

于建光, 常志州, 李瑞鹏. 水葫芦渣粪便混合物蚯蚓堆制后微生物活性及物理化学性质的变化[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(5): 970-975.

水葫芦渣粪便混合物蚯蚓堆制后微生物活性及物理化学性质的变化

于建光¹, 常志州¹, 李瑞鹏^{1,2}

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 为了评估蚯蚓用于水葫芦渣(water hyacinth residue)堆肥的可行性,设计水葫芦渣与牛粪、水葫芦渣与猪粪和水葫芦渣与鸡粪 2:1 堆肥混合物(HCD、HPM 和 HCE)中接种蚯蚓(*Eisenia foetida*)进行堆肥,探讨蚯蚓堆制后堆肥产物的微生物活性及物理化学性质的变化。结果表明:与常规堆肥相比,蚯蚓堆制 30d 后,HCD、HPM 和 HCE 中微生物量碳含量下降,而基础呼吸、微生物代谢熵、脱氢酶与碱性磷酸酶活性均升高;其中 HCD 中总固形物平均质量损失增加 3.32% ($P<0.05$);HCD 和 HPM 中的全氮含量均显著增加($P<0.05$),而 HCD 和 HCE 中的全钾含量极显著($P<0.01$)或显著增加($P<0.05$)。可见水葫芦渣混入部分牛粪经蚯蚓堆制可达到减少堆肥时间、提高产品质量的效果,而水葫芦渣混入猪粪和鸡粪进行蚯蚓堆制的效果较差。

关键词: 水葫芦渣; 蚯蚓堆制; 微生物; 养分

中图分类号: S899.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2010)05-0970-06

Microbial and Physicochemical Properties of the Mixture of Water Hyacinth Residue and Excrement through Vermicomposting

YU Jian-guang¹, CHANG Zhi-zhou¹, LI Rui-peng^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to evaluate the possibility of the mixtures composting of water hyacinth residue through vermicomposting, three kinds of mixtures (straw : dung = 2 : 1), which were water hyacinth residue plus cattle dung (HCD), water hyacinth residue plus pig manure (HPM) and water hyacinth residue plus chicken excrement (HCE), were used to study the microbial and physicochemical properties of the mixtures through vermicomposting. The results indicated that after 30 d, compared with conventional composting, the microbial biomass carbon (MBC) of HCD, HPM and HCE through vermicomposting were all decreased; the basal respiration (BR), microbial respiration quotient (qCO_2), dehydrogenase and alkaline phosphatase activities of HCD, HPM and HCE through vermicomposting were all increased, the total solid (TS) loss of HCD through vermicomposting was increased by 3.32%; the contents of total nitrogen (TN) of HCD and HPM

through vermicomposting were significantly enhanced ($P<0.05$), and the total potassium (TK) contents of HCD and HCE through vermicomposting were significantly improved ($P<0.01$ or $P<0.05$). Therefore, the mixture of HCD through vermicomposting could shorten the composting time and improve the quality of composting.

Key words: water hyacinth residue; vermicomposting; microbe; nutrient

收稿日期: 2009-12-19

基金项目: 江苏省博士后科研资助计划项目(0801035B); 国家科技支撑计划项目(2009BAC63B02)

作者简介: 于建光(1975-), 男, 山西忻州人, 博士, 助理研究员, 研究方向为农业废弃物处理与处置。(Tel)025-84390243; (E-mail)yujg@jaas.ac.cn

通讯作者: 常志州, (Tel)025-84390238; (E-mail)czhizhou@hotmail.com

水葫芦(Water hyacinth)是凤眼莲的俗称,由于繁殖能力极强,可在湖泊或河流中爆发性生长,产生阻塞河道、污染水体、影响饮用水安全等环境、生态与社会问题。水体中水葫芦的防控措施主要包括打捞、围网、施用农药、引入天敌或化感植物、接种寄生菌等物理、化学和生物学方法^[1]。物理打捞尽管成本高,但可通过对氮、磷的吸收利用而减缓水体污染,进而降低水体富营养化程度并减轻水葫芦在水体中的滋生疯长,而打捞后水葫芦的处理则成为研究的热点。已有研究通过将水葫芦作为动物饲料、制作栽培苗钵、提取活性物质、生产酒精、厌氧产沼气等而加以利用^[2-9],但均因技术不成熟、投资成本高、效果差而影响其推广。水葫芦富含大量的植物必需养分^[10],如果直接作为肥料还田,由于其生存力强,在湿润条件下可以长期生存,存在与作物争夺养分以及引入病原菌等风险。而水葫芦通过堆肥处理后,可避免上述风险。江苏省农业科学院有关课题组将水葫芦打捞后进行破碎挤压减容,再将挤压汁用于厌氧发酵产沼气,剩余水葫芦残渣用于堆肥,但在堆肥过程中发现水葫芦残渣仍含有大量水分,在堆肥过程中需不断翻堆,且腐熟时间较长,因此急需低成本地加快水葫芦残渣腐熟的堆肥技术。

将蚯蚓人为接种用于各种有机废弃物处理由来已久,接种蚯蚓用于各种废弃物材料堆肥化的过程称为“蚯蚓堆制(Vermicomposting)”。蚯蚓对堆肥进程的促进主要通过对堆肥材料的混合、加工、破碎以及对微生物群落的改变而起作用。用树叶、生活垃圾和秸秆等作为原料进行蚯蚓堆制的研究结果均表明,蚯蚓在堆肥过程中具有良好的效果^[11-13]。同时以上述堆肥原料获得的堆肥产物对作物生长的促进作用与土传病害的控制效果也相当明显^[14-15]。以水葫芦为原料接种蚯蚓堆肥的研究较少,主要是印度学者开展的一些零星试验^[16-17]。本研究拟采用常用的堆肥蚯蚓品种赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),对水葫芦与不同畜禽粪便组合材料的蚯蚓堆制技术进行研究,以期为长江中下游地区提供成本低、简单实用及附加值高的水葫芦蚯蚓堆制技术。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试水葫芦渣取自江苏省农业科学院本部水葫芦种养试验基地,为新鲜水葫芦挤压脱水后的残渣,

畜禽粪便均取自南京市周边养殖场,水葫芦渣的碳氮比为 14.10、全磷含量为 2.79 g/kg、全钾含量为 20.80 g/kg。畜禽粪便风干并粉碎过 4 mm 筛备用,牛粪碳氮比为 16.89、全磷含量为 8.06 g/kg、全钾含量为 12.60 g/kg;猪粪碳氮比为 40.93、全磷含量为 8.41 g/kg、全钾含量为 0.45 g/kg;鸡粪碳氮比为 20.20、全磷含量为 6.37 g/kg、全钾含量为 19.56 g/kg。供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),购自南京六合区长芦镇蚯蚓养殖场,其平均鲜重为 0.275 g。试验采用 3 种堆肥物料:水葫芦渣与牛粪混合物(干重比 2:1, HCD)、水葫芦渣与猪粪混合物(干重比 2:1, HPM)、水葫芦渣与鸡粪混合物(干重比 2:1, HCE),每种堆肥物料分别设常规堆肥和蚯蚓堆制,即 6 个处理,每处理重复 4 次。

所有物料在试验开始前均预先堆制 30 d 以便达到热稳定、初始微生物降解与软化。预先堆制所用容器为 1.2 m × 0.6 m × 0.5 m (长×宽×高)的塑料箱,加水调节物料使其含水量为 80%,置于温室培养,试验时当地大气日均温是 22~25 ℃,每 5 d 翻堆 1 次,并称重加水。初始堆置 30 d 后,将不同物料进行充分混合,混合后物料的物理化学特性见表 1。混合后物料分装于 25 cm × 25 cm (直径×高)的塑料盆钵中,每盆钵中装干物料 1 kg,加水调节物料使其含水量为 80%。在接种蚯蚓处理盆钵中接种赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),选取大小均匀且活性强的蚯蚓个体,蚯蚓接种量为每盆 55 g,约 200 条左右,物料每 2 d 喷 1 次水使其含水量维持在 80%。30 d 后破坏性采样,将蚯蚓与物料分离,蚯蚓用清水冲洗干净并称鲜重,物料充分混匀,部分鲜样保存于 4 ℃ 冰箱用于微生物指标测定,部分鲜样于 60 ℃ 烘干并粉碎后用于物理化学性状测定。

1.2 分析测定方法

微生物量碳(MBC)测定采用氯仿熏蒸浸提法^[18],即称取 5 g 鲜样,加 100 ml K₂SO₄,过滤后用 K₂CrO₇氧化法测定滤液中可溶性有机碳,熏蒸与未熏蒸样品可溶性有机碳含量之差为 MBC;基础呼吸(BR)采用 28 ℃ 恒温培养 24 h 碱液吸收法;微生物代谢熵为基础呼吸与微生物量碳之比;脱氢酶采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[19];纤维素酶采用 CMC 糖化-硝基水杨酸比色法;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法^[20]。堆肥总固形物(TS)通过 80 ℃ 烘干 24 h 测定^[21];将样品加入蒸馏水中(样品:蒸馏

水=1:10,质量比)振荡30 min,过滤,取上清液于pH计测定pH值,电导率仪测定电导率。堆肥养分测定采用常规分析方法^[22],即有机碳(TOC)采用重铬酸钾容量-外加热法;全氮(TN)采用H₂SO₄-H₂O₂消煮-蒸馏法;全磷(TP)采用H₂SO₄-

H₂O₂消煮-钼锑抗比色法;全钾(TK)采用H₂SO₄-H₂O₂消煮-火焰光度法。

1.3 数据统计与分析

数据整理及统计采用Excel和SPSS 11.0软件进行,处理间差异进行独立样本 T 检验(t -test)。

表1 蚯蚓堆制前各堆肥物料的理化性状

Table 1 Physicochemical properties of HCD, HPM and HCE

物料	pH值	电导率 (ms/cm)	总有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碳氮比
HCD	9.23	1.57	344.85	23.99	6.28	28.05	14.40
HPM	9.05	1.71	345.11	16.08	6.72	22.92	21.58
HCE	9.01	1.94	330.28	23.59	6.63	32.95	14.02

HCD、HPM和HCE依次表示水葫芦渣与牛粪、水葫芦渣与猪粪及水葫芦渣与鸡粪的混合物。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓生物量的变化

蚯蚓堆制30 d后,HCD、HPM与HCE中蚯蚓鲜重分别为 60.01 ± 4.94 g、 30.85 ± 8.15 g和 6.26 ± 3.55 g,HCD中的蚯蚓鲜重比试验开始时平均增加 $12.45\% \pm 7.35\%$,而HPM与HCE中的蚯蚓鲜重分别比试验开始时平均下降 $43.91\% \pm 14.82\%$ 和 $88.61\% \pm 6.45\%$,原因可能是牛粪与水葫芦渣混合物比猪粪和鸡粪与水葫芦渣混合物含有更适合于蚯蚓生存繁殖的养分或具有更适合于蚯蚓生存繁殖的环境条件。

2.2 堆肥中微生物群落活性的变化

在蚯蚓堆制过程中,蚯蚓与微生物的相互作用过程非常复杂,蚯蚓与微生物的相互作用影响堆肥物料的分解与矿化过程,微生物量既是微生物的数量表征,又是有效养分的供应源和储存库。相对于常规堆肥,爱胜蚓堆制30 d后HCD、HPM与HCE中的微生物量碳含量均减少,但差异均不显著,与Aira等^[23]的结果一致,原因可能源于蚯蚓部分以微生物为食或者蚯蚓堆制产物中养分的耗竭所致^[23-24](表2)。基础呼吸是微生物群落对基质整体利用能力的表征。蚯蚓堆制能使3种混合物料终产物的基础呼吸升高,且HCD经蚯蚓堆制后的基础呼吸显著升高($P < 0.05$),表明经蚯蚓堆制后,堆肥产物中有机质的矿化速率增大(表2)。3种混合物料经蚯蚓堆制后的微生物代谢熵均增大,与张宝贵等^[25]在土

壤中接种蚯蚓后的结果一致,微生物代谢熵是单位微生物代谢能力的表征,蚯蚓堆制后微生物代谢熵增加表明相应处理物料中微生物群落的年轻化或者微生物群落结构的改变^[26-27](表2)。

脱氢酶能促进糖类与有机酸的脱氢反应,脱氢酶活性是指示土壤与其他生物系统中微生物活性的重要指标^[28],脱氢酶活性不仅取决于基质碳的含量,也与氮、磷等含量有关。3种混合物料经蚯蚓堆制后脱氢酶活性均增加,其中HPM和HCE的增幅显著($P < 0.05$,表2),脱氢酶活性的增加表明经蚯蚓堆制后堆肥产物中微生物的活性提高。纤维素酶的作用是分解纤维素,纤维素酶活性受基质氮、磷含量的限制。试验中HCD和HPM中纤维素酶活性受蚯蚓堆制的作用较小,HCE受蚯蚓堆制的影响而使其纤维素酶活性显著降低($P < 0.05$,表2),原因尚不明了。磷酸酶催化有机磷为无机磷^[29],HCD、HPM和HCE经蚯蚓堆制后碱性磷酸酶活性均极显著或显著升高($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$,表2)。堆肥产物中酶活性的提高有助于提高堆肥的品质,堆肥产品施用于土壤后,其中所含有的酶可继续发挥酶促作用。有关堆肥中酶来源的争论一直存在,其中微生物产生、基质携入等均是其主要来源,但堆肥中微生物的活动会影响酶的活性,这是公认的事实。接种蚯蚓后一方面由于蚯蚓对堆肥材料的混合、吞咽及排粪等行为,影响堆肥中的微生物,进而影响酶的产生与释放;另一方面蚯蚓本身也可产生某些酶^[30]。

表2 蚯蚓堆制对水葫芦渣粪便混合物堆肥产物微生物群落活性的影响($n=4$)Table 2 Microbial properties of the mixtures of water hyacinth residues with dung through vermicomposting($n=4$)

指 标	处理	物料		
		HCD	HPM	HCE
微生物量碳(mg/kg)	常规堆肥	16 976.99±2 937.88	14 711.82±1 662.05	14 985.41±1 739.79
	蚯蚓堆制	14 613.22±1 745.17	14 339.90±1 001.68	13 946.79±1 995.76
基础呼吸[mg/(kg·d), CO ₂ -C]	常规堆肥	2 698.75±233.41	2 580.44±305.16	3 085.29±345.34
	蚯蚓堆制	3 183.81±215.02 *	2 700.20±257.09	3 277.05±342.55
微生物代谢熵[μg/(mg·h), CO ₂ -C]	常规堆肥	6.44±1.63	7.35±2.41	9.19±1.82
	蚯蚓堆制	8.36±1.45	8.64±1.49	11.03±2.29
脱氢酶[mg/(g·d)]	常规堆肥	26.97±1.43	23.02±1.68	22.68±0.45
	蚯蚓堆制	29.14±2.26	25.72±0.51 *	25.79±1.86 *
纤维素酶[mg/(g·d)]	常规堆肥	3.89±0.34	3.30±0.30	4.83±0.17
	蚯蚓堆制	3.74±0.08	3.37±0.33	4.30±0.31 *
碱性磷酸酶[mg/(g·d)]	常规堆肥	9.82±1.27	8.30±1.09	9.90±0.09
	蚯蚓堆制	14.94±1.47 **	10.16±0.49 *	14.16±2.15 *

* 和 ** 分别表示蚯蚓堆制与常规堆肥相比差异达 0.05 和 0.01 显著水平。物料 HCD、HPM 和 HCE 依次表示水葫芦渣与牛粪、水葫芦渣与猪粪及水葫芦渣与鸡粪的混合物。

2.3 堆肥物理化学性质的变化

与常规堆制相比, HCD 经蚯蚓堆制后总固形物质量的损失平均增加了 3.32%, 差异显著 ($P<0.05$), 而 HPM 和 HCE 经蚯蚓堆制后总固形物质量的损失没有显著性变化(表 3); 与总固形物变化相对应, HCD 中接种蚯蚓时蚯蚓鲜重相比于试验开始时增加, 而 HPM 与 HCE 中的蚯蚓鲜重均减小; 总固形物质量损失可较直观地评价堆肥的效果与进程, 接种蚯蚓后总固形物质量损失增加表明堆肥进程加快, 从而能促进水葫芦渣的减容减量。

水葫芦渣粪便混合物经常规堆肥后, 堆肥产物中的 pH 值均比各堆肥物料初始值下降, 且蚯蚓堆制会使 pH 值进一步下降(表 1、表 3), 与 Suthar^[13]的研究结果一致。pH 值的变化可能是源于蚯蚓堆制过程中有机质分解产生的 CO₂ 与有机酸或者氮磷矿化为亚硝态/硝态氮和磷酸盐所致^[31-32]。已知较低的 pH 值可减少氨的挥发, 从而减少氮的损失, 从这个意义上讲, 蚯蚓堆制有一定的保氮作用, 尽管这种作用需进一步证实。电导率是堆肥产物浸提液中导电性能的特征, 堆肥中电导率的变化归功于微生物和蚯蚓对有机质利用与分解过程中离子和矿物元素含量的变化所致, 本试验中常规堆肥与蚯蚓堆制均能使 3 种水葫芦渣粪便混合物的电导率比堆肥堆制前增大, 但常规堆肥与蚯蚓堆制则无显著差异

(表 1、表 3)。

3 种水葫芦渣与粪便混合物经常规堆肥和蚯蚓堆制后有机碳含量均比试验开始时降低, 这是堆肥过程的必然结果, 因为堆肥过程本身就是有机质分解、有机碳主要以 CO₂ 形式排放的过程。蚯蚓堆制与常规堆肥相比, 降低了有机碳含量, 但两者差异不显著(表 3), 蚯蚓堆制的过程是蚯蚓取食有机质和微生物降解的过程, 由于蚯蚓自身需求及较高的微生物活性均会对堆肥中有机质的矿化产生积极作用。3 种水葫芦渣与粪便混合物经常规堆肥后全氮含量与堆肥堆制前并无差别, 而蚯蚓堆制均相应增加了产物中的全氮含量, 其中 HCD 和 HPM 的增幅显著 ($P<0.05$, 表 1、表 3)。全氮增加的原因可能是蚯蚓通过富含氮排泄物的产生增加了底物的氮含量所致, 另一原因可能是因为蚯蚓堆制产物中较低的 pH 值减缓了氨气挥发从而增加氮的固持所致^[33]。无论是否接种蚯蚓, 3 种混合物料以 2 种方式堆制后的全磷含量均较试验开始时增加, 但常规堆肥与蚯蚓堆制之间差异不显著。与全磷的变化不同, 3 种物料经常规堆肥后全钾含量的变化不大, 而蚯蚓堆制后全钾含量则增加, 蚯蚓堆制与常规堆肥相比, 增加了全钾含量, 且 HCD 和 HCE 的差异达极显著或显著水平 ($P<0.01$ 、 $P<0.05$, 表 3)。堆肥后全磷含量的增加主要应与总固形物下降导致的“浓缩效

应”有关,而常规堆肥全钾含量变化不大的原因主要应与堆肥过程中钾的淋失有关^[34]。堆肥产物的碳氮比反映了常规堆肥与蚯蚓堆制后有机底物的矿化与稳定^[35],3 种水葫芦渣与粪便混合物经常规堆肥后碳氮比均比堆肥堆制前下降,但 HCD 和 HCE 的下降幅度不大,HPM 的下降幅度则较大,蚯蚓堆

制与常规堆肥相比虽然降低了碳氮比,但差异均不显著(表 1、表 3)。蚯蚓堆制使产物碳氮比降低的主要原因是蚯蚓通过加快有机碳的呼吸释放及通过富含氮排泄物的产生增加了底物氮含量所致。试验中 HPM 的碳氮比降幅较大的原因应归功于 HPM 具有较大的初始碳氮比。

表 3 蚯蚓堆制对水葫芦渣粪便混合物堆肥产物物理与化学性质的影响($n=4$)

Table 3 Physicochemical properties of the mixtures of water hyacinth residues with dung through vermicomposting($n=4$)

理化指标	处理	材料		
		HCD	HPM	HCE
总固形物重量损失(%)	常规堆肥	25.58±1.81	13.89±1.68	18.58±2.06
	蚯蚓堆制	28.90±0.81*	12.78±1.54	18.87±1.59
pH 值	常规堆肥	9.16±0.04	9.03±0.05	8.95±0.11
	蚯蚓堆制	9.14±0.08	8.89±0.12	8.86±0.01
电导率(ms/cm)	常规堆肥	2.04±0.16	1.95±0.06	2.31±0.12
	蚯蚓堆制	1.99±0.07	1.89±0.07	2.27±0.18
总有机碳(g/kg)	常规堆肥	322.35±8.41	331.64±13.57	326.56±8.77
	蚯蚓堆制	312.40±6.34	328.36±4.24	314.26±12.95
全氮(g/kg)	常规堆肥	22.68±0.83	16.72±0.79	22.54±2.17
	蚯蚓堆制	25.10±0.88*	19.26±0.86*	25.42±0.80
全磷(g/kg)	常规堆肥	9.02±0.65	9.29±0.46	9.08±1.31
	蚯蚓堆制	9.40±0.06	8.80±0.69	9.12±1.12
全钾(g/kg)	常规堆肥	28.54±1.42	22.86±0.29	31.35±0.95
	蚯蚓堆制	34.41±0.91**	25.45±1.23	33.52±1.06*
碳氮比	常规堆肥	13.44±0.83	18.91±0.52	13.26±0.95
	蚯蚓堆制	12.86±0.72	17.25±0.91	13.14±1.17

* 和 ** 分别表示蚯蚓堆制与常规堆肥相比差异达 0.05 和 0.01 显著水平。材料 HCD、HPM 和 HCE 依次表示水葫芦渣与牛粪、水葫芦渣与猪粪及水葫芦渣与鸡粪的混合物。

综上所述,水葫芦渣与牛粪、猪粪及鸡粪的混合物经蚯蚓堆制 30 d 后,只有水葫芦渣与牛粪混合物中的蚯蚓鲜重增加,平均增加 12.45%,而水葫芦渣与猪粪、水葫芦渣与鸡粪混合物中的蚯蚓鲜重分别比堆肥堆制前显著下降。因此以蚯蚓增殖为评价指标,牛粪较适合用于水葫芦渣蚯蚓堆制。与常规堆肥相比,水葫芦渣与牛粪、水葫芦渣与猪粪及水葫芦渣与鸡粪的混合物经蚯蚓堆制 30 d 后,微生物量碳含量均下降,而基础呼吸、微生物代谢熵、脱氢酶与碱性磷酸酶活性均升高。水葫芦渣与牛粪混合物经蚯蚓堆制 30 d 后,总固形物平均质量损失比常规堆肥增加了 3.32%,差异显著($P<0.05$);HCD 和 HPM 经蚯蚓堆制后的全氮含量均显著增加($P<$

0.05),而 HCD 和 HCE 经蚯蚓堆制后的全钾含量极显著或显著增加($P<0.01$, $P<0.05$)。水葫芦渣与牛粪混合物经蚯蚓堆制后的总固形物重量损失增加与养分提高效果最为明显。

参考文献:

- [1] 高雷,李博. 入侵植物凤眼莲研究现状及存在的问题[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 735-752.
- [2] 沈明卫,郝飞麟. 水葫芦制作温室栽培苗钵的可行性研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 258-260.
- [3] 蔡霞,施祖华,施英利. 水葫芦乙醇提取物对小菜蛾幼虫的生物活性[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2005, 31(5): 567-571.
- [4] MISHIMA D, KUNIKI M, SEI K, et al. Ethanol production from

- candidate energy crops: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99:2495-2500.
- [5] 陈彬,赵由才,曹伟华,等. 水葫芦厌氧发酵工程化应用研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(6):455-458.
- [6] 范铮,徐俊,郑晓峰,等. 水葫芦提取物抑菌作用的初步研究[J]. *江苏农业科学*, 2009(3):143-144.
- [7] 刘海琴,宋伟,高运强,等. 水葫芦与蓝藻厌氧发酵产沼气研究[J]. *江苏农业科学*, 2008(3):254-256.
- [8] 常志州,郑建初. 水葫芦放养的生态风险及控制对策[J]. *江苏农业科学*, 2008(3):251-253.
- [9] 沈明星,刘凤军,施林林,等. 水葫芦沼液肥对菜薹产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2009(4):168-169.
- [10] GUNNARSSON C C, PETERSEN C M. Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review [J]. *Waste Management*, 2007, 27:117-129.
- [11] MANNA M C, JHA S, GHOSH P K, et al. Comparative efficacy of three epigeic earthworms under different deciduous forest litters decomposition [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 88:197-206.
- [12] 陈玉成,皮广洁,黄伦先,等. 城市生活垃圾蚯蚓处理的因素优化及其重金属富集研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11):2006-2010.
- [13] SUTHAR S. Bioconversion of post harvest crop residues and cattle shed manure into value-added products using earthworm *Eudrilus eugeniae* Kinberg [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32:206-214.
- [14] ATIYEH R M, SUBLER S, EDWARDS C A, et al. Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil [J]. *Pedobiologia*, 2000, 44:579-590.
- [15] 胡艳霞,孙振钧,王东辉,等. 蚯蚓粪中拮抗微生物分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(1):99-103.
- [16] GAJALAKSHMI S, RAMASAMY E V, ABBASI S A. Assessment of sustainable vermiconversion of water hyacinth at different reactor efficiencies employing *Eudrilus eugeniae* Kinberg [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 80:131-135.
- [17] GUPTA R, MUTIYAR P K, RAWAT N K, et al. Development of a water hyacinth based vermireactor using an epigeic earthworm *Eisenia foetida* [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98:2605-2610.
- [18] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6):703-707.
- [19] TABATABAI M A. Soil enzymes [M]//WEAVER R W, ANGLE S, BOTTOMLEY P, et al. *Methods of soil analysis part 2: microbiological and biochemical properties*. Madison, Wisconsin, USA: Soil science Society of American, 1994:820-823.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 291-312.
- [21] NDEGWA P M, THOMPSON S A. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 76:107-112.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 433-437.
- [23] AIRA M, MONROY F, DOMÍNGUEZ J, et al. How earthworm density affects microbial biomass and activity in pig manure [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38:7-10.
- [24] DOMÍNGUEZ J. State of the art and new perspectives in vermicomposting research [M]//EDWARDS C A. *Earthworm ecology* 2th edition. Boca Raton: CRC Press, 2004:401-425.
- [25] 张宝贵,李贵桐,申天寿. 威廉环毛蚯蚓对土壤微生物量及活性的影响[J]. *生态学报*, 2000, 20(1):168-172.
- [26] ANDERSON J P E, DOMSCH K H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1978, 10:215-221.
- [27] SANTRUCKOVA H, STRASKABA M. On the relationship between specific respiration, activity and microbial biomass in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 23(6):525-531.
- [28] GARCIA C, HERNANDEZ T, COSTA F. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1997, 28:123-134.
- [29] ALEF K, NANNIPIERI P, TRAZAR-CEPEDA C. Phosphatase activity [M]//ALEF K, NANNIPIERI P. *Methods in applied soil microbiology and biochemical*. London: Academic Press, 1995: 335-344.
- [30] 张宝贵. 蚯蚓与微生物的相互作用[J]. *生态学报*, 1997, 17(5):556-560.
- [31] HAIMI J, HUHTA V. Capacity of various organic residues to support adequate earthworm biomass for vermicomposting [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1986, 2:23-27.
- [32] NDEGWA P M, THOMPSON S A, DAS K C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 71:5-12.
- [33] HARTENSTEIN R, HARTENSTEIN F. Physico-chemical changes affected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida* [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1981, 10:377-382.
- [34] GARG V K, YADAV Y K, SHEORAN A, et al. Livestock excreta management through vermicomposting using an epigeic earthworm *Eisenia foetida* [J]. *Environmentalist*, 2006, 26:269-276.
- [35] SENESI N. Composted materials as organic fertilizers [J]. *Science of the Total Environment*, 1989, 81/82:521-524.