

刘雅文, 马资厚, 潘复燕, 等. 不同土壤添加剂对太湖流域水稻产量及氮磷养分利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1395–1405.

LIU Ya-wen, MA Zi-hou, PAN Fu-yan, et al. Effects of different soil additives on rice yield and utilization of nitrogen and phosphorus in the Tai Lake region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1395–1405.

不同土壤添加剂对太湖流域水稻产量及氮磷养分利用的影响

刘雅文^{1,2}, 马资厚¹, 潘复燕³, 杨林章¹, 薛利红^{1*}

(1.江苏省农业科学院, 农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2.南京林业大学, 南京 210037; 3.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要:为探讨土壤添加剂对太湖流域稻田面源污染的控制效果, 选用生物炭、微生物菌肥和硝化抑制剂三种土壤添加剂作为供试材料, 通过盆栽试验研究其单独施用及两两组合配施对水稻生长、产量、肥期田面水养分动态、养分吸收利用以及土壤肥力等的影响。研究表明: 各添加剂处理均可保证水稻的正常生长, 并表现出增产效果, 生物炭添加处理、微生物菌肥与生物炭组合处理及生物炭与硝化抑制剂组合处理水稻产量分别较施肥对照处理提高了 57.5%、66.1%和 45.4%。各添加剂的施用对植株吸氮量的影响不显著, 仅微生物菌肥与生物炭组合处理显著提高了氮回收效率, 但是所有添加剂处理均显著提高了氮肥农学利用效率和生理效率, 生物炭处理和微生物菌肥与生物炭组合处理效果最佳, 各添加剂处理对水稻的磷素吸收利用没有影响。微生物菌肥单独处理提高了水稻基肥期田面水氮浓度, 而其他处理则表现为显著降低, 特别是与生物炭的组合处理; 蘖肥期各处理对田面水氮浓度影响不大; 穗肥期除生物炭与菌肥配施处理外, 其他各添加剂处理均显著提高了田面水氮浓度。添加剂处理还略微增加了基肥期和穗肥期的田面水总磷浓度, 但差异不显著。各添加剂处理对收获后土壤肥力指标没有影响。综合产量、氮肥吸收以及田面水氮磷流失风险, 微生物菌肥与生物炭组合处理可促进水稻生长, 显著提高水稻产量, 有效降低水稻生育前期氮素流失风险, 缩短养分流失风险期, 并能维持土壤肥力, 值得应用于太湖流域稻田的面源污染控制上。

关键词: 水稻; 土壤添加剂; 产量; 氮肥利用率; 田面水养分浓度

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)07-1395-11 doi:10.11654/jaes.2016-1674

Effects of different soil additives on rice yield and utilization of nitrogen and phosphorus in the Tai Lake region

LIU Ya-wen^{1,2}, MA Zi-hou¹, PAN Fu-yan³, YANG Lin-zhang¹, XUE Li-hong^{1*}

(1. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Key Lab of Agri-environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Agricultural nonpoint source pollution has been one of the main causes of water eutrophication in the Tai Lake region. Biochar, microbial agents, and nitrification inhibitors, individually or in combination, were added to the paddy soil in this study in order to evaluate the effect of different soil additives on paddy nonpoint pollution control. The effects on rice growth and yield, N and P uptake by rice, N and P concentration in surface water, and soil nutrient status after harvest were investigated. The results showed that all the soil additives ensured rice growth and promoted yield, with biochar, biochar combined with microbial agents, or nitrification inhibitors significantly increases—

收稿日期: 2016-12-29

作者简介: 刘雅文(1992—), 女, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 从事环境生态学研究。E-mail: zigubuxia@yeah.net

* 通信作者: 薛利红 E-mail: njxuelihong@gmail.com

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503106); 国家重点研发计划项目(2016YFD0801101); 江苏省自主创新项目(CX(15)1004)

Project supported: Special Fund for Agro-Scientific Research in the Public Interest(201503106); The National Research Program of China(2016YFD0801101); The Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund(CX(15)1004)

ing rice yield by 57.5%, 66.1%, and 45.4%, respectively, compared with the treatment without soil additive. The biochar combined with microbial agents treatment significantly increased the plant N uptake and N recovery efficiency, but all the treatments with additives significantly improved the agronomy efficiency and physiological efficiency of N, with the biochar treatment and the biochar and microbial agent combination treatment performing the best. Compared to the treatment without additives, the treatment with microbial agents increased the total N concentration in surface water, whereas other treatments, especially the treatment combining biochar with other additives, significantly decreased the total N concentration in surface water for the basal fertilizer stage. At the panicle fertilizer stage, all treatments with additives, except the combination treatment of biochar and microbial agents, obviously increased the N concentration of surface water. The total P concentration of surface water increased slightly at the basal and panicle fertilizer stages, but the difference was not significant when compared with the treatment without additives. No significant difference was observed in the soil fertility between the treatments with and without soil additives. For comprehensive consideration of yield, nitrogen use efficiency, and nutrient loss risk of surface water, the treatment combining microbial agents with biochar was best for maintaining the high paddy yield and reducing nutrient loss risk during the early fertilization period of the paddy. Therefore, this combination treatment is promising for controlling nonpoint source pollution in the Tai Lake region.

Keywords: paddy; soil additive; yield; nitrogen use efficiency; nutrient concentration in surface water

水稻是太湖流域主要的水田作物。与旱田不同,水田土壤含水率高,作物生长季节气温高,施肥后田面水养分迅速增加,使得养分流失风险增加。目前太湖地区农田面源污染治理的主要技术为源头减量技术,即通过有机替代或者肥料的优化运筹来减少肥料的施用量^[1],肥料适量减施对作物产量影响不大,但过多的肥料减施可能会造成作物的减产,要继续减少养分的流失就必须进一步提高肥料利用率,土壤添加剂成为首选。

已有研究报道,生物炭具有巨大的比表面积和孔隙度,施入土壤后可改善土壤环境^[5],吸附养分离子,推迟养分淋溶时间,减少氮素损失^[4],并可增加作物产量^[2-3]。郑小龙等^[6]发现,水稻施肥时添加生物炭能够适量吸附田面水中氮、磷等养分,降低养分流失风险。硝化抑制剂通过抑制铵态氮的硝化作用来提高氮素的利用率^[7-8],显著增加土壤矿质氮含量,降低其他去向氮含量^[9],可作为缓释肥料添加剂^[10]。微生物菌肥是由一种或数种微生物细菌经发酵而成的生物性肥料,具有无毒害无污染的特点^[11],稻田施用后可促进水稻根系发育,增产效果明显^[12]。崔曾杰等^[13]将生物菌肥应用于盐碱地,发现增施生物菌肥促进了水稻株高,提高了水稻全生育期叶片叶绿素含量。但稻季施用菌肥后可否降低田面水养分含量,从而降低养分流失风险还鲜见报道。

针对土壤添加剂应用于农田面源污染的研究大多集中于单一添加剂的施用,但单一添加剂施用后往往有得有失,而对于添加剂配施的效果目前研究较少。潘复燕等^[14]研究了不同添加剂组合施用对小麦产量及氮素流失的影响,发现添加剂两两配施均可以促进小麦的地上部生物量和产量,并呈现降低氮磷流失

的趋势。不同添加剂组合施用在水稻上是否也能起到增产减排的作用尚未见报道。为此,本研究以太湖流域的稻田系统为研究对象,选择生物炭、微生物菌肥和硝化抑制剂三种土壤添加剂,研究添加剂单施和两两配施对水稻生长、产量、肥期田面水养分动态和养分吸收利用以及土壤肥力等的影响,力求寻找集产量增加和氮磷损失减少于一身的最佳添加剂配施方案,为太湖面源污染控制提供应用依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

稻季盆栽试验于2014年7月10日至10月25日在江苏省农业科学院温室进行。温室环境温度为18~42℃,湿度为55%~70%。供试土壤为水稻土,取自太湖流域苏州望亭镇水稻田,基本理化性质:总氮1.89 g·kg⁻¹,总磷0.55 g·kg⁻¹,碱解氮212.5 mg·kg⁻¹,有效磷19.5 mg·kg⁻¹,速效钾99.0 mg·kg⁻¹,有机质20.5 g·kg⁻¹,pH 5.47。盆钵直径30 cm,高50 cm,底部密封,防止漏水漏肥。每盆装干土35 kg,栽种3穴,每穴3株,供试水稻品种为武运粳23号。稻季土壤添加剂选用微生物菌肥、生物炭和硝化抑制剂,试验中添加剂施用采用单施和组合配施两种方法,共设7个处理,分别为不施肥(NF)、施肥对照(SF)、施肥+微生物菌肥(FJ)、施肥+生物炭(FT)、施肥+微生物菌肥+生物炭(FJT)、施肥+硝化抑制剂(FX)、施肥+生物炭+硝化抑制剂(FTX),每个处理3个重复,共21盆。氮肥用量为1.413 g N·盆⁻¹(相当于200 kg N·hm⁻²),选用尿素分3次施用,基肥、分蘖肥和穗肥的比例为3:3:4,基肥与表层(20 cm)土壤充分混匀,蘖肥、穗肥均用尿素配制成溶液进行浇灌。磷肥0.495 g·盆⁻¹(相当于

70 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$), 钾肥 0.495 g $\cdot$ 盆 $^{-1}$ (相当于 70 kg $K_2O \cdot hm^{-2}$), 磷肥选用过磷酸钙, 钾肥选用氯化钾, 全部与土壤混匀后基施。采用常规水分管理, 即前期保持 3~5 cm 水层, 中期落干烤田, 灌浆后期保持浅水层。

微生物菌肥购买于上海绿乐生物科技有限公司, 胶冻样芽孢杆菌:枯草芽孢杆菌=1:9, 有效活菌数为 10^9 个 $\cdot$ g $^{-1}$, 施用量为 0.01%(W/W), 即 1.4 g $\cdot$ 盆 $^{-1}$, 在插秧前与 20 cm 表层土壤均匀混拌。生物炭为小麦秸秆炭, 500 °C 缺氧烧制, 比表面积 7.65 m $^2 \cdot$ g $^{-1}$, 孔容 0.01 cm $^3 \cdot$ g $^{-1}$ 、孔径 5.05 nm, 总氮含量 0.22%, CEC 为 25.45 mol $\cdot$ kg $^{-1}$, 施用量为 1%, 即 140 g $\cdot$ 盆 $^{-1}$, 在插秧前与 20 cm 表层土壤均匀混拌。硝化抑制剂购买于浙江奥复托化工有限公司, 主要成分为 2-氯-6-三氯甲基吡啶, 试验用量为施肥总氮的 0.5%, 即 0.007 g $\cdot$ 盆 $^{-1}$; 并按基肥、分蘖肥和穗肥为 3:3:4 的比例和氮肥一起施用, 施用时间与氮肥一起配制成溶液进行浇施。肥料均在晚上施入, 第 2 d 记为施肥后第 1 d。

1.2 测定项目和分析方法

水稻关键生育期(分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期)非破坏性测定水稻株高、植被覆盖指数(NDVI)以及叶绿素值(SPAD), 并破坏性取土壤样品。株高采用直尺测量, 测量 3 穴取平均值为该处理株高; SPAD 值用日本产的叶绿素仪 SPAD-502 测定, 测定每盆所有主茎的第一片全展叶, 取平均值; NDVI 值采用 Trimble 公司的 GreenSeeker 手持式光谱仪测定, 保持离冠层高度 0.5 m, 每盆重复测定 3 次, 取平均值。

田面水水样分别在施肥后的第 1、2、3、5、7 d 采集, 之后每隔 5~7 d 取一次样。水样经 Whatman 中速双圈定性滤纸过滤后用德国 Bran+Luebbe 公司生产的 AA3 流动分析仪测定总氮(TN)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮($NO_3^- - N$)和总磷(TP)浓度。

在水稻关键生育期(分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期)和收获后用直径 25 mm 土钻 3 点采集 0~15 cm 土层的土壤样品, 混合后约 500 g 装入自封袋, 带回实验室自然风干。部分样品研磨过 20 目筛后用碱解扩散法测定碱解态氮, 碳酸氢钠法测定有效磷含量。成熟期土样部分样品研磨过 100 目筛, 采用开氏消煮-半自动凯氏定氮法测定土壤总氮含量、酸溶-钼锑抗比色法测定全磷含量、水合热重铬酸钾氧化-比色法测定有机碳含量^[15]。

水稻成熟后, 沿地表进行收割, 取其地上部分, 称取各处理生物量和每盆实际所得籽粒重量。植株和籽粒烘干粉碎过筛后, 用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮, 半自动凯氏

定氮仪测定总氮含量, 钼锑抗比色法测定总磷含量^[15], 并计算每盆植物氮磷积累总量、氮肥恢复效率(REN)、氮肥农学效率(AEN)、氮肥生理效率(PEN)、氮收获指数(NHI)^[14]。

氮肥恢复效率=(施氮处理氮积累量-不施氮处理氮积累量)/施氮量 $\times$ 100%

氮肥农学效率=(施氮处理籽粒质量-不施氮处理籽粒质量)/施氮量

氮肥生理效率=(施氮处理籽粒质量-不施氮处理籽粒质量)/(施氮处理氮积累总量-不施氮处理氮积累总量)

氮收获指数=籽粒氮积累总量/植株氮积累总量 $\times$ 100%

1.3 数据处理

使用 Microsoft Excel 对数据进行计算和绘图, 应用 SPSS 对数据进行方差分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤添加剂对水稻生长的影响

随着水稻的生长, 添加剂对株高的影响逐渐显现, 分蘖期差异不显著, 拔节期以后, FT、FJT 和 FTX 处理均显著高于 SF 处理, 拔节期增幅分别为 13.1%、11.4%和 12.1%(图 1)。不同土壤添加剂处理下的叶片 SPAD 在抽穗期才表现出显著差异, FJ、FT、FJT 和 FTX 处理显著高于 SF 处理; 灌浆期时, 仅 FJ 处理略高于对照 SF 处理, 其余处理均降低了叶片的 SPAD 值。NDVI 是水稻生物量和 LAI 的综合反映, 体现了植被覆盖度。从图 1 看出, NDVI 随水稻生育期的推进逐渐增加, 随后略有降低。添加剂处理在分蘖期、拔节期和灌浆期与 SF 处理无显著差异, 但促进了抽穗期水稻 NDVI 的增加, FJ、FT、FJT 和 FX 处理均达到显著水平, 分别较 SF 处理提高了 13.3%、10.0%、13.3%和 10.0%。

2.2 土壤添加剂对不同肥期水稻田面水养分动态的影响

2.2.1 总氮

所有处理田面水总氮浓度在施入基肥后均呈现缓慢下降趋势(图 2)。施基肥后, 除 FJ 处理明显提高了田面水总氮浓度外, 其他添加剂的施用均显著降低了田面水总氮浓度, FJT 处理降幅最大(81.0%~89.9%), 其次分别是 FTX(65.9%~81.6%)、FT(43.8%~61%)和 FX(24.9%~53.9%), 其中 FJT 和 FTX 处理田面水总氮浓度与不施氮肥处理基本相当。由此可

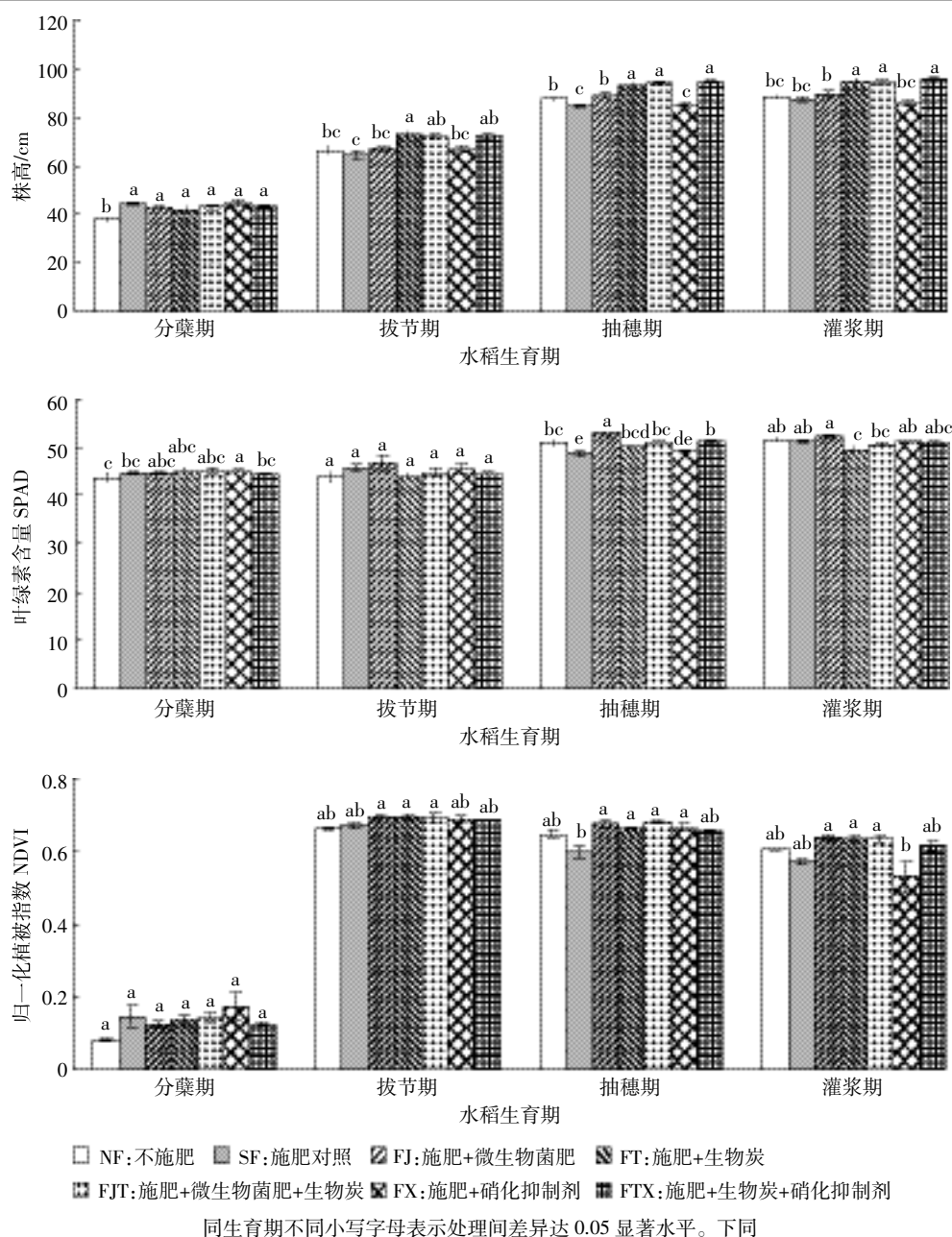


图1 不同生育期水稻生长指标

Figure 1 Rice growth indices at different stages

见,添加剂的配施产生协同效应,对总氮的降低效果优于添加剂的单施,其中 FJT 处理效果最佳,显著降低了氮素流失的风险,FTX 处理次之。

蘖肥施入后第 1 d, 田面水总氮浓度可高达 $140 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 第 2 d 出现急剧下降, 总氮浓度降低到 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 随后缓慢下降, 施肥后第 7 d, 总氮浓度降至 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。添加剂对蘖肥期田面水总氮浓度的影响与基肥期明显不同: 蘖肥施用当天, 除了 FJ 处理降低了田面水总氮浓度, 其余处理均显著增加; 蘖

肥施用后第 2 d, FJ、FT 和 FJT 表现为显著低于 SF 处理, 降幅分别为 38.1%、65.4% 和 56.9%; 之后, 各添加剂处理与 SF 处理之间没有显著差异。

穗肥施用后各处理总氮浓度变化和蘖肥一致, 在一周内呈现下降趋势。穗肥后第 1 d 和第 2 d, 所有添加剂处理总氮浓度均显著高于 SF 处理, 仅 FJT 处理在第 1 d 表现不显著; 之后, FJ 处理总氮浓度仍显著高出 SF 处理 82.8%, 其他处理与 SF 处理差异不显著。由此可见, 各添加剂处理增加了穗肥期总氮的流

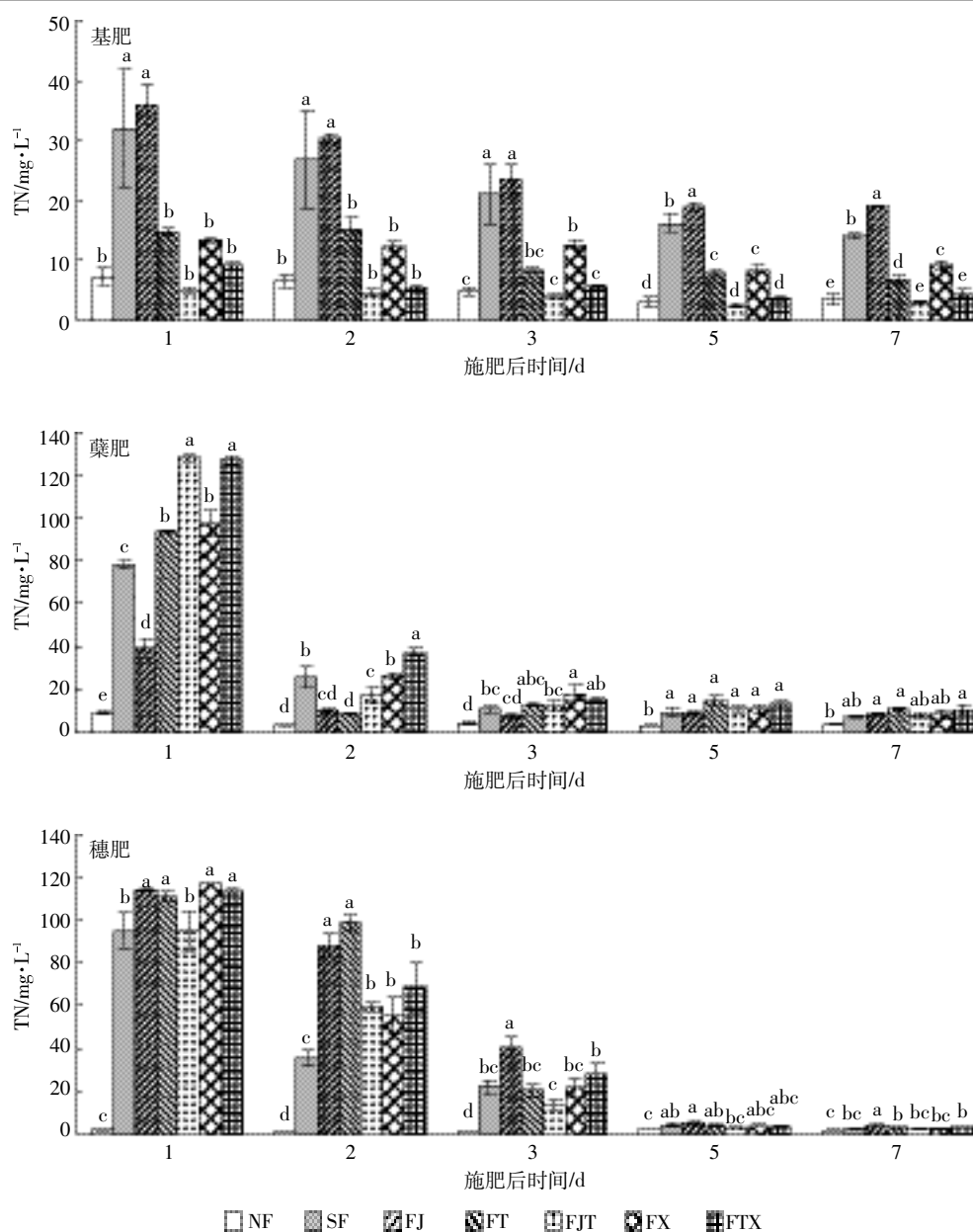


图2 3次施肥后稻田面水TN的动态变化

Figure 2 Change of TN concentration in surface water after fertilization

失风险。

2.2.2 总磷

图3显示,施入基肥前后5 d,田面水总磷浓度变化在 $0.15\sim 0.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,第7 d出现明显下降,降低至 $0.01\sim 0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。添加剂的施用对田面水总磷浓度的影响小于对氮素浓度的影响,除FJ处理在第1、5 d以及FT和FTX处理第5 d显著高出SF处理外,其他均与SF处理没有显著差异。穗肥施用后一周内田面水总磷浓度变化整体较小,在 $0.15\sim 0.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,第7 d略有增加。添加剂处理略微降低

了田面水总磷浓度,但所有添加剂处理与对照之间均无显著差异。穗肥施用后田面水总磷浓度呈上升趋势,由第1 d的 $0.192\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到第7 d的 $0.239\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。各处理之间在穗肥后第3 d开始表现出显著差异,FTX处理在穗肥后第3 d显著高出SF处理;FJ、FT、FJT和FTX 4个处理总磷浓度在穗肥后第5 d和第7 d显著高出SF处理,但与不施氮肥处理之间差异不显著。与不施氮肥处理比较,氮肥的施用降低了穗肥期田面水总磷浓度,添加剂的施用则促进了土壤中磷的释放,增加了总磷流失的风险。

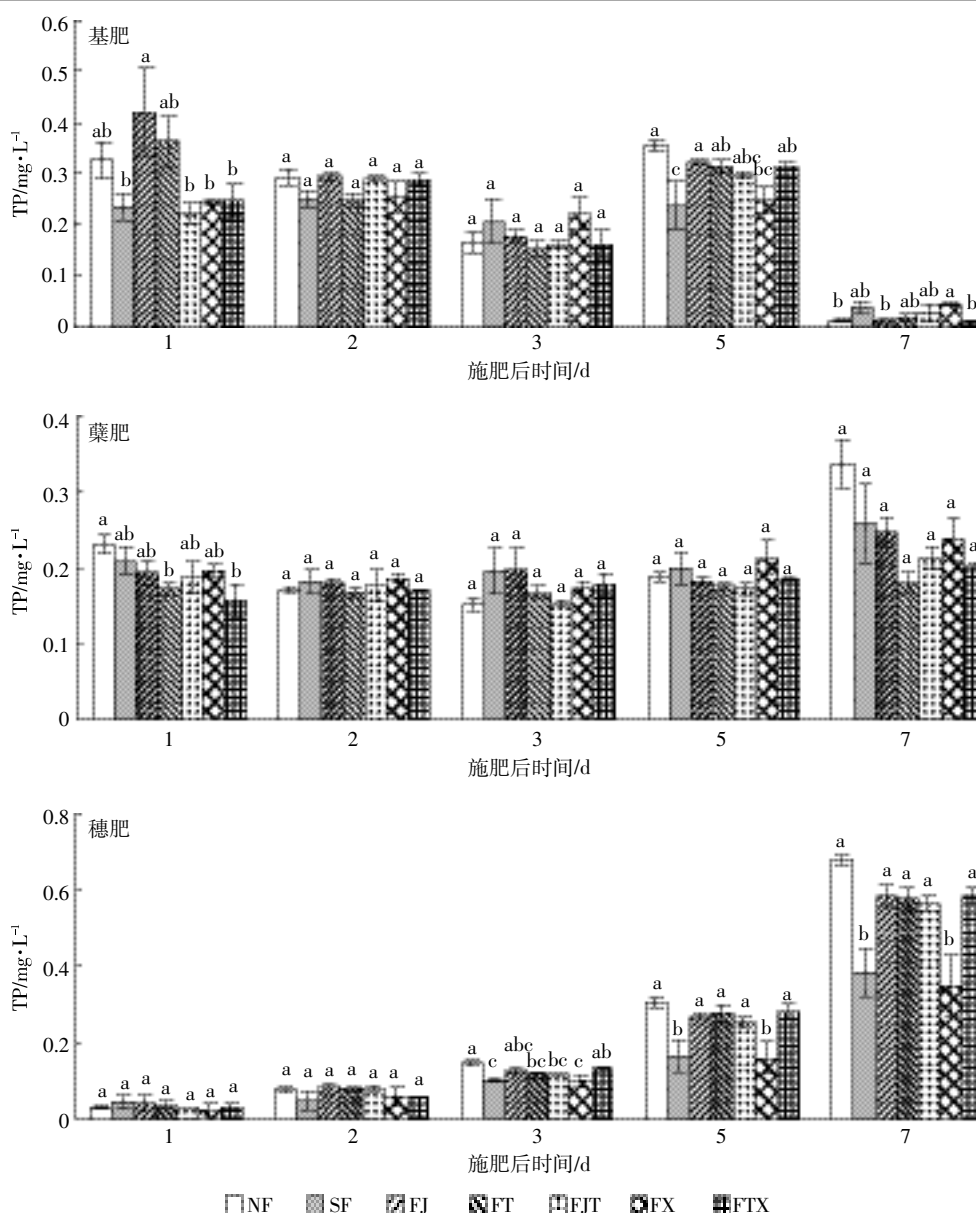


图3 3次施肥后稻田田面水TP的动态变化

Figure 3 Change of TP concentration in surface water after fertilization

2.3 土壤添加剂对水稻地上部生物量和产量的影响

2.3.1 地上部生物量

添加剂的施用对成熟期水稻地上部生物量的影响因添加剂的种类不同而有所差异(表1)。除微生物菌肥单施较SF处理略降低了水稻地上部生物量外,其他添加剂的施用均提高了水稻地上部生物量,其中FJT处理达到显著水平。生物炭和菌剂配施表现出了较好的正协同效应,地上部生物量分别高出FT和FJ处理6.8%和29.6%;而生物炭与硝化抑制剂配施(FTX处理)因产生轻微的中和效应,生物量居于FT和FX处理之间,且无显著差异。

2.3.2 产量及其构成因子

添加剂的施用均提高了水稻产量,但各处理产量提高的内在因素不尽相同。与SF处理相比,FJ处理提高了水稻有效穗数(10.8%)和千粒重(3.5%),产量提高了14.0%,但差异不显著;FX处理显著提高了千粒重,最终产量提高了24.8%,未达到显著水平。FT处理显著提高水稻产量57.5%,原因在于生物炭显著提高了水稻的有效穗数(21.5%)、穗粒数(21.6%)和千粒重(6.6%)。微生物菌肥和生物炭配施产生正协同效应,显著提高了有效穗数(21.5%)、穗粒数(25.3%)和千粒重(7.6%),从而使FJT处理产量最高,比SF

处理显著提高了 66.1%。生物炭和硝化抑制剂配施则产生了一定的中和效应,对有效穗数没有影响,显著提高了穗粒数和千粒重,使得 FTX 处理产量较 SF 处理显著提高了 45.4%,但仍低于 FT 处理。这表明,生物炭的单施以及与其他添加剂的配施均显著提高了水稻的产量,尽管这种提高作用与水稻的穗粒数和千粒重显著提高有关,但 FT、FJT、FTX 三种处理之间并没有显著的差异性。

2.4 土壤添加剂对养分吸收利用的影响

2.4.1 氮素吸收利用

添加剂的施用对水稻植株和籽粒氮含量的影响不大(表 2),除 FTX 的植株氮含量显著降低及 FJ 处理的水稻籽粒氮含量显著提高外,其余表现均不显著。因此,添加剂的施用对植株吸氮量的影响也不显著。而添加剂的施用提高了水稻产量,所以各处理的 AEN 和 NHI 均高于 SF 处理,其中,FJ、FT、FJT 和 FTX 达到显著水平。FJT 处理植株吸氮量最高,因此 REN 也最高,显著高于 SF 对照。添加剂的施用显著提高了 PEN,其中 FT 和 FTX 处理分别是 SF 处理的 4.52、6.16 倍。

2.4.2 磷素吸收利用

氮肥的施用显著促进了水稻对磷的吸收,但添加

剂的施用对磷素吸收利用没有显著影响(表 3)。与 SF 处理相比,所有添加剂处理均略微降低了水稻植株磷含量,FJ、FT、FX 和 FTX 处理稍微提高了水稻籽粒中磷的含量,但均未达到显著水平。水稻植株吸磷量除 FJ 处理略降低外,其他处理均显现出增加的趋势,但差异不显著,与添加剂对地上部生物量的影响一致。

2.5 土壤添加剂对水稻不同生育期土壤养分动态的影响

2.5.1 土壤碱解氮

土壤碱解氮含量在水稻整个生育期变化不大,分蘖期最高,拔节期明显降低,抽穗期和灌浆期略有回

表 3 不同处理下的植株和籽粒磷含量及植株磷吸收

Table 3 Plant and grain phosphorus content, plant phosphorus uptake under different treatments

试验处理	植株磷含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	籽粒磷含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	植株吸磷量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$
NF	3.29±0.05a	4.05±0.14a	0.53±0.05b
SF	3.59±0.05a	3.76±0.14a	0.75±0.02a
FJ	3.54±0.26a	4.50±0.64a	0.71±0.09a
FT	3.34±0.20a	4.00±0.46a	0.82±0.07a
FJT	3.28±0.22a	3.71±0.34a	0.86±0.19a
FX	3.58±0.05a	4.18±0.11a	0.79±0.04a
FTX	3.33±0.10a	3.94±0.24a	0.77±0.11a

表 1 不同处理对水稻地上部生物量和产量及其构成因子的影响

Table 1 Effects of different treatments on rice aboveground biomass, yield and yield components

试验处理	地上部生物量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$	产量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$	有效穗数/穗·盆 $^{-1}$	穗粒数/粒·穗 $^{-1}$	结实率/%	千粒重/ $\text{g} \cdot 1000 \text{ 粒}^{-1}$
NF	161.55±13.92d	79.42±4.49c	23.00±2.29c	124.3±1.8de	97.22±0.45a	28.68±0.29abc
SF	209.72±6.90bc	83.92±9.23c	28.00±2.29b	116.0±2.5e	96.00±0.62a	26.95±0.37d
FJ	202.55±23.97c	95.67±14.58c	31.00±3.12ab	115.0±4.0e	95.88±0.64a	27.89±0.19bcd
FT	245.81±15.13ab	132.15±7.43a	34.00±0.87a	141.0±4.5abc	95.98±0.15a	28.72±0.48ab
FJT	262.41±39.47a	139.34±22.18a	34.00±3.77a	145.3±4.2ab	96.86±0.28a	28.99±0.28a
FX	222.38±15.71abc	104.70±13.59bc	29.50±1.73ab	129.7±5.6cde	96.31±0.54a	28.35±0.04abc
FTX	231.19±23.80abc	122.04±19.29ab	28.50±3.97b	154.3±1.7a	96.37±0.43a	28.75±0.39ab

注:同列不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。下同。

表 2 氮素吸收利用相关指标

Table 2 Related indicators of nitrogen uptake and utilization

试验处理	植株氮含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	籽粒氮含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	植株吸氮量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$	氮收获指数 NHI/%	氮肥恢复效率 REN/%	氮肥生理效率 PEN/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	氮肥农学效率 AEN/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
NF	9.99±0.34ab	11.38±0.53a	1.62±0.23b	55.99±0.90ab			
SF	10.37±0.76a	10.32±0.53b	2.18±0.34a	40.32±4.58c	39.69±5.25b	22.07±1.32f	3.18±0.26f
FJ	10.14±0.25ab	11.37±0.30a	2.06±0.28ab	52.84±0.69ab	30.89±2.82c	33.80±2.48e	11.50±1.61e
FT	8.92±0.31ab	9.58±0.12bc	2.20±0.27a	57.86±1.78a	40.93±2.83b	99.77±5.61b	37.31±1.27b
FJT	8.99±0.33ab	9.48±0.07c	2.36±0.40a	56.13±2.17ab	52.46±4.40a	90.29±3.72c	42.41±4.42a
FX	9.74±0.35ab	9.85±0.16bc	2.16±0.20a	47.94±4.28bc	38.55±4.44b	52.39±5.59d	17.89±2.39d
FTX	8.62±0.49b	9.60±0.37bc	1.98±0.17ab	58.83±3.55a	25.79±2.19c	136.07±9.14a	30.16±3.21c

升。添加剂对水稻各生育期土壤碱解氮含量大小的影响略有不同。分蘖期, FJ 和 FX 处理略微提高了土壤中碱解氮的含量, 其他三种处理均降低了土壤中碱解氮的含量; 拔节期, FT 处理土壤碱解氮含量显著低于 SF 处理, 其他处理差异不显著; 抽穗期和灌浆期时, 所有处理之间差异均不显著(图 4)。

2.5.2 土壤有效磷

与碱解氮含量的变化规律正好相反, 土壤有效磷含量在拔节期最高, 分蘖期、抽穗期和灌浆期含量基

本相当, 各处理趋势一致。各添加剂处理对土壤有效磷的影响仅在拔节期差异显著, FT 处理显著提高了土壤中有效磷含量 53.0%, FX 处理降低了土壤有效磷含量, 但未达到显著水平(图 5)。

2.6 土壤添加剂对水稻收获后土壤养分的影响

土壤添加剂施用后, 为验证其是否耗竭土壤本身的肥力, 是否具有可持续性, 对水稻收获后的土壤养分状况进一步进行了比较。结果表明(表 4), FT 处理显著提高了土壤 pH, 总磷、有效磷和碱解氮含量也有

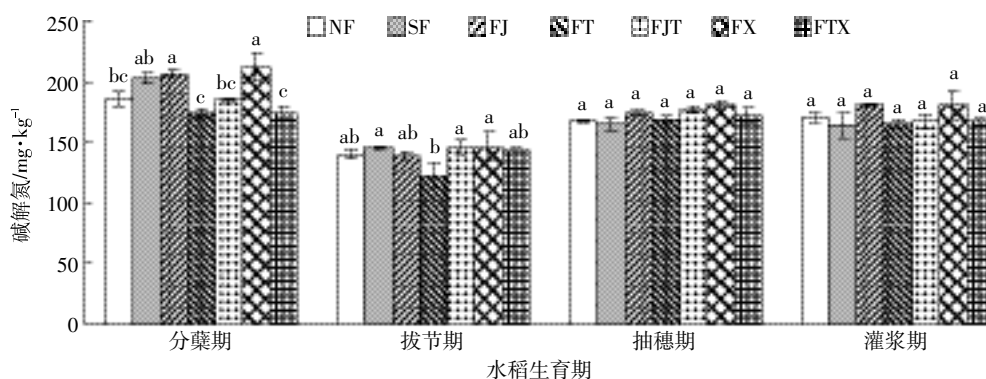


图 4 水稻不同生育期土壤碱解氮含量

Figure 4 The soil alkali-hydrolyzable nitrogen content at different stages

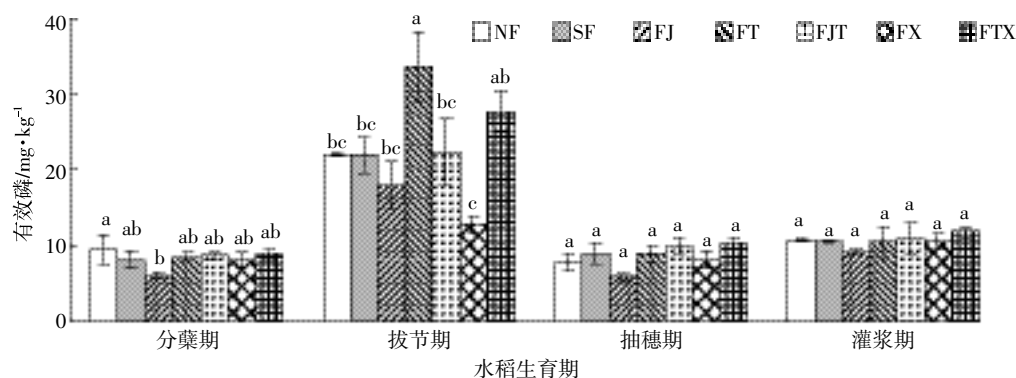


图 5 水稻不同生育期土壤有效磷含量

Figure 5 The soil available phosphorus content at different stages

表 4 水稻收获后各处理土壤养分状况

Table 4 Soil nutrient status of treatments after harvest

试验处理	pH(1:2.5)	总氮/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	总磷/g·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹
NF	5.76±0.08bc	1.59±0.14a	131.09±3.46a	0.41±0.10b	7.78±0.54b	19.89±0.58ab
SF	5.74±0.08bc	1.96±0.25a	147.91±6.50a	0.50±0.04ab	8.81±1.02ab	19.49±1.91ab
FJ	5.79±0.07bc	1.58±0.12a	132.57±8.58a	0.50±0.02ab	8.45±0.28ab	18.23±0.52b
FT	6.00±0.08a	1.56±0.06a	159.28±20.53a	0.59±0.02a	9.73±0.74ab	19.41±1.52ab
FJT	5.92±0.03ab	1.59±0.11a	150.38±12.95a	0.52±0.05ab	10.28±0.74a	19.91±1.19ab
FX	5.86±0.07ab	1.80±0.03a	159.04±4.78a	0.54±0.02ab	8.18±0.16ab	19.21±0.29b
FTX	5.64±0.04c	1.59±0.16a	138.26±1.93a	0.55±0.05ab	9.24±0.74ab	21.27±1.03a

所增加,其他处理与 SF 处理间差异均不显著。不同添加剂处理之间表现各异,FTX 较 FT 处理显著降低了 pH,FX 处理增加了碱解氮和总磷,FTX 处理土壤有机质最高,显著高于 FJ 和 FX 处理,土壤有效磷含量则以 FJT 处理为最高。

3 讨论

添加剂的施用均可保证水稻的正常生长,FT、FJT 和 FTX 三种处理水稻株高显著提高。除 FJ 处理外,其他处理的地上部生物量均呈现增加趋势,所有添加剂处理均呈现增产效果。FT、FJT 和 FTX 处理水稻产量分别较 SF 处理显著提高 57.5%、66.1% 和 45.4%,与前人研究结果^[16-19]一致。此外,生物炭单施及与其他添加剂配施均显著提高了水稻的穗粒数和千粒重,亦与以往研究结果^[20]一致,可能与生物炭对酸性土壤的改良作用和对养分的固持有关。生物炭巨大的表面积为养分的吸收固定提供了场所,可作为肥料缓释载体,延缓肥料养分在土壤中的释放。微生物菌肥的施用能够促进水稻各生育期对肥料的吸收和利用,达到增产的效果,与前人结果^[21-22]一致。

本试验中,FJ 处理显著提高了水稻籽粒氮含量,促进了氮素向籽粒的运输,可能是因为菌肥其肥效期长,使水稻生长后期根部活力仍然较旺盛,有利于籽粒的后熟^[13]。FTX 处理虽然显著提高了 NHI 和 PEN,但其植株氮含量显著低于 SF 处理,说明这两种添加剂配施时,阻碍了水稻对土壤中氮素的吸收,而 FT 和 FX 处理即生物炭和硝化抑制剂单施时,与 SF 处理无显著差异。

肥料的施用显著提高了蘖肥期和穗肥期 7 d 内田面水中总氮的浓度,第 1 d 时总氮浓度最高,随后迅速下降,最后趋于平稳,再次证实了前人研究^[23-24]得出的“施肥后一周是氮素流失的风险期”这一结论。添加剂施用后,除了 FJ 处理,其他处理基肥期田面水总氮浓度均显著降低,表明这些添加剂处理可以减少基肥期氮素流失风险。微生物菌肥的施用则提高了基肥期田面水中氮素浓度,增加了氮素流失的风险,延长了氮素流失风险期。这主要是因为微生物菌肥中活的微生物能促进土壤氮素的转化,提高土壤中无机氮含量,从而使田面水中的氮浓度也有所增加^[25]。但基肥期菌肥与生物炭组合配施时,田面水氮素浓度显著降低,则可能是因为生物炭表面丰富的官能团和较大的比表面积,吸附了土壤中的养分离子^[26]。生物炭处理略微提高了蘖肥和穗肥期田面水氮素含量,增加了氮

素流失的风险,与郑小龙等^[6]的结果不一致,可能是肥料施用的方式不同所致。本研究中蘖肥和穗肥采用水溶解后浇灌的方式,肥料全部溶解在田面水中,而生物炭则是在插秧前均匀混合在表层土壤中,并不能有效接触到田面水中的养分;此外,生物炭在基肥期已吸附大量养分,这部分养分也会随着水稻的生长而被缓慢释放出,从而导致田面水中氮素浓度有所增加。硝化抑制剂添加处理以及生物炭与硝化抑制剂配施处理均显著降低了基肥期田面水总氮浓度,也证实了俞巧刚等^[18]的研究结果;但蘖肥初期田面水氮素浓度有所提高,可能由于基肥期累积的大量铵态氮对硝化抑制剂的作用产生抑制,生物炭对养分的吸附提高了土壤中氮素的含量,降低了氮素从水体向土体的转移,从而使得田面水氮素浓度提高。添加剂对磷素的流失风险没有显著影响,则与磷肥的性质和磷肥一次性基施有关。穗肥施用后稻田田面水磷浓度出现了持续增加,主要是因为穗肥施用是在水稻晒田后进行,施肥前进行了覆水,而水田土壤淹水后土壤磷有效性会显著增加^[27]。

菌肥的施用提升了土壤养分含量及养分的有效性^[28]。本试验中,微生物菌肥的施用提高了水稻生长期碱解氮含量,略降低了有效磷含量,对水稻收获后的土壤养分没有显著影响,可能与试验土壤理化性质有关。生物炭的施用提高了土壤碱解氮含量和有效磷含量,可能与生物炭本身带入一定量的氮磷有关^[29];此外生物炭对土壤中养分的固持与再释放作用,能够协调土壤养分供应与水稻养分需求之间的关系,提高养分利用率,保持土壤肥力,也与前人研究结果^[20,30-32]一致。生物炭与菌肥共同施用发生了正协同作用,有利于水稻生长季和收获后土壤有效养分含量的提高,为下一季作物的生长提供养分。由于本研究采用的是盆栽试验,相关结论在推广应用前还有待进一步在田间验证。

4 结论

(1) 添加剂的施用均促进了水稻的生长,提高了水稻产量和氮肥利用率,对磷素的吸收没有影响,生物炭单施以及与其他添加剂的配施增产效果最好。

(2) FJ 处理提高了水稻基肥期田面水氮素浓度,增加了氮素的流失风险;其他处理均显著降低了基肥期田面水氮素浓度,FJT 和 FTX 处理降幅最大。各添加剂的施用均提高了蘖肥和穗肥施用初期田面水氮素浓度,有可能增加生育中后期氮素径流的损失风

险。添加剂的施用对田面水中磷浓度的影响不大。

(3) 添加剂的施用均提高了水稻生长季土壤 pH 和氮磷的有效含量, 但对水稻收获后土壤养分含量没有显著影响。

(4) 综合来看, FJT 处理可促进水稻生长, 提高水稻产量 45.8%, 有效降低水稻生育前期氮素流失风险, 缩短养分流失风险期, 并能维持土壤肥力, 在所有处理中表现最佳, 值得应用于太湖流域稻田的面源污染控制。

参考文献:

- [1] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与实践——源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881–888.
- XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-Reuse-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.
- [2] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1): 81–84.
- [3] 陈心想. 生物炭对土壤性质、作物产量及养分吸收的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- CHEN Xin-xiang. Effects of biochar amendment on soil properties, crop yield and nutrient uptake[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [4] Mukherjee A, Zimmerman A R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures[J]. *Geoderma*, 2013, 193: 122–130.
- [5] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in Southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2): 159–166.
- [6] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 生物质炭与不同肥料配施对水稻田面水养分流失风险的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 221–226.
- ZHENG Xiao-long, WU Jia-sen, CHEN Pei-pei, et al. Effects of different nitrogen and biomass carbon fertilization on nutrient loss risk in field surface water[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 221–226.
- [7] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 等. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2077–2083.
- ZHANG Miao-miao, SHEN Ju-pei, HE Ji-zheng, et al. Microbial mechanisms of nitrification inhibitors and their application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2077–2083.
- [8] 孙海军, 闵 炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1027–1033.
- SUN Hai-jun, MIN Ju, SHI Wei-ming, et al. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field[J]. *Soils*, 2015, 47(6): 1027–1033.
- [9] 宁建凤, 崔理华, 艾绍英, 等. 两种硝化抑制剂对土壤氮转化的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 144–151.
- NING Jian-feng, CUI Li-hua, AI Shao-ying, et al. Effects of two nitrification inhibitors on transformations of nitrogen in soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 144–151.
- [10] 王 斌, 万运帆, 郭 晨, 等. 控释尿素、稳定性尿素和配施菌剂尿素提高双季稻产量和氮素利用率的效应比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1104–1112.
- WANG Bin, WAN Yun-fan, GUO Chen, et al. A comparison of the effects of controlled release urea, stable urea and microorganisms in increasing double rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1104–1112.
- [11] 吴建峰, 林先贵. 我国微生物肥料研究现状及发展趋势[J]. 土壤, 2002, 34(2): 68–73.
- WU Jian-feng, LIN Xian-gui. Research status and development trend of microbial fertilizer in China[J]. *Soils*, 2002, 34(2): 68–73.
- [12] 邱献锟, 赵基洪, 初秀成, 等. 健晨·微生物菌肥对水稻生长发育的影响[J]. 现代农业科技, 2015(4): 217–217.
- QIU Xian-kun, ZHAO Ji-hong, CHU Xiu-cheng, et al. Effects of Jianchen microbial fertilizer on rice growth[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(4): 217–217.
- [13] 崔曾杰, 耿艳秋, 范丽丽, 等. 生物菌肥对盐碱地水稻生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(5): 32–35.
- CUI Ceng-jie, GENG Yan-qiu, FAN Li-li, et al. Effects of bacterial manure on the growth and yield of rice growing in saline-alkali land[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2013, 38(5): 32–35.
- [14] 潘复燕, 薛利红, 卢 萍, 等. 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 928–936.
- PAN Fu-yan, XUE Li-hong, LU Ping, et al. Effects of different soil additives on wheat yield and nitrogen and phosphorus loss in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5): 928–936.
- [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, 2000.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000.
- [16] 李文军, 夏永秋, 杨晓云, 等. 施氮和肥料添加剂对水稻产量、氮素吸收转运及利用的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2331–2336.
- LI Wen-jun, XIA Yong-qiu, YANG Xiao-yun, et al. Effects of applying nitrogen fertilizer and fertilizer additive on rice yield and rice plant nitrogen uptake, translocation, and utilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2331–2336.
- [17] 张伟明, 孟 军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1445–1451.
- ZHANG Wei-ming, MENG Jun, WANG Jia-yu, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445–1451.
- [18] 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.

- YU Qiao-gang, CHEN Ying-xu. Influences of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen transformation and potential runoff loss in rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9):1274-1280.
- [19] Dong D, Feng Q, Mcgrouter K, et al. Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2015, 15(1):153-162.
- [20] Devereux R C, Sturrock C J, Mooney S J. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth[J]. *Earth & Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2013, 103(1):13-18.
- [21] 梁运江, 许广波, 郑哲, 等. 生物菌肥对水稻营养特性及增产效果的初步研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(2):88-89.
- LIANG Yun-jiang, XU Guang-bo, ZHENG Zhe, et al. Preliminary study of bacterial manure on nutritional characteristics and yield on rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(2):88-89.
- [22] 盖学峰, 梁桂德, 陈刚. 平安福生物菌肥在水稻上应用效果[J]. 现代化农业, 2011(7):14.
- GAI Xue-feng, LIANG Gui-de, CHEN Gang. Effects of Pinganfu bacterial manure on rice[J]. *Modernizing Agriculture*, 2011(7):14.
- [23] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4):39-43.
- ZHENG Xiao-long, WU Jia-sen, CHEN Pei-pei, et al. Effects of reducing nitrogen and biomass carbon fertilization on loss of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and grain production[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):39-43.
- [24] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):743-749.
- ZHAO Dong, YAN Ting-mei, QIAO Jun, et al. Change of different nitrogen forms in surface water of rice field and reduction of nitrogen fertilizer application in rice season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):743-749.
- [25] Foster E J, Hansen N, Wallenstein M, et al. Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 233:404-414.
- [26] 苗微. 生物炭陈化对土壤养分和水稻生长的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
- MIAO Wei. Ageing effect of biochar on soil nutrients and growth of rice [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2014.
- [27] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学, 2001, 22(4):67-71.
- GAO Chao, ZHANG Tao-lin, WU Wei-dong. Phosphorus sorption and desorption of agricultural soils under different land uses[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(4):67-71.
- [28] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 99:1-12.
- [29] 刘青松, 赵丽芳. 热解温度对生物炭表面性质及释放氮磷的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2):164-169.
- LIU Qing-song, ZHAO Li-fang. Effects of biochar pyrolysis temperature on its surface characteristics and nitrogen and phosphorus release [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2):164-169.
- [30] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8):979-984.
- ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cun-cang, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8):979-984.
- [31] Masulili A, Utomo W H, Syechfani M S. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil: 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010, 2(1):39-47.
- [32] 才吉卓玛, 翟丽梅, 习斌, 等. 生物炭对不同类型土壤中 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1):163-168.
- CAI Ji-zhuoma, ZHAI Li-mei, XI Bin, et al. Effect of biochar on Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in different types of soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1):163-168.