

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)

长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)

北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)

上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)

青岛市大气PM_{2.5}元素组成及来源研究 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)

冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)

再悬浮装置在大气PM_{2.5}源谱分析中的应用 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)

黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)

三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)

香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)

臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)

托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)

五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)

7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)

巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)

北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)

东莞运河排涝对东江河水水质影响分析 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)

北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)

地下水曝气修复过程的三维数值模拟 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)

垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)

新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)

营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)

水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)

酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 迟杰,杨青(1570)

电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)

青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)

四溴双酚A的辐照降解研究 李杰,徐殿斗,马玲玲,吴明红(1587)

污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)

高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)

城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 尚晓玲,李咏梅(1604)

利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)

好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓娟,竺建荣(1614)

活性污泥对病毒的生物吸附特性 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)

阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)

两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 李婷,孟昭福,张斌(1632)

表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)

南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)

焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)

Xanthobacter flavus DT8降解二噁英的特性研究 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)

未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)

矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)

长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)

典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)

闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)

三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)

典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)

密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)

湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)

基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)

土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)

蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)

LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)

亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)

蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)

固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)

《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究

任云, 崔春红, 刘奋武, 占新华, 周立祥*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 选取锯木屑和药渣作为调理剂并分别添加酸化沸石、过磷酸钙和氢氧化镁与磷酸的混合液作为氮素固定剂或损失抑制剂, 研究了蓝藻堆肥的效果. 结果表明, $V(\text{蓝藻}):V(\text{锯木屑}):V(\text{药渣})=1:1:1$ 时极易发酵. 添加氮素固定剂在堆肥前期能促进发酵, 特别是添加过磷酸钙的处理最高温度达 66.8°C . 固定剂的添加能促进物料的降解, 尤其添加过磷酸钙的促进作用比较明显; 各氮素固定剂在蓝藻堆肥过程中都起到了抑制氮素损失的作用, 其中过磷酸钙和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 H_3PO_4 混合液对氮素的固定率达 50% 以上, 且对氨氮的固定效果较好. 堆肥结束后, 添加过磷酸钙和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 H_3PO_4 混合液的两处理氨氮比堆肥起初分别增加 23.52% 和 28.06%, P 素分别增加了 67.56% 和 36%. 随着堆肥的进行, 各处理堆肥物料中 N、P、K 含量均明显升高, C/N 比显著下降, 发芽指数增加到 75% 以上, 而且添加氮素固定剂的处理效果更为明显. 可见采用高温堆肥和氮素固定技术可有效实现蓝藻的资源化利用.

关键词: 蓝藻; 堆肥; 氮损失; 固定剂; 控制

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1760-07

Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor

REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Aerobic composting of dewatered cyanobacteria spiked with sawdust and traditional Chinese medicine residue as bulking agent was conducted in the absence and presence of nitrogen fixatives with an aim to inhibit nitrogen loss during composting. Selected nitrogen fixatives included zeolite, calcium superphosphate, and $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4$ solution. The results showed that the raw mixed materials with 1:1:1 (V/V/V) of cyanobacteria, sawdust, and traditional Chinese medicine residue was easily composted, as exhibiting that a higher composting temperature obtained within a short time especially for the treatment with the addition of calcium superphosphate being 66.8°C . The obvious inhibiting effect on the nitrogen loss during cyanobacteria composting were observed in the treatments spiked with the above three nitrogen fixatives. Above 50% of N loss was efficiently controlled or prevented due to the addition of calcium superphosphate or $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4$ solution. The content of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in matured compost were increased by 23.52% for the treatment spiked with calcium superphosphate and 28.06% for the treatment spiked with $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-H}_3\text{PO}_4$ solution compared to initial phase of composting. Likewise, P were increased by 67.56% and 36% for the two treatment mentioned above. It was noted that the content of N, P, K, and seed germination index in compost obviously increase but the content of organic matter and C/N declined with the increase of composting time especially for these treatment amended with nitrogen fixatives. It was concluded that aerobic composting in the present of nitrogen fixatives was a suitable approach to treat dewatered cyanobacteria.

Key words: cyanobacteria; composting; nitrogen loss; fixatives; control

浅水湖泊暴发蓝藻时, 打捞是解决蓝藻危机最为快捷的方法^[1]. 湖蓝藻暴发期间, 每天打捞的水华蓝藻超过 1 000 t, 最多时可达 2 000 t^[2]. 蓝藻富含蛋白质, 打捞上来后如不及时处理则极易腐败发臭, 有效处理处置好这些被打捞出来的蓝藻意义重大.

目前, 国内外针对蓝藻利用的研究主要有制备饲料用氨基酸^[3]、提取藻蓝蛋白^[4]、藻多糖^[5]、 γ -亚油酸^[6]、做生物柴油^[7]、厌氧发酵产沼气^[8,9]、制有机肥^[10]等. 蓝藻含有丰富的蛋白质及氮、磷等营养物, 利用高温堆肥法将蓝藻开发成优质有机肥料, 不仅有效解决了蓝藻易腐败发臭问题, 而且可转化为农业资源, 变“废”为“宝”. 但由于蓝藻含氮量高, C/N 比低, 利用传统的堆肥方式容易使有机氮降解

后变成氨氮挥发损失^[11,12], 降低了有机肥料的养分含量. 因此, 氮素损失的控制是蓝藻高温堆肥中需要注意的重要问题之一^[13-15]. 另外, 有关蓝藻堆肥的研究也有一些报道^[16], 但多数研究集中在堆肥前后产品品质的变化, 对整个堆肥过程中成分的动态变化报道较少.

为此, 本研究以锯木屑和药渣作为调理剂分析蓝藻堆肥中分别添加酸化沸石、过磷酸钙和氢氧化镁与磷酸的混合液作为氮素损失抑制剂的堆肥效果

收稿日期: 2011-08-29; 修订日期: 2011-12-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07101-011); 江苏省科技支撑计划项目(BE2009671)

作者简介: 任云(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理处置及资源化, E-mail: rynnjau@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

及其对抑制氮素损失的作用,分析了整个堆肥过程中各成分动态变化,以期为蓝藻高温堆肥提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用太湖梅梁湾藻水分离站脱水蓝藻泥,与刨木花和江苏某中药厂的药渣进行混合堆肥.物料的基本性质见表 1.

氮素固定剂:改性沸石、过磷酸钙、 $m[\text{Mg}(\text{OH})_2]:m[\text{H}_3\text{PO}_4]=1:4$ 的混合液。

改性沸石:625 g 沸石用 pH 2.0 的 H_3PO_4 浸泡 12 h 后用去离子水洗至 pH 7.05.

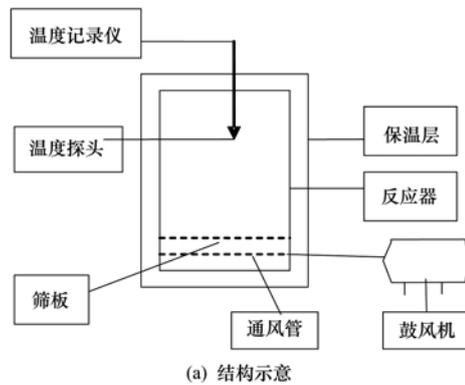


表 1 堆制材料的基本性质

Table 1 Basic properties of raw materials for composting

项目	水分 /%	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 N / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 P /%	全 K /%
蓝藻	89.68	650	107	1.1	1.2
药渣	17.36	732	7.46	0.3	0.2
木屑	12.23	826	1.33	0.1	0.1

1.2 好氧堆肥装置

高温堆肥装置结构和实物图如图 1 所示.由密闭反应容器、保温层、筛板、鼓风机、定时器、通风管和温度自动记录仪等组成,筒体有效内径与高分别为 35 cm 和 75 cm,有效容积为 60 L.鼓风机通过通风管道从筛板下向堆体充气,以便通风保湿。



图 1 高温堆肥装置结构示意图和实物图

Fig. 1 Aerobic composting device

1.3 好氧堆肥化及氮素固定试验设计

按 $V(\text{蓝藻}):V(\text{锯木屑}):V(\text{药渣})=1:1:1$,为了堆肥容易发酵,同时添加质量比为原料总重量 10% 的猪粪做接种物,水分控制在 60% 左右.为研究堆肥过程中氮素损失控制,以 $V(\text{蓝藻}):V(\text{锯木屑}):V(\text{药渣})=1:1:1$ 的混合物料为底物,设置如下处理:① 混合物料(对照试验 CK);② 混合物料 + 3% (质量比) 酸化沸石;③ 混合物料 + 3% 过磷酸钙;④ 混合物料 + 3% $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 $\text{H}_3\text{PO}_4(1:4)$ 混合液。

将处理①~④的物料分别装入 1~4 号堆肥反应器中,装料前称桶重,装料后称总重.人工翻堆频率为每 4 d 翻堆 1 次;机械通风时间为每 6 h 通风 30 min.用温度自动记录仪每天于 08:00、16:00、24:00 测定堆体温度和环境温度.堆肥当天及第 5、

11、18、26、34 d 采用混合均匀采样法采样,同时记录所采样品重量和桶与物料总重量,采回的样贮于 4℃ 冰箱中,部分项目用鲜样测定,部分项目风干后测定。

1.4 测定项目与方法

参照文献[17]对堆肥样品进行有机质、全氮、全磷、全钾、硝态氮和铵态氮测定;参照文献[18]对堆肥浸提液进行水溶性有机碳的测定.堆肥浸提液的浸提方法为:测定水分后,根据水分含量计算并称取相当于 10.00 g 干样的湿样,装入 250 mL 三角瓶中,加入 100 mL 蒸馏水,在往复振荡机上振荡 1 h ($160 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),再用离心机以 $10\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度离心 30 min,然后用慢速滤纸过滤。

取部分滤液进行油菜种子发芽试验,种子发芽指数按如下公式计算:

$$\text{种子发芽指数} = \frac{\text{堆肥浸提液处理种子的发芽率} \times \text{处理种子的根长}}{\text{去离子水处理种子的发芽率} \times \text{去离子水种子的根长}} \times 100\%$$

1.5 氮素固定率计算



其中, n 为取样次数; W_0 为堆肥开始时堆肥原料总重量(鲜重), kg; M_{w0} 为堆肥开始时堆肥样品含水量, %; W_n 为每次取完样后堆肥重量(鲜重), kg; M_{wn} 为每次取样时堆肥含水量, %; W'_n 为每次取的样品重量(鲜重), kg; N_n 为每次取样的全氮含量, $g \cdot kg^{-1}$. 根据氮素平衡则有:

第一次取样前后:

$$W_0 \times (1 - M_{w0}) \times N_0 = (W_1 + W'_1) \times (1 - M_{w1}) \times N_1 + N_{1\text{损失}}$$

第二次取样前后:

$$W_1 \times (1 - M_{w1}) \times N_1 = (W_2 + W'_2) \times (1 - M_{w2}) \times N_2 + N_{2\text{损失}}$$

依此类推, 每次取样间隔均有氮素损失.

第 n 次取样前后, 氮素平衡式:

$$W_{n-1} \times (1 - M_{wn-1}) \times N_{n-1} = (W_n + W'_n) \times (1 - M_{wn}) \times N_n + N_{n\text{损失}}$$

则总的全氮损失量:

$$N_{\text{总损失量}} = N_{1\text{损失}} + N_{2\text{损失}} + \dots + N_{n-1\text{损失}}$$

氮素损失率:

$$N_{\text{损失率}} = \frac{N_{\text{总损失量}}}{N_{\text{初始量}}} \times 100\%$$

氮素固定率:

$$N_{\text{固定率}} = \frac{N_{\text{CK损失率}} - N_{\text{处理损失率}}}{N_{\text{CK损失率}}} \times 100\%$$

2 结果与讨论

2.1 蓝藻堆肥过程中温度的变化

温度是判断堆肥能否达到无害化要求的最重要的指标之一^[20,21]. 从图 2 看出, 蓝藻堆肥随着翻堆的进行堆体温度呈波浪形的变化. 所有处理在堆制的前 3 d 温度迅速升高, 第 3 d 温度都达到 60℃ 以上, 各处理在堆制过程中维持 50℃ 以上 10 d 左右. 在随后堆肥过程中, 堆体温度随着翻堆仍成波浪形变化, 但温度总体上逐渐下降, 最后稳定在 30℃ 左右.

可见, $V(\text{蓝藻}):V(\text{锯木屑}):V(\text{药渣}) = 1:1:1$ 混合的 4 个处理都已达到高温堆肥的卫生标准^[22], 与对照相比, 添加氮素固定剂处理堆温在前期较高, 特别是添加过磷酸钙的处理最高温度达 66.8℃, 这说明过磷酸钙的加入有利于堆肥中微生物的营养平衡, 有利于微生物的代谢和有机物的分解, 从而使堆

根据物料平衡原理, 氮素固定率计算如下^[19]:

温明显升高^[20].

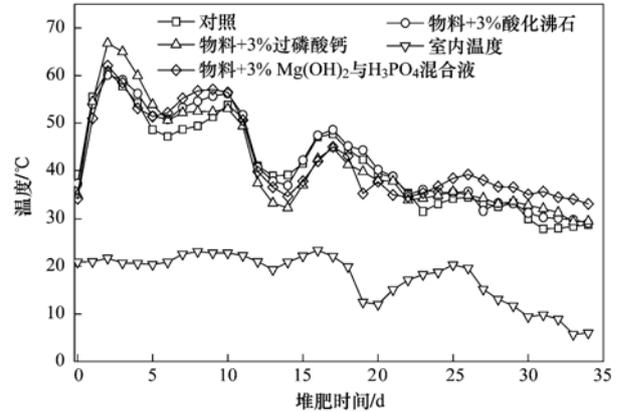


图 2 添加不同氮抑制剂的蓝藻堆肥物料在堆肥过程中温度变化动态
Fig. 2 Dynamics of temperature during composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor

2.2 蓝藻堆肥过程中 pH 的变化

pH 值是微生物生长的重要影响因素之一, 也是反映堆肥进程的主要参数之一, 过高或过低的 pH 值都会影响堆肥反应的正常进行^[23]. 试验中 4 个堆体的 pH 值均维持在 7~9 之间, 在堆肥微生物适应的范围内(图 3), 也符合堆肥对 pH 的要求^[24]. 各处理均呈现出 pH 先升高后降低的趋势. 在发酵前期(0~5 d)随着温度的上升有机氮发生强烈的矿化作用, 各处理物料的 pH 随之迅速上升^[25]. 随着堆肥的进行, 由于 NH_3 挥发速率降低以及硝化菌的硝化作用产生 H^+ 和有机物分解产生的有机酸^[26], 各处理(处理 4 除外) pH 值基本上逐渐降低. 而添加 1:4 $Mg(OH)_2$ 与 H_3PO_4 混合液处理的 pH 在第 18 d 时

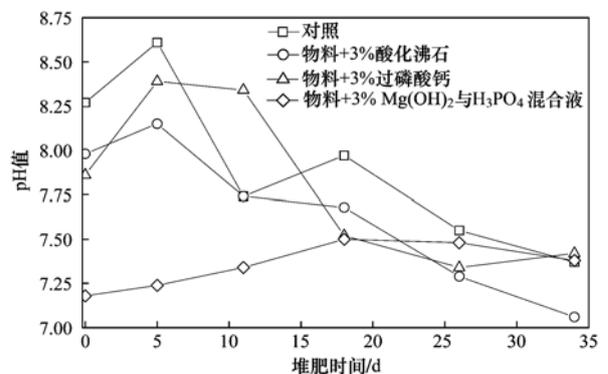


图 3 添加不同氮抑制剂的蓝藻堆肥物料在堆肥过程中 pH 变化
Fig. 3 Dynamics of pH during composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor

才呈现下降趋势,且在堆制过程中变化不大。

添加氮素固定剂的处理与未添加氮素固定剂的处理比较,添加氮素固定剂处理的起始 pH 在 8.00 以下,这与所添加的固定剂的 pH 有关. 对照处理 pH 从初始的 8.27 降低到 7.37 和 7.06,降幅达 0.9 个 pH 单位. 添加酸化沸石和过磷酸钙处理的 pH 分别从 7.98 和 7.86 降到 7.25 和 7.42,降幅分别为 0.73 和 0.44 个 pH 单位,而添加 1:4 $Mg(OH)_2$ 与 H_3PO_4 混合液的处理 pH 则从 7.18 升高到 7.38. 可以看出添加固定剂后 pH 值降幅小于未添加固定剂的处理. 这可能是因为添加固定剂后将更多的 NH_4^+ -N 固定下来,从而减小了堆肥物料 pH 值的降低。

2.3 蓝藻堆肥过程中有机质的变化情况

从图 4 中看出,所有处理的有机质含量随着堆制时间的推移均呈下降趋势,0~5 d,随着温度的升高,有机物的降解较剧烈,有机质含量呈现较大幅度的下降. 堆肥结束后,添加过磷酸钙和 $Mg(OH)_2$ 与 H_3PO_4 混合液的 2 个处理有机质降解率分别为 24.73%、21.95%,较对照的降解率(20.07%)高. 表明这 2 种 N 固定剂在一定程度上能促进有机物的降解。

2.4 蓝藻堆肥过程中全氮和不同氮形态的变化

从图 5(a)可见,总体上,添加氮素固定剂的处理全 N 含量在整个堆制期间基本上都高于对照,明

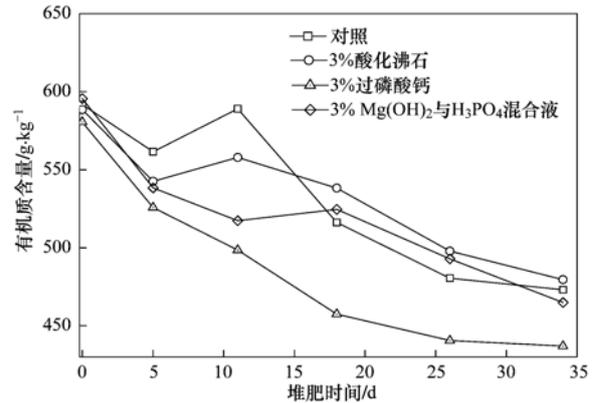


图 4 添加不同氮抑制剂的蓝藻堆肥物料在堆肥过程中有机质变化

Fig. 4 Dynamics of organic matter during composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor

显表现出一定的固氮能力. 例如,在 0~5 d 内,虽然不同处理总氮含量呈现下降的趋势,然而,对照组全 N 含量降低幅度达 5.78%、而处理 2、处理 3 及处理 4 总 N 含量分别仅降低 2.01%、4.74% 与 1.87%。

在后续 5~34 d 内各处理全 N 含量可能由于堆肥过程中有机物降解、堆料浓缩原因呈现出增加的趋势. 然而,添加氮素固定剂各处理与对照相比,均有较高的全 N 含量. 这也进一步说明各固定剂的加入均具有控制堆肥过程氮素损失的功能。

NH_4^+ -N 的变化是堆肥过程中氮素变化特别是氮挥发的重要指标. 从图 5(b)可见,在堆肥前期 0

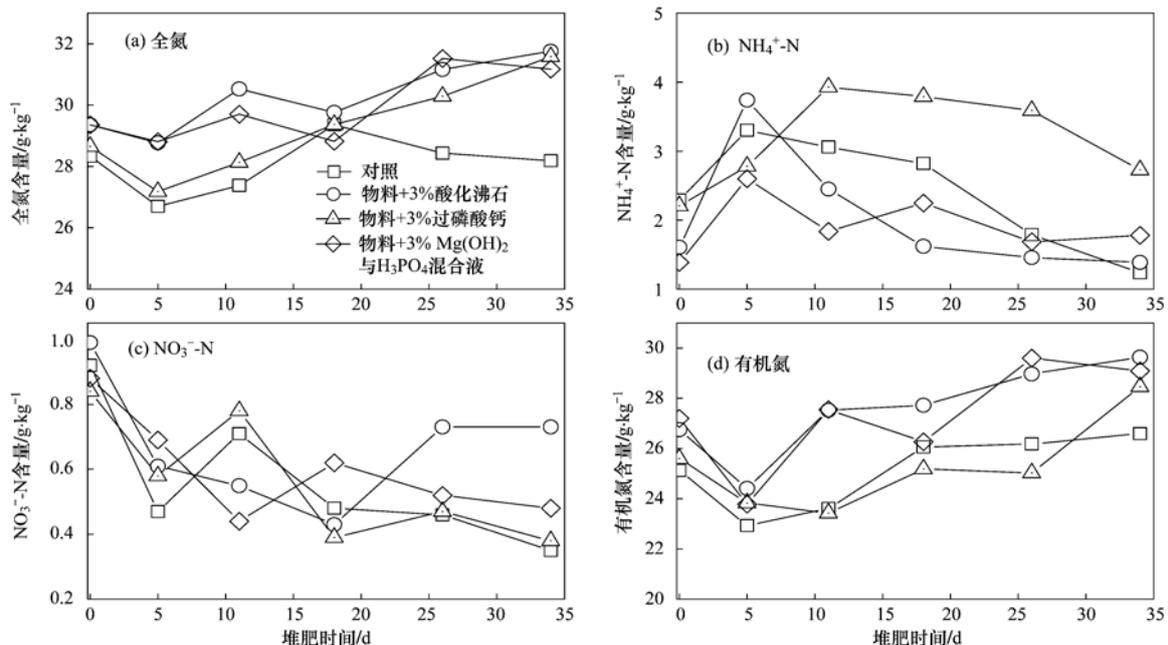


图 5 添加不同氮抑制剂的蓝藻堆肥物料在堆肥过程中全氮和铵态氮,硝态氮和有机氮的变化

Fig. 5 Dynamic change of TN, NH_4^+ -N, NO_3^- -N and organic nitrogen during the composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor

~5 d,随着温度的升高,氮化细菌的活性增大,各处理的 NH_4^+ -N含量都呈较高的增加趋势,而后,由于温度的缓慢下降, NH_4^+ -N含量呈现下降趋势.堆肥结束后,对照组 NH_4^+ -N含量下降45.85%;而添加酸化沸石的处理 NH_4^+ -N含量仅降低13.66%,添加过磷酸钙和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ - H_3PO_4 混合液的处理 NH_4^+ -N含量则分别增加23.52%和28.06%,说明固定剂的添加相对于对照处理都起到了抑制氮流失的作用,且相对于酸化沸石,过磷酸钙和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 H_3PO_4 混合液的固氮效果在 NH_4^+ -N指标的控制上显得更优.

从图5(c)可见,各处理 NO_3^- -N含量在0~5 d内均呈现下降趋势,这可能是随着温度的升高和 NH_4^+ -N含量的增加,硝化细菌的生长活动受到强烈限制^[27].在5~34 d, NO_3^- -N含量变化不大,可能是在堆肥后期 NH_4^+ -N含量仍较高,硝化作用受到了一定程度的抑制.

有机氮的变化趋势与全氮相类似.从图5(d)中看出,各处理的有机氮含量均先降低后升高,主要是因为堆肥开始阶段含氮有机物在微生物的作用下被分解为无机养分主要是氨气;堆肥后期,随着发酵进程,无机氮逐渐转化为有机氮.堆肥结束后,处理1、处理2、处理3和处理4有机氮含量分别增加5.84%、10.76%、11.21%和6.90%.综上所述,固定剂的加入使得处理组的总氮、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N及有机氮含量均高于对照组,在某种意义上达到了“固氮”目的.

2.5 不同氮素固定剂固定率比较

从表2可见,固定剂过磷酸钙和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 H_3PO_4 混合液对总氮的固定率达50%以上,起到了

显著的固氮效果.过磷酸钙成分中无论是磷酸钙、石膏还是游离酸,都能将堆肥中易挥发的 NH_4^+ 转化为比较稳定的酸性磷酸铵或硫酸铵,减少总氮的损失;而 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 H_3PO_4 混合液在堆肥过程中形成了一种 MgNH_4PO_4 的无机肥料(俗称“鸟粪石”),将氨氮固定.所以将其作为堆肥化过程氮素损失的控制材料不但有效地控制了堆肥过程中的氮素损失,还得到了一种含有 MgNH_4PO_4 的有机无机复混肥^[28],同时也增加了磷的含量,有利于作物的生长.

表2 不同氮素固定剂固定率/%

Table 2 Efficiency of inhibiting nitrogen-loss by different chemical agents during cyanobacteria composting/%			
项目	酸化沸石	过磷酸钙	$\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 H_3PO_4 混合液
氮素固定率/%	13.12	52.50	52.10

2.6 蓝藻堆肥过程中全磷和全钾的变化

由图6可见,在发酵过程中,堆肥中全磷和全钾含量均有明显升高.堆肥结束后,对照、添加酸化沸石、添加过磷酸钙、添加 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 H_3PO_4 混合液的4个处理全磷含量比堆肥初始时分别增加47.62%、36.23%、67.56%和36%.全钾含量的变化趋势与全磷含量的变化类似,其中添加过磷酸钙的处理全钾含量由0.69%上升到0.89%,上升幅度达28.98%,高于对照的上升幅度(18.05%).在堆肥过程中,添加过磷酸钙的处理有机质分解较快,全钾被“浓缩”,含量上升很快.同样地,由于在整个发酵过程中磷几乎没有损失,随着发酵进程,有机质降解,磷被“浓缩”.因此,各处理堆肥结束后磷含量的提高主要归因于“浓缩效应”,此外,添加过磷酸钙的处理和添加 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 H_3PO_4 混合液的处理则不仅由于浓缩效应,而且还归因于磷酸的添加.

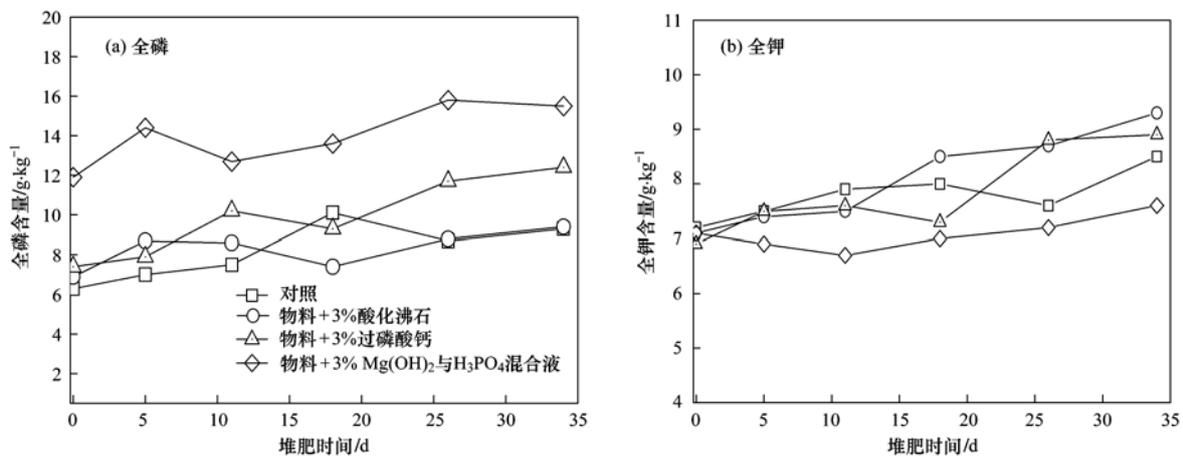


图6 添加不同氮抑制剂的蓝藻堆肥物料在堆肥过程中全磷和全钾含量的变化

Fig. 6 Dynamic change of total P and K during the composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor

2.7 C/N 的变化

C/N 是堆肥过程中的一个重要参数. 各处理 C/N 随着堆肥的进行而呈现明显下降趋势(图 7), 对照处理在前期呈现上升趋势是由于氨气挥发所致. 总体上, 添加氮素固定剂的 3 个处理 C/N 下降幅度大于对照处理, 这是因为添加固定剂的处理不仅有有机质分解强度较大, 更重要的是氮素损失减少所致. 堆肥结束后, 添加固定剂的各处理 C/N 均降到了 15 左右.

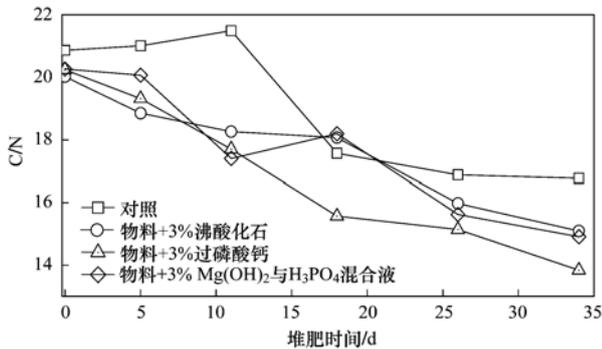


图 7 添加不同氮抑制剂的蓝藻堆肥物料在堆肥过程中 C/N 的变化

Fig. 7 Dynamic change of C/N during the composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor

2.8 种子发芽指数的变化

堆肥的腐熟度受很多因素的综合影响. 种子发芽指数(GI)被认为是最敏感、最可靠的堆肥腐熟度评价指标. 如果 GI > 50%, 则可认为基本无毒性, 当 GI 达到 80% ~ 85% 时, 就可以认为堆肥对植物没有毒性^[29]. 从图 8 中可看出, 堆肥对降低蓝藻毒性有明显的作. 在堆肥开始时, 各处理的发芽率都小于 50%, 添加过磷酸钙处理的初始种子发芽指数为

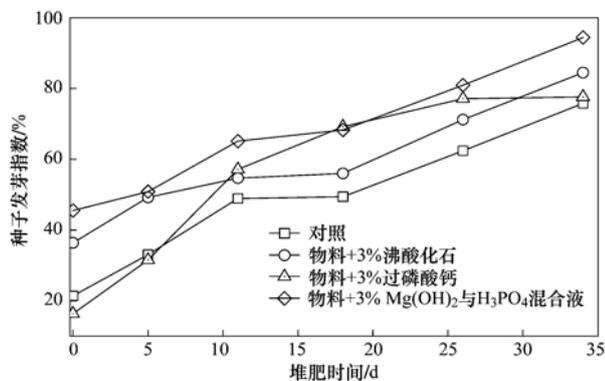


图 8 添加不同氮抑制剂的蓝藻堆肥物料在堆肥过程中种子发芽指数的变化

Fig. 8 Dynamic change of seed germination index during the composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor

16.32%, 低于对照 21.39%, 这是因为添加了过磷酸钙使堆肥盐度相对较高, 对种子有一定的胁迫作用. 堆肥结束后, 添加酸化沸石和 $Mg(OH)_2$ 与 H_3PO_4 混合液处理的种子发芽指数分别达到了 84.48% 和 94.40%, 明显高于对照 75.82%, 说明在本试验条件下, 固定剂的添加不仅可以起到氮素固定的作用, 而且有益于堆肥的腐熟.

3 结论

(1) $V(\text{蓝藻}): V(\text{锯木屑}): V(\text{药渣}) = 1:1:1$ 时容易高温发酵, 添加氮素固定剂在堆肥前期能促进发酵, 特别是添加过磷酸钙的处理最高温度达 66.8°C .

(2) 固定剂的添加能促进物料的降解, 其中, 添加过磷酸钙的促进作用比较明显; 各固氮剂都起到了抑制堆肥过程中氮素损失的作用, 固定剂过磷酸钙和 $Mg(OH)_2$ 与 H_3PO_4 混合液对氮素损失的抑制率达 50% 以上, 且对氨氮的固定效果较好, 堆肥结束后, 添加过磷酸钙和 $Mg(OH)_2$ 与 H_3PO_4 混合液的两处理氨氮比堆肥起初分别增加 23.52% 和 28.06%.

(3) 固定剂过磷酸钙和 $Mg(OH)_2$ 与 H_3PO_4 混合液的添加, 使堆肥结束后, 两处理 P 元素分别比堆肥起始时增加了 67.56% 和 36%, 大大提高了堆肥品质.

(4) 随着堆肥的进行, 各处理堆肥物料中 N、P、K 含量均明显升高, C/N 比显著下降, 发芽指数增加到 75% 以上, 而且添加氮素固定剂的处理效果更为明显.

参考文献:

- [1] 姜继辉, 严少华, 陈巍, 等. 太湖蓝藻发酵后沼渣和沼液的肥效研究 [J]. 江苏农业学报, 2009, 25(5): 1025-1027.
- [2] 韩士群, 严少华, 王震宇, 等. 太湖蓝藻无害化处理资源化利用 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 431-438.
- [3] 钱玉婷, 常志州, 王世梅, 等. 水华蓝藻酸解制备复合氨基酸液的研究 [J]. 江苏农业学报, 2008, 24(5): 706-710.
- [4] 杨苏, 陈朝银, 赵声兰, 等. 滇池蓝藻资源综合利用的研究进展 [J]. 云南化工, 2006, 33(3): 49-53.
- [5] 汪之和, 施文正. 蓝藻的综合开发利用 [J]. 渔业现代化, 2003, (2): 32-33.
- [6] Han Q G, Shen Y W, Hu Z L, et al. Studies on γ -linolenic acid content analysis and separation methods from blue-green algae in Dianchi Lake [J]. Biotechnology, 2004, 14(5): 50-52.
- [7] 孙世中, 高天荣, 徐锐, 等. 蓝藻泥和废弃烟叶混合作有机肥料工艺优化 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2008, 28(5): 35-39.
- [8] 胡萍, 严群, 宋任涛, 等. 蓝藻与污泥混合厌氧发酵产沼气

- 的初步研究 [J]. 环境工程学报, 2009, **3**(3): 559-563.
- [9] 董诗旭, 董锦艳, 宋洪川, 等. 滇池蓝藻发酵产沼气的研究 [J]. 可再生能源, 2006, **4**(2): 16-18.
- [10] 王景文. 比利时蓝藻爆发防治和综合利用 [J]. 全球科技经济瞭望, 2007, **2**(12): 52-53.
- [11] Raviv M, Medina S, karasnovsky A, *et al.* Conserving nitrogen during composting [J]. *Biological Cycle*, 2002, **43**(9): 48-53.
- [12] Beck-Friis B, Smårs S, Jönsson H, *et al.* Se-structures and environment: Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, **78**(4): 423-430.
- [13] 杨宇, 魏源送, 刘俊新. 不同通风方式对添加镁盐后猪粪堆肥过程中氮磷保存的影响 [J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1238-1243.
- [14] 杨宇, 魏源送, 刘俊新. 镁盐添加对猪粪堆肥过程中氮、磷养分保留的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2672-2677.
- [15] 王立群, 喻其林, 黄明媛. 鸡粪好氧堆肥氨氧化霉菌的筛选及氮转化能力的研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2763-2767.
- [16] 王利娟, 谢丽娟, 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.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 225-227, 392-394.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 422-425.
- [19] 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.
- [20] 黄懿梅, 曲东, 李国学. 调理剂在鸡粪锯末堆肥中的保氮效果 [J]. 环境科学, 2003, **24**(2): 156-160.
- [21] Stentiford E I. Composting control: principles and practice [A]. In: de Bertoldi M, Sequi P, Lemmes B, *et al* (Eds.). *The Science of Composting* [C]. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1996. 49-59.
- [22] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 5-14.
- [23] 李帆, 朱宏斌, 郭熙盛, 等. 畜禽粪便高温堆肥过程中氨挥发的机理及控制 [J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(25): 10996-10997.
- [24] 姚岚, 王成端, 徐灵. 秸秆与污泥混合好氧堆肥研究 [J]. 西南科技大学学报 (自然科学版), 2008, **23**(3): 53-56.
- [25] Bishop P L, Godfrey C. Nitrogen transformations during sludge composting [J]. *Biological Cycle*, 1983, **24**(5): 34-39.
- [26] Mathur S P. Composting processes [A]. In: Martin A M (Ed.). *Bioconversion of waste materials to industrial products* [M]. New York: Elsevier, 1991.
- [27] 金志刚, 屈计宁. 硝化细菌富集技术分析及其方法研究 [J]. 上海环境科学, 1998, **17**(8): 16-19.
- [28] 任丽梅, 贺琪, 李国学, 等. 氢氧化镁和磷酸混合添加剂在模拟堆肥中的保氮效果研究及其经济效益分析 [J]. 农业工程学报, 2008, **24**(4): 225-228.
- [29] Tiquia S M, Tam N F Y. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge [J]. *Bioresource Technology*, 1998, **65**(1-2): 43-49.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorous in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DTS	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行