

翻堆工艺对 0~15 mm 垃圾堆肥腐熟度空间变异影响研究

周 玉¹, 赵晓松¹, 李国学², 王桂琴², 张红玉², 史殿龙¹, 许德刚²

(1.吉林农业大学资源与环境学院, 吉林 长春 130118; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要:针对好氧堆肥高温发酵阶段堆体腐熟度差异大、空间存在变异的问题,以经北京市马家楼垃圾转运站筛分后的 0~15mm 生活垃圾为研究对象,在南宫堆肥厂隧道仓进行密闭式静态发酵试验。设计添加高温发酵阶段翻堆处理 1 次,与未经翻堆的处理进行对比,进行空间各种腐熟度指标测定及统计分析配对 *t* 检验。结果表明,未翻堆和翻堆物料的腐熟度指标经统计分析配对 *t* 检验,容重、pH 值、EC、WSC、NH₄⁺-N、发芽率指数 *Pr* 值均小于 0.01,差异极显著,含水率和 E₄/E₆ 的 *Pr* 值小于 0.05,差异显著;只有固相 C/N 的 *Pr* 值为 0.445 5,大于 0.05,差异不显著。高温发酵阶段进行翻堆处理,可以使堆体各处腐熟度均匀一致,空间变异性得到改善,同时可以明显促进微生物对垃圾的分解转化,加快垃圾的腐熟速度,提高堆肥产品的品质,为南宫堆肥厂提供了技术保障。

关键词:生活垃圾;腐熟度;空间变异

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)06-1288-05

The Impact of Turning Techniques on 0~15 mm Municipal Solid Waste Composting Maturity Spatial Variation

ZHOU Yu¹, ZHAO Xiao-song¹, LI Guo-xue², WANG Gui-qin², ZHANG Hong-yu², SHI Dian-long¹, XU De-gang²

(1. College of Resource and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the problem of the heap maturity great variation and spatial variation of aerobic composting fermentation stage of high-temperature, taking 0~15 mm municipal solid waste (MSW) in Majialou transfer station as research object, and researching 0 ~ 15 mm MSW in the high-temperature fermentation stage of the spatial variability. Simultaneously discussed turning disposal to improve the role of variation. Closed static state fermentation test will be carried out in fermentation warehouse of Nangong compost plant. It was designed to add turning disposal once in fermentation stage of high-temperature, and compared with un-turning disposal by taking various kinds of maturity target test and statistical analysis of matched T-test. The result indicated: ① *Pr* of bulk density、pH、EC、WSC、NH₄⁺-N、GI for un-turning and turning material maturity was less than 0.01, showing great difference; ② *Pr* of moisture and E₄/E₆ was less than 0.05, showing difference; ③ Only *Pr* of C/N was 0.445 5, which was more than 0.05, showing no difference. Carrying out turning disposal in fermentation stage of high temperature could make heap maturity same thus improve spatial variation. Meanwhile, it could promote decomposition and transformation of microorganism to MSW obviously, speed up the rate of maturity of MSW, improved the quality of compost product and provide technique assurance for Nangong compost plant.

Keywords: MSW; maturity; spatial variation

20 世纪 80 年代以来,空间变异性理论先后用于地质学、土壤学、水科学、生态学等研究领域,显示出经典统计学不可替代的优越性^[1-3]。黄启飞等成功地将这一理论引入堆肥科学。罗维^[4]等人对城市污泥与猪粪混合堆肥过程中堆体内湿度的空间变异性进行了研究,利用克里格法对湿度进行最优插值。得出了

堆肥不同时期堆体湿度的空间变异的分布特征,同时讨论了形成湿度空间变异的原因,并提出相应提高堆肥效率和质量的措施。王丽莉^[5]等人以鲜鸡粪、蘑菇渣和污泥按照体积比 3:1:1 混合进行动态堆肥模拟试验,深度地研究了冬季动态槽式堆肥温度的空间变异性。

生活垃圾在堆肥过程中的不均匀性使堆体成为一个复杂的、均匀度和通气状况等性质存在明显差异的生物反应系统,这种差异性导致了高温发酵阶段堆体不同部位腐熟度的空间变异性,从而使得堆

收稿日期:2008-10-09

作者简介:周 玉(1982—),女,硕士研究生,主要从事固废处理及资源化。E-mail:zhou66742109@126.com

通讯联系人:李国学 E-mail:ligx@cau.edu.cn

肥产品腐熟不均匀、品质得不到提高。李春萍^[6]等人通过对南宫堆肥厂发酵仓10个不同区间的垃圾堆肥腐熟度进行分析和模糊评价,结果表明:南宫堆肥厂发酵仓各区间垃圾堆肥的腐熟程度并不一致,存在着空间变异的问题。但对于改善发酵仓空间变异的文章比较少见。

本文通过对高温发酵结束时垃圾的物理指标、化学指标和生物学指标进行测定,对翻堆和不翻堆的垃圾腐熟度指标进行统计分析配对 t 检验,探讨翻堆工艺对发酵仓腐熟度空间变异的改善作用,为提高堆肥品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

南宫堆肥厂位于北京市大兴区瀛海乡,是由德国政府赠款的、北京市五个城市生活垃圾处理设施之一。堆肥工艺技术上采用的是近年来欧洲在垃圾堆肥领域所普遍采用的好氧隧道堆肥技术。这种技术的优点是工厂自动化程度高、环保系数高、设备相对不容易过度磨损,使用寿命较长,而且每个隧道内部工艺都可以直接独立控制。

1.2 供试材料

本试验全部生活垃圾均取自于北京市南宫堆肥厂经过隧道高温发酵8d后的生活垃圾样品。于2008年5月14日将0~15 mm垃圾原料在发酵仓布料,5月22日在不同采样点采样。

1.3 试验方法

本试验以隧道仓内高温发酵8d不翻堆的生活垃圾为对照,与在高温发酵第4d翻堆1次的生活垃圾进行对比。发酵仓长27 m,高4 m,堆体高1.5 m。以发酵仓长度的中线为分界线,将发酵仓分为两个部分,其中距仓门近的堆体在第4d进行翻堆,离仓门远的另一堆体保持不动。翻堆后的垃圾重新布回发酵仓原来位置,继续进行高温发酵。待4d后采集样品。当高温发酵结束时,在翻堆与不翻堆两个部分中间位置分别选取一个垂直断面作为采样断面,每个断面上6个采样点。在翻堆部分采样断面上,距离发酵仓左侧墙壁1 m,发酵仓底部0.2 m、0.7 m、1.3 m位置取样,分别命名为左下点、左中点和左上点,同样在距离发酵仓右侧墙壁1 m,发酵仓底部0.2 m、0.7 m、1.3 m处取样,分别命名为右下点、右中点和右上点。在不翻堆部分的采样断面上,以同样方法采样,共12个采样点。分别为翻堆与不翻堆的左下点、左中点、左上点、

右下点、右中点、右上点,对各点的垃圾进行物理组成分析以及理化性质分析。

1.4 测定指标与测定方法

1.4.1 垃圾样品物理学指标的测定

(1)测定指标

含水率、容重

(2)测定方法

垃圾在105~110℃烘24 h,取出待冷却后称重,根据下式计算其含水率:

$$W_i\%=(M-M_f)/M\times 100\%$$

式中: W_i 为垃圾含水率,%; M_f 为垃圾干重,kg; M 为样品总质量,kg。

垃圾容重的计算公式为: $B_i=M_i/V_i$

式中: B_i 为垃圾容重, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; M_i 为垃圾湿基重量,kg; V_i 为垃圾的体积, m^3 。

1.4.2 垃圾样品化学指标的测定

(1)测定指标

pH值、电导率(EC)、胡敏酸光学特性(E_4/E_6)、水溶性碳(WSC)、水溶性铵态氮(NH_4^+-N)、固相C/N。

(2)测定方法

将垃圾样品按1:10(W:V)浸提过滤。用Twin pH B-212测pH值;EC用DDS-11A型电导测定仪测定; E_4/E_6 用722型可见光分光光度计于465 nm和665 nm处分别测定吸光度值并取两者之比;水溶性碳(WSC)用重铬酸钾氧化法测定^[7];铵态氮(NH_4^+-N)用凯氏定氮法测定;固相C/N=总有机碳/总氮。将垃圾彻底风干后,用植物粉碎机粉碎并过0.149 mm筛,总有机碳(TOC)采用重铬酸钾容量法-外加热法;总氮(TN)采用凯氏定氮法^[8]。

1.4.3 垃圾样品生物学指标的测定

(1)测定指标

发芽率指数(GI)

(2)测定方法

GI(%):将垃圾样品按1:10(W:V)浸提过滤,取5 mL浸提液于铺有滤纸的9 cm培养皿内,播20粒饱满的小青菜种子,放置20℃培养箱中培养,第48 h测种子发芽率GI, $\text{GI}(\%)=(\text{浸提液种子发芽率}\times\text{根长})/(\text{对照种子发芽率}\times\text{根长})\times 100\%$ 。

1.5 数据处理

配对 t 检验:进行单因素2水平试验设计时,对同一个指标观测2个数据,这两个数据来自同一个受试对象或来自非常相同的2个受试对象。求出每个目标每对2个数据相减的差值diff,要注意各对数据相

减的顺序必须保持一致。若在严格配对条件下,处理的 2 个水平之间依然没有本质差别,则每对数据算得的差值 diff 都应接近于零。此时以差值 diff 的均数为样本均数,以零为理论均数,同时考虑多个指标,设置检验的零假设为:差值总体均值向量为零。

结果说明: $W>Pr>0.05$ 服从正态分布; $Pr<W<0.05$ 不服从正态分布; $Pr\leq 0.01$ 差异极显著; $Pr\leq 0.05$ 差异显著; $Pr>0.05$ 差异不显著。

2 结果与讨论

2.1 翻堆工艺对垃圾物料物理学指标空间变异的影响

为了研究翻堆工艺对垃圾物料空间变异性的影响,对高温发酵结束时堆体不同采样点的物理学指标进行测定,物理学指标主要包括容重和含水率,测定结果见表 1;对测定结果进行统计分析配对 t 检验,结果见表 2。

表 1 高温发酵结束时堆体不同采样点的物理指标变化表
Table 1 Physical index variation table of pile in different parts after high-temperature fermentation

项目	容重/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$		含水率/%	
	不翻堆	翻堆	不翻堆	翻堆
左上	588.23	646.32	57.66	52.45
左中	600.20	678.54	56.21	48.87
左下	590.12	655.25	47.87	46.55
右上	576.00	640.14	58.32	52.79
右中	632.30	660.20	55.98	49.32
右下	594.00	652.00	46.65	47.83

表 2 高温发酵结束时物理学指标统计分析配对 t 检验的结果
Table 2 The result of physical index statistical analysis of matched t-test after high-temperature fermentation

物理学指标		配对 t 检验结果			
容重	Shapiro-Wilk	W	0.869 55	$Pr<W$	0.224 4
	Student's t	t	8.559 503	$Pr> t $	0.000 4
含水率	Shapiro-Wilk	W	0.877 564	$Pr<W$	0.258 1
	Student's t	t	3.037 167	$Pr> t $	0.028 8

(1)容重

如表 1 所示,翻堆后垃圾的容重明显增加,不翻堆垃圾容重变化范围为 $576.00\sim 632.30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,差值为 $56.30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;经过翻堆的垃圾容重变化范围为 $640.14\sim 678.54\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,差值为 $38.40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。翻堆后容重的差值明显减小。经统计分析配对 t 检验,服从正态分布,且 Pr 值为 0.000 4,差异极显著。说明翻堆工艺能够使垃圾充分混合均匀,明显改善了垃圾容重的

空间变异性。同时促进整仓垃圾的腐熟。相对不翻堆的处理提高了垃圾的减量化程度。

(2)含水率

如表 1 所示,经过翻堆后的垃圾含水率有所降低,不翻堆垃圾含水率变化范围在 $46.65\%\sim 58.32\%$ 之间,差值为 11.67%;经过翻堆后垃圾含水率变化范围是 $46.55\%\sim 52.79\%$,差值为 6.24%。翻堆后含水率的差值明显减小。经统计分析配对 t 检验,服从正态分布,且 Pr 值为 0.028 8,差异显著。说明翻堆工艺改善了垃圾含水率的空间变异性。使翻堆后的含水率相对均匀一致。

2.2 翻堆工艺对垃圾物料化学指标空间变异的影响

为了研究翻堆工艺对垃圾物料空间变异性的影响,对高温发酵结束时堆体不同采样点的化学指标进行测定,化学指标主要包括 pH 值、EC、 E_4/E_6 、WSC、 NH_4^+-N 、固相 C/N,测定结果见表 3;对测定结果进行统计分析配对 t 检验,结果见表 4。

表 3 高温发酵结束时不同采样点的化学指标变化表
Table 3 Chemical index variation table of pile in different parts after high-temperature fermentation

化学指标		左上	左中	左下	右上	右中	右下
pH	不翻堆	6.7	6.8	6.6	6.8	7	6.6
	翻堆	7	7.2	7.0	7.1	7.2	7
EC/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	不翻堆	2.61	2.42	2.56	2.5	2.39	2.72
	翻堆	2.37	2.25	2.4	2.33	2.19	2.39
E_4/E_6	不翻堆	2.1	2.21	1.94	2.16	2.37	2.08
	翻堆	2.26	2.33	2.28	2.18	2.31	2.26
WSC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	不翻堆	3.33	3.11	3.47	3.34	3.2	3.37
	翻堆	3.16	3.01	3.19	3.17	3.01	3.18
NH_4^+-N / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	不翻堆	1 189.64	1 252.81	1 185.49	1 214.62	1 252.85	1 189.2
	翻堆	1 271.92	1 311.27	1 293.96	1 277.64	1 293.5	1 272.37
固相 C/N	不翻堆	25.54	25.55	25.36	24.29	24.31	24.33
	翻堆	24.22	23.61	25.41	25.01	23.63	25.41

(1)pH 值

pH 值可以作为评价腐熟度的一个指标^[9],一般认为 pH 值在 7.5~8.5 时,可获得最大堆肥速率^[10]。腐熟的堆肥一般呈弱碱性^[11],pH 值在 8~9 左右,但因原料和堆肥条件的影响而变化很大。如表 3 所示,翻堆工艺使垃圾的 pH 值变化很明显,未经过翻堆垃圾的 pH 值变化范围为 6.60~7.00,差值为 0.40,而翻堆后垃圾 pH 值变化范围为 7.00~7.20,差值为 0.2。经统计分析配对 t 检验,服从正态分布,且 Pr 值为 0.000 2,差异极显著。由此可见,高温发酵过程中添加翻堆工

表 4 高温发酵结束时化学指标统计分析配对 t 检验的结果
Table 4 The result of chemical index statistical analysis of matched t -test after high-temperature fermentation

化学指标	配对 t 检验结果				
pH	Shapiro-Wilk	W	0.821 616	$Pr < W$	0.091 1
	Student's t	t	10	$Pr > t $	0.000 2
EC	Shapiro-Wilk	W	0.821 466	$Pr < W$	0.090 9
	Student's t	t	7.984 422	$Pr > t $	0.000 5
E_4/E_6	Shapiro-Wilk	W	0.931 188	$Pr < W$	0.589 3
	Student's t	t	2.729 402	$Pr > t $	0.041 3
WSC	Shapiro-Wilk	W	0.912 526	$Pr < W$	0.453 2
	Student's t	t	4.636 466	$Pr > t $	0.005 7
NH_4^+-N	Shapiro-Wilk	W	0.973 153	$Pr < W$	0.912 9
	Student's t	t	7.516 447	$Pr > t $	0.000 7
固相 C/N	Shapiro-Wilk	W	0.963 8	$Pr < W$	0.848 5
	Student's t	t	0.827 79	$Pr > t $	0.445 5

艺对 pH 值的空间变异有明显的改善作用,同时也使 pH 值有所升高,使其接近中性或弱碱性,促进了垃圾分解和腐熟。

(2) 电导率(EC)

由表 3 可以看出,不翻堆垃圾 EC 值变化范围为 $2.39 \sim 2.72 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,差值为 $0.33 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。而经过翻堆后垃圾的 EC 变化范围有所减小,为 $2.19 \sim 2.40 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,差值为 $0.21 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,经统计分析配对 t 检验,服从正态分布,且 Pr 值为 0.000 5,差异极显著。由此说明翻堆有利于垃圾分解和腐熟,该工艺一方面降低了堆肥产品的可溶性盐分和有毒有害组分的浓度,另一方面减小了堆肥发酵仓内电导率的空间变异性。有利于垃圾降解和腐熟,使垃圾更加均匀一致。

(3) 胡敏酸光学特性(E_4/E_6)

一般来说,堆肥水浸提液的 E_4/E_6 值与腐植酸分子数量无关而与腐植酸的分子大小或分子的缩合度大小有直接的关系,通常随腐植酸分子量的增加或缩合度增大而减小,因此水浸提液 E_4/E_6 可以用来作为堆肥腐殖化作用大小的重要指标,堆肥水浸提液的 E_4/E_6 比值越大,堆肥越腐熟。由表 3 可以看出,垃圾堆肥水浸提液的 E_4/E_6 值,未经过翻堆其变化范围为 $1.94 \sim 2.37$,差值为 0.43,经过翻堆后,其变化范围为 $2.18 \sim 2.33$,差值为 0.15,翻堆后差值明显减小。经统计分析配对 t 检验,服从正态分布,且 Pr 值为 0.041 3,差异显著。

上述结果表明,翻堆对堆体 E_4/E_6 值影响显著,增加该工艺促进了有机酸向大分子腐植酸的转化,有利于垃圾分解和腐熟度提高,同时减小了堆肥发酵仓内各点

E_4/E_6 值的空间变异性,使垃圾降解更充分、腐熟更好。

(4) 水溶性碳(WSC)

如表 3 所示,未经过翻堆垃圾水溶性有机碳(WSC)含量的变化范围为 $3.11 \sim 3.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相差 $0.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;而经过翻堆后垃圾水溶性碳的含量普遍降低,其变化范围为 $3.01 \sim 3.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,差值为 $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。经统计分析配对 t 检验,服从正态分布,但 Pr 值为 0.005 7,差异极显著。

由此可见,翻堆对减小堆肥发酵仓内各点的空间变异性有明显贡献,由于物料粒径变小且更加均匀,促进了有机物分解转化与物料腐熟,并减小了堆体各处 WSC 含量的空间变异性。

(5) 铵态氮(NH_4^+-N)

由表 3 可以看出,经翻堆工艺处理后垃圾的铵态氮含量明显大于未翻堆的铵态氮含量,未经翻堆垃圾的铵态氮变化范围为 $1\ 185.49 \sim 1\ 252.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,差值为 $67.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而经过翻堆垃圾的铵态氮变化范围 $1\ 271.92 \sim 1\ 311.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,差值为 $39.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,差值明显减小。经统计分析配对 t 检验,服从正态分布,且 Pr 值为 0.000 7,差异极显著。

这说明,翻堆对堆体的 NH_4^+-N 含量影响显著,有利于垃圾在高温发酵阶段产生更多的 NH_4^+-N ,也有利于减小堆体各点间 NH_4^+-N 的空间变异性。

(6) 碳氮比(C/N)

C/N 是国内外重要的堆肥腐熟度评价指标之一。C/N 比过高,微生物增殖时由于氮不足,生长受到限制,有机物降解速率变得缓慢,堆肥时间变长;若 C/N 比过低,则堆肥过程产生氨,不仅影响环境,而且造成肥分氮的损失。

如表 3 所示,经过翻堆后垃圾的 C/N 变化不是很明显,C/N 的空间差异性也不大。未翻堆垃圾 C/N 的变化范围为 $24.29 \sim 25.55$,最大差异为 1.26,而经过翻堆处理后的垃圾 C/N 的变化范围为 $23.61 \sim 25.41$,最大差异为 1.80。经统计分析配对 t 检验,服从正态分布,且 Pr 值为 0.445 5,差异不显著,对空间变异的改善效果不是很明显。虽然本次试验原料都是来自北京市 0~15 mm 生活垃圾,但是由于翻堆与未翻堆的垃圾可能存在原料成分之间的差异,C/N 同时还受到堆肥温度、分解速率及堆体中菌群的影响,各种因素都可能导致翻堆前后生活垃圾 C/N 的差异不显著。所以在以后的研究中可以针对此问题进一步深入研究。

2.3 翻堆工艺对垃圾物料生物学指标空间变异的影响 发芽率指数(GI)

由表 5 可以看出, 经过翻堆后垃圾的 GI 变化很明显。未经过翻堆 GI 的变化范围是 46.07%~53.70%, 差值为 7.63%; 经过翻堆后 GI 的变化范围是 57.13%~60.98%, 差值为 3.85%。经统计分析配对 t 检验, 服从正态分布, 且 P 值为 0.000 2, 差异极显著。可见, 翻堆对改善发芽率指数的空间变异性有明显帮助, 并加速了垃圾中抑制种子发芽的有毒有害物质的分解转化, 从而在很大程度上提高了堆肥的腐熟度。

表 5 高温发酵结束时堆体不同采样点 GI 变化

Table 5 GI variation table of pile in different parts after high-temperature fermentation

采样点	不翻堆/%	翻堆/%
左上	48.86	57.13
左中	52.43	60.40
左下	48.53	60.98
右上	46.07	57.43
右中	53.70	60.20
右下	50.31	60.12

表 6 高温发酵结束时 GI 统计分析配对 t 检验的结果

Table 6 The result of GI statistical analysis of matched t -test after high-temperature fermentation

生物学指标	配对 t 检验结果				
GI	Shapiro-Wilk	W	0.876 068	$Pr < W$	0.251 5
	Student's t	t	10.131 34	$Pr > t $	0.000 2

3 结论

(1) 物理指标: 通过对高温发酵结束时不同采样点物理指标进行测定及统计分析配对 t 检验, 翻堆与不翻堆物料容重的 P 值为 0.000 4, 差异极显著, 含水率的 P 值为 0.028 8 差异显著。

(2) 化学指标: 通过对高温发酵结束时不同采样点的化学指标进行测定及统计分析配对 t 检验, 翻堆与不翻堆物料的 pH 值、EC、WSC、 NH_4^+-N 的 P 值均小于 0.01, 差异极显著; E_4/E_6 的 P 值为 0.041 3, 差异显著; 只有 C/N 的 P 值为 0.445 5, 差异不显著。

(3) 生物指标: 通过对高温结束时不同采样点的发芽率指数进行统计分析配对 t 检验, 翻堆与不翻堆物料 GI 的 P 值为 0.000 2, 差异极显著。

(4) 翻堆能使堆体各处腐熟度均匀一致, 对空间变异的改善起到一定作用。同时可促进微生物对垃圾的分解转化, 进一步加快垃圾的腐熟速度, 从而使得

堆肥产品腐熟均匀, 提高堆肥产品的品质, 为南宫堆肥厂肥料的销售提供了技术保障。

参考文献:

- [1] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985(9): 10-20.
LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XU Zhi-rong, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985(9): 10-20.
- [2] 周惠珍, 龚子同, Lamp L. 土壤空间变异性研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 233-241.
ZHOU Hui-zhen, GONG Zi-tong, Lamp L, et al. Study on soil spatial variability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(3): 233-241.
- [3] 吕 军, 俞劲炎. 水稻土物理性质空间变异性研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 8-15.
LV Jun, YU Jin-yan. Spatial variability of physical properties of paddy solid in field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, 27(1): 8-15.
- [4] 罗 维, 陈同斌, 高 定, 等. 城市污泥与猪粪混合堆肥过程中湿度空间变异[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 126-133.
LUO Wei, CHEN Tong-bin, GAO Ding, et al. Variations of moisture content during co-composting of biosolid and pig manure[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(1): 126-133.
- [5] 王丽莉, 涂淑兰, 路 鹏, 等. 冬季动态槽式堆肥温度的空间变异[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1838-1844.
WANG Li-li, TU Shu-lan, LU Peng, et al. Temperature spatial variability in dynamic trough composting process in winter[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11): 1838-1844.
- [6] 李春萍, 李国学, 李玉春, 等. 北京市南宫隧道仓不同区间垃圾堆肥腐熟度的模糊评价[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 201-206.
LI Chun-ping, LI Guo-xue, LI Yu-chun, et al. Fuzzy mathematics-based evaluation of municipal solid waste compost maturities in different spaces in static tunnel from Nangong compost plant[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(2): 201-206.
- [7] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 2000.
Nanjing Agricultural University. Soil analysis in agricultural chemistry [M]. Beijing: Agriculture Publishing Company, 2000.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry (3rd edition) [M]. Beijing: China Agriculture publishing company, 2000.
- [9] U SEPA. Compost of municipal waste water sludge[R]. Center of Env. Research Information Office of Research and Development; EPA 625/4-85/014, 1985.
- [10] 陈世和, 张所明. 城市垃圾堆肥管理与工艺[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990.
CHEN Shi-he, ZHANG Suo-ming. The principle and process of municipal solid waste composting[M]. Shanghai: Fudan University Publishing Company, 2000.
- [11] Nakasaki K, Yaguchii H, Sasaki Y, et al. Effects of pH control on composting of garbage[J]. *Waste Management & Research*, 1993, 11: 117-125.