

蚯蚓堆肥处理剩余污泥混合有机垃圾的效率研究

陈大志¹, 刘顺会^{2*}, 林秋奇³, 吴 艳¹

(1.广东省水环境污染控制重点实验室, 广州 510440; 2.广东药学院生命科学与生物制药学院, 广州 510006; 3.暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘 要:为了研究基质堆料高度和高密度接种条件对蚯蚓堆肥处理有机垃圾混合剩余污泥时蚯蚓生物量及其堆肥效率的影响,共设 6 个处理进行试验,按接种密度-堆料高度表示,分别为:1/10-10 cm 组、1/10-15 cm 组、1/15-10 cm 组、1/15-15 cm 组、1/20-10 cm 组、1/20-15 cm 组。试验结果表明,在堆料高度相同时,蚯蚓生物量与其接种密度呈显著的负相关关系,但接种密度对蚯蚓堆肥效率的影响有限,只有在 1/10 组同 1/15 组或 1/20 组比较时表现出显著差异,而后两个组别之间差异不显著;在接种密度相同时,堆料高度对蚯蚓堆肥效率的影响不显著,而对蚯蚓生物量的影响可能存在一个密度临界点(1/15),在此密度附近,堆料高度对蚯蚓生物量的影响较显著,呈显著正相关关系,而在此密度以上或以下,堆料高度的影响不显著。从产业应用的角度,综合考虑蚯蚓维持种群繁衍的再生能力以及混合污泥的堆肥效率这两个因素,赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)处理有机垃圾混合剩余污泥的最佳接种密度为 1/15,堆料高度为 15 cm。

关键词:蚯蚓堆肥;有机垃圾;剩余污泥;接种密度;堆料高度

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)06-1244-06

Efficiency of Vermicomposting on Organic-Waste-Mixed Municipal Sludge

CHEN Da-zhi¹, LIU Shun-hui^{2*}, LIN Qiu-qi³, WU Yan¹

(1.Guangdong Key Laboratory of Water Pollution, Guangzhou 510440, China; 2.School of Life Sciences and Biopharmacology, Guangdong Pharmaceutical College, Guangzhou 510006, China; 3. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The effects of medium stack height and high inoculum density on earthworm's biomass and efficiency of vermicomposting were investigated in *Eisenia foetida* vermicomposting on organic-waste-mixed municipal sludge. Combining medium stack height and earthworm inoculum density (mass ratio, worm wet mass/sludge dry mass), six treatments, i.e., 1/10-10 cm, 1/10-15 cm, 1/15-10 cm, 1/15-15 cm, 1/20-10 cm and 1/20-15 cm, respectively, were set in the experiment. Results showed that, under the same medium stack height, the biomass of earthworms was negatively correlated with their inoculum density significantly. However, the effect of inoculum density on the efficiency of vermicomposting was limited. Specifically, there was significant difference in the efficiency of vermicomposting between high-density group (1/10) and low-density ones (1/15 and 1/20), while insignificant between the latter two groups, 1/15 and 1/20. Under the same inoculum density, the effect of medium stack height on the efficiency of vermicomposting was insignificant, whereas on the earthworm's biomass, there was a critical point of inoculum density (1/15) where the earthworm's biomass was positively correlated with medium stack height significantly, while a lot above or below this density point, medium stack height had no significant effect. In the view of industrial application, there is a trade-off between the reproductive ability for the earthworm population and the efficiency of vermicomposting, and thereby the inoculum density of 1/20 and the medium stack height of 15 cm are possibly the optimum parameters for the vermicomposting of *Eisenia foetida* on the organic-waste-mixed municipal sludge.

Keywords: vermicomposting; organic waste; municipal sludge; inoculum density; medium stack height

收稿日期:2011-12-23

基金项目:国家自然科学基金(31170437);广东省水环境污染控制重点实验室开放基金(2011001)

作者简介:陈大志(1966—),男,高级工程师,主要从事环境污染控制方面的研究。E-mail:cdz99998@163.com

* 通讯作者:刘顺会 E-mail:lishhsl00@163.com

城市剩余污泥由于含水率高、脱水困难,其较高的有机质含量又使得集中堆放容易发臭、生蛆,污染环境,成为城市运营中排放的较难处理和处置的有机固体废弃物。随着污水处理覆盖面的扩大以及处理标准的提高,剩余污泥的排放量正与日俱增,有些地方甚至出现了“污泥围城”的严峻状况。近年来,国内外对蚯蚓处理城市剩余污泥的研究开展了大量的工作,但是这些研究主要集中在处理污泥时蚯蚓的生长条件、繁殖情况以及污泥理化性质、营养物质和重金属含量的变化等方面^[1-6],对制约这一技术进入产业化应用的瓶颈环节的研究却鲜有报道。从产业应用的角度来说,蚯蚓作为反应器的主体,其生物量越大则“吞吐”能力越强,综合考虑蚯蚓种群的再生产能力以及污泥的堆肥处理效率,在此基础上尽可能高的维持蚯蚓的反应密度是决定这一技术应用成败的关键环节^[7]。我们前期进行了利用餐厨、绿化等有机垃圾提高城市剩余污泥的蚯蚓堆肥效率的试验,结果表明,在保证剩余污泥占主体(70%)的情况下,餐厨和绿化垃圾掺入比例为15%:15%时,蚯蚓堆肥的效率达到最高。随后,按此比例作为堆肥基质配方,进行了不同接种密度蚯蚓堆肥处理有机垃圾混合剩余污泥的比较研究,结果表明,蚯蚓基质质量比在1/20的接种密度不仅能够满足赤子爱胜蚓种群的再生产能力,同时也具有较高的基质降解速率和蚓粪生产速率,特别是较高的单位体积堆肥效率,因此确定1/20是赤子爱胜蚓处理有机垃圾混合剩余污泥的最佳接种密度。

本文基于上述研究结果,并进一步考虑产业化应用所要达到的集约化、高效率等目标,通过试验探讨不同堆料高度、不同高密度下蚯蚓堆肥处理有机垃圾混合剩余污泥的效率以及堆肥过程对蚯蚓生长、繁殖的影响,以便为高效蚯蚓生物反应器的设计提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

蚯蚓品种采用“大平二号”蚯蚓(*Eisenia foetida*),由本实验室蚯蚓繁殖基地提供。餐厨垃圾(含水率83.4%、总有机碳505.6 g·kg⁻¹、全氮38.4 g·kg⁻¹)取自广东药学院学生食堂;绿化垃圾(含水率74.1%、总有机碳402.1 g·kg⁻¹、全氮9.9 g·kg⁻¹)取自广州大学城绿化垃圾堆放点;剩余污泥(含水率80.5%、总有机碳287.4 g·kg⁻¹、全氮29.6 g·kg⁻¹)取自广州市沥滘生活污水处理厂。

1.2 试验方法

1.2.1 基质处理、接种密度和堆料高度

新鲜餐厨垃圾经分拣、脱盐后利用食物粉碎机破碎至5 mm以下,混合均匀备用,无需发酵。绿化垃圾经粉碎机破碎至1 cm左右,混合均匀备用。新鲜污泥使用前要反复搅拌使有毒气体排尽并保证物料均质。3种食物基质(干重)按剩余污泥70%、餐厨垃圾15%、绿化垃圾15%的比例,采用搅拌机混合均匀待用。为了更精确地探讨高密度情况对蚯蚓堆肥效率的影响,本研究选择了3个接种密度,按接种密度=蚯蚓质量(鲜重)/基质质量(干重),分别取1/10、1/15和1/20,其中1/10和1/20两个密度组在我们前期的研究中能够较好平衡蚯蚓再生产能力和单位体积堆肥效率这一对矛盾,特别是1/10组,其单位体积堆肥效率要显著高于1/20组(基质降解总量和蚓粪生产总量分别为后者的1.59倍和1.56倍),虽然该组在培养期内(7周)不能实现蚯蚓数量上的加倍(如果蚓茧折合蚯蚓数量按每个茧1条蚯蚓计算则为初始蚯蚓数量的1.7倍),但在质量上却能够加倍(2.02倍),因此1/10组应该可以作为蚯蚓高接种密度的候选。

为了营造适宜蚯蚓生活的环境,需要在蚯蚓和食物基质之间构造缓冲带^[8],本试验采用经充分淋洗并沥干后的蚯蚓粪(含水率74.2%)作为缓冲基质。因此,上述培养基质包括食物基质(即混合污泥,含水率79.1%)和缓冲基质两个部分,其中食物基质的加料多少决定于接种的蚯蚓密度,而与堆肥效率无关,为了在保证食物充足的情况下尽量多的提供给蚯蚓适宜的生存空间,本研究所有组别加入的混合污泥量(干重)都等于初始接种蚯蚓质量(鲜重)的2倍。另外,基质堆料高度也是现实生产实践中必须考虑的一个重要参数。通常,食物基质一般呈平面分布,从蚯蚓反应的角度来看,食物基质与蚯蚓的接触面积越大,则越有利于提高其堆肥效率^[7]。在蚯蚓接种密度不变时,堆料高度越低,食物基质与蚯蚓接触的面积就会越大,则其堆肥效率应该越高,但堆料高度过低会导致蚯蚓的生存空间过于狭小,不利于其生长和繁殖,又会反过来影响其堆肥效率。为了探讨基质堆料的高度不同对蚯蚓堆肥效率的影响,本研究设计了2个堆料高度,分别为10 cm和15 cm。

本研究同时考察接种密度和堆料高度两个指标,共设6个处理,按接种密度-堆料高度表示,分别为:1/10-10 cm组、1/10-15 cm组、1/15-10 cm组、1/15-15 cm组、1/20-10 cm组、1/20-15 cm组。

1.2.2 蚯蚓培养

在尺寸为 60 cm×40 cm×20 cm, 侧面四周具透气孔、底部有透水孔的塑料框架底垫 50 目细纱网, 在其上添加基质和蚯蚓, 所有组别保持初始堆肥总尺寸为 20 cm×20 cm×10/15 cm, 并用绳索扎好上口, 防止蚯蚓逃逸。所有接种蚯蚓都来自于同一批次约 20 d 龄幼蚓, 按上述组别先将不同密度的蚯蚓接种到缓冲基质蚯蚓粪里面, 平衡 48 h 后投加相应蚯蚓 2 倍质量(干重)的混合污泥基质, 并用蚯蚓粪稍稍掩埋, 待 70% 混合污泥转化为蚓粪时, 再覆盖添加同样质量的新的食物基质。当蚯蚓粪增加到一定程度时, 通过扩大堆肥总尺寸来保持堆料高度不变。另外, 为了消除蚯蚓代谢废物影响蚯蚓的生长和繁殖, 在每次添加食物基质前喷雾洗涤培养基质, 并确保培养框架内不积水。如此反复, 直至培养结束。

每个组别设 3 个重复, 暗室恒温培养(25±1)℃, 整个试验周期为 7 周。试验期间, 定期查看, 使蚯蚓处于最佳生存状态。

1.3 分析测量与数据处理

1.3.1 蚯蚓生物量和堆肥效率的计算

试验结束后, 去除未被分解的混合基质, 将蚯蚓、蚓茧、蚓粪分离。蚯蚓水洗后用滤纸吸干水分称重(鲜重, 不进行消化道残余物校正); 蚯蚓计数包括蚓茧数、成蚓数、幼蚓数, 每个蚓茧按 1 条蚯蚓计算; 剩余基质、蚓粪称重(干重); 培养时间以天计。蚯蚓生物量和堆肥效率按下列公式计算:

混合基质降解速率(单位 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)=(加入的基质总量-未降解基质量)/(平均蚓重×培养时间), 其中平均蚓重=(实验开始时蚯蚓总重+实验终止时蚯蚓总重)/2^[8]。

蚓粪生产速率(单位 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)=蚓粪净增加量/(平均蚓重×培养时间), 其中平均蚓重同上^[8]。

蚯蚓日增重倍数(单位 d^{-1})=(实验终止时蚯蚓总重-实验开始时蚯蚓总重)/(实验开始时蚯蚓总重×培养时间)^[9]。

1.3.2 数据分析

采用 SPSS 13.0 统计软件, 对各试验数据进行单因素方差分析(ANOVA), 在 95% 的置信度下对不同处理之间的差异性进行比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同接种密度和堆料高度对蚯蚓生物量的影响

在为期 7 周的试验期间, 各组蚯蚓均没有死亡现象。本试验选取蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数评价蚯蚓生物量的增长情况。具体数据见表 1。数据表明, 在实验结束时, 不同处理各组蚯蚓生物量都出现了不同程度的增长, 而且反映出比较明确的趋势, 即接种密度越小或堆料高度越高, 则蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数越大。具体来说, 按照蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数排序为 1/10-10 cm 组<1/10-15 cm 组<1/15-10 cm 组<1/15-15 cm 组<1/20-10 cm 组<1/20-15 cm 组。1/10-10 cm 组蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数最低, 分别为 1.735、0.015 d^{-1} , 而 1/20-15 cm 组蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数最高, 分别达到 2.617、0.033 d^{-1} 。

研究数据发现, 除了 1/10-10/15 cm 两个组在整个试验周期内不能质量加倍(分别为 1.735、1.882 倍)外, 其他各组 7 周内均能达到初始质量的 2.1~2.6 倍。同一接种密度比较, 除了 1/15-10/15 cm 两组间蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数具有显著差异外, 其他同密度两组间都没有显著性差异; 而相同堆料高度的 3 个不同密度组间比较, 不论是 10 cm 组还是 15 cm 组间其蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数均存在显著性差异。总之, 蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数

表 1 不同接种密度和堆料高度对蚯蚓生物量的影响

Table 1 Effects of different densities of earthworms and medium stack height on earthworm's biomass

组别	蚯蚓质量(鲜重)/g		蚯蚓增重倍数(7 周)	蚯蚓日增重倍数/ d^{-1}
	实验开始时	实验终止时		
1/10-10 cm	122.04±14.11	211.74±7.65	1.735±0.059a	0.015±0.001a
1/10-15 cm	183.06±11.02	344.51±18.66	1.882±0.083a	0.018±0.002a
1/15-10 cm	81.36±12.30	173.05±11.21	2.127±0.063b	0.023±0.001b
1/15-15 cm	122.04±9.34	283.50±20.47	2.323±0.089c*	0.027±0.002c*
1/20-10 cm	61.02±8.22	150.72±18.75	2.470±0.085c	0.030±0.002c
1/20-15 cm	91.53±12.20	239.53±21.32	2.617±0.105c*	0.033±0.003c*

注: 字母与数值顺序相同, 由低到高排序; 同列字母相同者表示数值相邻两组间不存在显著差异($P>0.05$); 同列字母不同者表示各组间存在显著差异($P<0.05$); * 表示同列相同字母组间存在显著差异($P<0.05$); 不同列字母间无比较意义。下同。

的大小似乎很大程度上决定于蚯蚓的接种密度而与堆料高度的关系不太确定。不过接种密度为 1/15 的两组间蚯蚓生物量的显著差异关系似乎说明,堆料高度对蚯蚓生物量的影响可能存在一个密度临界点,即在极高密度(如 1/10)或较高密度(如 1/20)接种条件下,蚯蚓生物量主要决定于接种密度;而在中高密度(如 1/15)情况下,堆料高度对蚯蚓生物量的影响较显著。造成这种现象的原因可能是,在极高密度下,由于繁殖率低,蚯蚓生物量主要决定于其个体的摄食生长,而蚯蚓的摄食活动一般不会受到堆料高度太大的影响;而在相对较低密度时,除个体生长外,蚯蚓的生物量还很大程度上取决于其繁殖速率,而繁殖速率一般与堆料高度有很大的正相关关系。不过,当密度下降到 1/20 时,蚯蚓的生存空间可能已得到很大改善,因此,堆料高度的进一步上升并没有对其繁殖速率产生显著影响;而在 1/15 的接种密度下,其繁殖所需的空間要求可能刚好处于临界点,如果此时增加堆料高度可能大大改善蚯蚓的繁殖状况,从而显著增加其生物量。

从表 1 还可以看出,1/15-15 cm 组与 1/15-10 cm 组比较,其蚯蚓增重倍数(7 周)和日增重倍数均存在显著差异,但前者与 1/20-10 cm 组比较,其差异均不显著,这进一步表明,可以通过增加堆料高度来提高蚯蚓的接种密度而不致显著影响蚯蚓生物量的增长。因此,综合而言,6 个组别中,1/15-15 cm 组可能是能够平衡蚯蚓接种密度和生物量的最优方案。

2.2 不同接种密度和堆料高度对蚯蚓堆肥效率的影响

尽管混合基质的配比、适口性和营养价值在试验各组中都完全相同,但由于各组蚯蚓的接种密度以及基质的堆料高度不同,导致蚯蚓的生存环境、种间竞争大小也各不相同,因而可能会影响蚯蚓日常的摄食、交配等行为^[10],从而最终影响蚯蚓的生长和繁殖,而蚯蚓的生物量多寡及日常的摄食活力对混合基质取食和降解的速度及效率可能会产生较大不同^[11]。蚯

蚓对混合基质的降解效率可以用混合基质的降解速率和蚓粪生产速率来定量研究^[8],具体数据见表 2。数据显示,混合基质的降解速率和蚓粪生产速率的排序呈现出相当的一致性,即接种密度越低或堆料高度越高,单位时间内、单位质量的蚯蚓对混合基质的降解量越大,产生的蚯蚓粪也相应越多,具体表现为 1/10-10 cm 组<1/10-15 cm 组<1/15-10 cm 组<1/15-15 cm 组<1/20-10 cm 组<1/20-15 cm 组。但是,统计分析表明,不同处理组别蚯蚓对混合基质的降解效率差异不是太大。6 个组别中,密度相同但堆料高度不同组间比较,其混合基质降解速率和蚓粪生产速率差异均不显著;堆料高度相同但密度不同组间比较,除 1/10 密度组与其他 2 个组别存在显著性差异外,其他 2 组间比较则差异不显著。总体而言,除 1/10 密度对应的 2 个组别由于其相应的混合基质降解速率和蚓粪生产速率与其他组别比较均存在显著性差异外,其他 4 个组别间两两比较均无显著差异。

上述数据分析表明,如果单考虑蚯蚓对混合基质的降解效率,则蚯蚓的接种密度只要保持在 1/15 左右即可,而对基质堆料高度则没有最优要求。不过,从产业应用的角度,考虑到单位空间的堆肥效率,15 cm 的堆料高度可能是最优之选,因为 1/15-15 cm 组比 1/15-10 cm 组的每框基质降解总量要高出 60%(1.6 倍)。

3 讨论

在利用蚯蚓堆肥处理剩余污泥的生产实践中,必须平衡两个方面的要求:一是维持蚯蚓自身种群的连续性所必需的生物量增长率,另一个则是蚯蚓的堆肥效率,而后者在实际蚯蚓生物反应器的设计中常常要考虑单位空间的效率。因此,这两个要求有时是相互对立的^[7],具体来说,如果维持较高的蚯蚓生物量增长率,则接种密度就不能太高,基质堆料高度也不能太低,但如此以来,单位空间的堆肥效率就会降低,反之

表 2 不同接种密度和堆料高度对蚯蚓堆肥效率的影响

Table 2 Effects of different densities of earthworms and medium stack height on efficiency of vermicomposting

组别	混合基质降解总量/kg·框 ⁻¹	混合基质降解速率/mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹	蚓粪生产总量/kg·框 ⁻¹	蚓粪生产速率/mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹
1/10-10 cm	7.162±0.462	875.8±12.0a	4.155±0.167	508.1±6.8a
1/10-15 cm	11.361±0.515	879.2±14.4a	6.591±0.206	509.9±7.6a
1/15-10 cm	5.595±0.489	897.7±13.7b	3.252±0.188	521.8±7.1b
1/15-15 cm	8.955±0.547	901.3±16.3b	5.201±0.244	523.5±8.1b
1/20-10 cm	4.710±0.569	907.9±18.7b	2.741±0.209	528.3±8.9b
1/20-15 cm	7.370±0.457	908.6±12.4b	4.272±0.201	528.7±6.3b

亦然。一般而言,蚯蚓接种密度越高,其种间竞争就会越激烈,这会导致蚯蚓长期处于紧张、应激的状态而不利其生长和繁殖;同时,种群密度越大,排泄物堆积也越快,导致蚯蚓的生存环境很快恶化^[10-12];再者,由于蚯蚓交配的持续时间较长,达2~3 h,在此期间最怕受到干扰,蚯蚓/基质比越大,蚯蚓交配所必需的环境稳定就越难满足,从而越不利于蚯蚓的繁殖^[7,10]。基质的堆料高度则从蚯蚓的摄食、栖息特别是交配等行为所必需的空间纵深的角度来影响蚯蚓的生长和繁殖。总之,不论是接种密度还是堆料高度,其对蚯蚓日常的摄食活力、交配能力以及繁殖潜力均具有深刻的影响,而这些行为能力又直接影响蚯蚓生物量的增长率以及蚯蚓对食物基质的消解效率。

本研究的结果表明,赤子爱胜蚓堆肥处理有机垃圾混合剩余污泥的接种密度保持在1/15、基质堆料高度为15 cm时能够在培养时间内(7周)使其生物量加倍,同时维持较高的堆肥效率,特别是单位体积的堆肥效率。到目前为止,还没有发现对基质堆料高度的相关研究,因此本研究无法进行文献比较。有关蚯蚓接种密度的报道也不多,就现有的文献跟踪来看,1/15这一接种密度虽然比较高,但还是接近其他学者的研究结果,因为本试验是以质量比作为接种密度,这一比值会随着食物基质的不断补充以及蚯蚓生物量的增长而发生变化(到试验结束时,各组蚯蚓密度分别变化到1/23~1/26之间);而其他学者^[13-15]则是以蚯蚓数量为密度基准,而且在整个试验过程中不补充食物基质,因此随着食物基质的消解和蚯蚓的生长和增殖,实际的蚯蚓密度将会逐渐增大,比如仓龙等^[15]认为,100 g(干重)物料中接种8条赤子爱胜蚓是最佳接种密度,但到试验终点时,蚯蚓生物量可达到 $3.3\sim 5.8\text{ g}\cdot 100\text{ g}^{-1}$ 物料,即质量比为1/30~1/17。

本文使用质量比作为蚯蚓接种密度的另外一个原因是,这一比值在生产实践中很容易测量,也比较容易控制,因为只要知道蚯蚓生物量的增长率,我们就可以通过补充食物基质和清除蚯蚓粪的方式来控制蚯蚓的密度。

4 结论

(1)在堆料高度相同时,蚯蚓增重倍数(7周)和日增重倍数均与蚯蚓接种密度呈显著的负相关关系;在接种密度相同时,堆料高度对蚯蚓生物量的影响可能存在一个密度临界点(1/15),在此密度附近,堆料高度对蚯蚓生物量的影响较显著,呈正相关关系,而

在此密度以上或以下,堆料高度的影响不显著。

(2)接种密度越低或堆料高度越高,单位时间内、单位质量的蚯蚓对混合基质的降解量越大,产生的蚯蚓粪也相应越多。接种密度相同时,堆料高度对混合基质降解速率和蚓粪生产速率的影响不显著;堆料高度相同时,1/10密度组的堆肥效率显著小于1/15组和1/20组,而后两组间比较则差异不显著。

(3)从产业应用的角度,综合考虑蚯蚓维持种群繁衍的再生产效率以及混合污泥的堆肥效率这两个因素,赤子爱胜蚓处理有机垃圾混合剩余污泥的最佳接种密度为1/15,堆料高度为15 cm。

参考文献:

- [1] Hartenstein R, Hartenstein F. Physico-chemical changes affected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida*[J]. *Environmental Quality*, 1981, 10(3):377-382.
- [2] Elvira C, Sampedro L, Dominguez J, et al. Vermicomposting of waste water sludge from paper-pulp industry with nitrogen rich materials[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(3-4):759-762.
- [3] Khwairakpam M, Bhargava R. Vermitechnology for sewage sludge recycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2-3):948-954.
- [4] 陈学民, 王惠, 伏小勇, 等. 赤子爱胜蚓处理污泥对其性质变化的影响[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6):1422-1425.
CHEN Xue-min, WANG Hui, FU Xiao-yong, et al. Effect of vermicomposting using *Eisenia foetida* on properties of sewage sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(6):1421-1425.
- [5] 高莉红, 周文宗, 张 璐, 等. 城市污泥的蚯蚓分解处理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3):788-793.
GAO Li-hong, ZHOU Wen-zong, ZHANG Luo, et al. Development of earthworm as a potential municipal sewage sludge disposal source[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3):788-793.
- [6] 李 明. 高温堆肥与蚯蚓堆肥对城市污泥重金属形态的影响[J]. 环境工程学报, 2008, 2(10):1407-1412.
LI Ming. Effects of high-temperature and earthworm composting on heavy metal speciation changes in municipal sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(10):1407-1412.
- [7] 孙振钧. 蚯蚓反应器与废弃物肥料化技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
SUN Zhen-jun. Earthworm reactor and waste fertilization technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [8] 蔡玉琪, 蔡树美, 倪圣亚, 等. 蚯蚓对秸秆-污泥混合物的消解转化效果[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6):1284-1287.
CAI Yu-qi, CAI Shu-mei, NI Sheng-ya, et al. Efficiency of using earthworms to assimilate and transform straw-sludge mixture[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6):1284-1287.
- [9] 赖发英, 周 颖, 王国锋, 等. 蚯蚓对农村有机生活垃圾分解处理的研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7):1450-1455.
LAI Fa-ying, ZHOU Ying, WANG Guo-feng, et al. Earthworm decomposing organic solid waste in rural areas[J]. *Journal of Agro-Environ-*

- ment Science, 2011, 30(7):1450–1455.
- [10] Edwards C A, Lofty J R. Biology of earthworm[M]. New York:Chapman & Hall, 1984.
- [11] Elvira C, Sampedro L, Nogales R. Suitability of sludges from dairy and paper industries for growth and reproduction of *Eisenia andrei*[J]. *Pedobiologia*, 1998, 43(6):766–770.
- [12] Kaplan D L, Hartenstein R, Neuhauser E F, et al. Physicochemical requirements in the environment of the earthworm *Eisenia foetida*[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1980, 12(4):347–352.
- [13] Garg V K, Chand S, Chhillar A, et al. Growth and reproduction of *Eisenia foetida* in various animal wastes during vermicomposting[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2005, 3(2):51–59.
- [14] Dominguez J, Edwards C A. Effect of stocking rate and moisture content on the growth and maturation of *Eisenia foetida* (Oligochaete) in pig manure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 9(3–4):743–746.
- [15] 仓 龙, 李辉信, 胡 锋, 等. 赤子爱胜蚓处理畜禽粪的最适湿度和接种密度研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(3):38–42.
- CANG Long, LI Hui-xin, HU Feng, et al. Optimal moisture condition and inoculation density of *Eisenia foetida* for vermicomposting of domestic animal manure[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(3):38–42.