

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

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

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘邃庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展

张志剑¹, 刘萌¹, 朱军²

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, St. Paul 55108, USA)

摘要: 有机废弃物处置不当引起的环境污染与潜在资源浪费已引起广泛关注, 生物堆肥处理是解决有机废弃物污染与再利用的主要技术手段之一。蚯蚓堆肥和蝇蛆生物转化是废弃物生物处理与利用的两项代表性技术, 不仅可将废弃物基质转化为均匀且稳定的类腐殖质化合物, 同时收获丰富的虫体蛋白。本文在介绍蚯蚓堆肥和蝇蛆生物转化基本定义与原理的基础上, 重点综述了两种技术的工艺过程与机制、影响因素与控制、以及废弃物生物特性演变规律等; 进而阐述了虫体生物量转化、肠道消化分解、生物酶降解、以及微生物区系等多重物理及生化机制共同实现有机废弃物减量化-增值化-稳定化处理的共性与差异, 以及工程应用潜力与发展前景。

关键词: 蚯蚓堆肥; 蝇蛆生物转化; 有机废弃物; 减量化; 增值化

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1679-08

Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective

ZHANG Zhi-jian¹, LIU Meng¹, ZHU Jun²

(1. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, St. Paul 55108, USA)

Abstract: There is a growing attention on the environmental pollution and loss of potential regeneration of resources due to the poor handling of organic wastes, while earthworm vermicomposting and larvae bioconversion are well-known as two promising biotechnologies for sustainable wastes treatments, where earthworms or housefly larvae are employed to convert the organic wastes into humus like material, together with value-added worm product. Taken earthworm (*Eisenia foetida*) and housefly larvae (*Musca domestica*) as model species, this work illustrates fundamental definition and principle, operational process, technical mechanism, main factors, and bio-chemical features of organisms of these two technologies. Integrated with the physical and biochemical mechanisms, processes of biomass conversion, intestinal digestion, enzyme degradation and microflora decomposition are comprehensively reviewed on waste treatments with purposes of waste reduction, value-addition, and stabilization.

Key words: vermicomposting; larva bioconversion; organic waste; reduction; value-added

城市化进程及人口膨胀和生活方式的改变都在无形中加速有机废弃物的生成, 如何进行减量化、资源化(增值化)、稳定化处理越来越受到人们的关注。常规处置技术手段如填埋、农田直接利用、焚烧等^[1]虽然能一定程度地解决废弃物环境污染, 但不可避免地产生新的环境问题。20世纪70年代末, Hartemtein等^[2]将赤子爱胜蚯蚓(*Eisenia foetida*)引入污泥处理过程并将最终产品加工成土壤基质。几乎在同一时期, 又有学者以蝇蛆为生物反应器, 将动物粪便转化为腐熟度高、稳定性好且养分充足的有机堆肥, 并获得数量可观且高附加值的蝇蛆蛋白^[3]。随后, 根据蚯蚓等食腐性生物的生理特性及其处理废弃物的效能, 学者与从业者逐步发展并总结了“蚯蚓堆肥”(vermicomposting)^[4]和“蝇蛆生物

转化”(larvae bioconversion)^[5]这一廉价、经济、环保的有机废弃物处理技术, 不仅解决了普通堆肥因嗜热过程造成的氨氮流失^[6], 同时将废弃物生物质迅速转化为更为稳定的堆肥产品^[7]。本文对这两种代表性技术的研究动态进行总结, 并结合工程应用进行研发探讨, 服务于废弃物减量化-增值化-稳定化处理与污染控制。

1 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化的定义及技术类型

1.1 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化的定义

收稿日期: 2012-07-31; 修订日期: 2012-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701162); 环境保护公益性行业科研专项(2010467014)

作者简介: 张志剑(1973~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为废弃物利用与水生态安全, E-mail: zhangzhijian@zju.edu.cn

生物堆肥的实质是生物/微生物在适宜条件下的代谢作用^[6]。虽然蚯蚓属环节动物门寡毛纲(*Annelida Oligochaeta*)^[1]可归于蠕虫,而蝇蛆为双翅目蝇科(*Cyclorrhapha*)的幼虫体隶属昆虫^[8],但两种生物降解技术均利用引入的虫体将有机废弃物转化为类腐殖质,其生物质产品主要为富含高蛋白蚯蚓、蝇蛆本身与堆肥^[4,5]。生物堆肥含较高的类腐殖质化合物、活性微生物、生物酶和氮磷等养分,将其农用(蝇蛆转化技术则需二次堆制工艺)则土壤肥效显著提高,故在工艺过程、基质-虫体-微生物作用原理等方面具有共性。

1.2 两种生物降解技术

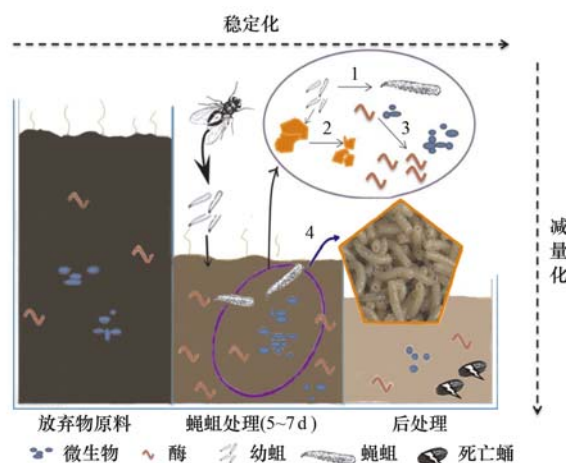
1.2.1 蚯蚓堆肥技术

蚯蚓堆肥技术,又称蚯蚓生物稳定化技术,是利用蚯蚓特殊的生态学功能及其与环境微生物的协同作用,将动物粪便^[9]、污水污泥^[10]、工业固废^[4]、食品垃圾^[11]等有机废弃物高效降解与腐熟的生物处理工艺。蚯蚓虽然品种繁多,但可用于有机废弃物处理的主要集中在 *Epigeic*、*Endogeic* 和 *Anecic* 这 3 个种属^[1,4,7]。目前国内外研究最多且大量应用于废弃物处理的蚓种是爱胜属(*Eisenia*)^[4,12,13],这种蚯蚓生长周期短(最适条件下成熟期为 4~6 周),繁殖率高,食谱广泛,对有机质的处理效果好;此外 *Eudrilus eugeniae*^[14] 及 *Perionyx excavatus*^[15] 也应用于实验研究及工程处理。蚯蚓堆肥通过虫体与微生物的相互作用完成有机物的生物降解与稳定^[4,6,16],可分为两个阶段:①活跃期,蚯蚓改变基质物理性能及微生物组成;②类腐熟期,微生物代替蚯蚓进一步降解基质。蚯蚓堆肥体系涵盖复杂的食物网结构^[17],除微生物对有机质的生化降解外,蚯蚓嚼碎过程促进有机质原料的物理分解,增加供给微生物生长代谢作用的表面积并刺激其活性^[14],其内脏中多种酶(如蛋白酶、酯酶、淀粉酶、纤维素酶、几丁质酶等)及肠道内微生物群落^[4]可加速分解基质纤维素及蛋白质成分,同时促进 β -糖苷酶、纤维素酶、蛋白酶、磷酸酶等胞外酶的分泌,加快有机碳、含氮化合物及有机磷等生物降解^[18],最终将有机废弃物中诸如 N、P、K、Ca 等重要营养元素转化为比原废弃物更易溶、易吸收的形态^[10],而收获的蚯蚓除用于动物饲料外^[19],还可综合运用于医疗保健^[20]。

1.2.2 蝇蛆生物转化技术

蝇蛆生物转化技术利用家蝇(*Musca domestica*)^[21]、绿光蝇(*Lucilia Sericata*)、麻蝇(*Sarcophaga Carnaria*)^[5]、黑兵蝇(*Diptera*

Stratiomyidae)^[22]等幼虫体的生长代谢过程,在适宜条件下将有机废弃物转化为虫体生物量并显著改善有机物生化性状^[5]。由于种源广泛,加之从卵孵化至化蛹时段一般为 5~7 d(夏季)^[3],家蝇蝇蛆是有机质生物转化与降解的天然生物反应器^[21,23],其生物转化有机废弃物过程见图 1。除对基质的嚼碎、翻转、生物通风等物理作用外,杂食性蛆体的内脏及唾腺亦能生化降解有机废弃物,其丰富的酶结构(淀粉酶、酯酶、蛋白酶及胰蛋白酶等^[24])不仅能降解基质碳水化合物、脂肪及蛋白成分,还能储存脂肪,并还原降解含氮化合物^[3,25],最终将高黏度粪便转化为气味低、结构松散的堆肥产物^[5,21],作为有机肥料还田将带来额外经济效益。收获的蝇蛆本身富含 50%(干重)以上的粗蛋白,是赖氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸等必需氨基酸的有效来源^[20,25]。除以高蛋白部分替代动物饲料这种常规资源化再利用途径之外,蝇蛆体内抗菌肽等特殊活性物质还能清除伤口坏死组织,刺激纤维原细胞生长,抑制病原体并治愈伤口^[26];而从其体内提取的壳聚糖或甲壳素还可用于污水重金属富集分离^[27]。



1. 蝇蛆生长代谢作用; 2. 虫体物理作用;
3. 菌-酶协同作用; 4. 蝇蛆收获

图 1 蝇蛆生物转化有机废弃物过程示意

Fig. 1 A schematic processes of larvae bioconversion for organic waste treatment

2 处理过程控制因素

蚯蚓堆肥和蝇蛆生物转化技术集好氧、生物氧化固定、非嗜热过程于一体^[3,4,19,23,28],利用虫体嚼碎、混合基质底物并促进微生物活性,最终实现有机废弃物的降解与稳定。处理全过程的控制要素主要包括基床(bedding)、基质、湿度、氧含量、温度、pH 和虫体接种密度等。

2.1 基床与基质

基床为适宜虫体稳定生长的任何材料,一般具有良好的吸水性、膨胀潜质及高碳氮比^[1],如龙糠、木屑等。基质为供虫体生长代谢的食物源,如需降解处理的有机质废弃物:蚯蚓可摄食动物粪便^[9]、城市垃圾^[29]及多种工业固废^[4];而目前研究应用较多的供蝇蛆降解的基质主要集中于禽畜养殖粪便^[3,5,21]。

2.2 湿度与需氧量

充足的水分能保证降解体系内虫体和微生物活性,并充当化学反应与元素转化的介质^[4]。蚯蚓堆肥的理想湿度为 60% ~ 70%^[1,4],蝇蛆为 50% ~ 80%^[3,23,30]。体系内过多的水分将造成厌氧环境削弱降解过程或致死虫体^[1],另外油脂类底物的添加也将降低体系氧含量,故未经过预堆肥处理的油脂类废弃物不可直接添加在基质中^[4]。为改变体系缺氧环境,如当基质氧化还原电位低于 160 mV 时,可适当通过机械或人工手段曝气^[12]维持虫体正常生理活性。

2.3 温度

温度影响虫体活性、新陈代谢、生长繁殖及呼吸,用于堆肥的绝大多数蚓种的耐温范围是 10 ~ 35℃^[1,19],温度过高(超过 35℃)则蚯蚓新陈代谢活动及繁殖受阻甚至导致虫体死亡^[4]。蝇蛆生长的最适温度在 13 ~ 38℃ 之间,过高的环境温度能致死蛆虫^[30],在耐温范围内温度越高蝇蛆繁殖速率越快,如 16℃ 时家蝇的平均生命周期为 45 d 而 35℃ 时只需 7 d^[3]。

2.4 虫体接种密度

幼虫的接种密度直接影响虫体呼吸率、繁殖率及生理活性^[4],继而影响废弃物处理效率。堆肥系统中,蚯蚓最佳接种密度为 1.60 kg·m⁻²,每 kg 蚯蚓日摄食量约为 0.75 kg(基质)^[31]。蛆虫的最佳接种密度为 3 ~ 8 kg·m⁻²,每条蛆虫每日平均摄食 100 mg 基质来满足营养物质的需求及有机成分的降解^[32]。一定范围内,基质处理效率与幼虫接种密度成正比^[23],但因卵茧卵化生成的成虫重量与其可摄食的基质重量呈线性关系并以对数函数增长^[30],故当基质中投加过量幼虫时,每只卵茧因摄食不足导致卵化生成的成虫生物量降低^[4],继而影响虫体代谢强度而降低处理效率。

2.5 其他影响参数

除上述参数外,pH 同样影响堆肥过程。pH 在 5.5 ~ 8.5 之间有利于维持虫体及微生物活性^[4],最

适 pH 接近中性或弱碱性(7.5 ~ 8.0)^[1]。此外有机废弃物的前处理、盐浓度、害虫疾病及有毒成分^[28]均能对虫体的生长、代谢及繁殖造成不同程度的影响而导致降解进程滞后或终止。

3 废弃物处理过程中基质的生化性质变化

不论蚯蚓堆肥还是蝇蛆生物转化,在降解废弃物时,基质水分、有机碳、营养成分、酸碱度、生物酶、以及生物群落等参数均将发生规律性的显著变化。

3.1 水分

虫体在降解有机物的同时对其进行固化,其新陈代谢过程及空气流动引起的水分蒸发均能造成体系水分消减。蚯蚓堆肥可在 45 d 内使基质水分从 80% 降至 30% 左右^[33],而蝇蛆仅在一周内实现与蚯蚓等效的水分消减水平^[21]。但堆体基质水分流失过多将影响虫体活性,故可在基质表层覆盖稻草秸秆防止水分过分蒸发使体系维持在理想湿度范围内^[34],从而确保废弃物彻底降解及稳定。

3.2 有机碳

反应体系中虫体的投加一方面促进体系微环境的形成,使微生物群落大量繁殖^[14]。为构建细胞结构并获取能量来源,虫体及微生物摄食大量碳素并通过呼吸作用使碳以 CO₂ 的形式释放于空气^[18,35,36]。另一反面,在与微生物的共同作用中,蚯蚓、蝇蛆体内各类消化酶系活性增强,不断消解半纤维素、纤维素及木质素成分^[4,22,37],水解淀粉类物质^[3,38]及长链多糖^[21,39],致使有机碳总量降低。如蚯蚓堆肥 90 d 后牛粪、马粪中有机碳分别减少 58%、55%^[40];而黑兵蝇蛆可在生物转化过程中分解基质内 50% 纤维素及 29% 的半纤维素成分^[22]。

3.3 养分物质

生物堆肥会使堆肥干物质氮含量明显上升^[6,13,18,21]。在有机质矿化及水分减量化过程中,虫体内脏中的蛋白酶催化含氮化合物的解聚反应,将其分解为溶解性有机氮^[41],再通过虫体及微生物进一步降解使堆肥干物质总氮含量上升。堆肥含氮量取决于原基质氮含量及降解转化程度^[4],而转化过程中体系 pH 的降低亦有利于氮固定,防止氮元素在高 pH 条件下以氨氮形态散失^[1]。与氮素不同,因为气态磷挥发几乎不计,除生物吸收之外蚯蚓堆肥和蝇蛆转化可使堆肥总磷含量高于处理前基质^[13,21]。虫体肠道分泌的碱性磷酸酶将有机磷酸酯水解为能被植物吸收的无机磷酸盐,而降解基质时

产生的有机酸可增强磷酸酶活性^[42],促进底物有机磷生物降解,同时体系微生物群落也能间接刺激磷素的转化^[4]。其他元素如 K、Ca、Mg、Al 亦会在虫体内脏酶系的直接分解有机质作用和底物微生物群落间接代谢过程中使相应盐基离子活性增强^[1,21]。

3.4 pH

有机废弃物在生物降解过程(如氮磷化合物矿化、呼吸及 CO₂ 释放,微生物新陈代谢积累的有机酸、腐植酸或富里酸等)都会造成整个体系 pH 的波动^[1,4,6],通常情况下这些过程将导致 pH 由碱性变为中性或酸性^[9]。不同基质在降解时因产生不同中间产物,使 pH 的变化方式不同,如有机质降解时产生的铵根离子会使体系 pH 升高,而 CO₂ 和腐殖酸中羧基、酚基组分又使 pH 降低,两者综合作用导致 pH 向中性转变^[4]。

3.5 酶活性

基质中酶活性的变化可表征堆肥腐熟性及元素循环规律^[4,23,18]。与碳循环相关的 β -糖苷酶在其引物催化下不断合成释放^[43]。例如,经蝇蛆生物转化后的粪便中 β -糖苷酶活性是未处理底物的 45 倍,但在最终产物中纤维素酶活性却只有原底物的 1/69^[21],而在蚯蚓堆肥的研究中也出现相似的结论^[43],原因在于纤维素降解的产物恰是 β -糖苷酶催化反应的底物^[21],碳元素在两种酶的共同作用下,最终导致有机碳含量降低并促进产物稳定化。降解初期,虫体和微生物新陈代谢作用消耗大量涉及 N、P 循环的物质,生成的磷酸盐和溶解性有机氮有利于增强磷酸酶及蛋白酶合成^[44],但随反应时间的推移,基质中含氮化合物(如蛋白质、多肽)及含磷化合物(如磷酸二酯、DNA)迅速分解导致无机氮和无机磷的积累,致使蛋白酶、磷酸酶活性降低^[21]。与此类似,降解初期脱氢酶活性与虫体及微生物活性呈正相关^[1],如在蚯蚓堆置植物残体初期脱氢酶活性可高达 400 $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,随后可利用有机质耗尽抑制微生物生长及酶合成,故脱氢酶活性又急剧下降最终达到恒定状态^[45]。

3.6 微生物群落变化

蚯蚓堆肥和蝇蛆生物转化可在分子水平上改变微生物群落结构。细菌和真菌群落的变化在蚯蚓堆肥中起主要作用^[14],影响有机质降解过程。例如用蚯蚓处理工业污泥与猪粪的混合物,堆肥前 30 d 真菌生物量大幅上升,随后生物量降低并保持稳态直至堆肥完成,但仍高于原基质^[46]。就细菌群落而言,利用 PCR-DGGE 技术分析有机质底物(橄榄废

渣与羊粪 8:1 混合)及其堆肥产物的细菌 16S rRNA 基因序列,分别得到 20、30 条清晰条带,且堆肥产物的基因条带亮度明显高于对照,表明蚯蚓堆肥不仅丰富了基质细菌群落多样性,同时增加了细菌多样性并增强其活性^[47]。此外蚯蚓通过嚼碎、翻转、疏散直接或间接影响基质原生动物群及线虫数量,在刺激微生物活性的同时刺激原生动物^[48]。蚯蚓能通过直接吞噬大幅降低有机废弃物中线虫的数量(>50%),但其新陈代谢活动会增加原生动物尤其是鞭毛虫丰度,而线虫数量的降低又能促进原生动物数量的增加^[49]。例如 *L. terrestris* 的接种能使基质中原生动物数量增加 3~19 倍^[50],而食真菌类线虫也会因与真菌的竞争而减少^[49]。蝇蛆生物转化家禽粪便的实例中,细菌 16S rRNA 基因序列发现堆肥产品共有 4 种细菌占优势,其中变形菌门最为丰富,控制有机质降解过程中水解酶活性;而降解底物中假单胞菌的存在也说明磷酸酶基因在底物有机磷降解中起重要作用^[21]。可见,生物堆肥的效能动态地取决于基质-虫体-微生物特定的协同作用机制。由于待处理废弃物种类的多样性,加之蚯蚓与蝇蛆生理及其代谢机制的差异,剖析这种协同机制的多样性及功能是废弃物处理的关键之一。

3.7 基质后期变化

堆肥产物的微生物性能(如微生物量及相关活性)在腐熟过程中控制基质养分含量,导致营养元素的固定和释放^[51],但基质后熟过程显然受前期虫体处理特性差异而不同。一旦蚯蚓离开基质即进入腐熟阶段,由微生物代替蚯蚓进一步降解基质^[6,23]。堆肥后期阶段,微生物活性及生物量衰减,无法刺激酶系合成,导致胞外酶更新中断,微生物量 N、基础呼吸、及相关酶活性都将持续降低^[52]。随微生物量 N 的减少,蛋白酶、纤维素酶活性明显降低,而 β -糖苷酶活性呈先增加后下降趋势,但碱性磷酸酶活性却可随腐熟进程持续增加^[43]。基质腐熟性是生物堆肥过程的关键步骤^[4,19,23],由于蚯蚓和蝇蛆虫体在与废弃物基质作用的物理-生化机制不同,在深入分析后熟机制的基础上有必要针对性地设计这两种技术的后熟工艺,以优化产品的稳定化过程。

4 两种生物降解技术的应用

4.1 蚯蚓堆肥技术应用

近年来蚯蚓堆肥技术引入各类废弃物的处理处置中,不仅获得优质高值的堆肥产品及虫体蛋白,更在很大程度上解决了排放固废所带来的一系列环境

问题. 这说明蚯蚓堆肥应用领域的广泛性与可行性,不啻为一种经济、环保、高效的生物处理工艺. 在工程应用方面,Paul 等^[29]将牛粪和生活垃圾按不同比例混合,用 *P. ceylanensis* 蚓种对其进行堆肥降解,培养 50 d 后,各基质降解效率达到 55% ~ 78%,养分含量均高于未加虫体的对照组,其中两种废弃物比例为 10:1 的基质处理效果最优. Kaviraj 等^[33]开展了相似的工程,发现 *E. fetida* 和 *L. mauritii* 蚓种的最大碳降解率分别为 44.3% 和 44.1%,用 *E. fetida* 堆置的产物中有机质、总氮、养分浓度均高于普通堆肥产物. 此外蚯蚓还能以污泥成分为食,不仅提高好氧降解和有机堆肥的速率,将有机残渣固化,并通过体腔中的抗菌液去除病原体^[10]. Garg 等^[9]比较了 *Eisenia foetida* 在牛、马、猴、羊、骆驼等 7 种不同哺乳动物粪便中的生长繁殖及基质降解情况,结果表明蚯蚓生物量在羊粪中最高 (55.3 mg·g⁻¹ ± 1.9 mg·g⁻¹) 而在骆驼粪便中最小 (32.5 mg·g⁻¹ ± 1.40 mg·g⁻¹). 我国在“十五”及“十一五”期间,规模化畜禽养殖场采用蚯蚓堆肥较为普遍,而且研发了“集约养殖-蚯蚓处理-水产/作物利用”为特色的多种高效集约新型农业循环经济模式.

4.2 蝇蛆生物转化技术应用

蝇蛆处理有机废弃物的工程应用也有不少成功

实例. El Boushy^[3]早在 1991 年就总结了家蝇蛆虫对猪粪的处理效果. 另外还有学者用 *L. sericata* 和 *S. carnaria* 蛆虫降解动物粪便,使降解底物干重减少 60% ~ 80%,鲜蛆平均产量接近 304 g·kg⁻¹,生物转化率在 16.6% ~ 39.6% 之间^[5]. 在我国浙江省德清县,2008 年一家生物技术公司应用全天候蝇蛆生物转化技术大规模处理生猪粪便(最大日处理量为 35 t),并研发相应的温室大棚辅助蝇蛆反应器^[21]. 该应用工程由 4 个工艺单元组成:①种蝇繁殖与育种;②工厂化蝇蛆粪便转化;③蛆卵储存与羽化;④蝇蛆加工,其中利用温室大棚辅助蝇蛆反应器降解废弃物的技术设计是该流程最重要的环节. 经过蝇蛆 5 ~ 7 d 的处理期,基质不匀并伴有恶臭的半流质粪便迅速转化为暗棕色均质化产物,平均水分减少 80.2%,恶臭降低 95%. 同时鲜蛆平均产量高达 105 ~ 120 kg·t⁻¹ (干蛆,30 ~ 35 kg·t⁻¹),转化后堆肥产量约为 350 ~ 450 kg·t⁻¹,平均收入在 210 ~ 280 元·t⁻¹ 之间. 这种全年运行的温室大棚辅助蝇蛆反应器具有显著的经济效益,为畜禽养殖粪便的生物转化与深度资源化利用提供了有利的技术支撑.

4.3 蝇蛆生物转化与蚯蚓堆肥的技术比较

蝇蛆生物转化与蚯蚓堆肥均属虫体堆置有机废弃物的生物降解技术,但就工艺模式、处理周期及效果等方面^[3,4,20,21,54 ~ 57]存在较大差异,具体见表 1.

表 1 蝇蛆生物转化与蚯蚓堆肥的技术比较

Table 1 Comparison between larvae bioconversion and vermicomposting

项目	蝇蛆生物转化技术	蚯蚓堆肥技术
工艺模式	序批式	连续式
处理周期(夏季)/d	5 ~ 9	20 ~ 40
虫体产量(以猪粪为例)/kg·t ⁻¹	166 ~ 260	100 ~ 334
废弃物减量化效率	有机固废总重量/%	45 ~ 70
	水分重量/%	40 ~ 60
	蛋白质含量/%	53 ~ 60
蚓体/蝇蛆营养成分	不饱和脂肪酸含量/%	6 ~ 10
	脂肪含量/%	4.5 ~ 18
剩余产物是否需要堆放熟化	需要	不需要
虫体与基质的分离	光照分离、高温逃逸	光照分离、引诱、漂离
虫体去向	饲料、食品工业、医药、造纸、日用化工、印染纺织及农业等	饲料、食品工业、医药、农业等

由表 1 可知蝇蛆转化技术的废弃物减量化效率高,而且对基质脱水、除臭、杀菌等作用显著^[57,58]. 收获蝇蛆营养成分丰富,是赖氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸等必需氨基酸的有效来源^[25],产品深加工潜力大. 与蚯蚓堆肥相比,蝇蛆生物转化废弃物处理周期短(主要取决于温度条件,夏季温度较高时处理周期极短). 但蚯蚓堆肥生成的堆肥产物无需二次

熟化,可直接用作高效肥料;而经蝇蛆生物转化降解得到的产物仍未熟化,直接用于农作物将导致“烧苗”. 在实际应用中,通常将蝇蛆转化后的半成品再经过 2 ~ 4 周(如条垛式强化通风)二次堆肥工艺后方可农用. 另外,虽然少量蝇蛆在废弃物处理过程中从控制区逃逸或变成成虫,但蝇蛆生物转化的最终阶段并不是苍蝇,而是生长为蝇蛆成虫后人

工快速中止蝇蛆生活史(除留作种蝇之外),生成的鲜蛆经加工用于饲料、食品工业、医药、造纸、日用化工、印染纺织及农业等诸多领域^[3,20,27,56],因此不会增加大量苍蝇影响作业环境。

5 展望

目前,蚯蚓堆肥已广泛应用于城市生活各行各业的有机废弃物处理处置过程。该技术不仅能提高基质生物化学性能、储存营养,同时还可减少恶臭释放,实现废弃物减量化与稳定化效果。但因虫体生理性能的特殊需求使反应体系温度通常在常温范围内变动,故较普通堆肥而言,病原体去除率仍不确定^[6]。因此可结合常规堆肥技术,即“堆肥-蚯蚓堆肥”一体化降解技术,利用普通堆肥嗜热过程产生的高温($>50^{\circ}\text{C}$)^[7]去除废弃物病原体、降解有毒化合物,随后通过蚯蚓堆肥进一步降解有机质,获得改良的均质化高价值堆肥产物^[59]。而用蚯蚓堆置源自普通堆肥在嗜热阶段降解的基质,不仅可防止普通堆肥造成的氨氮流失^[6],同时降低反应全过程耗费的堆肥时间及处理费用^[7],节约电力、人力资源,因此在工程应用中将两种堆肥技术结合更能快速有效的实现有机废弃物减量化、资源化、无害化处理。蝇蛆生物转化技术主要应用于家禽粪便的处理过程,现有技术工艺存在以下缺点:蝇蛆工厂化生产技术模式在调控蝇蛆生长因子(温度、光照、通风等)与虫体-残渣分离等方面存在不足,且缺少专门用于满足蝇蛆所需适宜温度-湿度-光照的调控装置,难于在季节、昼夜交替的条件下保障蝇蛆高产及废弃物处理效能,因此研发适用于产业化大型蝇蛆生物反应器势在必行。另外较蚯蚓堆肥而言,蝇蛆生物转化多用于处理家禽粪便,在生活垃圾、农业废弃物及污泥废渣等方面鲜有报道,其技术瓶颈主要在于对不同废弃物与蝇蛆生长的相互作用机制认识不足,因此有必要研究整个体系生物活性的动态变化并与微生物群落遗传信息将结合^[21],从分子生态学层面揭示降解过程机制,进而优化现有蝇蛆转化技术同时促进工程增效。

6 结论

有机固体废弃物(如工农业废弃物、畜禽粪便、剩余污泥、食品废弃物等)的产生与堆放造成了明显的环境污染,并危及公众健康,尤其对发展中国家造成巨大的经济负担和环境压力。蚯蚓堆肥和蝇蛆生物转化是一种廉价、经济、环保的废弃物生物转

化技术,通过虫体生物量转化、肠道消化分解、生物酶降解、以及微生物区系分解等多重物理、生化及生物过程降解有机废弃物,同时获得高稳定性堆体及高蛋白鲜虫,实现废弃物最大限度减量化、增值化、稳定化。较蚯蚓堆肥技术而言,蝇蛆转化技术在有机废弃物生物处理领域内更具技术优势。

参考文献:

- [1] Pandey A, Soccol C R, Larroche C. Current developments in solid-state fermentation [M]. India: N. K. Muraleedharan for Asiatech Publishers, 2008. 468-511.
- [2] Hartenstein R, Hartenstein F. Physicochemical changes effected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida* [J]. Journal of Environmental Quality, 1981, **10**(3): 372-376.
- [3] El Boushy A R. House-fly pupae as poultry manure converters for animal feed: A review [J]. Bioresource Technology, 1991, **38**(1): 45-49.
- [4] Yadav A, Garg V K. Industrial wastes and sludges management by vermicomposting [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2011, **10**(3): 243-276.
- [5] Yehuda B, Marchaim U, Glatman L, et al. Bioconversion of poultry and fish waste by *Lucilia Sericata* and *Sarcophaga Carnaria* larvae [J]. Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 2011, **8**(4): 69-75.
- [6] Lazcano C, Gómez-Brandón M, Domínguez J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure [J]. Chemosphere, 2008, **72**(7): 1013-1019.
- [7] Ndegwa P M, Thompson S A. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids [J]. Bioresource Technology, 2001, **76**(2): 107-112.
- [8] Ferrar P. A guide to the breeding habits and immature stages of *Diptera Cyclorrhapha* [J]. Entomograph, 1987, **8**(1-2): 907.
- [9] Garg V K, Chand S, Chhilar A, et al. Growth and reproduction of *Eisenia foetida* in various animal wastes during vermicomposting [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2005, **3**(2): 51-59.
- [10] Gupta R, Garg V K. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **153**(3): 1023-1030.
- [11] Fernández-gómez M J, Romero E, Nogales R. Feasibility of vermicomposting for vegetable greenhouse waste recycling [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(24): 9654-9660.
- [12] Ismail S A. Vermicology: the biology of earthworms [R]. Chennai: Orient Longman Ltd, 1997.
- [13] Garg P, Gupta A, Satya S. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study [J]. Bioresource Technology, 2006, **97**(3): 391-395.
- [14] Pramanik P, Chung Y R. Changes in fungal population of fly ash and vinasse mixture during vermicomposting by *Eudrilus eugeniae*

- and *Eisenia fetida*; documentation of cellulase isozymes in vermicompost[J]. Waste Management, 2011, **31**(6): 1169-1175.
- [15] Suthar S. Nutrient changes and biodynamics of epigeic earthworm *Perionyx excavatus* (Perrier) during recycling of some agriculture wastes[J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(8): 1608-1614.
- [16] Aira M, Domínguez J. Microbial and nutrient stabilization of two animal manures after the transit through the gut of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 1234-1238.
- [17] Domínguez J, Parmelee R W, Edwards C A. Interactions between *Eisenia andrei* (Oligochaeta) and nematode populations during vermicomposting[J]. Pedobiologia, 2003, **47**(1): 53-60.
- [18] Aira M, Dominguez J. Earthworm effects without earthworms: inoculation of raw organic matter with worm-worked substrates alters microbial community functioning[J]. Plos One, 2011, **6**(1): e16354, doi:10.1371/journal.pone.0016354.
- [19] 陈巧燕, 杨健, 王志强, 等. 蚯蚓堆肥处理有机废弃物的国外研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2006, **24**(12): 8-10.
- [20] 鲍世铨, 曾耀辉. 蚯蚓在医药保健方面的综合利用研究[J]. 中国生化药物杂志, 1994, **15**(3): 165-168.
- [21] Zhang Z J, Wang H, Zhu J, et al. Swine manure vermicomposting via housefly larvae (*Musca domestica*): the dynamics of biochemical and microbial features[J]. Bioresource Technology, 2012, **118**: 563-571.
- [22] Li Q, Zheng L Y, Qiu N, et al. Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (*Diptera*: *Stratiomyidae*) for biodiesel and sugar production[J]. Waste Management, 2011, **31**(6): 1316-1320.
- [23] Čiřkova H, Pastor B, Kozanek M, et al. Biodegradation of pig manure by the housefly, *Musca domestica*: a viable ecological strategy for pig manure management [J]. Plos One, 2012, **7**(3): e32798.
- [24] Kim W, Bae S, Park S, et al. Biochemical characterization of digestive enzymes in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2011, **14**(1): 11-14.
- [25] Zhu F X, Wang W P, Hong C L, et al. Rapid production of maggots as feed supplement and organic fertilizer by the two-stage composting of pig manure[J]. Bioresource Technology, 2012, **116**: 485-491.
- [26] Marchaim U, Gelmn A, Braverman Y. Reducing waste contamination from animal-processing plants by anaerobic thermophilic fermentation and by flesh fly digestion[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2003, **109**(1-3): 107-115.
- [27] Gyliene O, Rekertas R, Šalkauskas M. Removal of free and complexed heavy-metal ions by sorbents produced from fly (*Musca domestica*) larva shells[J]. Water Research, 2002, **36**(16): 4128-4136.
- [28] Gunadi B, Blount C, Edwards C A. The growth and fecundity of *Eisenia foetida* (Savigny) in cattle solids pre-composted for different periods[J]. Pedobiologia, 2002, **46**(1): 15-23.
- [29] Paul J A, Karmegam N, Daniel T. Municipal solid waste (MSW) vermicomposting with an epigeic earthworm, *Perionyx ceylanensis* Mich[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(12): 6769-6773.
- [30] Moon R D, Hinton J L, O'Rourke S D, et al. Nutritional value of fresh and composted poultry manure for house fly (*Diptera*: *Muscidae*) larvae[J]. Journal of Economic Entomology, 2001, **94**(5): 1308-1317.
- [31] Ndegwa P M, Thompson S A, Das K C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids [J]. Bioresource Technology, 2000, **71**(1): 5-12.
- [32] Diener S, Zurbrugg C, Tockenr K. Conversion of organic material by black soldier fly larvae; establishing optimal feeding rates[J]. Waste Management and Research, 2009, **27**(6): 603-610.
- [33] Patil J H, Sanil P H, Malini B M, et al. Vermicomposting of water hyacinth with poultry litter using rotary drum reactor [J]. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 2012, **4**(5): 2585-2589.
- [34] Suthar S. Vermistabilization of municipal sewage sludge amended with sugarcane trash using epigeic *Eisenia fetida* (Oligochaeta) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **163**(1): 199-206.
- [35] Venkatesh R M, Eevera T. Mass reduction and recovery of nutrients through vermicomposting of fly ash [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2008, **6**(1): 77-84.
- [36] Prakash M, Karmegam N. Vermistabilization of pressmud using *Perionyx ceylanensis* Mich[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(21): 8464-8468.
- [37] Benitez E, Sainz H, Melgar R, et al. Vermicomposting of a lignocellulosic waste from olive oil industry: A pilot scale study [J]. Waste Management and Research, 2002, **20**(2): 134-142.
- [38] Raphael K, Velmourougane K. Chemical and microbiological changes during vermicomposting of coffee pulp using exotic (*Eudrilus eugeniae*) and native earthworm (*Perionyx ceylanensis*) species[J]. Biodegradation, 2011, **22**(3): 497-507.
- [39] Sen B, Chandra T S. Chemolytic and solid-state spectroscopic evaluation of organic matter transformation during vermicomposting of sugar industry wastes [J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(8): 1680-1683.
- [40] Garg V K, Gupta R, Kaushik P. Vermicomposting of solid textile mill sludge spiked with cow dung and horse dung: a pilot-scale study[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2009, **38**(4): 385-396.
- [41] Aira M, Monroy F, Dominguez J. *Eisenia fetida* (Oligochaeta: Lumbricidae) modifies the structure and physiological capabilities of microbial communities improving carbon mineralization during vermicomposting of pig manure [J]. Microbial Ecology, 2007, **54**(4): 662-671.
- [42] Vinotha S P, Parthasarathi K, Ranganathan L S. Enhanced phosphatase activity in earthworm casts is more of microbial origin

- [J]. Current Science, 2000, **79**(9): 1158-1159.
- [43] Aira M, Monroy F, Domínguez J. Microbial biomass governs enzyme activity decay during aging of worm-worked substrates through vermicomposting[J]. Journal of Environment Quality, 2007, **36**(2): 448-452.
- [44] Pramanik P. Changes in enzymatic activities and microbial properties in vermicompost of water hyacinth as affected by pre-composting and fungal inoculation: A comparative study of ergosterol and chitin for estimating fungal biomass[J]. Waste Management, 2010, **30**(8-9): 1472-1476.
- [45] Melgar R, Benitez E, Nogales R. Bioconversion of wastes from olive oil industries by vermicomposting process using the epigeic earthworm *Eisenia andrei*[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2009, **44**(5): 488-495.
- [46] Matovic D. Biomass-detection, production and usage [M]. Croatia; In Tech, 2011. 113-124.
- [47] Vivas A, Moreno B, Garcia-Rodriguez S, et al. Assessing the impact of composting and vermicomposting on bacterial community size and structure, and microbial functional diversity of an olive-mill waste[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(3): 1319-1326.
- [48] Monroy F, Aira M, Domínguez J. Changes in density of nematodes, protozoa and total coliforms after transit through the gut of four epigeic earthworms (Oligochaeta)[J]. Applied Soil Ecology, 2008, **39**(2): 127-132.
- [49] Tao J, Chen X Y, Liu M Q, et al. Earthworms change the abundance and community structure of nematodes and protozoa in a maize residue amended rice-wheat rotation agro-ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(5): 898-904.
- [50] Binet F, Fayolle, Pussard M, et al. Significance of earthworms in stimulating soil microbial activity[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, **27**(1): 79-84.
- [51] Schimel J P, Bennett J. Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm[J]. Ecology, 2004, **85**(3): 591-602.
- [52] Aira M, Monroy F, Domínguez J. *Eisenia fetida* (Oligochaeta: Lumbricidae) activates fungal growth, triggering cellulose decomposition during vermicomposting[J]. Microbial Ecology, 2006, **52**(4): 738-746.
- [53] Kaviraj, Sharma S. Municipal solid waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworms[J]. Bioresource Technology, 2003, **90**(2): 169-173.
- [54] 齐胜利, 朱东亮, 叶玉营. 畜禽粪便与作物秸秆无害化处理试验[J]. 河南畜牧兽医, 2006, **27**(1): 6-7.
- [55] 郭金生. 蚯蚓分离技术的研究[J]. 动物学杂志, 1985, (4): 20-22.
- [56] 王亚超, 白林, 李学伟. 蝇蛆蛋白资源化利用的生物安全性初探[J]. 四川动物, 2007, **26**(1): 120-121.
- [57] Nagavallema K P, Wani S P, Lacroix S, et al. Vermicomposting: Recycling wastes into valuable organic fertilizer[R]. India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2004. 1-14.
- [58] Wang H, Zhang Z J, Czapar G F, et al. A full-scale house fly (*Diptera: Muscidae*) larvae bioconversion system for value-added swine manure reduction[J]. Waste Management & Research, 2013, **31**(2): 223-231.
- [59] Tognetti C, Mazzarina M J, Laos F. Cocomposting biosolids and municipal organic waste: effects of process management on stabilization and quality[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, **43**(4): 387-397.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 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) 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: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行