

猪粪、木屑混合物蚯蚓堆制处理中 蚓体 Cu、Zn 富集的影响因素

胡安, 梅凌斐, 张志, 单监利, 贾秀英, 朱维琴^① (杭州师范大学生命与环境科学学院, 浙江 杭州 310036)

摘要: 采用室内接种法,以赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)构建生物反应器,研究猪粪、木屑混合物的蚯蚓堆制处理中,蚓体的生长状况及影响其 Cu、Zn 富集的主要因素。结果表明,接种密度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、湿度为 75% 同时有利于蚯蚓生长和基质消耗;温度为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 对蚓体质量增加最有利,而温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 最利于基质消耗; $m(\text{猪粪}) : m(\text{木屑})$ 为 6:4 可同时利于蚓体质量增加和基质消耗。适宜的接种密度($48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、湿度(70%)、温度($15 \text{ }^\circ\text{C}$)及较高比例的碳源辅料[$m(\text{猪粪}) : m(\text{木屑})$ 为 6:4]有利于蚓体对 Cu 的吸收和富集;低接种密度和高比例碳源辅料有利于蚓体对 Zn 的吸收,湿度和温度对蚓体 Zn 含量无显著影响,但蚓体 Zn 富集量分别在接种密度 $48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $m(\text{猪粪}) : m(\text{木屑})$ 为 6:4、湿度 75% 和温度 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下达最大。

关键词: 猪粪; 蚯蚓堆制; Cu; Zn; 富集

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2012)01-0077-05

Factors Affecting Cu and Zn Accumulation in Earthworms in Vermicomposting Pig Dung and Sawdust Mixture.

HU An, MEI Ling-fei, ZHANG Zhi, SHAN Jian-li, JIA Xiu-ying, ZHU Wei-qin (College of Life and Environmental Sciences, Hang Zhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: Vermireactors were set up containing pig dung and sawdust mixture inoculated with *Eisenia fetida* indoors to investigate factors affecting growth of and Cu or Zn accumulation in earthworms during the course of vermicomposting. Results demonstrate that earthworm growth and substrate consumption were both boosted when the inoculation density and humidity was set at $40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and 75%, respectively; the optimal temperature for earthworm growth was $15 \text{ }^\circ\text{C}$, and for matrix consumption, $20 \text{ }^\circ\text{C}$; pig dung/sawdust ratio of 6:4 was conducive to both earthworm growth and substrate consumption. Cu uptake and accumulation by earthworms were facilitated in the context of appropriate inoculation density ($48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), humidity (70%), temperature ($15 \text{ }^\circ\text{C}$) and a higher proportion of carbon source materials in the mixture (pig dung/sawdust ratio, 6:4). Lower inoculation density and a higher proportion of carbon source materials were advantageous to earthworm Zn uptake, whereas humidity and temperature exerted little effects on earthworm Zn concentration. Earthworm Zn accumulation was the highest in the treatment with $48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ in inoculation density, 6:4 in pig dung/sawdust ratio, 70% in humidity and $15 \text{ }^\circ\text{C}$ in temperature.

Key words: pig dung; vermicomposting; Cu; Zn; accumulation

研究表明,猪粪中重金属超标率为 10.3%~69.0%,超标元素以 Cu、Zn 和 Cd 为主^[1]。DRECHSEL 等^[2]亦指出,污泥和猪粪中重金属含量一般高于其他来源的废弃物。任顺荣等^[3]研究发现,猪粪堆制的有机肥中 Cu、Zn 含量分别高达 $1\ 454$ 和 $1\ 763 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。反复大量施用含有较高浓度重金属的畜禽粪便,将会导致土壤及植物中重金属含量增加^[4]。据报道,畜禽粪便对土壤 Cu、Zn 积累的年贡献率分别为 37%~40% 和 8%~17%^[5]。因此,畜禽粪便的重金属污染治理已显得非常迫切。

有研究表明,蚓体组织内的黄色细胞具有蓄积

某些重金属的功能^[6],蚯蚓可以富集污泥或垃圾中的重金属^[7],并降低污泥中重金属含量(Zn、Fe、Pb 和 Cu)^[8]。朱维琴等^[9]研究发现,利用蚯蚓对猪粪和木屑进行混合堆制可同时达到猪粪安全化和资源化利用的目的。此外,废弃物蚯蚓堆制处理过程

收稿日期: 2011-09-17

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y306160); 杭州师范大学中青年培育基金(2010QN17); 杭州师范大学国家级一般项目培育基金(2010PYjj18); 杭州市属高校重点实验室科技创新项目(20090233T14)

① 通信作者 E-mail: zhwq-2000@tom.com

中保持适宜的培养条件对蚯蚓生长、繁殖及处理效率等尤其重要^[10]。SUTHAR^[8]亦发现蚯蚓接种密度对污泥中重金属减量及蚓体重金属富集具有重大影响。湿度和温度对于蚯蚓生长及活性也具有深远影响^[11-12]。但是,当前有关培养密度、湿度、温度等影响蚓体吸收和富集畜禽粪便中 Cu、Zn 的研究报道甚少。笔者基于蚯蚓堆制处理高 Cu、高 Zn 猪粪的初始优化条件,对蚯蚓堆制处理猪粪、木屑混合物过程中影响蚓体生长及其 Cu、Zn 吸收的因素进行深入探讨,以期为重污染农业有机废弃物的无害化处置及资源化利用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

主要试验材料为猪粪和杉木木屑,猪粪取自杭州余杭某养殖有限公司,木屑源自杭州某木材加工厂。将猪粪和木屑分别置于阴凉处自然风干,然后粉碎过 2 mm 孔径筛供试。供试蚯蚓为赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*),购自杭州半山某养殖场,试验前先对蚯蚓进行清肠和预培养,选择个体质量相近、环带明显的蚯蚓供试。供试猪粪及木屑的基本化学性质见表 1。

表 1 猪粪和木屑的基本化学性质

Table 1 Chemical properties of pig dung and sawdust

物料	pH 值	$w/(g \cdot kg^{-1})$		C/N 比值	$w/(mg \cdot kg^{-1})$	
		总 C	总 N		Cu	Zn
猪粪	7.8	368.7	28.1	13.07	1 569.81	2 978.10
木屑	5.3	504.1	1.2	420.08	8.01	9.05

1.2 试验设计

以猪粪为主料,木屑为辅料,采用 $L_9(3^4)$ 正交法^[9]进行预备试验,得到适宜蚯蚓堆制处理高 Cu、高 Zn 猪粪的大致条件为蚯蚓接种密度 $32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、培养温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 75%、猪粪与木屑配比(以干质量比计,下同)6:4,并以此作为控制条件,分别进行蚯蚓接种密度、湿度、温度、主辅料配比单因子试验。主要包括:(1)接种密度试验,设 5 种不同接种密度,即 16、32、40、48 和 $64 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,其余控制条件为湿度 75%、温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、主辅料配比 6:4;(2)湿度试验,设 5 个湿度处理水平,即 60%、65%、70%、75% 和 80%,其余控制条件为蚯蚓接种密度 $32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、主辅料配比 6:4;(3)温度试验,设 5 个温度处理水平,即 10、15、20、25 和 $30 \text{ }^\circ\text{C}$,其余控制条件为蚯蚓接种密度 $32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、湿度 75%、主辅料配比 6:4;(4)主辅料配比试验,

设 6 个不同配比水平,即 5:5、6:4、7:3、8:2、9:1 和 10:0,其余控制条件为蚯蚓接种密度 $32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、湿度 75%、温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。上述各处理基质按要求混配后,称取约 200 g 基质(以干质量计)装入内置有保鲜袋的塑料盆中,平衡 7 d 后接种蚯蚓,蚯蚓体质量为 $(0.38 \pm 0.03) \text{ g}$,塑料盆用扎有透气孔的保鲜膜封口,然后将各处理组置于相应条件的培养箱中培养 30 d,每隔 3 天补水(去离子水)1 次以维持基质湿度整体不变。每个处理设置 3 个重复。

1.3 样品分析

试验结束时,首先采集蚓体,用去离子水洗净、吸干,置于培养皿内清肠 24 h 后称质量,并统计蚓体数量。蚓体及基质中 Cu、Zn 总量采用 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 消煮,原子吸收分光光度计(AAS)测定。

1.4 数据分析

蚓体质量平均增量 = (试验末蚓体质量 - 初始蚓体质量) / 蚯蚓总数,其中试验末蚓体质量中包含蚓茧质量,并将 5 个蚓茧折合为 1 条蚯蚓计入蚯蚓总数;基质日消耗量 = (初始饵料干质量 - 养殖一定时间后饵料干质量) / 养殖时间;重金属富集量 = 蚓体重金属含量 × 养殖后蚓体总生物量。

采用 Statistic 5.0 软件进行数据处理和方差分析,采用 Tukey 法检验差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 不同条件因子对蚯蚓生长及基质消耗的影响

由表 2 可见,接种密度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 对蚯蚓生长和基质消耗最有利,蚓体质量平均增量极显著高于其他处理 ($P < 0.01$),而当接种密度进一步提高(48 和 $64 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)时,蚓体质量平均增量和基质日消耗量均显著降低 ($P < 0.05$ 或 0.01)。HAIT 等^[11]在利用赤子爱胜蚓处理初沉污泥时,亦发现接种密度过高会引起蚯蚓总生物量或个体生物量下降,且蚯蚓密度以 $32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 为宜。分析其原因可能在于接种密度过高导致蚯蚓生存空间及食物来源受限^[13]。

当湿度为 60% 时,蚓体质量平均增量及基质消耗受抑明显;75% 的湿度条件同时适宜于蚯蚓生长和基质消耗,蚓体质量平均增量和基质日消耗量均达最高;湿度达 80% 时,蚓体质量平均增量和基质日消耗量均极显著降低 ($P < 0.01$)。蚯蚓气体交换主要在体表进行,氧气可溶解于体表的湿润薄膜中,再渗入角质膜及上皮进而到达微血管丛,并与血浆中的血红蛋白结合后输送至体内各部分,因此,保持体表湿润有利于蚯蚓的呼吸作用。但湿度

过高同样不利于蚯蚓生长发育。SIMONSEN 等^[12]发现在莱茵河畔被淹频次最高的洪泛区,粉正蚓 (*Lumbricus rubellus*) 种群密度最小,蚓体质量也最低。

表 2 不同条件因子对蚯蚓生长及基质消耗量的影响

Table 2 Effects of various cultivation factors on earthworm growth and substrate consumption

条件因子	蚓体质量平均增量/ mg	基质日消耗量/ (g · d ⁻¹ · 盆 ⁻¹)
接种密度/(mg · g ⁻¹)		
16	252.4 ^{bcB}	1.08 ^{aA}
32	258.4 ^{bcB}	1.05 ^{aA}
40	357.8 ^{aA}	1.05 ^{aA}
48	266.4 ^{bB}	0.69 ^{bA}
64	210.7 ^{cB}	0.68 ^{bA}
湿度/%		
60	-187.7 ^{eE}	0.65 ^{bBC}
65	78.4 ^{dD}	1.23 ^{aAB}
70	125.0 ^{cC}	1.43 ^{aAB}
75	254.3 ^{aA}	1.44 ^{aA}
80	201.8 ^{bB}	0.46 ^{bC}
温度/℃		
10	335.5 ^{abA}	0.66 ^{bcAB}
15	362.9 ^{aA}	0.29 ^{cB}
20	265.1 ^{bAB}	1.43 ^{aA}
25	155.2 ^{cBC}	0.93 ^{abAB}
30	63.7 ^{cC}	1.29 ^{aA}
m(猪粪):m(木屑)		
5:5	73.1 ^{dD}	1.33 ^{aA}
6:4	258.4 ^{aA}	1.22 ^{abA}
7:3	181.4 ^{bB}	0.86 ^{abA}
8:2	106.4 ^{cC}	1.03 ^{abA}
9:1	108.3 ^{cC}	0.27 ^{bcAB}
10:0	27.9 ^{eE}	-0.66 ^{cB}

同一条件因子同列英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$),英文大写字母不同表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

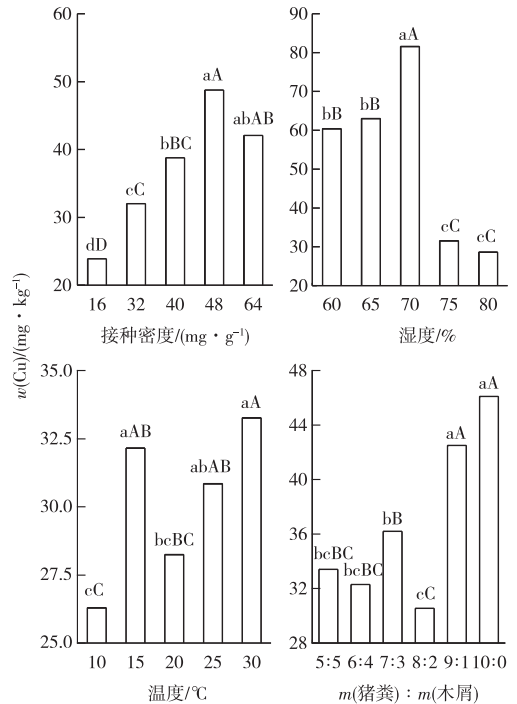
笔者研究中蚓体质量平均增量以 15 ℃ 处理最高,但与 10 ℃ 处理间差异未达显著水平。亦有报道认为温度为 20 ℃ 左右最适于蚯蚓堆制处理^[14],蚯蚓品系、处理基质及试验条件不同可能是导致差异的主要原因。该试验中温度达 25 ℃ 后蚓体质量平均增量呈显著降低趋势 ($P < 0.05$),这与 DOMINGUEZ 等^[15]的研究结果较为一致。然而,温度升高却有利于废弃物的减量消耗,20、25 和 30 ℃ 处理的基质日消耗量显著高于 10 和 15 ℃ 处理,这可能与高温促使蚯蚓堆制系统中微生物活性增强和基质好氧消耗加速有关^[15]。

适宜的主辅料配比对蚯蚓堆制系统至关重要,主辅料配比过高或过低均会抑制蚓体质量增加。笔者试验表明 m(猪粪):m(木屑)为 6:4 时蚓体质

量平均增量极显著高于其他处理 ($P < 0.01$);基质日消耗量随木屑添加量增加呈增加趋势,主辅料配比为 10:0 时基质日消耗量显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。KAUR 等^[16]利用赤子爱胜蚓处理造纸污泥与牛粪混合物时发现,m(牛粪):m(污泥)为 75:25 时,蚯蚓种群数量最高;而当 m(牛粪):m(污泥)为 25:45 或 0:100 时,个体生长受到抑制且出现不同程度的死亡现象。这与笔者试验结果相似。

2.2 不同条件因子下蚓体 Cu 含量及富集量变化

由图 1 和表 3 可见,随接种密度升高,蚓体 Cu 含量和富集量逐渐增大,接种密度为 48 mg · g⁻¹ 时蚓体 Cu 含量达最大,接种密度为 64 mg · g⁻¹ 时 Cu 富集量达最大,且这 2 个接种密度间蚓体 Cu 含量和富集量均无显著差异。SUTHAR^[8]发现适宜的接种密度(40 mg · g⁻¹)有助于基质中重金属(Pb 和 Cu)减量以及蚓体重金属富集。HAIT 等^[14]亦发现合理的接种密度(32 mg · g⁻¹)可极大地促进蚓体质量增加,间接提高蚓体对重金属的富集量。



同一幅图中英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$),英文大写字母不同表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

图 1 不同条件因子对蚓体 Cu 含量的影响
Fig.1 Effects of different cultivation factors on Cu content in earthworms

培养湿度和温度在一定程度上可决定蚓体质量及活性^[11-12],而蚯蚓活性又可直接左右其表皮、肠道对重金属的富集能力^[17]。由图 1 和表 3 可见,

当湿度为70%时,蚓体Cu含量和富集量达最大,且极显著高于其他处理($P < 0.01$);当湿度超过70%后,蚓体Cu含量和富集量均极显著降低($P < 0.01$)。蚓体Cu富集量以60%湿度处理最低,这可能与60%湿度处理蚓体质量平均增量出现负增长有关(表2)。10~30℃范围内,以15和30℃处理蚓体Cu含量相对较高,鉴于30℃时蚓体质量平均增量最低(表2),且蚓体Cu富集量在15℃时达最大,因此,15℃是蚓体吸收和富集Cu的最适宜温度。

表3 不同条件因子下蚓体Cu、Zn富集量变化

Table 3 Cu and Zn accumulation in earthworms as affected by cultivation conditions after 30 d incubation

条件因子	Cu 富集量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$)	Zn 富集量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$)
接种密度/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)		
16	13.56 ^{dC}	16.95 ^{cA}
32	44.94 ^{cB}	32.30 ^{bA}
40	65.21 ^{bB}	37.90 ^{abA}
48	97.02 ^{aA}	43.50 ^{abA}
64	102.84 ^{aA}	45.10 ^{aA}
湿度/%		
60	10.30 ^{eE}	4.10 ^{eB}
65	58.40 ^{bB}	25.60 ^{abAB}
70	82.57 ^{aA}	25.20 ^{bAB}
75	44.16 ^{cC}	30.80 ^{aA}
80	28.65 ^{dD}	22.30 ^{bAB}
温度/℃		
10	29.40 ^{bA}	25.50 ^{abAB}
15	40.90 ^{aA}	30.70 ^{aA}
20	38.05 ^{abA}	27.25 ^{abAB}
25	30.15 ^{bA}	19.55 ^{bB}
30	28.55 ^{bA}	19.55 ^{bB}
$m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})$		
5:5	29.25 ^{bcB}	17.35 ^{abA}
6:4	47.25 ^{aA}	22.00 ^{aA}
7:3	32.20 ^{bB}	20.40 ^{abA}
8:2	24.15 ^{cB}	18.40 ^{abA}
9:1	26.00 ^{bcB}	17.30 ^{bA}
10:0	29.05 ^{bcB}	18.80 ^{abA}

同一条件因子同列英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著($P < 0.05$),英文大写字母不同表示差异极显著($P < 0.01$)。

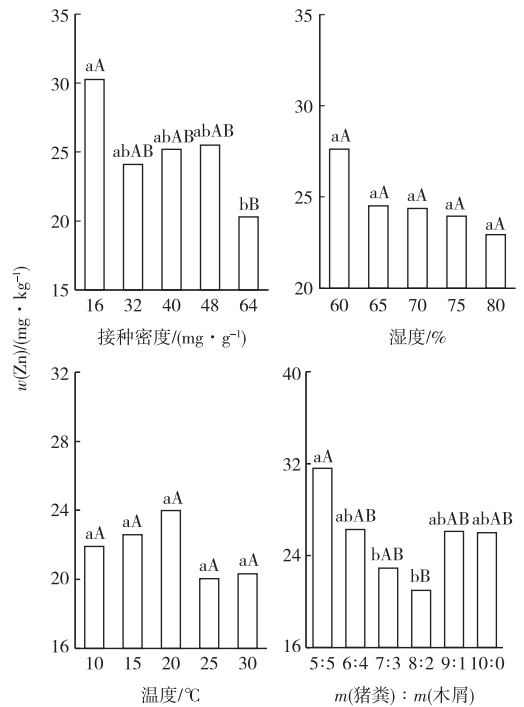
不同 $m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})$ 处理蚓体Cu含量由高到低依次为10:0、9:1、7:3、5:5、6:4和8:2,且9:1与10:0处理间,5:5、6:4与7:3处理间蚓体Cu含量均无显著差异。与蚓体Cu含量不同,蚓体Cu富集量在 $m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})$ 为6:4时极显著高于其他处理($P < 0.01$),达47.25 $\mu\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。可见,尽管碳源辅料配比低时蚓体Cu含量较高,但是较高的碳源辅料配比相对有利于蚓体Cu的富集,这可

能与较高的碳源辅料配比(6:4)下蚓体质量平均增量受到促进(表2)有关。这与OWOJORI等^[18]的研究结果类似。

综上所述,适宜的接种密度($48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、湿度(70%)、温度(15℃)及较高的碳源辅料配比[$m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})=6:4$]相对有利于蚓体对Cu的吸收和富集。

2.3 不同条件因子下蚓体Zn含量及富集量变化

由表3和图2可见,接种密度为 $16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,蚓体Zn含量高达 $30.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,随着接种密度升高,蚓体Zn含量呈下降趋势;而蚓体Zn富集量随着接种密度增加而升高,但40、48及 $64 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 处理间差异未达显著水平,这可能与高接种密度下蚓体总生物增加但蚓体Zn含量降低有关。



同一幅图中英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著($P < 0.05$),英文大写字母不同表示差异极显著($P < 0.01$)。

图2 不同条件因子对蚓体Zn含量的影响
Fig. 2 Effects of different cultivation factors on Zn content in earthworms

湿度和温度对蚓体Zn含量均无显著影响,但蚓体Zn富集量分别在湿度为75%和温度为15℃时达最大,这与该湿度和温度条件下蚓体质量平均增量最高有关,说明湿度和温度可通过影响蚯蚓生长进而影响其对Zn的富集。

就不同主辅料配比处理而言,蚓体Zn含量在辅料比例高[$m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})=5:5$]时相对较

高,但与主辅料配比为 6:4、9:1、10:0 处理间无显著差异;主辅料配比为 7:3 和 8:2 时蚓体 Zn 含量较低,均显著低于主辅料配比为 5:5 处理;蚓体 Zn 富集量在主辅料配比为 6:4 时达最大,但与多数处理间无显著差异。另有研究发现,含碳辅料比例增高可促进蚯蚓生长,但会稀释基质中重金属含量^[8,16],进而影响蚓体对废弃物中重金属的吸收和富集,这亦可能是笔者研究中蚓体 Zn 含量与富集量变化产生差异的原因。

可见,低接种密度和高比例碳源辅料均有利于蚓体 Zn 的吸收,但蚓体 Zn 富集量以接种密度 48 mg·g⁻¹ 以及 $m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})=6:4$ 为宜;湿度和温度对蚓体 Zn 的吸收无显著影响,但湿度 75% 及温度 15 °C 相对有利于蚓体对 Zn 的富集。

3 结论

(1) 接种密度为 40 mg·g⁻¹ 对蚯蚓生长和基质消耗最有利,接种密度过高会显著降低蚓体质量平均增量和基质日消耗量;75% 的湿度条件同时有利于蚓体质量增加和基质消耗;温度为 15 °C 对蚓体质量增加最有利,而温度为 20 °C 最利于基质消耗;适宜的主辅料配比 [$m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})=6:4$] 方可获取较高的蚓体生物量,同时有助于基质消耗。

(2) 适宜的接种密度 (48 mg·g⁻¹)、湿度 (70%)、温度 (15 °C) 及较高的碳源辅料配比 [$m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})=6:4$] 相对有利于蚓体对 Cu 的吸收和富集。

(3) 低接种密度和高比例碳源辅料有利于蚓体对 Zn 的吸收,而湿度和温度对蚓体 Zn 的吸收无显著影响;对于蚯蚓 Zn 富集的最适条件为:接种密度 48 mg·g⁻¹, $m(\text{猪粪}):m(\text{木屑})=6:4$, 湿度 75% 和温度 15 °C。

参考文献:

[1] 刘荣乐,李书田,王秀斌,等.我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J].农业环境科学学报,2005,24(2):392-397.

[2] DRECHSEL P, KUNZE D. Waste Composting for Urban and Peri-Urban Agriculture: Closing the Rural-Urban Nutrient Cycle in Sub-Saharan Africa[M]. London: CABI Publishing, 2001: 139-148.

[3] 任顺荣,邵玉翠,王正祥.利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析[J].农业环境科学学报,2005,24(增刊):216-218.

[4] 郭丹,朱维琴,林娟.杭州市主要地区农田土壤重金属污染评价

及关联特征研究[J].杭州师范大学学报,2009,8(2):138-143.

[5] NICHOLSON F A, SMITH S R, ALLOWAY B J, et al. An Inventory of Heavy Metal Inputs to Agricultural Soil in England and Wales [J]. Science of the Total Environment, 2003, 311 (1/2/3): 205-219.

[6] FISHER E, MOLNAR L. Environmental Aspects of the Chloragogenous Tissue of Earthworms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(12):1723-1727.

[7] 郭永灿,王振中,张友梅,等.重金属对蚯蚓的毒性毒理研究[J].应用与环境生物学报,1996,2(1):132-140.

[8] SUTHAR S. Pilot-Scale Vermireactors for Sewage Sludge Stabilization and Metal Remediation Process: Comparison With Small-Scale Vermireactors [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(5):703-712.

[9] 朱维琴,贾秀英,王玉洁,等.农业有机废弃物蚯蚓堆制因素优化及堆制产物主要性状变化特征[J].生态与农村环境学报,2009,25(4):77-82.

[10] 单监利,张志,朱维琴,等.畜粪、木屑混合物蚯蚓堆制过程中蚓体生长的影响因素研究[J].杭州师范大学学报,2011,10(6):491-496.

[11] HAIT S, TARE V. Vermistabilization of Primary Sewage Sludge [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3):2812-2820.

[12] SIMONSEN V, KLOK C. Genetic and Ecological Impacts of Heavy Metal and Flooding Stress on the Earthworm *Lumbricus rubellus* in Floodplains of the Rhine River [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(2):270-275.

[13] MONROY F, AIRA M, DOMINGUEZ J, et al. Seasonal Population Dynamics of *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) (*Oligochaeta, Lumbricidae*) in the Field [J]. Comptes Rendus Biologies, 2006, 329(11):912-915.

[14] HAIT S, TARE V. Optimizing Vermistabilization of Waste Activated Sludge Using Vermicompost as Bulking Material [J]. Waste Management, 2011, 31(3):502-511.

[15] DOMINGUEZ J, EDWARDS C A. Vermicomposting Organic Wastes: A Review [C] // Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century. Cairo: [s. n.], 2004:369-395.

[16] KAUR A, SINGH J, VIG A P, et al. Cocomposting With and Without *Eisenia fetida* for Conversion of Toxic Paper Mill Sludge to a Soil Conditioner [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(21):8192-8198.

[17] BARTLETT M D, BRIONES M J I, NEILSON R, et al. A Critical Review of Current Methods in Earthworm Ecology: From Individuals to Populations [J]. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(2):67-73.

[18] OWOJORI O J, REINECKE A J, ROZANOV A B. Influence of Clay Content on Bioavailability of Copper in the Earthworm *Eisenia fetida* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73(3):407-414.

作者简介:胡安(1986—),男,安徽安庆人,硕士生,主要从事废弃物资源化及环境生物修复研究。E-mail: huan-juan@163.com