

常慧萍,夏铁骑,王 丁,等. 接种发酵剂对城市污泥强制通风堆肥的效果评价[J]. 江苏农业科学,2017,45(15):271-274.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.15.068

接种发酵剂对城市污泥强制通风堆肥的效果评价

常慧萍¹,夏铁骑²,王 丁¹,杨 雪¹,韩鸿鹏¹,陶令霞²,徐 建¹,张 红¹

(1. 河南教育学院生命科学系,河南郑州 450046; 2. 濮阳职业技术学院,河南濮阳 457000)

摘要:采用静态强制通风好氧堆肥的方法,评价发酵剂对城市污泥堆肥的效果。以牛粪、回填料、麦秸秆为调理剂,接种 SCB 发酵剂,在堆肥反应器中模拟堆肥过程,监测堆体的温度、含水率、pH 值及种子发芽指数等指标的动态变化,并设置对照堆体;试验堆体添加功能菌群进行二次发酵。试验堆体在堆肥的第 4 天最高温度达 62.5℃,高温期(≥55℃)持续 5 d,对照堆体 55℃维持 4 d;第 11 天时,试验堆体含水率由 58.6% 下降到 45.3%,下降了 22.7%,对照堆体含水率下降了 19%;试验堆体和对照堆体的 pH 值在第 5 天时分别为 8.0 和 7.8;堆肥第 11 天时,两者种子发芽指数达到 68.7% 和 60.6%,均没有植物毒性。二次发酵后的堆肥产品的各项指标均符合 CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》标准。结果表明,接种发酵剂能加速污泥腐熟化进程,达到无害化和资源化利用目的。

关键词:城市污泥;SCB 发酵剂;功能菌群;静态强制通风;堆肥;无害化评价;资源化利用

中图分类号: Q939.9;X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)15-0271-04

随着我国城市化进程的加快和环境质量标准的提高,污水处理量增加、处理深度提升,污泥的产量大幅增长。据《2016 年中国污泥处理市场现状分析及行业发展趋势预测》统计,2015 年我国生活污水产量为 3 500 万 t,预计到 2020 年我国市政污泥产量达到 6 000 万~9 000 万 t。污泥含丰富的有机质及营养成分,是良好的有机肥料资源,但也含有大量的病原菌、重金属等各种有毒有害物质,必须予以处理。以“四化”即减量化、稳定化、无害化、资源化的理念为出发点进行污泥的处理处置,充分利用污泥中的物质和资源。从思维理念、设备工艺、技术创新到项目开展,实现污泥处理处置的极致化。目前国际上对污水、污泥处理研究的热点主要包括污水深度处理(持久性有机物);污染物资源回收利用;高效节能降耗工艺等^[1]。污泥好氧堆肥是利用嗜温菌和嗜热菌的共同作用,将污泥中的有机物转化为腐殖质并杀灭病原菌、寄生虫卵和病毒,提高污泥肥料的资源化处置方法,静态强制通风好氧堆肥的方式是目前较常采用的堆肥工艺。将堆肥化处理后的污泥应用于林地、园林绿化和农地,以发挥污泥的肥效^[2]。国内外许多关于城市污泥堆肥的文献,主要从堆肥的工艺过程及参数控制方面进行研究,如接种菌剂和调理剂的种类及添加量、碳氮比、通风方式等对堆肥效果的影响^[3]。从发酵过程中分离出来的高温(中温)的放线菌(真菌),作为接种剂可加速分解木质素、纤维素,促进腐殖化过程,缩短腐

殖化时间^[4]。复合微生物菌剂利用微生物间的联合优势调节堆肥中的菌群结构、缩短发酵周期^[5-6]。徐智等研究表明,接种外源微生物菌剂能够提高堆体在高温期的最高温度,有利于提高脱氢酶和纤维素酶活性,促进堆肥的氧化还原反应^[7];应用接种剂到堆肥中,对调节剩余污泥中的菌群结构、缩短发酵周期、加速堆肥进程有重要作用^[8-9]。刘佳等通过在牛粪堆肥中接种微生物使堆体能够在初期快速升温,并显著延长高温期^[10];欧阳建新等研究复合菌剂在污泥堆肥中的作用,表明复合菌剂的加入会迅速降低堆体的生物毒性^[11];徐晨等研究了复合微生物菌剂对城市污泥好氧堆肥的影响^[12]。有研究表明,添加适量的表面活性剂能够促进发酵中微生物的生长代谢及产酶能力^[13],表面活性剂可以提高堆肥的效率^[14]。表面活性剂产生菌应用于污泥堆肥的研究较少。本研究以牛粪、回填料、秸秆为调理剂,接种发酵菌剂,通过高温好氧静态强制通风的方式对污泥进行堆肥并添加功能菌群,为污泥堆肥化的过程控制和资源化利用提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 堆肥材料

用于堆肥的材料主要有污泥、牛粪、回填料、麦秸秆。污泥为河南省郑州市某污水处理厂污泥;含水率 82.7%,有机质含量 546 g/kg,总氮含量 35.2 g/kg,总磷含量 21.6 g/kg,总钾含量 4.5 g/kg,pH 值 7.4;牛粪取自郑州市惠济区某奶牛养殖场,经干燥、粉碎处理;回填料取自郑州某污泥处置厂;含水率为 28.2%;麦秸秆来自郑东新区某村麦场,粉碎后长 2~3 cm。堆肥反应在自制的堆肥反应器中进行模拟。

堆肥发酵剂 SCB,由笔者所在的项目组研制,含纤维素降解菌^[15]和生物表面活性剂产生菌^[16];笔者所在的项目组分离于植物根际,用于二次发酵的功能菌群:固氮菌属于假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.)、解磷菌属于假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.)、解钾菌属于芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)。

收稿日期:2016-07-22

基金项目:河南省基础与前沿技术研究项目(编号:152300410092);

河南省科技攻关项目(编号:122102310331、172102110183);河南

省高等学校重点科研项目(编号:15B180016)。

作者简介:常慧萍(1970—),女,河南原阳人,博士,副教授,主要从事微生物资源开发与应用研究。Tel:(0371)69303780;E-mail:shengwuchp@126.com。

通信作者:张 红,博士,教授,主要从事分子生物学与免疫学研究。

Tel:(0371)69303663;E-mail:angela9922@sina.com。

1.2 堆肥反应器

堆肥反应器如图 1 所示,主体为一塑料桶(带盖且桶体周围包 1 层泡沫予以保温),桶底部用支架支起与地面相距约 15 cm,以给通气管的弯头留有空间;桶底部开一孔,以接入直径为 10 cm 的 UPVC 塑料管作为通气管;通气管直立于混合物料的中间,顶端与桶盖相距约 10 cm(上覆盖保温层);间隔 10 cm 在通气管壁四周开孔,作为通风孔(共开了 7 排孔);通气管通过 90°弯头和鼓风机连接。鼓风时将通气管顶部堵住,利用通气管壁上的开孔向混合物料中通入;自然通风时,去掉通气管顶部的堵头和下端与鼓风机相连部分。桶底部开若干直径为 1 cm 的孔,作为渗滤液流出孔,滤液收集到 1 个托盘中。

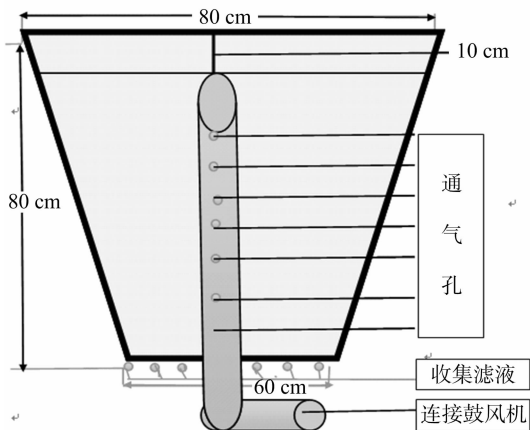


图1 堆肥反应器图示

1.3 试验方法

在堆肥反应器中,采用静态强制通风好氧堆肥方式对城市污泥进行堆肥处理,设置试验组(发酵剂 SCB 菌剂添加量为 0.2%)和对照组,对堆肥过程中堆体温度、pH 值、含水率、发芽指数等指标进行检测、分析,判断堆肥腐熟的程度。

将城市污泥、牛粪、回填料、麦秸秆按照 10:3:3:2 的质量比例混合,使堆料含水率控制在 60% 左右,C/N 的值为 25 左右,均匀混合后装入堆肥反应器进行试验。在堆体表面覆盖 1 层约 10 cm 厚的稻草保温及除臭,鼓风机每天定时鼓风。堆肥期间每天 10:00、16:00 分别测定堆体不同位置和深度的温度,取平均值作为当日堆体温度;堆肥第 1、第 3、第 5、第 7、第 9、第 11 天从堆体的不同位置和深度取样,样品均匀混合后进行参数分析。

当堆温降至 40~45℃ 时结束第 1 次发酵,将堆肥产物移至发酵池中,接种具有固氮、解磷、解钾功能的菌群(灭菌麸皮为吸附剂,按 1:1:1 的比例混匀,接种量 1%),翻堆混匀并将堆料厚度控制在 30 cm 左右,进行二次发酵,按照 CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》标准对发酵产品的质量进行检测。

1.4 分析测定方法

温度用温度计检测。含水率采用烘干法,样品置于 105℃ 干燥箱中烘干 24 h,冷却后称质量。样品浸提液:取 10 g 新鲜堆肥样品用 100 mL 蒸馏水作为浸提剂,在摇床上振荡 30 min,浸提,以 4 000 r/min 的速度离心 15 min,取离心后的上清液,用于 pH 值及种子发芽率的测定。pH 值采用

pHS-3C 型实验室 pH 计测定。种子发芽指数:为检测堆肥的腐熟效果,用经过表面消毒的小麦种子进行发芽试验。取样品浸提液 5 mL 于铺有滤纸的直径为 90 mm 的培养皿中(经灭菌),以等量蒸馏水作为空白对照,每个培养皿内置 20 粒饱满的小麦种子,在温度 28℃、湿度为 80% 的条件下避光培养 48 h,测定种子的发芽率和根长^[17]。发芽指数(GI)的计算公式为:GI=(堆肥浸提液的种子发芽率×种子根长)/(蒸馏水的种子发芽率×种子根长)。

2 结果与分析

2.1 堆体的温度

通常发酵温度的变化是衡量发酵过程的重要评价指标,堆肥过程可分为升温期、高温期、降温期 3 个阶段,最后达到腐熟。堆肥期间,于每天 10:00、16:00 分别测定堆体不同位置的温度,结果见图 2。由图 2 可知,添加发酵剂的试验堆体比对照升温快,发酵过程启动快速,并且高温期持续时间长,促进了腐熟进程。试验堆体温度在堆肥初期急剧上升,第 3 天就达到 53.4℃,第 4 天达到最高温度 62.5℃,维持 55℃ 以上高温达 5 d,说明堆体中的有机物经过了快速分解的过程。对照堆体第 3 天达到 50.7℃,第 5 天达到最高温度 58.2℃,维持 55℃ 以上高温达 4 d。我国 GB 7959—1987《粪便无害化卫生标准》规定,堆肥温度在 50~55℃ 以上维持 5~7 d 或在 55℃ 以上超过 3 d,可杀灭所含致病微生物和害虫卵,是堆肥的无害化标准。所以,从温度的变化来看符合腐熟标准。

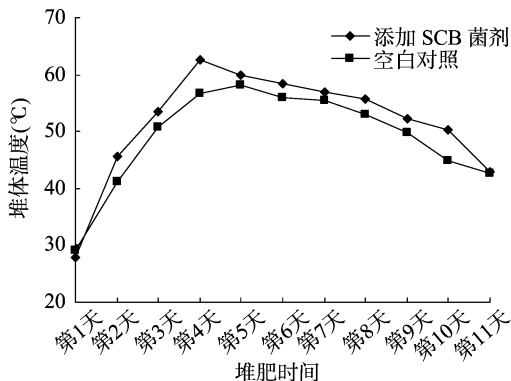


图2 SCB 发酵剂对堆体温度的影响

2.2 堆体的含水率

含水率直接影响堆体氧气的供应,影响堆体内微生物的代谢活动,含水率与以下堆肥过程中有机物氧化分解产生的水分、强制通风导致以水蒸气形式散失的部分水分有关,分别在堆肥第 1、第 3、第 5、第 7、第 9、第 11 天从堆体的不同位置和深度取样,测定堆体的含水率,结果如图 3 所示。图 3 表明,试验堆体和对照堆体的含水率都呈下降趋势。堆肥结束时,试验堆体含水率由 58.6% 下降到 45.3%,下降了 22.7%;而对照堆体含水率由 57.9% 下降到 46.8%,下降了 19.2%。试验堆体含水率下降较多,与试验堆体温度升高的速率快且维持高温的时间长有关。

2.3 堆肥样品的 pH 值

pH 值的变化是氨气的产生与挥发、有机酸的产生与挥发综合作用的结果^[18]。通常认为,pH 值在 7.5~8.5 时堆肥效

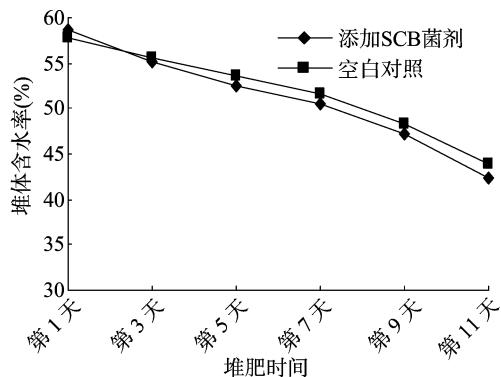


图3 SCB 发酵剂对堆体含水率的影响

果最好,利于提高堆肥初期反应速率、启动发酵过程、缩短堆肥腐熟时间^[19]。分别在堆肥后第1、第3、第5、第7、第9、第11天从堆体的不同位置和深度取样,测定堆肥样品的pH值,结果如图4所示。由图4可知,堆肥初期,试验堆体与对照堆体均呈现升高趋势,第5天时达到峰值;堆肥后期,随着堆温的降低及有机物的分解,堆体中的有机酸逐渐累积,pH值逐渐恢复到初始水平。试验堆体的pH值在整个堆肥过程中均高于对照堆体,其pH值在堆肥初期升高速率较对照堆体快,第5天时达到8.0,而对照堆体为7.8。这与堆温升高、微生物降解有机物速率加快相关。

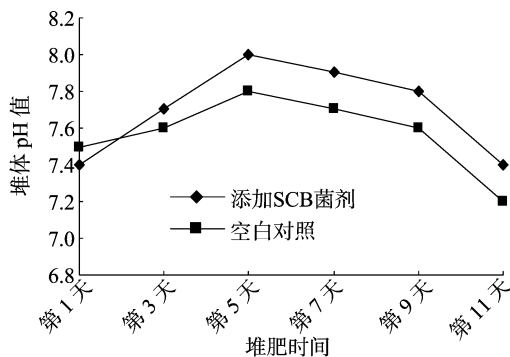


图4 SCB 发酵剂对堆体 pH 值的影响

2.4 种子发芽指数

种子发芽指数(GI)被认为是最敏感、最可靠的堆肥腐熟度评价指标^[20],它通过检测堆肥产品对植物种子发芽产生抑制作用的强弱来表征。通常认为,种子发芽指数 $\geq 50\%$ 时,堆肥基本无毒;种子发芽指数 $\geq 80\%$ 时达到腐熟^[21]。未腐熟的发酵产品中含有对植物有抑制或毒性作用的物质,抑制植物种子的发芽。通过定期取样,测定试验堆体与对照堆体的种子发芽指数,结果如表1所示。由表1可知,两者发芽指数均呈现出上升趋势,试验堆体的发芽指数增速高于对照堆体,说明前者腐熟速度较后者快,可能与试验堆体的有机质快速降解有关。堆肥第11天时,试验堆体和对照堆体的发芽指数分别达到68.7%和60.6%,基本没有植物毒性。

表1 试验堆体与对照堆体的种子发芽指数

堆体	堆肥不同时间后的种子发芽指数(%)					
	第1天	第3天	第5天	第7天	第9天	第11天
添加 SCB 菌剂	11.2	26.4	35.5	48.8	58.6	68.7
空白对照	11.4	21.9	33.3	45.7	54.8	60.6

2.5 二次发酵后堆肥物料的质量检测

试验堆体一次发酵进行到第11天时,接种具有固氮、解磷、解钾的功能菌群进行二次发酵,当温度高于45℃时进行翻堆,以降低温度;第5天后对堆肥产品进行质量检测,各种指标见表2。经检测,堆肥产品的养分、有机质、有机污染物、物理性质、卫生学等指标均符合CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》标准,说明接种SCB发酵剂达到了污泥的无害化、资源化处理的目的。

表2 堆肥产品的技术指标与重金属含量

指标	含量	重金属	含量 (以干基计,mg/kg)
有效活菌数(亿CFU/g)	4.6	总砷(As)	11.7
有机质含量(以干基计,%)	42.8	总镉(Cd)	1.2
含水率(%)	26.5	总铅(Pb)	30.2
pH值	7.2	总铬(Cr)	120.4
总氮含量(%)	2.84	总汞(Hg)	1.5
总磷含量(%)	1.53		
总钾含量(%)	0.87		
粪大肠菌群数(万个/g)	<10.0		
蛔虫卵死亡率(%)	100.0		

3 结论与讨论

城市污泥含水率高、碳氮比低,须要将污泥按照一定比例与调理剂混合,借助混合物料中多种好氧微生物对有机物进行氧化分解,使有机固体废物转换为腐殖质^[22-25]。调理剂在堆肥中主要起调节物料碳氮比、含水率、自由空域、堆肥养分的作用,保证堆肥快速高效发挥作用^[26]。调理剂的种类及与污泥的比例对堆肥效果至关重要。姚岚等将秸秆与污泥进行混合好氧堆肥,降低了污泥土地利用对环境的危害^[27];兰时乐等以鸡粪和油菜秸秆为原料进行高温好氧堆肥试验,堆肥过程中氨态氮、硝态氮、总氮相对含量上升,堆肥时间以30d左右为宜^[28];刘卫等应用污泥熟肥作为调理剂,促进了污泥堆肥进程^[29];金芬等研究了不同调理剂对城市污泥好氧堆肥的影响^[30]。目前,污泥堆肥熟肥的应用仅限于土壤改良剂或有机肥料^[31]。薛澄泽用污泥研制的复合肥施用于高速公路绿化带,表明污泥复合肥对高速公路绿化带有十分明显的土壤改良和养分供给的作用,且肥效持久、后效显著^[32]。Nyamangara等发现,土地经过施用污泥19年后,表层土壤中有机物、矿化氮、有效磷、K、Ca、Mg、Na等离子的含量大大增加,表明污泥是一种营养物质含量丰富的可利用资源^[33]。张宏忠等研究表明,将城市污泥堆肥用作无土草坪基质是一种非常经济有效的污泥资源化途径^[34]。牛明杰等研究了城市污泥堆肥过程中各项有机质组分的形成与转化,表明堆肥化处理在实现污泥无害化和减量化基础上,污泥中有机质得到了稳定化,有利于城市污泥的土地利用^[35]。

发酵剂SCB含有纤维素降解菌和生物表面活性剂产生菌,以牛粪、回填料、麦秸秆为调理剂对污泥进行高温好氧静态强制通风发酵,并添加具有固氮、解磷、解钾功能菌株进行二次发酵。堆肥第3天堆温就达到53.4℃,第4天达到最高温度62.5℃,维持55℃以上高温达5d;第11天时,试验堆体含水率由58.6%下降到45.3%,下降了22.7%。试验堆

体的 pH 值在堆肥初期快速升高,第 5 天时达到 8.0。堆肥第 11 天时,试验堆体的发芽指数达到 68.7%,基本没有植物毒性。二次发酵后的堆肥产品各项指标均符合 CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用地泥质》标准。

参考文献:

- [1]戴晓虎. 对国内外污水污泥技术集成的思考 & 国际研究热点解析[C]//2015(第七届)上海水业热点论坛. 2015.
- [2]罗 维,陈同斌,高 定,等. 城市污泥-猪粪混合堆肥过程中湿度的层次效应及其动态变化[J]. 环境科学,2004,25(2):140-144.
- [3]Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge[J]. Environment International,2009,35(1):142-156.
- [4]杨 莹. 发酵剂作用下粪肥腐解过程物质组成的动态变化研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [5]Stylianou M A, Inglezakis V J, Moustakas K. Improvement of the quality of sewage sludge compost by adding natural clinoptilolite[J]. Desalination,2008,224(1/2/3):240-249.
- [6]席北斗,刘鸿亮,孟 伟,等. 高效复合微生物菌群在垃圾堆肥中的应用[J]. 环境科学,2001,22(5):122-125.
- [7]徐 智,张陇利,张发宝,等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响[J]. 中国环境科学,2009,29(8):856-860.
- [8]张陇利,刘 青,徐 智,等. 复合微生物菌剂对污泥堆肥的作用效果研究[J]. 环境工程学报,2008,2(2):266-269.
- [9]林金宝,赵立伟,于 静,等. 复合菌剂对城市生活污水好氧发酵的影响[J]. 天津农业科学,2010,16(5):9-12.
- [10]Liu J, Xu X H, Li H T, et al. Effect of microbiological inocula on chemical and physical properties and microbial community of cow manure compost [J]. Biomass & Bioenergy, 2011, 35 (8): 3433-3439.
- [11]欧阳建新,施 周,崔凯龙,等. 微生物复合菌剂对污泥好氧堆肥过程的影响[J]. 中国环境科学,2011,31(2):253-258.
- [12]徐 晨,檀 笑,解启来,等. 复合微生物菌剂对城市污泥好氧堆肥的影响[J]. 广东农业科学,2015,42(7):133-138.
- [13]王仁佑,刘剑潇,黄丽红. 鼠李糖脂对两株木质素降解菌产酶能力的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2008,35(10):70-74.
- [14]晁 阳,袁兴中,曾光明,等. 生物表面活性剂在城市污泥静态强制通风好氧堆肥中的作用[J]. 环境工程学报,2012,6(4):1331-1336.
- [15]常慧萍,张 红,杨 雪,等. 高温纤维素降解细菌的筛选与鉴定[J]. 河南教育学院学报(自然科学版),2012,21(3):5-7.
- [16]夏铁骑,常慧萍,张建清. 产生物表面活性剂石油降解菌的筛选及高效降解菌群的构建[J]. 农业灾害研究,2013,3(6):49-51.
- [17]Ahuja S K, Ferreira G M, Moreiraa A R. Production of an endoglucanase by the shipworm bacterium *Teredinobacter turnirae* [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2004, 31 (1):41-47.
- [18]Tang J C, Maie N, Tada Y, et al. Characterization of the maturing process of cattle manure compost [J]. Process Biochemistry, 2006, 41(2):380-389.
- [19]Yuan X Z, Ren F Y, Zeng G M, et al. Adsorption of surfactants on a *Pseudomonas aeruginosa* strain and the effect on cell surface lyphohydrophilic property [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 2007, 76(5):1189-1198.
- [20]黄国锋,吴启堂,孟庆强,等. 猪粪堆肥化处理的物质变化及腐熟度评价[J]. 华南农业大学学报(自然科学版),2002,23(3):1-4.
- [21]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:178-201.
- [22]陶 玉,王里奥,黄 川,等. 稻草调理剂的掺量对污泥堆肥的影响研究[J]. 中国给水排水,2010,26(21):98-101.
- [23]王建华,陈永志,彭永臻. 低碳氮比实际生活污水 A2O-BAF 工艺低温脱氮除磷[J]. 中国环境科学,2010,30(9):1195-1200.
- [24]雷勋杰,曾正中,苟剑锋,等. 堆肥污泥施入黄土后有机质和氮磷的淋滤特征[J]. 江苏农业科学,2015,43(8):344-347.
- [25]张 军,李世好,刘孟子,等. 城市污泥好氧堆肥过程中有机质降解模型[J]. 江苏农业科学,2016,44(2):348-351.
- [26]张 军,雷 梅,高 定,等. 堆肥调理剂研究进展[J]. 生态环境,2007,16(1):239-247.
- [27]姚 岚,王成端,徐 灵. 秸秆与污泥混合好氧堆肥研究[J]. 西南科技大学学报,2008,23(3):53-56.
- [28]兰时乐,曹杏芝,戴小阳,等. 鸡粪与油菜秸秆高温好氧堆肥中营养元素变化的研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(3):564-569.
- [29]刘 卫,袁兴中,欧阳建新,等. 利用污泥熟肥作为高含水率污泥堆肥调理剂[J]. 环境工程学报,2013,7(6):2349-2354.
- [30]金 芬,孙先锋,高自文,等. 不同调理剂对城市污泥好氧堆肥的影响[J]. 西安工程大学学报,2015,29(1):62-67.
- [31]Song U, Lee E J. Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill [J]. Resources Conservation and Recycling, 2010, 54(12):1109-1116.
- [32]薛澄泽,张增强,孟昭福. 复合污泥堆肥施用于高速公路绿化带效果的研究 II. 土壤化学,植物营养及环境问题的探讨[J]. 农业环境保护,2000,19(5):263-266.
- [33]Nyamangara J, Mzezewa J. Effect of long-term application of sewage sludge to a grazed grass pasture on organic Carbon and nutrients of a clay soil in Zimbabwe [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 59(1):13-18.
- [34]张宏忠,霍 晶,马 闯,等. 城市污泥用作无土草坪基质[J]. 环境工程学报,2016,10(2):880-886.
- [35]牛明杰,郑国砥,朱彦莉,等. 城市污泥与调理剂混合堆肥过程中有机质组分的变化[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(4):1016-1023.