

芦荻生物质炭基肥研制及其对水稻土氮损失的影响

赵杭¹, 周旋², 王艺哲¹, 张含丰¹, 颜波静¹, 许缘¹, 曾雯¹, 张玉平¹

(1.湖南农业大学资源与环境学院, 长沙 410128; 2.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

摘要:为实现秸秆资源化利用和强化生物质炭基肥生产应用,以洞庭湖芦荻秸秆热解生物质炭为基质,采用包膜和混合造粒技术,以改性淀粉为黏合剂,辅以膨润土、腐殖酸等材料制备包膜炭基肥(CT)和混合炭基肥(MT)。以生物质炭占比 10%(T1),15%(T2),20%(T3),25%(T4)和 30%(T5),从微观形态结构、养分释放速率、粒径及抗压强度等基本性质进行择优筛选,将筛选后的炭基肥处理(CT2、CT3、CT4 和 MT1、MT2、MT3)与普通复合肥(NPK)、不施肥(CK)共 8 个处理进行室内水稻盆栽试验,对比不同研制方式及生物质炭添加量下水稻土氮挥发及氮素渗漏流失差异。结果表明:炭肥比越大,肥料结构愈紧密,累积氮素释放率愈低,但过量的生物质炭的添加会造成肥料粒径不均匀、抗压强度不达标。包膜生物质炭基肥以 15%~25%的生物质炭添加量较适宜;混合生物质炭基肥以 10%~20%的生物质炭添加量较适宜。与 NPK 处理相比,CT2、CT3、CT4 处理氮累积挥发量分别降低 12.95%,27.96%,23.82%,氮挥发损失率分别降低 16.56%,35.67%,30.57%,以 CT3 效果最好;MT1、MT2、MT3 处理氮累积挥发量分别降低 33.72%,41.48%,16.06%,氮挥发损失率分别降低 43.31%,53.18%,20.38%,以 MT2 效果最好。2 种炭基肥均可减少盆面水铵氮平均浓度,与 NPK 处理相比,最高降幅分别达 20.74%(CT4)和 39.90%(MT2);混合造粒炭基肥中以 MT2 处理的全氮、硝氮浓度降幅最大,分别达 5.50%,5.09%,而包膜炭基肥各处理间差异均不显著。与 NPK 处理相比,施包膜炭基肥处理的渗漏水中铵氮与全氮平均浓度分别显著降低 8.93%~14.00%,8.84%~16.38%,而各处理间硝氮平均浓度均无显著性差异。施混合炭基肥可降低铵氮、硝氮和全氮平均浓度,分别达 11.16%~12.42%,3.22%~22.29%,11.14%~15.86%。此外,炭肥比越高,生物质炭的氮减排效应越明显,但添加量过大其氮减排量并无显著性增加。总体而言,2 种工艺制备生物质炭基肥均能有效降低氮挥发损失以及减缓氮素径流渗漏损失风险。其中,包膜炭基肥以 20%~25%生物炭添加量效果最优,混合炭基肥以 15%最优。

关键词: 芦荻生物炭; 生物炭基肥; 氮挥发; 氮素流失; 面源污染

中图分类号: X712

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0319-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.045

Effects of Biochar Fertilizers Prepared by Reeds with Different Techniques on Nitrogen Loss in Paddy Soil

ZHAO Hang¹, ZHOU Xuan², WANG Yizhe¹, ZHANG Hanfeng¹,

YAN Bojing¹, XU Yuan¹, ZENG Wen¹, ZHANG Yuping¹

(1.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University,

Changsha 410128; 2.Hunan Institute of Soil and Fertilizer, Changsha 410125)

Abstract: For the dual purposes of the straw resource utilization and strengthening the biomass carbon basal application, the rushes straw in the Dongting Lake was pyrolysed as biomass substrate. Using the coated and mix granulation technologies, the coated (CT) and mixed (MT) biochar fertilizers were prepared, with modified starch as adhesive, and bentonite, humic acid as supplementary. The ratios of biochar in fertilizers were 10% (T1), 15% (T2), 20% (T3), 25% (T4) and 30% (T5) respectively. All the fertilizers were screened considering the microstructure, nutrient release rate, particle size and compressive strength and other basic properties. A pot experiment was carried out with the screened biochar fertilizers (CT2, CT3, CT4 and MT1, MT2 and MT3), taking common compound fertilizer (NPK) and no fertilizer as the control (CK). The differences of ammonia volatilization and nitrogen leaching and loss in paddy soil were analyzed.

收稿日期: 2021-11-02

资助项目: 湖南省重点研发计划项目(2019NK2021); 国家“十三五”重点研发计划项目(2018YFD0800500)

第一作者: 赵杭(1998—), 女, 汉族, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防控与农业生态环境研究。E-mail: zh3245643@163.com

通信作者: 张玉平(1974—), 男, 湖南安仁人, 副教授, 主要从事作物施肥原理与技术、农业面源污染防控研究。E-mail: zhyup2003@126.com

The results showed that the larger ratio of biochar resulted in the compacted fertilizer structure and the lower cumulative nitrogen release rate. However, the excessive addition of biochar would cause the uneven particle size and non-standard compressive strength of fertilizer. For CT, 15%~25% biochar was suitable. For MT, 10%~20% biochar was suitable. Compared with NPK, CT2, CT3 and CT4 reduced ammonia volatilization accumulation by 12.95%, 27.96% and 23.82%, and ammonia volatilization loss rate by 16.56%, 35.67% and 30.57%, respectively, among which CT3 had the best effect. The cumulative amount of ammonia volatilization was reduced by 33.72%, 41.48% and 16.06% respectively in MT1, MT2 and MT3, and the loss of ammonia volatilization was reduced by 43.31%, 53.18% and 20.38% respectively. The average concentration of ammonium and nitrogen in surface water decreased by 20.74% (CT4) and 39.90% (MT2), respectively, compared with NPK. Total nitrogen and nitrate nitrogen concentration of MT decreased by 5.50% and 5.09% respectively in MT2, while the difference of CT was not significant. Compared with NPK, CT significantly reduced the average concentration of ammonium nitrogen and total nitrogen by 8.93%~14.00% and 8.84%~16.38%, respectively, while there was no significant difference in nitrate nitrogen treatments. The average concentrations of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen were reduced by 11.16%~12.42%, 3.22%~22.29% and 11.14%~15.86%, respectively. The higher the ratio of biochar was, the more obvious the emission reduction of biochar was. But the effect was not obvious when the excessive biochar was added. In general, the two methods could effectively reduce the loss of ammonia volatilization and reduce the loss risk of nitrogen. Among them, the CT with 20%~25% biochar content was the best, and the MT with 15% was the best.

Keywords: reed biochar; biochar based fertilizer; ammonia volatilization; nitrogen loss; non-point source pollution

生物质炭是由生物质材料在低氧或缺氧条件下经热裂解后制备而成,因其比表面积大,孔隙结构丰富,能吸附固持土壤中氮、磷养分,减少土壤中养分流失。同时其表面具有大量负电荷及高电荷密度特性,能吸附固定水、土壤或沉积物中极性或非极性有机化合物以及无机离子如铵根离子和硝酸根离子等。因此,农田施用生物质炭对改良土壤、固碳、减排氮磷、提高作物产量具有积极意义^[1-3]。

生物质炭基肥是以生物质炭为养分缓释载体,将化肥与养分载体有机结合而制成肥料,不仅能发挥生物炭改良土壤的优点,又可结合农作物需肥规律持续供应养分,减少养分损失,赋予其缓释和固碳的双重功能。已有研究^[4-6]认为,生物质炭基肥具有含碳量高、减肥增效和养分可持续供应等优点,在改善土壤理化性状、减少化肥投入、促进作物生长等方面具有良好的应用前景。近年来,随着农业结构调整及生态循环农业的发展,以秸秆资源化利用为目标,高效生物质炭基肥研发与应用已成为植物营养与肥料领域研究的热点。

生物质炭的制备原料、炭基肥配比及其制备方法等因素直接影响生物质炭基肥的机械性能、养分释放和肥效。目前,生物质炭基肥生产工艺主要包括掺混法、吸附法、包膜法和混合造粒法等,其中包膜法主要是以生物炭细粉状颗粒包裹速效性化肥颗粒,逐渐释

放养分供农作物利用,可有效减少因肥料的分解、挥发、冲蚀等造成的养分损失,提高肥料利用率。混合造粒法是将生物质炭与一种或者多种肥料粉碎后,形成粒度接近的粉状颗粒进行混合造粒,该方法生产效率高、操作简便,是目前肥料生产的主要方式。

当前,洞庭湖区芦荻产量大,原有用于造纸原料的利用方式对环境污染过大,随意处置不仅造成资源浪费,而且会造成更大的污染。基于此,本文以洞庭湖芦荻秸秆炭基化利用为目标,将洞庭湖绿色安全、可再生、资源量巨大的芦荻生物秸秆热解炭化,作为肥料载体,采用包膜造粒和混合造粒工艺研制生物质炭基肥,结合盆栽试验方法,对比研究不同生产工艺、不同碳基添加比例条件下芦荻生物质炭基肥的基本性状,以及施用后氮素损失上的差异,以期优化生物炭基肥配方及其生产工艺、促进芦荻秸秆炭基化肥料利用与推广提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为“湘早籼 45 号”。供试土壤为花岗岩发育的麻沙泥,取自浏阳市永和镇,其基本理化性质见表 1。芦荻生物质炭原材料为洞庭湖芦荻秸秆,在 500 ℃高温密闭条件下的炭化制成,其基本理化性质见表 1。生物质炭包膜炭基肥制备肥料为 NPK 复合肥芯(N : P₂O₅ : K₂O 为 26 : 10 : 15),粒

径 2~4 mm。混合造粒炭基肥制备肥料为尿素(含 N 46%)、磷酸一铵(含 P₂O₅ 45%)、氯化钾(含 K₂O

62%)。其他辅助材料包括膨润土、腐殖酸、玉米淀粉黏结剂。造粒设备为开放式圆盘造粒机。

表 1 供试土壤及生物质炭基本理化性质

供试材料	有机质/ (g·kg ⁻¹)	总炭/ (g·kg ⁻¹)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	pH (1:2.5)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	灰分 /%	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔容积/ (cc·g ⁻¹)
土壤	28.34		4.59	0.87	17.35	7.14				
生物质炭		143.40	4.94	4.53	28.10	9.30	14.50	77.40	405.86	2.38

1.2 试验设计

1.2.1 芦荻生物质炭基肥制备 以芦荻生物炭制备包膜炭基肥(CT)与混合炭基肥(MT)2 种工艺肥料。改性玉米淀粉黏结剂制备^[7]:将 50 g 玉米淀粉加入 100 mL 水中,不断搅拌下添加适量浓硫酸进行催化,5 min 左右后加入 5 g 高锰酸钾溶液氧化 1 h 并不断搅拌,然后加入 4 g 氢氧化钠糊化 20 min,加入 1 g 硼砂交联 15 min,最后加入适量水充分搅拌后,冷却得淀粉黏结剂。加水稀释至 0.5%(质量分数)以供缓释肥制备使用。

按重量计,氮磷钾肥料占 60%,生物质炭及其他辅助材料占 40%。2 种剂型的生物质炭基肥中的生物质炭添加比例均设 5 个梯度,具体材料配方见表 2。设备转速设为 40 r/min,预热 30 min。

包膜炭基肥研制过程:在匀速转动的造粒机中加入颗粒复合肥后撒施部分包膜材料粉末,转动片刻,喷淋一部分黏结剂,使颗粒尿素表面形成一层黏结液,从而形成一层紧密的包裹层。继续撒施部分包膜材料粉末,重复上述过程直到粉末全部包裹上颗粒肥,外表油亮光泽为止。

混合炭基肥研制过程:将制备炭基混合肥所需尿素、粉状磷酸一铵、氯化钾 3 种肥料粉末混合均匀后与表 2 所示生物质炭混合材料再次混匀。将一部分混合好的粉末倒入预热好的圆盘造粒机造粒,转动片刻,喷淋黏结剂。再逐渐加入剩余粉末,如此喷淋黏结剂多次,粉末会变成米粒大小的引子,并且逐渐变大成球形。重复上述过程直至所有粉末全部添加,外表油亮光泽为止。上述 2 种生物炭基肥均于 45℃烘箱中烘干后取出过筛,封装于聚乙烯袋中,置于阴凉干燥处储存,于 2 周后进行盆栽试验。

表 2 炭基肥制作所用生物质炭及其他辅助材料的含量配比
单位: %

处理	生物质炭	膨润土	腐殖酸
CT1/MT1	10	20	10
CT2/MT2	15	15	10
CT3/MT3	20	10	10
CT4/MT4	25	5	10
CT5/MT5	30	0	10

1.2.2 水稻盆栽试验 试验于 2021 年 4—8 月在湖南农业大学校内基地进行。水稻盆栽模拟土柱试验装置

为内径 25 cm、高 50 cm 的 PVC 圆柱管,管底装配可自由旋开或关闭的螺口盖。盖底中央开有 1 个直径约 0.5 cm 的圆孔,采用密封胶固定安装连接圆孔且尾部带有阀门的塑料管,以控制土柱内渗漏水流出。为方便收集渗漏水,在圆柱管底部铺 2 cm 厚的沙砾,圆孔周围用纱布包裹以防止土粒堵塞塑料管。

盆栽试验设 8 个处理:CK,不施肥;NPK,施常规肥;CT2,生物质炭占肥料质量 15% 的包膜炭基肥;CT3,生物质炭占肥料质量 20% 的包膜炭基肥;CT4,生物质炭占肥料质量 25% 的包膜炭基肥;MT1,生物质炭占肥料质量 10% 的混合炭基肥;MT2,生物质炭占肥料质量 15% 的混合炭基肥;MT3,生物质炭占肥料质量 20% 的混合炭基肥。每个处理重复 3 次,随机排列。水稻移栽前 1 天施肥,N 用量为 200 kg/hm²,P₂O₅ 用量为 90 kg/hm²,K₂O 用量为 186 kg/hm²。水稻于 4 月 28 日移栽,8 月 15 日收获。肥水管理采用常规方法,盆栽试验氮素渗漏装置见图 1。

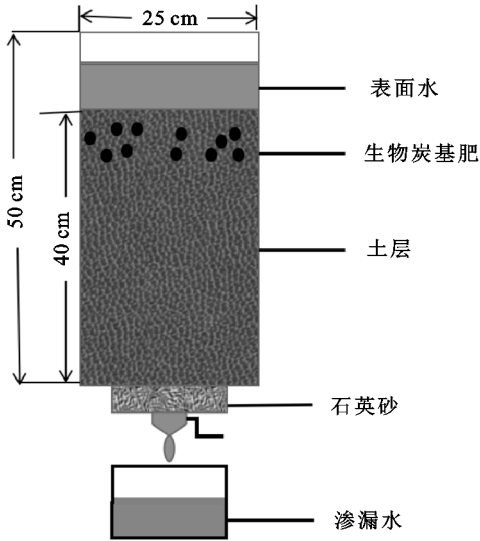


图 1 盆栽试验装置示意

1.3 测定指标

1.3.1 生物质炭基肥基本性能测定

(1)生物质炭基肥氮素释放性能测定:称取 12.50 g 缓释肥放入 1 mm 孔径的指形网袋中,封口后,将网袋置于玻璃瓶中,加入 250 mL 蒸馏水,加盖密封,于 25℃恒温箱中静置。每个处理 3 次重复。取样时,摇动玻璃瓶使瓶内液体浓度一致,取样后瓶内剩余液体倒出并加入 250 mL 蒸馏水再次放入恒温箱

继续培养。浸出液氮浓度采用过硫酸钾法测定。

(2)粒径:随机取出 30 粒制备好的生物质炭基肥颗粒置于培养皿中,利用游标卡尺测量每粒肥料颗粒的粒径并计算肥料平均粒径及标准差。

(3)抗压强度:随机取出制备好的生物质炭基肥颗粒,利用质构仪(MTS insight 30)测定每个肥料颗粒的抗压力值,重复 5 次,计算其平均值和标准差。

(4)结构特征:采用扫描电镜(Apreo,赛默飞)对制备好的生物质炭基肥颗粒横截面进行扫描分析,观察不同粒径生物质炭基肥颗粒的结构特征。

1.3.2 盆栽试验测定指标与方法

(1)氨挥发监测:采用密闭室间歇式通气法收集氨气。氨挥发吸收液为 20 g/L 硼酸,施肥后连续监测 6 天,之后每 3 天监测 1 次,直至氨挥发趋近于 0 为止。每次抽气结束后,用标准稀硫酸(0.02 mol/L)进行滴定,并计算氨挥发量。测定分析各处理氨挥发速率,并计算其累积挥发量。计算公式为:

$$F=\frac{c\times V\times 14\times 10-2}{S}\times \frac{24}{t}$$

式中: F 为氨挥发速率(以 NH_3-N 计, $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot \text{d})$); c 为标准稀硫酸的滴定浓度(mol/L); V 为滴定消耗稀硫酸的体积(mL);14 为每摩尔氨中 N 的质量数(g/mol); S 为捕获装置的截面积(m^2); t 为 NH_3 挥发的收集时间(h)。

氨挥发累积量 (kg/hm^2)=测定时期内每次收集的氨挥发通量之和

氨挥发损失率(%)=(各处理的氨累积挥发量—不施肥处理的氨累积挥发量)/施氮量 $\times 100\%$

(2)水样氮素测定:水稻施肥后前 6 天,之后每 3 天 1 次,后期每 11 天 1 次,连续采集 14 次盆栽盆面水;施肥后第 1,3,5,7 天连续收集渗漏水,之后每 7,11 天收集 1 次渗漏水样,共 9 次,测定盆面水和渗漏水中铵氮、硝氮和全氮浓度。全氮浓度采用紫外分光光度法^[8]测定;铵氮、硝氮浓度采用 SmartChem™ 200 全自动间断化学分析仪测定^[8]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 17.0 软件进行数据统计和分析,显著性分析采用最小显著差异法(LSD)。采用 Origin 8.5 软件进行作图及方程拟合。

2 结果与分析

2.1 生物质炭基肥理化性能评价

2.1.1 生物质炭基肥粒径 肥料颗粒均匀度是评价肥料质量的重要指标之一^[9]。由表 3 可知,各处理的包膜生物质炭基肥粒径为 3.50~6.50 mm,最大粒径为 5.50~6.50 mm,均值为 4.20~4.50 mm,CT5 的均值显著大于其他包膜肥处理,但其他 4 个包膜肥

处理之间差异不明显。而混合生物质炭基肥粒径为 3.00~8.00 mm,最大粒径为 6.00~8.00 mm,各处理均值为 4.00~5.60 mm,各处理间差异显著,其中 MT4、MT5 处理粒径过大,不利于运输保存。粒径统计综合反映出芦荻包膜生物质炭基肥均值差异较小,均匀度较高,造粒难度较混合炭基肥更小。

表 3 不同工艺制备下生物质炭基肥粒径

单位:mm			
处理	最小值	最大值	均值±标准差
CT1	4.00	5.50	4.40±0.40ab
CT2	3.50	5.50	4.20±0.60b
CT3	4.00	6.00	4.40±0.46ab
CT4	4.00	6.00	4.40±0.47ab
CT5	4.00	6.50	4.50±0.72a
MT1	3.00	6.00	4.00±0.70d
MT2	3.50	6.50	4.40±0.77c
MT3	3.50	6.50	4.20±0.62cd
MT4	3.00	7.50	5.20±0.97b
MT5	4.00	8.00	5.60±1.15a

注: $n=30$;同列不同小写字母表示不同处理组差异性显著($P<0.05$)。下同。

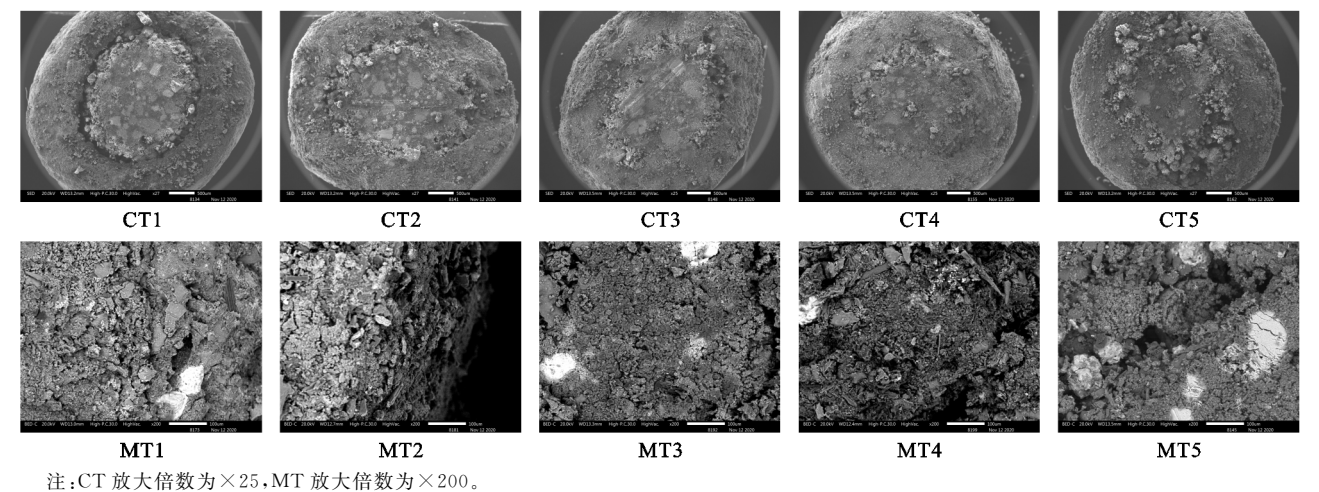
2.1.2 生物质炭基肥抗压强度 肥料抗压强度越高,其硬度越大,越利于储存和运输。一般复混肥颗粒平均抗压强度 $>12.00\text{ N}$ 代表具有较高的硬度。由表 4 可知,包膜炭基肥除 CT5 抗压强度较小外,其余处理均达到 12 N 以上。而混合炭基肥各处理抗压强度均显著低于包膜炭基肥,MT4、MT5 处理因抗压强度过低被淘汰。说明本试验条件下芦荻包膜炭基肥的抗压性优于混合炭基肥。

表 4 不同工艺制备下芦荻生物质炭基肥抗压强度

单位:N			
处理	最小值	最大值	均值±标准差
CT1	10.73	19.81	15.44±2.99a
CT2	12.94	25.72	18.22±4.55ab
CT3	9.65	17.82	13.96±3.27ab
CT4	10.43	13.25	11.09±1.18bc
CT5	4.97	16.82	8.22±4.35c
MT1	6.00	11.05	8.37±1.99a
MT2	8.09	10.13	8.18±1.58a
MT3	5.13	6.04	5.50±0.37b
MT4	2.07	4.04	3.18±0.69c
MT5	2.21	3.91	3.17±0.59c

2.1.3 生物质炭基肥微观结构 由图 2 可知,CT2、CT3 和 CT4 处理内部膜层较为细密紧致无明显损毁。其中添加量 20%~25%包膜炭基肥膜层与肥芯紧密结合,更加光滑平整。而 CT1、CT5 处理膜层相对粗糙多裂痕。反映出生物质炭添加量越高,越有助于膜层形成,但是达到 30%后会加重造粒难度。MT1、MT2 和 MT3 处理混合材料间粘结较紧密,空

隙少且小。而超过 25% 比例添加量,混合炭基肥结 构松散、碎块多、分布不均匀,造粒效果不理想。



注:CT 放大倍数为×25,MT 放大倍数为×200。

图 2 不同工艺制备下芦荻生物质炭基肥电镜扫面图

2.1.4 生物质炭基肥养分释放规律 由图 3 可知,NPK 处理于第 1 天氮素累积释放率已达 82%,而包膜炭基肥处理平均累积氮素释放率仅为 47.80%,混合炭基肥处理为 31.98%。第 7 天,CT1、CT2、CT3、CT4 和 CT5 处理累积氮素释放率分别较 NPK 处理降低 30.53%,27.37%,27.37%,41.05%和 29.47%,

CT4 处理较其他 4 个处理显著降低氮素累积释放率;MT1、MT2、MT3、MT4 和 MT5 分别降低 46.32%,62.10%,58.95%,28.42%和 38.95%,反映出芦荻混合炭基肥较包膜炭基肥氮素释放缓慢,有助于减缓氮素流失,其中 MT1、MT2、MT3 处理与其他 2 个处理相比氮素缓释效果更显著,可应用于后续盆栽试验。

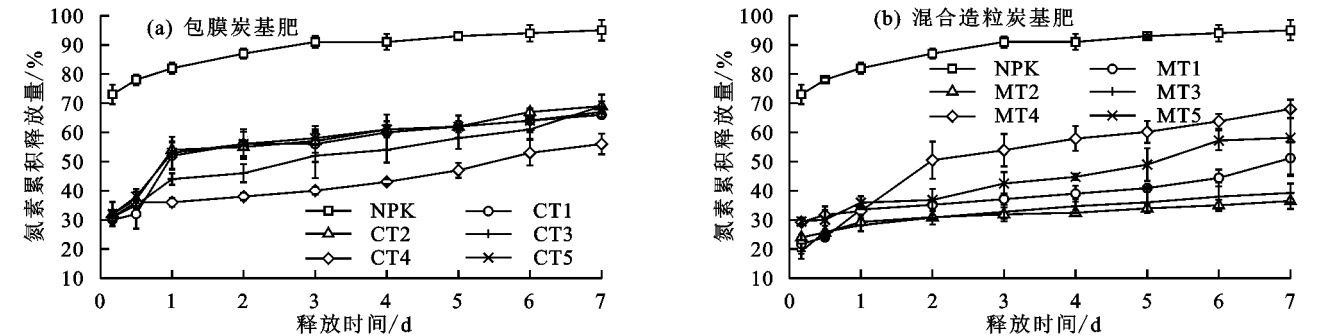


图 3 不同工艺制备下芦荻生物质炭基肥浸出液氮素累积释放率

2.2 氮素损失

2.2.1 氨挥发损失特征 由图 4 可知,施肥后各处理氨挥发速率迅速升高,达峰值后逐渐下降。NPK 处理氨挥发速率于第 4 天达到峰值(1.34 kg/(hm²·d))。而包膜炭基肥 CT2、CT3 和 CT4 处理氨挥发速率峰值较 NPK 处理分别降低 32.87%,33.53%和 19.04%,混合炭基肥 MT1、MT2 和 MT3 处理分别降低 17.10%,40.68%和 31.60%。故 2 种工艺制备炭基肥均能有效降低水稻土中氨的挥发,而在一定用量范围内施加生物质炭会对水稻土中的氨损失起到抑制作用,均以 15%和 20%添加量减排效果较好。其中,CT3 和 MT2 处理氨挥发累积量较 NPK 处理分别显著降低 28.04%和 41.56%。NPK 处理氨挥发损失率达 3.14%,而包膜炭基肥处理为 2.27%(2.02%~2.62%),混合炭基肥处理为 1.92%(1.47%~2.50%)。说明芦荻生物炭基肥能有效降低氨挥发累积量及损失率,且混合炭基肥氨挥发损失率较包膜炭基肥低,以 MT2 处理最低。

2.2.2 盆面水氮素流失 由图 5 可知,施肥后盆面水铵氮浓度整体呈波动下降的趋势。NPK 处理在第 1 天的铵氮浓度高达 40.67 mg/L,而后逐渐下降,在第 4 天再次出现峰值,前 1 周内铵氮浓度显著高于其他炭基肥处理。包膜炭基肥处理中,CT4 第 1 天铵氮浓度达 33.72 mg/L,CT2、CT3 处理在第 2 天出现第 1 个峰值,而后逐渐下降,并于第 6~9 天才达到第 2 个峰值,分别为 27.32,25.34,23.33 mg/L。混合炭基肥处理中,均与第 1 天达到第 1 个峰值,分别为 29.81,32.26,26.04 mg/L,而后逐渐下降于第 5~9 天出现第 2 个峰值分别为 24.65,20.92,23.93 mg/L。从峰值大小来看,2 种生物质炭基肥均降低盆面水铵氮浓度;从峰值出现时点来看,炭基肥有一定的缓释效果,能够延缓氮素的释放。此外,NPK 处理的盆面水平均铵氮浓度为 18.32 mg/L,包膜炭基肥和混合炭基肥处理盆面水平均铵氮浓度较 NPK 分别显著降低 14.74%~20.74%,35.64%~39.90%。表明施

用生物质炭基肥能控制氮素流失风险,且混合炭基肥

较包膜炭基肥更稳定,氮素吸附固定效果更好。

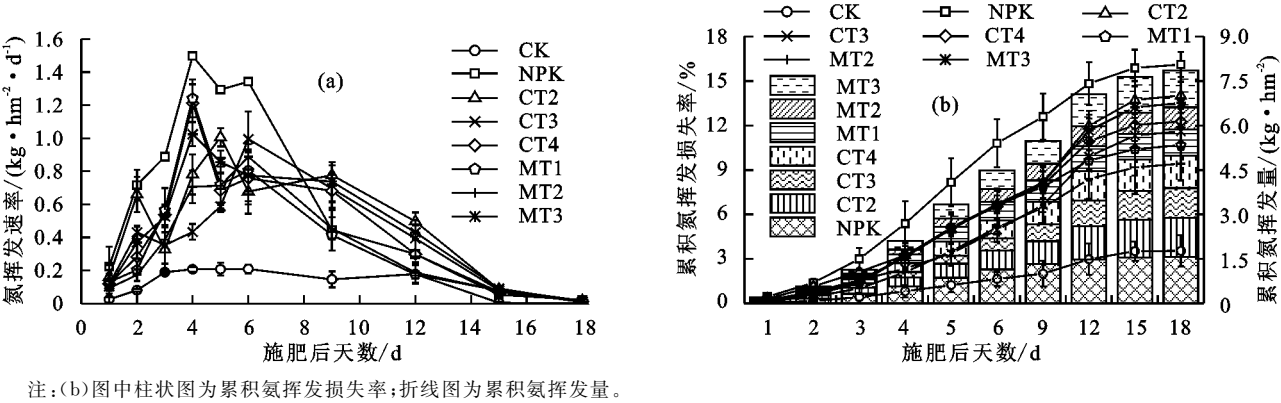


图 4 不同工艺制作芦荻生物炭基肥下氮挥发速率、氮挥发累积量及氮挥发损失率

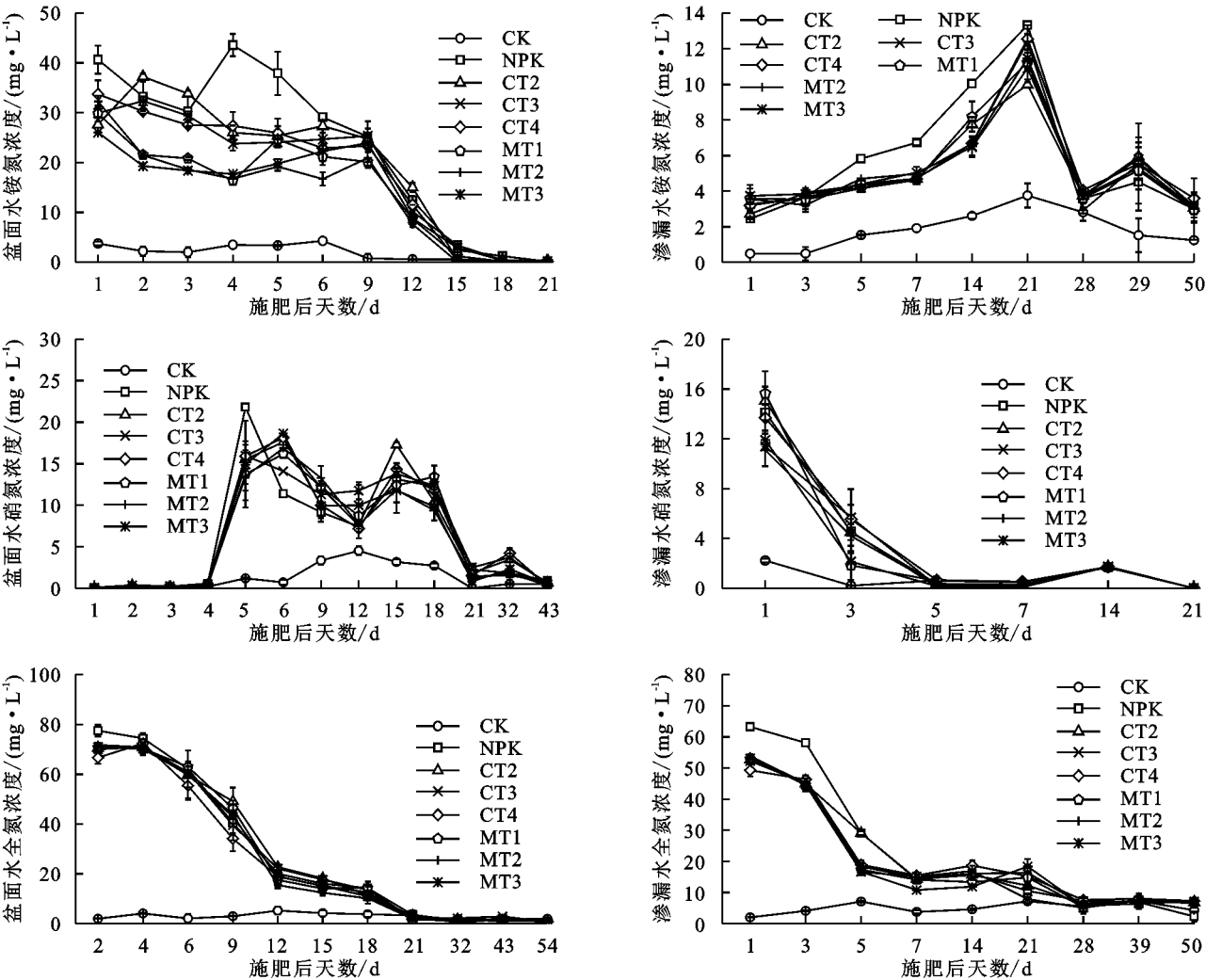


图 5 不同工艺制备芦荻生物炭基肥下盆面水及渗漏水氮浓度

盆面水硝态氮浓度先升高后下降,施肥后前 4 天内,硝氮浓度几乎为 0,施肥后第 5 天 NPK 处理达到最大值(21.82 mg/L),而后急速下降,径流渗漏风险较高,包膜炭基肥各处理盆面水平均硝氮浓度较 NPK 差异性不显著;混合炭基肥处理 MT2 盆面水平均硝氮浓度最低,与 NPK 相比降低 5.09% ,后期炭基肥处理硝氮浓度均大于 NPK,可能是因为生物质炭基肥缓释的铵氮在后期转变为硝氮。所有处理盆

面水全氮浓度均在第 1 天达到最大值,包膜炭基肥较 NPK 处理全氮浓度降低 $9.10\% \sim 9.66\%$,全氮平均浓度最高降低 1.04% ,无显著性差异。混合炭基肥较 NPK 处理全氮浓度降低 $7.40\% \sim 8.67\%$,全氮平均浓度最高降低 5.50% ,能有效控制氮素流失风险。

2.2.3 渗漏水氮素流失 由图 5 可知,渗漏水铵氮浓度整体先上升后下降,并于第 21 天达到峰值,与 NPK 处理相比,包膜炭基肥处理铵氮浓度降低 $5.87\% \sim 25.22\%$,

混合炭基肥处理铵氮浓度降低 7.10%~15.85%。此外,与 NPK 处理平均铵氮浓度(13.35 mg/L)相比,包膜炭基肥渗漏水平均铵氮浓度分别降低 13.16%, 14.00% 和 8.93%,混合炭基肥渗漏水平均铵氮浓度分别降低 11.52%, 12.42% 和 11.16%。

各处理渗漏水硝氮浓度均在第 1 天达到峰值,而后逐渐下降。NPK 处理在第 1 天渗漏水硝氮浓度为 14.11 mg/L,平均浓度为 3.41 mg/L。包膜炭基肥各处理第 1 天渗漏水硝氮浓度分别为 15.05, 11.38, 13.69 mg/L,平均浓度分别为 3.60, 3.16, 3.60 mg/L,除 CT3 降低 7.06%,其他处理较 NPK 处理均无明显差异。混合炭基肥各处理第 1 天渗漏水硝氮浓度分别为 15.64, 11.10, 11.90 mg/L,平均浓度为 3.30, 2.88, 2.65 mg/L,3 个处理均降低渗漏水硝氮平均浓度,分别降低 3.22%, 15.54% 和 22.29%,混合炭基肥吸附固定硝态氮的效果优于包膜炭基肥,其中 MT3 处理最优。渗漏水全氮浓度均在第 1 天达到最大值,而后逐渐下降。当天 NPK 处理渗漏水全氮浓度为 63.25 mg/L,平均浓度为 23.08 mg/L,与之相比,包膜炭基肥 3 个处理平均浓度分别降低 8.84%, 16.38% 和 10.00%。混合炭基肥 3 个处理平均浓度分别降低 14.64%, 11.14% 和 15.86%。

3 讨论

3.1 不同工艺制备生物质炭基肥理化性能差异

一般来说,炭肥比越高,生物质炭基肥对养分的吸附作用越大^[10]。电镜扫描图(图 2)可以观察到,随着生物炭添加量的增加,包膜炭基肥中包膜材料与肥芯结合愈紧致,混合炭基肥中复合肥料粉末与生物质炭粉混合更均匀。与 NPK 处理相比,2 种生物质炭基肥施用前期氮素释放较慢,表明生物炭与肥料养分的结合增加两者间的吸附固持作用^[11]。在一定用量范围内,随着炭基肥中炭肥比的增加,2 种生物质炭基肥各处理的累积氮素释放率逐渐降低,这是因为生物炭丰富的介孔和微孔结构限制水分的快速进入和养分的快速溶出,其丰富的官能团对肥料中阴阳离子和分子有很强的吸附作用,从而达到一定的缓释效果^[12]。但当生物炭添加量过高时,2 种炭基肥料的 N 素释放率反而升高,可能是由于膨润土添加量减少,导致肥料颗粒致密性降低,使得养分更易向表面迁移^[13]。炭基肥中生物炭的比例也影响着炭基肥的物理性状^[14],随着生物质炭粉比例的增加,肥料粒径增大,颗粒抗压强度逐渐降低,这与生物炭粉的孔隙结构丰富、脆性强等特性有关。在成粒过程中,颗粒间缝隙多,造成黏结不充分,养分吸附效果受到影响。适宜生物炭添加量使得 2 种生物炭基肥的粒径均匀度和抗压强度达到最优,更利于肥料的储存和运输,

可显著减少炭基肥在运输过程中的养分流失^[15]。

生物质炭基肥制备方法对其机械性能和缓释性能产生直接影响^[14]。肥料结构越紧密、均匀,抗压强度越高,越不容易破裂,更利于肥料的缓释作用,增强生物质炭基肥的机械强度,减少生物质炭基肥在施用过程中的损失。包膜生物质炭基肥粒径均值显著小于混合生物质炭基肥,且相对标准偏差较小,表明粒径更均匀。同时包膜生物质炭基肥抗压强度也优于混合生物质炭基肥,这都源于 NPK 复合肥芯本身的粒径基础和抗压强度。此外,25% 添加量包膜和 15% 添加量混合生物质炭基肥处理的累积氮素释放率分别降低 41.05% 和 62.10%。综上,本试验条件下,包膜法和混合造粒法研制生物质炭基肥的最优炭肥比为 1:3~1:4 和 1:5~1:6,将来应对炭基肥研制工艺以及生物炭配比进行深入的研究,从而优化生物质炭基肥的制备条件。

3.2 不同类型生物炭基肥对土壤氮挥发的影响

一般而言,高浓度铵氮更易导致农田土壤氮挥发。本研究中,生物质炭基肥处理氮挥发速率在施肥后 1~6 天显著低于 NPK 处理,可能是因为生物质炭具有高比表面积与孔隙度决定其吸附性强的特质,而表面的酸性官能团可通过离子交换作用达到吸附固定铵离子的效果^[16],缓解氮挥发速率。施肥 6 天后 NPK 处理氮挥发速率急速下降,而 CT、MT 处理下降幅度较 NPK 处理小,可能由于生物质炭吸附的铵氮逐渐释放,表明施肥初期氮挥发强烈,生物质炭能有效减少氮的排放,而随后又能释放其固定的铵氮,补充土壤中氮损失,体现出一定的缓释性能。施肥后 1~6 天 NPK 处理表面水铵氮浓度显著大于生物质炭基肥处理,后期差异性不显著,这与氮挥发速率变化趋势一致。因此,生物质炭对铵离子的强吸附作用可有效抑制土壤中氮挥发损失^[17-18]。

本研究中,生物质炭的添加有效降低氮挥发速率峰值,且 20% 生物质炭添加量的包膜炭基肥和 15% 生物质炭添加量的混合炭基肥延缓氮挥发速率峰值出现时点,表明适宜生物质炭添加量的炭基肥对氮素有一定固持作用而延缓养分释放。同时,CT3 和 MT2 处理较 NPK 处理均显著降低氮挥发累积量及损失率。基于此,2 种研制工艺下生物质炭基肥的最优添加量存在差异。

3.3 不同工艺制备生物质炭基肥对盆面水和渗漏水氮素流失的影响

炭基肥优良的控释吸附能力,能有效增加对土壤养分的固持,降低土壤中铵氮和硝氮的淋溶率^[19-20]。

施肥后前期(1~9 天)盆面水主要以铵态氮的形式存在^[21]。与 NPK 处理相比,施用生物质炭基肥显著降低表面水氨氮浓度,这是因为生物质炭存在酚羟基等基团,能提高铵根离子在其表面的静电吸附,将其吸附在土壤中,提高对铵的固定,从而显著降低渗漏水铵氮浓度,缓解铵离子流失的风险^[16]。同时,生物质炭表面与土粒对铵氮的吸附使土壤中游离态的铵离子转变为吸附态,进而降低土壤中铵氮有效性来抑制硝化作用,避免硝氮的大量积累造成淋溶及反硝化损失^[22]。此外,生物质炭表面的阴离子交换位点,能吸附游离在土壤溶液中的硝氮^[23-24]。因此,生物质炭基肥的施用有效降低表面水、渗漏水中的铵氮、硝氮浓度,减少氮素损失,降低面源污染风险。

炭肥比越高,官能团、孔隙率、比表面积、阳离子交换量等特性越明显,因此更能有效地固持氮^[10]。Puga 等^[25]研究也认为,高生物炭含量的炭基肥对土壤氮的固持效果更大。本研究中,增加包膜生物质炭基肥中生物质炭添加比例由 15%到 25%时,混合生物质炭基肥的生物质炭添加比例由 5%增加到 15%时,更能有效减缓氮素损失,这与生物质炭疏水性,多孔的结构有关^[20]。2 种肥料研制方式下,王思源等制备包膜生物质炭基肥显著降低氮素淋失率,并提高氮素利用率^[19];付嘉英等^[26]通过圆盘造粒制备的炭基肥能有效增加蔬菜产量;张伟^[27]研究也表明,生物质炭基肥的缓释性随生物质炭含量的增多而升高。本研究中,混合生物质炭基肥各处理盆面水平均铵氮和硝氮浓度较 NPK 最高降低 39.90%(MT2)以及 5.09%(MT2),说明 15%炭添加量对于芦荻混合生物质炭基肥是最适宜的。包膜生物质炭基肥各处理表面水铵氮的平均浓度较 NPK 分别降低 20%左右(CT3,CT4 差异不显著),且对硝氮没有明显的吸附固持作用。这可能是由于游离铵态氮变为吸附铵态氮,从而抑制硝化作用,避免硝氮的大量积累所引起的淋溶及反硝化损失。

对于渗漏水铵氮和硝氮的浓度分析表明,混合生物质炭基肥最高分别降低 12.42%(MT2)和 22.29%(MT3),包膜炭基肥最高分别降低 14.00%(CT3)和 7.06%(CT3)。综上,生物质炭混合炭基肥比生物质炭包膜复合肥制得的生物质炭基肥在添加量较少(15%左右)的条件下有更好的氮素固持作用,这取决于研制工艺上的区别。包膜造粒过程中,生物质炭仅包裹在肥料外围,一旦包膜层吸水破裂,养分会快速释放,而混合造粒过程中生物质炭、膨润土等与肥料混合更为均匀,生物质炭单位平均面积对氮素的吸附固定作用

也相应增强。因此,炭基肥研制工艺和生物炭占比是确定最优炭基肥的重要因素。

4 结 论

本研究所制备的包膜炭基肥和混合造粒炭基肥均能有效降低氨挥发累积量及损失率,分别以 CT3 和 MT2 处理减排效果最好。生物炭基肥通过对氨氮的吸附显著降低盆面水渗漏水水平均铵氮浓度,有效减缓稻田氮素径流、渗漏风险,其中以 CT4 和 MT2 效果最明显,而对于硝氮浓度,各处理差异不显著。炭肥比越高,生物质炭的特性越突出,越利于降低农业面源污染,但添加量大于一定比例后缓解效果不明显。包膜炭基肥和混合炭基肥添加量分别以 20%~25%和 15%效果最优。

参考文献:

- [1] 张继宁,周胜,陈桂发,等.基于文献统计的农业领域生物炭研究现状[J].环境科学与技术,2015,38(增刊 2):240-245,250.
- [2] 王志鹏,陈蕾.秸秆生物炭的研究进展[J].应用化工,2019,48(2):444-447.
- [3] 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.
- [4] 卢广远,张艳,王祥福,等.炭基肥料种类对土壤物理性质及玉米产量的影响[J].河北农业科学,2011,15(5):50-53.
- [5] 刘善良,常春丽,蒲加军,等.生物炭基肥料在水稻上的应用效果研究[J].现代农业科技,2019(15):5-6.
- [6] 黄劭理,徐茂华.生物炭基有机肥的优势及其在广西烤烟上的应用探析[J].现代农业科技,2020(14):41-42.
- [7] 钱湘群,陈腾蛟,盛奎川,等.玉米/木薯淀粉基竹炭成型燃料的品质特性[J].农业工程学报,2011,27(增刊 1):157-161.
- [8] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] 彭春辉,任奕林,李宝军.生物炭基肥挤压成型工艺参数优化[J].中国农业科技导报,2019,21(5):74-84.
- [10] 吕娟,任永志,王明峰,等.淀粉胶生物质炭基氮肥制备及其缓释特性分析[J].农机化研究,2019,41(6):175-180.
- [11] Qiao D L, Liu H S, Yu L, et al. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 147: 146-154.
- [12] 陈剑秋.几种新型缓控释肥工艺及养分释放特征研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2012.
- [13] 牛智有,刘鸣,牛文娟,等.炭肥比和膨润土粘结剂对炭基肥颗粒理化及缓释特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(2):219-227.

2017(3):157-162.

- [10] 曾婕,海梅荣,王晓会,等.木醋液对植烟土壤微生物多样性的影响[J].土壤通报,2015,46(1):93-98.
- [11] 刘标,陈应泉,何涛,等.农作物秸秆热解多联产技术的应用[J].农业工程学报,2013,29(16):213-219.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [14] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J].Analytical Chemistry,1979,51(7):844-851.
- [15] 李忠徽,王旭东.灌施木醋液对土壤性质和植物生长的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):510-516.
- [16] 常青,王永亮,杨治平,等.木醋液对土壤 pH、EC 与茄子叶片光合特性及根系发育的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(3):322-328.
- [17] 覃青青,王丰,王晓,等.木醋液与其他改良剂配施对土壤养分及烤烟生长的影响[J].中国烟草科学,2020,41(5):15-19.
- [18] Kaur G, Reddy M S. Influence of P-solubilizing bacteria on crop yield and soil fertility at multilocational sites[J].

European Journal of Soil Biology,2014,61:35-40.

- [19] 龚芳芳,樊卫国.外源柠檬酸对石灰性黄壤养分活化及刺梨实生苗养分吸收与生长的影响[J].中国农业科学,2018,51(11):2164-2177.
- [20] 邹小明,刘强,肖春玲,等.竹醋液对土壤微生物及酶活性的影响[J].土壤通报,2010,41(1):64-67.
- [21] 程虎,王紫泉,周琨,等.木醋液对碱性土壤微生物数量及酶活性的影响[J].中国环境科学,2017,37(2):696-701.
- [22] 罗海艳,李丹阳,刘寿涛,等.铁锰改性椰壳炭对土壤镉形态及水稻吸收积累镉的影响[J].环境科学研究,2019,32(5):857-865.
- [23] 黄敬,龙坚,蒋凯,等.外源有机酸对不同土壤中 Cd 解吸行为的影响[J].环境生态学报,2019(4):54-62.
- [24] Passatore L, Rossetti S, Juwarkar A A, et al. Phytoremediation and bioremediation of polychlorinated biphenyls (PCBs): State of knowledge and research perspectives [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 278:189-202.
- [25] 钱翌,刘莹.单一及复合有机酸对土壤中镉形态的影响研究[J].土壤通报,2012,43(1):186-189.

(上接第 326 页)

- [14] 蒋恩臣,张伟,秦丽元.粒状生物质炭基尿素肥料制备及其性能研究[J].东北农业大学学报,2014,45(11):89-94.
- [15] González M, Cea M, Medina J, et al. Evaluation of biodegradable polymers as encapsulating agents for the development of a urea controlled-release fertilizer using biochar as support material [J]. Science of the Total Environment, 2015, 505:446-453.
- [16] Spokas K A, Novak J M, Venterea R T. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: Ammonia capture [J]. Plant and Soil, 2012, 350(1/2):35-42.
- [17] Chen C R, Phillips I R, Condon L M, et al. Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand [J]. Plant and Soil, 2013, 367(1/2):301-312.
- [18] Yadav V, Karak T, Singh S, et al. Benefits of biochar over other organic amendments: Responses for plant productivity (*Pelargonium graveolens* L.) and nitrogen and phosphorus losses [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 131:96-105.
- [19] 王思源,宁建凤,王荣辉,等.黏土矿物混合生物炭包膜尿素的制备及其氮素污染减排潜力[J].水土保持研究,2019,26(5):151-157.
- [20] 周旻旻.水稻秸秆生物质炭基缓释肥的制备与应用研究[D].杭州:浙江大学,2013.

- [21] 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.
- [22] Manolikaki I, Mangolis A, Diamadopoulos E. The impact of biochars prepared from agricultural residues on phosphorus release and availability in two fertile soils [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181:536-543.
- [23] Mandal S, Thangarajan R, Bolan N S, et al. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat [J]. Chemosphere, 2016, 142:120-127.
- [24] Qin J H, Niu A Y, Li Q W et al. Effect of soluble calcium on enhancing nitrate retention by biochar [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 274: e111133.
- [25] Puga A P, Grutzmacher P, Pellegrino Cerri C E, et al. Biochar-based nitrogen fertilizers: Greenhouse gas emissions, use efficiency, and maize yield in tropical soils [J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: e135375.
- [26] 付嘉英,乔志刚,郑金伟,等.不同炭基肥料对小白菜硝酸盐含量、产量及品质的影响[J].中国农学通报,2013,29(34):162-165.
- [27] 张伟.水稻秸秆炭基缓释肥的制备及性能研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.