

蚯蚓对农村有机生活垃圾分解处理的研究

赖发英, 周 颖, 王国锋, 陈文姬, 杨 林, 余跑兰

(江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045)

摘 要:本文以农村有机生活垃圾为研究对象,根据蚯蚓的生活习性设计了4个不同组分的试验基质,这些基质的主要成分为厨余垃圾,辅料为猪粪、牛粪和土壤。本试验引进“大平二号”赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)在室内进行盆养试验,同时以未放养蚯蚓处理的试验基质作为对照,培养周期为5周。研究表明,蚯蚓分解新鲜有机生活垃圾的效果最好,其生物降解率达到75.688%,该试样中蚯蚓日增重倍数和日增值倍数也最大。经蚯蚓处理后的各基质肥效都有所增加,试验样基质中有机碳、氮磷含量相对于对照样都有所升高,试验样中碱解氮含量是对照样的3倍左右。新鲜有机生活垃圾基质C/N比最大,其速效磷含量也为最大值。同时,蚯蚓还对各基质的重金属有富集作用,其富集效果都在48%左右。各组之间的试验结果大多存在显著性差异($P<0.05$)。

关键词:蚯蚓;有机生活垃圾;生物降解力;重金属

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)07-1450-06

Earthworm Decomposing Organic Solid Waste in Rural Areas

LAI Fa-ying, ZHOU Ying, WANG Guo-feng, CHEN Wen-ji, YANG Lin, YU Pao-lan

(College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract:Organic solid waste in rural areas was studied with earthworm(*Eisenia foetida*) decomposing. According to the living habits of earthworms, four different combinations of the test's ground-substance was designed for pot experiment. The main components of the ground-substance were kitchen waste. Additional material were pig dung, cow dung and soil. The ground-substance without earthworm was the contrast. Treatment time was five weeks. Results showed earthworm had best effect on decomposing fresh organic waste. The rate of biological degradation of fresh organic waste was 75.688%. In addition, the increment of earthworm's quality and quantity for everyday was also greatest in fresh organic waste. The available fertilizer of the ground-substance had obvious increase after earthworms decomposing compared with the control sample. The concentration of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the ground-substance was higher than in control sample. The content of alkali-hydrolyzed nitrogen in the ground-substance was three times higher than in control sample. C/N and available phosphorus in the round-substance of fresh organic waste were the highest. Earthworms could accumulated heavy metals from the ground-substance. Accumulation rate of heavy metal in the earthworms was about 48 percent. There were significant difference between most results of each group($P<0.05$).

Keywords: earthworms; organic solid waste; biodegradable force; heavy metal

随着社会的快速发展,农村生活水平的提高,农村生活垃圾的构成也发生了变化。尤其是有机垃圾的含量占了很大部分。以太湖地区农村为例,有机生活垃圾含量占垃圾总量的67.70%^[1]。虽然农民生活水平逐步实现了现代化,但垃圾处置方法却十分原始。长期以来,我国农村的生活垃圾基本上是一种放任自流

的状况。这些农村生活垃圾如果不经适当处理,将会对生态环境造成严重的影响,也会影响到农村居民的生活环境和身体健康。建设社会主义新农村,就必须采取有效措施处理农村生活垃圾,让农村生活垃圾减量化、无害化和资源化。因此,如何有效处理农村有机生活垃圾成为农村垃圾处理的关键所在。

蚯蚓可以将自然界的有机质通过自身的消化系统,在蛋白酶、脂肪酶、纤维酶、淀粉酶的作用下,迅速分解、转化成为自身或其他生物易于利用的营养物质。该技术既可以生产优良的动物蛋白,又可以生产肥沃的生物有机肥^[2]。在国外,如美国、日本、加拿大等国家已建立蚯蚓养殖场作为城市废弃物的处理补充

收稿日期:2011-04-18

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BAD96B04);江西省科技厅项目(20041A0400301)

作者简介:赖发英(1966—),女,江西省吉水人,博士,副教授,主要研究方向为土壤污染治理与生态工程修复。

E-mail:laifyjx@126.com

系统,来解决城市的环境污染问题^[3-4]。在我国,已有许多城市利用蚯蚓来分解处理城市生活垃圾以及城市污水处理厂污泥,并取得了良好的效果^[5],但我国目前对蚯蚓分解处理农村有机生活垃圾,特别是处理新鲜垃圾的研究比较少。因此,本文将着重对利用蚯蚓分解农村有机生活垃圾进行试验研究,分析相关性质。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在蚯蚓品种的选择上,以分解速率快、生长周期短、产生的蚯蚓肉和蚯蚓粪多为原则,选用“太平二号”赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)。垃圾主要来源于学校周围村庄的有机生活垃圾,其主要成分是厨余垃圾,如烂菜叶果皮、残羹剩饭及动物内脏残渣等。将有机垃圾破碎至 50 mm 以下。辅料为猪粪、牛粪和土壤。

1.2 试验方案

1.2.1 物料配比及堆肥

蚯蚓能够在整个分解过程中健康成长,与基质的配比有着密切的关系。各种试验材料经过合理配制才能使得各基质的氮碳比例合理且营养丰富,有利于蚯蚓生长、繁殖。同时,蚯蚓生长对土壤存在着相当程度的依赖性。当垃圾质量分数>50%,蚯蚓存活率急剧下降,无土时难以成活。因此本试验按 1:1 的比例向每个基质加入同一性质的土壤。有机生活垃圾堆肥过程如下:向堆料中加水并用塑料布覆盖顶部,周边留有一定缝隙进行好氧堆肥。每隔 10 d 进行翻堆,如发现有白蘑菇菌丝说明堆料过干,需加水调制。经过 1 个月的堆制发酵即可腐熟^[14]。在试验开始前,为了稳妥起见,可用 20~30 条蚯蚓作小区试验,投放 1 d 后蚯蚓无异常反应,说明堆肥成功。具体基质详细配比见表 1。其理化性质见表 4、表 5 对照样。

表 1 中的试验基质配比主要是根据长江中下游地区农村常见的有机垃圾成分。通过本试验,找出最适合蚯蚓生长和繁殖的基质配比,从而使蚯蚓降解农村有机垃圾的效率提高。

表 1 试验基质配比

Table 1 Mixture ratio of the test's ground-substance

编号	试验材料
1 组	新鲜有机生活垃圾+土壤(1:1)
2 组	堆肥后有机生活垃圾+土壤(1:1)
3 组	猪粪和新鲜有机生活垃圾混合堆肥后+土壤(1:1:2)
4 组	牛粪和新鲜有机生活垃圾混合堆肥后+土壤(1:1:2)

1.2.2 蚯蚓的培养

在上口直径为 18 cm,下底直径为 10 cm,高 15 cm,底部有透水孔的塑料钵中培养蚯蚓,底部放有细纱网,防止蚯蚓逃逸。每钵接种个体质量为 150 mg 左右的蚯蚓 8 条,蚯蚓用分度值为 0.000 1 g 电子天平精确称重,投加上述各基质 500 g,每基质 3 个重复。放在温室培养,试验期间每隔 3 d 浇 1 次水,控制各基质湿度在 70%,温度在 20 ℃左右,培养 5 周^[6]。定期查看其繁殖状况,使其处于最佳繁殖状态。

1.3 测定及分析方法

1.3.1 测定方法

所有样品均在自然状态下风干,取适量样品研磨,按照分析测定数据的要求进行过筛。将剩余所有物料自然风干,研磨后过筛,留待分析。

1.3.1.1 蚯蚓的计数和称重

生物降解率=(总有机物质-剩余有机物质)/总有机物质×100%^[7]

日增重倍数=(养殖一定时间后蚯蚓总重-初始体重)/(初始体重×养殖时间)^[8-9]

日增值倍数=(养殖一定时间后蚯蚓总数-初始蚯蚓数)/(初始蚯蚓数×养殖时间)^[8-9]

式中,蚯蚓总数包括蚓茧数、成蚓数、幼蚓数,每个蚓茧按 1 条蚯蚓计算,养殖时间以天计,蚓重以克计。

1.3.1.2 样品测试项目及方法

采用常规法测定有机物含量^[10];采用固体稀释法测定有机 C 含量;凯氏定氮法测定总 N 含量^[11];火焰原子吸收光谱法进行测定重金属浓度^[12]。

1.3.2 数据分析方法

试验数据在 Excel 下建立数据库,进行制表和作图。采用 SPSS 16.0 统计软件对各试验基质进行方差分析及差异显著性检验,即单因素方差分析(one-way ANOVA)。若不注明,差异显著指 $P<0.05$ ^[13]。

2 结果与讨论

2.1 蚯蚓对不同基质的生物降解率

试验中蚯蚓对基质的降解程度叫生物降解率。蚯蚓的生物降解作用可以使各种复杂的有机化合物得到降解,从而保持生态系统的良性循环^[7]。蚯蚓分解处理各基质最终生物降解率见表 2。

蚯蚓对不同基质的生物降解率为:1 组>4 组>3 组>2 组。蚯蚓分解新鲜有机生活垃圾的生物降解率最高,达到 75.688%,分解堆肥后的有机生活垃圾的

表 2 各基质有机质含量及最终生物降解率

Table 2 Content of organic matter in each ground-substance and the final rate of biological degradation

基质	有机质含量/%		生物降解率/%
	对照样	试验样	
1 组	17.024±0.128	13.254±0.063d	75.688±0.374a
2 组	16.032±0.128	14.534±0.128c	37.757±1.084d
3 组	18.062±0.010	17.053±0.010a	52.206±0.449c
4 组	17.019±0.018	16.035±0.018b	53.554±0.869b

注:表中数据为平均值±标准差,同一列不同字母表示彼此差异显著(P<0.05),下同。

Note: Numbers are mean values and standard error. Within a row followed by the different letters are significantly at the level of 5%.The same as below.

生物降解率最低,仅为 37.757%。经差异显著性检验,各组之间有机质含量和生物降解率差异显著。

2.2 不同基质中蚯蚓的增长和繁殖率

5 周的试验期结束后,“大平二号”赤子爱胜蚓生长状况良好,未发现死亡蚯蚓,且体重随时间有一定的波动变化,随着时间的推移,产生的蚓茧个数也逐渐增加。本试验选取日增重倍数和日增值倍数评价蚯蚓的增长和繁殖率。试验过程中蚯蚓的增长和繁殖情况见表 3。

新鲜有机生活垃圾中蚯蚓的繁殖状况良好,在试验结束时,各基质蚯蚓体重大小为 1 组>4 组>3 组>2 组。新鲜有机生活垃圾基质内蚯蚓体重达到最大,堆肥后的有机生活垃圾基质中蚯蚓体重最小,这可能与新鲜有机生活垃圾基质在堆肥阶段过多地消耗营养物质致使在试验阶段无足够营养物质供蚯蚓食用造成的。同时,蚯蚓日增重倍数和日增值倍数在堆肥后的有机生活垃圾基质中最低,在新鲜有机生活垃圾基质中最高。各基质日增重倍数和日增值倍数大小为 1 组>4 组>3 组>2 组。新鲜有机生活垃圾中蚯蚓生长最快,日增重倍数是 0.139,日增值倍数 0.177。经差异显著性检验,各组之间蚯蚓的增长和繁殖情况均存在

显著性差异。

试验过程中还观察到新鲜有机生活垃圾基质的蚯蚓个体较大,环带出现的较早,蚯蚓达到性成熟时间较短,交配时间较早,产茧量高,故日增值倍数最高,这说明新鲜有机生活垃圾有利于蚯蚓的生长和繁殖。

2.3 不同基质中有机质、有机碳、C/N 的变化

有机质含量是肥力高低的重要指标之一。C/N 值的高低,能够反应有机质在处理过程中所释放出的有效氮的量的多少,C/N 值越小,释放出的有效氮的量就越多^[16-18]。本试验中蚯蚓对有机垃圾分解后以粪便的形式进入基质,改变了基质中有机质、有机碳、总氮的含量以及 C/N 的情况,具体见表 4。

通过试验前后样品对照分析可以得出,蚯蚓处理后产物的有机质含量明显低于对照样。处理后不同基质的有机质质量大小为 1 组<4 组<3 组<2 组,其中新鲜有机生活垃圾基质的有机质质量最小,堆肥后的有机生活垃圾基质的有机质质量最大。经差异显著性检验,各组基质有机质质量存在显著性差异。各基质中有机碳的含量在试验样中都比对照样大,都有明显的增幅,增幅大小为:1 组>2 组>4 组>3 组,其中新鲜有机生活垃圾基质的增加程度更为明显。这是因为蚯蚓在分解处理过程中使原来的各基质中增加了大量的蚯蚓粪便,而蚯蚓粪便是一种高效有机肥,其有机碳含量要比普通的有机废弃物以及发酵后的畜禽粪便要高,因此试验样中各基质中的有机碳含量要高于对照样。经差异显著性检验,各组之间有机碳的含量都存在显著性差异。

试验样各基质 C/N 比对照样都有所降低,降低幅度为:1 组>2 组>4 组>3 组。经差异显著性检验,试验各组之间基质 C/N 存在显著性差异。试验样中新鲜有机生活垃圾基质 C/N 最大,释放的有效氮量就越少,其肥力就越小。猪粪与有机生活垃圾堆肥的产物基质 C/N 最小,释放的有效氮量就越多,其肥力就越大。试验样基质中有机碳和全氮含量相对于对照样都有所

表 3 各基质蚯蚓的增长和繁殖情况

Table 3 Complexion of earthworm's growth and reproduction in each ground-substance

基质	蚯蚓总重量/g		日增重倍数	日增值倍数	总产茧量 /个·盆 ⁻¹
	试验前	试验后			
1 组	1.205±0.003	7.028±0.005a	0.139±0.001a	0.177±0.002a	37.667±0.471a
2 组	1.204±0.002	5.345±0.006d	0.099±0.001d	0.098±0.002d	21.333±0.471d
3 组	1.203±0.001	6.100±0.005c	0.117±0.001c	0.108±0.008c	25.333±1.248c
4 组	1.205±0.002	6.437±0.003b	0.125±0.001b	0.118±0.003b	27.667±0.471b

表 4 各基质中有机质质量、有机碳及 C/N 变化情况

Table 4 Changes of organic matter, organic carbon and C/N ratio in each ground-substance

基质	有机质质量/kg		有机碳 /g·kg ⁻¹		C/N	
	对照样	试验样	对照样	试验样	对照样	试验样
1 组	0.085±0.001	0.021±0.005d	322.517±0.084	401.825±0.548a	25.267±0.015	20.312±0.066a
2 组	0.080±0.005	0.050±0.008a	298.373±0.024	357.729±0.011b	23.125±0.017	19.313±0.009b
3 组	0.091±0.005	0.043±0.005b	276.578±0.024	342.413±0.016d	20.865±0.022	16.882±0.017d
4 组	0.085±0.001	0.039±0.001c	282.472±0.036	345.226±0.016c	21.381±0.004	17.514±0.045c

升高,而且全氮的升高的幅度比有机碳的升高幅度还要大,所以试验样基质土壤中各基质 C/N 比有所下降,这一点与 Caroline C.M ba、王振中、张雪萍的研究结果相同^[19-21]。

2.4 不同基质中总磷、速效磷和总氮、碱解氮的变化

从表 5 可以看出,试验样中各组合总磷含量最高的是新鲜有机生活垃圾组合,最低的是猪粪与有机生活垃圾堆肥的组合。总体的变化趋势是总磷的含量都有所升高:1 组>2 组>4 组>3 组,即蚯蚓的分解处理提高了试验各组合中全磷的含量,致使基质土壤中全磷的含量升高。经差异显著性检验,各组之间基质土壤总磷的含量存在显著性差异。试验样中各基质总氮含量相对对照样均有增加,经差异显著性检验,各组之间基质土壤总氮的含量无显著性差异。增幅大小为:3 组>1 组>4 组>2 组,新鲜有机生活垃圾基质总氮增加量大于堆肥后的有机生活垃圾基质,猪粪与有机生活垃圾堆肥的基质中总氮增加量大于牛粪与有机生活垃圾堆肥的基质。

速效磷是植物能直接吸收利用的一种磷的形态,它的供应状况,对于施肥有着直接的指导意义。从表 5 可以看出,试验结束后各组合中速效磷含量最大值出现在新鲜有机生活垃圾组合基质,最小值出现在牛粪与有机生活垃圾堆肥组合。经差异显著性检验,基质土壤中各组合速效磷的含量无显著性差异。具体的增幅情况为:1 组>2 组>3 组>4 组。其中新鲜有机生活垃圾组合速效磷含量大于堆肥预处理的有机生活垃圾组合,牛粪与稻草堆肥的组合速效磷含量大于

猪粪与稻草堆肥的组合,猪粪与有机生活垃圾堆肥的组合速效磷含量大于牛粪与有机生活垃圾堆肥的组合。对于新鲜有机生活垃圾组合来说,经过蚯蚓的分解处理,速效磷含量是巨大的增加,这说明未预处理的有机生活垃圾经蚯蚓分解处理后其速效磷的水平非常高,其他各组速效磷的总体变化趋势不是很明显。

经差异显著性检验,试验样中各组合基质土壤碱解氮含量有显著性差异。由表 5 可以看出,各组合基质土壤中对照样的碱解氮含量是试验样中碱解氮含量的 1/3 左右,碱解氮含量的增加幅度为:1 组>2 组>4 组>3 组。其中新鲜有机生活垃圾组合的增加幅度最大,猪粪与生活垃圾堆肥组合的增加幅度最小。蚯蚓在分解处理的过程中消耗了各原料中大量的有机物,其中包括相当量的氮,这些氮大部分通过排泄物进入基质中。

2.5 各基质和蚯蚓体内重金属含量的变化

蚯蚓对重金属元素具有很强的富集作用,同时,蚯蚓不仅被作为土壤环境污染的重要生物指示剂,而且对被重金属污染的土壤具有一定的净化能力^[22-26]。蚯蚓体内重金属含量的多少决定了其用途,同样,被蚯蚓分解处理后的各基质所含的重金属浓度也影响其施用于农田作为高效有机肥的可行性。本试验对处理前后各基质及蚯蚓体内重金属 Cu、Pb、Zn 的浓度进行检测,各组对应的重金属浓度见表 6、表 7。

由表 7 可知,试验样中各基质重金属 Cu、Pb、Zn 的浓度都明显低于对照样,这表明在试验过程中蚯蚓

表 5 不同基质中总磷、速效磷和总氮、碱解氮的变化

Table 5 Changes of total phosphor, rapid available phosphorus and total nitrogen, alkaline hydrolysis nitrogen in each ground-substance

基质	总磷/g·kg ⁻¹		速效磷/g·kg ⁻¹		总氮/g·kg ⁻¹		碱解氮/g·kg ⁻¹	
	对照样	试验样	对照样	试验样	对照样	试验样	对照样	试验样
1 组	6.670±0.010	9.680±0.006a	0.120±0.003	0.382±0.004a	12.764±0.005	19.783±0.051a	0.921±0.055	3.538±0.032a
2 组	5.790±0.071	9.530±0.019b	0.261±0.004	0.361±0.005a	12.903±0.004	18.523±0.008a	0.874±0.119	3.464±0.045b
3 组	6.950±0.078	9.270±0.005d	0.273±0.002	0.313±0.009a	13.256±0.013	20.283±0.020a	1.134±0.042	3.317±0.205d
4 组	6.740±0.006	9.360±0.009c	0.254±0.004	0.284±0.005a	13.211±0.003	19.711±0.050a	0.983±0.080	3.411±0.056c

对基质中的重金属 Cu、Pb、Zn 有一定的富集作用,其富集效果都在 48%左右。经差异显著性检验,各组基质不同重金属含量存在显著性差异,同时,各组蚯蚓体内不同重金属的含量也有显著性差异。试验结束后各基质中重金属的浓度均明显高于对应的蚯蚓体,表明了耐受极限这一观点,也说明蚯蚓对这些重金属并不能持续的吸收积累,这一点与牛明芬的研究结果相同^[23]。

综合表 6、表 7 可知,对比试验样与对照样中各基质重金属含量及试验前后蚯蚓体内重金属含量,蚯蚓体内的重金属含量比分解处理各基质前大幅度升高,由此可知蚯蚓对各基质中重金属元素都表现出了富集作用,其富集能力为 Zn>Cu>Pb,这说明蚯蚓对重金属有一定的忍耐和富集能力,这一点与王振中的研究结论相同^[27]。影响蚯蚓体内富集重金属的主要原因可能是体内酶的作用,由于酶分子是蛋白质,重金属含量高时往往会使酶分子因沉淀、络合等反应而失活,不同重金属对酶活性的影响不同,这主要是重金属本身对酶分子的选择能力不同所致。

3 结论

- (1)蚯蚓分解新鲜有机生活垃圾的生物降解率最高,分解堆肥后的有机生活垃圾的生物降解率最低。
- (2)新鲜有机生活垃圾基质内蚯蚓体重最大,堆肥后的有机生活垃圾基质中蚯蚓体重最小。同时,蚯蚓日增重倍数和日增值倍数在堆肥后的有机生活垃圾基质中最低,在新鲜有机生活垃圾基质中最高。

(3)试验样基质中有机碳和全氮含量相对于对照样都有所升高,而且全氮的升高的幅度比有机碳的升高幅度还要大,所以试验样基质土壤中各基质 C/N 有所下降。其中新鲜有机生活垃圾基质的增加程度更为明显。其总氮增加量大于堆肥后的有机生活垃圾基质。因此,试验样中新鲜有机生活垃圾基质 C/N 最大。

(4)蚯蚓的分解处理提高了试验各组合中全磷的含量,各基质总氮含量相对对照样也有增加。试验中各组合中速效磷含量最大值出现在新鲜有机生活垃圾组合基质,最小值出现在牛粪与有机生活垃圾堆肥组合。各组合基质土壤中对对照样的碱解氮含量是试验样中碱解氮含量的 1/3 左右。

(5)蚯蚓对重金属 Cu、Pb、Zn 有一定的富集作用,其富集效果都在 48%左右。各基质中重金属的浓度均明显高于对应的蚯蚓体,表明了蚯蚓对这些重金属有耐受极限。

参考文献:

[1] 武攀峰, 崔春红. 农村经济相对发达地区生活垃圾的产生特征与管理模式初探:以太湖地区农村为例[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1):237-243.

WU Pan-feng, CUI Chun-hong. Characteristics and management pattern of household solid wastes in relatively developed rural areas of China: A case study of Tai Lake region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):237-243.

[2] 邱江平. 蚯蚓及其在环境保护上的应用[J]. 上海农学院学报, 2000 (3):53-58.

QIU Jiang-ping. Earthworms and their application in environment protection[J]. *Journal of Shanghai Agricultural College*, 2000(3):53-58.

表 6 各基质重金属浓度
Table 6 Main contents of heavy metals in each ground-substance

基质	Cu /mg·kg ⁻¹		Pb/mg·kg ⁻¹		Zn/mg·kg ⁻¹	
	对照样	试验样	对照样	试验样	对照样	试验样
1 组	2.205±0.058	1.213±0.160c	1.373±0.115	1.054±0.022c	232.264±0.043	79.862±0.086b
2 组	2.183±0.052	0.992±0.003d	1.114±0.045	0.867±0.012d	132.440±0.022	44.428±0.099d
3 组	98.558±0.140	47.727±0.188a	12.372±0.043	10.382±0.119a	878.427±0.081	249.816±0.022a
4 组	16.356±0.073	7.414±0.099b	4.865±0.047	3.250±0.027b	225.404±0.050	75.921±0.056c

表 7 各基质蚯蚓体内重金属浓度
Table 7 Main contents of heavy metals in earthworm of each ground-substance

基质	Cu/mg·kg ⁻¹		Pb/mg·kg ⁻¹		Zn/mg·kg ⁻¹	
	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
1 组	0.141±0.034	0.538±0.020d	0.118±0.010	0.166±0.008c	0.134±0.009	122.056±0.015b
2 组	0.163±0.015	0.639±0.004c	0.120±0.009	0.157±0.004d	0.133±0.008	70.543±0.007d
3 组	0.149±0.034	20.481±0.002a	0.122±0.009	0.421±0.012a	0.129±0.008	503.018±0.001a
4 组	0.168±0.030	3.745±0.022b	0.112±0.003	0.354±0.009b	0.131±0.004	119.717±0.021c

- [3] U.S.EPA. Municipal Solid Waste in The United States:2001 Facts and Figures, Office of Soil Waste and Emergency Response[R]. 2003.
- [4] 张承龙. 农业废弃物资源化利用技术现状及其前景[J]. 环境保护, 2002(1):25-28.
ZHANG Cheng-long. Comprehensive utilization technologies of agricultural wastes[J]. *Environmental Protection*. 2002(1):25-28.
- [5] 霍维周, 丁雪梅. 蚯蚓处理垃圾及产业化问题的探讨[J]. 城市管理与科技, 2002, 4(1):16-18.
HUO Wei-zhou, DING Xue-mei. How to use earthworm for garbage treatment and make it industrialized[J]. *Municipal Administration & Technology*, 2002, 4(1):16-18.
- [6] 仓龙, 李辉信. 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. Optimal moisture condition and inoculation density of *Eisenia foetida* for vermicomposting of domestic animal manure[J]. *Rural Eco-environment*, 2002, 18(3):38-42.
- [7] Rao M S, Singh S P, Singh A K, et al. Bioenergy conversion studies of the organic fraction of MSW: assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage[J]. *Applied Energy*, 2000 (66): 75-87.
- [8] 胡秀仁, 方田. 蚯蚓处理垃圾的试验研究[J]. 农村生态环境, 1991, 7(4): 44-49.
HU Xiu-ren, FANG Tian. Study on the treatment of solid waste with earthworm[J]. *Rural Eco-environment*, 1991, 7(4):44-49.
- [9] 胡秀仁, 卢晓清. 蚯蚓对生活垃圾肥效影响的研究[J]. 重庆环境科学, 1990, 12(1):45-48.
HU Xiu-ren, LU Xiao-qing. Influence of the earthworm on fertilizer efficiency of domestic refuse[J]. *Chongqing Environmental Science*, 1990, 12(1): 45-48.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Analysis of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Book Concern, 2000.
- [11] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学技术出版社, 1983.
Chinese Soil and Agricultural Chemical Professional Committee. Soil agricultural chemical routine analysis method[M]. Beijing: Science and Technology Book Concern, 1983.
- [12] 伍曼娇, 吴湘江. 原子吸收法测定污泥蚯蚓中的镉、铜、铬、锌、铅[J]. 化学分析计量, 2008, 17(1):55-56.
WU Man-jiao, WU Xiang-jiang. Determination of cadmium, copper, chromium, zinc and lead in the sludge earthworm by atomic absorption spectrometry[J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2008, 17(1):55-56.
- [13] 辛未冬. 利用蚯蚓对长春地区两种农业废弃物分解作用研究[D]. 长春:东北师范大学, 2006:9.
XIN Wei-dong. Study on decomposition of earthworm to two kinds of agricultural wastes in Changchun[D]. Changchun:Northeast Normal University, 2006:9.
- [14] 周玉, 赵晓松. 翻堆工艺对0~15 mm垃圾堆肥腐熟度空间变异影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6):1288-1292.
ZHOU Yu, ZHAO Xiao-song. The impact of turning techniques on 0~15 mm municipal solid waste composting maturity spatial variation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*. 2009, 28(6):1288-1292.
- [15] 管冬兴, 楚英豪. 蚯蚓堆肥用于我国农村生活垃圾处理探讨[J]. 中国资源综合利用, 2008, 9: 28-30.
GUAN Dong-xing, CHU Ying-hao. Study on vermicomposting applied to Chinese rural domestic refuse disposal[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2008, 9:28-30.
- [16] Bayon R C Le, Binet F. Earthworm change the distribution and availability of phosphorous in organic substrates[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006 (38): 235-246.
- [17] 董炜华. 蚯蚓在红松阔叶混交林物质分解与转化作用研究[D]. 长春:东北师范大学, 2004:10.
DONG Wei-hua. Study on Earthworms' action in the material decomposing and transforming in the Pinus koraiensis broad-leaved mixed forest [D]. Changchun Northeast Normal University, 2004:10.
- [18] Gajalakshmi S, Abbasi S A. Vermiconversion of paper waste by earthworm born and grown in the waste-fed reactors compared to the pioneers raised to adulthood on cowdung feed[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 94:53-56.
- [19] Caroline C Mba. Treated-cassava peel vermicomposts enhanced earthworm activities and cowpea growth in field plots[J]. *Resource, Conservation and Recycling*, 1996, 17:219-226.
- [20] 王振中, 张友梅. 土壤环境变化对土壤动物群落影响的研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6):892-897.
WANG Zhen-zhong, ZHANG You-mei. Effect of change in soil environment on community structure of soil animal[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6):892-897.
- [21] 张雪萍, 张毅. 小兴安岭针叶凋落物的分解与土壤动物的作用[J]. 地理科学, 2000, 20(6):552-556.
ZHANG Xue-ping, ZHANG Yi. Decomposition of coniferous litter and the function of soil animals in the Xiao Hingan Mountains[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(6):552-556.
- [22] 戈峰, 刘向辉. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用[J]. 生态学报, 2001, 21(11):1790-1795.
GE Feng, LIU Xiang-hui. The role of earthworm in the ecological restoration of mining wasteland of Dexing Copper Mine in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11):1790-1795.
- [23] 牛明芬, 崔玉珍. 蚯蚓对垃圾与底泥中镉的富集现象[J]. 农村生态环境, 1997, 13(3):53-54.
NIU Ming-fen, CUI Yu-zhen. Function of earthworm for accumulation of Cd from garbage and sediments[J]. *Rural Eco-environment*, 1997, 13(3):53-54.
- [24] Lee K E. Some trends and opportunities in earthworm research or Darwin's children—the future of our disciplin[J]. *Soil Biol Bio Chem*, 1992(24): 1765-1771.
- [25] Pennanen T A, Frostgard H F, Baath E. Phospholipid fatty acid composition and heavy metal tolerance of soil microbial communities along two heavy metal polluted gradients in coniferous forests[J]. *Applied Environmental and Microbiology*, 1996, 62:420-428.
- [26] Kinght B P, McGrath S P, Chaudri A M. Biomass carbon measurements and substrate utilization patterns of microbial populations from soils amended with cadmium, copper or zinc[J]. *Applied Environmental and Microbiology*, 1997, 63:39-43.
- [27] 王振中, 张友梅. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10):1948-1952.
WANG Zhen-zhong, ZHANG You-mei. Enrichment and toxicity effect of heavy metals in soil ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10):1948-1952.