

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 7 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架	孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应	李 敏, 王 垠, 牟晓飞, 等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb(II) 和 Cd(II) 的生物吸附及其影响因素	姜 晶, 李 亮, 李海鹏, 等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应	韩立新, 汪有科, 张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法	施晓清, 杨建新, 王如松, 等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例	 赵卉卉, 王 远, 谷学明, 等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价	白琳红, 王 卫, 张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理	 王艳红, 吴晓民, 朱艳萍, 等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究	 何春霞, 孟 平, 张劲松, 等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布	张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响	王西存, 于 毅, 周洪旭, 等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响	金凌波, 周 峰, 姚 涓, 等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期	 徐岩岩, 张佳华, YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化	王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响	高晓容, 王春乙, 张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响	朱小红, 马中文, 马友华, 等 (2119)
丛枝菌根真菌对枳根净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响	肖家欣, 杨 慧, 张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响	杨再强, 张 静, 江晓东, 等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态	刘 蕾, 申国珍, 陈芳清, 等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献	周小刚, 郭胜利, 车升国, 等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局	陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性	郑 宁, 张劲松, 孟 平, 等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究	 徐少君, 曾 波, 苏晓磊, 等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....
..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

专论与综述

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

问题讨论

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

研究简报

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-04



封面图说: 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201109171366

余杰,郑国砥,高定,刘洪涛,陈同斌.城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素.生态学报,2012,32(7):2271-2278.

Yu J, Zheng G D, Gao D, Liu H T, Chen T B. Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2271-2278.

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解 及其影响因素

余 杰^{1,2,*}, 郑国砥¹, 高 定¹, 刘洪涛¹, 陈同斌¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要:分析了国内部分城市脱水污泥中几种主要有机污染物浓度, PAHs 含量为 1.156—34.940 mg/kg, PCBs 含量为 0—115.730 mg/kg; PCDD/Fs 含量为 9.530—22.900 ngTEQ/g 干泥, NP 含量为 177.000 mg/kg。提出要实现污泥安全、环保的土地利用, 可采用生物好氧发酵技术降解污泥中的有机污染物, 降低污泥在土地利用时有机污染物带来的环境风险。同时通过优化污泥生物好氧发酵控制条件: C/N 值范围为 25:1—40:1, 温度在 30—55℃, 氧气浓度 5%—15%, 强制通风量控制在 1.5—2.0 m³·min⁻¹·t⁻¹ (干泥) 左右, pH6—9, 混料含水率为 50%—65%, 经生物好氧发酵后的污泥施用土地, 可以大大降低污泥在土地利用时的环境风险, 避免污泥资源化利用带来的二次污染问题。

关键词: 污泥; 有机污染物; 土地利用; 环境风险; 好氧发酵

Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors

YU Jie^{1,2,*}, ZHENG Guodi¹, GAO Ding¹, LIU Hongtao¹, CHEN Tongbin¹

1 Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China

Abstract: Concentrations of the organic contaminants in sewage sludge dewatering of several Chinese cities were analyzed, and pointed out the concentration of PAHs was 1.156—34.940 mg/kg, PCBs content was 0—115.730 mg/kg; PCDD/Fs concentration was 9.530—22.900 ngTEQ·g⁻¹ dm, NP concentration was 177 mg/kg. This paper demonstrated that the organic contaminants in sludge can be degraded with the aerobic biological treatment technology, and the environment risk of the organic contaminants in sewage sludge can be reduced to realize the safety and environmental protection of land use. Meanwhile, by optimizing sludge biological aerobic fermentation control conditions: C/N in the range of 25:1 to 40:1, a temperature of 30 to 55℃, the oxygen concentration is 5%—15%, forced ventilation control in 1.5—2.0 m³·min⁻¹·t⁻¹ (dried mud), pH6—9, mixing water rate is 50%—65%, the environmental risk of sewage sludge land application can significantly be reduced. The resource utilization of the sludge to bring about two pollution problems can also be avoided.

Key Words: sludge; organic contaminants; land application; environmental risk; aerobic biological fermentation

截至 2010 年底, 我国已建设污水处理厂 2800 余座, 城镇污水处理量已达到 300 多亿立方米, 处理废水而

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41101463)

收稿日期: 2011-09-17; 修订日期: 2012-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jackyujie@163.com

产生的污泥量(按含水率 80% 计)达 3000 万吨左右;初步估算近五年,全国湿污泥年产量约为 6000 万吨左右(80% 含水率)^[1]。目前我国 90% 以上的城市污泥未得到妥善处理,污泥二次污染现象非常普遍。根据 2010 年环保部发布的《城镇污水处理厂污泥处理处置污染防治最佳可行技术指南(试行)》,以及 2011 年国家发改委、建设部发布的《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》,城市污泥土地利用在我国是一种主要的、最佳且可行的污泥处置方式。然而关于污泥土地利用过程中,有机污染物带来的环境风险研究在我国几乎处于空白。如果城市污泥中含有较高含量的有机污染物进入土壤,很有可能带来环境污染风险。因此如何在污泥土地利用前消减有机污染物含量,降低其在土地利用时的环境风险,是未来研究的重点。

2 国内污泥中有机污染物含量

城市污泥中有机污染物主要有多环芳烃(PAHs)、可吸附有机卤化物(AOX)、直链烷基苯磺酸盐(LAS)、壬基酚(NP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)、邻苯二甲酸酯类(PEs)、氯苯(CBs)、氯酚(CPs)等^[2]。其中许多有机污染物具有生物放大效应,并有“三致”作用。表 1 为我国部分城市污泥中几种有机污染物及其含量,有机污染物 PAHs 含量大致为 1.156—34.940mg/kg,PCBs 含量大致为 0—115.730mg/kg;北京某污水厂污泥 PCDD/Fs 含量为 9.530—22.900 ngTEQ/g 干泥,NP 含量为 177.000 mg/kg。根据现有数据分析,我国城市污泥中 PAHs 含量多数超过了欧盟规定的 6.0mg/kg 限值,PCBs 和 PCDD/Fs 浓度均小于欧盟规定的 0.8mg/kg 和 100 ngTEQ/g 干泥限值。

表 1 国内部分城市污泥中几种有机污染物浓度

Table 1 Several common organic contaminants concentration in sewage sludge of Several Chinese cities

有机污染物 Organic contaminants	地区 Area	浓度 (mg/kg 干泥) Concentration	欧洲标准 (mg/kg 干泥) European standard
PAHs ^[3-6]	广州	33.1	6.0
	无锡	15.7	
	北京	33.6	
	西安	23	
	上海	1.2—6.8	
	青岛	2.0—6.6	
	苏州	19.2—35.0	
	无锡	16.6—31.8	
	南京	24.8	
PCBs ^[7-8]	广州	115.7 ng/kg 干泥	0.8
	长江三角洲地区	0—0.70	
PCDD/Fs ^[9]	北京	9.5—22.9 ngTEQ/kg ⁻¹ 干泥	100 ngTEQ/kg 干泥
NP ^[10]	北京	177.0	50.0

3 污泥土地利用的有机污染物环境风险评价

污泥土地利用过程中,由于污泥的累积施加,污泥中的有机污染物会对生态环境乃至人类健康带来危害,因此对城市污泥土地利用过程有机污染物进行生态风险评价是必要的。我国在污泥土地利用的生态风险评价方面的研究几乎是空白,可用数据、资料不足,很难据此进行定性和定量的分析。在这方面研究比较成熟、可以借鉴的有美国环保局和欧洲国际生命科学学会的研究成果。

美国环保局于 1992 年开始进行污泥土地利用和地表处置过程中的生态风险评价研究^[11]。为确定某种污染物的潜在毒害,USEPA(美国环保局)提出了风险评价程序和评价工具,其风险评价可分为危害鉴定、剂量响应评价、接触评价和风险特性 4 个阶段^[12]。

欧洲国际生命科学学会为评价污泥中有机污染物的风险推荐了一个概念框架(图 1)^[13]。该风险评价描述了污泥在土地利用后有机污染物进入土壤表现的毒性主要有 3 个方面:土壤动物毒性、土壤微生物毒性以及土壤植物毒性,这些有机污染物表现的毒性对动植物、水体以及人体造成直接和间接影响。该风险概念框

架建议基于风险的方法去评价并且获得城市污泥中有机污染物的最低限值(SQS),目的在于保持污泥农用的基础上去保护环境和公众健康。

从图 1 可以看出城市污泥土地利用时有机污染物暴露的途径。在进行风险评价时,土壤微生物群、动物群、农作物是评价的重点。

污泥土地利用时,其有机污染物进入土壤首先对土壤的质量和土壤微生物群产生影响;其次对陆地系统最主要生产者——植物产生影响;此外还对动物群落产生影响。有机污染物可以在鸟类和哺乳动物体内富集,同时通过渗滤进入水体。而人体能通过各种非直接途径被有机污染物污染,如农产品、动物肉和牛奶摄入以及饮用水等。人体也能直接被污泥中的有机污染物污染,如人的手指直接接触施用含有有机污染物污泥的土壤后,通过口、呼吸等进入人体,0—18 个月大的小孩是高风险人群。污泥土地利用的农民以及采用污泥作为园林绿化的人员,有被污泥中有机污染物污染的风险。

胡雪丽^[14]对城市污泥土地利用时 LAS 的生态风险进行了评价,重点对其生态毒性、土壤微生物的毒性、植物的毒性及其毒理学参数等进行了研究分析,指出当 LAS 浓度等于或大于 65% 时,吞食即有害,LAS 对高粱、向日葵和绿豆的最大无影响浓度为 100mg/kg。因此关注有机污染物毒性、毒理学参数及其风险特性是污泥土地利用环境风险评价的重点。

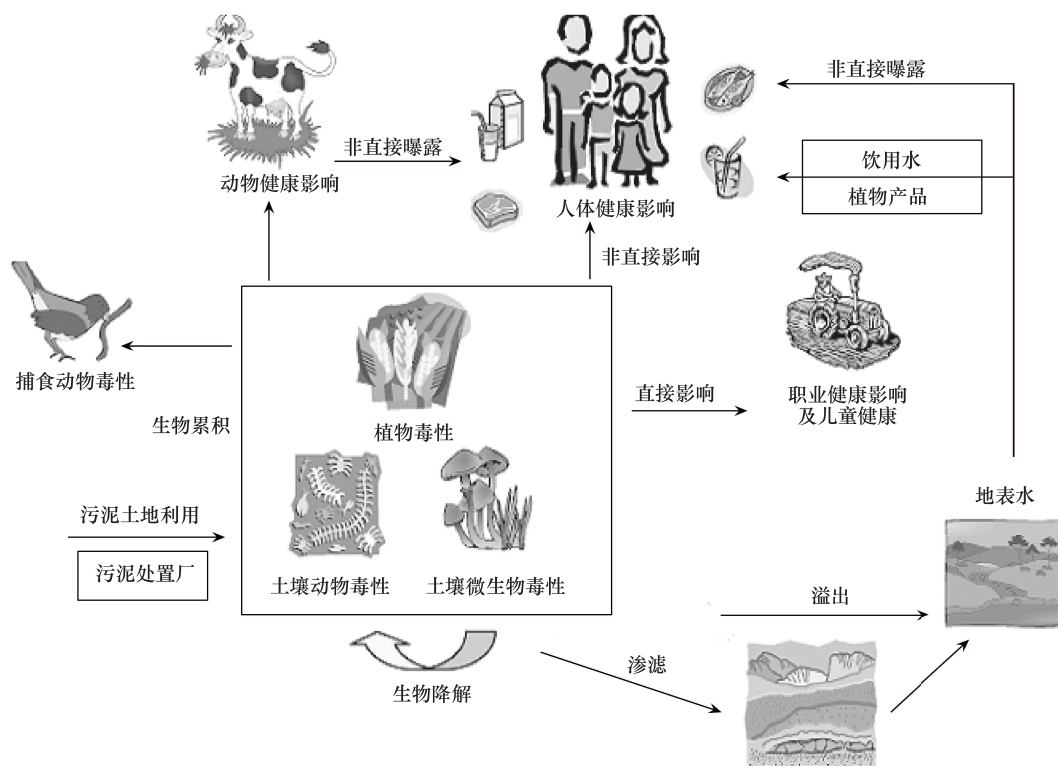


图 1 城市污泥土地利用有机污染物风险评价概念框架示意图^[13]

Fig. 1 Conceptual Framework of risk assessment for sewage sludge land application on organic contaminants

4 生物好氧发酵消减污泥有机污染物的效果

目前,污泥中的有机污染物降解主要采用生物好氧发酵。研究表明,污泥好氧发酵是一种有效降低有机污染物浓度(如 PAHs、NP、DEHP 等)的方法^[15-16]。蔡全英等^[3]利用污泥中固有的微生物群落,将污泥与稻草、玉米秸秆和木屑等混合进行好氧发酵处理,有效地降低了污泥中 PAHs、PCBs 等有机污染物的含量,指出多环芳烃类化合物在好氧发酵过程中是比较容易降解的。国内外污泥生物好氧发酵降解有机污染物情况见表 2。

表2 城市污泥中几种有机污染物生物好氧发酵降解情况

Table 2 The degradation of several organic contaminants in domestic sewage sludge

有机污染物 Organic contaminants	污泥混料比例(质量比) Sludge mixture ratio(Mass ratio)	发酵时间 Fermentation time	降解效率/% Degradation efficiency/%
PAHs	泥:稻草=2:1	90 d	96.4 ^[17]
	—	30 d	70 ^[15]
	—	76 d	57.9 ^[18]
	污泥:油菜榨渣=9:1	50 d	79 ^[19]
	—	84 d	73 ^[3]
DEHP	—	85 d	58 ^[20]
	污泥:牛粪=3.4:3.1	60 d	97 ^[21]
NP	体积比:污泥:秸秆:树叶=1:1:1	90 d	50 ^[22]
	污泥:牛粪=3.4:3.1	60 d	68.9 ^[21]
LAS	污泥:牛粪=3.4:3.1	60 d	90.8 ^[21]

由表2可知,在采用稻草作为调理剂的情况,经生物好氧发酵90 d后,对PAHs的降解可以到96.4%,采用油菜榨渣作为调理剂的,经生物好氧发酵50d后,PAHs的降解也可以到79%。Constantina Pakou^[21]研究将牛粪作为调理剂,按照污泥:牛粪=3.4:3.1,经生物好氧发酵90d后,污泥中的DEHP、NP、LAS均得到有效降解,降解率分别为97%、68.9%、90.8%,明显好于Martinen^[20]和Moeller J^[22]对DEHP和NP研究时的降解效果。可见污泥生物好氧发酵,调理剂种类、掺混比例以及好氧发酵的时间是影响有机污染污染物的主要因素之一。

供气条件也是污泥好氧发酵效果的一个主要因素。Soares A等^[23]研究指出好氧发酵条件下可降解NPE。LAS主要依靠好氧生物得到降解,Abad E等^[24]的研究发现LAS在好氧条件下很容易降解,Madsen等^[25]指出在厌氧条件下LAS是不降解的。Hackett^[26]认为,经好氧发酵后的污泥可以达到污泥园林、农用施用标准。以上研究表明:不同方式的生物好氧发酵能不同程度地降解污泥中有机污染物。

5 污泥生物好氧发酵影响因素

污泥土地利用前一般采用生物好氧发酵工艺进行无害化处理。影响生物好氧发酵过程中有机污染物降解的因素主要有:污泥的性质、有机污染物特性以及污泥好氧发酵的控制条件(温度、湿度、pH值、通气性以及C/N比等)^[3]。

5.1 污泥的性质

污泥来源不同,其污泥中的有机污染物含量、组分和分布等不同。Patryk Oleszczuk^[27]指出污泥中好氧发酵过程中,PAHs的降解是由污泥理化性质决定的,污泥颗粒的大小、污泥中有机质含量等,都会影响有机污染物的降解。另外,污泥的有机质提供一些有效的生长介质和营养,有利于提高微生物的活性。

5.2 有机污染物的特性

污泥中有机污染物在好氧发酵过程的降解行为和污泥中有机污染物的特性有关。污泥中有机污染物的好氧生物降解与分子量和分子结构有密切关系。一般说来,环烃比链烃难降解;多环的比低环的难于降解;饱和烃比不饱和烃难降解;高分子量的比低分子量的难于降解;非线性排列的较线性排列的难降解;高浓度的比低浓度的难降解;支链烷基愈多,愈难降解。如多环芳烃(PAHs),在好氧发酵过程中,大分子和多环的不易降解,而小分子和环数少的易被生物降解。

5.3 好氧发酵的控制条件

在污泥好氧发酵过程中,需考虑好氧发酵本身的适宜条件,同时还需考虑降解有机污染物最佳的适宜条件。污泥生物好氧发酵的控制条件(温度、pH值、供氧量、水分含量、C/N等)影响污泥中有机污染物的降解和转化。

(1) 有机质

C/N 比指物料中碳含量和氮含量的比值,是有机质影响好氧发酵处理过程的重要指标。李国学等^[28]的研究认为,物料的最佳初始 C/N 比为 25—35。张文娟等^[29]研究表明 C/N 值变化对 4—6 环芳烃降解有一定影响,适宜的 C/N 值范围为 25:1—40:1,且 C/N 值为 25:1 时对多环芳烃的降解效果优于 C/N 值为 40:1 的处理效果。Li H 等^[19]的研究发现污泥中多环芳烃(PAHs)的降解和污泥中有机质浓度具有一定的相关性。Patryk Oleszczuk^[27]研究发现污泥中 TOC 的含量影响多环芳烃的降解,污泥中添加飞灰和锯末可以有效促进多环芳烃的降解。Oleszczuk P 和 Baran S^[30]的研究也指出氮在多环芳烃的降解过程中有重要作用,氮作为细胞生长的营养物质和电子受体影响 PAHs 的降解。

Chang BV 等^[31]发现污泥好氧发酵过程中添加有机调理剂刨花时,80% 的 NP 得到降解。可见添加适量的有机调理剂有利于 NP 的降解,并且可能随着添加量的提高 NP 的降解效率相应提高。

(2) 温度

温度可影响微生物生长、反应速率和水分脱除。堆体内的温度越高,反应的速度越快。由于高温分解较中温分解速度要快,且高温可将虫卵、病原菌、寄生虫、孢子等迅速彻底地杀灭,故一般多采用高温生物发酵处理。

温度对 PAHs 生物降解的影响主要表现在其对 PAHs 的理化性质、化学组成、微生物对 PAHs 的代谢以及微生物群落结构等的影响。低温下由于酶活性的降低使 PAHs 的生物降解受到抑制。在 30—40℃ 范围内,高温可以使 PAHs 代谢率达到最大值。但超过这个温度范围,PAHs 的膜毒性会增高^[32]。多环芳烃的降解主要有生物降解和挥发,当温度超过 60℃,挥发发生在污泥好氧发酵开始的阶段^[33]。Patryk Oleszczuk^[27]认为在污泥好氧发酵过程 PAHs 其降解率从 14% 上升到 74%,主要取决于好氧发酵的温度。Antizar-Ladislao 等^[34]报道 25℃ 是 PAHs 降解和微生物活性最佳的温度。Yuan S Y 等^[35]指出在 pH 值为 7,温度为 30℃ 时 PAHs 降解效果最好。

Lu J^[36]等的研究发现 NP 的降解随温度升高而升高。Lashermes 等^[37]通过模拟试验,发现 NP 在 50℃ 时的降解作用比发酵初期和腐熟期降解快,但在 65—75℃ 高温阶段反而抑制 NP 的降解。Constantina Pakou^[21]按照好氧发酵的实际升温过程进行研究发现好氧发酵过程中 NP 的降解速度小于因 NPE 的降解生成 NP 的速度,因此好氧发酵后 NP 的浓度有升高的现象。在温度 35—55℃ 时,NP、NPEO1、NPEO2 在污泥好氧发酵过程中开始降解^[22]。Moeller J 等^[22]发现不同温度下 4-NP 和 NPE 降解程度不同,在 65℃ 时,NP1EO 和 NP2EO 均被快速降解消失,而 4-NP 却快速积累。这些研究表明:在污泥好氧发酵过程中,创造一个相对较高的温度比绝对高温效果要好。

(3) 氧气

供气是好氧发酵成功的重要因素之一。一般而言,发酵温度在 55℃ 时,氧气浓度以 5%—15% 为宜,而强制通风量应控制在 $1.5—2.0 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ (干泥) 左右^[38]。

牛俊玲等^[39]指出,微生物降解多环芳烃的活性与氧气含量、水分含量密切相关,当氧气含量少(<18%)、水分含量高(>75%)时,发酵就从好氧条件转化为厌氧条件。好氧发酵水分过高以及含氧量不足时不利于多环芳烃的完全降解,而通气方式尤其是间歇通气的供氧充足且有效性高,因而多环芳烃降解效果更佳。

从降低污泥中 NP 含量来看,好氧处理效果优于厌氧处理^[40]。关于 NPE 在厌氧条件下降解的报道比较少,比较多见的是 NPE 在好氧条件下降解的报道^[23]。在好氧条件下,微生物通过产生单加氧酶或双加氧酶,对 NP 中最为稳定的苯环结构进行降解,最终达到 NP 的完全矿化。Patureau^[41]研究发现污泥中的壬基酚在厌氧/好氧消化处理过程中能得到较好去除,采用高温好氧-中温厌氧或高温厌氧结合处理 NP 类物质的去除效果更佳。

(4) pH 值

污泥中多环芳烃的降解受物料 pH 值的影响,环境中的 pH 值可影响微生物酶反应的速度。如果介质中的 H^+ 或 OH^- 的质量浓度不在微生物生存的适宜范围内,可能导致微生物的细胞膜和质膜上的电荷发生变化,

影响物质的通透性和吸收转化,从而影响酶活性及降解性能。

Pignatello^[42]指出 pH 值直接影响生物吸附和多环芳烃降解。Patryk Oleszczuk^[27]实验发现,为了适应微生物的生长,pH 值必须处于一个适当的水平,变化范围在 6.1—6.9,随着 pH 值的增加,PAHs 的去除率非常明显,主要原因在于酸度的降低可能刺激微生物的降解活动。

不同的 pH 值对于 NP 的降解也有一定影响,Chang BV 等^[31]在研究发现,沉积物和土壤中 NP 降解的最适宜 pH 值为 7。污泥好氧发酵时,pH 在 5—9 范围内,随着 pH 升高污泥中 NP 的降解速率也在升高^[43]。目前关于在污泥中生物降解 NP 的报道不多,到底什么范围内的 pH 值适合 NP 的生物降解有待于进一步研究。

(5) 水分

大量研究表明^[44],含水率低于 30% 时,微生物在水中提取营养物质的能力降低,有机物分解缓慢;当水分低于 12%—15% 时,微生物的活动几乎停止。反之,含水率超过 65% 时,水就会充满物料颗粒间的间隙,堵塞空气的通道,使空气含量大量减少,发酵由好氧状态向厌氧转化,温度急剧下降,其结果是形成发臭的中间产物,影响有机污染物的降解效果。一般认为含水率为 50%—65% 为最佳条件。

6 结论及建议

(1) 目前我国对污泥中有机污染物的研究以及污泥土地利用后的环境风险评估缺乏深入研究,加强对污泥土地利用时有机污染物及环境风险的分析,是污泥土地利用安全、环保施用前提,而采用生物好氧发酵可有效降解污泥中有机污染物含量,降低土地利用带来的风险。

(2) 研究适合污泥有机污染物降解的好氧发酵条件,包括温度、水分含量、供氧量、C/N、膨胀剂和调理剂的种类等,研究不同污泥好氧发酵条件对有机污染物降解和转化的影响,可为堆制高品质的污泥好氧发酵提供理论指导。

(3) 污泥好氧发酵时,适宜的 C/N 值范围为 25:1—40:1,温度在 30—55℃,氧气浓度以 5%—15% 为宜,而强制通风量应控制在 1.5—2.0 m³/min. t(干泥)之间,pH 在 6—9 范围内,混料含水率为 50%—65%,这些控制条件有利于有机污染物的降解。

(4) 通过优化污泥好氧发酵控制条件(温度、pH 值、供氧量、水分含量、C/N 等),可以大大降低污泥在土地利用时的环境风险,避免污泥资源化利用带来的二次污染问题。

References:

- [1] Wang K J, Gao Z Y, Zhang G C. How are the prospects of investment for sludge treatment and disposal. *Environmental Protection*, 2011, 8: 21-23.
- [2] Mo C H, Cai Y Q, Wu Q T. Research advance on organic pollutants in municipal sludge. *Agro-environment Protection*, 2001, 20(4): 273-276
- [3] Mo C H, Cai Y Q, Wu Q T, Wang B G. Variation of Organic Pollutants in Treatment of Sewage Sludge During Composting. *Agriculture Environmental Protection*, 2001, 20(3): 186-189
- [4] Fang H L, Chen L, Peng X L, Zhou X, Zhou X, Lin L, Nan P. Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in sludge from major municipal sewage treatment plants in Shanghai. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1164-1169.
- [5] Zhai J, Tian W, Liu K. Quantitative assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge from wastewater treatment plants in Qingdao, China. *Environment Monitor Assess*, 2011, 6: 1164-1169
- [6] Zhang X Y, Zhou L X, Cui C H. Jiangsu province city sludge content and its major influencing factors analysis. *Environmental science*, 2008, 29(8): 2271-2276
- [7] Xie W M, Hu Y Y, Liu H B, Xu Z C. Quality assurance/quality control for determination of PCBs in municipal wastewater sludge. *Environment Chemistry*, 2005, 24(5): 599-602
- [8] Shen R Y, Luo Y M, Zhang G Y, Li Z G, Teng Y, Qian W. PCBs and OCPs in Municipal Sludges from Yangtze River Delta Area. *Soils*, 2006, 38(5): 539-546
- [9] Zhang T T, Yu G, Wang B. CALUX bioanalysis to analyze the dioxin-like compounds in sewage sludge of the Beijing wastewater plants. *Persistent organic pollutants forum and national conference collection of papers of the third session persistent organic pollutants in 2008*. Beijing, 2008: 189-191.

- [10] Hao R X, Liang P, Zhou Y W. Study on Translation and Conversion Behavior of Nonylphenol in Municipal Wastewater Treatment. *ChinaWater & Wastewater*, 2007, 23 (1): 105-108.
- [11] Li Y Q, Huang Y, Dong J W. A Study on Ecological Risk Assessment of Sludge Land Use. *Research progress*, 2006, 29 (1): 29-31
- [12] Wang Y F, Qian C L. An Overview of Risk Assessment Method Used in the Constitution of American Regulatory Requirements on Sludge. *Research progress*, 2008, 21(1): 218-222.
- [13] Diederik Schowanek, Helen David, Rosa Francaviglia, Jeremy Halld, Holger Kirchmanne, Paul Henning Kroghf, Nathalie Schraepena, Stephen Smithg, Tanja Wildemann. Probabilistic risk assessment for linear alkylbenzene sulfonate (LAS) in sewage sludge used on agricultural soil. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2007, 49: 245-259
- [14] Hu X L. Ecological risk assessment of sludge land use. [2012-02-01]. <http://wenku.baidu.com/view/e99bd8f77c1cfad6195fa770.html>
- [15] Amir S, Hafidi M, Merlina G, Hamdi H, Revel J C. Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of lagooning sewage sludge. *Chemosphere*, 2005, 58: 449-458.
- [16] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, Zeng Q Y, Athanasios Katsoyiannis, Jean-François Férard. Bioremediation of polycyclia aromatic hydrocarbons (PHAs)-contaminated sewage sludge by different composting processes. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 142: 535-542.
- [17] Hafidi M, Amir S, Jouraiphy A, Winterton P, El Gharous M, Merlina G, Revel J C. Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of activated sewage sludge with green waste. *Chemosphere*, 2008, 99: 8819-8823
- [18] Patryk Oleszczuk. Changes of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of sewage sludges with chosen physico-chemical properties and PAHs content. *Chemosphere*, 2007, 54: 265-272.
- [19] Li H, Wu W X, Liu Y X, Chen Y X, Murry B, McBride. Effect of Composting on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Removal in Sewage Sludge. *Water Air Soil Pollut*, 2008, 193: 259-267.
- [20] Martinen, S K, Hänninen K, Rintala J A. Removal of DEHP in composting and aeration of sewage sludge. *Chemosphere*, 2004, 54: 265-272.
- [21] Constantina Pakou, Michael Kornaros, Katerina Stamatelatu, Gerasimos Lyberatos. On the fate of LAS, NPEOs and DEHP in municipal sewage sludge during composting. *Bioresource Technology*, 2009, 100: 1634-1642.
- [22] Moeller J, Reeh U. Degradation of Nonylphenol Ethoxylates (NPE) in Sewage Sludge and Source Separated Municipal Solid Waste Under Bench-Scale Composting Conditions. *Environment Contamination and Toxicology*, 2003, 70: 248-254.
- [23] Soares A, Guieysse B, Jefferson B, Cartmell E, Lester J N. Nonylphenol in the environment: A critical review on occurrence, fate, toxicity and treatment in wastewaters, *Environment International*, 2008, 34: 1033-1049
- [24] Abad E, Martnez K, Planas C, Palacios O, Caixach J, Rivera J. Priority organic pollutant assessment of sludges for agricultural purposes. *Chemosphere*, 2005, 61: 1358-1369
- [25] Madsen T, Kristensen P, Samsø-Petersen L, Rasmussen J O. Application of sludge on farmland—quality objectives, level of contamination and environmental risk assessment// Specialty Conference on Management and Fate of Toxic Organics in Sludge Applied to Land, Copenhagen, 30 April-2 May 1997. Preprint
- [26] Hackett G A R, Easton C A, Duff S J B. Composting of pulp and paper mill fly ash with wastewater treatment sludge. *Bioresource Technology*, 1999, 70 (3): 217-224
- [27] Patryk Oleszczuk. Influence of Different Bulking Agent on the Disappearance of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) during Sewage Sludge Composting. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 175: 15-32
- [28] Li G X, Zhang F S. The solid waste composting and production of organic compound fertilizer. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [29] Zhang W J, Sheng D Z, Zhang C, Meng M B, Han Q P. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in composting of soil. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 1999, 5(6): 605-609.
- [30] Oleszczuk P, Baran S. Kinetics of PAHs losses and relationships between PAHs properties and properties of soil in sewage sludgeamended soil. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2005, 25: 245-269.
- [31] Chang B V, Liu C L, Yuan S Y, Cheng C Y, Ding W H. Biodegradation of nonylphenol in mangrove sediment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008, 61: 325-330.
- [32] Tan W J, Li Z L, Ding A Z, Wang J S. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil and groundwater: A review. *The ecological environment*, 2007, 16(4): 1310-1317.
- [33] Brändli R, Bucheli T, Kupper T, Mayer J, Stadelmann F X, Tarradellas J. Fate of PCBs, PAHs and their source characteristic ratios during composting and digestion of source-separated organic waste in full-scale plants. *Environment Pollution*, 2007, 148: 520-528.
- [34] Antizar\Ladislao B, Lopez-Real J, Beck A J. Laboratory studies of the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated soil by in-vessel composting. *Waste Management*, 2005, 25: 281-289.
- [35] Yuan S Y, Chang S W, Chang B V. Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sludge. *Environment Contaminant and Toxicology*,

2003, 71: 625-632.

- [36] Lu J, Jin Q, He Y, Wu J. Enhanced anaerobic biodegradation of nonylphenol ethoxylates by introducing additional sulfate or nitrate as terminal electron acceptors. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008, 62: 214-218.
- [37] Lashermes G, Houot S, Barriuso E. Sorption and mineralization of organic pollutants during different stages of composting. *Chemosphere*, 2010, 79: 455-462.
- [38] Zhang Q M, Chen W P, Hu G C, Sun H W, Zhu T. State and Development for Treatment and Disposal of Sewage Sludge in City. *Environmental protection*, 2000, 19(1): 58-61.
- [39] Niu J L, Cui Z J, Wang L L, Li G X, Li Y M. Biodegradation of organic pollutant in composting process. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 152-155.
- [40] González M M, Martín J, Santos J L, Aparicio I, Alonso E. Occurrence and risk assessment of nonylphenol and nonylphenol ethoxylates in sewage sludge from different conventional treatment processes. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 563-570.
- [41] Patureau D, Delgenes N, Delgenes J. Impact of sewage sludge treatment processes on the removal of the endocrine disrupters nonylphenol ethoxylates. *Chemosphere*, 2008, 72: 586-591.
- [42] Pignatello J J. Soil organic matter as a nanoporous sorbent of organic pollutants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1998: 445-467.
- [43] Liu Y, Wang F, Xia S, Zhao J. Study of 4-t-octylphenol degradation and microbial community in granular sludge. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 167-171.
- [44] Jimenez E I, Garcia V P. Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. evaluation of temperature, pH, C/N ratio and cation-ex2 change capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 1991, 6: 45-60.

参考文献:

- [1] 王凯军, 高志永, 张国臣. 投资污泥处理处置前景如何. *环境保护*, 2011, 8: 21-23.
- [2] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂. 城市污泥中有机污染物的研究进展. *农业环境保护*, 2001, 20(4): 273-276.
- [3] 蔡全英, 莫测辉, 吴启堂, 王伯光. 城市污泥堆肥处理过程中有机污染物的变化. *农业环境保护*, 2001, 20(3): 186-189.
- [4] 方海兰, 陈玲, 彭喜玲, 周旋, 周犀, 林莉, 南蓬. 上海主要污水处理厂污泥中多环芳烃的分布特征. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1164-1169.
- [6] 张雪英, 周立祥, 崔春红. 江苏省城市污泥中多环芳烃的含量及其主要影响因素分析. *环境科学*, 2008, 29(8): 2271-2276.
- [7] 谢武明, 胡勇有, 刘焕彬, 许振成. 2005. 城市污水污泥中 PCBs 的分析及其 QA/QC 研究. *环境化学*, 24(5): 599-602.
- [8] 申荣艳, 骆永明, 章钢娅, 李振高, 滕应, 钱薇. 2006. 长江三角洲地区城市污泥中多氯联苯和有机氯农药含量与组分研究. *土壤*, 38(5): 539-546.
- [9] 张婷婷, 余刚, 王斌. 利用 CALUX_生物法分析北京市污水厂污泥中的二恶英类化合物. 持久性有机污染物论坛. 2008 暨第三届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集. 北京: 2008, 189-191.
- [10] 郝瑞霞, 梁鹏, 周玉文. 城市污水处理过程中壬基酚的迁移转化途径研究. *中国给水排水*, 2007, 23(1): 105-108.
- [11] 李宇庆, 黄游, 董建威. 污泥土地利用生态风险评价初探. *研究进展*, 2006, 29(1): 29-31.
- [12] 王燕枫, 钱春龙. 美国污泥管理体系风险评价方法. *研究进展*, 2008, 21(1): 218-222.
- [14] 胡雪丽. 城市污泥土地利用生态风险评价. [2012-02-01]. <http://wenku.baidu.com/view/e99bd8f77c1cfad6195fa770.html>
- [28] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [29] 张文娟, 沈德中, 张从, 孟明宝, 韩清鹏. 堆制处理过程中的多环芳烃降解. *应用与环境生物学报*, 1999, 5(6): 605-609.
- [32] 谭文捷, 李宗良, 丁爱中, 王金生. 土壤和地下水中多环芳烃生物降解研究进展. *生态环境*, 2007, 16(4): 1310-1317.
- [39] 张清敏, 陈卫平, 胡国臣, 孙红文, 朱坦. 污泥有效利用研究进展. *农业环境保护*, 2000, 19(1): 58-61.
- [40] 牛俊玲, 崔宗均, 王丽莉, 李国学, 李彦明. 堆肥化过程中有机污染物生物降解的研究进展. *中国农业生态学报*, 2006, 14(1): 152-155.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 7 April, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research	SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)
Response of sinapate esters in <i>Arabidopsis thaliana</i> to UV-B radiation	LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)
Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by <i>Chlorella pyrenoidsa</i> and its influential factors	JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)
Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels	HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)
An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems	SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)
Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province	ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)
Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province	BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)
Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus <i>Chaetomium globosum</i> L18 from <i>Curcuma wenyujin</i>	WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)
Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China	HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau	ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)
Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification	LI Yilin (2066)
Effects of <i>Eriosoma lanigerum</i> (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars	WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)
Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community	JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)
Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China	XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)
Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province	WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)
The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China	GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)
Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin	ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)
Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange (<i>Poncirus trifoliata</i>) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination	XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)
The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of <i>Chrysanthemum</i> leaves	YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)
Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China	LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)
Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau	ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)
Life history and spatial distribution of a <i>Taiwania flousiana</i> population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China	CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)
The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy	ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)
Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS	XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)
Early nitrogen deposition effects on CO ₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil	WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)
Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)
Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp (<i>Cyprinus carpio</i>) in Xiaolangdi Reservoir	SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)
Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method	TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)
Host searching behaviour of <i>Apanteles cypris</i> Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ...	ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)
The effect of hedgerows on the distribution of <i>Harmonia axyridis</i> Pallas in agroforestry systems	YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)
Induction of early resistance response to <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>mali</i> in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ...	WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping, et al (2239)
Review and Monograph	
Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change	WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)
Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species <i>Sonneratia apetala</i>	PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)
Discussion	
Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors	YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al (2271)
Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species	YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)
Scientific Note	
Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China	LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)
Effects of <i>Meloidogyne incognita</i> on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ...	LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元