

王海候, 孟祥国, 金梅娟, 等. 蚯蚓生物消解尾菜废弃物工艺参数优化[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 694-702.

WANG Hai-hou, MENG Xiang-guo, JIN Mei-juan, et al. Optimization of parameters of earthworm digestion of vegetable waste[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 694-702.

蚯蚓生物消解尾菜废弃物工艺参数优化

王海候, 孟祥国, 金梅娟, 施林林, 周新伟, 陆长婴, 沈明星*

(江苏太湖地区农业科学研究所/农业农村部苏州水稻土生态环境重点野外科学观测试验站, 江苏 苏州 215155)

摘要:为优化蚯蚓生物消解尾菜废弃物的技术工艺,以尾菜废弃物为供试对象,采用实验室模拟方法,分别设置5种影响因子的不同梯度水平:物料腐烂时间为7、14、21、28、35 d, C/N为12、18、24、30、36,含水率为40%、50%、60%、70%、80%,环境温度为8、16、24、32、40 ℃,投放密度为20、40、60、80、100条·kg⁻¹,并进行了工艺参数优化的效果验证,测定了蚯蚓培养前后群体质量、数量变化率及物料消解率,研究了不同工艺因子对蚯蚓生物消解尾菜废弃物的影响,并进一步优化各因子的技术参数。结果表明:尾菜废弃物腐烂率、C/N、含水率及环境温度、蚯蚓投放密度均对物料消解率存在影响,蚯蚓消解尾菜废弃物能力与物料腐烂率、蚯蚓投放密度均呈极显著的对数曲线相关($P<0.01$),而与物料C/N、含水率及环境温度呈极显著的开口向下一元二次抛物线相关($P<0.01$);根据曲线拟合方程,应用蚯蚓生物消解技术处理尾菜废弃物,各项工艺参数优化值分别为:物料腐烂率 $\geq 40.67\%$ (即预堆制11 d以上)、物料C/N为27.79、物料含水率为69.61%、环境温度为26.23 ℃、蚯蚓投放密度为57.17条·kg⁻¹;与CK处理相比,工艺参数优化处理显著提高了蚯蚓重量及物料消解率($P<0.05$)。

关键词:尾菜废弃物;蚯蚓;物料消解率;影响因子;参数优化

中图分类号:X712

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)05-0694-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0384

Optimization of parameters of earthworm digestion of vegetable waste

WANG Hai-hou, MENG Xiang-guo, JIN Mei-juan, SHI Lin-lin, ZHOU Xin-wei, LU Chang-ying, SHEN Ming-xing*

(Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Key Scientific Observation & Experiment Station Paddy Field for Eco-environment, Suzhou, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Suzhou 215155, China)

Abstract: Earthworm digestion has emerged as an effective method for resource utilization of organic materials in recent years. A laboratory simulation study was conducted to determine the optimum process parameters for earthworm digestion of vegetable waste and verified the efficiency of these parameters on earthworm digestion. Five different influence factors with different levels were established: (1) Material decay time of 7, 14, 21, 28, and 35 d; (2) Material C/N of 12, 18, 24, 30, and 36; (3) Moisture content of 40%, 50%, 60%, 70%, and 80%; (4) Environment temperature of 8, 16, 24, 32, and 40 ℃; (5) Earthworm density of 20, 40, 60, 80, and 100 per kg of vegetable waste. The population quality, quantity change rate, and material digestion rate of the earthworms before and after cultivation were tested. The material decay ratio, material C/N, material moisture content, environmental temperature, and earthworm density all exerted significant effects on the earthworm digestion ability. There was a significantly logarithmic curve regularity ($P<0.01$) between earthworm digestion ability and material decay ratio as well as between earthworm digestion ability and earthworm density. However, the relationships between earthworm digestion ability with material C/N, material moisture content, and environment temperature were all downward parabolic curve correlations ($P<0.01$). According to the fitting curve equation, the optimization value of each process parameter of earthworm digestion was as follows: Material decay ratio was larger than 40.67% (i.e., pre-heap for more than 11 d); Material C/N was 27.79, Material moisture content was

收稿日期:2018-12-25 录用日期:2019-03-09

作者简介:王海候(1979—),男,江苏启东人,副研究员,主要从事农业废弃物资源化处置技术及其应用研究。E-mail: wanghaihou@126.com

*通信作者:沈明星 E-mail: smxwwj@163.com

基金项目:江苏省重点研发计划项目(BE2018387-3);苏州市科技计划项目(SNG201646)

Project supported: Key Research and Development Program of Jiangsu Province (BE2018387-3); Science and Technology Development Program of Suzhou (SNG201646)

69.61%; The environment temperature was 26.23 °C, and earthworm density was 57.17 per kg of vegetable waste. Compared with the CK treatment, the process parameter optimization treatment significantly improved earthworm weight and material digestion rate ($P<0.05$).

Keywords: vegetable waste; earthworms; material digestion rate; influence factor; parameter optimization

尾菜废弃物是蔬菜生产、采收、运输、加工和销售过程中为提高其商品性而剥离的伤、病、残叶及留在田间地头的藤蔓枯枝等废弃物。不同类型蔬菜的废弃物产生量不同,尾菜废弃物可占蔬菜产量的30%~60%^[1],据估算,2013年我国尾菜废弃物产生量高达 2.69×10^7 t^[2],已成为仅次于水稻、玉米和小麦秸秆的第四大农作物废弃物^[3]。由于尾菜废弃物含水率高、保存周期短、不易运输,易腐烂并引发恶臭,现已成为污染农业生产及农村和城市生态环境的一大“公害”^[4-5]。但是尾菜废弃物中含较高的营养成分,如:氮(2.02%~5.69%)、磷(0.29%~3.25%)和钾(0.49%~5.37%)(以干物质计算),是一种良好的有机物料^[6-7]。因此,如何将尾菜废弃物变废为宝,减少资源浪费和环境污染,是目前亟待解决的问题。

蚯蚓是一种以腐败有机物为食的杂食性动物,蚯蚓生物消解是在常温有氧条件下吞食有机物,通过肠道物理破碎及微生物的协同作用对有机固体废弃物进行生物氧化和转化,形成富含腐殖质和营养元素的蚓粪有机肥^[8]。目前,蚯蚓生物消解技术已经广泛应用于畜禽粪便、城市污泥等有机固体废弃物的生物处置工程^[9-12],有效实现了有机固体废弃物的资源化、减量化、无害化利用。另外,研究表明蚯蚓消解废弃物的能力与有机物料成分性状及环境因子密切相关,如:Garg等^[13]发现蚯蚓在相同环境条件下对不同类型有机物料的处理能力也不一致,处理效率由高到低呈现为纺织污泥和纤维>公共有机废弃物>农业废弃物>厨房垃圾;仓龙等^[14]研究认为蚯蚓处理不同物料的适宜技术参数也不一致,蚯蚓处理未腐熟牛粪、猪粪、鸡粪的适宜含水率分别为70%、75%、65%。尾菜废弃物具有高有机质含量和无毒害性的特性决定它可以作为蚯蚓的食物来源^[5],已有研究以常规高温好氧发酵或自然堆制为对照,比较了果皮、叶菜、藤蔓等蔬菜废弃物经蚯蚓生物处置后的蚓粪有机肥性状差

异及农田再利用效应^[5,15-17];另外,尾菜废弃物的物理化学性状区别于畜禽粪便、污泥等其他有机物料^[13-14],利用蚯蚓生物消解尾菜废弃物的技术工艺不可直接照搬蚯蚓处理其他有机废弃物的技术参数,而有关蚯蚓生物消解尾菜废弃物的影响因子及技术参数优化等研究鲜见报道。因此,本文拟研究物料腐烂率、C/N、含水率、环境温度、投放密度等技术因子对蚯蚓消解尾菜废弃物效率的影响,并量化各工艺参数的适宜值,旨在为尾菜废弃物妥善处置及循环利用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试蚯蚓

选择具有成熟环、健康活泼的赤子爱胜蚓作为供试蚓种。蚯蚓鲜质量 $0.25 \sim 0.30$ g·条⁻¹,长约5 cm。

1.1.2 供试物料

选择尾菜废弃物、牛粪、秸秆作为供试有机物料(表1)。尾菜废弃物取自苏州市相城区望亭镇御亭现代农业园,牛粪取自附近奶牛养殖场。尾菜废弃物主要为废弃的果、叶、根茎、藤蔓等混合鲜样,进行1~3 cm破碎,备用。秸秆取自附近农场的水稻秸秆,进行0.2~0.5 cm粉碎、备用。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

试验于2017年3月—2018年10月在江苏太湖地区农业科学研究所实验室内进行。试验围绕物料腐烂程度、C/N、含水率及环境温度、蚯蚓投放密度对物料消解能力的影响,分别开展了5种因子不同梯度水平的实验室模拟研究,具体如下:

(1)物料腐烂程度对蚯蚓消解能力的影响(试验1)。试验首先堆制总质量约1000 kg、C/N约为25的尾菜废弃物混合堆肥体。将800 kg新鲜尾菜废弃物

表1 初始物料的基本性质

Table 1 Properties of initial materials

物料 Material	含水率 Moisture content/%	有机碳 Organic carbon/%	全氮 Total nitrogen/%	C/N
尾菜混合物 Vegetable waste mixture	81.22	37.88	2.28	16.61
牛粪 Cow manure	53.61	32.57	1.03	31.62
秸秆 Straw	22.84	42.69	0.77	55.44

(废果 100 kg、废叶 340 kg、根茎 180 kg、藤蔓 180 kg)与 100 kg 牛粪、100 kg 秸秆粉末充分混合,控制水分 65%~75%,堆成垛状并覆盖薄膜,同时,将混合均匀的尾菜废弃物装入细孔尼龙网袋,每袋 1 kg,共计 15 袋,一起放入垛状堆体内部,进行好氧堆制腐解。试验设计于堆制第 7、14、21、28、35 d,通过多点采样的方法,不同腐烂程度的混合物料分别采集 6 kg,作为 5 个不同腐烂程度处理的供试材料,置于-18 ℃冰箱中保存备用。每次采集物料的同时,从堆体内部抽出 3 袋样品,进行人工筛分并计算物料腐烂率。另外,每次采集物料后,混合堆肥体进行翻堆处理。

蚯蚓培养试验在高 20 cm、上口直径 25 cm 和下底直径 18 cm 的塑料盆中进行。盆底粘贴无纺布,透气同时防止蚯蚓逃跑。每盆装入不同腐烂程度的尾菜腐烂物料 1000 g,物料含水率 60%~70%,接种蚯蚓 50 条,盆口用纱布覆盖并扎紧,每个处理重复 3 次,置于人工气候箱内,设置温度为 25 ℃进行培养。每隔 2~3 d 用称量法保持物料湿度,整个试验持续 45 d。培养结束后,将盆中的物料全部倒出,仔细分离出蚯蚓、蚓粪、未消解的物料,并分别计数与计量。

(2)物料 C/N 对蚯蚓消解能力的影响(试验 2)。试验设计 5 个不同 C/N 处理,分别为 12、18、24、30、36。以试验 1 的混合物料为基础,在堆制第 21 d 取尾菜混合腐烂物料 20 kg,分为 5 份,先测定尾菜混合物料的含水率、全氮、全碳含量,通过向混合物料中添加干鸡粪粉末(全碳含量为 30.9%、全氮含量为 3.81%)或秸秆粉末的方法,计算并配制成不同 C/N 物料,之后每盆装入物料 1000 g,物料含水率 60%~70%,接种蚯蚓 50 条,重复 3 次。蚯蚓培养过程的管理方式及测定内容与试验 1 相同。

(3)物料含水率对蚯蚓消解能力的影响(试验 3)。试验设计 5 个不同含水率处理,分别为 40%、50%、60%、70%、80%。以试验 1 的混合物料为基础,在堆制第 21 d 取尾菜混合腐烂物料 20 kg,分为 5 份,通过风干或加水的方式,配制成不同含水率物料,每盆装入物料 1000 g,接种蚯蚓 50 条,重复 3 次。蚯蚓培养过程的管理方式及测定内容与试验 1 相同。

(4)环境温度对蚯蚓消解能力的影响(试验 4)。试验设计 5 个不同环境温度处理,分别为 8、16、24、32、40 ℃。以试验 1 的混合物料为基础,在堆制第 21 d 取尾菜混合腐烂物料 20 kg,混合均匀后,每盆装入物料 1000 g,物料含水率 60%~70%,接种蚯蚓 50 条,重复 3 次。置于人工气候箱内,分别设置不同温度进

行培养。蚯蚓培养过程的管理方式及测定内容与试验 1 相同。

(5)蚯蚓投放密度对物料消解能力的影响(试验 5)。试验设计每 1000 g 物料投放 5 个不同蚯蚓密度处理,分别为 20、40、60、80、100 条·kg⁻¹。以试验 1 的混合物料为基础,在堆制第 21 d 取尾菜混合腐烂物料 20 kg,混合均匀后,每盆装入物料 1000 g,物料含水率 60%~70%,分别接种不同密度的蚯蚓,重复 3 次。蚯蚓培养过程的管理方式及测定内容与试验 1 相同。

(6)蚯蚓生物消解尾菜废弃物工艺参数优化的效果(试验 6)。试验于 2018 年 9—10 月进行,以工艺参数优化措施为处理,以生产中常见措施(直接投喂、打浆投喂)为对照,分别用 TR、CK1、CK2 表示。TR 处理:取试验 1 过程堆制第 14、21、28 d 的物料各 2 kg,然后将 3 种不同腐烂程度的物料充分混合均匀,备用;CK 处理:取新鲜尾菜废弃物 20 kg(废果、废叶、根茎、藤蔓鲜质量比参照试验 1),先用剪刀进行 5~7 cm 破碎处理,再充分混合均匀,均分为 2 份,一份直接备用(CK1),一份采用加水打浆的方法进行打浆处理(CK2)备用。

蚯蚓培养试验在高 20 cm、上口直径 25 cm 和下底直径 18 cm 的塑料盆中进行。盆底粘贴无纺布,透气同时防止蚯蚓逃跑。每盆塑料盆底部先均铺一层厚度为 5 cm 且适宜蚯蚓生存的蚯蚓粪、接种蚯蚓 60 条。TR 处理:每盆装入半腐烂物料 1000 g、物料含水率约 70%、C/N 约 26,盆口用纱布覆盖并扎紧,每个处理重复 5 次,置于人工气候箱内,设置温度为 26 ℃进行培养,每隔 2~3 d 用称量法保持物料湿度。CK1 处理:每盆装入 5~7 cm 破碎处理的物料 1000 g、含水率约 55%、C/N 约 16;CK2 处理:每盆装入打浆处理的物料 1000 g、含水率约 85%、C/N 约 16;CK 处理的塑料培养盆全部置于室外,仅遮阳无避雨措施。整个试验持续 45 d。培养结束后,将盆中的物料全部倒出,仔细分离出蚯蚓、蚓粪、未消解的物料,并分别计数与计量。

1.2.2 测试指标与方法

(1)物料腐烂率:将尼龙网袋中的物料全部倒出,通过人工筛分的方法,将混合物料中已腐烂与未腐烂的物料分开,分别测定鲜质量与含水率,之后按下式计算:物料的腐烂率=(初始干物质总质量-未腐烂部分干物质质量)/初始干物质总质量×100%。

(2)物料消解率:将塑料盆中的物料全部倒出,通过人工筛分的方法,将未经蚯蚓过腹的物料、蚓粪、蚯

蚓分开,分别测定未经蚯蚓过腹物料的鲜质量与含水率,之后按下式计算:物料的消解率=(初始干物质总质量-未消解部分干物质质量)/初始干物质总质量×100%。

(3) 蚓质量变化率^[12]:培养处理前后蚯蚓鲜质量的增长率,按下式计算:蚓质量变化率=(培养结束后蚯蚓鲜质量-培养初始蚯蚓鲜质量)/培养初始蚯蚓鲜质量×100%。

(4) 蚓数变化率^[12]:蚓数包括了成蚓、幼蚓及蚓茧数量,指培养前后的蚯蚓数量增长率,按下式计算:蚓数变化率=(培养结束后蚯蚓数量-培养初始蚯蚓数量)/培养初始蚯蚓数量×100%。

1.3 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理与作图,SPSS 23.0 进行方差分析及曲线估算分析。分别以物料腐烂率、C/N、含水率、环境温度、投放密度为因子进行单因素方差分析[One-way ANOVA, Dunnett' St-test(2-sided)],利用多重比较(LSD法)对处理组间的均值进行差异显著性检验。利用曲线估算分析分别对不同工艺参数进行曲线拟合,根据拟合方程提出优化参数值。

2 结果与分析

2.1 不同腐烂率物料对蚯蚓消解能力的影响

蚯蚓喜欢吞食细软的物料,每日的吞食量相当于自身重量,物料通过消化道约有50%~70%作为粪便排出^[18]。本试验的供试材料主要为农业园区的废弃尾菜混合物,包括废弃的果、叶、根茎、藤蔓等新鲜物料混合物,蚯蚓吞食前需进行腐烂处理,为此,本研究采用好氧发酵方式,促进尾菜腐烂。尾菜废弃物腐烂率与堆制时间的关系如图1所示。由图1可知,随着

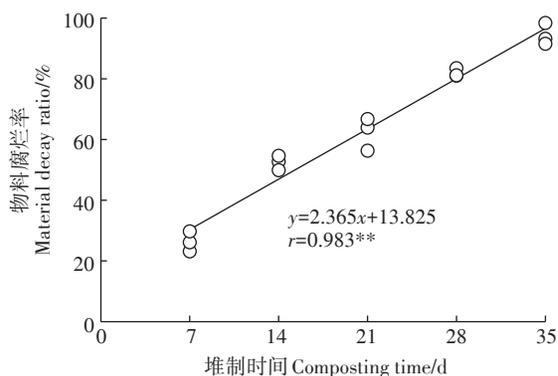


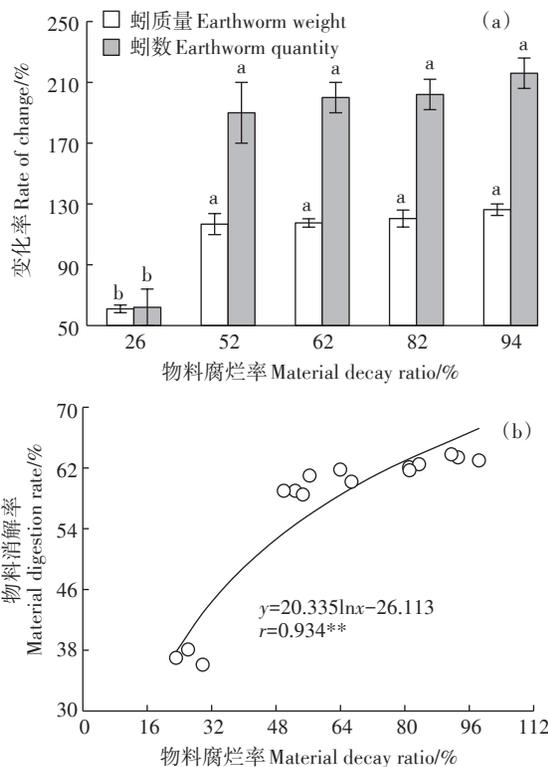
图1 蔬菜物料腐烂率与堆制时间的关系

Figure 1 The relationship between decay ratio of vegetable waste and composting time

堆制时间的增加,尾菜废弃物料的腐烂率呈上升的趋势;堆制14 d后,尾菜腐烂率已达52.44%;堆制35 d后,腐烂率达94.39%。统计分析结果表明,尾菜物料腐烂率与堆制时间呈极显著的正相关($r=0.983, P<0.01$)。

应用不同腐烂程度的尾菜物料进行蚯蚓培养试验,由图2a可知,不同腐烂率物料处理的蚯蚓质量、数量具有差异性,随着物料腐烂率的提升,蚯蚓质量与数量均呈上升的变化趋势。统计分析结果表明,尾菜物料腐烂率为26%处理(堆制后7 d)的蚓群质量与数量的变化率显著小于尾菜物料腐烂率高于50%的处理(堆制时间 ≥ 14 d)($P<0.05$),而腐烂率为52%(堆制后14 d)、62%(堆制后21 d)、82%(堆制后28 d)、94%(堆制后35 d)处理之间的蚯蚓质量、数量无显著差异性($P>0.05$)。

由图2b可知,蚯蚓对尾菜废弃物的消解率随着物料腐烂率的增加而呈上升的趋势。以尾菜废弃物腐烂率为x轴、物料消解率为y轴进行曲线拟合分析,结果表明:物料腐烂率与物料消解率呈极显著的对数



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

The different lowercase letters indicate significant difference among treatments($P<0.05$). The same below

图2 不同腐烂率物料对蚯蚓消解能力的影响

Figure 2 Effects of different decay ratio of materials on digestion ability of earthworms

曲线相关($r=0.934, P<0.01$),说明提高物料的腐烂率可以促进蚯蚓对物料的消解率,但随着物料腐烂率的增加,这种作用贡献率在显著弱化。进一步对回归方程进行求导分析,获得导函数 $y'=20.335/x$,以 $y'\leq 0.5$ 为斜率临界,则 $x\geq 40.67\%$,即尾菜废弃物的适宜腐烂率 $\geq 40.67\%$,适合蚯蚓消解处理。

2.2 不同 C/N 物料对蚯蚓消解能力的影响

蚯蚓消解物料能力对尾菜废弃物 C/N 的响应具有差异性。由图 3a 可知, C/N 为 24 处理的蚯蚓质量与数量变化率最大,再增加或降低物料 C/N,蚯蚓群体的质量与数量变化率均呈下降的趋势。C/N 为 12 的处理,培养 45 d 后,蚯蚓群体不仅没有增加反而减少,说明 C/N 为 12 的处理不适宜蚯蚓生长。统计分析结果表明,不同 C/N 处理的蚯蚓质量、数量变化率具有显著的差异性($P<0.05$)。

蚯蚓群体变化率的差异直接影响了蚯蚓对尾菜废弃物的消解能力,由图 3b 可知,在 C/N 为 12~36 范围内,物料消解率随着 C/N 的增加呈先上升后下降的变化趋势,以尾菜废弃物 C/N 为 x 轴、物料消解率为 y 轴进行曲线拟合分析,结果表明:物料 C/N 与物料消解率呈开口向下的一元二次抛物线相关,相关性为极

显著水平($r=0.957, P<0.01$)。根据回归方程,实现尾菜废弃物最大比例的消解处理,尾菜混合体的初始 C/N 宜为 27.79。

2.3 不同含水率物料对蚯蚓消解能力的影响

图 4a 为尾菜废弃物不同含水率处理下蚯蚓群体质量与数量变化率。统计分析结果表明,物料含水率对蚯蚓群体变化率具有显著影响($P<0.05$),在 40%~80% 范围内,提高物料含水率显著增加了蚯蚓群体质量与数量的变化率,至含水率为 70% 时,蚓群数量与质量变化率达最大值,再提高物料的含水率,蚓群的数量与质量变化率显著下降。

尾菜废弃物不同含水率处理的消解率分析结果见图 4b。随着尾菜废弃物含水率的增加,在相同培养时间内,蚯蚓对物料的消解率呈先上升后下降的变化趋势。以尾菜废弃物含水率为 x 轴、物料消解率为 y 轴进行曲线拟合分析,结果表明:物料含水率与物料消解率呈极显著一元二次抛物线相关($r=0.953, P<0.01$)。根据回归方程,实现尾菜物料最大比例的消解处理,尾菜物料的含水率宜为 69.61%。

2.4 不同环境温度对蚯蚓消解能力的影响

蚯蚓是变温动物,受环境温度影响较大。由图

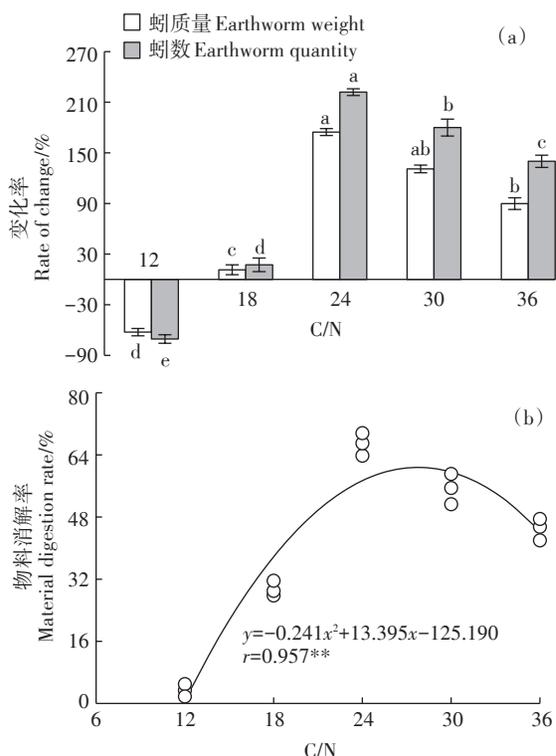


图 3 不同 C/N 物料对蚯蚓消解能力的影响

Figure 3 Effects of different C/N of materials on digestion ability of earthworms

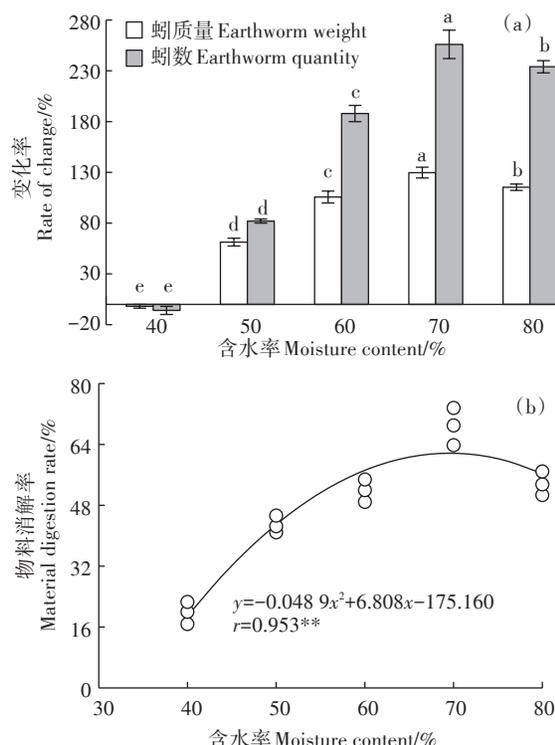


图 4 不同含水率物料对蚯蚓消解能力的影响

Figure 4 Effects of different moisture content of materials on digestion ability of earthworms

5a可知,环境温度显著影响蚯蚓群体的质量与数量变化率($P<0.05$),环境温度为24℃处理时,蚯蚓质量与数量变化率最大,降低与升高环境温度均不利于蚯蚓群体质量与数量的增加,8℃低温处理不利于蚯蚓生长繁殖,蚯蚓群体的质量与数量变化率均较小;40℃高温处理下,培养前后的蚓群质量与数量变化率为负值,说明高温处理导致蚯蚓死亡现象的发生。

由图5b可知,随着环境温度的提高,尾菜废弃物的消解率呈先上升后下降的趋势。以环境温度为 x 轴、物料消解率为 y 轴进行曲线拟合分析,结果表明,环境温度与物料消解率呈开口向下的一元二次抛物线相关,相关性达极显著水平($r=0.941, P<0.01$)。根据回归方程,实现尾菜废弃物最大比例的消解处理,蚯蚓生长繁殖的环境温度宜为26.23℃。

2.5 蚯蚓不同投放密度对其消解能力的影响

蚯蚓投放密度直接决定尾菜废弃物的消解能力,一般而言投放的蚯蚓群体越多,其消解物料的能力越强。然而,蚯蚓的自我繁殖与生长也受蚯蚓密度的影响,结果(图6a)表明,培养前后,蚯蚓群体数量与质量变化率均随初始投放密度的增加而呈下降的趋势,

且不同投放密度处理之间的蚓群变化率差异达显著水平($P<0.05$)。

由图6b可知,不同处理之间的尾菜废弃物消解率,随着蚯蚓投放密度的增加呈上升的趋势,蚯蚓密度20~80条·kg⁻¹时,尾菜物料消解率升幅较大,在蚯蚓密度80~100条·kg⁻¹时,尾菜物料消解率升幅逐渐平缓。以蚯蚓投放密度为 x 轴、物料消解率为 y 轴进行曲线拟合分析,结果表明,蚯蚓投放密度与物料消解率呈极显著对数曲线相关($r=0.957, P<0.01$),说明提高蚯蚓投放密度可以促进蚯蚓对物料的消解率,但增加蚯蚓密度对物料消解率的贡献作用并不会直线上升。通过对回归方程进行求导分析,并以 $y' \leq 0.5$ 为斜率临界,则 $x \geq 57.17$ 条·kg⁻¹,即蚯蚓初始的投放密度不低于57.17条·kg⁻¹,则适合蚯蚓最大效率地实现消解处理。

2.6 蚯蚓生物消解尾菜废弃物工艺参数优化的效果

根据腐烂率、C/N、含水率、环境温度、蚯蚓投放密度等技术参数的适宜值,应用优化后的蚯蚓生物消解尾菜废弃物技术工艺(TR),同时以生产中常见措施[尾菜废弃物直接投喂(CK1)、打浆投喂(CK2)]为

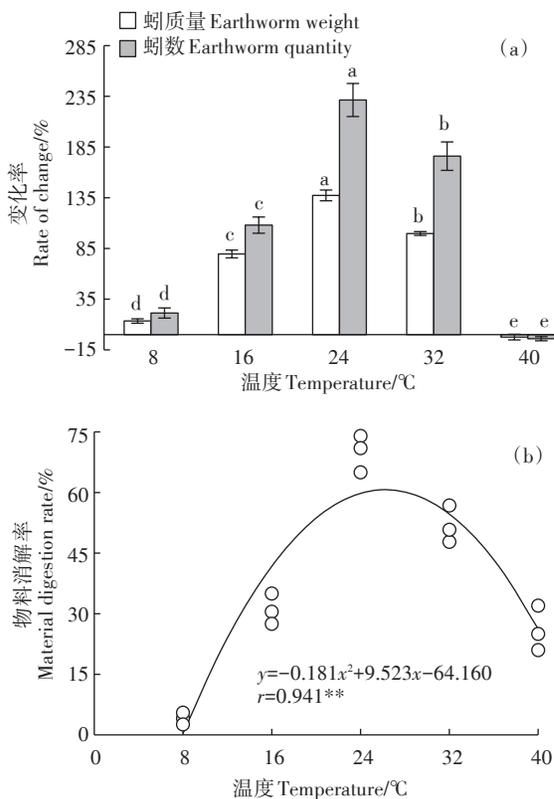


图5 不同环境温度对蚯蚓消解能力的影响

Figure 5 Effects of different ambient temperature on digestion ability of earthworms

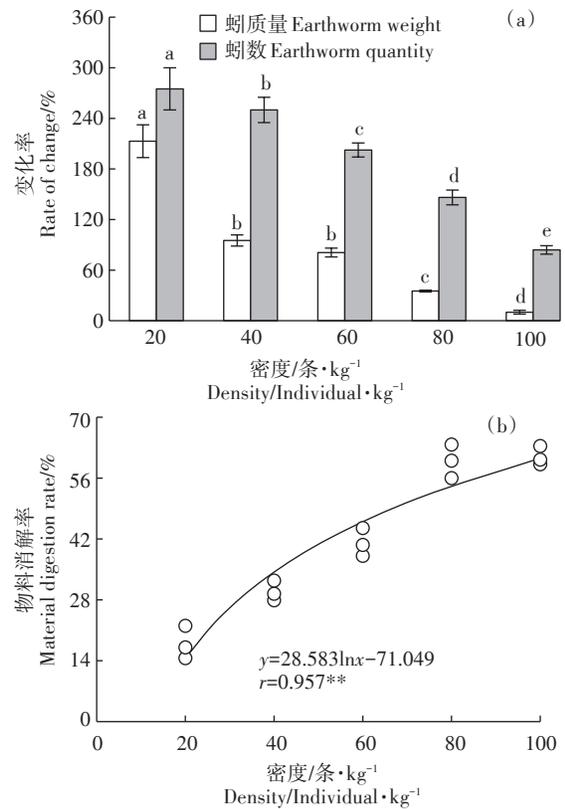


图6 不同投放密度对蚯蚓消解能力的影响

Figure 6 Effects of different densities on digestion ability of earthworms

对照,比较工艺优化后蚯蚓消解物料能力、蚓质量的变化。结果(图7)表明,TR处理的蚓质量变化率较CK1、CK2提高了69.0、36.1个百分点;TR处理的物料消解率较CK1、CK2提高了40.1、21.6个百分点。统计分析结果表明,优化的工艺措施显著提高了蚓质量变化率、物料消解率($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 物料腐烂率与蚯蚓消解能力的关系

蚯蚓对腐烂物料有食性偏好,本研究结果表明,蚯蚓对尾菜废弃物的消解能力随着物料腐烂率的增加而呈上升的趋势;张雪萍等^[19]研究蚯蚓对不同腐烂程度的木本植物叶片的摄食量,发现蚯蚓对半腐烂叶的消耗量明显大于未腐烂叶的消耗量,与本研究结果一致。有机物料经腐烂后,提高了蚯蚓吞食的适口性,既有利于蚯蚓进食,也有利于蚯蚓对有机物料的消化^[20],蚯蚓体内不但富含蛋白酶、脂肪分解酶、纤维酶、甲壳酶、淀粉酶等活性物质,且蚯蚓消化道中还有大量的细菌、酶菌、放线菌等微生物^[21],随蚓粪排出后,可促进尾菜废弃物的腐烂,蚯蚓与微生物存在协

同作用与相互促进作用^[22]。另外,本研究结果表明,尾菜废弃物堆制14 d之后(腐烂率为52%~94%),不同腐烂率处理之间的蚓群质量与数量变化率、物料消解率无显著差异性($P>0.05$),根据回归方程,研究认为尾菜废弃物腐烂率 $\geq 40.67\%$ (前期预堆制天数不少于11 d),则尾菜废弃物可从预堆制过程转入蚯蚓生物消解环节,可缩短尾菜废弃物处置周期、节约预处理环节的能耗与投入。

3.2 物料C/N与蚯蚓消解能力的关系

有机物料中的营养搭配是限制蚯蚓生长和繁殖的关键,物料C/N对蚯蚓的生长和繁殖有较大的影响,并且不同物料符合蚯蚓快速生长与繁殖的适宜C/N也并不一致^[23-24]。Ndegwa等^[25]在蚯蚓处理造纸污泥研究中发现,物料C/N为25时,蚯蚓可以获得最高的生殖率,而且堆制后的产物具有较高的肥力;仓龙等^[14]发现调节未腐熟牛粪C/N为20时,蚯蚓生长较好,而调节猪粪C/N为17时,生长最快。本试验结果表明,尾菜混合物C/N为27.79时,蚯蚓消解能力最强,在此基础上再提高或降低物料C/N,均显著降低了物料的消解率,其原因主要为C/N过高,氮素营养少,蚯蚓发育不良,生长缓慢;C/N过低,氮素含量过高,容易引起蚯蚓蛋白质中毒症,导致蚯蚓腐烂^[14,24]。

3.3 物料含水率与蚯蚓消解能力的关系

蚯蚓属于湿生动物,它的机体保持水分的功能很不发达,蚯蚓的呼吸和其他生命活动与物料含水率密切相关。但不同类型有机物料,适宜蚯蚓生物处理的含水率并不相同^[14],因此在投喂合适的食物之后,最重要的生长条件就是适当的含水率。本研究结果表明,蚯蚓最大能力消解尾菜废弃物,混合物的适宜含水率为69.61%,含水率太大或太小均不利于蚯蚓的生长繁殖,主要原因是当物料含水率低时,蚯蚓体表水分太少,则溶解于体表水层的氧气就少,蚯蚓能利用的氧气也少;当含水率高时,虽然蚯蚓体表的水分很多,但物料中的氧气减少,氧气扩散到体表含水层的速度小于蚯蚓消耗氧气的速率,也会抑制蚯蚓的生长^[26-27]。

3.4 环境温度与蚯蚓消解能力的关系

环境温度不仅直接影响蚯蚓的体温与活动,还会影响其新陈代谢、呼吸、消化、生长发育、繁殖等生理功能,合理调控环境温度,有利于促进蚯蚓的生长繁殖,并进一步提高蚯蚓对有机物料的处理能力^[28]。本试验结果表明,蚯蚓处理尾菜废弃物的适宜环境温度为26.23℃,不同环境温度处理之间,8、40℃处理的消解

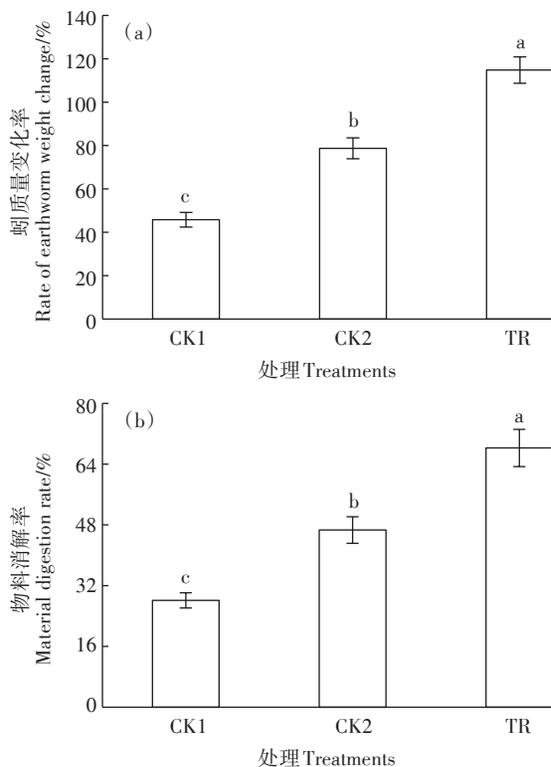


图7 工艺参数优化措施对蚓质量变化率及蚯蚓消解能力的影响

Figure 7 Effects of optimization measures of technological parameter on digestion ability of earthworms

能力明显小于24、32℃处理,这主要是因为低温条件下,蚯蚓生长繁殖缓慢,对有机物料的消解能力差^[29];高温条件下,蚯蚓新陈代谢加剧、蚓茧成活率下降,甚至40℃处理的蚯蚓出现了小部分死亡的现象,从而导致蚯蚓消解有机物料能力降低^[28]。

3.5 蚯蚓投放密度与其消解能力的关系

仓龙等^[14]在调控温度、湿度等物理条件都理想的情况下,发现蚯蚓群体的质量与数量随接种密度增加而减少,本研究结果表明,蚯蚓消解尾菜废弃物过程中,培养前后的蚯蚓群体的质量与数量变化率随蚯蚓投放密度的增加呈下降的趋势,与其研究结论一致。一般而言,增大蚯蚓投加密度可提高单位容积的处理效率,但密度过高会使种群内发生生存空间和食物的争夺,影响有机废弃物处理效率^[30];另外,当投放密度较低时(如20条·kg⁻¹),虽然蚯蚓群体的质量与数量变化率较高,但蚯蚓群体的质量与数量绝对值并不高,从而消解尾菜废弃物的能力较低,可见投放密度太大或太小均不利于蚯蚓的生长繁殖及其对尾菜废弃物的消解,本研究认为蚯蚓每消解1 kg尾菜废弃物的适宜投放密度为57.17条。

3.6 工艺参数优化措施对蚯蚓生物消解能力的影响

本试验结果表明,在培养时间、蚯蚓投放量相同条件下,与CK处理相比,蚯蚓生物消解尾菜废弃物工艺参数优化措施(TR)显著提高了蚓质量变化率、蚯蚓消解物料能力($P<0.05$)。CK1处理的物料消解率最低,主要原因是尾菜废弃物未经腐解处理,不利于蚯蚓吞食,培养初期蚯蚓缺少饵料有效供给,导致群体生长偏慢;CK2处理的物料消解率低于TR处理,其原因是尾菜经打浆处理后,虽然方便蚯蚓吞食,但是物料未腐解且含水率较高(85%),不利于蚯蚓生长繁殖;同时,CK处理物料的C/N偏低,置于室外露天状态下,9—10月份的环境温度为25~35℃,均不利于蚯蚓生长繁殖,从而导致消解物料能力下降。然而,本研究虽然提出了蚯蚓消解尾菜废弃物的各项技术参数优化值,但是不同技术因子对蚯蚓生长繁殖及消解能力的作用贡献率尚不明确,并且不同因子交互作用对蚯蚓消解能力的影响亦尚不清楚,有待进一步研究。

4 结论

(1)尾菜废弃物腐烂率、C/N、含水率及环境温度、投放密度均对蚯蚓消解能力存在显著影响,蚯蚓对尾菜废弃物的消解率与物料腐烂率、蚯蚓投放密度

呈极显著对数曲线相关($P<0.01$),与物料C/N、含水率及环境温度呈极显著的开口向下一元二次抛物线相关($P<0.01$)。

(2)蚯蚓生物消解尾菜废弃物是一项实现尾菜废弃物原位高效高值处置技术。应用蚯蚓生物消解技术处置尾菜废弃物,各项技术参数的优化值分别为:物料腐烂率 $\geq 40.67\%$ (即尾菜废弃物预堆制11 d以上)、物料C/N为27.79、物料含水率为69.61%、环境温度为26.23℃、蚯蚓投放密度为57.17条·kg⁻¹。与CK处理相比,工艺参数优化处理的物料消解率可显著提高21.6个百分点以上($P<0.05$)。

参考文献:

- [1] 戚如金,魏涛,王梦芝,等.尾菜饲料化利用技术及其在畜禽养殖生产中的应用[J].动物营养学报,2018,30(4):1297-1302.
QI Ru-Jin, WEI Tao, WANG Meng-zhi, et al. Technologies of feed utilization for vegetable waste and its application in livestock and poultry production[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018,30(4):1297-1302.
- [2] 杜鹏祥,韩雪,高杰云.我国蔬菜废弃物资源化高效利用潜力分析[J].中国蔬菜,2015,1(7):15-20.
DU Peng-xiang, HAN Xue, GAO Jie-yun. Potential analysis on high efficient utilization of waste vegetable resources in China[J]. *China Vegetables*, 2015,1(7):15-20.
- [3] 毕于运,王亚静,高春雨.中国主要秸秆资源数量及其区域分布[J].农机化研究,2010(3):1-7.
BI Yu-yun, WANG Ya-jing, GAO Chun-yu. Straw resource quantity and its regional distribution in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010(3):1-7.
- [4] 王丽英,吴硕,张彦才,等.蔬菜废弃物堆肥化处理研究进展[J].中国蔬菜,2014(6):6-12.
WANG Li-ying, WU Shuo, ZHANG Yan-cai, et al. Research progress on composting treatment of vegetable wastes[J]. *China Vegetables*, 2014(6):6-12.
- [5] 王亚利,杨光,熊才耘,等.蔬菜废弃物蚯蚓堆肥对鸡毛菜生长的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(10):2129-2135.
WANG Ya-li, YANG Guang, XIONG Cai-yun, et al. Effect of vegetable waste vermicompost on the growth of *Brassica chinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017,36(10):2129-2135.
- [6] 黄鼎曦,陆文静,王洪涛.农业蔬菜废物处理方法研究进展和探讨[J].环境污染治理与设备,2002,3(11):38-42.
HUANG Ding-xi, LU Wen-jing, WANG Hong-tao. Progress on study of agricultural vegetable waste treatment[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002,3(11):38-42.
- [7] Lu W J, Wang H T, Nie Y F, et al. Effect of inoculating flower stalks and vegetable waste with lingo-cellulolytic microorganisms on the composting process[J]. *Journal of Environmental Science & Health*, 2004,39:871-887.

- [8] 张志剑, 刘 萌, 朱 军. 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1679-1686. ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun. Organic waste treatment by earthworm vermicomposting and larvae bioconversion: Review and perspective[J]. *Environ Sci*, 2013, 34(5): 1679-1686.
- [9] 赵海涛, 狄 霖, 刘 平, 等. 蚯蚓生物床工程处理对牛粪性质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 255-259. ZHAO Hai-tao, DI Lin, LIU Ping, et al. Effect of earthworm bio-bed treatment on properties of cow manure[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 255-259.
- [10] Sangwan P, Kaushik C P, Garg V K. Feasibility of utilization of horse dung spiked filter cake in vermicomposting using exotic earthworm (*Eisenia foetida*) [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7): 2442-2448.
- [11] Hait S, Tare V. Optimizing vermicomposting of waste activated sludge using vermicomposting as bulking material[J]. *Waste Management*, 2011, 31(3): 502-511.
- [12] 李辉信, 胡 锋, 仓 龙, 等. 蚯蚓堆制处理对牛粪性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 588-593. LI hui-xin, HU Feng, CANG Long, et al. Effect of vermicomposting on characteristics of cattle manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(3): 588-593.
- [13] Garg P, Gupta A, Satya S. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(3): 391-395.
- [14] 仓 龙, 李辉信, 胡 锋, 等. 赤子爱胜蚓处理畜禽粪便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.
- [15] 杨 帆, 李国学, 江 滔, 等. 蚯蚓辅助堆肥处理蔬菜废弃物及其温室气体减排效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 190-196. YANG Fan, LI Guo-xue, JIANG Tao, et al. Vermicomposting treatment of vegetable waste and its greenhouse gas emissions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(16): 190-196.
- [16] 蔡琳琳, 李素艳, 龚小强, 等. 好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合法处理绿化废弃物与牛粪[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(2): 261-267. CAI Lin-lin, LI Su-yan, GONG Xiao-qiang, et al. Composting-vermicomposting of green waste processing spiked with cow dung[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35(2): 261-267.
- [17] 杨文霞, 郑金伟, 李志鹏, 等. 果皮、菜叶混合垃圾的蚯蚓堆制处理[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 49-53, 64. YANG Wen-xia, ZHENG Jin-wei, LI Zhi-peng, et al. Vermicomposting of mixed waste of pericarp and vegetable offal using *Eisenia foetida*[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(2): 49-53, 64.
- [18] 陈 杰, 谢 飞, 雍 毅, 等. 蚯蚓生物处理猪粪肥料变化研究[J]. 环境保护科学, 2018, 41(1): 89-94. CHEN Jie, XIE Fei, YONG Yi, et al. Study of the transformation of pig manure by earthworm biological treatment[J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 41(1): 89-94.
- [19] 张雪萍, 黄初龙, 李景科. 赤子爱胜蚓对森林凋落物的分解效率[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2427-2433. ZHANG Xue-ping, HUANG Chu-long, LI Jing-ke, et al. Efficiencies of earthworms (*Eisenia foetida*) decomposing forest litters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2427-2433.
- [20] Cortez J, Hameed R, Bouche M B. C and N transfer in soil with or without earthworms fed with C and N-labeled wheat straw[J]. *Soil Biol Biochem*, 1989, 21(4): 491-497.
- [21] Zhang L H, Xu G H. Effects of microorganisms in synchronization with earthworms on the fertilities of soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, 10(2): 116-120.
- [22] Parle J N. A microbiological study of earthworm casts[J]. *Journal of General Microbiology*, 1963, 31: 13-22.
- [23] 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.
- [24] Nogales R, Melgar R, Guerrero A, et al. Growth and reproduction of *Eisenia andrei* in dry olive cake mixed with other organic wastes[J]. *Pedobiologia*, 1999, 43(6): 744-752.
- [25] Ndegwa P M, Thompson S A. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75(1): 7-12.
- [26] Lee K E. Earthworms: Their ecology and relationships with soil and land use[M]. Australia: Academic Press, 1985: 15-16.
- [27] 徐晋佑. 蚯蚓生理学[M]. 广州: 科学普及出版社, 1985. XU Jin-you. Earthworm physiology[M]. Guangzhou: Science Popularization Press, 1985.
- [28] 沈明星, 王海候, 沈晓萍, 等. 温度对蚯蚓处理牛粪能力的影响及调控效果[J]. 江苏农业科学, 2008(3): 263-265. SHEN Ming-xing, WANG Hai-hou, SHEN Xiao-ping, et al. Effect of temperature on the ability of earthworm to treat cow dung and its regulation[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2008(3): 263-265.
- [29] 王海候, 沈明星, 陆长婴, 等. 晚秋早冬季节覆盖保温措施对蚯蚓处理牛粪能力的影响[J]. 江西农业学报, 2009, 21(7): 173-175. WANG Hai-hou, SHEN Ming-xing, LU Chang-ying, et al. Influence of heat preservation measures through covering on ability of treating cattle manure by *Eisenia foetida* in late autumn and early winter[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(7): 173-175.
- [30] Dominguez J, Edwards C A. Effect of stocking rate and moisture content on the growth and maturation of *Eisenia andrei* (Oligochaeta) in pig manure[J]. *Soil Biol Biochem*, 1997, 9(3/4): 743-746.