

供氧方式及供氧量对堆肥发酵进程的影响

王伟东^{1,2}, 王小芬¹, 刘建斌¹, 高丽娟¹, 李献梅¹, 崔宗均^{1*}

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094; 2. 黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院, 大庆 163319)

摘要:对于麦秸、牛粪和鸡粪为原料的堆肥系统,通过翻堆和强制通气实现微好氧和好氧处理,测定了各种发酵参数的变化。结果表明,微好氧处理堆体内氧浓度始终小于 1.5%,而通气处理堆体的氧浓度始终在 4% 以上;微好氧处理 50℃ 以上高温期为 23d,比通气处理多 6d,而通气虽然高温期短但后期温度下降慢;微好氧处理的半纤维素含量从发酵开始时的 13.86% 下降到堆肥结束时的 7.99%,纤维素含量由 21.45% 下降到 16.07%,而通气处理最终半纤维素含量为 8.50%,纤维素含量由 21.45% 下降到 18.02%;从各种成分的下降曲线看,微好氧处理为一次下降,而通气处理基本为缓慢的 2 峰曲线。从硝酸根浓度、温度和 C/N 综合评价产物的腐熟度,微好氧处理进入腐熟约经 35d,而通气处理经 45~50d 才进入腐熟。富集培养堆肥样品的试验证明 0.01~0.05mg/L 的微好氧和 50~60℃ 高温是纤维素分解的最适宜条件。

关键词:微好氧;通气;堆肥化;木质纤维素

中图分类号:X705 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2006)03-0594-05

Effect of Oxygen Concentrations on Process of Composting

WANG Wei-dong^{1,2}, WANG Xiao-fen¹, LIU Jian-bin¹, GAO Li-juan¹, LI Xian-mei¹, CUI Zong-jun¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. College of Biological Science and Technology, Heilongjiang August First Land Reclamation University, Daqing 163319, China)

Abstract: The effect of oxygen concentrations was evaluated during the decomposition of some selected organic materials under a controlled condition composting process for a period of 60 days. Mixtures of cattle manure, chicken manure, and wheat straw at a 1:3:6 ratio were used in the experiment. Micro-aerobic treatment was attained by turning of heap at a frequency of one time each two days, while forced air was applied under aerobic treatment. Results showed that concentration of oxygen under micro-aerobic treatment was significantly lower than that of the aerobic treatment by 1.5% in all composting periods. The duration of thermophilic phase more than 50℃ of micro-aerobic treatment was 23 days, and was 6 days more than that of the aerobic. On the other hand, the decreasing of temperature of the aerobic treatment is slow. The concentration of hemicellulose and cellulose of the micro-aerobic treatment was decreased from the 13.86% and 21.45% to 7.99% and 16.07%, respectively. Under the aerobic treatment, only decreased to 8.50% and 18.02%, respectively. A marked compost maturity was noted under the micro-aerobic treatment than under the aerobic treatment as indicated by C/N, NO₃⁻ ion, and temperature profiles. The optimal condition of cellulose degrading was micro-aerobic and high temperature between 50℃ and 60℃ proved by microorganism culture coming from the materials of the thermophilic phase.

Key words: micro-aerobic; forced aeration; composting; lignocellulose

堆肥化是有机固体废弃物实现无害化、减量化和资源化的有效途径。如何加快物料分解,提早堆肥化进程,降低处理成本,而减少养分损失等是堆肥化应用于环境治理和生产优质有机肥亟待解决的重大课题。在好氧堆肥工艺中,两段发酵理论占据主流,一般认为堆肥发酵初期在好氧条件下易分解的含氮化合物、糖类、淀粉等分解,伴随着高温,此过程称一次发酵;而中后期堆温回落,在相对厌氧条件下纤维素等较难分解的化合物缓慢分解,此过程称二次发酵。经过二次发酵,堆体才趋于稳定,进入完熟^[1]。根据该理论,好氧堆肥工艺提倡强行通风,要求每 h 通气量达到堆体体积的 3~4 倍^[2]。但其结果耗费大量能源,将大量含氮、含硫化合物吹散到大气中,不仅引起大气污染,也浪费了宝贵的养分,同时也抑制

了纤维素等难分解物质的分解。笔者等研究堆肥中培养的分解微生物发现,50~60℃ 的高温 and 0.02~0.5mg/L 的微好氧条件下微生物强烈分解木质纤维素,仅 8~10d 可将水稻秸秆分解溶化。从而笔者等认为在堆肥发酵的初期创造微好氧条件,促进纤维素为主的难分解物的分解,可以免去典型的二次发酵,缩短堆肥化时间,减少环境污染,提高堆肥养分的保全率。基于上述观点,本文将报告在微好氧和通气 2 种供氧条件下堆肥的发酵及腐熟进程。

收稿日期:2005-02-01;修订日期:2005-04-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA245031);国家“十五”科技攻关计划项目(2002BA516A03)

作者简介:王伟东(1970~),男,博士,副教授,主要研究方向有机废弃物资源再利用,E-mail: wwdcyy@sohu.com

* 通讯联系人,E-mail: acuijz@cau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 堆制材料

堆肥原料采用新鲜的鸡粪、牛粪及干枯麦秸.鸡粪为中国农业大学养鸡场笼养蛋鸡春季粪便,牛粪为中国农业大学养牛场牛粪便,麦秸取自中国农业大学科技园.将鸡粪、牛粪及切碎成 5cm 左右的麦秸按 1:3:6 重量比例均匀混合,使 C/N 为 25~30,水分含量在 55%~60%.

1.2 微好氧和好氧条件的创建

堆制实验是在中国农业大学科学园内建设的水泥发酵槽内进行.微好氧处理:在宽 1.5m,深 1.0m,长 20m 的发酵槽内堆成堆体上部长 1m、下部长 2m,高 1m.人工翻堆,堆体温度上升到 50℃ 开始翻堆,高温期每 2d 翻堆 1 次,温度下降到 35℃ 后每 5d 翻 1 次.通气处理:在长、宽、高分别为 1.2m 的通气池内装满料,每天利用压力气泵定时从底部通气,通气时间每天 7 次,每次 30min,气流量为 50L/min,在发酵进行到第 15d 和 30d 时翻堆 1 次.堆肥时间从 2004-04-17 开始,2004-06-15 结束.每天测定堆体上(20cm)、中(50cm)、下部(70cm)的温度和堆制现场的环境温度.在发酵前(0d)和发酵过程的第 3、5、10、15、20、25、30、45、60d 采集样品,每次在堆体的上、中、下部分别多点取样,混匀后,一部分直接冰冻保存备用,另一部分样品风干磨碎过 60 目筛,干燥保存备用.待采集全过程样品后,统一进行测定.

1.3 测定项目及方法

堆体氧浓度的测定:在发酵进行到第 14d 时,微好氧处理在翻堆后 1、4、7、18、21、24h,用 HORIBA OM-14 型 DO meter 测定堆体中央 50cm 深度的氧浓度,连续测定 1d.通气处理的将探头埋入 50 cm 深处测定氧浓度,第 1、4、7、18h 时在通气结束后立即测定,第 21、24h 测定在通气结束后 1h 进行.

纤维素、半纤维素和木质素的测定采用范氏洗涤纤维分析法^[3];全碳采用重铬酸钾氧化法测定^[4];可溶性糖和淀粉采用蒽酮比色法测定^[5],硝酸根含量测定采用试纸测定(德国 Merck 日本公司生产的 Merckoquant 牌硝酸根试纸),按照产品使用说明测定.

堆肥样品的微生物培养及需氧特点:在发酵 10d 的高温期取堆肥鲜样品,按 5% 的接种量接种到以滤纸为碳源的蛋白胨纤维素培养液(PCS)中,50℃ 静止培养.等滤纸完全分解后,以培养液为菌种,在直径 4cm 的圆柱形玻璃管内分别设置液体深

度为 1、3、5、7、9cm 创造不同的溶氧浓度,按 5% 体积接种,50℃ 静止培养.在滤纸旺盛分解时用 HORIBA OM-14 型 DO meter 测定培养液中溶氧浓度.PCS 培养液的成分为,蛋白胨,5g/L;纤维素(新华滤纸),5g/L;NaCl 5g/L;CaCO₃,3g/L;酵母粉 1g/L.

2 结果与分析

2.1 微好氧条件与好氧条件下堆体氧浓度

如表 1 所示,通过通气和翻堆的方式达到了氧浓度不同的目的.翻堆后 1h,微好氧处理的堆体氧浓度为 7.7%,到 4h 以后,氧浓度一直维持在 1.5% 的水平,堆体的氧浓度除了在翻堆后的短时间内处于好氧状态,其余时间都处于微好氧状态.而通气处理的氧浓度始终高于 4.0%,微好氧处理和通气处理的堆体的氧浓度差异明显.

表 1 微好氧处理和通气处理堆体的氧浓度¹⁾/%
Table 1 Concentration of oxygen of micro-aerobic and aerated treatment/%

测定时间/h	1.0	4.0	7.0	18.0	21.0	24.0
微好氧	7.7	1.5	1.5	1.5	0.9	0.7
通气	17.4	12.7	16.4	12.5	4.0	4.5

1)微好氧与通气处理测定是在翻堆后把探头埋入开始,通气处理的 1、4、7、18h 是通气刚刚结束时的氧含量,21h 和 24h 是通气结束后 1h 的氧含量.

2.2 堆体温度的动态

微好氧处理和通气处理的温度在发酵后第 3d 都超过了 50℃,二者的变化趋势不同(图 1).微好氧处理堆体温度在 50℃ 以上的高温维持时间为 23d,而通气处理的维持了 17d,前者比后者多出 6d.另外,在发酵进行到 30d 以后,微好氧处理的堆体温度已经降到 40℃ 以下,并且还在继续下降,没有二次升温现象;而通气处理在 30d 后,温度又有所回升,回升持续了 10d 左右,然后下降到与微好氧处理同样的温度水平,出现了二次升温现象.从后面的分析结果来看,其原因可能是由于通气处理氧浓度高,前期堆体内容易分解利用的物质快速分解,而这样的氧浓度不利于纤维素等物质的降解,所以纤维素等难分解物质分解较少,因为很多研究者认为,纤维素在厌氧或者微好氧的状态下才能分解^[6].后期温度的升高可能是纤维素物质分解发热造成的,而微好氧处理纤维素的降解在发酵前期已经大量完成,后期没有纤维素大量分解而集中发热现象.

2.3 淀粉与可溶性糖的变化

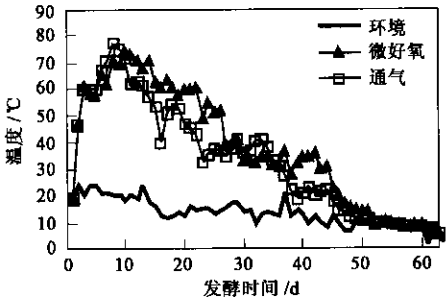


图 1 微好氧处理与通气处理发酵过程中堆体的温度变化
Fig.1 Change of temperature of microaerobic and aerated treatment during composting

在发酵过程中,2 种处理下淀粉和可溶性糖的变化有明显差异(图 2). 通气处理的淀粉含量始终比微好氧处理低,这可能因为通气处理供氧充足,促进淀粉分解. 2 种处理可溶性糖含量在发酵前期(15d 前)基本没有差异,但是发酵中后期好氧处理高于微好氧处理,原因可能是好氧处理的淀粉分解量高于微好氧处理,从而产生的可溶性糖量高,同时从纤维素的分解情况可知,通气的好氧处理后期纤维素分解量高于微好氧处理,这也可以造成可溶性糖含量高.

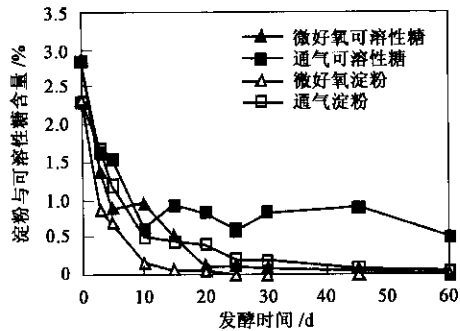


图 2 微好氧和通气处理在发酵过程中可溶性糖和淀粉含量的变化
Fig.2 Concentration of soluble sugar and starch of microaerobic and aerated treatment during composting

2.4 半纤维素、纤维素、木质素的变化

半纤维素、纤维素和木质素等难分解物质的分解是堆肥化进程中的关键环节. 微好氧条件下,半纤维素一直处于旺盛的分解状态下,尤其在发酵第 5d 至 20d,分解最快. 半纤维素含量从发酵开始时的 13.86% 下降到堆肥结束时的 7.99%. 通气处理的半纤维素分解主要发生在前 20d,之后半纤维素分解很少,最终的含量为 8.5%,高于微好氧处理(图 3A).

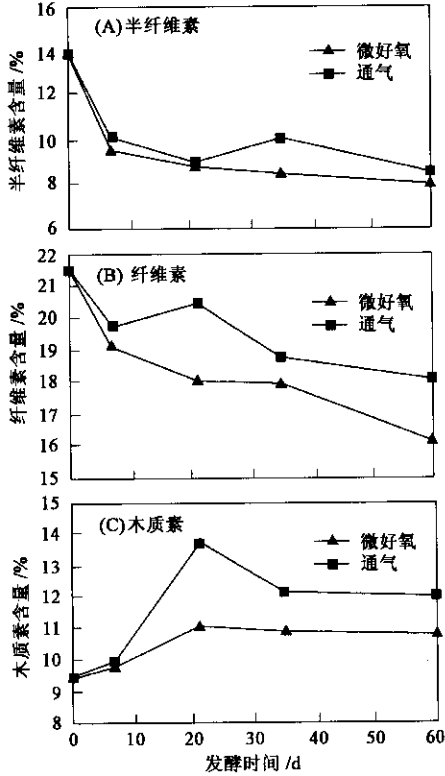


图 3 微好氧和通气处理在发酵过程中半纤维素(A)、纤维素(B)和木质素(C)含量的变化
Fig.3 Change of concentration of hemicellulose (A), cellulose (B) and lignin (C) of microaerobic and aerated treatment during composting

在微好氧条件下,纤维素的分解从发酵开始,一直到第 35d,纤维素快速分解,这个时期正是高温期,说明在微好氧和 50~60℃ 高温是纤维素分解的适宜条件,高温期后纤维素分解较少,最终纤维素的含量由发酵开始时的 21.45% 下降到结束时的 16.07%. 通气处理纤维素的分解,在 20d 以前,纤维素含量由开始的 21.45% 下降到 20.46%,然后在 20~60d 又有一个纤维素分解高峰,可能原因是,第一次分解主要是由细菌在发生作用,因为研究表明,在高温期对发酵起主要作用的微生物是嗜热细菌^[7,8],但是由于氧含量高,造成纤维素分解不充分;发酵中后期,由于温度的下降和含水量的降低,一些真菌和放线菌增殖,开始分解纤维素类物质,产生热量,从而造成二次升温. 即第 1 次高温期主要是细菌发挥作用降解纤维素类物质,第 2 次高温主要由真菌和放线菌引起,试验的现象也表明,通气处理发酵后期堆体内部出现大量白色菌丝,而且有真菌和放线菌特有的味道. 由于微好氧条件下纤维素类物质一直持续分解,所以没有后来的二次升温现象.

最终微好氧处理的纤维素分解率高于通气处理(图 3B).

通气条件下木质素的含量在发酵前后分别为 9.47% 和 12.02%, 而微好氧条件下分别为 9.47% 和 10.8%, 分解量高于曝气处理(图 3C). 木质素的含量增加是因为木质素很少分解, 而其它物质的分解量很大, 造成木质素的含量增加. 已有很多研究者证明木质素在自然条件下很难分解和基本不分解^[9]. 在堆肥化过程中, 木质素不分解对于将来堆肥应用于农业生产, 改善土壤理化性状具有积极的意义.

2.5 C/N 比的变化

堆肥材料的原材料的 C/N 比是评价堆肥腐熟度的主要指标之一, 一般认为如果堆肥原料的 C/N 在 25 以上时, C/N 下降到 16 左右堆肥已经腐熟. 材料开始的 C/N 比为 25.2:1, 随着发酵的进行, C/N 逐渐下降. 微好氧处理在 35d 时下降到 18 以下, 45d 时 C/N 下降到 17 左右, 此时已经基本腐熟, 60d 试验结束时的 C/N 为 15.7, 已经完熟. 而好氧处理的 C/N 在 45d 时为 18.6, 在 60d 时也在 18.0, 因此, 从 C/N 的角度看, 微好氧处理比好氧处理的腐熟程度要高, 并且腐熟的时间提前.

表 2 堆肥发酵过程中 C/N 比变化						
Table 2 Changes of C/N during composting						
时间/d	0	10	20	30	45	60
微好氧	25.2	20.3	18.9	18.1	17.4	15.7
通气	25.2	19.7	18.9	17.9	18.6	18.0

2.6 硝酸根含量的变化

在堆肥化过程中, 氨态氮逐渐减少, 最终消失; NO₃⁻ 浓度随着发酵进程而增加, 可以作为堆肥腐熟度的指标^[2]. 2 种处理的确态氮变化趋势是, 在发酵进行到 10d 左右时减少到几乎为 0, 之后开始逐渐增加, 但是之后的趋势不同. 通气处理发酵进行到 25、30 和 35d 时, 硝酸根含量分别为 1.0、2.5 和 4.0mg/g, 而微好氧处理的硝酸根含量在 25d 时已经达到 6.0mg/g(图 4), 一般认为硝酸根含量达到几 mg/g 时已经腐熟^[2]. 结合 2 种工艺下的温度变化, 微好氧处理在发酵进行到 35d 左右时, 温度已经降到 30℃ 左右, 而通气处理在 45d 左右才降到 30℃ 左右. 同时在 35d 时, 微好氧处理的 C/N 比从开始时的 25.2 左右下降到 18 以下. 因此, 从腐熟度角度讲, 在 35d 时微好氧处理已经基本腐熟, 而通气处理腐熟时间推迟 10d 以上.

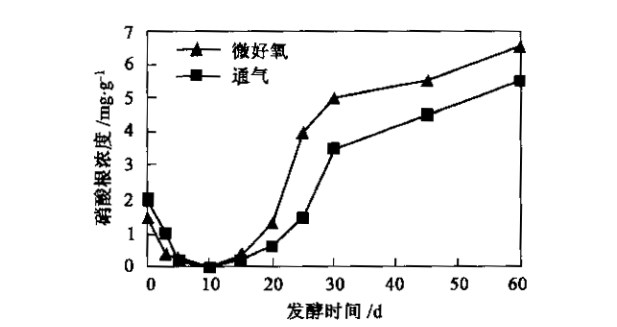


图 4 微好氧和通气处理在发酵过程中 NO₃⁻ 浓度的变化
Fig.4 Change of NO₃⁻ concentration of microaerobic and aerated treatment during composting

2.7 堆肥材料培养微生物的需氧特点

把堆肥高温期的材料 50℃ 高温静止培养后, 7cm 深度处理在发酵后 48h 滤纸已经全部分解, 5cm 和 9cm 处理在 60h 后滤纸也全部分解, 而 1cm 处理时始终没有分解(表 3). 5~9cm 处理的液体溶氧量都处在 0.01~0.04 mg/L 的微好氧条件下, 从而间接的证明了堆肥发酵过程微好氧条件和高温是木质纤维素类物质分解的适宜条件. 在微好氧处理中, 堆体的氧浓度正处于微好氧的条件下, 所以, 木质纤维素类物质的分解率要高于好氧状态下的通气处理.

表 3 不同深度培养液的 DO 值/mg·L ⁻¹					
Table 3 Concentration of dissolved oxygen under different liquid deeps/mg·L ⁻¹					
时间/h	1cm	3cm	5cm	7cm	9cm
0	7.07	5.25	5.32	4.04	3.30
6	0.65	0.085	0.02	0.017	0.015
18	0.14	0.075	0.02	0.02	0.015
28	0.06	0.035	0.02	0.01	0.01
36	0.04	0.04	0.015	0.00	0.00
48	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
60	0.07	0.04	0.03	0.04	0.02
72	0.11	0.03	0.02	0.045	0.015
123	0.10	0.09	0.02	0.03	0.02

3 讨论

“好氧堆肥工艺理论”认为堆肥发酵过程是多种微生物频繁演替的过程, 微生物的繁殖代谢和群落的演替影响有机物的分解和堆肥的发酵进程^[1,2,7,8,10], 并且, 难分解物的木质纤维素的分解主要靠后期的放线菌和真菌, 细菌的作用相对被忽视. 近年的研究表明由细菌组成的复合系具有强烈的纤维素分解能力^[11], 并且细菌耐高温性强, 好氧

和厌氧的种类丰富,所以应该重新评价细菌对难分解物质的分解作用。

纤维素类物质分解难,它的分解决定堆肥的最终发酵进程.纤维素的分解需要多种微生物的协同作用才能完成,其分解是氧化过程,需要氧气,而纤维素分解酶在分解纤维素时需要局部的厌氧条件^[6],这样,微生物的生长需氧与纤维素分解的厌氧形成一对矛盾.如果把氧浓度调整到一定范围,兼顾二者的矛盾,就可能实现多种需氧特性微生物协同下的纤维素高效分解,微好氧条件正是合适的氧浓度.在堆体氧浓度小于2.0%的微好氧条件和50~60℃左右的温度是纤维素类物质生物降解的适宜条件,这个条件解决了纤维素分解微生物生长需氧及纤维素酶分解纤维素厌氧的矛盾,从而在整个堆肥化过程中纤维素类物质持续分解,可一次完成彻底分解,免去二次发酵.而如果堆肥化过程中氧浓度过高,会造成前期容易分解的物质快速分解,但是过高的氧含量抑制了纤维素类物质的分解,当易分解物质分解完后,堆体温度回落慢,在好氧的真菌和放线菌的作用下,纤维素等难分解物缓慢再分解,即进入二次发酵阶段,堆肥腐熟时间拉长。

关于木质素的分解问题,有的研究者认为木质素可以被微生物高效分解^[12],而有的人认为木质素在自然状态下几乎不分解^[9].本研究的结果表明,在堆肥化过程中,木质素很少分解.堆肥原料中木质素不分解,对于农业生产却有积极的意义,这些木质素回到土壤后,可形成腐殖质而改良土壤的理化性状,增加土壤肥力,对于土壤改良意义巨大。

4 结论

在堆体氧浓度小于1.5%的微好氧条件下,与

传统好氧堆肥过程相比,堆肥材料中的木质纤维素类物质的分解量和分解速度明显高于好氧处理,腐熟时间提前,可以免去典型的二次发酵,实现堆肥化过程的一段发酵。

参考文献:

- [1] Haug R T. The practical handbook of compost engineering [M]. Florida: Lewis Publishers. 1993, 307~335.
- [2] 有机质资源化推进会议编. 有机废弃物资源化大事典 [M]. 东京:农山渔村文化协会,1997.7~50.
- [3] Watanabe A, Katoh K, Kimura M. Effect of Rice Straw Application on CH₄ Emission from Paddy Field [J]. Soil Sci. Plant Nutr., 1993, 39(4): 707~712.
- [4] 徐静安. 分析测试方法[M]. 北京:化学工业出版社,2000, 376~379.
- [5] 何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术[M]. 北京:农业出版社,1985.144~150.
- [6] Schwarz W H. The cellulosome and cellulose degradation by anaerobic bacteria [J]. Appl. Microbiol. Biotechnol., 2001, 56: 634~649.
- [7] Khalil A I, Beheary M S, Salem E M. Monitoring of microbial population and their cellulolytic activities during the composting of municipal solid waste [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2001, 17: 155~161.
- [8] 冯明谦,刘德明. 滚筒式高温堆肥中微生物种类数量的研究 [J]. 中国环境科学,1999,19(6):490~492.
- [9] Iiyama K, Stone B A, Macauley B J. Compositional changes in compost during composting and cropping of *Agaricus bisporus* [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1994, 60: 1538~1546.
- [10] Tiquia S M, Wan J H C, Tam N F Y. Microbial population dynamics and enzyme activities during composting [J]. Compost Science and Utilization, 2002, 10(2): 150~161.
- [11] 崔宗均,李美丹,朴哲,等. 一组高效稳定纤维素分解菌复合系 MC1 的筛选及功能[J]. 环境科学,2002,23(3):36~39.
- [12] Singh A, Sharma S. Effect of microbial inocula on solid waste composting, vermicomposting and plant response [J]. Compost Science and Utilization, 2003, 11(3): 190~199.