

粪便中温好氧堆肥过程有机物的降解研究*

白 帆^{1,2} 王晓昌²

(1. 灾害监测与机理模拟陕西省重点实验室, 宝鸡文理学院地理科学与环境工程系, 陕西 宝鸡 721016;

2. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要 为了生态厕所的推广使用、便于操作和节约能耗, 多采用无加热的设施, 即在自然条件下(对于小型生态厕所, 接近中温条件)的好氧堆肥处理。了解中温好氧堆肥过程有机物的降解特性, 对于生态厕所的推广使用和简化设计、操作等具有重要意义。采用密闭式好氧堆肥反应器, 模拟中温(35℃)的堆肥温度, 以新鲜锯末为空白载体, 在含水率为60%以及连续强制供气条件下, 进行了为期14 d的实验, 评估中温好氧堆肥过程中粪便中有机物的降解特性。结果表明, 中温条件下粪便中有机物去除率达到63%以上; 且堆肥腐熟期长达10~12 d。微生物总量的磷脂分析表明, 中温条件下堆肥的微生物总量的变化充分说明了有机物的生物降解特性。中温好氧堆肥过程中具有较高的有机物去除率, 只是堆肥腐熟期较长, 这对于生态厕所在实际中的推广应用及设计操作等意义重大。

关键词 堆肥反应器 人粪便 有机物降解 堆肥腐熟期 生物量 磷脂法

Study on organics biodegradation during aerobic thermophilic composting of human feces BAI Fan^{1,2}, WANG Xiaochang².

(1. Key Lab of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Department of Geo-science and Environmental Engineering, Baoji University of Arts & Sciences, Baoji Shaanxi 721016; 2. Key Lab of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055)

Abstract: Batch experiments were conducted using a closed aerobic composting reactor with sawdust as the bulky matrix to simulate the condition of bio-toilet for sanitary disposal of human feces. Under a controlled condition of temperature at 35℃, moisture content at 60% and continuous air supply, the aerobic composting experiments were conducted for 14 days, and the biodegradation of organics in human feces during the composting process was investigated. Results showed that more than 63% fecal organic was removed under thermophilic condition. Compost maturity period lasted for 10-12 days at 35℃. Biomass was analyzed by phospholipid fatty acids (PLFA), the process of organics biodegradation could be well described by the first class bio-chemical dynamics reaction. Generally speaking, satisfied compost effect was reached under the methapholic condition while composting maturity period is long, it was important for designing and further spread of bio-toilet.

Keywords: composting reactor; human feces; organic degradation; composting maturity period; biomass; phospholipid analysis

在我国, 尤其在农村, 传统的粪便处理是覆土堆肥的旱厕。晴天气味刺鼻, 蚊蝇满地, 雨天环境更为恶劣。这种传统的旱厕卫生问题严重, 导致传染性疾病的传播和蔓延。另外, 覆土堆肥工作量大, 取土不便。随着农民生活水平的提高和新农村建设的推进, 一些地方将其改造为水冲式厕所, 虽然使用方便, 但化粪池存在脏、臭、不卫生的问题, 加上干旱缺水地区水资源的紧缺以及冲厕污水的排放和收集处

理等问题依然存在。

好氧堆肥作为一种实用性技术, 用于生态厕所人粪便的卫生降解, 具有免水冲、卫生、方便、可回收利用资源等优点。该技术对于缺水或严重缺水地区粪便的处理、新农村建设中传统厕所的改造具有重要意义^[1,2]。为了节约能源、便于推广应用和方便操作, 生态厕所常常省去加热部分装置, 使得生态厕所的好氧堆肥过程处于自然状态(接近中温

第一作者: 白 帆, 男, 1973 年生, 博士研究生, 研究方向为水污染治理、固体废物处理以及资源回收利用。

* 国家“863 计划”项目(No. 2006AA06Z328); 国家自然科学基金重大国际合作项目(No. 50621140001、No. 50621140002); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No. 2008ZX07317-004); 长江学者基金和创新研究梯队项目(No. IRT0853); 宝鸡文理学院院级项目(No. YK1030)。

35 ℃)。笔者曾采用日本科学技术振兴机构 JST 提供的 Bio-Lux S15 型堆肥反应器和自行设计的反应器处理粪便,均表明基于粪便卫生降解的生态厕所所在高温条件下具有良好的有机物降解特性^{[3] 228-234, [4]}。为了进一步在新农村建设中,尤其是农村卫生条件的改善方面应用该技术,有必要研究中温条件下粪便好氧堆肥过程中有机物的降解特性。笔者采用自行设计的堆肥反应器,研究中温条件下好氧堆肥过程粪便中有机物降解的特性,对于简化生态厕所的设计和运行以及改造传统厕所具有重要意义。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置和材料

本研究采用的实验装置为密封式堆肥反应器^{[3] 229},如图 1 所示。该反应器采用有机玻璃加工而成,由内外 2 层柱状有机玻璃构成,内筒直径 10 cm,高 55 cm。外层空间装热水构成水浴环境以使内筒堆肥反应主体(反应堆)保持恒定的温度。水浴温度由热水泵、温度传感器、加热棒以及温控微处理器进行联合控制。搅拌器垂直置于反应堆内,通过搅拌手柄进行手动搅拌以使堆肥材料混合均匀。内筒底部装有布气板使通过气泵强制进气能够均匀地分布在反应堆中。

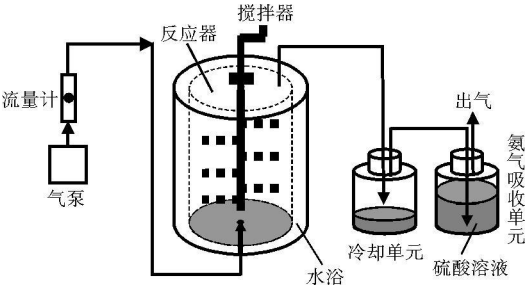


图 1 堆肥反应器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental composting reactor

作为生物载体的锯末均由西安市某木材加工厂提供;实验中定量投加的粪便取自某校学生公寓,粪便由专人集中收集,混合均匀后分装冷藏于- 20 ℃的冰箱中保存。锯末和粪便的理化特性见表 1。

表 1 实验所用锯末和粪便的理化特性

Table 1 Physicochemical properties of the saw dust and feces used in the experiment

项目	含水率/%	有机固体(S_{org}) /($g \cdot kg^{-1}$)	总有机碳(TOC) /($g \cdot kg^{-1}$)	COD /($g \cdot kg^{-1}$)	总氮(N_{tot}) /($g \cdot kg^{-1}$)	有机氮(N_{org}) /($g \cdot kg^{-1}$)	无机氮(N_{in}) /($g \cdot kg^{-1}$)
锯末	11.1	956.9	378.1	1 270.3	2.10	2.10	0
粪便	81.8	901.0	497.9	1 671.3	68.23	55.94	12.29

1.2 操作条件

用水浴系统控制整个反应堆处于恒温条件下。初始加料粪便:粪便 440.3 g(干质量 80.0 g),锯末 360.0 g(干质量 320.0 g),补充 200 mL 去离子水使得初始含水率约为 60%,总质量为 1 000.0 g,混合均匀后加入反应器中密闭。控制进气流量 0.4 $m^3/(min \cdot kg)$,进行好氧中温堆肥反应。手动搅拌间隔 8 h 搅拌 1 次,每次 2 min。每个实验重复进行 2 次,每次实验周期为 14 d,数据以均值±标准差表示。

1.3 采样与分析

1.3.1 物化分析

取样和分析方法参考文献^[3],固体样品主要分析水分、总固体(S_{tot})、 S_{org} 、COD 和 TOC^[5]。

1.3.2 生物总量

采用磷脂法^[6,7]分析样品中微生物总量的变化,具体操作如下:(1)取出适量填料;(2)将待测物置于 100 mL 具塞三角瓶中,加入氯仿、甲醇和去离子水的混合萃取液(氯仿:甲醇:去离子水体积比为 1.0:2.0:0.8) 19 mL,用力摇 10 min,静置 12 h,向三角瓶中加入氯仿和去离子水各 5 mL,使得最终氯仿:甲醇:去离子水为 1.0:1.0:0.9,静置 12 h;(3)取出含有脂类组分下层氯仿相 5 mL 转移至 10 mL 具塞刻度试管,水浴(温度< 65 ℃)蒸干;(4)向试管中加入 0.8 mL 5%(质量分数)过硫酸钾溶液,并加入去离子水至 10 mL,在高压蒸汽灭菌锅内 121 ℃消解 30 min;(5)然后加入 0.2 mL 抗坏血酸溶液,混匀,30 s 后加入 0.4 mL 钼酸铵溶液充分混匀,室温放置 15 min 显色,最后将分光光度计波长调至 700 nm 处,测定吸光度。所用试剂均为分析纯。

2 结 果

2.1 粪便堆肥过程有机物减量化的效果

粪便好氧堆肥过程 S_{tot} 的减量,有利于延长堆肥反应器的使用周期、减少堆肥材料的更新频率、提高堆肥产物的有机肥肥效、降低收集运输和农田施用的工作量。因此, S_{tot} 的减量效果是评价好氧堆肥的一个重要指标。粪便好氧堆肥过程 S_{tot} 变化情况见图 2。从图 2 可以看出,中温条件下粪便中 S_{tot} 的去

除率最终达到 56.6%, 减量化效果显著。同时, 灰分无机固体(S_{ino}) 累积缓慢, 说明矿化的无机物很少, 说明有机物生化降解彻底。这是以锯末为载体的生态厕所粪便好氧堆肥能够长期使用(半年到一年以上)的重要原因。由于好氧堆肥过程有机物降解较为彻底, 产物稳定, 减量化效果显著, 因此以锯末为载体的粪便好氧堆肥卫生处理方法, 可以极大降低劳动强度。

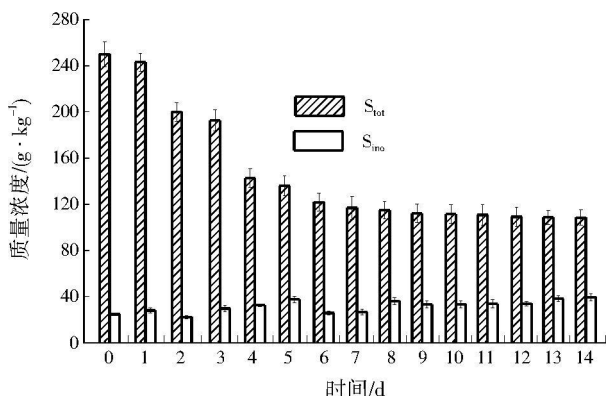


图2 中温好氧堆肥过程粪便中 S_{tot} 的变化
Fig. 2 Variation of fecal solid contents in the composting process

2.2 粪便堆肥有机物生化降解的特性

堆肥可以使有机物得到很好的生化降解和矿化稳定, 尤其高温堆肥, 不但加速有机物的生化降解, 而且使堆肥腐熟期缩短, 粪便的降解更彻底和稳定更快。在堆肥周期内, 在恒温水浴控制堆肥温度、恒定流速强制通风的好氧条件下, 粪便中有机物生化降解的特性见图 3。由图 3 可见, 中温好氧堆肥条件下有机物(以 COD 表征)的去除率达到 63% 以上, 堆肥腐熟期(各指标稳定不变)为 10~12 d。与高温好氧堆肥反应过程中有机物的降解^{[3]231} 比较, 中温好氧堆肥有机物去除率约 10%, 堆肥腐熟期

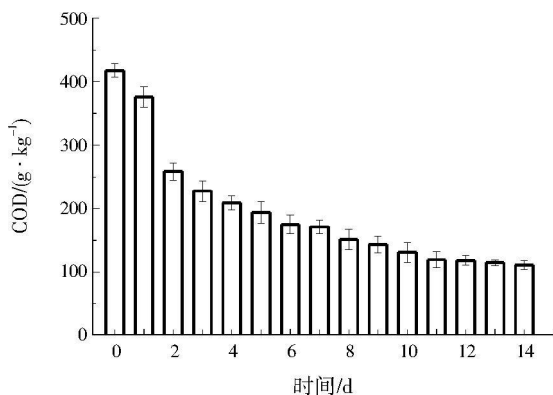


图3 中温好氧堆肥过程粪便中 COD 的变化
Fig. 3 Variation of fecal COD in the methapholic aerobic composting process

延长了近 4 d。尽管中温好氧堆肥的有机物去除率比高温好氧堆肥的去除率低, 但仍可达到较高的去除率, 粪便中的有机物能得到很好的生化降解和矿化稳定。另外, 中温好氧堆肥以腐熟时间的延长可换取能源的节约, 对于反应器的节能以及在农村、偏远地区、风景区等推广使用具有重要意义。

3 讨论

3.1 堆肥过程有机物降解的影响因素

含水率和 pH 对粪便好氧堆肥有很大的影响。堆肥过程含水率要求稳定在 50%~65%, pH 稳定在 5~9, 以保证好氧堆肥能够顺利进行。从图 4 可以看出, 在整个中温好氧堆肥过程中, 堆体含水率虽然有所下降, 但在堆肥周期内仍能维持在 50%~60%。在整个堆肥过程中 pH 的变化幅度不大, 基本稳定在 7 左右。含水率和 pH 变化甚至比高温下的变化更微小^{[3]231}, 说明中温好氧堆肥过程中物化条件更为稳定, 有利于微生物的生长繁殖和有机物的生化降解。

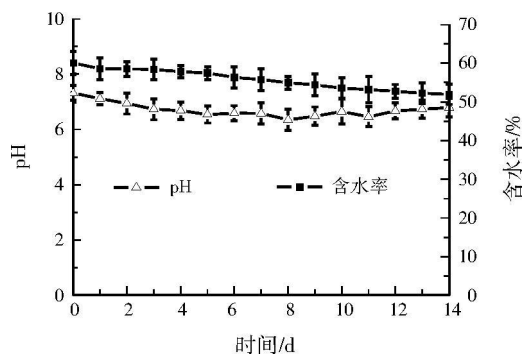


图4 中温好氧堆肥过程中含水率和 pH 的变化
Fig. 4 Changes of moisture and pH in composting

3.2 堆肥过程有机物降解的生物特性

微生物是堆肥的主要作用者, 对其分析有助于理解堆肥的有关特性。由于常规的生物量分析方法——培养计数法只对极少部分可培养的微生物进行准确计数分析, 堆肥中大多数的微生物往往难以培养。因此, 本研究对生物量的分析, 采用了分子生物学的测定方法——磷脂法。该方法可以测定常规培养难以培养的微生物, 得到的生物量接近真实值^{[8]13}。堆肥过程生物量的变化见图 5。由图 5 可见, 堆肥过程中生物量总体呈现先降低再升高最后降低的变化趋势。中温条件下, 堆肥初期, 由于环境的变化, 微生物经历较长的趋于下降的自适应波动过程(约 5 d)。适应新的环境后, 在新陈代谢过程中对有机物进行生化降解, 微生物开始生长和繁殖, 生

物量开始缓慢增加,在堆肥反应的第 11 天达到峰值 1.18×10^{14} cfu/ kg。之后,由于底物降解基本完成,微生物进入内源代谢阶段,生物量开始下降,直到堆肥周期结束时仍有较高的生物量(0.63×10^{14} cfu/ kg)。堆肥过程中生物量变化的过程与有机物降解去除的过程吻合。生物量的增加与有机物去除率的升高呈显著正相关,说明中温好氧堆肥过程中有机物生物降解的本质特性。

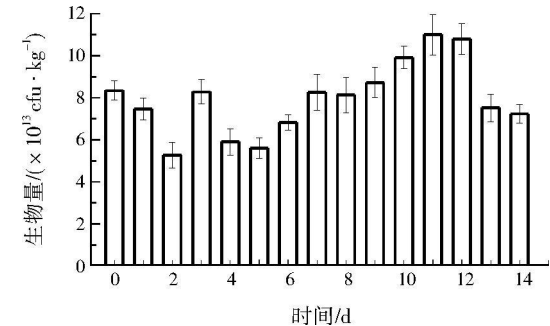


图 5 中温好氧堆肥条件下生物量随时间的变化
 Fig. 5 Changes of microbial biomass during methapholic composting process

3.3 堆肥过程有机物降解的动力学

利用软件 Orign8.0 对 COD 的变化进行拟合,结果见图 6。拟合曲线方程见式 (1),并对其进行数学变化,得到类似一级动力学方程,这也与目前研究得出的有机物降解的动力学方程一致^[14 17]。可以看出,该动力学模型很好地反映了粪便中温好氧堆肥条件下 COD 的变化规律,相关系数(R^2)达到 0.985 0。这从动力学的本质揭示了粪便好氧堆肥有机物生化降解的本质。

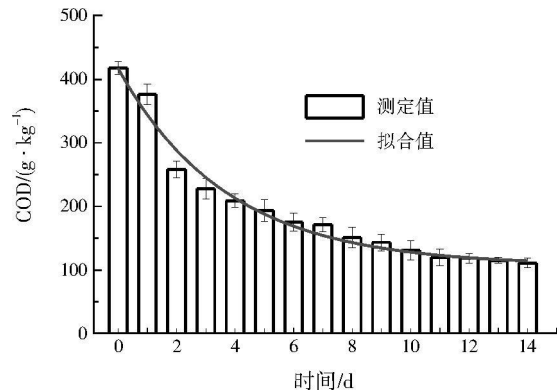


图 6 COD 随时间的变化

Fig. 6 Variation of COD in the composting process

$$c = 310.48374e^{-\frac{t}{3.72062}} + 106.85345 \quad (1)$$

对其求导并整理后得出:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{1}{3.72062}c + \frac{106.85345}{3.72062} \quad (2)$$

该式形式归为:

$$\frac{dc}{dt} = -kc + b \quad (3)$$

式中: c 为有机物(COD) 质量浓度, g/ kg; t 为时间, d; k 为反应动力学常数, 取决于反应温度。

4 结 论

(1) 粪便 S_{tot} 减量效果显著(56% 以上), 灰分 S_{ino} 累积缓慢, 说明反应器可以长时间使用。

(2) 粪便中有机物的降解仍可达到较高的去除率(约 63% 以上), 说明在反应器中粪便有机物能够得到很好的生化降解和矿化稳定。

(3) 中温好氧堆肥腐熟期(约 10~ 12 d) 较之高温好氧堆肥稍长。中温好氧堆肥以腐熟时间的延长可换取能源的节约, 这对于反应器的节能以及在农村、偏远地区、风景区等推广使用具有重要意义。

(4) 堆肥过程有机物降解的动力学符合类似一级动力学方程, 说明粪便中有机物的生化降解符合一般有机物降解的规律, 即一级生化反应。

(5) 在中温条件下, 粪便的好氧堆肥可以有效减少粪便的总固体量、生化降解和矿化稳定粪便中的有机物, 实现粪便的免水冲、卫生降解、资源回收的生态卫生处理。

参考文献:

- [1] LOPEZ ZAVALA M A, FUNAMIZU N. Design and operation of the bio-toilet system [J]. Water Science & Technology, 2006, 53(9): 55-61.
- [2] LOPEZ ZAVALA M A, FUNAMIZU N, TAKAKUWA T. Biological activity in the composting reactor of the bio-toilet system [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(7): 805-812.
- [3] BAI Fan, WANG Xiaochang. Nitrogen retaining property of compost in an aerobic thermophilic composting reactor for the sanitary disposal of human feces [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2010, 4(2).
- [4] 王洪波, 王晓昌. 新型堆肥生物反应器人粪堆肥功效的评价 [J]. 环境工程学报, 2008, 2(1): 97-100.
- [5] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 环境科学出版社, 2002.
- [6] FINDLAY R H, KING G M, WATLING L. Efficacy of phospholipid analysis in determining microbial biomass in sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1989, 55(11): 2888-2893.
- [7] KIM W H, NISHIJIMA W, SHOTO E, et al. Pilot plant study on ozonation and biological activated carbon process for drinking water treatment [J]. Water Science & Technology, 1997, 35(8): 21-28.
- [8] 叶劲松, 吴克, 蔡敬民, 等. 好氧堆肥微生物研究方法进展 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(30): 13287-13291.

(下转第 53 页)

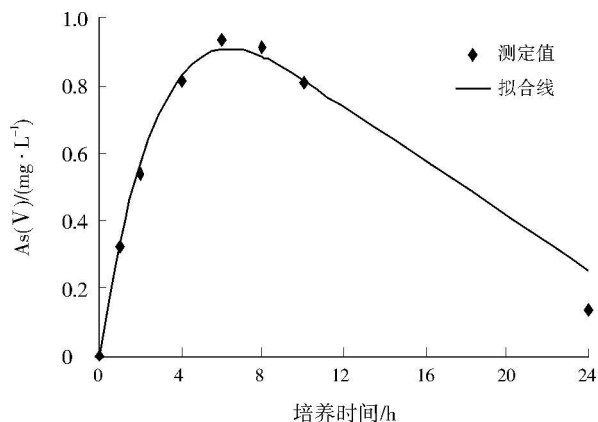


图4 As() 初始质量浓度为 10.00 mg/L 时蜈蚣草氧化 As() 的动力学过程拟合结果

Fig.4 The simulated and experimental data of As() when initial As() was 10.00 mg/L

由图4可见,培养液中 As() 浓度的实测值与理论值能较好地相符, $R^2 = 0.9895$ 。拟合得到的参数为: $K_1 = 0.093 \text{ h}^{-1}$ 、 $K_2 = 0.011 \text{ h}^{-1}$ 、 $K_3 = 0.224 \text{ h}^{-1}$ 、 $K = 3.6 \text{ h}^{-1}$ 。

本研究中,当初始 As() 浓度较低时,蜈蚣草直接吸收 As() 的表现速率常数远远大于氧化 As() 的表现速率常数,前者为后者的 8.45 倍,而蜈蚣草吸收 As() 的表现速率常数则是吸收 As() 的 2.41 倍。

另据计算,在被吸收的砷中,通过直接 As() 途径吸收的占 89.42%,通过先氧化为 As() 再加以吸收的部分占 10.58%。可见,在被吸收的总砷中,以 As() 形式吸收的只是一小部分,其原因是蜈蚣草氧化 As() 的速率较慢。

3 结 论

(1) 蜈蚣草在吸收 As() 的同时,可以将 As() 氧化为 As() ,然后再进行吸收,即砷可通过 2 种途径被蜈蚣草吸收。

(2) 当培养液中 As() 初始浓度较低时 (10.00 mg/L),蜈蚣草对砷的吸收和氧化过程较好地符合一级动力学规律,表现速率常数为 0.104 h^{-1} ,当初始质量浓度为 20.00~50.00 mg/L 时,砷吸收过程不符合一级动力学规律,需用 Michaelis-Menten 方程加以描述。

(3) 当培养液中 As() 初始浓度较低时,蜈蚣草直接吸收 As()、氧化 As() 和吸收 As() 的表现速率常数分别为 0.093 、 0.011 、 0.224 h^{-1} 。在被吸收的总砷中,以 As() 形式吸收的只是一小部分,其原因是蜈蚣草氧化 As() 的速率较慢。

参考文献:

[1] 谢正苗,廖敏,黄昌勇. 砷污染对植物和人体健康的影响及防治

政策[J]. 广东微量元素科学, 1997, 4(7): 17-21.

- [2] 刘锐平,李星,夏圣骥,等. 高锰酸钾强化三氯化铁共沉降法去除亚砷酸盐的效能与机理[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 72-75.
- [3] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [4] 谢景干,雷梅,陈同斌,等. 蜈蚣草对污染土壤中 As、Pb、Zn、Cu 的原位去除效果[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 165-171.
- [5] 张昆峰,宋卫锋,钟宜航. 粤北某市“土法炼砷”土壤中化学砷污染的研究[J]. 广东化工, 2006, 33(12): 76-78.
- [6] TU S, MA L Q, MACDONALD G E, et al. Effects of arsenic species and phosphorus on arsenic absorption, arsenate reduction and thiol formation in excised parts of *Pteris vittata* L. [J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 51(12): 121-131.
- [7] WANG Junru, ZHAO Fangjie, MEHARG A A, et al. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*: uptake kinetics, interactions with phosphate and arsenic speciation[J]. Plant Physiology, 2002, 130(18): 1552-1561.
- [8] CAO Xinde, MA L Q, SHIRALIPOUR A. Effects of compost and phosphate amendments on arsenic mobility in soils and arsenic uptake by the hyper-accumulator, *Pteris vittata* L. [J]. Environmental Pollution, 2003, 126(2): 157-167.
- [9] KERTULIS G M, MA L Q, MACDONALD G E, et al. Arsenic speciation and transport in *Pteris vittata* L. and the effects on phosphorus in the xylem sap. [J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 54(3): 239-247.
- [10] POYNTON C Y, HUANG J W, BLAYLOCK M J, et al. Mechanisms of arsenic hyper-accumulation in *Pteris species*: root as influx and translocation[J]. Planta, 2004, 219(2): 1080-1088.
- [11] HUANG Zechun, CHEN Tongbin, LEI Mei, et al. Direct determination of arsenic species in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* by EXAFS[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(9): 46-50.
- [12] ASHER C J, REAY P F. Arsenic uptake by barley seedlings [J]. Plant Physiology, 1979, 6(6): 459-466.
- [13] ABEDIN M J, FELDMANN J, MEHARG A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants[J]. Plant Physiology, 2002, 128(12): 1120-1128.

编辑:卜岩枫 (修改稿收到日期:2011-06-11)

(上接第 18 页)

- [9] 唐景春,ARATA K. 酞类图谱分析在环境微生物生态测定中的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(4): 530-536.
- [10] 颜慧,蔡祖聪,钟文辉. 磷脂脂肪酸分析方法及其在土壤微生物多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 851-859.
- [11] 吴振斌,王亚芬,周巧红,等. 利用磷脂脂肪酸表征人工湿地微生物群落结构[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 737-741.
- [12] 王道营,徐幸莲,徐为民. 磷脂的提取与分析检测技术[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(7): 51-54.
- [13] 齐鸿雁,薛凯,张洪勋. 磷脂脂肪酸谱图分析方法及其在微生物生态学领域的应用[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1576-1582.
- [14] 席北斗,李英军,刘鸿亮,等. 生活垃圾堆肥分阶段反应动力学研究[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(5): 381-383, 386.
- [15] 席北斗,李英军,刘鸿亮,等. 生活垃圾堆肥工艺条件及其反应动力学研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(11): 31-34.
- [16] 陆伟东,周少奇. 好氧堆肥系统动力学模型及自控技术研究应用进展[J]. 中国资源综合利用, 2008, 26(6): 19-20.
- [17] 罗玮,曾光明. 城市生活垃圾堆肥过程动力学模型研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(5): 106-109.

编辑:陈泽军 (修改稿收到日期:2010-03-18)