

不同通风方式对污泥堆肥的影响

魏源送,李承强,樊耀波*,王敏健,贾智萍(中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室,北京 100085, E-mail:ys_wei@yahoo.com)

摘要:采用 2 种通风方式和 5 种调理剂进行污泥堆肥,堆温均能顺利达到设定温度(60℃),并能保持一段高温期,堆肥产品的卫生学指标达到了无害化国家标准.同采用正压强制通风相比,采用自然通风与正压强制通风相结合方式,堆温上升迅速,能耗更低.但正压强制通风能加快堆料含水率的降低和有机质的降解.堆料含水率能极大地影响污泥堆肥过程,堆料的含水率不宜超过 80%,在污泥堆肥过程中不必对堆料的 pH 值进行调整.

关键词:通风方式;污泥堆肥;调理剂

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)03-06-0054

Effect on Sewage Sludge Composting with Different Aeration Modes

Yuansong Wei, Chengqiang Li, Yaobo Fan, Minjian Wang, Zhiping Jia (SKLEAC, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China E-mail:ys_wei@yahoo.com)

Abstract: Two kinds of aeration modes, five kinds of amendment were tested in sewage sludge composting. The pile temperature rose to the set temperature (60℃) and could maintain some thermophilic period. The pathogen reduction of sewage sludge compost met with the control standard. Compared with positive forced aeration, the natural aeration combined with positive forced aeration made the pile temperature rise faster and consume less energy. However, the positive forced aeration could accelerate the moisture content reduction and the organic matter degradation of mixtures of sewage sludge and amendment. The moisture content of raw materials affected the composting process very much, and should be less than 80%. The pH value of raw materials need not be adjusted during the sewage sludge composting process.

Keywords: aeration mode; sewage sludge composting; amendment

在堆肥过程中,通风有 3 个作用:供氧、散热和去除水分.通风方式有自然通风、强制通风和被动通风,其中强制通风有 3 种方式:正压鼓风、负压抽风和由正压鼓风与负压抽风组成的混合通风^[1~4].不同的通风方式对堆肥过程有不同的影响.同其它通风方式相比,强制通风易于操作和控制,是为堆料生物降解提供氧气的最有效方法,并且是堆肥过程能耗的主要影响因素,然而它对通风管附近的堆料有明显的冷却效应^[5].本研究采用 2 种通风方式和 5 种调理剂,利用自行研制的强制通风静态仓进行污泥堆肥,研究不同通风方式对污泥堆肥过程的影响,建立适合我国城市污水处理厂的高效低耗污泥堆肥工艺.

1 材料与方法

1.1 污泥堆肥实验系统

根据污泥堆肥系统的技术经济分析^{*,*1},选择、设计和建造了强制通风静态仓污泥堆肥实验系统,该系统由一个静态仓(长×宽×高=2.8m×1.4m×1.5m,有效容积 4.2m³)、5 个后腐熟仓和贮存仓(长×宽×高=1.5m×1.2m×1.5m)组成(图 1).强制通风静态仓采用风室结构,风室内安装有一定排列方式的折流板,风室

基金项目:国家“九五”重点科技攻关项目(96-909-01-05)

作者简介:魏源送(1969~),男,江西新建,博士.

收稿日期:2000-11-10

* 通讯联系人

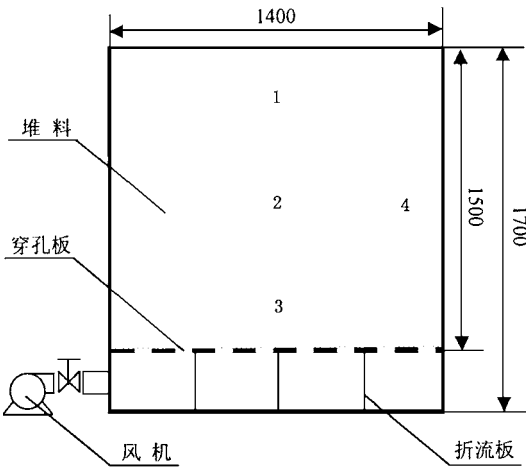
* * 魏源送.污泥堆肥系统的技术经济分析(报告). 1998.

上铺一层预制混凝土穿孔板(穿孔板的孔隙率为6%,孔截面为梯形),折流板和穿孔板的作用为使空气均匀通过堆体.采用离心通风机,功率小,风量大,投资和运行费用低;采用了时间-温度反馈的通风控制方式^[5](当堆体中心温度小于60℃时,采用时间控制器控制离心风机;当堆体中心温度达到60℃时,采用温度控制器控制离心风机),实现了通风的自动控制.

1.2 堆肥原料及堆料配比

脱水生污泥来自于北京市方庄污水处理厂,稻壳、麦壳和玉米芯来源于北京近郊农村,木片来源于北京木材厂,回流堆肥来源于自制的腐熟堆肥,玉米芯粉碎成约粒径为3cm大小的颗粒.它们的特性见表1.根据物料衡算(以堆料含水率控制为依据)确定污泥与调理剂的体积比.堆料组成及特性见表2.

1.3 堆肥操作方法



1、2、3、4是温度传感器在堆体中的位置,1、3分别距离顶部和底部20cm,2距离顶部65cm,4距离墙壁15cm

图1 强制通风静态仓截面示意图(单位:mm)

Fig.1 Section pattern of the forced aeration static warehouse

表1 堆肥原料特性 ¹⁾			
Table 1 Qualities of the raw materials			
物料	含水率/ %	有机质/ %	容重/kg·m ⁻³
脱水污泥	80.73 ~ 82.19(81.36)	61.19 ~ 66.52(64.26)	552.58 ~ 658.50(593.30)
木片	11.78 ~ 34.33(20.91)	83.19 ~ 98.83(91.26)	205.35 ~ 251.35(224.76)
稻壳	7.59 ~ 8.78(8.36)	83.99 ~ 85.40(85.00)	95.10 ~ 110.00(102.50)
玉米芯	7.41 ~ 11.40(8.75)	95.28 ~ 96.61(96.01)	83.33 ~ 125.00(105.83)
麦壳	6.02 ~ 6.36(6.19)	73.14 ~ 78.82(75.98)	50.00 ~ 55.00(52.50)
回流堆肥	37.35 ~ 38.94(38.15)	52.13 ~ 52.85(52.49)	466.67 ~ 500.00(483.34)

1) 括号内为平均值.

表2 不同堆料组成及特性				
Table 2 Components and features of different composting materials				
编号	时 间	物料配比(V/V)	初始含水率/ %	初始有机质/ %
I	1999-05-26 ~ 07-23 共计 57d 其中:堆肥期 27d,后腐熟 30d	木片/回流堆肥/污泥 = 1/1/1	65.70	67.79
II	1999-06-23 ~ 08-14 共计 52d 其中:堆肥期 21d,后腐熟 31d	木片/污泥 = 1/2	80.44	64.90
III	1999-07-24 ~ 09-13 共计 51d 其中:堆肥期 21d,后腐熟 30d	污泥/木片/回流堆肥 = 1/1.6/1	64.56	54.67
IV	1999-10-13 ~ 2000-01-20 共计 100d 其中:堆肥期 21d,后腐熟 79d	麦壳/污泥/回流堆肥 = 1/1/1	54.13	47.85
V	1999-11-05 ~ 2000-01-20 共计 76d 其中:堆肥期 21d,后腐熟 55d	木片/污泥 = 2/1	68.17	58.59
VI	1999-11-30 ~ 2000-02-24 共计 86d 其中:堆肥期 21d,后腐熟 65d	稻壳/污泥 = 1/1	73.06	74.68
VII	1999-12-28 ~ 2000-02-24 共计 58d 其中:堆肥期 27d,后腐熟 30d	玉米芯/污泥 = 1/1.5	76.13	46.97

根据堆料含水率的要求,将污泥与调理剂按照一定的体积比例混合,混合均匀后装入强制通风静态仓,用调理剂分别在穿孔板上铺设一层厚度为10~20cm的垫层和在堆体顶部铺

设一层厚度为 10 ~ 20cm 的覆盖层.实验(I) ~ (III)的堆体通风采用正压强制通风方式.在堆肥初期,采用时间控制器控制离心风机(设定离心风机开 1 ~ 10 min,关 20 ~ 120 min) ;根据不同堆料达到无害化的卫生要求设定堆体的控制温度为 60 ℃,当堆体中心温度达到设定温度(60 ℃)时,温度控制器控制离心风机,对堆体进行强制通风;当堆体中心温度低于设定温度时,时间控制器控制离心风机(设定离心风机开 5 ~ 10 min,关 20 ~ 60 min) ,对堆体进行强制通风.这种运行方式可使堆料达到无害化所需的一段高温期.当堆体堆置 3 ~ 4 周后,且堆体表面温度降至与周围环境温度相同时,堆料出仓,进入后腐熟期.

实验(IV) ~ (VII)的堆体通风采用自然通风与强制通风相结合的方式.分为 2 个阶段,在堆肥的第 1 阶段,堆体通风采用自然通风方式;在堆肥的第 2 阶段,根据不同堆料达到无害化的卫生要求设定堆体的控制温度为 60 ℃,当堆体中心温度达到设定温度时,温度控制器控制离心风机,对堆体进行强制通风;当堆体中心温度低于设定温度时,时间控制器控制离心风机,对堆体进行强制通风(离心风机开机10s ~ 90s,关

机 20 min ~ 60 min) ,使堆体保持一段高温期,从而达到堆料无害化的卫生要求.当堆体堆置 3 ~ 4 周后,且堆体表面温度降至与周围环境温度相同时,堆料出仓,进入后腐熟期(该堆肥方法已申报专利) .

1.4 分析方法

在堆肥过程的不同时间分别在堆体的上层(距离顶部 20cm) ,中层(距离顶部 65cm) 和下层(距离底部 20cm) 采集若干样品,除去木屑、石块等杂物,混合均匀,过 7 mm 筛.一部分鲜样进行含水率、有机质、pH、大肠菌值和蛔虫卵杀灭率的测定.污泥堆肥过程中的测试指标为:堆体温度、含水率、有机质、pH 值、大肠菌值和蛔虫卵杀灭率.具体测定方法参见文献[6 ~ 9] .

2 结果与讨论

2.1 堆体温度

在堆肥过程中,温度控制的目标是极大地使堆肥无害化(高温有利于堆肥无害化) 和稳定化(高温抑制堆肥稳定化)^[1].图 2 表明了采用不同调理剂的污泥堆肥堆体上、中、下 3 层和环境温度的变化情况,表 3 表明了采用不同调理剂的污泥堆肥堆体中层温度的特性.

表 3 采用不同调理剂的污泥堆肥堆体中层温度特性

Table 3 Median layer temperature features of the sludge composting piles with different amendments

特性	I	II	III	IV	V	VI	VII
堆温到达 50 ℃所需的时间/d	6.3	12.0	3.58	1.63	2.50	2.43	8.44
堆温 > 50 ℃的时间/d	15.7	3.0	12.42	5.08	3.75	8.08	9.08
最高温度/℃	59.7	51.47	60.9	70.9	59.7	67.7	65.6
堆温到达最高温度所需的时间/d	10.0	13.0	9.92	3.13	3.75	8.21	8.75
升温速率 $dT/dt/℃\cdot h^{-1}$	0.14	0.08	0.19	0.59	0.53	0.65	0.24

(1) 实验(I) ~ (III) 采用的通风方式为强制通风.除实验(II) 外,实验(I) (II) 的堆体中层温度均达到了设定温度,并分别历时 6.3d 和 3.58d.它们的升温速率分别为 0.14 ℃/h 和 0.19 ℃/h,堆体中层温度大于 50 ℃的时间分别长达 15.7d 和 12.42d,最高温度分别为 59.7 ℃和 60.9 ℃.在后腐熟阶段,实验(I) 的堆温最高达 74 ℃.

实验(II) 的堆温上升缓慢并达不到设定温度,且堆体中层温度 > 50 ℃的时间只有 3d.虽然在第 7d 对堆体进行了翻堆,但堆温仍然上升

缓慢.在堆肥过程及后腐熟过程,堆料臭味很重,堆料颜色变黑,表明在堆肥过程中出现了厌氧现象.原因是堆料初始含水率较高(80.44 %) ,造成堆料压实(堆体中层的容重为 857.66kg/ m³,远大于脱水污泥的平均容重 593.30kg/ m³) ,从而造成通风不畅.

(2) 实验(IV) ~ (VII) 采用自然通风与强制通风相结合的方式.实验(IV) ~ (VII) 的堆体中层温度均达到了设定温度,并分别历时 1.63d、2.50d 和 2.43d.实验(IV) ~ (VI) 的堆温上升迅

速,升温速率分别为 0.59℃/h、0.53℃/h 和 0.65℃/h,且它们的堆体中层温度 > 50℃的时间分别为 5.08d、3.75d、8.08d。由于气候寒冷(气温为 -14℃~3.9℃,平均气温为 -5.1℃),实验(Ⅶ)的中层温度达到设定温度(60℃)长达 8.44d,堆温上升缓慢,升温速率仅为 0.24℃/h,堆体中层温度 > 50℃的时间为 9.08d。

结果表明,无论采用哪一种通风方式,实验(Ⅱ)除外,它们的堆体中层温度都能达到设定

温度(60℃),并能维持一段高温期。通过对 2 种不同通风方式的比较,堆体采用自然通风与强制通风相结合的方式,堆温上升迅速,实验(Ⅳ)~(Ⅶ)的堆体升温速率是实验(Ⅰ)~(Ⅲ)的数倍。

2.2 含水率和有机质

采用不同调理剂的污泥堆肥含水率和有机质在不同堆肥阶段的变化特性见表 4。

在高速阶段和后腐熟阶段结束时,实验

表 4 采用不同调理剂的污泥堆肥含水率和有机质变化特性¹⁾/ %

编号	初始		高速阶段			后腐熟阶段		
	含水率	有机质	含水率	有机质	变化率	含水率	有机质	变化率
I	65.70	67.79	46.37	47.38	- 29.42(- 30.11)	21.09	43.28	- 67.90(- 36.16)
II	80.44	64.90	74.30	62.70	- 7.63(- 3.39)	70.06	57.87	- 12.90(- 10.83)
III	64.56	54.67	50.90	48.69	- 21.16(- 10.94)	32.40	29.84	- 49.81(- 45.42)
IV	54.13	47.85	50.74	42.94	- 6.26(- 10.26)	52.99	44.50	- 2.11(- 7.00)
V	68.67	58.59	60.50	53.35	- 11.90(- 8.94)	61.28	52.43	- 10.76(- 10.51)
VI	73.06	74.68	68.59	65.50	- 6.12(- 12.29)	74.38	64.89	1.81(- 13.11)
VII	76.13	7.61	57.84	50.06	- 24.02(- 13.11)	60.70	46.97	- 20.27(- 18.47)

1) 括号内为有机质的变化率

(Ⅰ)~(Ⅲ)的含水率分别降低 7.63%~29.42%和 12.90%~67.90%,有机质分别降低 10.43%~30.11%和 10.83%~45.42%;实验(Ⅳ)~(Ⅶ)的含水率分别降低了 6.12%~24. %和 2.11%~20.27%[实验(Ⅵ)的含水率在后腐熟阶段结束时略有升高],有机质分别降低了 8.94%~13.11%和 7.00%~18.47%。从表 4 可知:在堆肥过程的高速阶段,强制通风能加快有机质的降解和水分的去除;在堆肥过程的后腐熟阶段,实验(Ⅰ)和(Ⅲ)的含水率继续下降(这 2 轮实验正处在夏季,环境温度高,水分蒸发快),而实验(Ⅳ)~(Ⅶ)的含水率略有回升,可能的原因是在实验(Ⅳ)~(Ⅶ)的后腐熟阶段,堆料分解所产生的水分因环境温度较低而蒸发缓慢,从而积累在堆料中。采用木片和玉米芯为调理剂的污泥堆肥比采用麦壳和稻壳为调整剂的污泥堆肥有机质降解更快,水分去除更多。从图 2 和表 2 可知,堆料的含水率影响污泥堆肥过程。因此,堆料的初始含水率不宜超过 80%,否则,堆温有可能不能顺利达到设定温

度,从而导致污泥堆肥的失败,达不到使污泥堆肥无害化和稳定化的要求。

2.3 pH 值

根据美国环保局的规定,污泥与调理剂混合物的 pH 值应在 6~9 之间^[10]。图 3 表明了采用 5 种调理剂的污泥堆肥 pH 值变化情况。在堆温达到高温之前,微生物新陈代谢的产物(有机酸)使堆料的 pH 值下降,而随着高温期的到来,有机酸的挥发和有机氮分解的氨导致堆料的 pH 值逐渐回升。通过与堆体温度曲线的比较,可以清楚地表明采用各种调理剂的 pH 最大值发生在污泥堆肥过程的高温期。本研究表明,这些实验的 pH 值变化范围均在 6~9 之间,因此不必对堆料的 pH 值进行调整。在正常的污泥堆肥过程,堆料的 pH 值都具有在高温期上升,在后腐熟阶段趋于中性的特点。

2.4 卫生学指标

根据粪便无害化卫生标准(GB7959-87)^[8],最高堆温达 50℃~55℃以上持续 5~7d,粪大肠菌值为 0.01~0.1,蛔虫卵杀灭率为 95%~

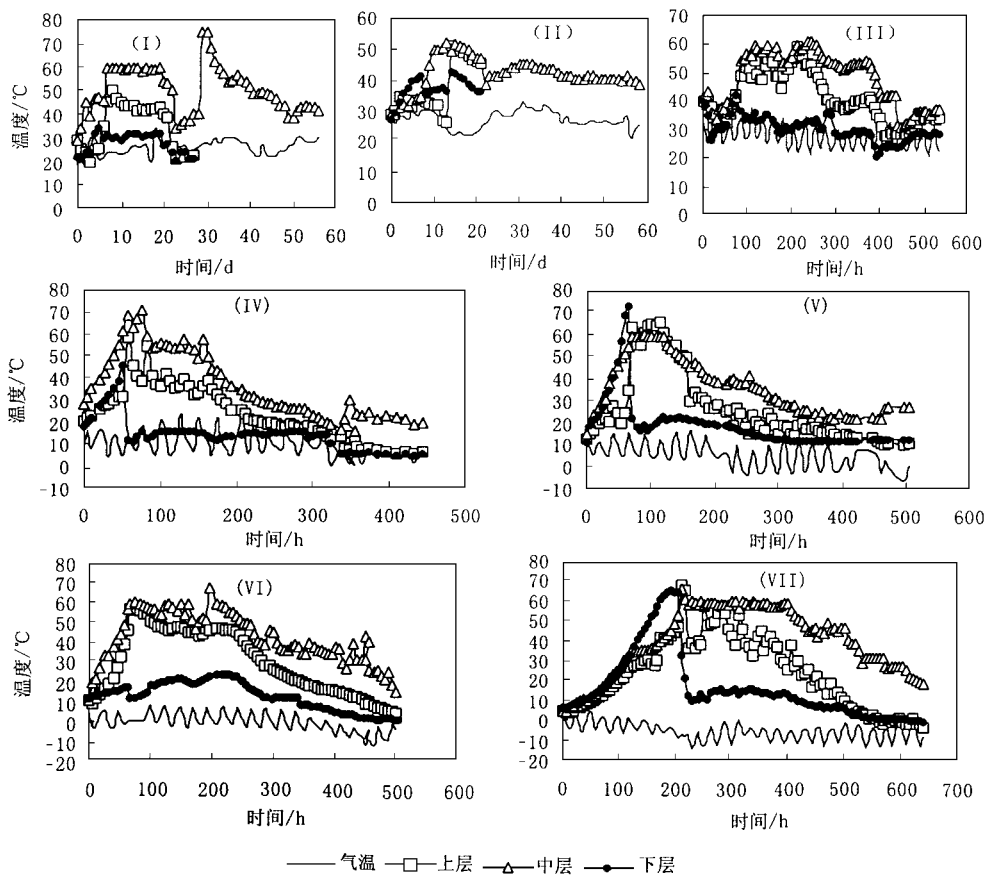


图 2 采用不同调理剂的污泥堆肥堆体温度曲线

Fig.2 Temperature curve of the sewage sludge composting piles with different amendments

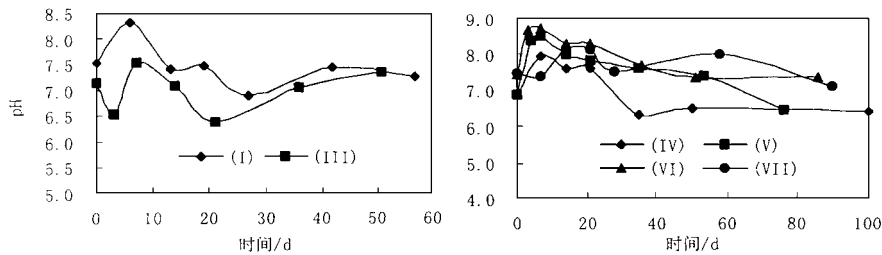


图 3 采用不同调理剂的污泥堆肥 pH 变化

Fig.3 pH variation of the sewage sludge composting piles with different amendments

100 % .因堆温未达到设定温度 ,实验(II) 未进行卫生学指标的测定 .表 5 表明了采用不同调理剂的污泥堆肥卫生指标 .从表 5 可知 ,采用这 2 种通风方式和不同调理剂的污泥堆肥卫生学指标均能达到国家标准 .

表 5 采用不同调理剂的污泥堆肥卫生指标

Table 5 Sanitary bacteriology indexes of the sewage sludge composting piles with different amendments

指标	I	II	III	IV	V	VI	VII
大肠菌值	> 0.111	0.43	0.04	0.04	0.04	0.04	0.43
蛔虫卵杀灭率/ %	100	100	100	100	100	100	100

表 6 采用不同调理剂的污泥堆肥能耗

Table 6 Consume energy of the sewage sludge composting piles with different amendments

编号	总量 /k W·h	污泥 / m ³	含水率 / %	时间 /d	干污泥能耗 /k W·h(t·d) ⁻¹	湿污泥能耗 / W·t ⁻¹	通风方式
I	39 .6	1 .4	65 .7	27	5 .15	73 .6	强制通风
II	19 .4	2 .8	80 .44	21	2 .84	23 .2	强制通风
III	10 .9	1 .17	64 .56	21	2 .11	31 .2	强制通风
IV	23 .3	1 .4	54 .13	21	2 .91	55 .7	自然通风与强制通风
V	3 .7	1 .4	68 .17	21	0 .67	8 .8	自然通风与强制通风
VI	1 .6	2 .1	73 .06	21	0 .23	2 .5	自然通风与强制通风
VII	5 .3	2 .52	76 .13	27	0 .55	5 .5	自然通风与强制通风

2.5 能耗

通风方式不同,调理剂不同,能耗也不同。表 6 表明了采用不同调理剂的污泥堆肥能耗情况。采用强制通风方式,干污泥单位能耗为 2.11 ~ 5.15k W·h/(t·d);采用自然通风与强制通风相结合的方式,干污泥单位能耗为 0.23 ~ 2.91 k W·h/(t·d)。因为温度控制器发生故障,当实验(IV)的中层温度达到设定温度时,温度控制器未能及时开启离心风机,致使堆体中层温度达到 70.9 ℃时温度控制器才开启离心风机,从而造成离心风机长时间连续鼓风,所以,实验(IV)的能耗较高。本研究表明,采用自然通风与强制通风相结合方式的污泥堆肥能耗比采用强制通风方式的污泥堆肥能耗低。采用 Belitsville 通风控制方式,通风方式为负压抽风,强制通风静态朵污泥堆肥的能耗为 5.48 W/t 湿污泥^[11]。本研究的实验(V) ~ (VII)的能耗为 2.5 ~ 8.8 W/t 湿污泥,表明能耗指标相当于国际同类工艺水平。

3 结论

- (1) 采用了 2 种通风方式和 5 种调理剂进行污泥堆肥,除实验(II)外,它们的堆温均能顺利达到设定温度(60 ℃),并能保持一段高温期,堆肥产品的卫生学指标达到了无害化标准(GB7959-87)。
- (2) 同堆体采用正压强制通风的污泥堆肥相比,堆体采用自然通风与正压强制通风相结

- 合方式的污泥堆肥,其堆温上升迅速,能耗更低。正压强制通风能加快堆料含水率的去除和有机质的降解。
- (3) 堆料含水率能极大地影响污泥堆肥过程,堆料的含水率不宜超过 80 %。在污泥堆肥过程,不必对堆料的 pH 值进行调整。
- 参考文献:
- de Bertoldi M,Sequi P,Lemmes B,Papi T.The science of composting .Blackie Academic & Professinal ,1996 .9 ~ 59 .
 - Haug R T.The practical handbook of compost engineering .Lewis Publishers ,1993 .261 ~ 286 .
 - Miller F C,MacGregor S T,Psarianos K Met al .Direction of ventilation in composting wastewater sludge .Journal WPCF ,1982 ,54 (1) :111 ~ 113 .
 - Kuchenrither R D,Martin W J,Smith D G,Williams D W.Design and operation of an aerated windrow composting facility .Journal WPCF ,1985 ,57(3) :213 ~ 219 .
 - 魏源送,樊耀波,王敏健,王菊思.堆肥系统的通风系统控制方式.环境科学,2000 ,21(2) :101 ~ 104 .
 - APHA,AWWA,WPCF .Standard methods for the examination of water and wastewater .18th,ed .APHA,Washington,DC .1992 .
 - Hue N V,J Liu .Predicting compost stability .Compost Science & Utilization ,1995 ,3(2) :8 ~ 15 .
 - 中华人民共和国国家标准,粪便无害化卫生标准(GB7959-87) .
 - 南京农学院主编.土壤农化分析.北京:农业出版社,1980 .
 - Design Manual Number 44 :Composting of municipal wastewater sludges .WWBLDM44 ,US EPA 625/4 - 85/014 ,August 1985 .
 - Miller F C,Finstein M S .Materials balance in the composting wastewater sludge as affected by process control strategy .Journal WPCF ,1985 ,57(2) :122 ~ 127 .