

展漫军,李婧,徐慧,等. 菇渣应用于生物堆修复有机污染土壤的研究[J]. 江苏农业科学,2013,41(12):344-347.

菇渣应用于生物堆修复有机污染土壤的研究

展漫军,李婧,徐慧,张磊,杭静

(南京市环境保护科学研究院,江苏南京 210013)

摘要:以南京市某化工废料堆场的有机污染土壤为研究对象,以甲苯、硝基苯、萘、菲为模型污染物,应用生物堆修复技术修复有机污染土壤,研究不同工艺下生物堆对土壤有机污染物的降解效果。结果表明:加入 2% 菇渣作为土壤结构及理化性质改良剂,能有效改善土壤通气能力和持水能力,增加土壤有机质含量,显著提高有机污染物降解率。加入 2% 厩肥,增加了微生物碳源,促进微生物新陈代谢,有助于提高堆体温度和有机污染物降解率。本示范工程中,2% 菇渣 + 主动曝气 + 被动曝气 + 自然通风的堆体运行工艺的环境效果和经济效益最佳。

关键词:土壤修复;生物堆;有机污染物;菇渣;厩肥

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2013)12-0344-04

近年来,随着工农业的快速发展以及城市化建设的推进,我国土壤污染问题日益严重,对人群健康构成威胁^[1-2]。Sufita 等于 20 世纪 80 年代针对有机污染土壤提出了生物修复技术,即利用微生物的新陈代谢过程,直接以有机污染物作为代谢底物,或者利用共代谢途径将有机污染物降解为 CO₂、H₂O 或其他无毒、低毒产物,从而实现有机污染土壤的修

复^[3-4]。生物修复方法是目前最有应用前景的技术之一,限制有机污染物降解率的因素通常有土壤通气状态、pH 值以及碳、氮、磷等营养物质含量、微生物种类、种群数量和污染物与土壤的结合状态等^[5-11]。一般通过生物刺激和生物强化 2 种方式来提高有机污染物降解率。生物刺激即通过一定的措施优化土壤微生态环境,主要包括提供电子受体、调节土壤含水率及 pH 值、投加适量的营养物质等;生物强化则是指向土壤中投加菌剂,以增加土壤中具有特定降解能力菌类的种群数量^[12-17]。

菇渣是食用菌培养采收后废弃的培养基质,是一种农业生产的废弃物^[18]。随着食用菌生产规模的扩大,菇渣的产生量也越来越大。如果不对其充分利用,将对生态环境构成很大的压力。此外,菇渣含有丰富的粗蛋白、氨基酸、菌体蛋白、

收稿日期:2013-05-12

基金项目:江苏省南京市市属公益类科研院所科学事业费专项(编号:2010305S)。

作者简介:展漫军(1970—),女,江苏南京人,博士,高级工程师,研究方向为环境保护技术咨询以及土壤、地下水修复技术研发。

E-mail:manjunzhan2007@163.com。

[3] Vergé X C, De Kimpe C, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2/4): 255-269.

[4] 田光明,何云峰,李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(3): 294-298.

[5] 任万辉,许黎,王振会. 中国稻田甲烷产生和排放研究[J]. *气象*, 2004, 30(6): 3-7.

[6] 马秀梅,朱波,杜泽林,等. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1199-1202.

[7] 唐海明,肖小平,帅细强,等. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(5): 1481-1489.

[8] 李勇先. 稻田土壤中氧化亚氮的释放机制及控制[D]. 杭州:浙江大学,2003:62.

[9] Liu S, Zhang L, Jiang J, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice seedling nurseries under flooding and moist irrigation regimes in Southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 426: 166-171.

[10] 秦晓波. 减缓华中典型双季稻田温室气体排放强度措施的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2011.

[11] Zou J, Huang Y, Jiang J, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China:

Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): 1-9.

[12] 白小琳,张海林,陈阜,等. 耕作措施对双季稻田 CH₄ 与 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 282-289.

[13] 徐华,邢光喜,蔡祖聪,等. 土壤水分状况和质地对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. *土壤学报*, 2000, 37(4): 499-505.

[14] 王智平,曾江海,张玉铭. 农田土壤氧化亚氮排放的影响因素[J]. *农业环境保护*, 1994, 13(1): 40-42.

[15] 熊超. 不同栽培模式下双季稻产量形成特点与温室气体排放差异的初步研究[D]. 南昌:江西农业大学,2012.

[16] 林洪鑫,潘晓华,石庆华,等. 施氮量与栽插密度对超级早稻中早 22 产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 22-28.

[17] 石生伟,李玉娥,万运帆,等. 不同氮、磷肥用量下双季稻田的 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1899-1907.

[18] Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 2196-2210.

[19] Jean L M, Pierre R. Production oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37: 25-50.

酶、维生素、矿物质等营养物质,可以为有机污染土壤生物修复过程中微生物的新陈代谢提供良好的营养来源,同时,菇渣具有疏松多孔的物理性质和一定的物理强度,是良好的土壤填充剂^[19-20]。

本研究将菇渣作为土壤调节剂优化土壤微生态环境,应用于生物堆处理有机污染土壤,研究不同堆制条件以及运行工艺下有机污染物的降解率及经济成本,探讨一种应用菇渣处理有机污染土壤的最优工艺条件,也为菇渣资源的再利用探讨一条可行的出路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

室内模拟试验及示范工程所用土壤均取自某化工废料堆场的有机污染土壤,约 100 t;所用菇渣取自某生物肥料企业。土壤和菇渣风干,粉碎,均过 10 mm 筛,备用。

1.2 试验设计

1.2.1 室内土柱模拟试验 采用模拟土柱试验方法确定菇渣添加比例。模拟土柱为内径 9 cm、长 20 cm 的 PVC 管,其底端用纱布蒙住。试验设置 4 个菇渣-土壤的重量配比,依次为 0、2%、4%、6%,即对照组和试验组 1、2、3。土壤和菇渣按照不同试验配比均匀混合后填充入 PVC 管,填充过程保持各处理压实程度及体积一致。

1.2.2 生物堆降解试验 本研究共构建 4 个生物堆,分别为:1 号堆(对照组)用原土堆制;2 号、3 号堆用原土+菇渣堆制;4 号堆用原土+菇渣+2% 厩肥堆制。其中菇渣添加量根据“1.2”试验结果确定。生物堆土壤与堆料充分混匀后检测其碳、氮、磷含量,添加适量的氮肥、磷肥,调节土壤 C:N:P 约为 100:10:1,洒水使其土壤含水率为 25%~30%^[21]。

生物堆基座长约 6 m、宽约 1.5 m、高约 1.5 m。3 号堆的被动曝气管理设在堆体底部,一端封闭,一端连接空气压缩机;堆体中间埋设主动曝气管,主动曝气管管壁钻孔,两端开口伸出堆体外与大气连通。具体生物堆运行工艺见表 1。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 菇渣添加量确定 每个土柱定量添加 200 mL 蒸馏水,静置,记录其每 10 s 的渗漏水重量,根据不同菇渣-土壤配比下的土壤持水量确定菇渣添加量。

1.3.2 检测项目及方法 生物堆分别于建堆时、运行 1 个周期后、运行结束时 3 个时期采取堆心处以及堆体的土样组成混合土样,检测土壤理化性质及有机物浓度。土壤理化性质包括土壤 pH 值、含水率、持水量、水解氮含量、速效磷含量、有机质含量,测定方法采用常规法^[22]。有机物包括挥发性有机物甲苯,半挥发性有机物硝基苯、萘、菲,测定方法分别为 USEPA 8260C 和 USEPA 8270D。在堆体中间距地面 60 cm 处插入温度计测定堆心土壤温度。

表 1 生物堆运行工艺方案

堆体	土壤调节剂	营养物质		水分	曝气条件			翻堆次数(次)
	菇渣	厩肥	氮肥磷肥		自然通风	主动曝气	被动曝气	
1 号堆			建堆时添加	建/翻堆时加适量、每天喷洒适量	室内空气对流			0
2 号堆	建堆、翻堆各加 1 次	—	建堆、翻堆时添加	建/翻堆时加适量、每天喷洒适量	室内空气对流	—	—	1
3 号堆	建堆时添加		建堆时添加	建/翻堆时加适量、每天喷洒适量	室内空气对流	堆体横向、纵向插管	3 次/d, 每次 10~20 min	0
4 号堆	建堆时添加	建堆时加 2%	建堆时添加	建/翻堆时加适量、每天喷洒适量	室内空气对流	—	—	0

2 结果与分析

2.1 菇渣添加量的确定

不同菇渣-土壤配比下模拟土柱渗漏水质量随时间变化情况如图 1 所示。滴落水重量的增加速率,表现为试验组 3>试验组 2≈试验组 1>对照组,表明水分在试验组 3 土样中通过的速率最快,在对照组中通过的速率最慢,而试验组 2 和试验组 1 中水流通过的速率差异不明显。这说明添加菇渣可以增加水分在土壤中的渗漏速率,即增加土壤的孔隙量,所以添加菇渣能有效改善土壤的通气性能,改善堆体的曝气效果。本试验中 6% 菇渣添加量效果最好,2% 与 4% 菇渣添加量效果次之。

本模拟试验中设土柱加水前和水停止滴落时土柱重量差即为土柱涵养水分的重量。经计算,各试验组土柱涵养水分的重量如图 2 所示。从图 2 可以看出,试验组 1 与试验组 2、3 土壤涵养水分的重量相差不大且均明显高于对照组,表明添加菇渣可有效地增加土壤持水能力。加入 4% 或者 6% 菇渣后,土柱涵养水分的重量并没有相应地显著增加,其增加土壤

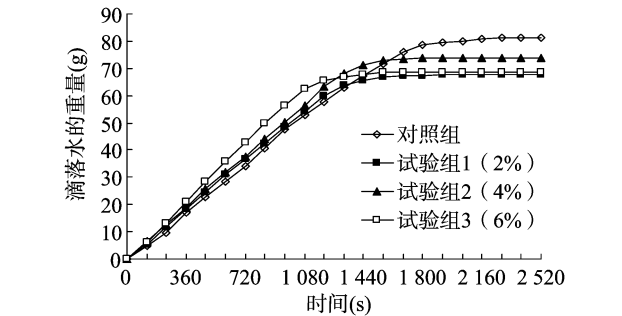


图 1 不同试验组渗出水重量随时间变化情况

持水能力的效果与 2% 菇渣添加量相当。本试验结果表明,当菇渣添加量为 2% 时,即可有效增加土壤持水能力,同时减少盲目添加菇渣造成的经济浪费。

以上分析表明,菇渣作为土壤调节剂可以改善土壤的通气状况,增加土壤持水量,结合考虑经济效益以适应规模化土壤修复工程应用,本试验选用的菇渣添加量为 2%。

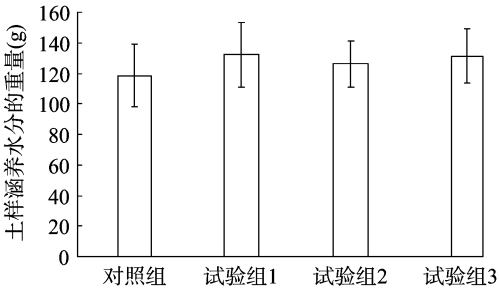


图2 各试验组土样持水能力的比较

2.2 添加菇渣对土壤理化性质的影响

生物堆建堆后,不同处理生物堆的土壤理化性质检测结果表明(表 2),添加菇渣能有效改善土壤的理化性质,主要体现在以下 2 个方面:(1)增加堆体的最大持水量,有利于堆体在运行过程中维持适宜的含水率;(2)增加土壤有机碳含量,为微生物的新陈代谢提供充足的碳源^[21]。其中 4 号堆的有机碳含量最高,主要是因为建堆时添加了一定量的厩肥。此外,通过添加外源氮、磷,调控土壤 C : N : P ≈ 100 : 10 : 1,有利于微生物新陈代谢^[23]。

表 2 生物堆建堆后的土壤理化性质

堆号	最大持水量 (%)	含量(mg/kg)			pH 值
		水解氮	有效磷	有机碳	
1 号堆	35.11	118	10.82	1 242	7.12
2 号堆	53.82	311	39.78	3 151	7.08
3 号堆	54.33	375	35.45	3 166	7.03
4 号堆	52.01	412	42.86	3 954	7.12

2.3 添加菇渣对堆体温度的影响

生物堆建堆后,生物堆堆心温度迅速上升,约 1 周后达到峰值,比室温高 10 ~ 20 ℃。高温持续约 1 周后,堆心温度缓慢下降。堆体运行后期,各堆堆心温度均趋于室温(图 3)。这是因为生物堆体内微生物在开始 1 ~ 2 周内活动活跃,释放了大量的热能,大约 2 周后有机碳基本耗尽,微生物新陈代谢水平降低,产生的热量较少,造成堆心温度逐渐降低。2 号堆在中后期温度有所上升,是因为翻堆过程中再次加入了菇渣,为微生物补充了碳源。

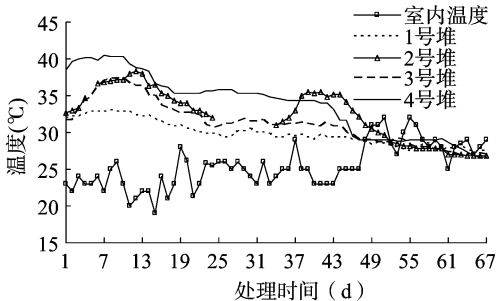


图3 生物堆运行期间堆心温度变化

由图 3 看出,不同处理的生物堆体的温度不同,按堆体温度从高到低依次为 4 号堆 > 2 号堆 > 3 号堆 > 1 号堆。1 号堆堆心温度最低的原因可能是缺乏碳源和矿质营养,微生物新陈代谢水平较低^[23]。4 号堆因堆制时加入菇渣和厩肥,有机碳含量最高,微生物新陈代谢最旺盛,所以温度最高。3 号堆和 2 号堆均加入了菇渣,但是 3 号堆堆心温度略低于 2 号堆,

可能是因为 3 号堆在主动曝气和被动曝气过程中散失了一部分热量。

因此,适量增加生物堆有机碳含量能够提高堆体微生物新陈代谢水平,增加堆心温度。在秋冬季节采用生物堆技术处理有机污染土壤时,可适当提高堆体土壤有机碳含量,利于提高堆体温度,促进微生物活动,加速有机污染物降解。这种措施相对于鼓入电加热空气等做法^[24]成本较低,且安全环保。在夏季采用生物堆技术处理有机污染土壤时,堆体温度很容易因过高而抑制微生物活性,影响有机污染物的降解,因此可通过翻堆或曝气等途径来对堆体降温。

2.4 添加菇渣对有机污染物降解的影响

2.4.1 甲苯 甲苯是挥发性有机物,在生物堆处理过程中,甲苯从土壤颗粒上解吸挥发出来后,在通过生物堆土壤孔隙扩散的同时,不断地被土壤颗粒捕捉,并被吸附其上的微生物降解。本示范工程中,甲苯在 1 号堆中的降解率最低,仅为 79%;2 号堆是在 1 号堆处理的基础上加入菇渣,其甲苯的降解率大幅度提高至 95%;而具有主动及被动曝气装置的 3 号堆,则进一步将甲苯的降解率提高至 100%。这些现象表明添加菇渣及曝气处理对于甲苯的降解均具有显著的促进作用,且其效果优于单独加入菇渣或翻堆处理。可能是因为加入菇渣及曝气处理改善了土壤通气条件^[19-20],有利于挥发性污染物的挥发扩散。4 号堆甲苯的降解率同样达到 100%,表明增加堆体有机质含量,提高微生物活性,从而提高微生物对甲苯的降解能力,也可达到良好的降解效果^[25]。

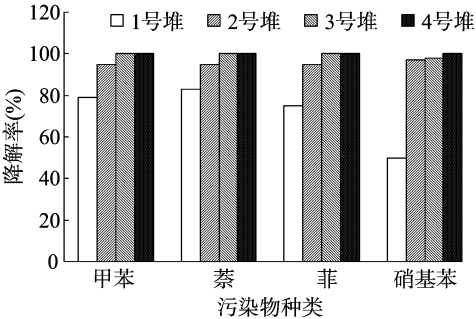


图4 不同生物堆有机污染物降解率的差异

2.4.2 萘、菲 经过 60 d 的运行,萘和菲的降解率在不同处理下的变化趋势大致相同,均表现为 1 号堆最低,2 号堆大幅度升高,3 号、4 号堆降解率最高。在 1 号堆中,菲的降解率较萘低,可能是因为菲的分子结构更复杂,在生物降解过程中环较难打开,此外,菲的生物降解主要通过好氧途径来完成,受碳、氮、磷等营养元素含量的限制^[26]。萘和菲在 1 号堆的降解率低于 2 号堆,表明菇渣对萘、菲的降解同样具有促进作用,这是因为菇渣带入了丰富的碳源,同时提高了土壤通气性能,而翻堆进一步向堆体提供了丰富的氧气。萘和菲在 3 号、4 号堆的降解率均高达 100%,表明曝气措施能够提供良好的好氧环境,添加厩肥能够提供碳源,这 2 种措施均有利于萘和菲的微生物降解。

2.4.3 硝基苯 土壤中的硝基苯主要通过土壤微生物的好氧反应达到消减的目的^[27]。本示范工程运行 60 d 后,1 号堆硝基苯降解率明显低于 2 号、3 号、4 号堆,表明加入菇渣对于硝基苯的降解具有明显促进作用,其中 4 号堆硝基苯降解率最

高,达到 100%,主要因为加入厩肥,增加了微生物碳源。硝基苯在 2 号、3 号堆中的降解速率相差不大,表明翻堆处理和曝气处理同样具有改善微生物好氧环境的功能,并且效果相当。

综合分析以上 4 种有机污染物在不同处理(工艺)生物堆中的降解率可以看出,加入菇渣能够改善土壤通气性和持水能力,增加微生物可用碳源。菇渣是生物堆技术处理有机污染土壤的一种优良土壤调节剂,在加入菇渣的基础上添加适量厩肥能有效增加微生物碳源,提高有机污染的降解率。在生物堆降解过程中进行主、被动曝气能显著促进有机污染物的降解,效果等同于翻堆等常规操作。

2.5 最优工艺条件的选择

本研究结果表明,生物堆正常运行 60 d 时,各种有机污染物均取得了有效降解,以 60 d 为生物堆的运行周期,核算不同处理工艺生物堆的运行成本,结合环境效益、技术指标和经济效益,确定本试验条件下最优工艺是 3 号堆和 4 号堆。3 号堆是 2% 菇渣 + 曝气 + 自然通风 + 不翻堆,4 号堆是 2% 菇渣 + 2% 厩肥 + 自然通风 + 不翻堆,2 种处理工艺的有机污染物降解率均显著高于对照。考虑到实际应用中主动曝气和被动曝气设施一次铺设即可长期利用,且材料可以重复利用,运行费用低廉,从进一步完善生物堆的工艺来看,可以在曝气的基础上构建废气收集和净化装置,将生物堆运行时挥发出来的有机物收集处理,不造成二次污染。因此,本研究推荐 2% 菇渣 + 曝气 + 自然通风 + 不翻堆为生物堆示范工程中的最优工艺。

3 结论

菇渣是一种有效的土壤调节剂,2% 的添加量即可明显改善土壤通气条件,增加土壤持水能力。菇渣能有效促进甲苯、硝基苯、萘、菲等有机污染物的降解。本示范工程证实,添加 2% 菇渣能显著提高有机污染物的降解率。适当添加厩肥(2%)能增加土壤有机质含量,提高堆体温度和促进有机污染物降解。曝气设施和翻堆在改善微生物好氧环境过程中效果相当,综合考虑,本研究推荐应用菇渣降解土壤有机污染物的最佳工艺为 2% 菇渣 + 曝气 + 自然通风 + 不翻堆。

参考文献:

- [1] 马晓明. 土壤污染研究现状及防治对策[J]. 科技经济市场, 2011(8): 92-93.
- [2] 梅祖明,袁平凡,殷婷,等. 土壤污染修复技术探讨[J]. 上海地质, 2010, 31(增刊): 128-132.
- [3] 叶为民,孙风慧. 土壤石油污染的生物修复技术[J]. 上海地质, 2002(4): 22-24, 57.
- [4] Balba M T, Al - Awadhi N, Al - Daher R. Bioremediation of oil - contaminated soil: microbiological methods for feasibility assessment and field evaluation[J]. Journal of Microbiological Methods, 1998, 32(2): 155-164.
- [5] Jean - Pierre A, Erik A. Biodegradation rates of aromatic contaminants in biofilm reactors[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(1): 117-128.
- [6] 谷庆宝,郭观林,周友亚,等. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 197-202.
- [7] Wilén B M, Nielsen J L, Keiding, et al. Influence of microbial activity

- on the stability of activated sludge flocs[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2000, 18(2): 145-156.
- [8] 陈 勇,郑向群,张 从,等. 降解菌对堆肥中多环芳烃降解作用的初步研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(1): 53-55.
- [9] Fordham W. Yard trimmings composting in the air force[J]. Biocycle, 1995, 36(1): 36-44.
- [10] Fuhr F, Mittelstaedt W, Burauel P, et al. Modification of the definition of bound residues[C]//State Commission for the Assessment of Chemicals Used in Agriculture, Pesticide Bound Residues in Soil. Weinheim; Wiley - VCH, 1998.
- [11] Zhang W, Li J, Huang G, et al. An experimental study on the bio - surfactant - assisted remediation of crude oil and salt contaminated soils[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2011, 46(3): 306-313.
- [12] Rojas - Avelizapa N G, Roldán - Carrillo T, Zegarra - Martínez H, et al. A field trial for an ex - situ bioremediation of a drilling mud - polluted site[J]. Chemosphere, 2007, 66(9): 1595-1600.
- [13] Sanscartier D, Zeeb B, Koch I, et al. Bioremediation of diesel - contaminated soil by heated and humidified biopile system in cold climates[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(1): 167-173.
- [14] Li L, Cunningham C J, Pas V, et al. Field trial of a new aeration system for enhancing biodegradation in a biopile[J]. Waste Management, 2004, 24(2): 127-137.
- [15] 魏德洲,秦煜民. H_2O_2 在石油污染土壤微生物治理过程中的作用[J]. 中国环境科学, 1997, 17(5): 46-49.
- [16] Zappi M E, Rpgers B A, Teeter C L, et al. Bioslurry treatment of a soil contaminated with low concentrations of total petroleum hydrocarbons[J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 46(1): 1-12.
- [17] 闫毓霞. 利用土著微生物修复胜利油田含油污泥的工业实验[J]. 石油与天然气化工, 2008, 37(3): 255-258.
- [18] 王德汉,项钱彬,陈广银. 蘑菇渣资源的生态高值化利用研究进展[J]. 有色冶金设计与研究, 2007, 28(2): 262-266.
- [19] 张 晶,林先贵,李炬桢,等. 菇渣和鼠李糖脂联合强化苜蓿修复多环芳烃污染土壤[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2431-2438.
- [20] 林始联. 用蘑菇植床废料生产土壤调理剂[J]. 磷肥与复肥, 2002, 17(3): 72-72.
- [21] Walworth J, Braddock J, Woolard C. Nutrient and temperature interactions in bioremediation of cryic soils[J]. Cold Region's Science and Technology, 2001, 32(2/3): 85-91.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000: 106-292.
- [23] Sabaté J, Viñas M, Solanas A M. Laboratory - scale bioremediation experiments on hydrocarbon - contaminated soils[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2004, 54(1): 19-25.
- [24] 王 翔,王世杰,张 玉,等. 生物堆修复石油污染土壤的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(6): 94-99.
- [25] Lei J Y, Sansregret J L, Cyr B. Biopiles and biofilters combined for soil cleanup[J]. Pollution Engineering, 1994, 6: 56-58.
- [26] 钱 翌,梁昌金. 污染土壤中菲的修复技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 176-182.
- [27] 孔德洋,高士祥,林志芬,等. 环糊精对硝基苯微生物降解的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 576-578.