

生物质炭对伊乐藻堆肥过程氨挥发的作用效应研究

王海候, 沈明星*, 涂荣文, 严慧霞, 陆长婴, 施林林, 周新伟

(江苏太湖地区农业科学研究所, 农业部苏州水稻土生态环境重点野外科学观测试验站, 江苏 苏州 215155)

摘要:针对水生植物堆肥过程中氮素损失严重的现状,探讨以生物质炭为添加剂的堆肥体氨挥发控制技术,以伊乐藻和稻草为供试材料,采用静态高温好氧堆肥的方法,在生物质炭不同添加比例条件下,监测了伊乐藻与稻草混合堆置过程中氨挥发及其影响因素的变化动态。结果表明:整个堆肥过程中,氨累积挥发量与生物质炭添加比例关系密切($P<0.01$),与不添加生物质炭的常规对照处理相比,添加比例为5%、10%的处理增加了氨的累积挥发量,而添加比例为15%、20%的处理降低了氨的累积挥发量;不同堆肥时间段,生物质炭不同添加比例处理0~3 d的氨累积挥发量均大于对照,4~6 d的氨累积挥发量,除添加比例5%处理外,均小于对照;伊乐藻堆肥体的氨挥发速率与堆温、铵态氮含量具有显著的偏相关性,其偏相关性均达到 $P<0.05$ 的显著水平;增加生物质炭添加比例,不仅提高了堆肥温度,对堆肥体的氨挥发损失具有负向的促进作用,同时也降低了堆肥体的铵态氮含量,对堆肥体的氨挥发损失具有正向的抑制作用,生物质炭对伊乐藻堆肥体氮素的氨挥发损失具有促进与抑制双重性的作用效应。

关键词:生物质炭;伊乐藻;堆肥;氨挥发

中图分类号:X71 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)11-2266-07 **doi:**10.11654/jaes.2014.11.028

Effects of Biochar on Ammonia Volatilization During *Elodea Nuttallii* Composting

WANG Hai-hou, SHEN Ming-xing*, TU Rong-wen, YAN Hui-xia, LU Chang-ying, SHI Lin-lin, ZHOU Xin-wei

(Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Key Scientific Observation & Experiment Station Paddy Field Eco-environment, Suzhou, Ministry of Agriculture, Suzhou 215155, China)

Abstract: Aquatic plants used in control of water eutrophication are rich in nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), and micronutrients, and can be used as good organic fertilizer after composting. However, composting process often causes losses of N through ammonia (NH_3) volatilization. Biochar has been shown to act as an absorber of NH_3 and water-soluble NH_4^+ and might therefore reduce losses of N during composting of aquatic plants. Here a composting experiment with aquatic plants and rice straw was carried out under static pile composting with natural ventilation to study the effect of biochar at varying rates on NH_3 volatilization reduction and influencing factors. Biochar addition significantly affected accumulated NH_3 volatilization ($P<0.01$). Compared to the CK (no biochar addition), NH_3 volatilization was increased by biochar at 5% and 10%, but decreased by biochar at 15% and 20%. During the first three days of composting, amount of NH_3 volatilization was higher in biochar addition than in the CK, while during 4~6 days of composting, NH_3 volatilization was lower in biochar than in the CK. A significant partial correlation existed between NH_3 volatilization rates and compost temperature & ammonium nitrogen ($P<0.05$). These results show that biochar has two way effects on NH_3 volatilization during composting aquatic plants by either decreasing NH_3 volatilization through enhancing NH_4^+ adsorption, or increasing NH_3 volatilization via raising the reactor temperature during composting.

Keywords: biochar; *Elodea nuttallii*; compost; ammonia volatilization

集约化水产养殖是长三角河网平原地区高效农业支柱产业之一,为了实现水产养殖业集约与持续协

同、效益与环境协调的目的,对控制养殖塘水体富营养化及其尾水循环利用(或达标排放)的技术需求十分迫切。目前,养殖塘水体原位植物净化及尾水异位生态塘处置技术已广泛应用于治理养殖塘水体富营养化^[1-3],但水体净化过程中会产生大量的水草,若不进行妥善处理,一方面会导致植物群体对水体氮、磷净化能力大幅下降,另一方面水草打捞上岸后随意堆放塘边或漂浮水面会给养殖塘或周边水体造成二次污染。因此,在这一技术体系中,水生植物的后续利用

收稿日期:2014-04-16

基金项目:国家科技部支撑计划专题(2012BAD14B12-03);江苏省科技支撑项目(BE2013334);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(12)3039);苏州市科技支撑项目(SNG201350)

作者简介:王海候(1979—),男,江苏启东人,硕士,助研,主要从事农业资源与环境研究。E-mail:wanghaihou@126.com

* 通信作者:沈明星 E-mail:smxw@163.com

是其最关键的环节,决定着这一技术的应用前景。由于水草等水生植物富含氮磷钾养分,是良好的有机物料,采用高温好氧堆肥方法,可实现水生植物的无害化、减量化、资源化利用。然而,高温好氧堆肥过程中普遍存在氮素损失严重的情况,不仅使肥料的农用价值降低,而且造成养分资源的流失,从而污染环境。氨挥发是高温堆肥过程中氮素损失的主要途径,控制堆肥过程氨挥发一直是国内外学者的研究热点^[4-6]。目前控制方法主要有两种:一是改变工艺条件,如适量的通风、控温、加湿等;二是添加吸附材料或富碳物料、或者添加与氨进行反应的化学试剂、以及添加保氮除臭的微生物菌剂等^[7-10]。

生物质炭属于黑炭的一种类型,是由植物生物质在完全或部分缺氧情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化的难溶性固态物质,具有高度热稳定性和较强吸附特性,对养分具有很强的持留功能,可以降低土壤养分的流失,将其作为土壤改良剂用于农田土壤改良、有毒有害物质吸附领域已有一些研究^[11-13],但有关生物质炭在好氧发酵堆肥过程中的应用,相关的报道较少。Christop 等发现生物质炭作为添加剂,可以减少畜禽粪便堆肥过程的氮素损失^[14];Keiji 等研究表明生物质炭可以增加堆肥体腐殖质含量、降低水溶性有机碳含量^[15];Bruno 等认为生物质炭可以提高畜禽粪便堆肥体的腐殖质碳含量、减少氮素的损失^[16]。然而,上述已开展的生物质炭作为堆肥添加剂研究,主要针对动物源性畜禽粪便堆肥过程,与畜禽粪便一样,水生植物堆肥过程同样存在剧烈的氨挥发,但其物质组成与动物源性有机物料不尽相同,且氮素转化规律及损失特征也可能不同,有关生物质炭在水生植物堆肥过程中的应用及其氨挥发的抑控效果报道尚不多见。本文在生物质炭不同添加比例条件下,监测了伊乐藻与稻草混合堆置过程中氨挥发及其影响因素的变化动态,旨在探讨以生物质炭为添加剂的堆肥体氨挥发控制技术,为生物质炭在水生植物堆肥实践生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2011年9月至10月,在江苏太湖地区农业科学研究所玻璃温房内进行。试验材料:伊乐藻(来源于苏州市相城区阳澄湖水产养殖产业园)含水率88%,干基含C量33.9%、含N量2.6%、C/N 13.04,进行3~5 cm切碎处理后备用;稻草含水率9.2%,干基

含C量39.3%、含N量0.69%、C/N 56.96,用秸秆粉碎机进行3~5 cm切碎处理后备用;生物质炭,购买于商丘三利新能源有限公司,其制备方法为:以花生壳粉为原料,厌氧条件、热裂解炭化温度为500℃,保持10 h,自然冷却,过40目筛备用,生物质炭含C量48.5%、含N量0.92%、C/N 52.83、pH值9.13(采用1:5固水比浸提,Inolab 720 pH计测定),使用时含水率为4.1%。

1.2 试验设计与实施概况

堆肥于反应器中进行,反应器为立方体形,顶部无盖,底部有均匀分布的通气孔(孔径2 cm),孔面积总和约为底部面积的1/3,反应器箱底装有4个活动轮,轮高25 cm;反应器容积为1 m³(长、宽、高均为1 m),其中一侧壁居中垂直方向均匀分布3个测温孔,其对面侧壁开有可嵌入挡板式出料口(40 cm×30 cm),每个反应器可装入堆料200 kg。

以经切碎处理后的伊乐藻、稻草作为堆肥原材料,将伊乐藻与稻草按鲜重比3.8:1均匀混合(堆肥体的C/N为25左右),不添加生物质炭,作为对照;在对照基础上设计生物质炭添加量占堆体干基重的不同质量百分比分别为5%、10%、15%、20%。试验共计5个处理,控制混合堆肥体含水率65%左右,并记录每个反应器中的堆肥混合体的质量。2次重复。

堆肥期间于每天9:00—11:00测定堆体温度,同时测定气温,并按日期记录温度数据。每隔7 d左右翻堆1次,根据堆体实际水分适当添加水,保持堆体含水率65%左右,直至试验结束。

1.3 样品采集与测定

在堆肥开始后的第0、3、7、14、21 d,取混合样品2 kg(堆肥体内30 cm左右深度,多点取样混合),运至实验室,分成2份。一份用于含水率的测定:先将干燥铝盒写好标签、称重并记录原始重,再装入堆肥样品,称重并记录鲜重,置于105℃烘箱中烘6 h以上,称重并记录烘干重。另一份用于新鲜样品的浸提:按堆肥鲜样与去离子水1:10的重量比,取堆肥鲜样40 g置于可密封的塑料瓶中,加去离子水400 mL,盖紧并保证密封,置于振荡器内,以150 r·min⁻¹的速度,浸提30 min后,过滤,滤液用塑料瓶收集,并作好标记,在4℃贮存备用,用于测定水浸提液中的铵态氮(SKALA流动分析仪测定)、pH值(Inolab 720 pH计测定)、EC值(DDS-11A电导率仪测定)等。

氨挥发收集测定装置:将已知截面面积(口径20 cm,高30 cm)且开口向下的圆柱形透明有机玻璃箱

安装于堆体上,箱内放入装有50 mL 2%硼酸吸收液的烧杯,箱顶部有一气压平衡孔,与软管连接并向上延伸至2.5 m高。在堆肥开始后,利用硼酸收集塑料箱覆盖范围内挥发的 NH_3 ,每天观察装置内硼酸的颜色变化,若颜色由红变绿,则需置换硼酸溶液,置换下来的硼酸溶液用保鲜膜盖好,带回实验室并立即用稀硫酸($0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)溶液进行滴定分析,并记录稀硫酸用量,计算堆肥体氨挥发速率($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),直至堆肥结束。2次重复。

1.4 数据处理

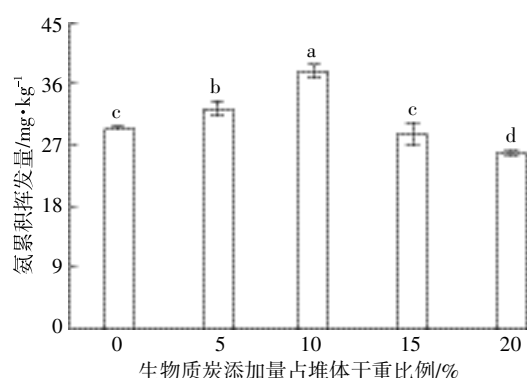
试验数据整理及作图采用 Microsoft Excel 2010 完成;应用 SPSS16.0 进行统计分析,以生物质炭添加比例为因子进行单因素方差分析 [One-way ANOVA, Dunnett's t-test (2-sided)],利用多重比较 (Post-hoc comparison LSD 法) 对处理组间的均值进行差异显著性检验,利用偏相关分析 (Partial Correlations) 研究氨挥发速率与各影响因素的相关性。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对伊乐藻堆肥过程氨挥发的影响

2.1.1 生物质炭对氨累积挥发量的影响

生物质炭不同添加比例处理下,整个堆肥过程(21 d)氨累积挥发量测定结果如图1所示。堆肥体的氨累积挥发量随生物质炭添加比例的增加呈上升趋势,至生物质炭添加比例为10%时,达最大值 $38.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,之后再增加生物质炭添加比例,堆肥体的氨累积挥发量呈下降趋势。堆肥体氨累积挥发量与生物质炭添加比例关系密切 ($P=0.001<0.01$),与对照处理相比(即添加比例为0%处理),生物质炭添加比例为



图中不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$), LSD 法

图1 堆肥过程中不同生物质炭添加比例处理的堆肥体氨累积挥发量

Figure 1 Accumulated ammonia volatilization in different treatments of biochar during aquatic plant composting

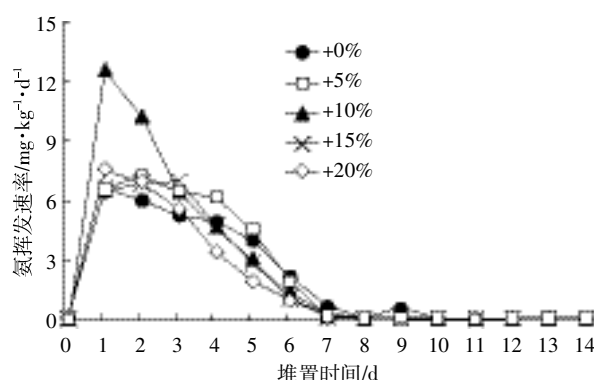
5%、10%的处理增加了堆肥体的氨挥发累积量,其增加幅度分别为11.94%、29.16%,且差异均达显著水平;生物质炭添加比例为15%、20%的处理降低了堆肥体的氨累积挥发量,降低幅度分别为2.43%、11.51%,其中添加比例为15%处理与对照无显著差异,而添加比例为20%处理与对照具有显著差异。

2.1.2 生物质炭对氨挥发速率的影响

图2为生物质炭不同添加比例各处理的堆肥体日均氨挥发速率。由图2可知,各处理堆肥体氨挥发均集中发生于堆肥前7 d内,且各处理日均氨挥发速率呈先上升后下降的相同变化趋势,第7 d后各处理的日均氨挥发速率值极小。在堆肥前期,各处理间氨挥发速率的差异较大,在堆置前3 d,添加生物质炭提高了堆肥体日均氨挥发速率,提高幅度以生物质炭添加比例10%处理为最大,且第1、2 d的氨挥发速率显著大于其他添加比例处理 ($P<0.05$),但第3 d的氨挥发速率与其他处理的差异不显著 ($P>0.05$);在堆置4~6 d时段,生物质炭添加比例10%、15%、20%三个处理的日均氨挥发速率均小于不添加生物质炭处理,以添加比例20%处理为最小,且添加比例20%处理在第4、5 d的氨挥发速率显著小于不添加生物质炭处理 ($P<0.05$)。

2.1.3 生物质炭对不同时段氨挥发量及占比的影响

分析不同生物质炭添加比例对堆肥体各时段氨挥发量的影响(表1)可知:添加生物质炭增加了堆肥体在前3 d时段的氨挥发量,随生物质炭添加比例的增加,氨挥发量呈先上升后下降的趋势,其中添加比例10%处理的氨挥发量显著大于其他处理 ($P<0.05$),其余处理间氨挥发量的差异不显著 ($P>$



图中+0%、+5%、+10%、+15%、+20%分别代表生物质炭添加量占堆体干重比例的0%、5%、10%、15%、20%。下同

图2 不同生物质炭添加比例处理的堆肥体氨挥发速率变化

Figure 2 Changes of NH_3 volatilization emission rates in different treatments of biochar during composting

0.05); 添加生物质炭降低了堆肥体在 4~6 d 时段的氨挥发量,随着生物质炭添加比例增加,氨挥发量呈下降趋势,添加比例 20%处理的氨挥发量显著低于添加比例 0%、5%处理($P<0.05$);堆置 7 d 以后,添加生物质炭处理的氨挥发量均显著小于不添加生物质炭处理($P<0.05$),但添加生物质炭处理间的差异不显著。

进一步分析各处理不同时段氨挥发量占总挥发量的比例,结果表明:各处理 0~3 d 氨挥发量占总挥发量的比例均在 59%以上,4~6 d 氨挥发量占总挥发量比例为 26~38%,堆置 7 d 至结束,添加生物质的各处理氨挥发量占总挥发量的比例均低于 1%,仅不添加生物质炭的对照处理高于 1%。可见,在本试验条件下,减少水生植物堆肥过程氨挥发量的关键时段为堆置 0~6 d。

2.2 生物质炭对伊乐藻堆肥过程氨挥发相关因素的影响

一般认为 NH_3 排放主要取决于两个因素: NH_4^+ 可利用性和在堆肥过程中的挥发条件。堆肥的 pH 值、EC 值、温度、调理剂的吸附性以及微生物种类等,都会影响堆肥过程中氮素的转化和迁移^[17-19]。

2.2.1 堆肥体的 pH 值与 EC 值

已有大量的研究证明,氨挥发主要在 pH 值较高的状态下进行,在一定范围内降低堆肥的 pH 值($\text{pH}\geq 5.5$)是有效减少氨挥发的重要手段^[20-21];图 3 结果表明,试验刚开始时,添加生物质炭提高了堆肥体 pH 值,虽然生物质炭添加比例为 0%处理的 pH 值最小、5%处理其次,但不同添加比例处理之间 pH 值差异不显著($P=0.828>0.05$);在堆肥第 3、7、14 d,不同处理间的 pH 值差异均未达显著水平($P>0.05$);堆肥第 21 d 时,添加比例为 10%、15%的处理 pH 值显著大于添加比例 0%、5%处理;另外,不同添加比例处理之间,堆肥体的 pH 值无明显的变化规律。

EC 值的变化趋势反映了堆体盐分离子的浓度变

化,而其中变化最大的离子就是 NH_4^+ 和 NO_3^- ,即堆肥中 EC 值的变化在一定程度上反映堆肥中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的总量及其相互转化程度,从而与堆肥过程氨挥发强度密切相关。试验数据表明,添加生物质炭提高了堆肥体的 EC 值,且在堆置后 0~7 d,EC 值随着生物质炭添加比例的增加呈上升趋势。统计分析结果表明在堆置第 0、3、7、14 d,添加比例为 15%、20%处理的 EC 值显著大于添加比例 0%、5%、10%处理($P<0.05$),添加比例为 15%、20%处理之间及添加比例为 0%、5%、10%处理之间差异均不显著;在堆肥第

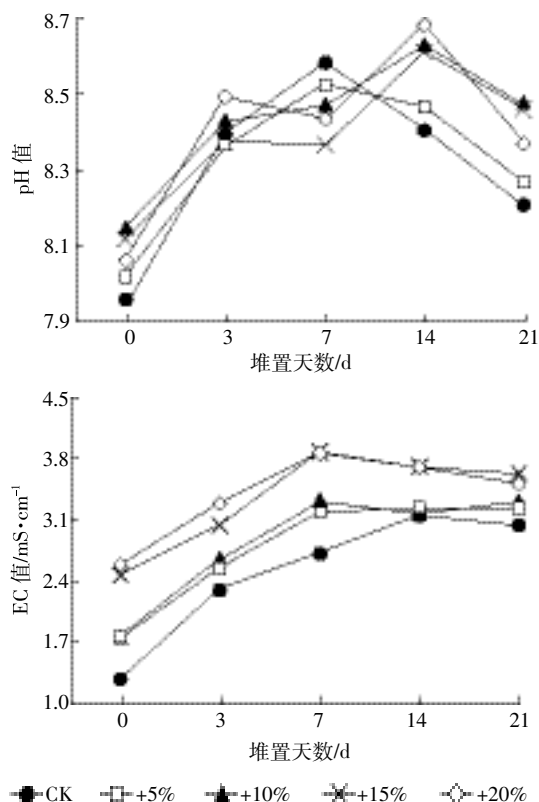


图 3 不同生物质炭添加比例处理的堆肥体 pH 值、EC 值变化
Figure 3 Changes of pH and EC values in different biochar rates during composting

表 1 不同生物质炭添加比例处理对堆肥体各时间段氨挥发的影响

Table 1 Effects of different biochar rates on ammonia volatilization at different stage of composting

生物质炭 添加量占比	0~3 d		4~6 d		>7 d	
	氨挥发量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	占比/%	氨挥发量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	占比/%	氨挥发量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	占比/%
0%	17.53±0.22b	59.42±1.12b	10.91±0.44a	36.96±1.26a	1.07±0.04a	3.62±0.14a
5%	20.10±0.33b	61.39±0.00ab	12.48±0.21a	38.11±0.00a	0.16±0.00b	0.50±0.00b
10%	28.96±0.69a	76.04±2.79a	9.07±1.17ab	23.73±2.77a	0.09±0.01b	0.23±0.02b
15%	20.14±1.90b	69.66±4.49ab	8.42±0.94ab	29.48±4.16a	0.24±0.08b	0.86±0.32b
20%	19.86±1.23b	75.99±4.29a	6.15±1.01b	23.59±3.99a	0.11±0.08b	0.42±0.30b

注:图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$),LSD 法。

21 d, 添加比例为 15%、20% 处理的 EC 值显著大于添加比例 0%, 但与 5%、10% 处理差异不显著。

2.2.2 堆肥体的温度与铵态氮含量

本试验不同生物质炭添加比例处理的堆温测定结果表明(图 4), 与对照处理相比, 添加比例为 20% 处理的堆肥体在堆肥第 2 d, 堆温差异达 15.8 °C, 前 7 d 的平均堆温提高了 7.7 °C, 添加 15% 处理的平均堆温提高了 6.64 °C, 添加 10% 处理的平均堆温提高了 5.04 °C, 添加 5% 处理的平均堆温提高了 2.03 °C, 显然增加生物质炭的添加比例, 提高了堆肥体的增温幅度。这可能是添加生物质炭对堆肥体 0~3 d 氨挥发具有促进作用的重要原因, 但整个堆肥过程的氨累积挥发量并没有随着生物质炭添加比例的增加而提高。

堆肥中的铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)是氨挥发的直接来源, 并且在氨挥发强度较大时期, 铵态氮是堆肥中无机氮的主要存在形式, 在堆肥初期, 物料中大量易分解有机物可为微生物的生长、繁殖提供充足的营养, 有机氮快速分解而产生大量的铵态氮, 而此时硝化细菌活动程度相对较弱, 无法及时将铵态氮转化为硝态氮, 从而加剧了铵态氮的累积^[22-23]。图 4 结果表明, 堆肥体铵态氮含量(水浸提, 固水比为 1:10)呈下降的变化趋势, 添加比例为 15%、20% 处理的铵态氮含量下降幅度大于 5%、10% 处理。在堆肥后 0~7 d, 不添加生物质炭处理的铵态氮含量均大于添加生物质炭处理的铵态氮含量, 统计分析结果表明, 在堆肥第 3 d, 添加比例为 0%、5% 处理的铵态氮含量与其他添加比例处理间均存在显著性差异($P < 0.05$), 10%、15%、20% 处理之间无显著差异性($P > 0.05$); 在堆肥第 7 d, 添加比例为 0% 与 5% 处理的铵态氮含量差异不显著, 但均显著大于其他添加比例处理, 10% 与 20% 添加比例处理间无显著差异性, 但均显著大于 15% 处理。

3 讨论

3.1 添加生物质炭对伊乐藻堆肥体氨挥发的影响

Christop 等研究表明, 生物质炭添加量占畜禽粪便堆体总重比例(干重占比)分别为 0%、5%、20% 处理下, 生物质炭可以降低堆肥体的氨挥发量、提高堆温, 其中添加量为 20% 的处理显著降低了堆肥体的 NH_3 挥发量与氮素损失, 并且堆温显著高于对照^[14]; Bruno 等将畜禽粪便与生物质炭按 1:1 的鲜重比例混匀后进行堆肥, 认为生物质炭可以降低畜禽粪便堆肥体的氮素损失^[16]。本试验以伊乐藻、稻草为堆肥材料, 设计了生物质炭添加量占堆肥体干重比例分别为 5%、

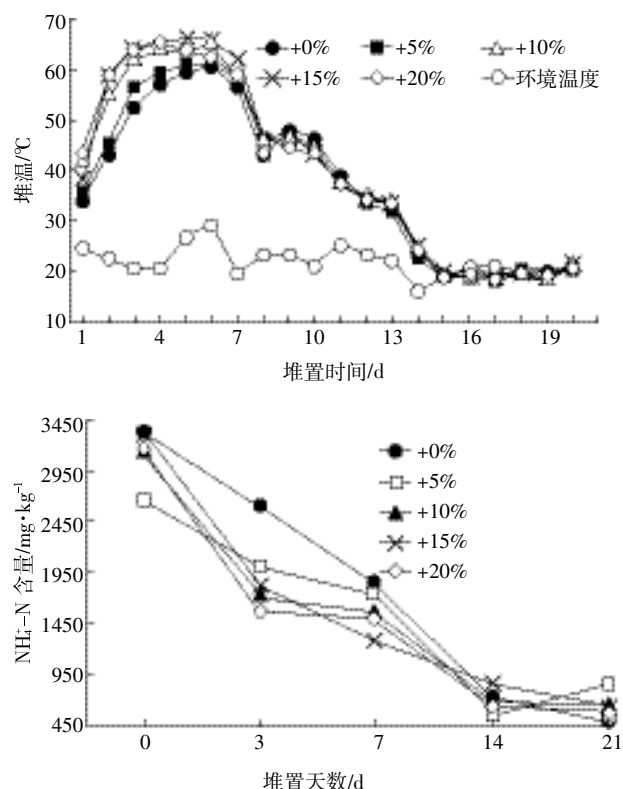


图4 不同生物质炭添加比例处理的堆肥温度与铵态氮含量变化
Figure 4 Changes of temperature and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ amount in different biochar rates during composting

10%、15%、20% 处理, 结果表明: 与对照处理相比, 生物质炭添加比例为 15%、20% 的处理降低了堆肥体的氨累积挥发量, 其中添加比例为 20% 处理显著降低了氨累积挥发量, 与 Christop、Bruno 等研究结论一致^[14,16]。其原因主要与生物质炭的吸附能力较强有关, 另外生物质炭能够提高微生物的活性、繁殖率以及种群数量, 在堆肥过程中通过生物氧化作用显著提高了表面酸性基团, 特别是羧基团, 与铵态氮结合而避免通过氨挥发的形式挥发^[16]。然而, 与对照处理相比, 生物质炭添加比例为 5%、10% 的处理增加了堆肥体的氨累积挥发量, 则与 Christop 等研究结论刚好相反^[14]。一般认为生物质炭是一种由于含有碱性盐而呈现碱性的材料, 添加到堆肥材料中, 增加了堆肥体的碱性离子浓度, 提高了堆肥起始阶段的 pH 值, 理论上会促进堆肥体的氨挥发。本试验通过测定不同时间段氨累积挥发量的数据结果表明, 添加生物质炭对水生植物堆肥体 0~3 d 氨挥发确实具有促进作用, 其中添加比例 10% 处理的促进作用较明显。这可能是堆置后 0~3 d 时间段, 添加生物质炭处理的氨累积挥发量均大于对照处理的原因之一, 但在添加比例为 10%

的基础上,增加生物质炭的比例并没有提高堆肥体的氨累积挥发量。另外,在堆肥 4~6 d,与对照处理相比,生物质炭处理对堆肥体的氨挥发表现为控制作用,且随着添加比例的增加,控制作用效果越好,而 5%处理仍然表现为促进作用。这说明,整个堆肥过程中氨挥发的负向促进与正向控制作用并存,氨累积挥发量是添加生物质炭条件下不同影响因子对不同时间段堆肥体氨挥发双向作用的综合效果。

3.2 生物质炭对伊乐藻堆肥过程氨挥发不同作用效应的原因分析

氨挥发受堆温、铵态氮浓度、pH 值等多因素影响,不同影响因子综合作用决定其最后的排放强度^[8]。本试验结果表明,与对照处理相比,在堆肥初期添加生物质炭可以提高堆温、降低铵态氮含量,与Christop 等研究结论一致^[14],还可以提高堆体的 EC 值。为进一步研究堆肥体氨挥发与不同影响因素的密切程度,对氨挥发速率与各影响因素的相关性进行偏相关分析(表 2),结果表明,伊乐藻与稻草混合堆肥体氨挥发速率与堆温、铵态氮含量的偏相关性均达到 $P<0.05$ 的显著水平,氨挥发速率与堆温、铵态氮含量关系比较密切,且与堆温相关性更显著,不相关的概率为 0.2%,与铵态氮含量不相关的概率为 2.7%。可见,堆温与铵态氮含量是影响水生植物堆肥体氨挥发强度的两个重要影响因子,添加生物质炭提高了堆肥温度,对堆肥体的氨挥发损失具有负向的促进作用,而添加生物质炭同时也降低了堆肥体的铵态氮含量,对堆肥体的氨挥发损失具有正向的控制作用,生物质炭对水生植物堆肥过程氨挥发损失的影响作用是两个因子(提高堆温与降低铵态氮含量)正负双向平衡的过程。

4 结论

(1)整个堆肥过程中,氨累积挥发量与生物质炭添加比例关系密切,与对照处理相比,添加比例为 5%、10%的处理显著增加了氨的累积挥发量,而添加比例为 15%、20%的处理降低了氨的累积挥发量,其

中添加比例为 15%处理与对照无显著差异性。

(2)不同堆肥时间段,生物质炭不同添加比例处理 0~3 d 的氨累积挥发量均大于对照,其中添加比例为 10%处理达显著水平;4~6 d 的氨累积挥发量,除添加比例 5%处理外,均小于对照,其中添加比例为 20%处理达显著水平。

(3)整个堆肥过程中氨排放强度决定于不同影响因子的综合作用。氨挥发速率与 pH 值、EC 值偏相关性不显著($P>0.05$),与堆温、铵态氮含量具有显著的偏相关性($P<0.05$)。堆温、铵态氮含量与氨挥发速率关系比较密切,是影响水生植物堆肥体氨挥发强度的两个重要因子;生物质炭对伊乐藻堆肥体氮素的氨挥发损失具有促进(提高堆温)与抑制(降低铵态氮含量)双重作用效应。

(4)生物质炭对堆肥过程中氨挥发损失作用效应的正向或负向的主导性,决定于生物质炭的添加量,但综合堆肥的质量、成本与效益,堆肥体氨挥发控制技术中的生物质炭适宜的添加比例,还需通过进一步研究确定。

参考文献:

- [1] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1447-1450.
TONG Chang-hua, YANG Xiao-e, PU Pei-min. Purification of eutrophicated water by aquatic plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1447-1450.
- [2] Nahlik A M, Mitsch W J. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica [J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28: 246-257.
- [3] 郑建初, 常志州, 陈留根, 等. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008, 3: 247-250.
ZHENG Jian-chu, CHANG Zhi-zhou, CHEN Liu-gen, et al. Study on feasibility of hyacinth treating water N and P pollution in the Taihu Lake area[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008, 3: 247-250.
- [4] Raviv M, Medina S, Karasnovsky A, et al. Conserving nitrogen during composting[J]. *Bio Cycle*, 2002, 43(9): 48.
- [5] Beck-JFriis B, Smars S, Jonsson H, et al. Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a composting reactor under different temperature regimes[J]. *Agric Eng Res*, 2001, 78(4): 423-430.
- [6] 李国学, 李玉春, 李彦富. 固体废弃物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 252-256.
LI Guo-xue, LI Yu-chun, LI Yan-fu. Advance on composting of solid waste and utilization of additives[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2): 252-256.
- [7] Eklind Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments: II nitrogen turnover and losses[J].

表 2 堆肥氨挥发速率与 4 个影响因子的偏相关系数

Table 2 Partial correlation analysis of 4 factors on ammonia volatilization rates

影响因子	偏相关系数	P 值
堆温	0.931	0.002
pH 值	-0.734	0.061
EC 值	-0.529	0.222
铵态氮含量	0.810	0.027

- Bioresource and Technology*, 2000, 74(2):125-133.
- [8] 罗一鸣, 魏宗强, 孙钦平, 等. 沸石作为添加剂对鸡粪高温堆肥氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):243-247.
LUO Yi-ming, WEI Zong-qiang, SUN Qin-ping, et al. Effects of zeolite addition on ammonia volatilization in chicken manure composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2):243-247.
- [9] 李冰, 王昌全, 江连强, 等. 化学改良剂对稻草猪粪堆肥氨气释放规律及腐熟进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1653-1661.
LI Bing, WANG Chang-quan, JIANG Lian-qiang, et al. Effect of chemical amendments on NH_3 emissions and compost maturity during co-composting of pig manure straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1653-1661.
- [10] 任丽梅, 贺琪, 李国学, 等. 氢氧化镁和磷酸固定剂控制堆肥氮素损失的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):814-819.
REN Li-mei, HE Qi, LI Guo-xue, et al. Effect of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and H_3PO_4 amendments on nitrogen conservation during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):814-819.
- [11] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2459-2463.
ZHANG A-feng, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. Biochar and the effect on C stock enhancement, mission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):2459-2463.
- [12] 秦海芝, 刘莹莹, 李恋卿, 等. 人居生活废弃物生物黑炭对水溶液中 Cd^{2+} 的吸附研究[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2):181-186.
QIN Hai-zhi, LIU Ying-ying, LI Lian-qing, et al. Adsorption of cadmium in solution by biochar from household biowaste[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(2):181-186.
- [13] 宋洋, 王芳, 杨兴伦, 等. 生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法[J]. 环境科学, 2012, 33(1):169-175.
SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, et al. Influence and assessment of biochar on the bioavailability of Chlorobenzenes in soil[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1):169-175.
- [14] Steiner C, Das K C, Melear N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. *Journal of Environment Quality*, 2010, 30(7):1236-1242.
- [15] Keiji J, Koki S, Kazuhiro M, et al. Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110:396-404.
- [16] Bruno O, Carlos A, Fábio S, et al. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(4):1239-1246.
- [17] Sasaki H, Maruyama G, Suzuki H, et al. Distribution of ammonia assimilating bacteria in the composting process[J]. *Compost Science and Utilization*, 2004, 12(2):106-110.
- [18] 曹喜涛, 黄为一, 常志洲, 等. 鸡粪堆制过程中氮素损失及减少氮素损失的机理[J]. 江苏农业学报, 2004, 20(2):106-110.
CAO Xi-tao, HUANG Wei-yi, CHANG Zhi-zhou, et al. Mechanism of nitrogen loss and reduction in nitrogen loss during the compost of chicken manure[J]. *Jiangsu Journal of Agri-Sci*, 2004, 20(2):106-110.
- [19] Mahimairaja S, Bolan N S, Hedley M J, et al. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: An incubation experiment[J]. *Bioresource Technology*, 1994, 47(3):265-273.
- [20] Sanchez-Monedero M A, Roig A, Paredes C, et al. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 78(3):301-308.
- [21] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 不同畜禽粪便堆肥过程中有机氮形态的动态变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5):930-936.
BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, YAN Li, et al. Dynamic changes of organic nitrogen forms during the composting of different manures[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5):930-936.
- [22] 李冰, 王昌全, 江连强, 等. 有机辅料对猪粪堆肥中氨气挥发的抑制效应及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5):987-993.
LI Bing, WANG Chang-quan, JIANG Lian-qiang, et al. Inhibitory effect of auxiliary organic materials on ammonia volatilization in composting and the influencing factors[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5):987-993.
- [23] 贺琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):169-173.
HE Qi, LI Guo-xue, ZHANG Ya-ning, et al. N loss and its characteristics during high temperature composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):169-173.