

冯 轲, 田晓燕, 王莉霞, 等. 化肥配施生物炭对稻田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.

FENG Ke, TIAN Xiao-yan, WANG Li-xia, et al. Influence of combined synthetic fertilizer and biochar applications on nitrogen and phosphorus losses from surface water of paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):329–335.

化肥配施生物炭对稻田田面水氮磷流失风险影响

冯 轲^{1,2}, 田晓燕¹, 王莉霞^{2*}, 欧 洋², 阎百兴², 符 雨³

(1.吉林建筑大学市政与环境工程学院松辽流域水环境教育部重点实验室, 长春 130118; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012; 3.辽宁省阜新市环境保护局, 辽宁 阜新 123000)

摘 要:在控制外源氮输入相同的前提下,通过大田试验研究生物炭部分替代化肥作为底肥,不同生物炭施用量(5、10、20 t·hm⁻²)对水稻生长期稻田田面水氮磷迁移转化特征的影响。研究表明:各处理的田面水总氮、硝氮、铵氮浓度在施肥后第3 d达到最高,然后迅速下降,并逐渐稳定;田面水总磷浓度在施肥后2~4 d内增幅较小,而后迅速下降至稳定,施加生物炭对田面水总磷的影响不大;可溶性磷浓度在施肥后2~4 d内处于平稳下降的状态,之后迅速下降至稳定。稻田施肥后10 d内是控制氮磷流失的最佳时段。采用生物炭代替部分化肥的施肥方式,在一定范围内能降低稻田田面水的氮磷浓度,稻田退水氮、磷的输出负荷分别减少了39%~50%和38%~50%,显著提高了水稻生态效益。通过综合效益评估可知,施加5 t生物炭代替化肥是综合效益最高的施肥方法,该施肥方式下氮、磷的年输出负荷分别为16.83、1.89 kg·hm⁻²。

关键词:面源污染;生物炭;稻田水;氮磷流失;生态效益

中图分类号:S158 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)02-0329-07 doi:10.11654/jaes.2016.02.017

Influence of combined synthetic fertilizer and biochar applications on nitrogen and phosphorus losses from surface water of paddy field

FENG Ke^{1,2}, TIAN Xiao-yan¹, WANG Li-xia^{2*}, OU Yang², YAN Bai-xing², FU Yu³

(1.Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education, School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2.Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130012, China; 3.Fuxin Environmental Protection Bureau, Fuxin 123000, China)

Abstract: Fertilization management is an effective measure for controlling non-point source pollution from paddy field. In this paper, nitrogen and phosphorus losses from the surface water of paddy field were investigated during rice growth season under the same inputs of exogenous nitrogen but partial replacement of synthetic fertilizer by different rates of biochar (5 t·hm⁻², 10 t·hm⁻² and 20 t·hm⁻²). Results showed that TN, NO₃⁻-N, and NH₄⁺-N concentrations in the surface water of paddy field reached a peak on the third day of fertilization, but decreased rapidly thereafter. TP concentrations showed slow increases 2~4 days after fertilization, but rapidly declined to a stable state after that. Applying biochar had little influence on total phosphorus (TP) in paddy field. Water-soluble phosphorus had the same trend as TP concentration. The critical period to reduce nitrogen and phosphorus loads should be within 10 days after fertilization. Application of biochar mitigated the fluxes of nitrogen and phosphorus outputs from paddy field water by 39%~50% and 38%~50%, respectively. Combined applications of synthetic fertilizer and biochar increased rice production slightly. Based on the recommended application rate of biochar (5 t·hm⁻²), the annual nitrogen and phosphorus outputs would be 16.83 kg·hm⁻² and 1.89 kg·hm⁻², respectively.

Keywords: non-point pollution; biochar; paddy field surface water; nitrogen and phosphorus loss; ecological benefits

收稿日期:2015-08-14

基金项目:国家水体污染控制与治理重大专项(2012ZX07201-004);吉林省科技发展计划项目(20140101157JC)

作者简介:冯 轲(1989—),男,硕士研究生,主要研究污(废)水处理与资源化理论与技术。E-mail:136341663@qq.com

* 通信作者:王莉霞 E-mail:lxwang@iga.ac.cn

水稻是东北地区的主要粮食作物之一,在目前的水稻管理模式下,氮、磷肥利用率较低,水田氮肥当季利用率仅为20%~35%,磷肥利用率只有5%~15%^[1]。大量的氮磷随农田退水流入江河湖泊,引起水体富营养化,农田氮磷流失引起的水体富营养化问题已引起国内外普遍关注^[2-4]。目前,许多国家的研究结果已经证实,面源污染已经成为世界范围内地表水与地下水污染的主要来源^[5-6]。同时,国家粮食增产计划实施以来,化肥和农药的超量施用,也使农业面源污染问题日益突出。

生物炭是生物有机材料在缺氧或低氧环境中经高温裂解后的固体产物。生物炭富含有机碳,结构稳定,施入土壤可提高土壤稳定性碳库,改善土壤质量,减少养分损失,促进植物生长,提高作物产量^[7-9]。由于生物炭具有疏松多孔的结构,对污染物的去除也具有较好的效果^[10]。国内外在生物炭治理面源污染研究多集中于对土壤有机污染物^[11-12]和重金属的去除^[13-15],而通过施加生物炭来削减大田面源污染中氮磷流失的研究相对较少。施肥方式是影响田间氮磷流失的重要因素^[16-19],田面水体中氮、磷的浓度直接影响面源污染物的输出负荷。因此,本研究采用生物炭部分代替化肥的施肥方式,研究水稻生长周期内稻田田面水氮、磷赋存形态,探明生物炭对水田氮磷迁移转化过程的影响,从而优化田间施肥管理,构建水田面源污染源头削减的田间施肥技术。

1 材料与方法

1.1 试验区介绍

研究区域设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试验站(125°23'56.30"E, 43°59'51.46"N)。属北温带大陆性季风气候区,最高温度39.5℃,最低温度-39.8℃,年平均气温4.8℃,日照时间2688 h。年平均降水量522~615 mm,夏季降水量占全年降水量的60%以上。稻田土为壤质黏

土,有机质含量21.4 g·kg⁻¹,总氮含量1.5 g·kg⁻¹,硝氮含量7.3 mg·kg⁻¹,铵氮含量7.9 mg·kg⁻¹,总磷含量1.1 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

以长期耕作的水田为研究对象,根据施用生物炭和化肥用量的不同,设置4个处理,每个处理3次重复,共有12个小区(4 m×3 m)。根据当地的施肥种类和用量,底肥采用生物炭部分替代化肥的方式,以施入的氮总量相同为依据,设计不同处理(表1)。各处理除底肥施用不同外,均于2014年7月20日追施钾肥(氯化钾,用量为150 kg·hm⁻²),底肥品种为市售磷酸氢二铵和生物炭。

为防止小区之间水分侧渗和串流,各小区在水稻插秧前用塑料隔板隔开。小区设立单独的灌水口和排水口,灌溉水TN浓度为1.19 mg·L⁻¹,TP浓度为0.11 mg·L⁻¹。2014年5月31日施用底肥后灌水泡田,水位控制在田面以上10 cm左右;6月5日排干,排水深约8 cm。打浆并插秧,灌水控制水位在田面以上8~10 cm,6月15日施用除草剂丁草胺,9月3日进行第二次排干,排水水深约5 cm,9月25日收获。其他田间管理与当地农户采用的管理相同。

1.3 样品采集及测试方法

1.3.1 水样采集

在施肥后的第2、4、6、10、25、40、55、70、85 d采集水样,整个生育期取水样共计9次。采样时间是施肥后每天下午17:00—18:00取表层水样。采样的方法是在水面无扰动的条件下,用100 mL医用注射器随机抽取小区内3处田面水,注入塑料瓶,带回实验室,经定量滤纸过滤后测定各形态氮磷。

1.3.2 植物样采集

在水稻成熟时,每小区采用5点取样法按照对角线共采集5个1 m²的样方,然后分离稻粒和稻秆,在70℃烘箱里杀青20 min,105℃烘干至恒重。测定各小区穗数、穗粒数及千粒重等指标,并计算水稻理论

表1 不同处理肥料施用量

Table 1 Application amount of fertilizers

处理	施肥量/kg·hm ⁻²		小区施肥实物量/kg		小区施肥折纯量/kg	
	二铵+生物炭	二铵	生物炭	钾肥	氮	磷
(NH ₄) ₂ HPO ₄ +B ₀ (N ₁ +B ₀)	750+0	0.9	0	0.5	0.16	0.41
(NH ₄) ₂ HPO ₄ +B ₅ (N ₂ +B ₅)	583+5000	0.7	6	0.5	0.16	0.34
(NH ₄) ₂ HPO ₄ +B ₁₀ (N ₃ +B ₁₀)	416+10 000	0.5	12	0.5	0.16	0.26
N ₀ +B ₂₀ (N ₀ +B ₂₀)	0+20 000	0	24	0.5	0.16	0.07

注:二铵 N=18%、P₂O₅=46%、氯化钾 K₂O=60%,生物炭 N=0.59%、P₂O₅=0.28%。

产量(有效穗数 $\times$ 平均穗粒数 $\times$ 千粒重)。

1.3.3 水样参数分析方法

水样总氮采用碱性过硫酸钾氧化-硫酸肼还原比色法测定;总磷、可溶性磷采用钼锑抗比色法测定;铵氮采用靛酚蓝比色法测定;硝氮采用硫酸肼还原法测定。

试验结果采用 Excel 2003 软件对数据进行统计分析,采用 Origin 8.0 软件进行制图处理。

2 结果与讨论

2.1 稻田氮磷流失最大风险期分析

稻田施肥后田面水中铵氮浓度、硝氮浓度、总氮浓度随时间的变化动态如图 1 所示。铵氮、硝氮、总氮浓度的变化趋势相似,在施肥后第 1 d 田面水各形态氮浓度开始上升,第 3 d 达到顶峰并迅速下降,至 55 d 左右田面水氮素浓度降到稳定状态。

水稻施肥后田面水中可溶性磷浓度、总磷浓度随时间变化如图 2 所示。施肥后田面水中可溶性磷浓度并未升高,而是呈现快速降低趋势,总磷浓度在施肥后 3~5 d 内达到峰值,在 55 d 左右降到稳定值。施肥后 10 d 内是稻田氮磷流失的最大风险期。

2.2 生物炭部分替代化肥对氮素迁移转化的影响

施肥后田面水铵氮浓度开始发生变化,处理 N_1+B_0 、 N_2+B_5 、 N_3+B_{10} 铵氮浓度在施肥后 3 d 内浓度呈上升趋势并达到顶峰,而仅施加生物炭的处理 N_0+B_{20} 田面水铵氮浓度呈逐渐递减趋势。这是由于化肥在水中能够迅速释放铵氮,田面水氨氮浓度迅速升高,而施加生物炭后使田面水铵氮含量减少了 35.1%~64.3%。生物炭施入土壤后易形成大团聚体,对铵氮有较好的吸附效果,降低了氮素挥发^[20]。刘玮晶等^[21]研究也发现,生物炭的不同添加量(1%、3%、5%)对黄棕壤中铵氮滞留效应存在差异,添加 1%的生物炭对土壤铵氮的吸附效果最好,能显著降低铵氮的淋失。另外,水稻生长旺盛期,根系对铵氮的吸收不断加强,同时水稻发达的根系的输氧功能使周围形成了好氧环境,为微生物的吸附代谢提供了良好的生物环境,有利于好氧细菌的氧化反应,从而造成铵氮的降低^[22]。

田面水中硝氮主要是由铵氮的硝化作用转化而来,在施肥后第 3 d 达到峰值,之后硝氮浓度迅速下降。这是因为随水分下渗、反硝化作用,田面水中硝氮浓度下降^[23]。采用生物炭部分替代化肥后,田面水硝氮含量有所降低,而处理 N_2+B_5 效果更为明显。这是因为生物炭能够吸附土壤中可溶性自由态酚类化合物,

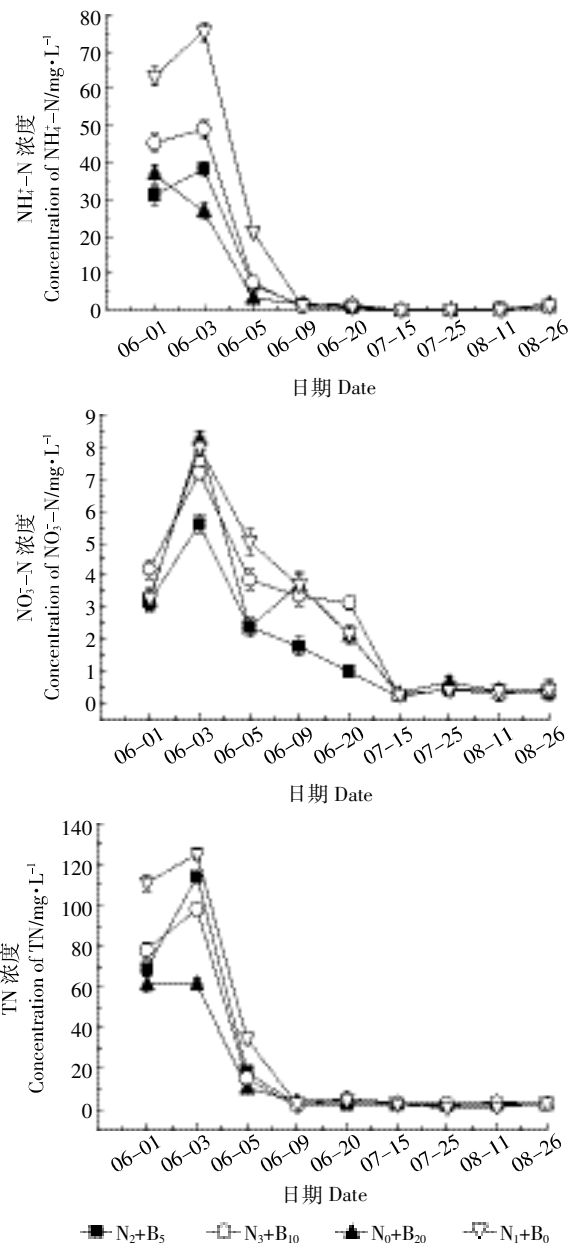


图 1 不同处理田面水铵氮、硝氮和总氮浓度随时间的变化
Figure 1 Variation of NH_4^+-N , $NO_3^- - N$ and TN concentrations in paddy field surface water of different treatments over time

而该化合物抑制了硝化细菌的生长,所以生物炭可以提高土壤中硝化细菌活性,促进氮素硝化过程^[24-25]。生物炭还可以增加土壤中固氮微生物数量,减少氮的反硝化作用^[26],同时生物炭对田面水中 NO_3^- 具有较好的吸附作用^[27]。在一定控制条件下,施加生物炭越多田面水硝态氮浓度越低。

在施肥 10 d 后,总氮浓度迅速下降到峰值期的 2.5%~6.7%。处理 N_2+B_5 、 N_3+B_{10} 、 N_0+B_{20} 田面水总氮浓度要低于仅施加化肥的处理 N_1+B_0 ,而且随着生物炭

用量的增多,田面水总氮含量逐步降低。这是因为生物炭具有较强的离子吸附交换能力,能够吸附土壤中溶解态 NO_3^- 、 NH_4^+ 。生物炭还能降低水分在土壤中的移动性,从而使水分携带的离子移动性减弱,进而降低氮素的淋溶损失^[27];生物炭还具有高碳氮比,能限制硝化和反硝化作用的氮底物,促进氮素的固持,从而降低 N_2O 的排放^[28]。另外,施加生物炭加速了土壤氮的矿化作用和固氮作用^[29-30],也有利于降低田面水的总氮浓度。

2.3 生物炭部分替代化肥对磷素迁移转化的影响

稻田施肥后田面水中可溶性磷浓度随时间变化如图2所示。处理 N_1+B_0 与处理 N_2+B_5 在施肥后的3 d内,可溶性磷浓度处于平稳状态,分别为 2.1 、 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,在7 d后浓度降至 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。处理 N_3+B_{10} 和处理 N_0+B_{20} 在施肥后可溶性磷浓度呈下降趋势,第9 d浓度也下降到 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。施加生物炭的处理,可溶性磷浓度呈波动性变化,可能与生物炭的性质有关,生物炭在土壤中释放可溶性磷的速度要低于二铵^[31]。在水稻成熟期,田面水可溶性磷浓

度呈升高趋势,可能是由于8月中下旬相对雨季少雨,土壤水分状况相对低湿,增加了土壤微生物的活性,提高了土壤磷有效性。同时,生物炭可通过阴离子交换能力或通过影响与磷相互作用的阳离子活性改变磷的有效性,减少可溶性磷的流失^[32]。

水稻施肥后田面水中总磷浓度与可溶性磷浓度变化趋势略有不同,呈现先升高后降低的趋势。这是因为总磷是由有机磷和部分颗粒态的磷组成。处理 N_1+B_0 、 N_2+B_5 、 N_3+B_{10} 、 N_0+B_{20} 总磷浓度于施肥后第3 d达到最大值,分别为 3.6 、 2.2 、 4.2 、 $3.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后迅速下降,在55 d后降到最低值。由于本实验是在控制外源氮输入相同的前提下进行的,致使外源磷输入量不同。从施肥方法对稻田磷素输出负荷影响来看,通过比较各处理总磷含量发现,处理 N_2+B_5 田面水总磷峰值浓度最小,磷素流失率较小。这是由于生物炭施入土壤后,能够促使有效磷低的土壤中闭蓄态磷转化为有效态磷^[33-34],同时生物炭的多孔结构也为微生物分解含磷有机物或无机物提供合适的场所,加快了土壤中磷素的周转速率^[35-36],从而降低了田面水磷的含量。另一方面,生物炭表面已吸附的部分有机磷也能与 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 等离子形成螯合物^[37-38],间接提高土壤磷素的有效性,降低了田面水磷素流失风险,因此处理 N_2+B_5 对于降低田面水中面源污染物总磷的效果最好。施肥前后5 d磷素浓度较高,远超过地表水Ⅲ类水标准,此时是控制水体养分流失的最佳时期,应严格控制田面水排放。

2.4 生物炭部分替代化肥对稻田氮磷流失负荷的影响

田面水系统的水平衡可用公式表示^[39]:

$$I+R=E+T+S+P+D+dW$$

式中: I 代表灌溉水量; R 代表降雨量; E 代表蒸发量; T 代表植物蒸腾量; S 代表侧渗量; P 代表下渗量; D 代表地表径流及人工排水量; dW 代表土壤水量。

由于重点关注的是面源污染物氮、磷由水田随水分迁移至水环境中的负荷量,仅需考虑侧渗量(S)、下渗量(P)和地表径流及人工排水量(D)。有研究发现,稻田积水的垂直迁移下渗量 P 可忽略不计。本试验小区之间用隔板隔开,故侧渗排水和地表径流排水可忽略不计,因此人工排水是该研究区域中氮、磷流失的主要流失方式。根据当地种植模式,在水稻插秧前和成熟期人工排水2次,第1次在打浆后-插秧前排放,排放8 cm水深,第2次在成熟后排出,排水深度5 cm。人工排水中氮、磷浓度按照排水当时实测的稻田水中氮、磷浓度计算:

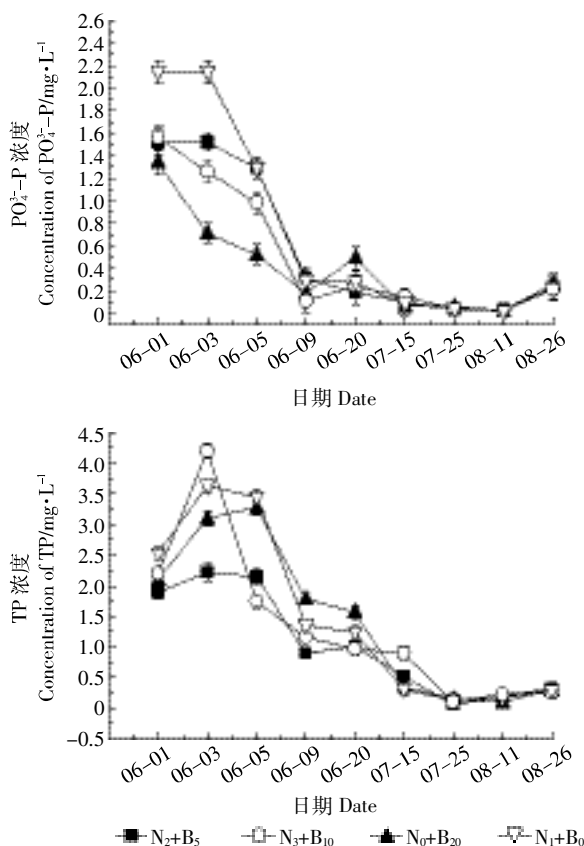


图2 不同处理田面水可溶性磷、总磷浓度随时间的变化

Figure 2 Variation of soluble phosphorus and TP concentrations in paddy field surface water of different treatments over time

输出负荷总量=第1次排水量×第1次排水浓度+第2次排水量×第2次排水浓度

何仁江^[40]研究三峡库区典型农业小流域氮磷排放负荷发现,氮磷素输出负荷分别为61、1.7 kg·hm⁻²。输出负荷差异较大,这是因为种植方法和施肥量不同造成的。由表2可以看出,仅施用二铵处理的单位面积水田总氮的年输出负荷为27.72 kg·hm⁻²,与祝惠等^[39]研究的水田单位面积总氮年输出负荷25.3 kg·hm⁻²相近,氮流失负荷较高。采用生物炭部分替代化肥的处理的氮磷输出负荷显著低于仅施加化肥的处理。根据估算,采用生物炭部分替代化肥的施肥方式,田面水总氮输出负荷减少39%~50%,总磷输出负荷减少38%~50%。采用生物炭部分替代无机肥的施肥方式能降低水田氮、磷的输出负荷,从而达到水田面源污染田间削减的目的。

表2 单位面积水田氮、磷素年输出负荷

Table 2 Output loads of nitrogen and phosphorus from paddy field

处理	输出负荷/kg·hm ⁻²				
	总氮	硝氮	铵氮	总磷	可溶性磷
N ₁ +B ₀	27.72	4.86	16.83	3.06	1.17
N ₂ +B ₅	16.83	2.16	9.72	1.89	1.08
N ₃ +B ₁₀	13.95	3.42	8.73	1.53	0.9
N ₀ +B ₂₀	10.62	2.07	5.85	2.88	0.72

2.5 生物炭部分替代化肥综合效益分析

各处理水稻效益评估如表3所示。施用生物炭部分替代化肥的处理N₂+B₅、N₃+B₁₀水稻稻谷的产量与仅施用二铵的处理N₁+B₀相差不大,但是由于施加生物炭的处理经济成本稍高一些,使得处理N₂+B₅、N₃+B₁₀实际收益有所减少。综合比较各处理生态效益和经济效益发现,处理N₂+B₅比较好,该处理经济效益与仅施加二铵的处理N₁+B₀基本一致,但是比较各处理氮磷输出负荷发现,处理N₂+B₅的施肥方法明显降低了田间退水中的氮磷负荷。这是因为生物炭表面具有丰富的官能团和较大的比表面积,可提高土壤的阳

表3 不同处理水稻效益评估

Table 3 Evaluation of economical benefits of different treatments

处理	水稻产量/ kg·hm ⁻²	水稻收益/ 万元·hm ⁻²	经济成本/ 万元·hm ⁻²	实际收益/ 万元·hm ⁻²
N ₁ +B ₀	9024±276	2.79	0.26	2.53
N ₂ +B ₅	9210±202	2.86	0.38	2.48
N ₃ +B ₁₀	9135±128	2.83	0.44	2.37
N ₀ +B ₂₀	8910±268	2.76	0.80	1.96

注:根据市场价格,二铵3400元·t⁻¹,生物炭400元·t⁻¹。

离子交换量,吸附更多的养分离子,避免养分离失,从而提高土壤肥力和肥料利用效率。因此,在外源氮输入相等情况下,处理N₂+B₅的施肥方法比较好,经济效益与仅施加二铵的处理相差不大,而生态效益得到了显著提高。

3 结论

(1)在施氮量相同的条件下,通过对施加生物炭部分代替化肥的施肥方式的研究发现,施肥后10 d是控制田面水面源污染物氮磷输出的最佳时期。

(2)采用生物炭部分替代化肥的施肥方式,田面水总氮输出负荷减少39%~50%,总磷输出负荷减少38%~50%。

(3)采用生物炭部分替代化肥的施肥方式经济成本有所增加,但是削减了氮磷污染物的输出,具有较高的生态效益。

(4)根据综合效益评估发现采用5 t生物炭替代部分二铵作为底肥的处理较好,面源污染物总氮、总磷的输出负荷分别为16.83、1.89 kg·hm⁻²。

参考文献:

- [1] Vlek P L G, Byrnes B H. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice[J]. *Fertilizer Research*, 1986, 9(1/2):131-147.
- [2] Weld J L, Parsons R L, Beegle D B, et al. Evaluation of phosphorus-based nutrient management strategies in Pennsylvania[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6):448-454.
- [3] 程波,张泽,陈凌,等.太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊):118-124.
CHENG Bo, ZHANG Ze, CHEN Ling, et al. Eutrophication of Taihu Lake and pollution from agricultural nonpoint sources in Lake Taihu basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):118-124.
- [4] 全为民,严力蛟.农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. *生态学报*, 2002, 22(3):291-299.
QUAN Wei-min, YAN Li-jiao. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3):291-299.
- [5] 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.
- [6] Ongly 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.
- [7] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2):235-246.
- [8] Noguera D, Rondon, Laossi K R, et al. Contrasted effect of biochar and

- earthworms on rice growth and resource allocation in different soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(7):1017-1027.
- [9] 何绪生, 耿增超, 余 雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):1-7.
- HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2):1-7.
- [10] 花 莉, 张 成, 马宏瑞, 等. 秸秆生物炭土地利用的环境效益研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10):2489-2492.
- HUA Li, ZHANG Cheng, MA Hong-rui, et al. Environmental benefits of biochar made by agricultural straw when applied to soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10):2489-2492.
- [11] Keiluweit M, Kleber M. Molecular-level interactions in soils and sediments: The role of aromatic pisystems[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(10):3421-3429.
- [12] 王 宁, 侯艳伟, 彭静静, 等. 生物炭吸附有机污染物的研究进展[J]. 环境化学, 2012, 31(3):287-295.
- WANG Ning, HOU Yan-wei, PENG Jing-jing, et al. Research progress on sorption of organic contaminants to biochar[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(3):287-295.
- [13] 成杰民. 改性纳米黑碳应用于钝化修复重金属污染土壤中的问题探讨[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):7-13.
- CHENG Jie-min. Discussion on application of modified nano-particle black carbon for the remediation of soil heavy metals pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):7-13.
- [14] 易 卿, 胡学玉, 柯跃进, 等. 不同生物质黑碳对土壤中外源镉(Cd)有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1):88-94.
- YI Qing, HU Xue-yu, KE Yue-jin, et al. Impact of different biomass black carbon amendments on retention capacity of cadmium in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):88-94.
- [15] Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(2):474-480.
- [16] Sharpley A N. Rainfall frequency and nitrogen and phosphorus runoff from soil amended with poultry litter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(4):1127-1132.
- [17] Schroeder P D, Radcliffe D E, Cabrera M L. Rainfall timing and poultry litter application rate effects on phosphorus loss in surface runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6):2201-2209.
- [18] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7):103-110.
- SHANG Fang-ze, YANG Pei-ling, LI Yun-kai, et al. Effects of different inorganic nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadosezone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7):103-110.
- [19] 孙向平, 李国学, 孟凡乔, 等. 新疆伊犁垦区有机水稻生产养分平衡及氮素污染风险分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2):158-162.
- SUN Xiang-ping, LI Guo-xue, MENG Fan-qiao, et al. Nutrients balance and nitrogen pollution risk analysis for organic rice production in Yili reclamation area of Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(Suppl2):158-162.
- [20] Kei M, Toshitatsu M, Yasuo H, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3):255-257.
- [21] 刘玮晶, 刘 烨, 高晓荔, 等. 外源生物炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):962-968.
- LIU Wei-jing, LIU Ye, GAO Xiao-li, et al. Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):962-968.
- [22] 段英华, 张亚丽, 沈其荣. 水稻根际的硝化作用与水稻的硝态氮营养[J]. 土壤学报, 2004, 41(5):803-809.
- DUAN Ying-hua, ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong. Nitrification in rice rhizosphere and the nitrate nutrition of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):803-809.
- [23] 苏成国, 尹 斌, 朱兆良, 等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应[J]. 土壤, 2005, 37(2):113-120.
- SU Cheng-guo, YIN Bin, ZHU Zhao-liang, et al. Gaseous loss of nitrogen from fields and wet[J]. *Soils*, 2005, 37(2):113-120.
- [24] Deluca T H, Mackenzie M D, Gundale M J, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2):448-453.
- [25] 褚 军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4):409-415.
- CHU Jun, XUE Jian-hun, JIN Mei-juan, et al. Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural non point source pollution[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4):409-415.
- [26] 王晓辉, 郭光霞, 郑瑞伦, 等. 生物炭对设施退化土壤氮相关功能微生物群落丰度的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(3):624-631.
- WANG Xiao-hun, GUO Guang-xia, ZHENG Rui-lun, et al. Effect of biochar on abundance of n-related functional microbial communities in degraded greenhouse soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3):624-631.
- [27] 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):768-780.
- WANG Meng-meng, ZHOU Qi-xing. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(5):768-780.
- [28] 李 露, 周自强, 潘晓建, 等. 不同时期施用生物炭对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4):839-848.
- LI Lu, ZHOU Zi-qiang, PAN Xiao-jian, et al. Different period applying biochar effects on paddy N_2O and CH_4 emissions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):839-848.
- [29] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1):1-14.
- [30] Nelissen V, Ritting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 55:20-27.

- [31] 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. Effect 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.
- [32] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响 [J]. 中国农学通报, 2009, 25: 153–157.
- ZHANG Wen-ling, LI Gui-hua, GAO Wei-dong. Effect of biomass charcoal on soil character and crop yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25: 153–157.
- [33] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central amazonian ferralsol amended with compost and charcoal[J]. *Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171 (6): 893–899.
- [34] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos; 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(s1–2): 81–84.
- [35] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300 (1): 9–20.
- [36] Yoshida S, Yamamoto K, Ezawa T. Enhancement of the effectiveness of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi by inorganic soil amendments [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2002, 48(6): 897–900.
- [37] Gundale M J, Deluca T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(3): 303–311(9).
- [38] Gundale M J, Deluca T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fire charcoal[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 231(1–3): 86–93.
- [39] 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.
- ZHU Hui, YAN Bai-xing. Export of nitrogen by lateral seepage from paddy field in Sanjiang plain[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 108–112.
- [40] 何仁江. 三峡库区典型农业小流域氮磷排放负荷与收支研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- HE Ren-jiang. Nitrogen and phosphorus discharge load and balance in a small typical agricultural watershed in Three-gorges Reservoir Area [D]. *Chongqing: Southwest University*, 2011.