

李荣华,张广杰,秦睿,等. 2012. 添加钝化剂对猪粪好氧堆肥过程中理化特性的影响[J]. 环境科学学报, 32(10): 2591-2599

Li R H, Zhang G J, Qin R, et al. 2012. Influence of heavy metal passive agents on the compost physicochemical properties during the swine manure composting [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(10): 2591-2599

添加钝化剂对猪粪好氧堆肥过程中理化特性的影响

李荣华, 张广杰, 秦睿, 李晓龙, 肖然, 沈锋, 张增强*

西北农林科技大学 资源环境学院, 杨凌 712100

收稿日期: 2011-12-22

修回日期: 2012-03-08

录用日期: 2012-03-22

摘要:以猪粪和玉米秸秆粉为堆肥原料,通过添加不同用量的重金属钝化剂(粉煤灰、风化煤或膨润土)进行 90 d 的好氧堆肥,研究钝化剂的种类和添加比例对堆肥理化特性的影响.结果表明:所有处理的堆体温度均能迅速升至近 70 °C,并维持在 55 °C 以上超过一周;随着堆肥时间的延长,各处理堆体含水量逐渐降低,并在 90d 后达到 30% 左右,但添加膨润土能减少一次发酵期水分的损失;添加风化煤会导致堆体 pH 呈现较强的碱性,而添加膨润土会显著提高堆体 EC 值;随着堆制时间的延长,堆体 Cu、Zn 全量逐渐增加,但 DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例则逐渐减小;对照处理和添加风化煤的各处理中,雪里蕻种子的发芽率最终均达到 90% 以上,GI 约 1.0 左右;而在添加膨润土和粉煤灰的各处理中,到 90 d 堆肥结束,发芽率最高仅达 80%,仅有 2.5% 和 5.0% 添加比例(质量分数,下同)的处理中 GI 大于 0.5,且 GI 的增加趋势随着膨润土和粉煤灰的添加比例增加而降低.研究表明,钝化剂的添加比例和种类对猪粪好氧堆肥中堆体温度和含水率变化无显著影响;虽然堆肥过程添加重金属钝化对堆肥重金属 Cu、Zn 有良好的钝化作用,但对堆体的 pH 和 EC 影响较为剧烈,对雪里蕻种子的根系生长也有一定的影响.在堆肥中应合理选择钝化剂的种类和添加比例.

关键词:猪粪;好氧堆肥;钝化剂;理化特征

文章编号:0253-2468(2012)10-2591-09

中图分类号:X705

文献标识码:A

Influence of heavy metal passive agents on the compost physicochemical properties during the swine manure composting

LI Ronghua, ZHANG Guangjie, QIN Rui, LI Xiaolong, XIAO Ran, SHEN Feng, ZHANG Zengqiang*

College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100

Received 22 December 2011;

received in revised form 8 March 2012;

accepted 22 March 2012

Abstract: In order to study the effects of passive agents and the adding proportion on the change of compost physicochemical properties during the aerobic composting process, swine manure and corn stalk powder were selected as the raw materials and mixed with different amounts of flyash, discarded weathered coal or bentonite for 90 days of aerobic composting. The results showed that the pile temperature of all the treatments could rise to nearly 70 °C quickly and maintained above 55 °C for more than a week. The moisture content gradually reduced with the composting time extension and was around 30% after 90 days composting for all the treatments. Adding fly ash would present a strong alkaline composting environment, while adding bentonite could significantly increase the compost water soluble salinities and the increase was significantly correlated with the amount of bentonite. The total Cu and Zn concentration in compost piles were elevated during the composting process, while the percentages of DTPA-extractable Zn and Cu in compost piles decreased. The *Potherb mustard* seeds germination rate reached 90% after 90 days composting in the control and weathered coal adding treatment, and the germination index were above 1.0. While for the bentonite and flyash-adding treatments, after 90 days of composting the germination index were lower than 0.5 except 2.5% and 5.0% treatments. The results implicated that adding passive agents had no notable effect on compost temperature and moisture content. pH, EC and *Potherb mustard* roots growth were strongly influenced by the variety and adding proportion of the passive agents, although Cu and Zn could be stabilized by adding the passive agents during the composting. The passive agent selection and dosage control should be considered in the pig manure aerobic composting process.

Keywords: swine manure; aerobic compost; passive agents; physicochemical properties

1 引言(Introduction)

随着我国畜牧业的快速发展,畜禽养殖已向区

域化、集约化方向发展,畜禽养殖场也由农村、牧区向城市近郊转移,导致养殖废物局部大量集中,加重了城市周边的环境污染.虽然畜禽粪便中含有丰

基金项目:陕西省攻关项目资助(No. 2010K01-01)

Supported by the Science and Technology Key Project of Shaanxi Province(No. 2010K01-01)

作者简介:李荣华(1977—),男,讲师(博士生),E-mail:rh.lee@nwsuaf.edu.cn; *通讯作者(责任作者),E-mail:zhangzq58@126.com

Biography: LI Ronghua (1977—), male, lecturer (Ph. D. candidate), E-mail: rh.lee@nwsuaf.edu.cn; * Corresponding author, E-mail: zhangzq58@126.com

富的 NP 和有机质等植物养分,适合于农业使用(李书田等,2009). 但目前我国规模化养殖场中的畜禽粪便中重金属含量普遍偏高(Li *et al.*, 2007),若长期直接农田施用,则有可能导致土壤甚至地下水重金属污染(康军等,2011).

为了减小重金属的环境风险,当前研究主要集中在向土壤或污泥中添加一些矿物材料,作为重金属钝化剂,以减小重金属的生物有效性和环境风险等(Lopareva-Pohu *et al.*, 2011; Tica *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011). 也有一些学者在畜禽粪便重金属钝化方面进行了研究. 例如荣湘民等(2009)发现在猪粪好氧堆肥中,Zn 的最佳钝化剂为 5.0% 的钙镁磷肥,Cu 的最佳钝化剂为 2.5% 的粉煤灰;何增明等(2010)指出,猪粪好氧堆肥中 Cu 的最佳钝化剂为 7.5% 的海泡石,Zn 的最佳钝化剂添加比例为 2.5% 的膨润土;刘浩荣(2008)在研究 3 种重金属钝化剂及不同添加比例对猪粪重金属钝化时认为,重金属 Cd、Pb 和 Cr 的最佳钝化剂及添加比例分别为 2.5% 沸石、7.5% 膨润土和 7.5% 沸石. 以上研究结果表明,虽然钝化剂对猪粪中的重金属具有较好的钝化作用,但在堆肥中钝化剂的添加比例均不超过 10%. 另外,由于在堆肥过程中,堆体温度、含水率、pH 和水溶性盐分(EC)等理化特性指标是评价堆肥过程的重要指标参数,关系到堆肥的成败(Bernal *et al.*, 2009; 孙利宁等, 2009; 陈同斌等, 2005). 而已有的研究关注堆肥过程中重金属钝化效果较多,对于其添加比例、堆肥理化特性和生物毒性等方面的研究较少.

为此,本研究选择常用的重金属钝化剂粉煤灰、膨润土和风化煤,以现有研究报道的添加比例不超过 10% 为基础,向猪粪和玉米秸秆粉混合物料中添加 0%、2.5%、5.0%、7.5% 和 10% 的钝化剂,进行 90 d 的好氧高温堆肥,通过测定堆肥的温度、含水率、pH 和 EC 4 个基本理化特性以及种子发芽率和发芽指数,来评价添加钝化剂对猪粪好氧堆肥过程中理化特性和植物毒性的影响,以期为规模化猪粪堆肥提供理论依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 堆肥试验

选取杨凌职业技术学院种猪场的新鲜猪粪(记做 SW)并经风干后碾压成粉,将采自杨凌张家岗农田的玉米秸秆(记做 CS)经粉碎后作为调理剂. 先按照 SW: CS(W/W,以干重计)1:2 的比例混合,然后按干重质量比添加 0% (对照 SW)、2.5%、5.0%、7.5% 和 10% 的钝化剂粉煤灰(FA)、风化煤(WC)或膨润土(BT),调节含水率 65% ~ 70% 左右. 将物料充分混匀,保证混合物料粒径 < 1.0 cm,然后把 100 L 混合物料装入自行设计的翻转式好氧堆肥反应器(康军等,2011),分批进行强制通风. 试验共计 13 个处理,重复两次,每一处理堆制 90 d. 堆肥期间未进行含水率调节. 其中粉煤灰采自兴平热电厂,风化煤采自西北农林科技大学锅楼房的废弃风化煤堆,膨润土为购自潍坊华潍膨润土集团股份有限公司的钠基膨润土. 堆肥混合物料初始性质见表 1.

表 1 堆肥混合物料初始性质

Table 1 Properties of composting materials

物料	含水率	粒径 /mm	有机质	总磷 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总氮 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总钾 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	总 Cu /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总 Zn /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
SW	78.89%	<2	73.01%	15.13	29.82	8.16	8.37	1175.22	2173.56
CS	10.07%	<5	94.18%	1.14	1.14	28.42	6.75	3.27	22.02
FA	0.52%	<0.25	未检出	0.20	未检出	3.24	11.67	11.03	66.39
WC	0.12%	<1	91.07%	0.06	6.67	8.28	7.78	9.22	13.75
BT	0.08%	<0.10	未检出	1.78	0.01	10.56	9.53	57.03	116.47

2.2 指标测定及数据处理方法

堆体温度用水银温度计于每天 9:00、15:00 和 21:00 各测量 1 次,取其平均值作为当天的堆体温度,同时测定当天的气温. 各处理于第 1、3、7、14、21、30、45、60、75 和 90 d 采样,每次取样前翻转堆肥器使物料混匀,然后多点取样约 1 kg 用于含水率、pH 和 EC 的测定. 堆肥结束时采集样品约 700 g,

40 °C 低温烘干,于玛瑙研钵研磨并过 100 目尼龙筛,用于重金属含量测定. 含水率、pH、电导率(EC)、发芽率(ER)和种子发芽指数(GI)的测定方法参见文献(邵森等,2010). 堆肥重金属总量测定时,样品经 Milestone 1 型微波消解仪 HCl-HNO₃ 混酸消解后,日立 Z-5000 型原子吸收光谱法测定;有效态重金属采用 DTPA 提取法后测定(鲍艳宇等,

2010). 重金属含量的测定设置 4 次重复. 数据分析采用 SPSS19.0.

3 结果 (Results)

3.1 堆体温度的变化

在堆肥初期,物料中易分解的有机物质在好氧微生物的作用下迅速分解,并释放热能,导致堆体温度迅速升至近 70 °C,并维持在 55 °C 以上超过一周. 此后由于供气充足,水分蒸发较盛,带走大量热量,导致堆体温度逐渐下降,约在一次发酵期(35 d)后堆肥温度逐渐接近外界气温,堆肥发酵基本结束,达到腐熟稳定期. 此时,堆肥不再吸引蚊蝇,臭味消失,具有新鲜的泥土味,堆肥内出现了大量白色或灰白色的真菌斑点,堆肥产品呈现疏松的黑褐色团粒结构. 研究表明添加不同比例粉煤灰、风化煤或膨润土与猪粪好氧混合堆肥过程均顺利进行,且钝化剂的用量和种类对猪粪好氧堆肥中堆体温度的变化无显著影响. 按照我国《粪便无害化卫生标准》的要求,堆肥最高温度达 50 ~ 55 °C 以上持续

5 ~ 7 d,或者在 55 °C 以上维持 3 d 即可达到无害化标准(中国预防医学科学院环境卫生研究所,1988). 可见,在本试验条件下,猪粪与添加不同钝化剂的堆肥完全达到无害化标准的规定.

3.2 堆体含水率的变化

本试验中各堆体的含水率变化见图 1. 从图 1 可见,堆体的含水率随着堆肥时间的延长而逐渐降低. 在一次发酵期(约 35 d),所有处理的堆体含水率均在 50% 以上,随后堆体含水率逐渐降低直至 90 d 结束后含水率在 30% ~ 40% 之间. 比较不同添加比例的钝化剂对堆体含水率变化的影响可见,添加粉煤灰和风化煤均对堆体含水率的变化没有明显影响,但添加膨润土则有利于堆肥初期堆体的持水. 尤其是在堆肥初期的升温 and 高温阶段,与对照堆体相比,添加膨润土的各堆体含水率变化相对较为缓慢. 在 30 d 时,添加膨润土堆体含水率约在 60% 左右,且含水量随着膨润土用量的增加而增加. 而此时对照处理、添加风化煤和粉煤灰的各处理中,含水率均低于 55%.

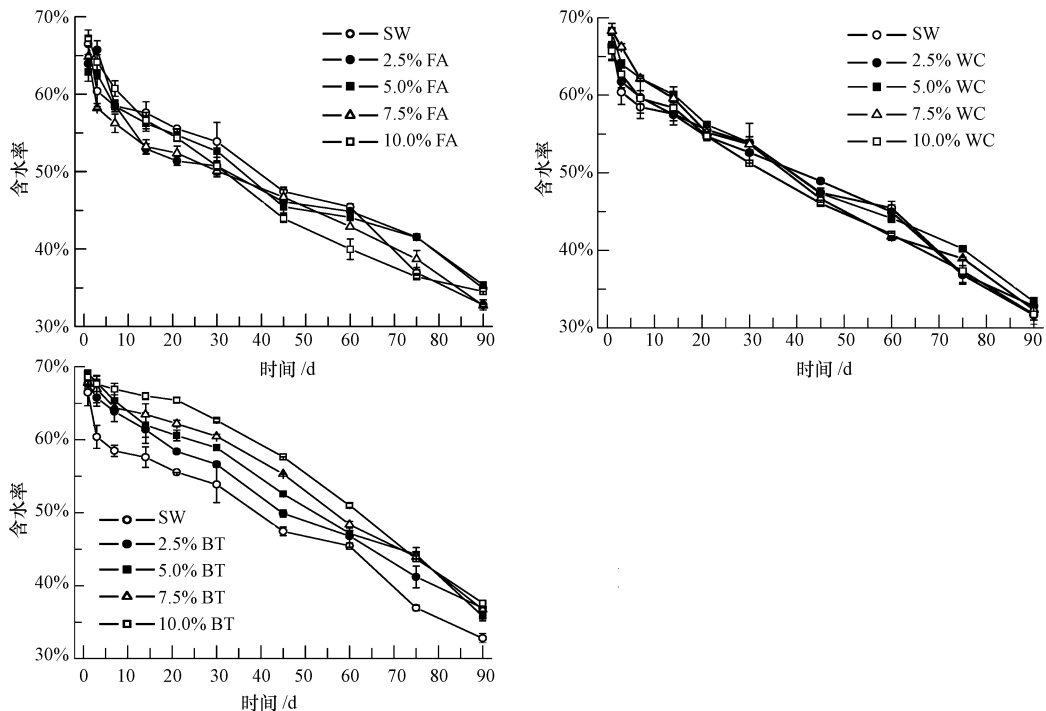


图 1 堆肥过程中堆体含水率的变化

Fig. 1 Change of compost moisture during the composting

3.3 堆体 pH 的变化

试验中 13 个处理的堆体 pH 的变化见图 2. 从图 2 可见,不同钝化剂种类,对堆体 pH 的影响不同. 其中,对照处理和添加粉煤灰的各处理中 pH 的

变化均在最初几天有一定的降低趋势,除了对照处理 pH 持续降低并最终稳定在 pH 7.88 以外,添加粉煤灰的各处理中 pH 的变化在 pH 8.55 ~ 9.21 的范围内波动. 添加膨润土的各处理呈现出先降低后

升高然后又逐渐降低的趋势,并分别于堆制结束时稳定在 pH 7.20 ~ 7.88;添加风化煤的各处理, pH

呈现出逐渐升高随后又逐渐降低并稳定在 pH 7.82 ~ 7.90 之间.

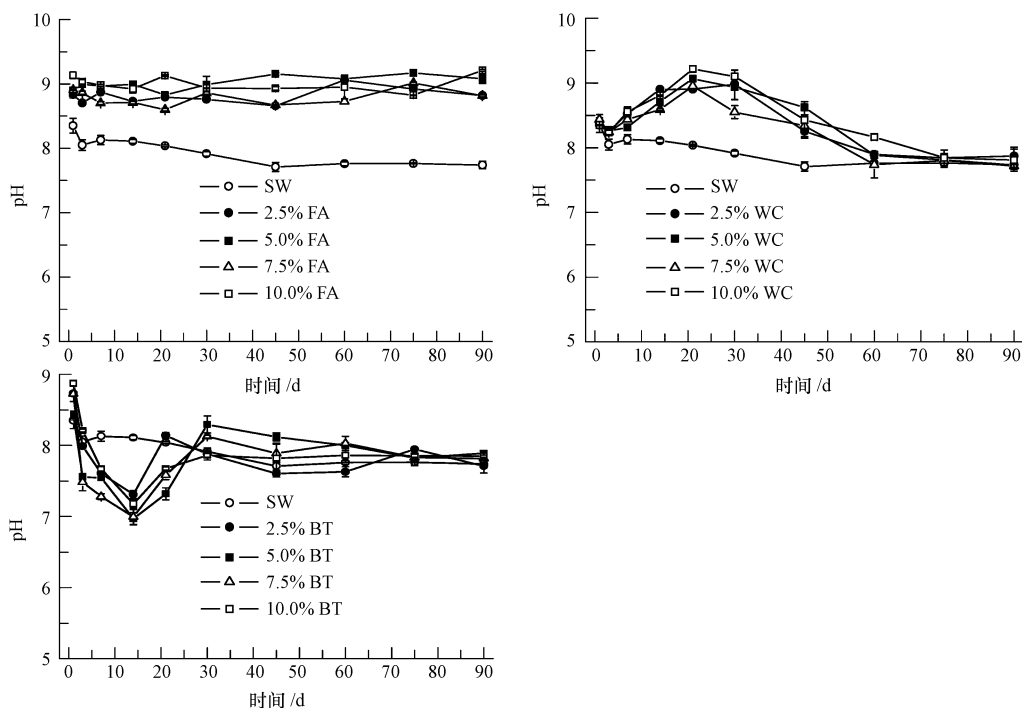


图2 堆体 pH 的变化

Fig.2 Change of pH during the composting

3.4 堆体电导率 EC 的变化

堆肥过程中堆体 EC 的变化如图 3 所示. 由图

3 可见,添加粉煤灰和风化煤的各处理中 EC 均呈现出先增加后降低的趋势,且 10.0% 添加比例的处理

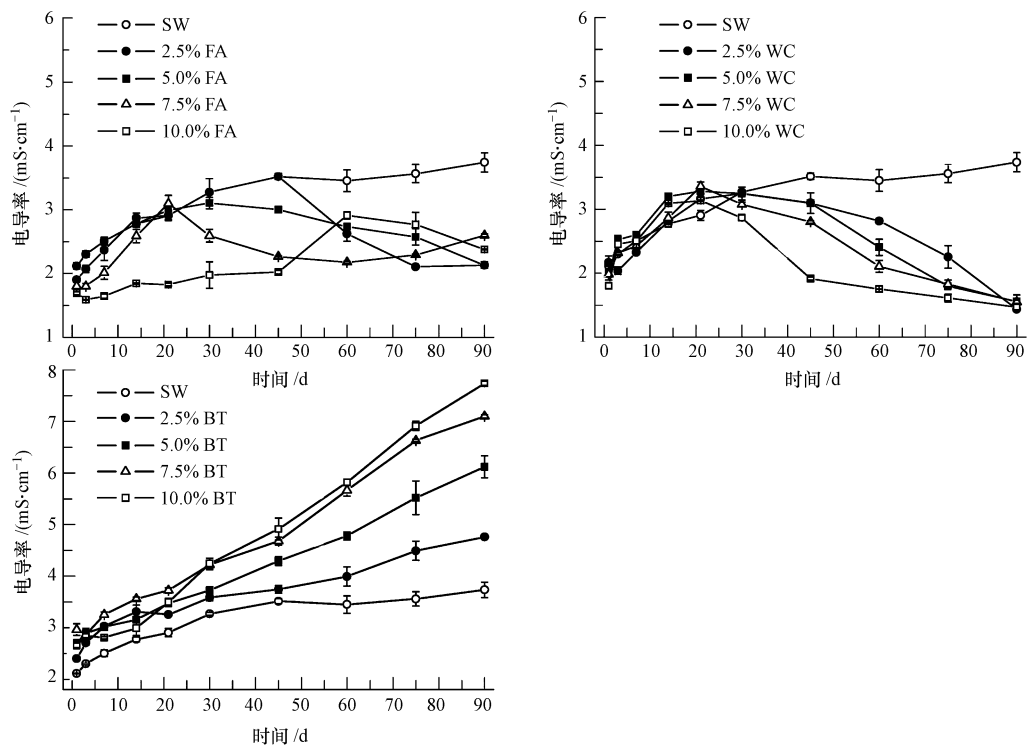


图3 堆体 EC 的变化

Fig.3 Change of EC during the composting

EC 下降较为显著外,其余添加比例之间差异不明显.在堆肥过程的初期,除添加 10.0% 粉煤灰的处理 EC 相对较低外,其他各处理的 EC 达到最大值的时间随着粉煤灰用量的增加而缩短.而对照处理和添加膨润土的各处理 EC 变化趋势一致,即 EC 持续增加,且增加趋势随着膨润土添加比例的增加而越加明显,至堆制结束,EC 分别达到 $4.74 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $6.12 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $7.10 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $7.74 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,而对照处理至 90 d 堆制结束时 EC 仅为 $3.74 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.

3.5 Cu、Zn 全量和 DTPA 提取态含量的变化

预实验表明,实验所用猪粪中含有大量的 Cu

和 Zn,而 Cd、Pb、Cr、As 和 Hg 均未检出,因而本实验只考虑 Cu、Zn 含量的变化.堆肥过程中 Cu、Zn 全量和 DTPA 提取态含量的变化如表 2 所示.由表 2 可知,随着堆制时间的延长,堆体 Cu、Zn 全量逐渐增加.但随着堆制时间的延长,DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例则逐渐减小,且添加重金属钝化剂后,堆体 DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例明显减低.不同重金属钝化剂对堆肥中 DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例的贡献率不同,其中添加 5.0% FA、2.5% WC 和 2.5% BT 堆体中 DTPA-Cu 所占比例最低,5.0% FA、10.0% WC 和 10.0% BT 堆体中 DTPA-Zn 所占比例最低.

表 2 添加粉煤灰前后堆体重金属 DTPA 提取态和全量的浓度变化
Table 2 Changes of DTPA-extractable and total Zn and Cu during composting

处理	Zn 全量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		DTPA-Zn 比例		Cu 全量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		DTPA-Cu 比例	
	1 d	90 d	1 d	90 d	1 d	90 d	1 d	90 d
SW	739.17	871.78	20.82%	18.89%	393.92	427.83	33.93%	22.29%
2.5% FA	722.77	775.81	19.34%	17.34%	384.58	422.47	36.27%	14.63%
5.0% FA	707.26	747.88	18.74%	15.07%	375.69	414.07	39.47%	8.54%
7.5% FA	692.36	737.88	17.72%	16.96%	367.21	404.08	47.38%	17.70%
10.0% FA	678.04	722.59	18.82%	18.19%	359.11	384.67	45.52%	21.28%
2.5% WC	721.51	791.25	20.02%	17.87%	384.54	424.62	31.92%	7.64%
5.0% WC	705.06	750.99	21.09%	17.00%	375.51	420.82	29.81%	11.87%
7.5% WC	689.03	748.06	20.20%	16.06%	366.91	413.73	22.91%	16.56%
10.0% WC	673.19	739.21	20.95%	14.07%	358.87	390.59	18.62%	16.39%
2.5% BT	724.22	786.93	19.77%	16.68%	385.68	421.76	33.43%	6.96%
5.0% BT	709.48	763.62	18.82%	15.54%	377.92	718.33	29.27%	13.92%
7.5% BT	695.56	755.51	18.02%	13.91%	370.31	405.26	24.53%	11.71%
10.0% BT	682.61	723.47	17.41%	11.11%	363.22	412.75	20.84%	11.92%

3.6 种子发芽指数(GI)和发芽率(GR)的变化

通过对堆肥的种子发芽指数的研究,不但可以检测堆肥样品中的残留植物毒性,而且也能预计毒性的发展.本试验中 GI 和 GR 的变化见图 4.

由图 4 可知,随着堆肥时间的延长,对照处理、添加粉煤灰处理和添加风化煤的各处理中,雪里蕻种子的 GR 逐渐增加,最终均达到 90% 以上,但 GR 随着粉煤灰比例的增加而有一定的降低.而在添加膨润土的各处理中,雪里蕻种子的 GR 则增加相对较慢,直到 90 d 堆肥结束,GR 最高仅达 80%,且 GR 随着膨润土的添加比例增加而降低.

分析 GI 的变化,可见对照处理在 90 d 堆肥结

束时,高达 1.10.而添加风化煤的各处理则在堆肥的前 30 d,GI 增加相对较慢,随后 GI 逐渐增加至约 1.0 左右.且风化煤的不同添加比例之间,GI 的变化无明显影响.而在添加粉煤灰和膨润土的各处理中,GI 增加很缓慢,直至 90 d 堆肥结束时,仅有 2.5% 和 5.0% 添加比例的 GI 达到 0.5,且 GI 基本随着粉煤灰和膨润土比例的增加而降低.这说明在猪粪好氧堆肥中,添加风化煤对雪里蕻种子的萌发基本无毒性作用.添加粉煤灰,虽然对种子发芽率的影响相对较弱,但会影响种子根长的增加.而添加膨润土则不但会影响种子的发芽,还会影响种子根系的发育.

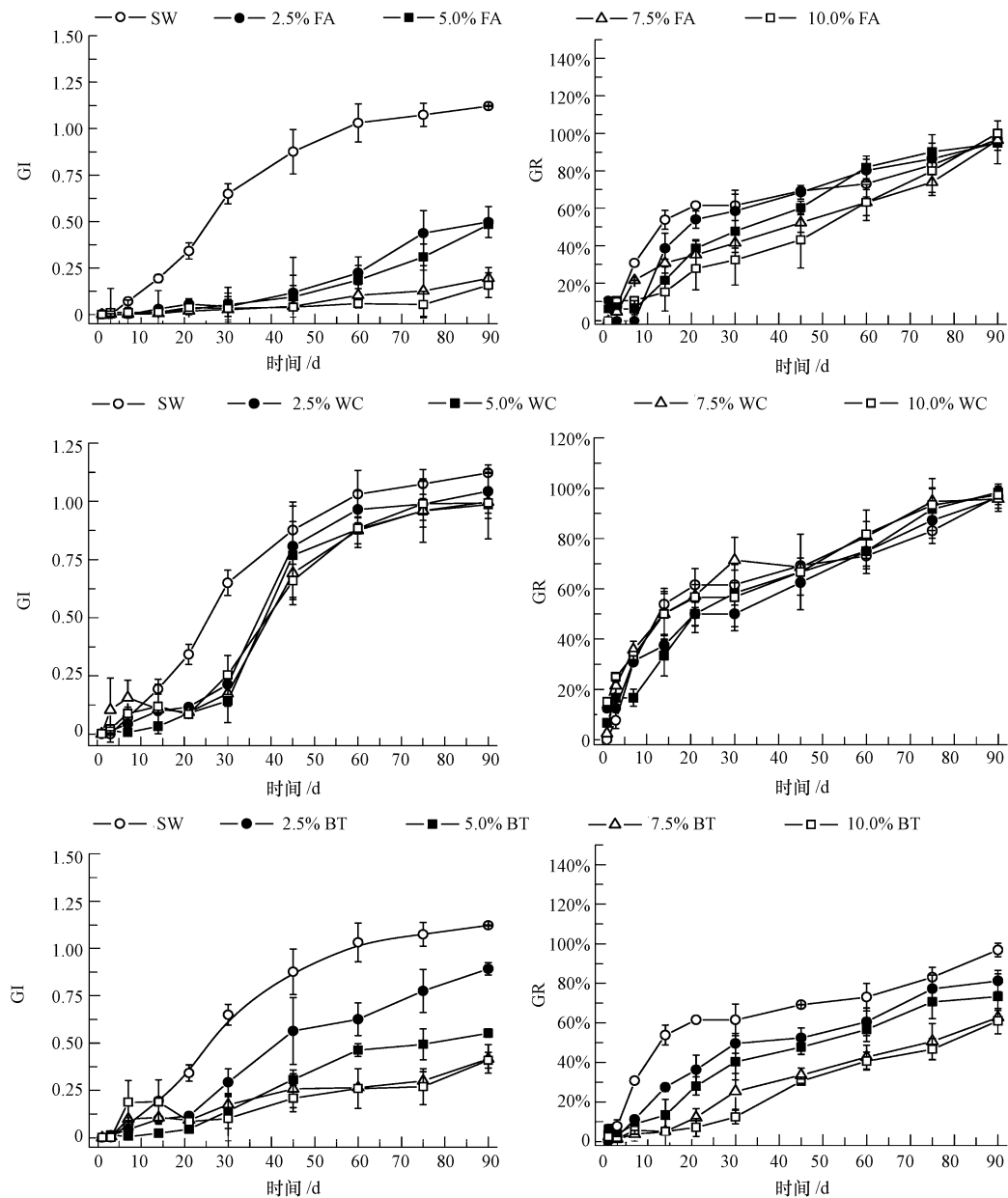


图4 雪里蕻种子发芽指数 (GI) 和发芽率 (GR) 的变化

Fig. 4 Change of Potherb mustard (*Ardiasquamulosa Presl*) GI and GR

4 讨论 (Discussion)

在堆肥过程中,堆体的含水量是一个重要的物理量(邵森等,2010).本试验中各堆体的含水率随着堆肥时间的延长而逐渐降低,从最初的约67%降低至90 d结束时的约30%.总体上,在升温 and 高温阶段,由于通风频率较大且每次鼓风的时间较长,加之此时堆体温度较高,水分易于通过蒸汽散失,水分减少较多(张增强,2011).进入降温阶段后,由于堆肥过程中未补充水分,导致堆体水分损

失严重.研究结果和王辉等(2006)进行粪渣和污泥好氧混堆过程中水分的动态变化规律相似.比较不同添加比例的钝化剂对堆体含水率变化的影响可见,添加粉煤灰和风化煤均对堆体含水率的变化没有明显影响,但添加膨润土则有利于堆肥初期堆体的持水,尤其是在堆肥初期的升温 and 高温阶段,且含水量随着膨润土用量的增加而增加.这是由于膨润土本身具有较强的吸水溶胀性能所致.

普遍认为,pH值的变化是揭示堆肥化过程比较直观的参数.适宜的pH值可使微生物有效地发挥

作用,减少氮素的损失,pH 太高和太低都会影响堆肥的效率,合适的 pH 在 7.5 ~ 8.5 (Bernal *et al.*, 2009; Rashad *et al.*, 2010; Tumuhairwe *et al.*, 2009)。本试验中,不同钝化剂种类对堆体 pH 的影响不同。添加粉煤灰的各处理中 pH 的变化在 8.55 ~ 9.21 波动。由于堆肥 pH > 7.5 会导致氮素损失 (Bernal *et al.*, 2009),因而添加粉煤灰可能不利于堆肥氮素的保存。而添加膨润土和风化煤的各处理中,在 90d 堆制结束时 pH 均稳定在 pH 7.20 ~ 7.90 之间。在添加膨润土的各处理中,可能是由于堆肥过程中所用膨润土的粒径较小($d < 0.10$ mm),更容易包裹堆肥物料,使得有机物料在堆制初期处于局部供氧不足而厌氧发酵产生有机酸以及生成大量 CO₂ 酸性物质,导致堆体 pH 的降低较多(李艳霞等,2000),且这种作用随着膨润土的用量增加而越加明显;随后堆肥 pH 的上升,是由于有机氮在微生物作用下发生强烈的矿化分解,并产生大量的 NH₃ 而引起的(曾光明等,2006);而堆肥后期 pH 的下降是由于 NH₃ 挥发速率降低且硝化菌的硝化作用产生大量的 H⁺,同时有机物分解产生的有机酸造成的(邵森等,2010);随着时间的延长,在堆肥末期,堆体中形成了碳酸氢盐缓冲体系,使得堆肥后期 pH 稳定在 8 左右 (Brito *et al.*, 2008; 邵森等,2010)。在添加粉煤灰和风化煤的处理中,可能由于堆制过程中堆肥局部供氧不足而厌氧发酵产生有机酸以及生成大量 CO₂ 而部分中和粉煤灰或风化煤的碱性,因而 pH 在堆肥初期下降程度相对较小 (Fang *et al.*, 1999)。研究结果与 Fang 等 (1999) 向污泥中添加粉煤灰、Samaras 等 (2008) 向污泥中添加粉煤灰和石灰进行堆肥的研究结果相一致。

在堆肥试验中,添加粉煤灰或风化煤的各处理中 EC 呈现出先增加后降低的趋势,这可能是由于过多的粉煤灰或风化煤将堆肥反应过程中产生的小分子络合为难溶的络合物,降低了堆肥的 EC (陈广银等,2007);也可能由于粉煤灰或风化煤包裹了物料,使得有机物料降解速率减慢 EC 降低,且这种作用随着粉煤灰的用量增加而更加明显。研究结果与陈广银等 (2007) 用添加 4.0% 石灰预处理的树叶进行堆肥过程中的 EC 变化相一致。对照处理和添加膨润土的各处理 EC 持续增加,至 90 d 堆制结束,EC 分别达到 4.74 mS·cm⁻¹、6.12 mS·cm⁻¹、7.10 mS·cm⁻¹ 和 7.74 mS·cm⁻¹,均高于对照处理 90d 堆制结束时的 3.74 mS·cm⁻¹,也高于 Garcia 等 (1991)

给出的腐熟堆肥的电导率值标准 (小于 4 mS·cm⁻¹),因而添加膨润土的堆肥具有潜在的土壤盐渍化风险。另外,土壤盐渍化也会导致重金属淋溶 (Acosta *et al.*, 2011)。造成添加膨润土各处理 EC 较高的原因主要是由于膨润土为钠基膨润土,本身具有较高的水溶性盐分,且这种作用随着膨润土添加比例的增加而增加。

堆肥过程中,随着堆制时间的延长,堆体 Cu、Zn 总含量逐渐增加。其原因是由于随着堆制时间的延长,有机物被降解矿化为 CO₂ 和水而被释放,导致堆体中 Cu 和 Zn 被“浓缩”所致 (鲍艳宇等,2010; 张树清等,2006)。但随着堆制时间的延长,DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例则逐渐减小,且添加重金属钝化剂后,堆体 DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例明显减低。这是由于高温好氧堆肥处理,能使重金属被钝化,因而 DTPA 提取态 Cu 和 Zn 所占的比例则逐渐减小 (鲍艳宇等,2010; 张树清等,2006)。但 DTPA 提取态 Cu 的比例比 Zn 所占的比例高,这也与鲍艳宇等 (2010) 和张树清等 (2006) 的研究结果一致。不同重金属钝化剂对堆肥中 DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例变化的贡献率不同,这是由于不同重金属钝化剂对重金属的钝化效果因重金属和钝化剂的种类而异 (荣湘民等,2009; 何增明等,2010; 刘浩荣,2008)。但总体上,进行好氧堆肥能减小畜禽粪便中的重金属的有效性,在堆肥过程添加重金属钝化对堆肥重金属有一定的钝化作用。

雪里蕻种子 GI 和 GR 的研究表明,只有对照处理 GI 增加迅速,其余添加粉煤灰、风化煤和膨润土的各处理,GI 增加较为缓慢。添加粉煤灰对种子 GR 的影响相对较弱,但会影响根长的增加,其作用基本随着粉煤灰、风化煤和膨润土的添加比例的增加而增加,这一点和 Samaras 等 (2008) 向污泥中添加石灰和粉煤灰的研究结果相一致。图 5 中雪里蕻的种子发芽在所有处理中均呈现出在前 3 d 发芽受到抑制的现象,与 Garcia 等 (1991) 进行城市有机废物堆肥时的研究结果相印证。这可能是未腐熟堆肥中含有的脂肪酸及酚酸等对植物生长产生了抑制作用 (Warman, 1999),例如添加风化煤处理中,风化煤本身含有大量的有机酸;也可能是由于在堆肥的初期产生了大量的 NH₃ 抑制了种子的发芽所致 (Fang *et al.*, 1999)。总体上,在 90 d 的堆制过程中,添加碱性物质 (如粉煤灰、石灰等) 和电解质含量较高的物质 (如膨润土) 会对雪里蕻种子发芽后

根系的生长产生一定的抑制作用 (Wong *et al.*, 2009).

表 3 各指标间的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson's correlation coefficient between parameters in experiments

处理	水分~pH	水分~EC	水分~GI	水分~GR	pH~EC	pH~GI	pH~GR	EC~GI	EC~GR	GI~GR
SW + CS	0.8855 **	-0.9195 **	-0.9342 **	-0.9014 **	-0.9392 **	-0.9249 **	-0.8521 **	0.9699 **	0.9625 **	0.9011 **
2.5% FA	-0.2857	-0.2178	-0.8644 **	-0.9596 **	0.3912	0.4048	0.2946	-0.2710	0.2701	0.8179 **
5.0% FA	-0.7251 *	0.2182	-0.9087 **	-0.9726 **	0.0288	0.6131	0.2922	0.3049	0.1322	0.8763 **
7.5% FA	-0.1000	-0.4111	-0.9295 **	-0.9905 **	-0.4473	0.2795	0.0686	0.2213	0.4480	0.9291 **
10.0% FA	0.2059	-0.8717 **	-0.8005 **	-0.9624 **	-0.3225	0.3658	0.0173	0.5801	0.8370 **	0.8998 **
2.5% WC	0.6137	0.2544	-0.9220 **	-0.9789 **	0.6194	0.7675	-0.5356	-0.1921	0.0934	0.9233 **
5.0% WC	0.5461	0.4094	-0.9419 **	-0.9819 **	0.8958 **	-0.6688 *	-0.4239	-0.5096	-0.3001	0.9054 **
7.5% WC	0.6904 *	0.3903	-0.9430 **	-0.9487 **	0.8585 **	-0.8509 **	-0.5305	-0.5816	-0.1564	0.8341 **
10.0% WC	0.5289	0.5852	-0.9611 **	-0.9772 **	0.9021 **	-0.6766 *	-0.4109	-0.7359 *	-0.4454	0.9244 **
2.5% BT	0.3318	-0.9403 **	-0.9883 **	-0.9714 **	-0.4626	-0.3040	-0.3630	0.9255 **	0.9780 **	0.9473 **
5.0% BT	-0.1761	-0.9766 **	-0.9702 **	-0.9666 **	0.0889	0.3151	0.3100	0.9293 **	0.9604 **	0.9616 **
7.5% BT	-0.1100	-0.9952 **	-0.9639 **	-0.9796 **	0.1265	0.0663	0.2322	0.9669 **	0.9884 **	0.9699 **
10.0% BT	0.1345	-0.9911 **	-0.8706 **	-0.9879 **	-0.1353	-0.4760	-0.1237	-0.9013 **	0.9870 **	0.8806 **

注: * 表示在 0.05 水平有显著差异, ** 表示在 0.01 水平有显著差异.

堆肥的基本理化指标间的 Pearson 相关系数见表 3, 由表 3 可知, 对照处理各指标间的相关性显著; 但添加不同重金属钝化剂后, 除了水分~GI、水分~GR、GI~GR 之间存在显著相关外, 其余各指标间的相关性各不相同. 添加粉煤灰的处理中, 当粉煤灰添加比例达到 10% 时, 水分~EC、EC~GR 之间存在显著相关性; 而添加风化煤的各处理中, 当风化煤添加比例超过 2.5% 时, pH~EC、pH~GI 间存在显著相关性, 且当添加比例达到 10% 时, EC~GI 之间也存在显著相关性; 在添加膨润土的各处理中, 水分~EC、EC~GR、EC~GI 间均存在显著相关性. 因而, 在堆肥中应合理添加钝化剂的比例.

5 结论 (Conclusions)

1) 在堆肥过程中, 添加粉煤灰、风化煤和膨润土对堆体温度的变化无明显影响, 添加粉煤灰和膨润土对堆体含水率变化影响也不显著, 但添加膨润土能减少一次发酵期水分的损失.

2) 添加不同种类的重金属钝化剂对堆体的 pH 和 EC 影响较为明显. 添加风化煤和膨润土均能使堆肥最终 pH 稳定; 而添加粉煤灰会导致堆体 pH 呈现较强的碱性; 添加膨润土会导致堆体 EC 增加, 可能具有潜在的土壤盐渍化风险.

3) 随着堆制时间的延长, 堆体 Cu 和 Zn 被“浓缩”而导致含量逐渐增加, 但 DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例则逐渐减小, 且添加重金属钝化剂后, 堆体 DTPA 提取态 Cu、Zn 所占的比例明显减低. 说明堆肥过程添加重金属钝化对堆肥重金属有良好

的钝化作用.

4) 添加粉煤灰、风化煤和膨润土对雪里蕻种子发芽率的影响相对较弱, 但会影响根长的增加. 在堆肥中应合理添加钝化剂的比例.

责任作者简介: 张增强 (1963—), 男, 教授, 主要从事农业固体废物资源化和环境化学研究. E-mail: zhangzq58@126.com.

参考文献 (References):

- Acosta J A, Jansen B, Kalbitz K, *et al.* 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils [J]. *Chemosphere*, 85(8): 1318-1324
- 鲍艳宇, 姜翼来, 颜丽, 等. 2010. 不同畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属的变化特征及其影响因素分析 [J]. *农业环境科学学报*, 29(9): 1820-1826
- Bao Y Y, Lou Y L, Yan L, *et al.* 2010. Dynamic change characteristic of heavy metals Pb, Cd, Cu and Zn during aerobic composting of different manure and the analysis of effect factors [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 29(9): 1820-1826 (in Chinese)
- Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review [J]. *Bioresource Technology*, 100(22): 5444-5453
- Brito L M, Coutinho J, Smith S R. 2008. Methods to improve the composting process of the solid fraction of dairy cattle slurry [J]. *Bioresource Technology*, 99(18): 8955-8960
- 陈同斌, 罗维, 郑国砥, 等. 2005. 翻堆对强制通风静态垛混合堆肥过程及其理化性质的影响 [J]. *环境科学学报*, 25(1): 117-122
- Chen T B, Luo W, Zheng G D, *et al.* 2005. Effects of pile-turning on chemical and physical properties in static forced-aeration composting of sewage sludge and pig manure [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(1): 117-122 (in Chinese)
- 陈广银, 王德汉, 吴艳, 等. 2007. 石灰预处理对树叶堆肥过程中养分转化的影响 [J]. *生态环境*, 16(1): 77-82
- Chen G Y, Wang D H, Wu Y, *et al.* 2007. Effect of lime-pretreatment on

- nutrient transformation of leaves compost [J]. Ecology and Environment, 16(1):77-82 (in Chinese)
- Fang M, Wong J, Ma K, *et al.* 1999. Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: Nutrient transformations [J]. Bioresource Technology, 67(1):19-24
- Garcia C, Hernandez T, Costa F. 1991. Study on water extract of sewage sludge compost [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 37 (3): 399-408
- 何增明, 刘强, 谢桂先, 等. 2010. 好氧高温猪粪堆肥中重金属砷、铜、锌的形态变化及钝化剂的影响[J]. 应用生态学报, 21(10): 2659-2665
- He Z M, Liu Q, Xie G X, *et al.* 2010. Changes of heavy metals form during aerobic high temperature composting of pig manure and the effects of passivators [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 21 (10): 2659-2665 (in Chinese)
- 康军, 张增强, 邵森. 2011. 玉米秸秆添加比例对污泥堆肥中 Cu 和 Zn 形态的影响[J]. 环境工程学报, 5(2): 436-442
- Kang J, Zang Z Q, Shao M. 2011. Effects of the ratios of maize straw to sewage sludge on speciation of Cu and Zn during composting process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 5 (2): 436-442 (in Chinese)
- Li Y X, Li W, Wu J, *et al.* 2007. Contribution of additives Cu to its accumulation in pig feces: study in Beijing and Fuxin of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 19(5): 610-615
- 李书田, 刘荣乐, 陕红. 2009. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 28(1): 179-184
- Li S T, Liu R L, Shan H. 2009. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 28 (1): 179-184 (in Chinese)
- 李艳霞, 王敏健, 王菊思, 等. 2000. 填充料和通气对污泥堆肥过程的影响[J]. 生态学报, 20(6): 1015-1020
- Li Y X, Wang M J, Wang J S, *et al.* 2000. Effect of bulking agent and aeration on sewage sludge composting process[J]. Acta Ecologica Sinica, 20 (6): 1015 -1020 (in Chinese)
- 刘浩荣, 宋海星, 荣湘民, 等. 2008. 好氧高温猪粪堆肥重金属钝化剂及其添加比例(Cr、Cd、Pb) 研究[J]. 江西农业大学学报, 30 (6): 967-972
- Liu H R, Song H X, Rong X M, *et al.* 2008. A study on the heavy metal passivation in aerobic high temperature composting of pig manure and its proportion[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 30(6):967-972 (in Chinese)
- Lopareva-Pohu A, Verdin A, Garçon G, *et al.* 2011. Influence of fly ash aided phytostabilisation of Pb, Cd and Zn highly contaminated soils on Lolium perenne and Trifolium repens metal transfer and physiological stress [J]. Environmental Pollution, 159 (6): 1721-1729
- Rashad F M, Saleh W D, Moselhy M A. 2010. Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments for organic farming systems: 1. Composting, quality, stability and maturity indices[J]. Bioresource Technology, 101(15): 5952-5960
- 荣湘民, 宋海星, 何增明, 等. 2009. 几种重金属钝化剂及其不同添加比例对猪粪堆肥重金属(As, Cu, Zn) 形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 23(4): 136-140, 160
- Rong X M, Song H X, He Z M, *et al.* 2009. Effect of some heavy metal passivation and its appending proportion on form transformation of heavy metal (As, Cu and Zn) in pig manure composting [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 23(4):136-140, 160 (in Chinese)
- Samaras P, Papadimitriou C A, Haritou I, *et al.* 2008. Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime[J]. Journal of Hazardous Materials, 154(1/2/3): 1052-1059
- 邵森, 杨淑英, 张增强, 等. 2010. 不同处理对高含水率奶牛粪堆肥好氧堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报, 29(5): 982-989
- Shao M, Yang S Y, Zhang Z Q, *et al.* 2010. Effect of different treatments on composting of high water content dairy manure [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5):982-989 (in Chinese)
- 孙利宁, 谷洁, 高华, 等. 2009. 小麦秸秆静态高温堆腐过程中的理化特征[J]. 干旱地区农业研究, 27(5): 157-160
- Sun L N, Gu J, Gao H, *et al.* 2009. Biochemical characteristics of wheat straw during composting at high-temperature and static state [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 27 (5): 157-160 (in Chinese)
- Tica D, Udovic M, Lestan D. 2011. Immobilization of potentially toxic metals using different soil amendments[J]. Chemosphere, 85 (4): 577-583
- Tumuhairwe J B, Tenywa J S, Otabbong E, *et al.* 2009. Comparison of four low-technology composting methods for market crop wastes[J]. Waste Management, 29(8): 2274-2281
- 王辉, 刘斌, 高定, 等. 2006. 粪渣污泥好氧堆肥过程中主要理化性质的动态变化[J]. 生态环境, 15(5): 966-968
- Wang H, Liu B, Gao D, *et al.* 2006. Pilot-scale composting of night soil sludge [J]. Ecology and Environment, 15 (5): 966 - 968 (in Chinese)
- Warman P R. 1999. Evaluation of seed germination and growth tests for assessing compost maturity[J]. Compost Science and Utilization, 7 (3): 33-37
- Wong J W C, Fung S O, Selvam A. 2009. Coal fly ash and lime addition enhances the rate and efficiency of decomposition of food waste during composting [J]. Bioresource Technology, 100 (13): 3324-3331
- 曾光明, 黄国和, 袁兴中, 等. 2006. 堆肥环境生物与控制[M]. 北京: 科学出版社
- Zeng G M, Huang G H, Yuan X Z, *et al.* 2006. Composting environment organism and control[M]. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Zhang M, Pu J. 2011. Mineral materials as feasible amendments to stabilize heavy metals in polluted urban soils [J]. Journal of Environmental Sciences, 23(4): 607-615
- 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 2006. 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用[J]. 中国农业科学, 39(2): 337-343
- Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, *et al.* 2006. Degradation of antibiotics and passivation of heavy metals during thermophilic composting process [J]. Scientia Agricultura Sinica, 39 (2): 337-343 (in Chinese)
- 张增强. 2011. 污水处理厂污泥堆肥化处理研究[J]. 农业机械学报, 42(7): 148-154
- Zhang Z Q. 2011. Composting sewage sludge of wastewater treatment plant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 42(7): 148 -154 (in Chinese)
- 中国预防医学科学院环境卫生研究所. 1988. GB7959-87 粪便无害化卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社
- Chinese Academy of Preventive Medicine. 1988. GB 7959-87 Sanitary standard for the non-hazardous treatment of night soil[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese)