

C/N 对蓝藻好氧堆肥腐熟及无害化进程的影响

江 君^{1,2}, 靳红梅¹, 常志州¹, 杜 静¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所 江苏省农业废弃物资源化工程技术中心, 南京 210014; 2. 扬州大学农学院, 江苏扬州 225009)

摘 要:为探索和优化脱水蓝藻藻泥好氧堆肥无害化处理工艺参数,利用堆肥反应器,研究了 C/N 分别为 5(T₁)、15(T₂)和 25(T₃)的处理对蓝藻藻泥腐熟进程及微囊藻毒素(MC)降解速率的影响。结果表明,堆肥过程中各处理间的 pH、总碳量及其形态、总氮量及其形态、总磷含量、总钾含量、种子发芽指数差异显著。与蓝藻自然堆置相比,添加辅料增加堆体 C/N 可提高蓝藻的腐熟速度。堆肥 35 d 后,T₂ 和 T₃ 处理的堆肥成品均已满足有机肥行业标准,种子发芽指数均高于 80%;但 MC-LR 和 MC-RR 仍有较大的降解潜力,从无害化的角度考虑,蓝藻高温堆肥时间不应少于 50 d。C/N 过高增加了氮素的损失,如何进一步降低氮素的损失,提高堆肥过程中 MC 的降解将是今后蓝藻堆肥研究的重点。

关键词:蓝藻;好氧堆肥;C/N;腐熟;微囊藻毒素降解

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)10-2031-08

Influence of C/N Ratio on the Composting Effect and Secure Utilization of Cyanobacteria

JIANG Jun^{1,2}, JIN Hong-mei¹, CHANG Zhi-zhou¹, DU Jing¹

(1.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China; 2.Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The efficient collection of cyanobacteria is an effective way to reduce the amount of cyanobacteria and its risk of bloom again. Aerobic composting of dewatering cyanobacteria by collection could change waste into resource. However, the residue of microcystins (MC) after aerobic composting should be considered in view of its application safety. To explore and optimize the aerobic composting technology of dewatering cyanobacteria, an composting using aerobic composting reactors was conducted, in which 5(T₁), 15(T₂) and 25(T₃) C/N ratio were installed during the composting. The objective of this study was to analyze the composting speed and the degradation of MC in dewatering cyanobacteria. Results showed that pH, contents of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium, germination index were significantly ($P < 0.05$ or 0.001) different between the three treatments. The composting speed significantly enhanced in treatments of T₂ and T₃ compared with treatment of T₁. After 35-d composting of cyanobacteria, the total nutrient content in T₂ and T₃ treatments met the requirement of the national industry standard of organic fertilizer. Meanwhile, the germination index in those treatments were more than 80%. However, the degradation potentials of MC-LR and MC-RR were still high after 35-d composting. For the secure utilization purpose, the high temperature composting time of cyanobacteria should be more than 50 days. Nitrogen loss would be larger with C/N ratio of the materials of composting. The research hotspots were to reduce nitrogen loss and to enhance the degradation of MC during the aerobic composting of dewatering cyanobacteria.

Keywords: cyanobacteria; aerobic composting; C/N; composting speed; degradation of microcystins

随着淡水湖泊水体富营养化的日益严重,蓝藻(Cyanobacteria)水华暴发的频次以及湖泊数越来越

多^[1]。蓝藻水华及时打捞对减少因暴发蓝藻而造成的生态灾害极为重要,实践证明机械打捞是目前最直接、最有效的措施之一^[2]。打捞上岸后的蓝藻藻泥如未能妥善处理势必会造成二次污染,因此对其进行有效和及时的处置,是实现蓝藻打捞治理水体的重要保证。

蓝藻中含有大量的氮素,堆肥腐熟后还田可有效实现其资源化利用。好氧堆肥技术已在城市污泥、

收稿日期:2012-03-13

基金项目:国家支撑计划项目(2009BAC63B02)

作者简介:江 君(1987—),男,江苏江阴人,硕士研究生,主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail:jjd1246@163.com

* 通信作者:常志州 E-mail:czhizhou@hotmail.com

禽畜粪便处理等方面得到广泛应用^[3],在蓝藻处理方面的工艺尚不成熟。在影响堆肥过程的诸多因素中,C/N 是对微生物的生长代谢起着重要作用的因素之一,也是反映堆肥进程的重要指标^[4]。目前大多数研究针对猪粪、牛粪和鸡粪等禽畜粪便好氧堆肥得出,适宜的起始 C/N 为 15~35^[5-6]。但蓝藻初始 C/N 较低(约为 4~6),含水量较高(约为 90%),不宜直接进行好氧堆肥。如果按常规堆肥所需的 C/N 计算,则需要添加大量的秸秆等物料进行混合堆置。

除含有大量的营养元素外,蓝藻体内含有大量对生物有害的微囊藻毒素(Microcystin,MC)。本研究室前期的调查发现,我国淡水水体中普遍存在且危害较大的 MC-LR(L 为亮氨酸)和 MC-RR(R 为精氨酸)^[7],在太湖蓝藻中的含量分别高达 300~5000 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (鲜重)和 200~2000 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (鲜重)。虽然好氧堆肥对蓝藻中 MC 的生物降解十分有效^[8],但不恰当的堆肥操作仍会导致成品中残留较多的 MC,还田后会对作物生长和人类健康产生安全风险^[9]。在蓝藻好氧堆肥的实际生产过程中,需要调节多大的 C/N 才能快速达到腐熟,且能最大限度地降解物料中的 MC 尚不明确。

本研究以打捞自太湖的蓝藻藻泥为堆肥原料,通过堆肥反应器的中试试验,添加水稻秸秆调节堆体物料的初始 C/N,研究不同 C/N 条件下蓝藻堆肥的腐熟效果及其无害化进程,探索适宜实际生产的蓝藻堆肥技术参数。

1 材料与方法

1.1 供试材料

堆肥试验所用蓝藻藻泥取自江苏省常州市武进区的藻水分离站,为 8 月初用移动式蓝藻打捞船在太湖中打捞浓缩后的藻泥。试验辅料为水稻秸秆(调节堆体 C/N)和蛭石(调节堆体含水率)。水稻秸秆取自江苏省农业科学院试验田,用粉碎机粉碎后备用,

蛭石购于南京市苗木市场。各物料的基本理化性质见表 1。

发芽试验所用的青菜品种为苏州青(*Brassica chinensis* L. var. *chinensis*),种子购于江苏明天种业科技有限公司。

1.2 试验设计

试验共分为 3 个 C/N 处理,即 C/N 为 5(T_1)、15(T_2)和 25(T_3)。各处理藻泥用量均为 200 kg,分别添加稻秸 0、35、85 kg,添加蛭石 80、45、5 kg,调节堆体含水率为 65%左右。物料用机械搅拌机混合均匀后,放置于长×宽×高为 1.0 m×1.0 m×1.0 m 的好氧堆肥反应器中进行堆置,自然通风供氧。堆置时间为 2011 年 8 月 15 日至 10 月 4 日,共 50 d。翻堆时间为堆肥后第 4、7、12、17、22、29、35、50 d,翻堆时将堆肥物料从反应器中移出,人工翻堆约 30 min。整个试验在江苏省农业科学院内的中试基地进行。

1.3 样品采集及测定

1.3.1 取样时间及方法

取样时间分别为堆肥当天,以及堆肥后第 4、7、12、17、22、29、35、50 d。取样在翻堆后进行,在堆体的 5 个不同部位各取样 200 g,混合均匀后作为一个样品。每个样品分为两份:一份存放在(4 ± 0.5)℃的冰箱中,尽快测定 pH、铵态氮(Ammonium nitrogen, NH_4^+-N)和硝态氮(Nitrate nitrogen, NO_3^--N)含量、可溶性有机碳(Dissolved organic carbon,DOC)、种子发芽指数(Germination Index,GI)和微囊藻毒素含量;另一份放置于阴凉处晾干,磨碎后过 60 目筛,粉末干燥贮存,用于测定总有机碳(Total organic carbon,TOC)、总氮(Total nitrogen,TN)、总磷(Total phosphorus,TP)和总钾(Total potassium,TK)等指标。

1.3.2 测定指标及方法

堆体及环境温度:每日定时(上午 9:00,下午 17:00)用温度计测定堆体温度,同时记录环境温度。

常规指标的测定:pH 采用精密 pH 计(PHS-2F,

表 1 堆肥原料和辅料的基本理化性质

Table 1 Basal characteristics of the composting materials in study

物料	水分/%	pH	有机碳	全氮	全磷	全钾	灰分	$\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$	C/N	MC-LR	MC-RR
			$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW					%		$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW	
蓝藻藻泥	89.8	8.59	289.4	58.2	6.04	8.0	36.1	8.2	5.0	10.2	4.5
稻秸	7.0	6.14	512.8	8.7	7.05	12.6	12.8	4.0	59.1	—	—
蛭石	3.7	7.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注:DW 表示干重。 Note:DW indicated dry weight.

上海精科-上海雷磁)测定,固液比(w/v)为1:2.5,在 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下振荡15 min,静置30 min后测定上层清液的pH;DOC采用TOC/TN仪测定(MultiN/C 3100, Jena, Germany);TN、TP和TK按有机肥料行业标准(NY 525—2011)^[10]测定;TOC采用重铬酸钾容量法-外加热法^[11];总灰分采用干法灰化。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的测定:样品用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钾溶液浸提,固液比(w/v)为1:10,振荡30 min后过滤,滤液稀释100倍,用流动分析仪(FIAstar™ 5000 Systems, FOSS, USA)测定含量。

GI的测定:取新鲜堆肥样品10 g于250 mL三角瓶中,加入蒸馏水100 mL混匀后,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中浸提3 h,用纱布过滤,滤液即为堆肥样品提取液;取10 mL提取液,注入铺有两层滤纸的无菌培养皿中(直径9 cm),点播20粒饱满的青菜种子,同时用蒸馏水作为对照。每个处理3个重复。将培养皿置于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中,60 h后测定种子发芽率和根长,然后计算发芽指数^[12]。

$\text{GI}(\%) = (\text{堆肥处理的种子发芽率} \times \text{种子根长}) / (\text{对照处理的种子发芽率} \times \text{种子根长}) \times 100\%$

微囊藻毒素含量的测定:称取1 g新鲜样品,用10 mL 80%甲醇研磨后超声破碎1 h, $12\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下离心12 min,取上清液;将上清液放于旋转蒸发器中蒸干去甲醇,调节pH 2~4并离心去除杂质蛋白,过 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,调节pH至7.0; $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灭菌15 min,用蒸馏水定容至5 mL。将微囊藻毒素粗提液过Sep-Pak C18柱,用LC/MS法测定MC-LR和MC-RR的含量。液质联用仪为液相HP1200,质谱6410, Triple Quad。LC/MS液质条件参考 Cong 等的方法^[13]。

1.4 数据分析

氮素损失率的计算公式:

$$N_{\text{loss}} = \frac{(N_0 - \frac{H_0}{H_n} \times N_n)}{N_0} \times 100\%$$

式中: N_{loss} 为氮素损失率,%; N_0 为堆肥当天TN质量分数(以干基计),%; H_0 为堆肥当天灰分质量分数,%; N_n 为堆肥第 n 天时TN质量分数,%; H_n 为堆肥第 n 天时灰分质量分数,%。

堆肥后总养分含量:

$$\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} = \text{TN} + \text{TP} \times \frac{142}{62} + \text{TK} \times \frac{94}{78}$$

由于样品在不同的时期取样测定,采用重复测量设计的方差分析对各指标在3种堆肥处理间的差异进行Duncan多重比较。数据分析软件为SPSS 13.0,作图软件为OriginPro 8.5。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中的温度变化

从图1看出,蓝藻堆置3 d后3个处理堆体温度均上升至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,其中 T_1 处理的高温期($>50\text{ }^{\circ}\text{C}$)仅维持了6 d,经过第一次翻堆就迅速下降,随后温度一直在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,主要原因是堆体初始C/N较低,导致碳源相对不足,使得微生物生长活动受到抑制。 T_2 和 T_3 处理的高温期均持续了18 d,随后温度逐渐下降。 T_3 处理的最高温度和高温的持续时间均大于另外两个处理,主要的原因有两个:一是碳源相对较充足;二是添加较多的秸秆增加了堆体的孔隙率,有利于氧气的供给,微生物的生长活动旺盛,导致高温持续时间较长。

2.2 堆肥过程中pH的变化

堆肥过程中,堆体pH总体变化趋势为先升高后降低(图2)。堆肥前12 d各处理pH值均呈上升的趋势,主要原因是微生物作用下蛋白类物质水解氨化作

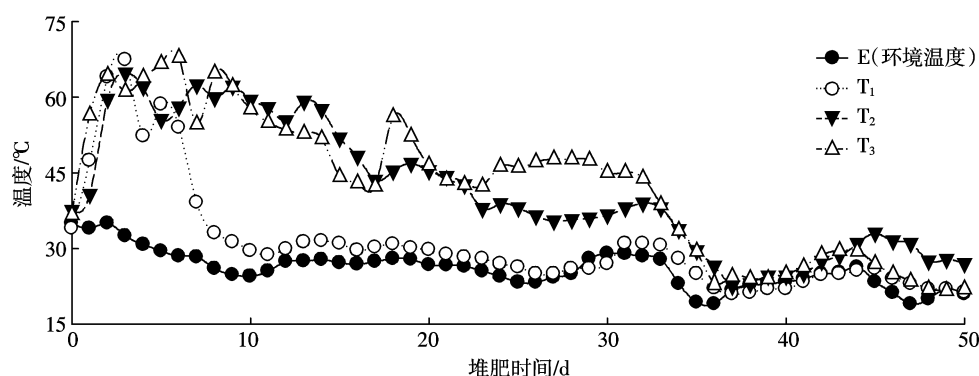


图1 堆肥过程中温度变化

Figure 1 Changes of temperature during the composting of cyanobacteria

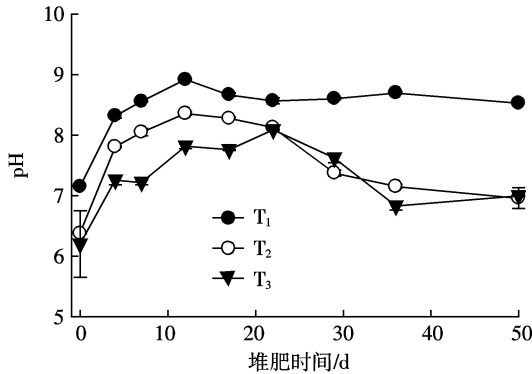


图 2 堆肥过程中 pH 值的变化

Figure 2 Changes of pH during the composting of cyanobacteria

用,产生了大量 NH_4OH ,使得堆体 pH 升高。后期随着蛋白类化合物含量降低,硝化作用增强,有机物逐渐分解产生有机酸,从而导致 pH 降低。整个堆肥过程中,3 个处理间 pH 差异达极显著水平 ($P<0.001$,表 2),即 $T_1>T_2>T_3$ 。 T_1 处理的 pH 高于其他两个处理的主要原因有两个:一是添加的秸秆量不同,初始 pH 值不同;二是 T_1 处理 C/N 较低,碳源在高温阶段大量消耗,碳源不足导致微生物活动受到抑制,整个堆体反应进程缓慢,硝化作用较弱,有机酸产生量少,因此后期 pH 值明显高于 T_2 和 T_3 处理。

2.3 堆肥过程中 TOC 和 DOC 含量的变化

随着堆肥的进行,TOC 呈逐渐降低的趋势(图 3a)。堆肥结束后 T_1 、 T_2 和 T_3 处理中 TOC 含量分别为 41.1、174.2、362.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW,损失率分别为 50.6%、31.2%和 23%。处理间差异达极显著水平($P<0.001$,表2),初始稻秸添加量的不同是造成这种结果的主要原因。

堆肥过程中 DOC 含量总体呈先升高后降低的趋势(图 3b)。堆肥前期(4 d 之内)堆体内微生物活动剧烈,有机物被大量分解导致 DOC 含量迅速上升,3 个处理 DOC 的最高浓度分别达到 1.69、3.46、4.21 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

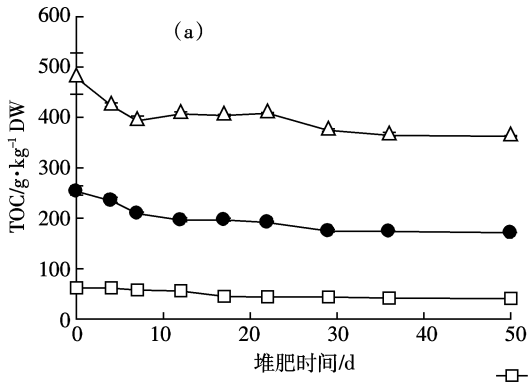


表 2 各指标在不同堆肥处理间的重复测量方差分析

Table 2 *F*-and *P*-values of repeated measures analysis of variances for different C/N ratio treatments during the composting of cyanobacteria

指标	<i>F</i>	<i>P</i>
pH	291.126	<0.001
TOC	69 370.0	<0.001
DOC	71.382	<0.001
TN	66 910.0	<0.001
N 素损失率	95.582	0.002
$\text{NH}_4\text{-N}$	20.037	0.018
$\text{NO}_3\text{-N}$	120.398	0.001
C/N	32 950.0	<0.001
TP	523.11	<0.001
TK	301.31	<0.001
GI	115.769	0.001
$\text{N+P}_2\text{O}_5\text{+K}_2\text{O}$	1 783.00	<0.001

DW,即 $T_3>T_2>T_1$ ($P<0.001$,表 2)。随着 DOC 逐渐被微生物生长利用,堆体 DOC 含量逐渐降低,其中 T_1 处理在堆肥 10 d 后 DOC 含量逐渐趋于稳定, T_2 和 T_3 处理在堆肥 35 d 后也逐渐趋于稳定。

2.4 堆肥过程中氮素总量及形态变化

堆肥过程中,堆体 TN 含量呈先降低后上升的趋势(图 4a)。堆肥结束后 T_1 、 T_2 和 T_3 处理的 N 素损失率分别为 12.1%、21.2%、23.9%(图 4b),各处理间差异达极显著水平($P<0.001$,表 2)。相对于 T_2 和 T_3 处理, T_1 处理的碳源相对不足,直接影响了微生物对氮素的转化和利用;而 T_3 碳含量相对较高,合适的 C/N 有利于微生物的分解和转化活动,因此氮素损失最大。

T_1 和 T_2 处理的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 质量浓度先小幅上升,然后降低,而 T_3 处理其质量浓度逐渐降低(图 4c)。主要的原因是, T_1 和 T_2 处理中碳素相对不足,前期堆体温度较高时,含 N 有机物会分解产生大量的铵态氮,导

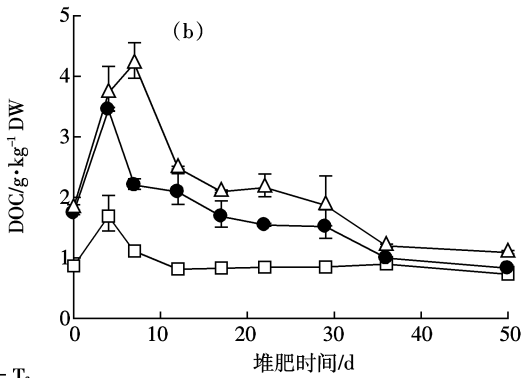


图 3 堆肥过程中 TOC 和 DOC 含量变化

Figure 3 Changes of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC) during the composting of cyanobacteria

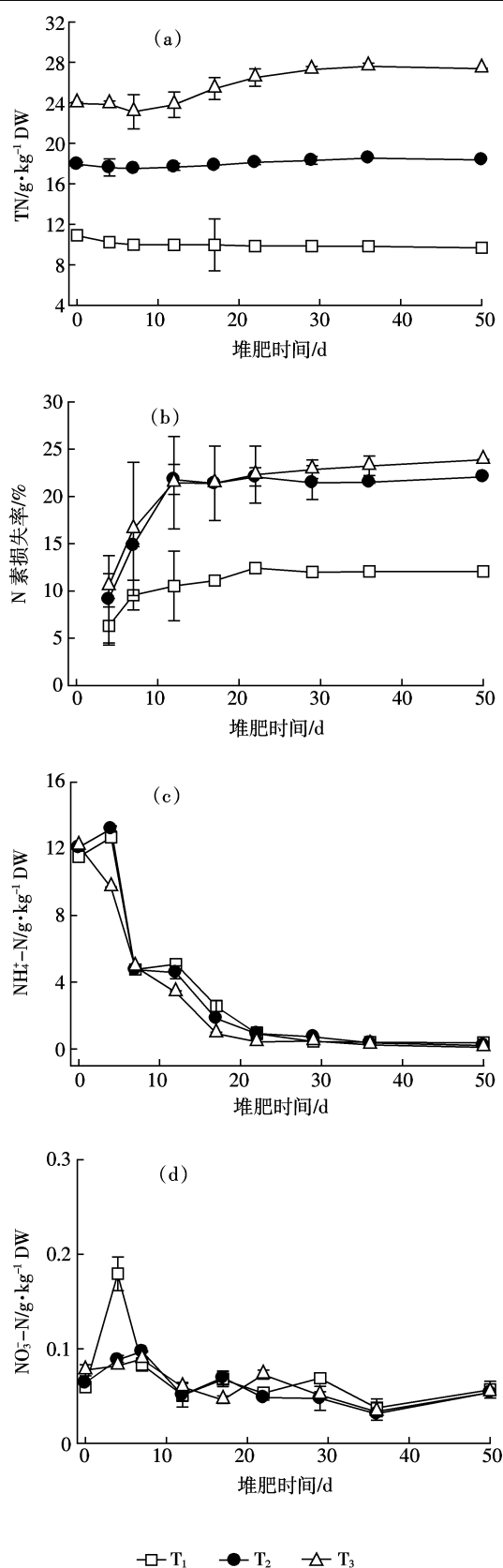


图4 堆肥过程中氮素总量、损失率及形态的变化

Figure 4 Changes of content, loss rate and chemical forms of nitrogen during the composting of cyanobacteria

致 NH_4^+-N 质量浓度出现小幅增加;随后这部分 N 素一部分通过氨气的形式挥发到大气中,另一部分被微生物同化或被硝化转化为 NO_3^--N ,使得 NH_4^+-N 质量浓度降低。T₃ 处理 NH_4^+-N 含量显著低于其他两个处理 ($P<0.05$, 表 2),可能是由于该处理添加的秸秆量较多,堆体的孔隙度大、通气性好,导致 NH_4^+-N 在高温条件下以氨气的形式快速释放到大气中,并未在堆体中大量积累。 NO_3^--N 质量浓度在整个堆肥过程中较低(图 4d), $T_1>T_2>T_3$ ($P<0.001$, 表 2)。

2.5 堆肥过程中总养分的变化

堆肥过程中,TP(图 5a)、TK(图 5b)和总养分(图

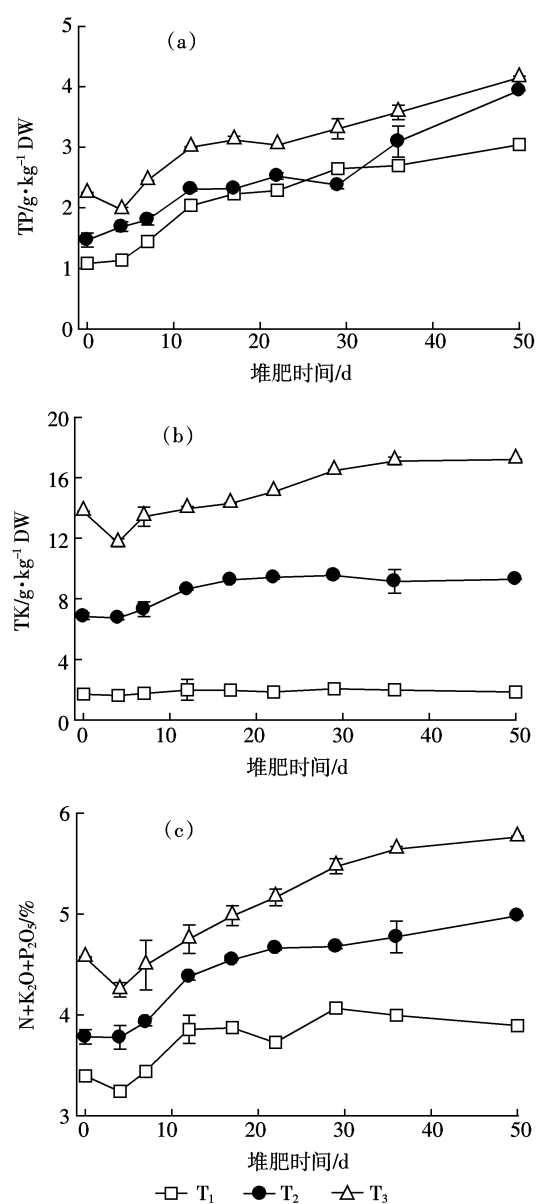


图5 堆肥过程中总磷、总钾和总养分含量的变化

Figure 5 Changes of total phosphorus, potassium and nutrient during the composting of cyanobacteria

5c) 含量均随堆肥时间而逐渐增加, $T_3 > T_2 > T_1$ ($P < 0.001$, 表 2)。堆肥结束时 T_1 、 T_2 和 T_3 处理的养分含量分别为 3.9%、5.0% 和 5.8%, 除 T_1 处理与新有机肥标准(NY 525—2011)^[10]中总养分的要求相差较大外, 其他两个处理均达到标准要求。

2.6 堆肥过程中 C/N 的变化

C/N 是堆肥过程的一个重要参数, 较适宜的范围是 15~35 之间^[4-6], 堆肥过程中, C/N 的变化取决于 C 和 N 含量的变化。堆肥结束时 T_3 处理的 C/N 变化最大(图 6), 极显著高于其他两个处理($P < 0.001$, 表 2)。造成这种现象的主要原因是, T_3 处理中初始 C/N 较为适宜, 微生物活性高, 对基质中 C 和 N 的分解能力较强, 且对 C 的分解速率高于 N, 导致最终堆体 C/N 降低最多。

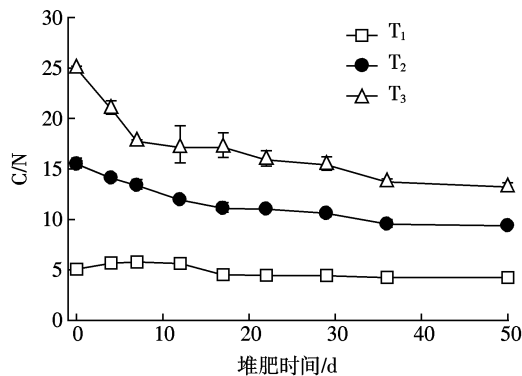


图 6 堆肥过程中 C/N 的变化

Figure 6 Changes of carbon to nitrogen ratio during the composting of cyanobacteria

2.7 堆肥过程中 GI 的变化

种子发芽指数是衡量堆肥腐熟度的一个直接而有效的生物指标^[9]。种子发芽率不但能检测堆肥样品的毒性, 而且能预测堆肥毒性的发展。目前普遍认为^[11]: 当 $GI > 50\%$ 时, 说明堆肥已达到可接受的腐熟程度; 当 GI 达到 $80\% \sim 85\%$ 时, 说明堆肥已完全腐熟, 对植物生长毒害不大。从图 7 看出, GI 在 3 个处理间变化趋势为 $T_3 > T_2 > T_1$ ($P < 0.001$, 表 2)。堆肥结束后, T_1 处理的 GI 仅为 63%, 而 T_2 (95.2%) 和 T_3 (95.4%) 处理的 GI 均大于 80%, 达到腐熟标准。可见, 与蓝藻直接堆置相比, 提高 C/N 不仅能加速蓝藻堆肥的腐熟进程, 而且有利于其无害化。

2.8 堆肥过程中微囊藻毒素含量的变化

从图 8 可以看出, 随着堆肥时间的推进, 各处理微囊藻毒素含量都呈下降趋势。特别是堆肥 5 d 后, 各处理 MC-LR 和 MC-RR 的降解率已分别达 80% 以

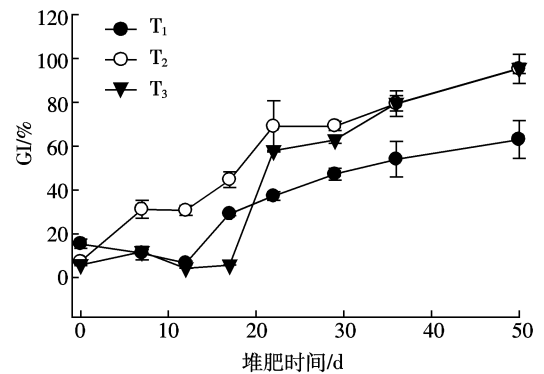


图 7 堆肥过程中 GI 的变化

Figure 7 Changes of germination index (GI) during the composting of cyanobacteria

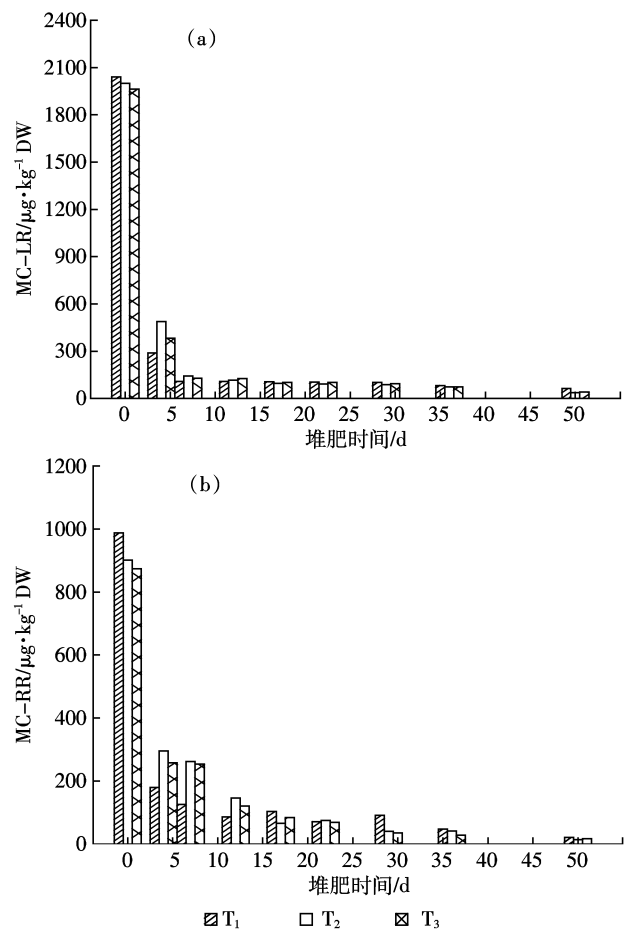


图 8 堆肥过程中微囊藻毒素含量的变化

Figure 8 Changes of microcystin content during the composting of cyanobacteria

上和 70% 以内。堆肥结束后 3 个处理堆体中 MC-LR 的含量分别为 64.2、36.3、40.3 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW, 降解率分别为 96.9%、98.2%、和 97.9%; MC-RR 的含量分别为 20.8、13.8、17.4 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW, 降解率分别为 97.9%、98.5% 和 98.0%。其中, T_2 处理对微囊藻毒素的降解效

果最好。

3 讨论

防治水体富营养化与蓝藻水华暴发,已成为水体污染防治、生态修复的主要课题与紧迫任务^[7]。在蓝藻水华频发的太湖和滇池等地开展蓝藻打捞工作,作为终端控制途径有效地降低了水污染灾害和再次暴发的强度及可能性^[2]。蓝藻含有丰富的蛋白质及氮、磷等营养物(含氮量达8%~10%,含磷量约为0.7%),将其作为主料进行高温堆肥可以制成优质有机肥。不仅使蓝藻打捞工作可以无后顾之忧地持续进行,而且可使蓝藻利用成为有利可图的新型环保产业。

由于打捞的新鲜蓝藻 C/N 较低(一般为4~6),不适合直接堆肥,需要添加其他含碳量较高的有机物料来调节堆肥的初始 C/N。秸秆作为常见的农业废弃物,不仅是比较理想的调节堆肥 C/N 的辅料^[14],同时也可以调节堆体的含水量,与蓝藻藻泥混合使用可以实现大规模的蓝藻堆肥生产,更大程度上实现农业废弃物的资源化利用。

本研究结果表明,提高堆体 C/N 到15和25后可以使堆体快速进入高温期,高温持续时间更长,明显加快蓝藻堆肥的腐熟进程,且有利于种子萌发。添加秸秆的蓝藻堆体在堆置35 d后,其 GI 均可达80%以上,总养分含量达5.0%以上;而蓝藻自然堆置35 d后,其 GI 仅为50%以上,总养分含量不足4.0%。较高的 C/N 会使得堆肥过程中氮素的损失增加^[15]。堆体 C/N 为15时,堆肥过程的氮素损失率较低,且成品的各指标中除了总养分含量(4.98%)略低于新有机肥料标准^[10]外,其他指标均达标。C/N 低时秸秆的添加量较少,降低了秸秆粉碎及前期搅拌的处理成本,在实际生产中的可操作性更高。

蓝藻作为一种特殊的物料,其中的 MC 在堆肥过程中的残留是其无害化处理时必须考虑的一个重要方面^[9]。从本研究结果看,虽然堆肥35 d后,GI和总养分含量已经达到普通堆肥的腐熟度要求,但是 MC 的降解率仍有较大的可降解空间。蓝藻藻泥自然堆放也可以使 MC 降解,但是其降解率低于 C/N 为15和25的两个处理。其中又以 C/N 为15的处理 MC 的相对残留量最低,即 MC-LR 和 MC-RR 的含量分别为36.3、13.8 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW,接近 MC 降解的最大值。因此,从无害化的角度考虑,高温蓝藻堆肥的腐熟时间不应少于50 d。

虽然添加较少的秸秆使堆体的含水率增加,但是

我们前期的工作发现(待发表),蓝藻堆体含水量为65%的处理与55%的处理相比,其各项腐熟指标及 MC 的降解率均无显著影响。因此,基于对蓝藻藻泥腐熟进程及无害化的考虑,在实际生产过程中,堆体的 C/N 可调节高于15。

在今后的研究工作中,如何有效减少蓝藻堆肥过程中氮素的损失,提高肥效,是下一步研究亟需解决的问题。此外,蓝藻堆肥结束后仍然有微囊藻毒素残余,并且高于饮用水中的最低标准(GB 5749—2006)^[16],作为有机肥施用后仍有可能存在安全风险。但其施用的最低标准还未确定,对其在食物链中存在的安全风险还没有系统研究^[17]。如何提高蓝藻堆肥过程中 MC 的降解,降低对环境的安全风险,是另一个亟需解决的问题。

4 结论

与蓝藻自然堆置相比,添加辅料增加堆体 C/N 可提高蓝藻好氧堆肥的腐熟速度。堆肥35 d后,C/N 为15和25的处理其堆肥成品均已满足有机肥行业标准,种子发芽指数均高于80%;但 MC-LR 和 MC-RR 仍有较大的降解潜力,从无害化的角度考虑,蓝藻高温堆肥时间不应少于50 d。

本研究探索了适宜实际生产的蓝藻堆肥技术参数,不仅使蓝藻打捞工作可以无后顾之忧地持续进行,而且可使蓝藻利用成为有利可图的新型环保产业。在今后的研究工作中,如何有效减少蓝藻堆肥过程中氮素的损失,提高蓝藻堆肥过程中 MC 的降解,降低对环境的安全风险,是下一步研究亟需解决的问题。

参考文献:

- [1] Dittmann E, Wiegand C. Cyanobacterial toxins—occurrence, biosynthesis and impact on human affairs[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2006, 50(1):7–17.
- [2] 吴祥德. 无锡太湖蓝藻打捞公益示范工程 [C]. 中国环境科学学会2008年学术年会论文集, 2009.
WU Xiang-de. Wuxi Taihu algae salvage public demonstration project [C]. Academic Conference on 2008, Chinese Society for Environmental Sciences, 2009.
- [3] 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
Treatment and disposal of pollutant of livestock and poultry breeding [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [4] 鲍艳宇, 陈佳广, 颜 丽, 等. 堆肥过程中基本条件的控制[J]. 土壤通报, 2006, 37(1):164–169.
BAO Yan-yu, CHEN Jia-guang, YAN Li, et al. Fundamental conditions of composting[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1):164–169.

- [5] 黄国锋, 吴启堂, 黄焕忠. 有机固体废弃物耗氧高温堆肥化处理技术[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 159–161.
HUANG Guo-feng, WU Qi-tang, HUANG Huan-zhong. Aerobic and thermophilic composting technology of solid organic waste[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(1): 159–161.
- [6] 杨毓峰, 薛澄泽, 唐新保. 畜禽废弃物的堆肥化处理和利用[J]. 西北农业大学学报, 1999, 8(2): 119–120.
YANG Yu-feng, XUE Cheng-ze, TANG Xin-bao. Composting and utilization of livestock and poultry wastes[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1999, 8(2): 119–120.
- [7] Song L, Chen W, Peng L, et al. Distribution and bioaccumulation of microcystins in water columns: A systematic investigation into the environmental fate and the risks associated with microcystins in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. *Water Research*, 2007, 41(13): 2853–2864.
- [8] 吕锡武, 稻森悠平, 丁国际. 有毒蓝藻及藻毒素生物降解的初步研究[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2): 138–140.
LÜ Xi-wu, YUHEI Inamori, DING Guo-ji. Degradation of microcystis viridis and microcystins with biological reactors[J]. *China Environmental Science*, 1999, 19(2): 138–140.
- [9] Saqrane S, Ouahid Y, El Ghazali I, et al. Physiological changes in *Triticum durum*, *Zea mays*, *Pisum sativum* and *Lens esculenta* cultivars, caused by irrigation with water contaminated with microcystins: A laboratory experimental approach[J]. *Toxicon*, 2009, 53(7–8): 786–796.
- [10] 中华人民共和国农业部. 农业行业标准 NY 525—2011 有机肥料[S].
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Agricultural Standard of People's Republic of China NY 525—2011. Organic fertilizer[S].
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 1999.
BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. Third Edition. Beijing: China Agricultural Press, 1999.
- [12] Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. *Biocycle*, 1981, 22: 54–57.
- [13] Cong L M, Huang B F, Chen Q, et al. Determination of trace amount of microcystins in water samples using liquid chromatography coupled with triple quadrupole mass spectrometry[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 569: 157–168.
- [14] 王利娟, 谢利娟, 杨桂军, 等. 不同填充剂及复合微生物菌剂对蓝藻堆肥效果的影响[J]. 环境工程学报, 2009, 3(12): 2261–2265.
WANG Li-juan, XIE Li-juan, YANG Gui-jun, et al. Impact of different bluking agents and compound microbial inoculant on blue algae composting[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(12): 2261–2265.
- [15] 秦 莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2668–2673.
QIN Li, SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, et al. The impact of composting with different C/N on maturity variation emission of gas concluding N [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2668–2673.
- [16] 卫生部和国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准 GB 5749—2006[S].
Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for Drinking Water Quality GB 5749—2006[S].
- [17] Järvenpää S, Lundberg-Niiniistö C, Spoof L, et al. Effects of microcystins on broccoli and mustard, and analysis of accumulated toxin by liquid chromatography-mass spectrometry[J]. *Toxicon*, 2007, 49(6): 865–874.