土壤肥力、肥料用量、净化水质、减小环境负面影响等方面发挥重要作用。我国水稻种植面积大,其种植面积占全球的18%~19%,水稻总产量居全球首位,约占27%~28%<sup>[3]</sup>,为了获得高产,农民大多施肥过量<sup>[4]</sup>。稻田过量施肥后的氨挥发、N、P径流及渗漏流失都会引起农业面源污染,而水稻淹水期间,田面水中N、P的浓度是关键污染控制因子<sup>[5]</sup>。汤秋香等<sup>[6]</sup>研究表明,田面水对沟渠水N、P的贡献率分别为73%和82%,因此,研究田面水N、P浓度对于控制面源污染具有重要意义。

在利用水稻田的湿地消纳功能的同时,降低化肥的使用量也是降低水稻田农业面源污染的重要途径。我国耕地面积不足全世界的10%,但化肥用量接近世界总用量的1/3<sup>[7]</sup>。据统计,我国水稻N肥、P肥的利用率分别仅为27.1%和13.7%,N、P的流失量比旱地更为突出,稻田中的N、P通过泡田弃水、降雨、灌溉进入到周围水体,导致水环境质量下降,易造成农业面源污染<sup>[8]</sup>。而过量单一使用化肥同样也是造成耕地质量下降的原因之一<sup>[9]</sup>。同时,我国又是畜禽养殖大国,畜禽粪便资源丰富,并逐年增长。一方面,畜禽粪便是重要的环境污染源,另一方面,畜禽粪便可以作为农家肥用于保持土壤肥力、防止土壤板结、维持作物可持续生产<sup>[10]</sup>。农业有机物料具有资源化再利用

的特点,化肥与其配施既可以保证作物产量,又可以提升地力<sup>[11]</sup>。施用有机肥已经成为世界范围内的一种用来部分替代无机肥的手段。许多田间试验表明,化肥有机肥配施可以把化肥的速效性和有机肥的持久性的优点相结合,在保持作物稳产增产的同时,明显改善地力<sup>[12-13]</sup>。另外,有机无机肥配合施用还能够提高肥料的利用率,减少化肥和有机废物的环境污染<sup>[14]</sup>。施用有机肥作为减少化肥投入量和提高耕地土壤质量的技术手段,已经得到了较为广泛的研究<sup>[9]</sup>。因此,畜禽粪便中营养物质的再利用对于农业、生态、环境都具有重要意义。

针对保护洱海的迫切需要和大理当地的种养殖特色,本研究通过盆栽试验,以探索水稻对于盆面水、土壤中C、N、P的影响,以及水稻自身的生物量及氮、磷的吸收及配置特征,对指导当地利用稻田湿地消纳牛粪、减少化肥施用量、降低农业面源污染都具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于云南省大理白族自治州农业农村部环保所大理综合实验站(N:25°50'01",E:100°07'42",海拔:1 974.49 m)。该区为北亚热带低纬度高原季风气候,年平均气温15.1℃,最冷月平均气温8.8℃,最热月为20.1℃。年无霜期为230 d,干湿季分明,雨季主要集中在5—10月,年均降雨量为1 078.9 mm,平均降雨日为136 d。本盆栽试验在实验站的网棚内进行,降雨和光照都可进入网棚,最大程度地使试验条件接近大田。

### 1.2 供试土壤

供试土壤为实验站内水稻田0~40 cm的水稻土,其理化性质如表1所示,将土壤碾碎过1 cm的筛,人工搅拌均匀,平铺于晒谷场上太阳暴晒1 d,待用,测定土壤含水量为18.69%±0.79%。

### 1.3 试验处理

试验设置4个施肥梯度,2个种植处理(种水稻和

不种水稻),共8个处理,分别是:100%化肥种植水稻(100%F);70%化肥+30%鲜牛粪种植水稻(70%F+30%M);50%化肥+50%鲜牛粪种植水稻(50%F+50%M);30%化肥+70%鲜牛粪种植水稻(30%F+70%M);100%化肥不种水稻(100%F-UN);70%化肥+30%鲜牛粪不种水稻(70%F+30%M-UN);50%化肥+50%鲜牛粪不种水稻(50%F+50%M-UN);30%化肥+70%鲜牛粪不种水稻(30%F+70%M-UN)。试验使用的化肥为尿素(N,46.4%)、过磷酸钙( $P_2O_5$ ,16%)、硫酸钾( $K_2O$ ,50%);使用的牛粪为当地奶牛场的鲜牛粪,测定出的鲜牛粪养分含量为:全N:0.490 1%±0.049 3%,全P:0.191 2%±0.010 1%,全K:0.103 9%±0.022 9%,含水量为78.20%±2.66%。牛粪部分替代化肥,只进行氮素的替代,磷肥和钾肥均使用同样的量。肥料分为底肥、蘖肥、穗肥3次施入,4个处理中,鲜牛粪、过磷酸钙和硫酸钾都作为底肥一次性施入。尿素在100%F处理中平均分成3份,分3次施入,在其他3个处理中平均分成两份,作为蘖肥和穗肥两次施入。每盆施肥量如表2所示。

试验用盆采用塑料桶,桶口直径为35 cm,桶底直径为30 cm,桶高31 cm,每桶装土20 kg。每个施肥处理设置6盆,每盆栽7丛水稻,每丛3株,水稻品种为“云粳25”,在实验站苗圃育苗再进行移栽,移栽时株高为(10±2)cm。在水稻种植前,塑料桶中的土壤进行淹水24 h处理,然后施入底肥(表层撒施),移栽水稻幼苗。灌溉水使用当地的灌溉用水(即苍山降水),其养分含量见表3,盆面水平时保持水位5 cm,降雨后水位会升高。

#### 1.4 样品的采集

水稻于2017年6月4日插秧,2017年9月13日收获采样。其中,水稻植株采集每次每盆采集一棵,清洗后分开各部分进行鲜质量的称量,再用纸袋分装烘干到恒质量,测定各部分的干质量,最后将各部分磨细过筛,进行N、P含量的测定。每次在采集完水稻植株后,在水稻剩下的土坑内采集土样,采样位置为水稻根区,深度为0~10 cm,每个桶采集一个土壤样品,带回实验室风干过筛备用。水样在水稻收获前1 d采集,用脚踏真空泵采集表面以下土表以上的水,用

表1 供试土壤背景值

Table 1 Soil background value

pH值 pH value	有机质 Organic matter/ $g \cdot kg^{-1}$	总氮 Total nitrogen/ $g \cdot kg^{-1}$	碱解氮 Available nitrogen/ $mg \cdot kg^{-1}$	总磷 Total phosphorus/ $g \cdot kg^{-1}$	速效磷 Rapid available phosphorus/ $mg \cdot kg^{-1}$	全钾 Total potassium/ $g \cdot kg^{-1}$	速效钾 Available potassium/ $mg \cdot kg^{-1}$
7.88±0.13	24.38±2.24	1.01±0.09	83.57±8.11	0.56±0.06	54.10±5.43	22.21±0.53	40.23±3.60

表2 每盆施肥总量( $g \cdot 盆^{-1}$ )

Table 2 Total amount of fertilizer per pot( $g \cdot pot^{-1}$ )

施肥处理 Fertilization treatment	尿素 Urea	过磷酸钙 Superphosphate	硫酸钾 Potassium sulphate	鲜牛粪 Fresh dairy manure	实际施入的总氮 The total nitrogen actually applied	实际施入的总磷 The total phosphorus actually applied	总氮/总磷 TN/TP
100%F & 100%F-UN	3.32	4.03	1.12	0	1.54	0.28	5.47
70%F+30%M & 70%F+30%M-UN	2.32	4.03	1.12	94.22	1.54	0.46	3.34
50%F+50%M & 50%F+50%M-UN	1.66	4.03	1.12	157.03	1.54	0.58	2.65
30%F+70%M & 30%F+70%M-UN	0.10	4.03	1.12	219.84	1.54	0.70	2.19

注:盆中实际施入的总氮是尿素中的总氮与鲜牛粪中总氮的和,每个处理设定的总氮量一致,只是尿素和牛粪的配比不同。由于施入的磷化肥设定一致,所以随着牛粪替代比例的增加,实际施入的总磷就会随之增加,总氮/总磷就会降低。

Note: Total nitrogen actually applied into the basin is the sum of total nitrogen in urea and total nitrogen in fresh dairy manure. The total nitrogen quantity set for each treatment is the same, but the proportion of urea and dairy manure is different. Because of the consistent setting of phosphorus fertilizer applied, as the proportion of dairy manure replacement increased, the actual total phosphorus applied increased and total nitrogen/total phosphorus decreased.

表3 灌溉水水质特征

Table 3 Characteristics of irrigation water quality

pH值 pH value	化学需氧量 COD/ $mg \cdot L^{-1}$	总氮 TN/ $mg \cdot L^{-1}$	总磷 TP/ $mg \cdot L^{-1}$	硝态氮 NO <sub>3</sub> -N/ $mg \cdot L^{-1}$	氨态氮 NH <sub>4</sub> -N/ $mg \cdot L^{-1}$
8.19±0.03	10.96±3.06	0.67±0.08	0.15±0.01	0.39±0.05	0.31±0.05

250 mL的聚乙烯瓶分装,带回实验室在4℃的冰箱保存,48 h内测定完相关指标。

### 1.5 土壤、水、植物的测定方法

土样测定pH值、有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP),植物样测定的指标有生物量、TN含量、TP含量,烘干研磨过筛样品用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,TP测定用钼锑抗比色法,TN测定用凯氏定氮法。其测定方法均参照鲁如坤的《土壤农业化学分析方法》<sup>[15]</sup>。

水样测定的指标有pH值、TN、TP、COD,其中TN采用碱性过硫酸钾氧化分光光度法测定;TP使用钼酸铵分光光度法测定;pH值采用pH计测定;COD采用微波消解重铬酸钾氧化法测定。

### 1.6 计算公式及数据分析

水稻成熟期地上生物量/地下生物量、地上部分N(P)/地下部分N(P)、生殖器官N(P)/营养器官N(P)、植株总N/植株总P的计算公式如下:

地上生物量/地下生物量=[籽粒生物量+茎叶生

物量]/根生物量;

地上部分N(P)/地下部分N(P)=[籽粒生物量×籽粒N(P)含量+茎叶生物量×茎叶N(P)含量]/根生物量×根N(P)含量;

生殖器官N(P)/营养器官N(P)=[籽粒生物量×籽粒N(P)含量]/[茎叶生物量×茎叶N(P)含量+根生物量×根N(P)含量];

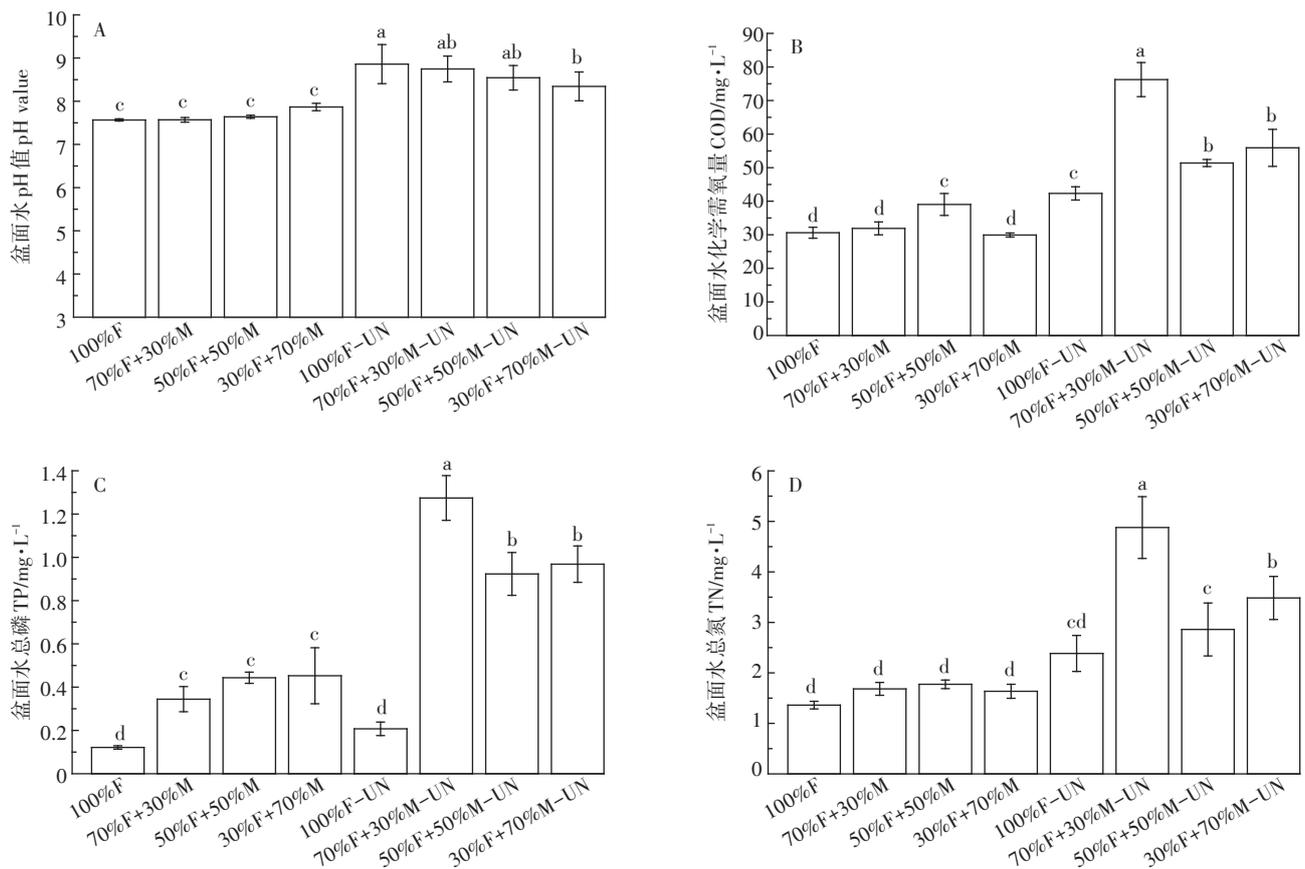
植株总N/植株总P=[根生物量×根N含量+茎叶生物量×茎叶N含量+籽粒生物量×籽粒N含量]/[根生物量×根P含量+茎叶生物量×茎叶P含量+籽粒生物量×籽粒P含量]。

试验数据使用Excel和SPSS软件进行分析,使用Origin软件进行图形制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻成熟期盆面水特征

图1A为盆面水pH值,由图可知,在无水稻种植



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ ). The same below

图1 水稻成熟期盆面水特征

Figure 1 Characteristics of basin water in ripening stage of rice

的情况下盆面水 pH 值随着牛粪替代量的增加而降低,而种植水稻后,4种施肥处理的盆面水 pH 值均显著降低,盆面水的 pH 值变化说明水稻的种植导致了水体的酸化。图 1B、图 1C、图 1D 分别为盆面水 COD、TP、TN 特征,在无水稻种植的情况下,70%F+30%M-UN 的 COD、TP、TN 浓度均显著高于其他 3 个处理,而种植水稻情况下,4 种施肥处理盆面水的 3 个指标都显著降低,盆面水 COD 浓度在 100%F、70%F+30%M、50%F+50%M、30%F+70%M 处理下,种植水稻与无水稻种植相比分别降低了 27.66%、58.16%、24% 和 46.47%;TP 浓度分别下降了 41.83%、72.92%、51.90% 和 53.20%;TN 浓度分别降低了 42.89%、65.50%、38.01% 和 53.06%。这说明 70%F+30%M 处理的水稻对于盆面水 COD、TP、TN 的消纳能力均最高。

## 2.2 盆面水 C、N、P 间的比例关系变化

盆面水的 C、N、P 之间的比例关系是水体中功能微生物群落结构的重要影响因素。图 2A 为 COD/TN,由图可知种植水稻后的 COD/TN 高于无水稻种植处理,这说明水稻的种植能够显著降低盆面水的 COD/TN。图 2B 为 TN/TP,该比值在是否种植水稻间都没有显著差异,而 100%F 处理无论是否种植水稻都显著高于其他 3 个施肥处理。说明水稻种植对盆面水 TN/TP 的数值没有显著影响,而牛粪施入带入了多余的 P 是降低盆面水 TN/TP 的主要影响因素。图 2C 为 COD/TP,种植水稻处理的 COD/TP 都显著高于不种植水稻处理,而 100%F 处理又显著高于其他几个处理。这说明水稻种植能够升高盆面水的 COD/TP 的值,施入牛粪可以显著降低盆面水的 COD/TP,这也是由于等 N 替代的情况下,牛粪的施入带入了多余的 P。

## 2.3 水稻成熟期土壤特征

由土壤 pH 值(图 3A)可知,100%F-UN 显著高于 100%F,水稻种植与无水稻种植相比,100%F 的土壤 pH 值降低了 3.47%。而其他 3 个施肥处理种植水稻与不种植水稻间没有显著差异,这说明在仅有化肥施用而无水稻种植的情况下土壤的 pH 值可以显著提高,这可能是由于尿素分解成的铵态氮使水体 pH 值升高。由土壤有机质变化情况可知(图 3B),无论种植水稻与否,土壤有机质含量都随着牛粪施用量的增加而升高,100%F 种植水稻后土壤的有机质含量要显著高于不种植水稻,而其他 3 个施肥处理种植水稻与否土壤有机质没有显著差异,这说明在有牛粪添加时,水稻对土壤有机质的增加作用不大,而没有牛粪

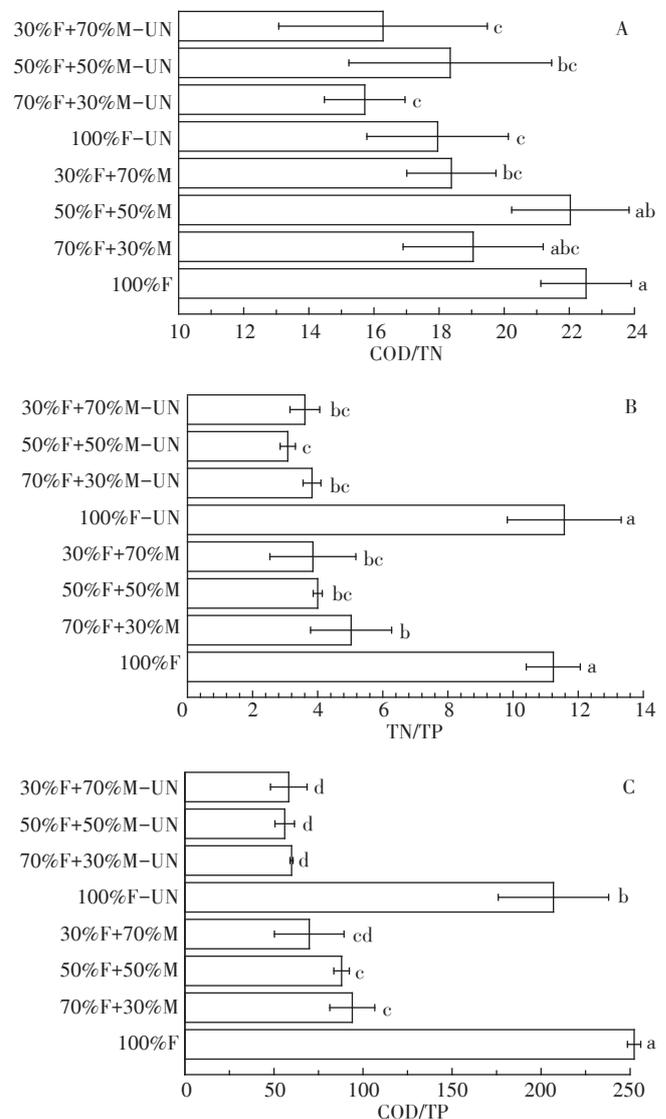


图 2 水稻盆面水 COD/TN、TN/TP、COD/TP 的差异比较

Figure 2 Comparison of COD/TN, TN/TP and COD/TP of basin water

添加的情况下,水稻本身的根系留土能够提高土壤的有机质含量,100%F 的根系生物量显著高于其他 3 个处理(表 4)。图 3C 为土壤 TP 含量,其中 70%F+30%M-UN 显著高于其他处理,而种植水稻后各处理间没有显著差异,这可能是由于 70%F+30%M 在无水稻种植情况下,聚磷菌将大部分 P 固定于土壤中,与不种植水稻相比,种植水稻的 70%F+30%M 的 TP 降低了 9.28%。图 3D 为土壤 TN 含量,图中水稻种植和无水稻种植的 4 个处理间均没有显著差异,说明种植水稻对土壤 TN 含量影响不显著。

## 2.4 土壤 C、N、P 间的比例关系

土壤中 C、N、P 间的比例关系可以很好地表明土

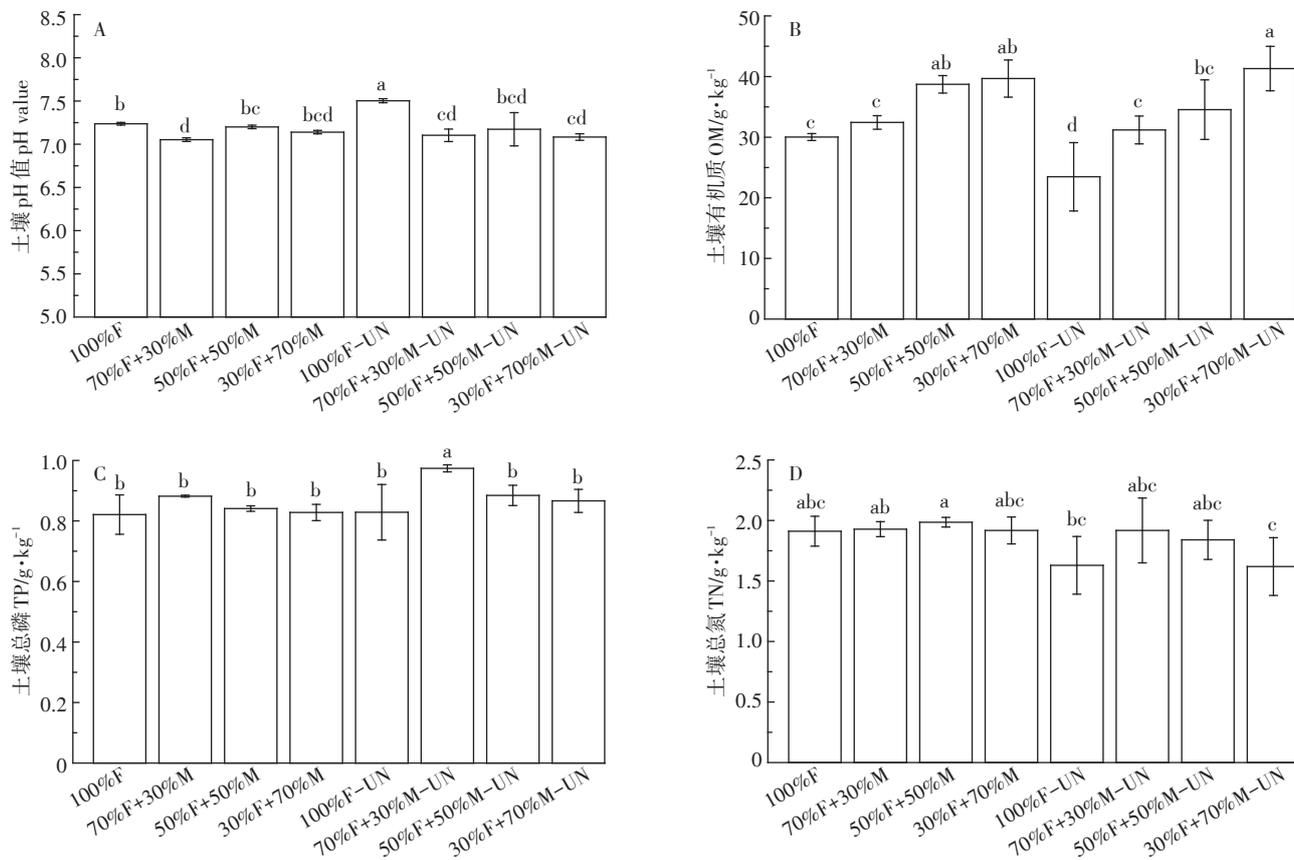


图3 水稻成熟期土壤TN、TP、OM及pH值特征

Figure 3 Soil TN, TP, OM and pH value characteristics of rice in ripening stage

壤的营养状况和营养元素流失的风险。由土壤OM/TN(图4A)可知,无论种植水稻与否,土壤OM/TN都随着牛粪替代量的增加而升高,其中30%F+70%M-UN显著高于30%F+70%M,与不种植水稻相比,种植水稻30%F+70%M的OM/TN降低20.99%,其他3个施肥处理在是否种植水稻间没有显著差异。说明随着牛粪替代量的增加,土壤的OM/TN也随之显著增加,而在牛粪替代量为70%的情况下,种植水稻又使OM/TN显著降低。图4B为土壤TN/TP,由图可知100%和30%F+70%M种植水稻要显著高于不种植水稻的TN/TP,100%F和30%F+70%M的TN/TP分别升高70.41%和48.86%,水稻种植可以显著增加100%和30%F+70%M土壤的TN/TP,这可能是因为这两个处理中施入的N/P与水稻植株实际的N/P相差较大,导致了土壤中N、P的失衡。图4C为土壤OM/TP,由图可知,无论种植水稻与否,OM/TP都随着牛粪替代量的增加而增加,但是只有50%F+50%M显著高于50%F+50%M-UN,其他3个处理的种植与无水稻种植间没有显著差异。土壤水稻种植与无水稻种植相比,50%F+

50%M的OM/TP升高了17.61%。本研究结果表明,随着牛粪替代量的增加,土壤P流失的风险没有相应增加。而OM/TN和OM/TP随着牛粪替代量的增加而增加,这是因为TN和TP在短期内相对较稳定,而土壤OM增加是其增加的主要原因。

### 2.5 成熟期水稻N、P及生物量特征

水稻收获对N、P的移除是消纳N、P最重要的途径。本研究中成熟期水稻籽粒、茎叶、根的N、P含量和生物量见表4,可知各部分的生物量均随着牛粪替代量的增加而逐渐降低,这可能是由于盆栽土壤养分含量较低导致,这与大田的研究结果有差异(大田4个处理间产量无显著差异,数据未列出)。100%F的籽粒和茎叶中P含量最高;70%F+30%M的籽粒、茎叶、根中的N含量均最高,而茎叶中的P也最高;50%F+50%M的籽粒、茎叶、根中的P含量均最高;而30%F+70%M的籽粒中N最高,茎叶中P最高,而根中N、P含量都较低。这说明,在100%F条件下,水稻植株趋向于增加生物量和地上部分的P含量;70%F+30%M条件下,水稻倾向于增加整个植株的N含量;

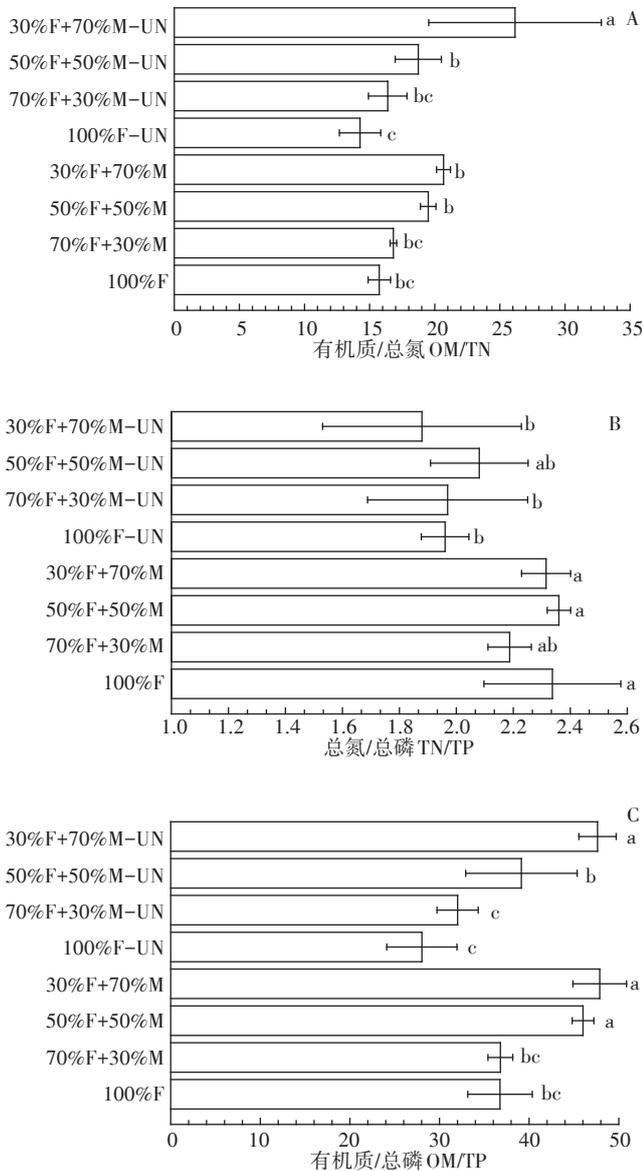


图4 土壤中OM、TN、TP间的比例关系

Figure 4 The OM/TN, TN/TP and OM/TP of soil

50%F+50%M条件下,植株倾向于增加整个植株的P含量;而30%F+70%M条件下则水稻植株把大量的N分配到籽粒中,把大量P分配到茎叶中,而根的营养最低。

## 2.6 水稻各部分间N、P及生物量间的比例关系

水稻各部分间的N、P比例关系可以进一步表明水稻的营养状况,以及收割带走N、P的比例,同时,植株的N/P比又可以与施肥的N/P比进行比较,阐释是否为合理施肥。表5为水稻地上部、地下部、生殖器官、营养器官的生物量及N、P含量的比例关系,由数据可知,4种施肥处理的生物量在各部分之间的比值没有显著差异,说明虽然生物量随着牛粪替代量的增

加而降低,但是其在各部分的配置比例没有受到施肥的影响,具有稳定性。地上部分P/地下部分P、生殖器官P/营养器官P都是随着牛粪替代量的增加而逐渐降低,而地上部分N/地下部分N及生殖器官N/营养器官N都是30%F+70%M最高,这说明30%F+70%M处理的N素更倾向于分配在地上部分和生殖器官中。70%F+30%M和30%F+70%M的植株总N/植株总P显著高于100%F和50%F+50%M。

## 2.7 盆面水及土壤指标相关性分析

土壤中N、P的含量是否会导致盆面水N、P浓度的升高,其相关性分析显示了内在的联系(表6)。由表6可知,土壤TP是一个重要的土壤指标,它与盆面水TN、TP、COD呈极显著正相关,与水TN/TP呈显著负相关。土壤TN/TP与盆面水pH值、TN、TP、COD呈极显著负相关关系,与水COD/TN呈极显著正相关关系。这说明,盆面水的TN、TP、COD随着土壤中TP的增加而增加,盆面水的pH值、TN、TP、COD随着土壤中TN/TP的增加而降低,而土壤中TP含量是随着牛粪的替代量增加而增加(表2),而施入的TN是相同的,因此都说明牛粪替代量的增加会增加盆面水TN、TP、COD的浓度。

## 3 讨论

使用新鲜牛粪进行田间施肥,在世界范围内都不常见<sup>[16]</sup>。其主要原因是人们认为鲜牛粪可能给农田带来杂草种子;未处理的粪便中可能含有大量致病菌<sup>[17]</sup>;土壤和地下水可能被来自牛粪的硝酸盐污染<sup>[18]</sup>;化肥更容易控制N、P、K的供给量。而以色列相关研究表明,用鲜牛粪替代化肥可以提高牧草产量和营养价值,同时提高了土壤养分水平和持水能力,并且也没有造成致病菌和杂草的威胁,因此,使用鲜牛粪替代化肥可以提高种养结合产业的净利润,并防止化肥污染水体<sup>[16]</sup>。基于此,我们也直接施用新鲜奶牛粪便来探索其对水稻种植是否可行。

### 3.1 不同化肥牛粪配施下水稻在盆面水N、P消纳中的作用

本研究对成熟期水稻盆面水水质的变化研究中发现,种植水稻在4种施肥处理中都可以显著降低水体TN、TP、COD的浓度(图1),而有牛粪施用的处理中,盆面水的TN、TP、COD都显著高于100%F处理,这说明牛粪中的养分在水稻生长期缓慢释放,导致成熟期仍然有较高的水体浓度,而水稻种植又消纳了水体中大部分的N、P,使水体中的养分显著降低,从

表4 水稻成熟期各部分N、P含量及生物量

Table 4 Nitrogen and phosphorus content and biomass in different parts of rice in ripening period

植株指标 Parameters of the plant		100%F	70%F+30%M	50%F+50%M	30%F+70%M
籽粒 Grain	氮 N/g·kg <sup>-1</sup> DW	6.93±0.46b	8.02±0.92a	7.25±0.11b	8.68±0.45a
	磷 P/g·kg <sup>-1</sup> DW	2.88±0.18a	2.47±0.25b	2.81±0.20a	2.11±0.16c
	烘干生物量 Drying biomass/g·plant <sup>-1</sup>	10.56±2.03a	7.02±0.96b	5.50±0.62c	4.77±0.85c
	氮磷比 N/P	2.42±0.28c	3.28±0.51b	2.59±0.17c	4.12±0.25a
茎叶 Stems and leaves	氮 N/g·kg <sup>-1</sup> DW	3.83±0.40b	4.87±0.35a	3.54±0.18bc	3.41±0.20c
	磷 P/g·kg <sup>-1</sup> DW	1.20±0.14a	1.26±0.24a	1.20±0.20a	1.12±0.15a
	烘干生物量 Drying biomass/g·plant <sup>-1</sup>	11.81±0.90a	8.49±0.83b	6.93±0.76c	5.76±0.85d
	氮磷比 N/P	3.22±0.50b	3.92±0.43a	3.01±0.46b	3.09±0.55b
根 Root	氮 N/g·kg <sup>-1</sup> DW	2.29±0.16c	4.29±0.11a	3.63±0.45b	2.29±0.09c
	磷 P/g·kg <sup>-1</sup> DW	0.69±0.04c	0.71±0.06c	1.05±0.16a	0.90±0.11b
	烘干生物量 Drying biomass/g·plant <sup>-1</sup>	4.63±0.66a	3.05±0.61b	2.33±0.39c	2.08±0.39c
	氮磷比 N/P	3.34±0.34b	5.66±0.47a	3.51±0.54b	2.58±0.34c

注:同一器官同一指标的4个不同施肥处理之间进行单因素方差分析,不同字母表示 $P<0.05$ ,有显著差异。下同。

Note: One-way anova is performed between 4 different fertilization treatments with the same index in the same organ.  $P<0.05$  is indicated by different letters, and there is significant difference. The same below.

表5 水稻不同部分间氮、磷及生物量的比例关系

Table 5 The proportion of nitrogen, phosphorus and biomass between different parts of rice

施肥处理 Fertilization treatments	100%F	70%F+30%M	50%F+50%M	30%F+70%M
地上生物量/地下生物量 Aboveground biomass/underground biomass	4.95±1.20a	5.23±0.97a	5.46±0.85a	5.13±0.81a
地上部分氮/地下部分氮 Aboveground N/underground N	11.71±4.11a	7.69±1.65b	7.85±1.38b	13.08±2.41a
地上部分P/地下部分P Aboveground P/underground P	14.32±3.38a	12.55±2.72ab	10.02±1.06bc	9.00±1.34c
生殖器官生物量/营养器官生物量 Reproductive organs biomass/vegetative organs biomass	0.64±0.12a	0.62±0.11a	0.60±0.08a	0.61±0.07a
生殖器官N/营养器官N Reproductive organs N/vegetative organs N	1.32±0.32b	1.05±0.23b	1.21±0.16b	1.71±0.33a
生殖器官P/营养器官P Reproductive organs P/vegetative organs P	1.78±0.46a	1.39±0.44ab	1.48±0.40ab	1.22±0.16b
植株总N/植株总P Plant total N/plant total P	2.72±0.28b	3.65±0.34a	2.78±0.14b	3.60±0.26a

表6 盆面水与土壤指标间的相关性分析( $n=24$ )Table 6 Correlation analysis of basin water and soil index ( $n=24$ )

	盆面水pH值 Basin water pH	盆面水总氮 Basin water TN	盆面水总磷 Basin water TP	盆面水COD Basin water COD	盆面水COD/总氮 Basin water COD/TN	盆面水总氮/总磷 Basin water TN/TP
土壤pH值Soil pH			-0.470*			0.675**
土壤总氮Soil TN						
土壤总磷Soil TP		0.625**	0.647**	0.642**		-0.457*
土壤有机质Soil organic matter						-0.719**
土壤有机质/总氮Soil OC/TN						-0.519**
土壤总氮/总磷Soil TN/TP	-0.550**	-0.661**	-0.455*	-0.606**	0.569**	
土壤有机质/总磷Soil OC/TP	-0.426*					-0.566**

而降低了流失的风险。沈其荣等<sup>[19]</sup>研究也发现,在淹水条件下牛粪N素的释放始速较小并且恒定,这与本研究盆面水在有牛粪配施条件下,成熟期盆面水的养分含量仍较高的结果相似。

水中的TN、TP、COD的比值对于微生物群落及功能具有显著的影响。本研究发现,100%化肥处理的

COD/TN、TN/TP、COD/TP与其他3个有牛粪配施的处理相比都较高。Zou研究表明,低COD/N有利于水体中微生物的积累<sup>[20]</sup>。COD/N比值决定了功能性生物可利用的碳量,从而塑造了微生物群落的动态<sup>[21]</sup>。因此,有牛粪配施的处理中水体微生物可能较为丰富。Wang等<sup>[21]</sup>研究发现,水体中随着COD/N比值的下降,

导致硝酸盐的积累,从而降低了反硝化率。这有利于N在水中积累,便于水稻吸收,也说明了本研究中,有牛粪配施的处理在水稻成熟期水体的TN浓度仍然较高的原因。本研究中,70%F+30%M对盆面水TN的净化能力最高,达到65.50%,但成熟期收割的TN却不是最高的,这也说明了水稻在70%F+30%M处理下对N素的移除,除了水稻本身的吸收外,其他与种植水稻有关的途径也起了重要作用,如水稻根际微生物可能在N移除方面起到了重要作用<sup>[22]</sup>。另有研究表明,水中C/P值的降低使TP的去除率下降,而不影响C和N的去除率;C/P比值决定了微生物种群的多样性和结构<sup>[23]</sup>。本研究中,有牛粪配施的3个处理COD/TP显著低于100%F处理,因此有牛粪配施的处理对TP的去除率较高,这与前人的研究结果相同。

### 3.2 不同化肥牛粪配施下水稻在土壤养分变化中的作用

土壤OM是研究土壤肥力和评价土壤质量的重要指标,在培育肥力、调节土壤理化性质、提供作物营养、改善土壤结构及减少环境负面影响等方面具有重要作用<sup>[24]</sup>。同时,OM还可以保护酶在土壤中免遭降解,保持较高的酶活性<sup>[15]</sup>。本研究发现,化肥配施牛粪可以显著提高土壤中OM的含量,而种植水稻对施用牛粪的土壤OM含量影响不显著,但是100%F条件下种植水稻却能够增加土壤OM的含量,这说明水稻在平衡土壤OM含量中起着一定的作用,可以通过增加土壤中根的生物量而间接增加土壤有机质含量。宓文海等<sup>[11]</sup>的研究也表明,与其他有机物料相比,化肥与牛粪配施下土壤有机质增幅最大。

本研究中,70%F+30%M施用后土壤的TP显著增加,而种植水稻土壤TP又显著降低,这说明70%F+30%M处理增加了土壤中植物可利用P的量,因此,种植水稻可以显著降低土壤TP含量。李想<sup>[14]</sup>研究表明,有机肥的施用有利于土壤中的无机P向有效态转化,不但增加了土壤有效态无机P的供应强度,而且增加了供应容量,从而极大地提高了土壤无机P的有效性。同时,70%F+30%M处理的土壤pH值最低,这也可能是P活性增加的关键。例如有研究发现,P的有效性受到一系列pH值依赖的生物和非生物反应的影响,这些反应会影响土壤中可溶态P和不溶态P的比例<sup>[25]</sup>。其中包括:交换态P的吸附和溶解;土壤微生物和植物通过菌根菌丝或根系对P的吸收;微生物分泌释放磷酸酶和有机酸使无机P从土壤或肥料中释放出来;微生物对有机质的矿化等<sup>[16-27]</sup>。本研究发

现,与种植前土壤相比,4种施肥处理都能够显著提高土壤TN含量,但是水稻种植与否对土壤TN含量影响不显著,这说明施肥都能够增加土壤N含量,而整个水稻-土壤-水系统对土壤N有一个稳定缓冲作用,土壤中N含量达到一个稳定值则植物对其影响不显著。宓文海等<sup>[11]</sup>的研究也发现,无论是单施化肥还是化肥与有机物料配施,都能显著提高水稻土壤的全N,其中以化肥牛粪配施提高土壤全N效果最为显著。

### 3.3 不同化肥牛粪配施下水稻对氮、磷的配置特征

尹爱经等<sup>[28]</sup>研究表明,污水中N、P存在正交互作用,即P浓度提高可以促进N素的吸收。王伟妮等<sup>[29]</sup>研究发现,在合理施肥条件下,其中一种肥料用量低时,可以促进另一种肥料的释放。本研究中,70%F+30%M肥料施入的N/P为3.335,水稻植株的N/P为3.646,50%F+50%M肥料施入的N/P为2.647,植株的N/P为2.780,这两个施肥处理的肥料施入和水稻生长的N/P最为接近,因此,对于水稻氮磷吸收比例来说属于合理施肥,在合理施肥的条件下,70%F+30%M的N/P比较高,因此说明P用量低,会促进N的释放,所以导致的结果是70%F+30%M水稻各部分的N含量最高,同理50%F+50%M处理的各部分P含量最高,试验结果也验证了该结论。因此在本研究中,从水稻植株养分含量的角度出发,30%~50%的牛粪替代比例都是促进N、P吸收的最优替代比例。许多学者研究指出,畜禽粪便与化肥混合施用,无机N的正激发效应可以提高有机N矿化,有机N的存在可以促进无机N的生物固定,从而降低无机N的挥发和硝化淋失、提高N肥的利用效率<sup>[30-32]</sup>,与本研究的结果相似。陈贵等<sup>[33]</sup>的研究发现,单独施用牛粪导致水稻产量明显下降,主要是由于水稻单位面积的穗数降低所致,可能是由于牛粪养分含量相对较低,矿化速率小养分释放慢,导致不能及时提供水稻分蘖所需的养分。本研究中在30%F+70%M条件下,水稻植株的生物量和N、P含量都显著降低,也说明了较高的牛粪替代导致速效养分较低,不利于水稻的生长、积累。

## 4 结论

(1)在70%F+30%M处理下,水稻对盆面水COD、TP、TN的消纳效果最显著,与无水种植相比,在该施肥处理下,水稻种植分别降低58.16%、65.50%和72.92%。

(2)70%F+30%M处理下,水稻植物各部分的N含量都显著高于其他施肥处理。

(3)随着牛粪配施量的增加,盆面水和土壤中的TP都会增加,但是,由于水稻自身的湿地植物吸收等作用,TP对于水体的流失风险不会增加(即盆面水TP浓度没有显著增加)。

(4)将水稻生长期施入的N/P与水稻植株的N/P作比较来判断是否为合理施肥,结果表明,水稻植株的N/P与施入土壤中的N/P越接近,盆面水的N、P含量越低,即N、P流失的风险越低。

#### 参考文献:

- [1] 张明奎, 方利平. 河岸水稻缓冲带宽度对排水中氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4):10-13.  
ZHANG Ming-kui, FANG Li-ping. Effects of riparian rice buffers width on concentration of nitrogen and phosphorus in drainage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4):10-13.
- [2] 郭海瑞, 赵立纯, 窦超银. 稻田人工湿地氮磷去除机制及其研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6):23-26.  
GUO Hai-rui, ZHAO Li-chun, DOU Chao-yin. Nitrogen and phosphorus removal mechanism of constructed wetland in rice field and its research progress[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2018, 46(6):23-26.
- [3] 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 De-feng, ZHANG Yu-ping, CHEN Hui-zhe, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17):3404-3414.
- [4] 马凡凡, 邢素林, 徐云连, 等. 肥料施用对稻田氮磷流失的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(2):14-18.  
MA Fan-fan, XING Su-lin, XU Yun-lian, et al. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus loss in paddy field[J]. *Journal of Chinese Rice*, 2018, 24(2):14-18.
- [5] 吕亚敏, 吴玉红, 李洪达, 等. 减肥措施对稻田田面水氮、磷动态变化特征的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(4):349-355.  
LÜ Ya-min, WU Yu-hong, LI Hong-da, et al. Effects of dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field under different fertilizer rate[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(4):349-355.
- [6] 汤秋香, 任天志, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3):608-615.  
TANG Qiu-xiang, REN Tian-zhi, LEI Bao-kun, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in various crop rotation system in northern watershed of Erhai lake[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3):608-615.
- [7] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2):292-304.  
WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zu-cong, et al. Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2):292-304.
- [8] 岳玉波, 沙之敏, 赵峥, 等. 不同水稻种植模式对氮磷流失特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(12):1424-1432.  
YUE Yu-bo, SHA Zhi-min, ZHAO Zheng, et al. Effects of rice cultivation patterns on nitrogen and phosphorus leaching and runoff losses[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(12):1424-1432.
- [9] 陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 绿肥和小麦秸秆与化肥配施对水稻生长和青紫泥土壤肥力的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(10):1797-1801.  
CHEN Gui, ZHANG Hong-mei, SHEN Ya-qiang, et al. Influence of incorporation of green manure, wheat straw and chemical fertilizer on rice growth and fertility of purple clay-based paddy soil[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(10):1797-1801.
- [10] 谢光辉, 包维卿, 刘继军, 等. 中国畜禽粪便资源研究现状述评[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4):75-87.  
XIE Guang-hui, BAO Wei-qing, LIU Ji-jun, et al. An overview of researches on livestock and poultry excreta resource in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(4):75-87.
- [11] 宓文海, 吴良欢, 马庆旭, 等. 有机物料与化肥配施提高黄泥田水稻产量和土壤肥力[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13):103-108.  
MI Wen-hai, WU Liang-huan, MA Qing-xu, et al. Combined application of organic materials and inorganic fertilizers improving rice yield and soil fertility of yellow clayey paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(13):103-108.
- [12] 董春华, 高菊生, 曾希柏, 等. 长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2):336-345.  
DONG Chun-hua, GAO Ju-sheng, ZENG Xi-bai, et al. Effects of long-term organic manure and inorganic fertilizer combined application on rice yield and soil organic carbon content in reddish paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2):336-345.
- [13] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3):516-523.  
HOU Hong-qian, LIU Xiu-mei, LIU Guang-rong, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3):516-523.
- [14] 李想. 有机无机肥磷配施的协同效应与机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.  
LI Xiang. The synergistic effects and mechanisms of combined application of organic and inorganic phosphorous fertilizer[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2012.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.  
LU Ru-kun. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [16] Mirona J, Yosefa E, Nikbachata M, et al. Fresh dairy manure as a substitute for chemical fertilization in growing wheat forage; effects on soil properties, forage yield and composition, weed contamination, and hay intake and digestibility by sheep[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 168:179-187.
- [17] Peacock A D, Mullen M D, Ringelberg D B, et al. Soil microbial com-

- munity responses to dairy manure or ammonium nitrate applications [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33:1011-1019.
- [18] Geohring L D, McHugh O V, Walter M T, et al. Phosphorus transport into subsurface drains by macropores after manure application: Implications for best manure management practices[J]. *Soil Science*, 2001, 166:896-909.
- [19] 沈其荣, 沈振国, 史瑞和. 有机肥氮素的矿化特征及其化学组成的关系[J]. 南京农业大学学报, 1992, 15(1):59-64.  
SHEN Qi-rong, SHEN Zhen-guo, SHI Rui-he. The characteristics of mineralization of nitrogen in organic manure and its relation to chemical composition of organic manure[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1992, 15(1):59-64.
- [20] Zou X. Effect of C/N ratio on properties of aerobic granular sludge[J]. *Chin J Environ Eng*, 2012, 6(11):3928-3932.
- [21] Wang H Y, Song Q, Wang J, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor with high dissolved oxygen: Effects of carbon to nitrogen ratios[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 1145-1152.
- [22] Chen D M, Yuan L, Liu Y R, et al. Long-term application of manures plus chemical fertilizers sustained high rice yield and improved soil chemical and bacterial properties[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 90:34-42.
- [23] He Q L, Zhou J, Song Q, et al. Elucidation of microbial characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal at varying carbon to phosphorus ratios[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241:127-133.
- [24] 尹云锋, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期施肥条件下潮土不同组分有机质的动态研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5):875-878.  
YIN Yun-feng, CAI Zu-cong, QIN Sheng-wu. Dynamics of fluvio-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5):875-878.
- [25] DeLuca T H, Gundale M J, MacKenzie M D. Biochar effects on soil nutrient transformations[M]//Lehmann J, Joseph, Stephen, et al. Biochar for environmental management: Science and technology. London, UK: Earthscan, 2009:251-270.
- [26] Frossard E, Achat D L, Bernasconi S M, et al. The use of tracers to investigate phosphate cycling in soil-plant systems[M]//Bünemann E, Oberson A, Frossard E, et al. Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling, Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 59-91.
- [27] Zhu J, Li M, Whelan M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612:522-537.
- [28] 尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水氮、磷浓度对水稻生长及氮磷利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4):768-776.  
YIN Ai-jing, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Effects of the N and P concentrations in domestic wastewater on the growth, N and P uptakes of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4):768-776.
- [29] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6):645-653.  
WANG Wei-ni, LU Jian-wei, HE Yu-qing, et al. Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(6):645-653.
- [30] 张 鸣, 高天鹏, 李 昂, 等. 畜禽粪肥与化肥配施对春小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2):216-221.  
ZHANG Ming, GAO Tian-peng, LI Ang, et al. Effects of different combinations of animal manures and chemical fertilizer on yield, nutrient uptake and utilization of spring wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(2):216-221.
- [31] 叶 静, 安藤丰, 符建荣, 等. 不同有机肥对土壤中的氮素矿化及对化肥氮固持的影响[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(3):176-180.  
YE Jing, AN Teng-feng, FU Jian-rong, et al. Effects of different organic manures on N mineralization and N retention in the soil[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(3):176-180.
- [32] Han K H, Choi W J, Han G H, et al. Urea-nitrogen transformation and compost-nitrogen mineralization in there different soils as affected by the interaction between both nitrogen inputs[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(3):193-199.
- [33] 陈 贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1):59-65.  
CHEN Gui, ZHANG Hong-mei, SHEN Ya-qiang, et al. Application effects of swine and cow manures on rice yield, nutrient uptakes and use efficiencies and soil fertility[J]. *Soils*, 2018, 50(1):59-65.