

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                |                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 北京不同污染事件期间气溶胶光学特性 .....                                                        | 施禅臻, 于兴娜, 周斌, 项磊, 聂皓浩 (4139)                     |
| 秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析 .....                                             | 张岩, 张洪海, 杨桂朋 (4146)                              |
| 中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征 .....                                                   | 杨毅红, 陶俊, 高健, 李雄, 施展, 韩保新, 谢文彰, 曹军骥 (4152)        |
| 改进的大气 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O、CO 在线观测 FTIR 系统 ..... | 夏玲君, 刘立新, 周凌晔, 方双喜, 王红阳, 张振波 (4159)              |
| 长沙市郊大气 CH <sub>4</sub> 浓度变化特征 .....                                            | 刘鲁宁, 王迎红, 徐小娟, 王卫东, 王跃思 (4165)                   |
| 麦草及其烟尘中正构烷烃的组成 .....                                                           | 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹 (4171)                           |
| 过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭 .....                                                        | 杨世迎, 王雷雷, 冯琳玉, 赵腊娟, 石超 (4178)                    |
| 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征 .....                                                | 钟佳, 魏源送, 赵振凤, 应梅娟, 周国胜, 熊建军, 刘培财, 葛振, 丁刚强 (4186) |
| 长江口沿岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究 .....                                                  | 顾丽军, 杨毅, 刘敏, 聂明华, 李涛, 侯立军 (4195)                 |
| 海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价 .....                                             | 吕书丛, 张洪, 单保庆, 李立青 (4204)                         |
| 汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征 .....                                       | 东口朋宽, 史江红, 张晖, 刘晓薇 (4211)                        |
| 基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析 .....                                              | 李凯, 曾凡棠, 房怀阳, 林澍 (4218)                          |
| 合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析 .....                                                   | 戴梅红, 李田, 张伟 (4226)                               |
| 微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究 .....                                             | 随伟伟, 丁海兵, 杨桂朋, 陆小兰, 李文娟, 孙立群 (4231)              |
| 太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响 .....                                                     | 马久远, 王国祥, 李振国, 许宽, 周锋, 张佳 (4240)                 |
| 表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究 .....                                                        | 秦晶, 高甫威, 谢慧君 (4251)                              |
| 带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究 .....                                                       | 王亚, 张春华, 王淑, 申连玉, 葛滢 (4257)                      |
| 铜改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究 .....                                           | 李佳, 林建伟, 詹艳慧 (4266)                              |
| 底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究 .....                                                        | 任朝亮, 宋进喜, 杨小刚, 薛健 (4275)                         |
| 铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成: 氯化化和溴化比较 .....                                                | 田川, 郭婷婷, 刘锐平, William Jefferson, 刘会娟, 曲久辉 (4282) |
| 天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析 .....                                                    | 徐磊, 俞文正, 梁亮, 王彤 (4290)                           |
| DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响 .....                                                  | 丰桂珍, 董秉直 (4295)                                  |
| 零价铁去除废水中的汞 .....                                                               | 周欣, 张进忠, 邱昕凯, 王定勇 (4304)                         |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究 .....           | 周红艺, 梁思, 曾思思, 雷双健 (4311)                         |
| 不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究 .....                                               | 李政剑, 石宝友, 王东升 (4319)                             |
| 氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用 .....                                                 | 郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 方巧, 杨孟娟, 王虹 (4325)                |
| 改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究 .....                                                      | 吴艳, 罗汉金, 王侯, 张子龙, 王灿, 王雨微 (4333)                 |
| 经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题 .....                                            | 朱健, 吴庆定, 王平, 李科林, 雷明婧, 张伟丽 (4341)                |
| 硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响 .....                                                     | 刘妍妍, 龙焰, 尹华, 叶锦韶, 何宝燕, 张娜 (4349)                 |
| 硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究 .....                                                         | 张丽, 黄勇, 袁怡, 李祥, 刘福鑫 (4356)                       |
| 硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究 .....                                                         | 袁怡, 黄勇, 李祥, 张春蕾, 张丽, 潘杨, 刘福鑫 (4362)              |
| UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析 .....                                                  | 赵健慧, 张百惠, 李宁, 王兵, 李永峰 (4370)                     |
| 响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价 .....                                                 | 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 孙德智 (4376)                         |
| 高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应 .....                                                        | 刘炎, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (4386)                          |
| NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究 .....                                            | 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4392)        |
| 近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征 .....                                                | 章明奎, 常跃畅 (4399)                                  |
| 浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨 .....                                                    | 黄春雷, 宋明义, 魏迎春 (4405)                             |
| 黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征 .....                                              | 孙文广, 甘卓亭, 孙志高, 李丽丽, 孙景宽, 孙万龙, 牟晓杰, 王玲玲 (4411)    |
| 崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究 .....                                               | 孙阳昭, 王学彤, 张媛, 孙延枫, 李梅, 马中 (4420)                 |
| 福建戴云山土壤有机氯农药残留及空间分布特征 .....                                                    | 瞿程凯, 祁士华, 张莉, 黄焕芳, 张家泉, 张原, 杨丹, 刘红霞, 陈伟 (4427)   |
| 电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平 .....                                            | 邵科, 尹文华, 朱国华, 巩宏平, 周欣, 王玲, 刘劲松 (4434)            |
| 外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性 .....                                               | 蔡荟梅, 彭传燧, 陈静, 侯如燕, 宛晓春 (4440)                    |
| 丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用 .....                                                  | 赵仁鑫, 郭伟, 付瑞英, 赵文静, 郭江源, 毕娜, 张君 (4447)            |
| 丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果 .....                                                 | 李少朋, 毕银丽, 孔维平, 王瑾, 余海洋 (4455)                    |
| 超积累植物垂序商陆 ( <i>Phytolacca americana</i> L.) 吸收锰机制的初步探讨 .....                   | 徐向华, 李仁英, 刘翠英, 施积炎, 林佳 (4460)                    |
| <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 对硫化汞的生物利用性研究 .....                           | 陈艳, 王卉, 司友斌 (4466)                               |
| 基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究 .....                                            | 蒋宝, 崔晓勇 (4473)                                   |
| 不同结构有机磷在 (氢) 氧化铝表面的吸附与解吸特征 .....                                               | 柳飞, 张延一, 严玉鹏, 刘凡, 谭文峰, 刘名茗, 冯雄汉 (4482)           |
| 煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究 .....                                                     | 熊金钰, 李寒旭, 董众兵, 张颂, 钱宁波, 武成利 (4490)               |
| 植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应 .....                                                       | 杨新萍, 赵方杰 (4495)                                  |
| 《环境科学》征订启事 (4239)      《环境科学》征稿简则 (4369)      信息 (4225, 4265, 4303, 4375)      |                                                  |

# 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征

钟佳<sup>1</sup>, 魏源送<sup>1\*</sup>, 赵振凤<sup>2</sup>, 应梅娟<sup>2</sup>, 周国胜<sup>2</sup>, 熊建军<sup>2</sup>, 刘培财<sup>2</sup>, 葛振<sup>1,3</sup>, 丁刚强<sup>4</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100038; 3. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 100044; 4. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 目前我国污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体( $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ )与氨气( $\text{NH}_3$ )排放数据极其缺乏, 难以满足温室气体减排和氮素保存的需求. 本研究通过原位观测, 首次开展污泥堆肥及其土地利用全过程温室气体和氨气排放特征的研究. 结果表明, 基于机械翻堆条垛(turning windrow, TW)工艺的全过程温室气体排放因子( $\text{eCO}_2/\text{干污泥}$ ,  $196.21 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )是基于强制通风+机械翻堆条垛(aerated turning pile, ATP)工艺的 1.61 倍.  $\text{N}_2\text{O}$ 主要来自土地利用过程,  $\text{CH}_4$ 主要来自堆肥过程. ATP 工艺的温室气体排放当量( $\text{eCO}_2/\text{干污泥}$ ,  $12.47 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )远低于 TW 工艺( $\text{eCO}_2/\text{干污泥}$ ,  $86.84 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ). TW 工艺的氨气排放因子( $\text{NH}_3/\text{干污泥}$ ,  $6.86 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )略高于 ATP 工艺( $\text{NH}_3/\text{干污泥}$ ,  $6.63 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ).  $\text{NH}_3$ 是全过程最主要的 N 素损失形式, 其中 TW 和 ATP 堆肥工艺因  $\text{NH}_3$  排放造成的氮素损失相当, 均约占堆料 TN 损失量的 30%. 而  $\text{N}_2\text{O}$ 和  $\text{CH}_4$  带来的 N、C 元素的损失可以忽略不计. 这些结果表明 ATP 是一种环境友好的污泥堆肥工艺.

**关键词:** 污泥堆肥; 土地利用; 温室气体; 氨气; 排放因子

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)11-4186-09

## Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost

ZHONG Jia<sup>1</sup>, WEI Yuan-song<sup>1</sup>, ZHAO Zhen-feng<sup>2</sup>, YING Mei-juan<sup>2</sup>, ZHOU Guo-sheng<sup>2</sup>, XIONG Jian-jun<sup>2</sup>, LIU Pei-cai<sup>2</sup>, GE Zhen<sup>1,3</sup>, DING Gang-qiang<sup>4</sup>

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100038, China; 3. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** There is a great uncertainty of greenhouse gas (GHG) reduction and nitrogen conservation from the full process of sludge composting and land application of compost in China due to the lack of emission data of GHG such as  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  and ammonia ( $\text{NH}_3$ ). The purpose of this study is to get emission characteristics of GHGs and  $\text{NH}_3$  from the full process with on-site observation. Results showed that the total GHG emission factor from full process of the turning windrow (TW) system ( $\text{eCO}_2/\text{dry sludge}$ ,  $196.21 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ) was 1.61 times higher of that from the ATP system. Among the full process,  $\text{N}_2\text{O}$  was mostly from the land application of compost, whereas  $\text{CH}_4$  mainly resulted from the sludge composting. In the sludge composting of ATP, the GHG emission equivalence of the ATP ( $\text{eCO}_2/\text{dry sludge}$ ,  $12.47 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ) was much lower than that of the TW ( $\text{eCO}_2/\text{dry sludge}$ ,  $86.84 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ). The total  $\text{NH}_3$  emission factor of the TW ( $\text{NH}_3/\text{dry sludge}$ ,  $6.86 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ) was slightly higher than that of the ATP ( $\text{NH}_3/\text{dry sludge}$ ,  $6.63 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ).  $\text{NH}_3$  was the major contributor of nitrogen loss in the full process. During the composting, the nitrogen loss as  $\text{NH}_3$  from both TW and ATP was nearly the same as 30% of TN loss from raw materials, and the N and C loss caused by  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  were negligible. These results clearly showed that the ATP was a kind of environmentally friendly composting technology.

**Key words:** sludge composting; land application; greenhouse gas; ammonia; emission factor

据统计,截止 2010 年底,我国城镇污水日处理能力达到 1.25 亿  $\text{m}^3$ ,城市污水处理率 82%,年产污泥(含水率 80%)达 2 039.87 万 t,但 2010 年污泥无害化处理处置率仅为 25.1%<sup>[1]</sup>,而“十二五”规划要求 2015 年全国污泥无害化处理率有显著的提高,要求 36 个重点城市的污泥无害化处理率达到 80%<sup>[2]</sup>. 因此,亟需有效的污泥处理处置方式解决污泥产量增加和处理能力提标的双重压力. 污泥富

含有机质、N、P、K 等营养元素,污泥堆肥及其土地利用广泛应用于污泥的无害化、减量化、资源化处理<sup>[3]</sup>. 目前,我国污泥处置方式主要有土地利用

收稿日期: 2013-02-26; 修订日期: 2013-04-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07208-07); 国家自然科学基金项目(21377151)

作者简介: 钟佳(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为有机固体废物废弃物资源化, E-mail: zhj0735@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: ysw@rcees.ac.cn

(48.28%，其中农用 44.83%)、土地填埋(34.48%)、弃置(13.79%)和焚烧(3.45%)<sup>[4]</sup>，其中土地利用所占比例低于美国(55%)<sup>[5]</sup>，与欧盟(49%)<sup>[6]</sup>相当。所以，污泥堆肥及其土地利用将是今后较长一段时期内我国污泥无害化处理与资源化利用的主要发展方向之一。然而，污泥堆肥和土地利用过程因 NH<sub>3</sub> 和温室气体(N<sub>2</sub>O)的排放会导致氮素严重损失，其中 NH<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub>O 在堆肥过程损失可占堆料初始总氮(TN)的 46.8%~77.4% 和 2.2%<sup>[7,8]</sup>。而且 NH<sub>3</sub> 不仅是堆肥过程的主要臭气组分，也是酸雨的重要影响因素。另有我国排放清单表明，2005 年废水废物处理的温室气体排放量为 1.25 亿 tCO<sub>2</sub>eq(占总排放量的 1.5%)<sup>[9]</sup>；1994 年为 1.93 亿 tCO<sub>2</sub>eq(占总排放量的 6.3%)<sup>[10]</sup>。而这些温室气体估算的排放因子多采用政府间气候变化框架委员会(IPCC)的缺省值。因此，当前我国污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体排放清单仍存在很大的不确定性。

许多研究调查了有机固废堆肥过程<sup>[11,12]</sup>和堆肥产品土地利用过程<sup>[13,14]</sup>的温室气体排放特征，但基本是对单一过程温室气体排放的考察，不仅缺少对温室气体和氨气排放的综合研究及环境评价，更

缺乏对堆肥及其土地利用全过程的研究。因此，本研究通过原位观测，首次开展污泥堆肥过程及其土地利用全过程温室气体(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)与 NH<sub>3</sub> 排放特征的研究，以期为我国污泥处理处置的温室气体减排和氮素保存提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 堆肥处理及土地利用工艺流程

1.1.1 污泥堆肥

污泥堆肥在北京某污泥处置厂进行。脱水污泥集中堆置于晾晒场，待含水率降至 70% 以下用作堆肥原料，脱水污泥、熟料(堆肥成品)、蘑菇渣的混合情况见表 1。选用了两种堆肥工艺：机械翻堆条垛(turning windrow, TW)和强制通风+机械翻堆(aerated turning pile, ATP)，它们的堆肥周期(包括升温、高温期)分别为 30 d 和 16 d，翻堆机(Backhus 17.0, 德国 Backhus 公司)定期翻堆(翻堆频率每 2~3 d 1 次，ATP 同时进行强制通风)，待堆料的理化指标均稳定后出垛，其中一部分堆肥产品出厂，另一部分堆肥产品作为熟料与脱水污泥返混进入下一轮堆肥。污泥经堆肥处理后，污泥质量减量比例约为 30%。TW 和 ATP 的堆肥工艺流程见图 1。

表 1 污泥堆料组成及其特性  
Table 1 Composition and properties of sludge composting

| 项目   | 指标                                 | 原料     |        |         | 初始混料   |          |
|------|------------------------------------|--------|--------|---------|--------|----------|
|      |                                    | 污泥     | 蘑菇渣    | 熟料      | TW     | ATP      |
| 理化指标 | pH                                 | 7.63   | 6.79   | 8.80    | 8.25   | 8.22     |
|      | 含水率/%                              | 67.71  | 27.78  | 53.14   | 64.83  | 57.48    |
|      | 电导率/μS·cm <sup>-1</sup>            | 1 223  | 2 413  | 3 834.9 | 839.75 | 1 349.50 |
|      | 有机质/%                              | 47.10  | 90.68  | 43.17   | 48.76  | 51.03    |
|      | TN (DW)/g·kg <sup>-1</sup>         | 26.55  | 29.27  | 22.24   | 26.64  | 23.13    |
|      | TC (DW)/g·kg <sup>-1</sup>         | 210.63 | 383.48 | 182.15  | 205.77 | 196.21   |
|      | C:N 比                              | 7.93   | 13.1   | 8.19    | 7.73   | 8.54     |
|      | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> :TN 比 | 0.08   | 0.16   | 0.34    | 0.29   | 0.15     |
| 配料   | 污泥/t                               |        |        |         | 80     | 140      |
|      | 熟料/t                               |        |        |         | 80     | 90       |
|      | 蘑菇渣/t                              |        |        |         | 40     | 28       |
|      | 总计/t                               |        |        |         | 200    | 258      |

污泥堆肥试验于 2012 年 7~8 月进行。堆体呈三角棱形，TW 堆体尺寸(长×宽×高)约 70 m×4.0 m×1.0 m，体积 140 m<sup>3</sup>；ATP 堆体尺寸(长×宽×高)约 90 m×4.5 m×1.0 m，体积 202.5 m<sup>3</sup>。ATP 底部中间设宽 10 cm 的沟型风道，每天通风 20 h(白天持续通风 8 h，夜晚间歇通风，其开机:关机时间=3:1，通风量为 50 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>)。堆肥期间没有补水。

1.1.2 污泥堆肥土地利用

因 TW 和 ATP 工艺的污泥堆肥产品特性基本

相同，故本研究对此未加区分，而是采用这两者的混合物作为供试堆肥品进行土地利用试验。因这些供试堆肥品存放了约 2 个月，含水率下降至 19.53% (表 2)。

土地利用试验于 2012 年 10~11 月在北京某蔬菜温室中进行，供试蔬菜为樱桃萝卜(*Raphanus sativus* L.)由北京中蔬园艺良种研究开发中心提供，种植试验期共 30 d，分为发芽期(约 8 d)、幼苗期(约 8 d)和生长期(约 13 d)这 3 个阶段。按照传统

土地利用过程:温室气体采集采用组合不锈钢静态采样箱,由底座和顶箱两部分构成。底座尺寸(长×宽×高)50 cm×50 cm×20 cm,为回型水封槽。为去除边缘效应区域,在每块试验田的正中间水平埋入底座,上沿水封槽高出土壤表面5 cm。顶箱尺寸(长×宽×高)50 cm×50 cm×50 cm,内接数

字温度计探头. 箱体外包一层保护膜, 防止太阳辐射下采样箱壁温度升高影响观测结果. 箱侧面装有采气口和防止箱内产生负压的导气管. 因排放浓度低, 气样每间隔 5 min 采集一次, 共 5 次. 气样采集频率为前 4 d 每天一次, 第 6~21 d 每 2 d 一次, 随后于第 23、26 和 29 d 采样.

### (3) 堆料、土壤和蔬菜的样品采集

堆肥过程: 堆料样品于各采样区中心表层 10 cm 下不同高度各采取 4 个样, 混合后用四分法取回密封冷冻保存. 采集时间 TW 条垛分别为第 1、5、9、13、17、21、25、29 d, ATP 条垛分别为第 1、3、5、9、13、15 d. 并于堆肥结束后采集堆肥成品用于土地利用试验.

土地利用过程: 土壤样品分别在试验开始前、施肥后、植物生长期和收获时共采集 4 次, 在气体样品采集结束后按照五点“S”法于表土下 10 cm 处取样. 樱桃萝卜蔬菜样品在收获前随机采集 10 株.

### 1.2.2 气体样品分析

采用气相色谱仪 (Agilent 4890, Agilent Technologies, USA) 的氢火焰离子化检测器 (flame ionization detector, FID) 和电子捕获检测器 (electron capture detector, ECD) 分别定量分析  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度. 将得到的色谱峰面积根据标气浓度转换成样品浓度.  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$  的累积排放量均由公式 (2)~(5) 计算得到:

$$Q = A \times \sum (\Delta f_i \times t_i) \quad (2)$$

$$f_i = h \times (\Delta c / \Delta t) \times M \times 60 \times 273 / [273 + (T_1 + T_2) / 2] \quad (3)$$

$$\Delta f_i = (f_i + f_{i+1}) / 2 \quad (4)$$

$$t_i = 24 \times (\text{Day}_{i+1} - \text{Day}_i) \quad (5)$$

式中,  $Q$  为采用微元加权计算气体排放通量在各检测时间段内的  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  累积排放量 (以 N 或 C 元素质量计), mg;  $t$  为相邻两次测定的间隔时间, h;  $i$  为取样次数.  $f$  为  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  的排放通量 (原子质量表示),  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ;  $h$  是静态箱高度, m;  $\Delta c / \Delta t$  为单位时间气体样品的浓度变化量,  $\times 10^{-6} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $M$  指 1 mol  $\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{CH}_4$  对应的 N 或 C 元素摩尔质量,  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $273 / [273 + (T_1 + T_2) / 2]$  为绝对温度校正系数;  $T_1$  和  $T_2$  分别是第一个和最后一个样品时采样箱内气体温度,  $^{\circ}\text{C}$ . 因 ATP 工艺每天有 4 h 不通风, 因此不通风状态的气体排放通量依据当天 TW 工艺排放通量折算累计排放量.

按照 IPCC 2007 年第四次评估报告<sup>[16]</sup> 计算温

室气体 ( $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ ) 的  $\text{CO}_2$  当量 ( $\text{eCO}_2$ ), 它们的当量系数分别为  $1 \text{ kg } \text{CH}_4 = 25 \text{ kg } \text{eCO}_2$ ,  $1 \text{ kg } \text{N}_2\text{O} = 298 \text{ kg } \text{eCO}_2$ . 应用 IBM SPSS® 20 统计分析数据.

## 2 结果与分析

### 2.1 污泥堆肥过程

#### 2.1.1 堆体温度和物化参数

如图 2 所示, TW 堆体的温度逐渐升至  $60^{\circ}\text{C}$ , 在第 24 d 之前表层 > 中层 > 底层, 之后中层温度超过表层并持续升温. ATP 堆体不仅表层温度 > 中层, 而且平均堆温低于 TW, 底层温度升温不明显, 因为 ATP 堆体底部受通风影响, 难以积累热量, 造成表层、中层温度偏高.

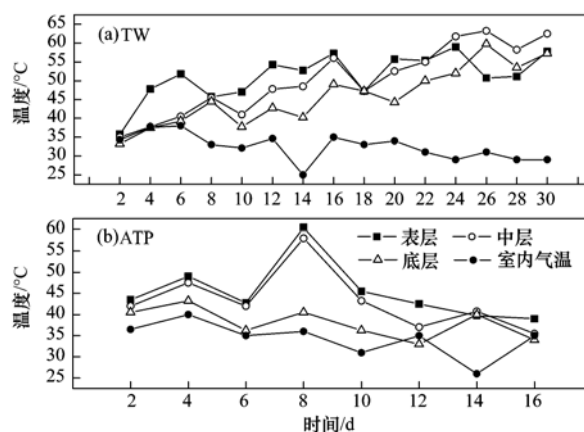


图 2 污泥堆肥过程中的堆体温度及环境温度变化

Fig. 2 Changes of pile temperature and ambient temperature during sludge composting

堆料均呈碱性, TW 和 ATP 堆料的 pH 值分别在 8.26~9.24 和 8.22~9.17 之间波动. 堆肥过程 TW 和 ATP 堆料的含水率分别降低了 19.50% 和 9.63%, 有机质分别减少了 14.70% 和 9.96%. 在相同时间内 (前 16 d), 受强制通风与机械翻堆共同作用, ATP 工艺的干化效果优于 TW 工艺. 最后 TW 和 ATP 堆料的含水率分别降至 52.19% 和 54.09%, 有机质分别降至 43.52% 和 43.90% (图 3).

#### 2.1.2 温室气体 ( $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ ) 排放

如图 4 所示, TW 堆体  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量均在堆肥前期出现峰值, 随后而降低.  $\text{CH}_4$  最大排放通量 [ $1.78 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] 出现在堆肥第 4 d, 平均排放通量为  $275.51 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ;  $\text{N}_2\text{O}$  最大排放通量 [ $23.07 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] 出现在第 2 d, 平均排放通量为  $2.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .

强制通风堆肥有周期短、脱水快、臭气易控制等优点<sup>[17]</sup>. 强制通风影响  $\text{CH}_4$  的产生与排放, ATP 堆

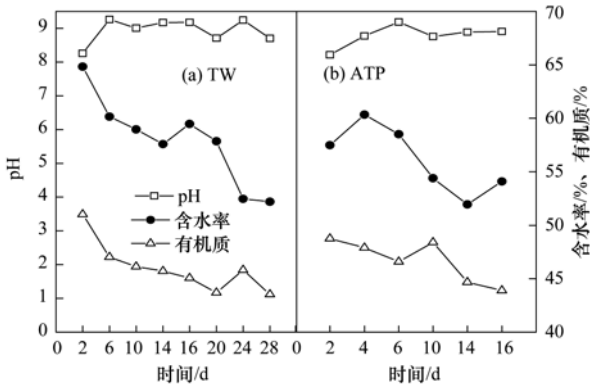


图3 污泥堆肥过程中堆料 pH、电导率、含水率、有机质的变化  
Fig. 3 Changes of pH value, electric conductivity, moisture content and organic matter of sludge composting

体的  $\text{CH}_4$  出现了个别负通量,平均排放通量为  $6.59 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ; 而  $\text{N}_2\text{O}$  的排放受硝化和反硝化作用共同影响,其排放通量波动无规律,分别在第 2、10 和 14 d 出现 3 个峰值 [ $1.41$ 、 $1.26$ 、 $0.91 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ], 平均排放通量为  $0.61 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .

2.1.3 氨气排放

如图 5 所示, TW 堆体的  $\text{NH}_3$  排放主要受低 C/N 比、高 pH 值、堆体温度等因素共同影响,使  $\text{NH}_3$  排放通量在堆肥初期显著上升.  $\text{NH}_3$  排放通量在前 12 d 缓慢上升至峰值  $1644.2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 之后逐渐降低, 平均排放通量为  $433.22 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 累积排放的  $\text{NH}_3$  量为  $113.24 \text{ kg N}$  (占堆料初始 TN 量的 4.44%).

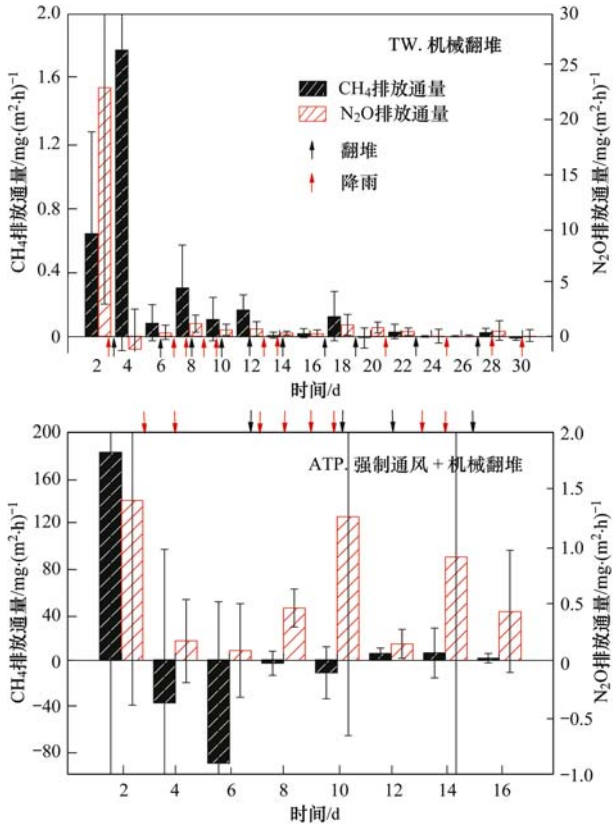


图4 TW 和 ATP 堆体的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量  
Fig. 4 Fluxes of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  from TW and ATP piles

ATP 堆体的  $\text{NH}_3$  排放通量变化不规则,第 14 d 排放通量达到峰值  $1021.4 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 平均排放通量为  $657.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 累积排放的  $\text{NH}_3$  量为  $79.47 \text{ kg N}$  (占堆料初始 TN 量的 2.18%), 低于 TW

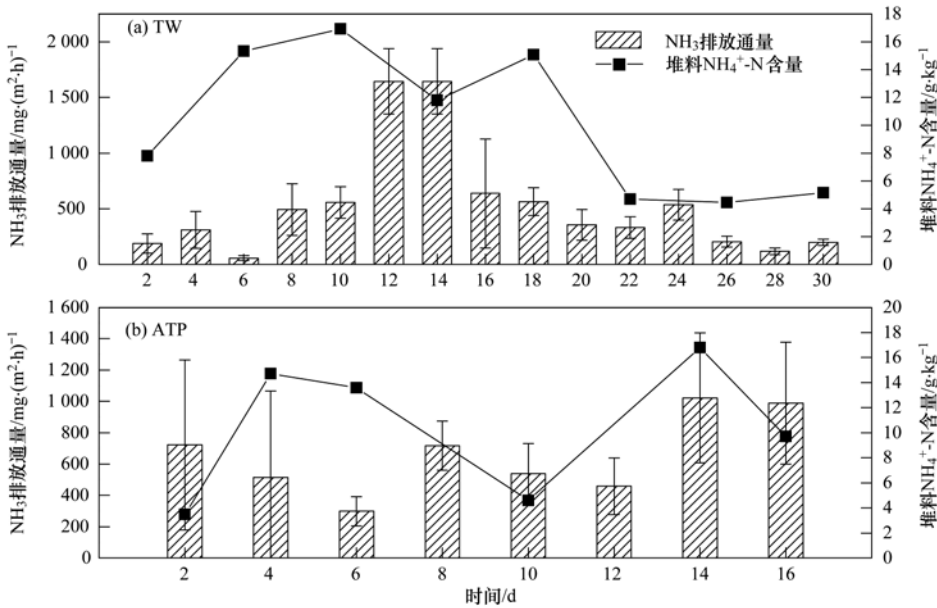


图5 TW 和 ATP 堆体的  $\text{NH}_3$  排放通量和堆料中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量(干重)  
Fig. 5 Fluxes of  $\text{NH}_3$  emission and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentration(dry weight) of TW and ATP piles



堆体.

## 2.2 堆肥品土地利用过程

### 2.2.1 温室气体( $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ )排放

如图 6 所示,SC(污泥堆肥品)处理和 CK(空白对照)处理的  $\text{CH}_4$  平均排放通量分别为  $0.023 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $0.072 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 其中 96.03%、59.36% 的  $\text{CH}_4$  累积排放量发生在樱桃萝卜生长期(第 18 d 之后),  $\text{CH}_4$  累积排放量依次为 CK(99.92 mg) > SC(23.84 mg), 占土壤初始 TC 均低于 0.001%, 且  $t$  检验表明两者不存在显著性差异 ( $P=0.871$ ).

$\text{N}_2\text{O}$  排放主要集中在试验的前 20 d, 随后平缓下降. SC、CK 处理的平均排放通量分别为  $0.487 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $0.140 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .  $t$  检验表明 SC 与 CK 的  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量存在显著性差异 ( $P=0.000$ ).

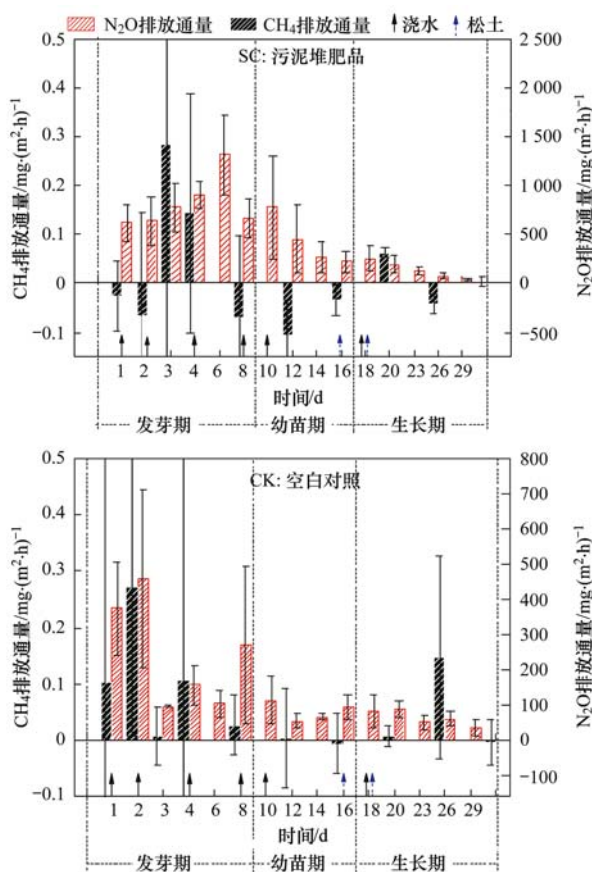


图 6 SC 和 CK 处理的温室气体( $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )排放通量

Fig. 6 Fluxes of GHG ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) from SC and CK tests

### 2.2.2 氨气排放

如图 7 所示,两组处理的  $\text{NH}_3$  平均排放通量和变化范围分别如下: SC  $17.77 (1.47 \sim 60.25) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , CK  $13.79 (2.49 \sim 50.79)$

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .  $\text{NH}_3$  累积排放量依次为 SC (27.28 g) > CK (19.09 g), CK 和 SC 处理以  $\text{NH}_3$  排放导致的 N 素损失分别占土壤 TN 含量的 1.38% 和 1.82%. 相对 CK, SC 处理因  $\text{NH}_3$  排放导致的净损失为 8.19 g, 占污泥堆肥品 TN 量的 7.22%. 堆肥品施用后, SC 处理的土壤 pH 值 (8.23) 高于 CK 处理 (8.15), 可见种植初期土壤在碱性环境、高含 N 水平下利于  $\text{NH}_3$  挥发. 此外, 进入植物成熟期时因冬季气温转凉、空气相对湿度升高, 且土壤含水率因无浇水而下降, 增加了土壤的通透性, 这也利于氨化作用, 促进了  $\text{NH}_3$  挥发.

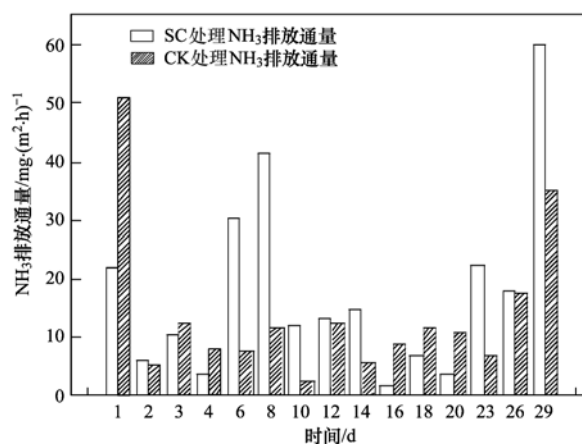


图 7 SC 和 CK 处理的氨气排放通量

Fig. 7 Fluxes of  $\text{NH}_3$  from SC and CK tests

## 2.3 全过程的温室气体与氨气排放特征

堆肥过程 TW 堆体的  $\text{CH}_4$  累积排放 62.85 kg (占堆料初始 TC 量的 0.32%),  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放 468.79 g (占堆料初始 TN 量的 0.018%). ATP 堆体的  $\text{CH}_4$  累积排放 14.9 kg (占堆料初始 TC 量的 0.064%),  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放 181.6 g (占堆料初始 TN 量的 0.0066%), 累积排放的 C、N 素占初始 TC、TN 的比例均远低于 TW 堆体.

土地利用过程  $\text{CH}_4$  累积排放量依次为 CK (99.92 mg) > SC (23.84 mg), 占土壤初始 TC 均低于 0.001%, 同对照处理 CK 相比, 可认为 SC 处理因污泥堆肥品添加而产生的  $\text{CH}_4$  排放潜势为 0.  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量依次为 SC (670.69 mg) > CK (180.57 mg), 分别占土壤初始 TN 量的 0.05% 和 0.015%, 相对 CK, SC 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  净排放量为 490.12 mg, 占污泥堆肥品 TN 量的 0.524%.

如表 3 所示, TW 和 ATP 工艺全过程直接产生的总温室气体当量 ( $\text{eCO}_2/\text{干污泥}$ ) 分别为  $196.21 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$  和  $121.84 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ . 全过程中土地利用的温室



气体排放当量更大, N<sub>2</sub>O 是主要温室气体排放源. 其中 CH<sub>4</sub> 均主要来自于堆肥过程, 分别占 TW 和 ATP 工艺总 CH<sub>4</sub> 排放量的 99. 52% 和 96. 60%; N<sub>2</sub>O 主要来自土地利用过程, 分别占它们总 N<sub>2</sub>O 排放量的 92. 91% 和 98. 36%.

表 3 各过程的温室气体排放因子<sup>1)</sup>

Table 3 GHG emission factors of the full process of sludge composting and compost application

| 过程   | 气体/干污泥<br>/kg·t <sup>-1</sup> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | eCO <sub>2</sub> |
|------|-------------------------------|-----------------|------------------|------------------|
| 堆肥   | TW                            | 3. 14           | 0. 028           | 86. 84           |
|      | ATP                           | 0. 43           | 0. 006 1         | 12. 47           |
| 土地利用 |                               | 0. 00           | 0. 37            | 109. 34          |
| 全过程  | TW                            | 3. 14           | 0. 39            | 196. 21          |
|      | ATP                           | 0. 43           | 0. 37            | 121. 83          |

1) 温室气体排放因子 = 温室气体累积排放总量/干污泥质量

在 TW、ATP 工艺的全过程中, 分别有 57. 00% 和 58. 97% 的 NH<sub>3</sub> 排放来源于土地利用. 各过程的 NH<sub>3</sub> 排放因子 (NH<sub>3</sub>/干污泥) 如下: ①堆肥过程: TW、ATP 工艺分别共排放 2. 95 kg·t<sup>-1</sup> 和 2. 72 kg·t<sup>-1</sup>; ②土地利用过程: 相对 CK 处理, SC 净排放 3. 91 kg·t<sup>-1</sup>. 这些结果表明, 虽然土地利用过程的 NH<sub>3</sub> 排放通量远低于堆肥过程, 但其基于吨干污泥计算的排放潜势却高于堆肥过程, 值得关注.

3 讨论

3.1 堆肥过程

堆肥期间, TW 工艺的堆料 TN (DW) 从初始的 26. 64 g·kg<sup>-1</sup> 下降至结束的 22. 97 g·kg<sup>-1</sup>, 损失了 13. 78%, 其中 NH<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的累积损失氮素量分别占堆料 TN 损失量的 32. 25% 和 0. 13%; ATP 工艺的堆料 TN (DW) 由初始的 23. 13 g·kg<sup>-1</sup> 降至结束的 21. 51 g·kg<sup>-1</sup>, 损失了 7. 0%, 其中 NH<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的累

积损失氮素量分别占堆料 TN 损失量的 30. 13% 和 0. 095%, 略低于 TW 堆体.

TW 的堆温不断升高不利于硝化、反硝化、产甲烷反应进程, 造成 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放通量显著减少. ATP 的堆温偏低, 通风充氧条件好, 抑制了厌氧产 CH<sub>4</sub>; 同时, 第 4~6 d 时堆料含水率受降雨影响而略微升高, 可能促进 CH<sub>4</sub> 吸收<sup>[18]</sup> 和甲烷氧化菌增长<sup>[19]</sup>, 抵消 CH<sub>4</sub> 排放. 这造成了 TW 堆体的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 平均排放通量分别是 ATP 的 4. 65 和 1. 39 倍. 多重线性回归分析结果表明 [式 (6)], TW 堆体的 N<sub>2</sub>O 排放通量与堆料中的氮素形态 (氨氮 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、硝氮 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和亚硝氮 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) 显著相关 ( $R^2 = 0. 908, P = 0. 015$ ), 其中, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 作用最大<sup>[20]</sup>, 是 N<sub>2</sub>O 产生的前体物质<sup>[21]</sup>.

$$f(N_2O) = 937. 34 \times NO_2^- - 24. 26 \times NO_3^- - 0. 11 \times NH_4^+ \quad (6)$$

与此同时, NH<sub>3</sub> 排放受堆体的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 变化影响大, 是主要的 N 素气体损失源<sup>[22]</sup>. TW 堆体升温期 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 含量随氨化作用上升, 氨化细菌活性增强<sup>[23]</sup>, 加之 pH > 8、C:N 比低 (8. 49~9. 01), 共同影响了 NH<sub>3</sub> 的挥发. 在通风条件下, ATP 的 NH<sub>3</sub> 平均排放潜势大于 TW 条垛, NH<sub>3</sub> 更容易从堆体扩散和排放至大气.

3.2 土地利用过程

如图 8 所示, 进入秋冬季, 土壤表层下 5 cm 处温度、温室内温度、地表温度均明显下降, 但相对湿度随浇水量和气温下降而略有提升.

Pearson 相关分析结果表明, SC 处理的 N<sub>2</sub>O 排放通量与温度参数 (土壤温度、室内气温和地表温度) 显著相关 ( $P < 0. 01$ ), 低温条件利于 N<sub>2</sub>O 排放; 而 SC 和 CK 处理的 N<sub>2</sub>O 排放通量均与堆肥时间呈显著

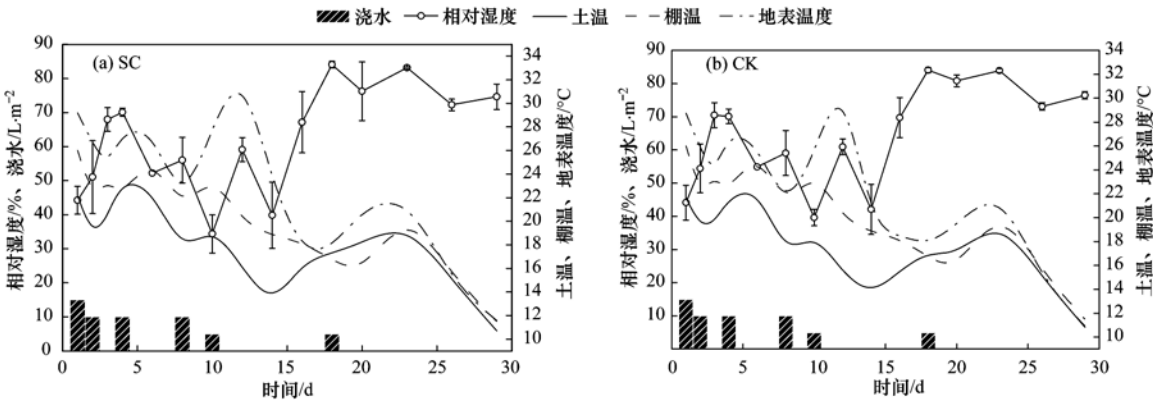


图 8 土壤温度, 室内温度, 地表温度, 浇水灌溉量和相对湿度的变化  
Fig. 8 Changes of soil, greenhouse and surface temperatures, irrigation and relative humidity

负相关( $P < 0.05$ )。

3.3 温室气体减排与氮素保存

本研究结果不仅远低于 IPCC 推荐的堆肥过程温室气体排放因子缺省值( $\text{CH}_4/\text{干污泥}, 10 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ;  $\text{N}_2\text{O}/\text{干污泥}, 0.6 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )<sup>[24]</sup>,而且也均低于相关发表研究的结果(表 4)。例如,污泥强制通风静态堆肥的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放占堆料初始 TN 的 0.7%<sup>[7]</sup>, $\text{CH}_4$ 排放为堆料初始 TC 的 0.003%~0.26%<sup>[25]</sup>;条垛堆肥处理橄榄油生产废水污泥时, $\text{CH}_4$ 排放量为堆料初

始 TC 的 1.47%~4.56%,但增加木质辅料可减少  $\text{CH}_4$  排放<sup>[26]</sup>。

此外,有机固体废弃物堆肥处理中 N 素迁移转化和保氮固磷措施是当前的研究热点,已有研究表明,添加干污泥混料<sup>[27]</sup>、镁盐<sup>[28]</sup>、改性赤泥<sup>[29]</sup>和采用间歇通风<sup>[30]</sup>可实现  $\text{NH}_3$  减排。本研究的污泥堆肥过程  $\text{NH}_3$  损失(堆料初始 TN 量的 2.18%~4.44%)低于同类研究结果(堆料初始 TN 的 46.8%~77.4%<sup>[8]</sup>)。

表 4 文献报道有机固废堆肥过程的温室气体排放因子

| Table 4 Literature data of GHG emission factors from organic waste composting operation |                              |             |                                                                |                                                                       |                                                                |                                                  |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------|
| 原料                                                                                      | 堆肥系统与规模                      | 含水率<br>/%   | $\text{CH}_4$ 排放<br>(干污泥)<br>/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ | $\text{N}_2\text{O}$ 排放<br>(干污泥)<br>/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ | $\text{CO}_2$ 当量<br>(干污泥)<br>/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ | 备注                                               | 文献   |
| 污泥                                                                                      | 条垛,140 m <sup>3</sup>        | 64.8        | 3.14                                                           | 0.028                                                                 | 86.84                                                          | TW 条垛                                            | 本研究  |
| 污泥                                                                                      | 强制通风+翻堆,202.5 m <sup>3</sup> | 60.9        | 0.426                                                          | 0.006 1                                                               | 12.47                                                          | ATP 条垛                                           | 本研究  |
| 污泥                                                                                      | 强制通风,18 L                    | 75          | — <sup>1)</sup>                                                | 0.7                                                                   | —                                                              |                                                  | [7]  |
| 废水污泥+木质素                                                                                | 条垛,18 m <sup>3</sup>         | 56.22~53.42 | 31.52~10.14                                                    | —                                                                     | —                                                              | 橄榄油生产                                            | [26] |
| 污泥                                                                                      | 强制通风,300 L                   | 66.2~71.3   | 138.54~182.17                                                  | —                                                                     | —                                                              | 通风量(以干污泥计):<br>1.69~16.63 L·(h·kg) <sup>-1</sup> | [25] |
| 有机固废                                                                                    | —                            | 60          | 10<br>(0.08~20)                                                | 0.6<br>(0.2~1.6)                                                      | 428.80                                                         | 污泥、餐余、园林废物                                       | [24] |
| 牛粪+秸秆                                                                                   | 条垛,40 m <sup>3</sup>         | 70          | 36                                                             | 4.71                                                                  | 2 304.86                                                       |                                                  | [31] |
| 畜禽粪便+秸秆                                                                                 | 条垛,30.5 m <sup>3</sup>       | 60          | 7.49                                                           | 0.077 1                                                               | 368.4±18.5 eCO <sub>2</sub>                                    | 包括生物沼气 CO <sub>2</sub>                           | [32] |
| 畜禽粪便+木屑                                                                                 | 条垛,30.5 m <sup>3</sup>       | 60          | 7.54                                                           | 0.084 2                                                               | 349.2±24.3 eCO <sub>2</sub>                                    | 包括生物沼气 CO <sub>2</sub>                           | [32] |
| 猪粪+蘑菇渣                                                                                  | 条垛,67.5 m <sup>3</sup>       | 72          | 4.51                                                           | 0.006 3                                                               | 114.63                                                         |                                                  | [33] |

1) “—”表示原文无相关数据

3.4 不确定性分析

虽然本研究为充分体现典型性、代表性优化了样品采集方案,但试验数据仍存在不确定性因素。①因工作量巨大,仅观测了两种污泥堆肥工艺的条垛各一条,欠缺平行条垛的观测数据,并且单个条垛(长 70 m~90 m)采样点有限;②试验只是在一个季节进行,不能体现其他季节的差异。例如,堆肥过程观测时间为夏季,堆肥品土地利用观测时间在秋季;③欠缺不同类型的土地利用观测研究。

因此,为了丰富、完善我国污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征研究,今后可从如下方面着手:①开展多点原位观测、改进气体采集与测量技术、提高多种气体测定效率;②开展不同区域、不同季节、不同污泥堆肥及其土地利用类型的原位观测研究

4 结论

(1) 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体排放因子依次为 TW 工艺( $\text{eCO}_2/\text{干污泥}, 196.21$

$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )>ATP 工艺( $\text{eCO}_2/\text{干污泥}, 121.84 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ),其中 $\text{N}_2\text{O}$ 来自土地利用过程(92.91%~98.36%), $\text{CH}_4$ 几乎完全来自堆肥过程。

(2) 全过程  $\text{NH}_3$  排放因子依次为 TW 工艺( $\text{NH}_3/\text{干污泥}, 6.86 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )>ATP 工艺( $\text{NH}_3/\text{干污泥}, 6.63 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ),主要来自土地利用过程(57.00%~58.97%)。

(3) 污泥堆肥过程中 ATP 工艺的 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$  累积排放量均低于 TW 工艺,其中 ATP 工艺的温室气体排放当量( $\text{eCO}_2/\text{干污泥}, 12.47 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )显著低于 TW 工艺( $\text{eCO}_2/\text{干污泥}, 86.84 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ ),TW 和 ATP 堆肥过程中  $\text{NH}_3$  累积排放量分别占堆料 TN 损失量的 32.25%和 30.13%, $\text{N}_2\text{O}$ 和  $\text{CH}_4$  排放导致的氮碳损失几乎可忽略不计。

(4) 土地利用过程中 $\text{N}_2\text{O}$ 是主要的温室气体排放源,分别占 CK 和 SC 处理温室气体排放当量的 96.21%和 99.74%,且 SC 处理的 N 素损失高于 CK 处理,其中 SC 处理因  $\text{NH}_3$  和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放造成的氮素净损失分别为污泥堆肥品初始 TN 量的 7.22%和 0.524%。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城镇排水与污水处理状况公报[R]. 北京: 住房和城乡建设部, 2012.
- [2] 国务院办公厅. “十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划[J]. 中国环保产业, 2012, (6): 4-13.
- [3] Wei Y S, Fan Y B, Wang M J, *et al.* Composting and compost application in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, **30**(4): 277-300.
- [4] 彭琦, 孙志坚. 国内污泥处理与综合利用现状及发展[J]. 能源工程, 2008, (5): 47-50.
- [5] 傅涛. 中国污泥处理处置市场报告(2010版)[R]. 北京: 中国水网/中国固废网, 2010.
- [6] Fytli D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, **12**(1): 116-140.
- [7] Czepiel P, Douglas E, Harriss R, *et al.* Measurements of N<sub>2</sub>O from composted organic wastes [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(8): 2519-2525.
- [8] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1992, **42**(2): 103-111.
- [9] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[R]. 北京. 2013.
- [10] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [11] Recycled Organics Unit. Life cycle inventory and life cycle assessment for windrow composting[R]. Sydney: The University of New South Wales, 2006.
- [12] USEPA. Solid waste management and greenhouse gases: A life-cycle assessment of emissions and sinks [R]. USA: Environmental Protection Agency, 2002.
- [13] He F, Jiang R, Chen Q, *et al.* Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1666-1672.
- [14] Xiong Z Q, Xie Y X, Xing G X, *et al.* Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(12): 2225-2234.
- [15] 郑循华, 徐仲均, 王跃思, 等. 开放式空气 CO<sub>2</sub> 浓度增高影响稻田大气 CO<sub>2</sub> 净交换的静态暗箱法观测研究[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(10): 1240-1244.
- [16] IPCC. 气候变化 2007: 综合报告[R]. 日内瓦: IPCC, 2007.
- [17] 张健, 赵媛, 吴溶, 等. ENS 污泥堆肥工艺及应用实践[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(6): 21-24.
- [18] Maia G D, Day G B, Gates R S, *et al.* Moisture effects on greenhouse gases generation in nitrifying gas-phase compost biofilters[J]. *Water Research*, 2012, **46**(9): 3023-3031.
- [19] Stern J C, Chanton J, Abichou T, *et al.* Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation [J]. *Waste Management*, 2007, **27**(9): 1248-1258.
- [20] 张静蓉, 王淑莹, 尚会来, 等. 硝化过程亚硝态氮氧化阶段的 N<sub>2</sub>O 产生情况[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(3): 25-29.
- [21] He Y W, Inamori Y, Mizuochi M, *et al.* Nitrous oxide emissions from aerated composting of organic waste [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(11): 2347-2351.
- [22] 郑国砥, 高定, 陈同斌, 等. 污泥堆肥过程中氮素损失和氨气释放的动态与调控[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(11): 121-124.
- [23] Pagans E, Barrena R, Font X, *et al.* Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature [J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(9): 1534-1542.
- [24] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Japan: IGES, 2006.
- [25] De Guardia A, Petiot C, Rogeau D. Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics [J]. *Waste Management*, 2008, **28**(1): 73-84.
- [26] Manios T, Maniadakis K, Boutzakis P, *et al.* Methane and carbon dioxide emission in a two-phase olive oil mill sludge windrow pile during composting[J]. *Waste Management*, 2007, **27**(9): 1092-1098.
- [27] 熊建军. 城市生活污泥条垛式堆肥保氮技术及安全风险研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
- [28] 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.
- [29] 郑嘉熹, 魏源送, 吴晓凤, 等. 猪粪堆肥过程保氮固磷及温室气体(N<sub>2</sub>O)减排研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2047-2055.
- [30] 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.
- [31] Hao X Y, Chang C, Larney F J, *et al.* Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(2): 376-386.
- [32] Hao X Y, Chang C, Larney F J. Carbon, nitrogen balances and greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**(1): 37-44.
- [33] Zhong J, Wei Y, Wan H, *et al.* Greenhouse gas emission from the full process of swine manure composting and land application of compost[R]. 2013.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                               |                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing .....                                                                         | SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)              |
| Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn .....                                   | ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)                        |
| Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China .....                                                    | YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)                  |
| Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR .....                                                                           | XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)           |
| Distribution of CH <sub>4</sub> in the Suburb of Changsha City, China .....                                                                                   | LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)        |
| Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke .....                                                                                      | LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)                     |
| Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution .....                                                                         | YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)         |
| Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost ...                                 | ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)         |
| Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem .....                                          | GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)                      |
| Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin .....                       | ..... LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)     |
| Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province .....                               | Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211) |
| Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model .....                                       | LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)            |
| Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method .....                                                           | DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)                                |
| Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area .....                                         | SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)        |
| Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu .....                | ..... MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)   |
| Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland .....                                                                                 | QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)                               |
| Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i> .....                                                      | WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)                |
| Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River ..... | ..... LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)                        |
| Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River .....                                                        | REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)      |
| Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter; Comparison Between Chlorination and Bromination .....    | ..... TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)    |
| Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Flocs Formed .....                                                     | XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)                |
| DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes .....                                                                                 | FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)                                    |
| Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron .....                                                                                                         | ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)           |
| Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Stabilized Nanoscale Pd/Fe .....                                     | ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)               |
| Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes .....                          | LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)                     |
| Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent .....                                | ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)       |
| Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater .....                                                                   | WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)                    |
| Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems .....                                         | ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)                |
| Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse .....                                                                          | LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)                   |
| Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions .....                                                                           | ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)                    |
| Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction .....                                                                                         | YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)                    |
| Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH .....                                                                                  | ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)            |
| Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts; Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation .....                               | LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)                 |
| Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i> .....                                                                              | LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)               |
| Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow .....                                                      | LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)              |
| Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years .....                                       | ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)                                 |
| Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors .....                                     | HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)                     |
| Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary .....                                  | SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)        |
| Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island .....                                                     | SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)         |
| Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China .....                                           | QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)               |
| Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites .....                                                                          | SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)                |
| Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil .....                                                       | CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)            |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks .....                                       | ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)               |
| Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas .....                                                        | LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)           |
| Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L. ....                                                | XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)          |
| Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 .....                                                                            | CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)                                  |
| Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China .....                                                      | JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)                                        |
| Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr) Oxides .....                                    | LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)               |
| Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction .....                                                         | XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)         |
| A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants .....                                                               | YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)                                    |

# 《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)

2013年11月15日 34卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 15, 2013

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行