

餐厨垃圾生化尾渣蚯蚓堆肥中矿物的调节效应

缪丽娟, 王依凡, 张明月, 应雨瑾, 张承业, 冯宇宁, 王浪, 朱维琴

引用本文:

缪丽娟, 王依凡, 张明月, 等. 餐厨垃圾生化尾渣蚯蚓堆肥中矿物的调节效应[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 425–433.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0623>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物质飞灰对餐厨垃圾两相厌氧消化的影响

黄红辉, 王德汉, 罗子锋, 尚卫辉

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1277–1283 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1518>

磷石膏和石膏对稻壳与油枯堆肥的影响及基质化利用评价

赵兵, 王宇蕴, 陈雪娇, 徐智

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2481–2488 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0558>

不同磷石膏添加比例对稻壳与油枯堆肥过程的影响及基质化利用的评价

陈雪娇, 王宇蕴, 徐智, 赵乾旭

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 1001–1008 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1463>

蔬菜废弃物蚯蚓堆肥对鸡毛菜生长的影响

王亚利, 杨光, 熊才耘, 谢尚宏, 李银生, 曹林奎, 赵琦

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2129–2135 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0335>

外源添加磷石膏对堆肥碳组分及腐殖质品质的影响

刘媛媛, 徐智, 陈卓君, 汤利

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2483–2490 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0377>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

缪丽娟, 王依凡, 张明月, 等. 餐厨垃圾生化尾渣蚯蚓堆肥中矿物的调节效应[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 425-433.

MIAO L J, WANG Y F, ZHANG M Y, et al. Regulation effect of mineral addition during vermicomposting of biochemical disposal residues from kitchen wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(2): 425-433.

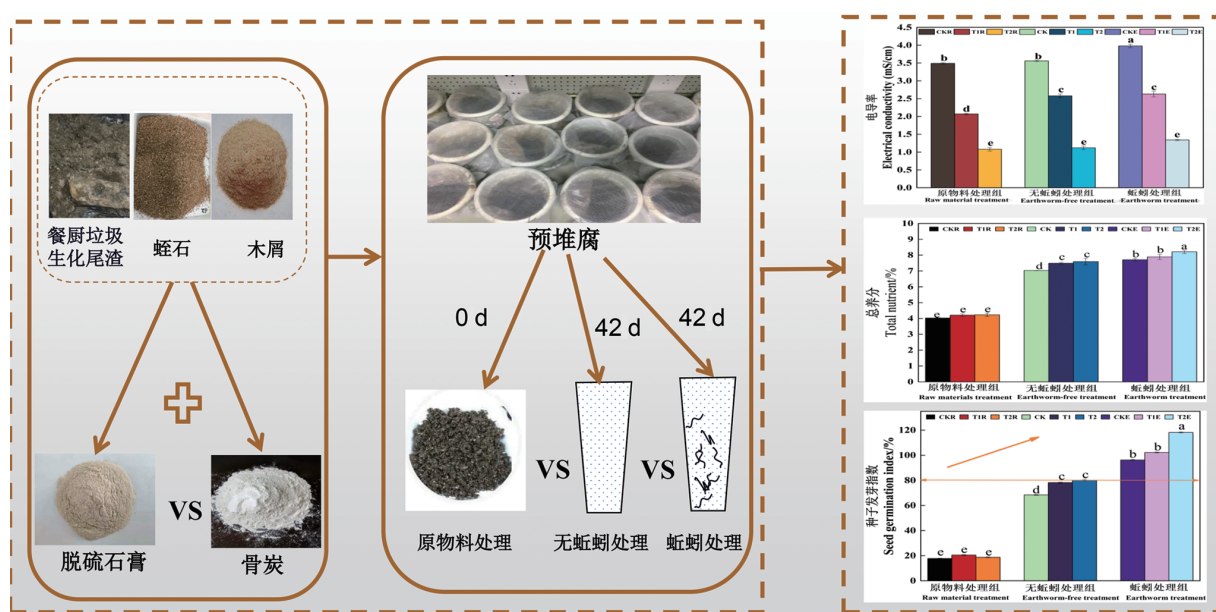


开放科学 OSID

餐厨垃圾生化尾渣蚯蚓堆肥中矿物的调节效应

缪丽娟, 王依凡, 张明月, 应雨瑾, 张承业, 冯宇宁, 王浪, 朱维琴*

(杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 311121)



摘要:餐厨垃圾生化尾渣的资源化利用是餐厨垃圾生化处理后的新难点,针对餐厨垃圾生化尾渣中的高盐分和低腐熟度问题,本研究以脱硫石膏和骨炭作为添加剂,探究脱硫石膏与骨炭对餐厨垃圾生化尾渣蚯蚓堆肥中的调节效应,研究其对蚓体生长及蚯蚓堆肥基本性状变化规律的影响。结果表明:脱硫石膏和骨炭添加均可促进蚯蚓生长繁殖,且骨炭添加下蚯蚓生长状况相对更优;蚯蚓处理可降低蚯蚓堆肥pH而提高其电导率(EC)和总养分含量;骨炭较之脱硫石膏添加下所获蚯蚓堆肥pH、总养分含量和过氧化氢酶(CAT)活性均升高,而其EC、脲酶(UA)和碱性磷酸酶(AKP)活性则均降低。腐熟度变化表明,蚯蚓活动和骨炭添加均可降低堆肥中C/N和 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$,增加其腐殖质(HS)、胡敏酸(HA)、富里酸(FA)含量和种子发芽指数(GI)。因此,在餐厨垃圾生化尾渣中添加骨炭进行蚯蚓堆肥以降低盐分和提高腐熟度具有一定可行性。

关键词:脱硫石膏;骨炭;餐厨垃圾;蚯蚓堆肥

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)02-0425-09 doi:10.11654/jaes.2021-0623

收稿日期:2021-05-30 录用日期:2021-09-02

作者简介:缪丽娟(1995—),女,硕士研究生,从事固体废弃物资源化研究。E-mail:2937025654@qq.com

*通信作者:朱维琴 E-mail:zhwq@hznu.edu.cn

基金项目:杭州市农业科研攻关项目(20180432B08);浙江省自然科学基金项目(LY17B070004);浙江省大学生新苗人才项目(2020R427035);杭州师范大学本科生创新能力提升工程项目(CX2020124)

Project supported: The Agricultural Research Project of Hangzhou City (20180432B08); The Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (LY17B070004); The College Students New Talent of Zhejiang Province, China (2020R427035); The Undergraduate Innovation Ability Improvement of Hangzhou Normal University(CX2020124)

Regulation effect of mineral addition during vermicomposting of biochemical disposal residues from kitchen wastes

MIAO Lijuan, WANG Yifan, ZHANG Mingyue, YING Yucui, ZHANG Chengye, FENG Yuning, WANG Lang, ZHU Weiqin*

(College of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract: Recycling the biochemical disposal residue from kitchen wastes is a new challenge. This study aims to find solutions to the problems of high salinity and low decomposition rate of biochemical disposal residue from kitchen wastes. Desulfuration gypsum and bone charcoal were used as additives for vermicomposting biochemical residue from kitchen wastes, and were noted to cause the regulation effect and their variance. The results showed that the addition of desulfuration gypsum and bone charcoal promoted the growth and fertility of earthworms with higher growth recorded in bone charcoal supplemented vermicomposting. Furthermore, the earthworm activity increased the electrical conductivity (EC) and the total nutrient content in the vermicompost. In addition, the bone charcoal supplementation recorded higher pH, total nutrient content, and catalase (CAT) activity while decreased the EC, urease (UA) activity, and alkaline phosphatase (AKP) activity in the vermicomposting when compared with desulfurization gypsum. The changes in maturity degree indicated that both earthworm activity and the bone charcoal addition could contribute to reducing C/N and $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ while increasing the levels of humus (HS), humic acid (HA), fulvic acid (FA), and seed germination index (GI) in the vermicompost. Therefore, it is possible to reduce salt concentration and improve the maturity degree by adding bone charcoal into the biochemical residues from kitchen wastes for vermicomposting.

Keywords: desulfurization gypsum; bone charcoal; kitchen wastes; vermicomposting

近年来,我国餐饮业迅猛发展并导致大量餐厨垃圾产生,据报道,我国餐厨垃圾的年均产量高达9 000万 t^[1]。餐厨垃圾具有水分、有机物及盐分高,易腐烂等特点,同时亦兼具危害性和资源性双重特点^[2]。餐厨垃圾处理技术包括填埋、机械破碎、好氧堆肥、厌氧消化和生化处理等^[3],其中,相对而言,餐厨垃圾生化处理技术是指在处理设备及复合微生物菌剂作用下对餐厨垃圾进行高效分离、破碎、除油、快速高温(12~48 h, 50~70 ℃)杀菌和生物发酵降解等并产生少量尾渣的过程^[4]。该技术更易实现餐厨垃圾的就地化、减量化处理,可有效避免餐厨垃圾可能产生的二次污染问题,使餐厨垃圾的污染源头得到有效控制。有研究表明,餐厨垃圾生化尾渣中富含氮、磷、钾等营养元素,因而具有资源化利用价值,但是其同时存在盐分高和腐熟度低等问题,不适合直接作为农业有机肥使用^[5],例如,毕峰等^[6]调查发现,杭州市12个生化处理机站点中约有75%站点所产餐厨垃圾生化尾渣的腐熟度根本无法满足《有机肥料》(NY/T 525—2021)的基本要求,其电导率(EC)平均值为7.14 mS·cm⁻¹,而已腐熟的堆肥EC值一般要求小于3 mS·cm⁻¹,故餐厨垃圾生化尾渣中的EC值总体相对偏高。因此,如何提高餐厨垃圾生化尾渣的腐熟度并降低其盐分,成为当前餐厨垃圾生化尾渣资源化再利用中亟待解决的问题之一。

蚯蚓堆肥是通过蚯蚓消化道及酶系统将有机废弃物彻底分解并加速堆肥腐熟的过程^[7]。有研究表

明,蚯蚓堆肥过程中添加适宜矿物可以促进废弃物降解、增加腐殖化程度并提高蚯蚓堆肥的植物促长能力。例如,牛粪和废纸混合废物蚯蚓堆肥时添加2%~8%含磷水平的磷矿石可以明显促进废物生物降解、降低C/N、增加腐殖化程度和促进有效磷含量增加^[8]。对牛粪添加0%、5%和20%片麻岩或滑石并经蚯蚓处理60 d后,发现添加片麻岩或滑石后所获蚯蚓堆肥施用后可明显促进玉米株高及质量增加^[9]。蔡琳琳等^[10]研究发现,园林废弃物蚯蚓堆肥时添加5%沸石、膨润土和过磷酸钙可促进蚯蚓生长繁殖和腐熟度。同时,因矿物来源广泛、价廉、除盐能力强等而被广泛用于降盐处理,其中,脱硫石膏的主要成分为硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),其经水溶解后形成可替换 Na^+ 的 Ca^{2+} ,从而降低钠盐含量^[11];骨炭中主要成分羟基磷酸钙 $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ 中的 Ca^{2+} 可通过发生离子交换反应代替 Na^+ 等盐基离子,形成对应盐基离子的磷灰石^[12]。例如,屈忠义等^[13]研究表明,施加脱硫石膏可降低盐碱地土壤EC值并促进番茄产量增长;徐峰^[14]研究发现,施加5%骨炭能降低土壤中的主要盐基离子和全盐量并促进玉米生长。可见,脱硫石膏或骨炭等矿物添加有望同时实现促进有机废弃物蚯蚓堆肥过程和降低盐分危害的双重效应。因此,针对餐厨垃圾生化尾渣的低腐熟度和高盐分问题,研究矿物添加对其蚯蚓堆肥过程的调节效应与差异,有望为餐厨垃圾生化尾渣的无害化、腐熟化处理及资源化利用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蚯蚓品种为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),购自杭州某花鸟市场,试验前选择体质量相近的成熟蚯蚓放入垫有多层湿滤纸的培养皿中暗处培养24 h,以排出肠道物。餐厨垃圾生化尾渣取自杭州市余杭街道某生活垃圾中转站;木屑和蛭石由江苏中远活性炭有限公司提供;脱硫石膏购自河北建投任丘热电有限公司;骨炭购自郑州永坤环保科技有限公司。各试验材料理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

根据我们的前期预试验,本试验以餐厨垃圾生化尾渣为主料,木屑和蛭石为辅料,先将主辅料按质量比为4:3:3混匀,分别以脱硫石膏和骨炭为矿物添加剂,按矿物添加水平分别为0%或5%,将各原辅物料及矿物添加剂充分混匀,然后用Milli-Q超纯水调节含水率至70%,经14 d预发酵后,将预发酵后所获物料分为3组,第1组为原物料处理组,为经14 d预发酵后所获原物料;第2组为无蚯蚓处理组,为经14 d预发酵所获原物料再经42 d自然堆制处理;第3组为蚯蚓处理组,为经14 d预发酵所获原物料再经42 d蚯蚓

堆制处理,具体试验设计如表2所示,试验共设9个处理,每个处理设3个重复。各处理均按表2称取14 d发酵后原物料350 g(干物质量)置于塑料桶中(桶底直径12 cm,桶口直径15 cm,桶高15 cm),其中蚯蚓处理组另需按照50条·kg⁻¹蚯蚓接种密度放入大小均匀、生长活跃和环带明显的赤子爱胜蚓,并用纱网(孔径为0.15 mm)封口以防蚯蚓逃逸和利于气体交换。然后,除原物料处理组外,将各桶均置于温度为20℃,湿度为70%,光照度为0 lx的人工气候室中培养42 d,每隔2 d浇一次Milli-Q超纯水以保持基质湿度基本不变。

1.3 分析方法

试验结束后,采集蚯蚓和蚓茧分别称质量和计数,每5个蚓茧折合成1尾蚯蚓,计算蚯蚓的存活率、日增质量倍数和繁殖率;然后对基质质量进行称量,计算基质日消耗量。计算方法为^[15]:

$$A=Q_m/Q_c \times 100\% \quad (1)$$

式中: A 为蚯蚓存活率,%; Q_m 为试验末蚯蚓数量,条; Q_c 为初始蚯蚓数量,条。

$$Z=(Q_{ZL}-Q_{CL})/(Q_{CL} \times t) \quad (2)$$

式中: Z 为蚯蚓日增质量倍数; Q_{ZL} 为试验末蚯蚓总质量,g; Q_{CL} 为初始蚯蚓总质量,g; t 为培养时间,d。

表1 各原材料基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of raw materials

原材料 Raw material	pH	电导率 EC/(mS·cm ⁻¹)	总碳 TC/%	总氮 TN/%	碳氮比 C/N
餐厨垃圾生化尾渣 Biochemical disposal residues from kitchen wastes	6.20±0.01	10.42±0.02	22.73±0.19	1.93±0.03	11.77±0.03
木屑 Sawdust	6.34±0.01	0.51±0.01	43.21±0.21	0.10±0.001	432.10±0.01
蛭石 Vermiculite	6.12±0.01	0.53±0.01	1.34±0.07	0.03±0.001	44.67±0.03
脱硫石膏 Desulfurized gypsum	6.91±0.01	0.92±0.01	10.23±0.01	0.53±0.01	19.30±0.03
骨炭 Bone charcoal	7.93±0.01	0.41±0.04	2.23±0.23	0.23±0.05	9.70±0.03

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理组 Treatment	处理编号 Processing number	物料配方 Material formula	处理时间 Processing time/d
原物料处理组 Raw materials treatment	CKR	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀	0
	T1R	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀,另加5%脱硫石膏	0
	T2R	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀,另加5%骨炭	0
无蚯蚓处理组 Earthworm-free treatment	CK	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀	42
	T1	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀,另加5%脱硫石膏	42
	T2	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀,另加5%骨炭	42
蚯蚓处理组 Earthworm treatment	CKE	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀,另加蚯蚓	42
	T1E	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀,另加5%脱硫石膏及蚯蚓	42
	T2E	餐厨垃圾生化尾渣、蛭石、木屑按质量比为4:3:3混匀,另加5%骨炭及蚯蚓	42

$$F=(Q_z-Q_c)/Q_c \times 100\% \quad (3)$$

式中: F 为蚯蚓繁殖率, %; Q_z 为折合后蚯蚓数量, 条; Q_c 同上。

$$H=(H_c-H_m)/t \quad (4)$$

式中: H 为基质日消耗量, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; H_c 为初始基质干质量, g ; H_m 为试验末基质干质量, g ; t 为培养时间, d 。

含水率采用 105°C 烘干法测定; 采用 pH 计 (LEICI, 中国) 测定 pH; EC 采用上海雷磁电导率仪 (DDS-11A, 中国) 测定; 采用浓硫酸-重铬酸钾外加加热法测定有机质含量^[16]; 采用元素分析仪 (EURO EA3000, 意大利) 测定全氮 (N) 含量, 采用《有机肥料》(NY/T 525—2021) 标准中附录 D 方法测定总养分 ($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$) 含量^[17]; 采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定铵态氮 (NH_4^+-N) 含量; 采用双波长紫外分光光度法测定硝态氮 (NO_3^--N) 含量; 新鲜样品与去离子以 1:10 ($m:V$) 混合后经振荡浸提 2 h 后收集过滤液用于种子发芽指数 (GI) 测定^[18]。参考 Hoffmann 与 Teicher 靛酚比色法测定脲酶活性 (UA); 采用磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶活性 (AKP)^[19]; 参考卢越等^[20]测定过氧化氢酶活性 (CAT); 采用总有机碳分析仪 (TOC-L, Japan) 测定腐殖质 (HS) 和胡敏酸 (HA) 含量, 并采用差减法计算出富里酸含量 (FA)^[15]。

1.4 数据处理

用 Excel 进行数据计算和统计, 采用 SPSS17.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 T 检验 (Paired-samples T test), 显著性检验采用 Duncan 法, 相关图表采用 Origin 8.0 制作。

2 结果与讨论

2.1 蚯蚓生长及基质日消耗量变化

蚯蚓生长繁殖状况可反映其对生存环境的适应程度^[15], 而基质日消耗量反映的是蚯蚓及微生物对有机

机质的分解能力及堆肥的消耗性降解程度^[21]。如表 3 所示, 各蚯蚓处理组 (CKE、T1E 和 T2E) 的蚯蚓存活率、日增质量倍数、繁殖率和基质日消耗量范围分别为 $98.71\% \sim 121.68\%$ 、 $0.014 \sim 0.032$ 、 $115.43\% \sim 155.12\%$ 和 $0.92 \sim 1.56 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 大小顺序均为 $\text{T2E} > \text{T1E} > \text{CKE}$, 且各处理间差异均达显著差水平 ($P < 0.05$)。因此, 骨炭和脱硫石膏添加下蚯蚓均可以正常适应生长并促进基质降解, 且以骨炭的促进效应更优。同样, 刘顺会等^[22]研究发现蚯蚓生长和数量均与餐厨垃圾消耗速度成正比。分析其原因可能与脱硫石膏中硫酸钙 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 能够降低钠盐含量^[23]及骨炭中含有蚯蚓生长需要的磷、钾、钙、镁等必需营养元素有关^[24]。综上, 脱硫石膏和骨炭添加均可促进蚯蚓生长繁殖和基质消耗, 尤以骨炭添加下最优。

2.2 基本理化性质变化

一般认为 pH 为 7.5~8.5 时可获得最大堆肥速率。由表 4 可见, 蚯蚓处理组 pH 均低于其原物料处理组和无蚯蚓处理组, 这可能与蚯蚓活动增加有机酸含量或促进铵态氮转化为硝态氮致其堆肥 pH 降低有关^[25]。而各蚯蚓处理组 pH 大小顺序为: $\text{T2E} > \text{CKE} > \text{T1E}$, 说明骨炭添加可提高蚯蚓堆肥的 pH, 而脱硫石膏添加则降低了其 pH, 这可能与骨炭的 pH 较高而脱硫石膏中的 SO_4^{2-} 致其 pH 降低有关。此外, 无蚯蚓处理组和无蚯蚓处理组 pH 范围为 7.28~7.97, 亦均符合 pH 为 7.0~8.5 的农业应用要求范围^[26]。

EC 可衡量堆肥中可溶性盐含量, 当堆肥中 EC 低于 $4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时, 可以安全施用于土壤^[27]。由表 4 所示, 各处理 EC 范围为 $1.08 \sim 3.98 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 大小顺序为 $\text{CKE} > \text{CK} > \text{CKR} > \text{T1E} > \text{T1} > \text{T1R} > \text{T2E} > \text{T2} > \text{T2R}$, 且 CKE、T1E 和 T2E 相互间差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 说明蚯蚓活动提高了蚯蚓堆肥中 EC, 而脱硫石膏和骨炭均可降低其 EC, 这可能与蚯蚓活动促进有机质降解

表 3 蚯蚓生长及基质日消耗量变化

Table 3 Changes of earthworm growth and daily consumption of substrate

处理 Treatment	存活率 Survival rate/%	日增质量倍数 Daily weight increment	繁殖率 Reproduction rate/%	基质日消耗量 Matrix daily consumption/($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)
CK	—	—	—	$0.61 \pm 0.01\text{d}$
T1	—	—	—	$0.64 \pm 0.07\text{d}$
T2	—	—	—	$0.65 \pm 0.09\text{d}$
CKE	$98.71 \pm 0.05\text{c}$	$0.014 \pm 0.001\text{c}$	$115.43 \pm 0.19\text{c}$	$0.92 \pm 0.07\text{c}$
T1E	$116.71 \pm 0.41\text{b}$	$0.022 \pm 0.001\text{b}$	$133.41 \pm 0.65\text{b}$	$1.27 \pm 0.01\text{b}$
T2E	$121.68 \pm 0.31\text{a}$	$0.032 \pm 0.001\text{a}$	$155.12 \pm 0.05\text{a}$	$1.56 \pm 0.03\text{a}$

注: 同列中不同小写字母表示各处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. The same below.

并释放盐分^[28]而脱硫石膏及骨炭中 Ca^{2+} 可代换性降盐有关^[29-30]。

另由表4可见,各处理有机质含量大小顺序为 $\text{CKR}>\text{T1R}>\text{T2R}>\text{T1}>\text{T2}>\text{CK}>\text{CKE}>\text{T1E}>\text{T2E}$,即蚯蚓处理组和无蚯蚓处理组的有机质含量均低于其原物料处理组;同时,蚯蚓处理组(CKE、T1E和T2E)总养分范围为7.71%~8.21%,明显高于无蚯蚓处理组(CK、T1和T2)中7.03%~7.59%的总养分范围,符合《有机肥料》(NY/T 525—2021)中总养分($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$) $\geq 4\%$ 的要求。因此,蚯蚓活动可以降低堆肥中有机质含量而提高其总养分含量。这可能与蚯蚓的摄食作用和促进微生物分解有机质有关^[25]。表4还可看出,与CKE相比,T2E中有机质含量显著降低($P<0.05$)而其总养分含量显著提高($P<0.05$),说明脱硫石膏和骨炭添加促进了有机质的消耗降解及养分释放,且添加骨炭的促进效应更为明显,这与上述骨炭添加下蚯蚓的良好生长具有一致性。

2.3 酶活性变化

研究表明,堆肥腐熟过程亦是废弃物酶促生物化学转化过程,酶活性大小可直接反映物料的腐熟进程,其中,AKP、UA和CAT是参与微生物进行氮、磷代谢和循环的重要酶类,AKP可参与堆肥过程中速效磷的转化形成并供植物吸收利用^[31];UA活性与微生物数量、总氮含量密切相关,对促进氮素循环具有重要作用。由图1A和图1B所示,各处理AKP和UA活性大小顺序均为 $\text{CKR}>\text{T1R}>\text{T2R}>\text{CK}>\text{T1}>\text{T2}>\text{CKE}>\text{T1E}>\text{T2E}$,即无蚯蚓处理组和无蚯蚓处理组的UA和AKP活性均低于其原物料处理组,蚯蚓处理组(CKE、T1E和T2E)亦显著低于无蚯蚓处理组(CK、T1和T2) ($P<0.05$),蚯蚓处理组中T2E和T1E处理AKP和UA活性显著低于CKE,说明蚯蚓活动以及脱硫石膏和骨

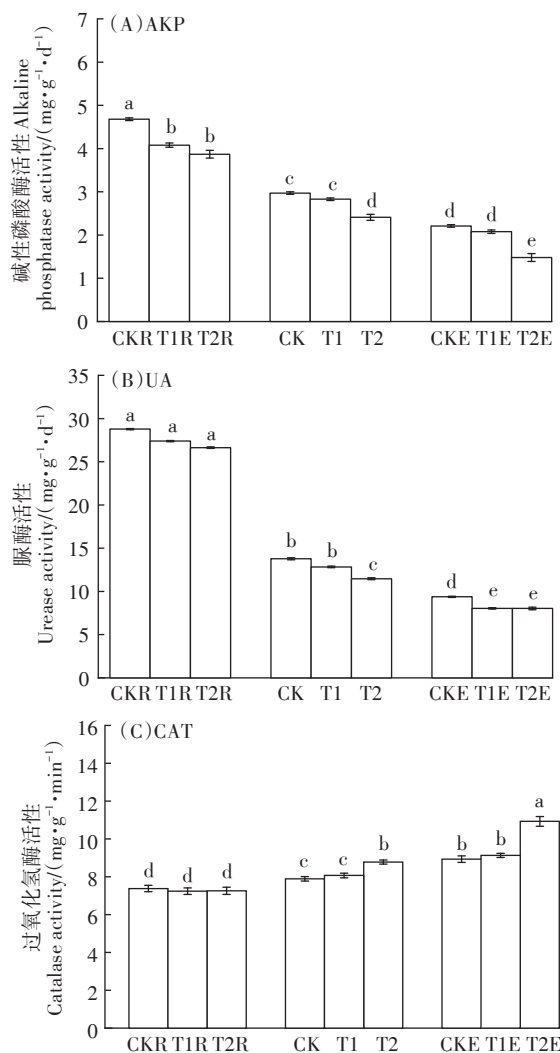


图1 堆肥中酶活性变化

Figure 1 Changes of enzyme activity during composting

炭添加均可以降低堆肥中AKP和UA活性。朱能武^[32]研究亦发现堆肥初期AKP和UA活性明显上升而在中后期下降并趋于稳定,并认为这可能与有机废

表4 堆肥中基本理化性质变化

Table 4 Changes in basic physio-chemical properties during composting

处理 Treatment	pH	电导率 EC/($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	有机质含量 Organic matter content/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总养分 Total nutrient/%
CKR	8.32±0.02a	3.49±0.02b	654.32±0.21a	4.03±0.02e
T1R	7.82±0.01b	2.07±0.02d	647.16±0.16a	4.21±0.08e
T2R	8.11±0.01a	1.08±0.05e	649.28±0.29a	4.23±0.11e
CK	7.76±0.02b	3.56±0.02b	540.22±0.31b	7.03±0.01d
T1	7.78±0.03b	2.58±0.05c	547.16±0.32b	7.49±0.06c
T2	7.97±0.01a	1.12±0.05e	542.33±0.20b	7.59±0.21c
CKE	7.67±0.04b	3.98±0.05a	442.25±0.16c	7.71±0.08b
T1E	7.28±0.06c	2.63±0.88c	435.00±0.36c	7.89±0.16b
T2E	7.74±0.03b	1.34±0.32e	390.61±0.28d	8.21±0.11a

弃物中含氮有机物的酶解主要发生在堆肥初期有关。

CAT可反映氧化分解有机质的强弱程度^[33],图1C所示,各处理CAT活性大小顺序均为T2E>T1E>CKE>T2>T1>CK>T2R>T1R>CKR,即无蚯蚓处理组和蚯蚓处理组的CAT活性都高于其原物料处理组,且蚯蚓处理组(CKE、T1E和T2E)高于无蚯蚓处理组(CK、T1和T2);同时,与CKE相比,T2E和T1E提高CAT活性,说明蚯蚓活动及矿物添加均可提高堆肥中CAT活性,尤以骨炭添加下为优。同样,赵海涛等^[34]研究发现新鲜牛粪经蚯蚓处理后其CAT活性增加了57.3%。这可能与蚯蚓活动改善堆肥内部环境、提高微生物活性、促进有机碳分解并增加CAT活性有关。综上,蚯蚓处理和脱硫石膏、骨炭添加均能降低AKP和UA活性,而提高CAT活性。

2.4 腐熟度变化

2.4.1 C/N变化

C/N是检验堆肥腐熟度的常用指标,当C/N降至20以下时,可认定堆肥腐熟^[35]。由图2所示,各处理C/N大小顺序为CKR>T1R>T2R>CK>T1>T2>CKE>T1E>T2E,即无蚯蚓处理组和蚯蚓处理组的C/N均低于原物料处理组,且各蚯蚓处理组(CKE、T1E和T2E)与无蚯蚓处理组(CK、T1和T2)之间的差异达显著水平($P<0.05$),说明蚯蚓活动促进了堆肥中C/N降低。同样,朱兰保等^[36]的研究表明农业废弃物堆肥各处理的C/N分别由初始的26.1、26.3和26.8依次下降为15.6、14.6和14.1。GARG等^[37]和KAUSHIK等^[38]研究认为,蚯蚓处理后混合物C/N下降可能与堆肥中氨气挥发或蚯蚓生长消耗部分氮素有关。另由图2可见,C/N在蚯蚓处理组中的大小顺序为:CKE>T1E>T2E,说明脱硫石膏和骨炭添加均可降低蚯蚓堆肥中C/N,且骨炭较脱硫石膏对堆肥中C/N的降低效应更为明显。综上所述,蚯蚓处理和添加脱硫石膏、骨炭能显著降低C/N,骨炭添加降低效应最大。

2.4.2 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 变化

堆肥过程中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的相对变化亦可反映堆肥的腐熟程度,当 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 小于0.5时可认为堆肥已达腐熟^[39]。由图3所示,各处理堆肥中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 均小于0.5,范围为0.14~0.32,大小顺序为CKR>T1R>T2R>CK>T1>T2>CKE>T1E>T2E,即蚯蚓处理组和无蚯蚓处理组的 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 均低于其原物料处理组,蚯蚓处理组(CKE、T1E和T2E)显著低于无蚯蚓处理组(CK、T1和T2)($P<0.05$),说明各处理堆肥均已腐熟,且蚯蚓活动可降低堆肥中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比

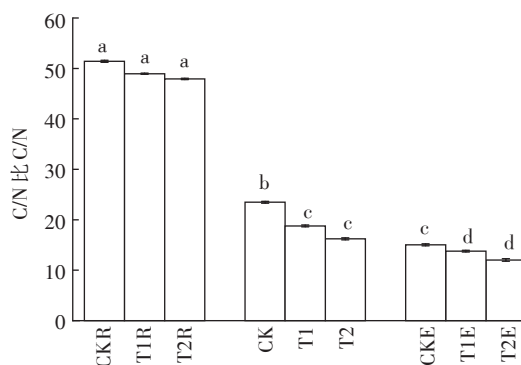


图2 堆肥中C/N比值变化

Figure 2 Changes of C/N ratio during composting

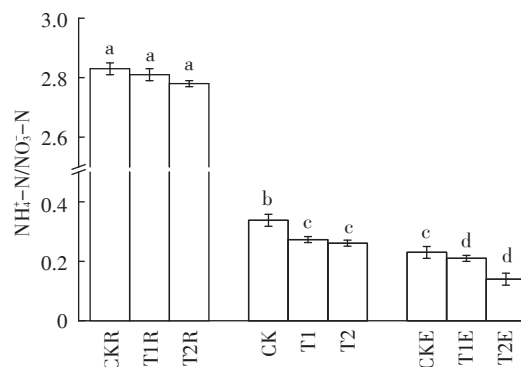


图3 堆肥中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比值变化

Figure 3 Changes of $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ ratio during composting

值,提高其腐熟度。另由图3可见,各蚯蚓处理组堆肥 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 大小顺序为:CKE>T1E>T2E,说明脱硫石膏和骨炭添加均可以降低蚯蚓处理组堆肥中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$,且骨炭较之脱硫石膏对 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 的降低效应更为明显,这可能与骨炭有利于堆体内部氮素转化有关^[40]。

2.4.3 种子发芽指数变化

种子发芽指数(GI)是判定堆肥是否腐熟及其判定植物毒性大小的重要指标。一般认为,GI大于50%时堆肥基本腐熟,而大于80%时则达到完全腐熟程度^[17]。如图4所示,蚯蚓处理组GI均高于其原物料处理组和无蚯蚓处理组,其中,无蚯蚓处理组和无蚯蚓处理组GI范围为68.39%~118.18%,均大于50%,即各处理组基本达到腐熟,而蚯蚓处理组GI均达到80%以上,说明蚯蚓可以提高腐熟度并降低堆肥的植物毒性。同样,龚小强等^[41]的研究亦发现牛粪混合园林绿化废弃物的蚯蚓堆肥种子发芽指数均达到80%以上。此外,各蚯蚓处理组GI大小顺序为T2E>T1E>CKE,分别为118.18%、102.21%和96.23%,说明脱硫石膏和骨炭添加均可以提高蚯蚓堆肥的GI,且骨炭较脱硫石膏的提高效应更显著。综上所述,蚯蚓堆肥

和矿物添加均可促进堆肥种子发芽指数上升,尤以骨炭添加下最优。

2.4.4 腐殖质含量变化

堆肥过程中形成的腐殖质(HS)主要包括HA和FA,胡富比(HA/FA)是反映堆肥过程中胡敏酸和富里酸相互消长和转化的过程^[15]。一般认为,堆肥HA/FA>1.7时堆肥完全腐熟。由表5所示,各处理堆肥中HS、HA和FA含量的大小顺序均为T2E>T1E>CKE>T2>T1>CK>T2R>T1R>CKR,即无蚯蚓处理组和蚯蚓处理组均高于其原物料处理组,其中,无蚯蚓处理组(CK、T1和T2)堆肥中HA/FA范围为1.92~2.01,而蚯蚓处理组(CKE、T1E和T2E)HA/FA范围为2.01~2.08,说明蚯蚓活动有利于胡敏酸和富里酸的形成,提高HA/FA,增加堆肥腐殖化程度及腐熟度。另由表5可见,蚯蚓处理组堆肥中HS、HA和FA大小顺序均为:T2E>T1E>CKE,说明脱硫石膏和骨炭添加均可以提高蚯蚓堆肥中腐殖质形成及腐熟度提高,尤以骨炭添加下最佳。

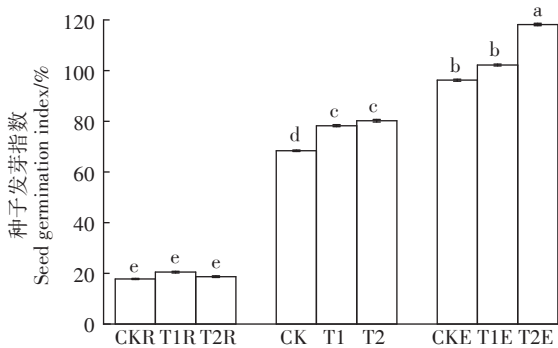


图4 堆肥中种子发芽指数变化

Figure 4 Changes of seed germination index during composting

3 结论

(1)与无添加矿物相比,骨炭和脱硫石膏添加下蚯蚓均可以较好地适应生长环境,尤以骨炭添加下效果最优。

(2)与无蚯蚓处理相比,餐厨垃圾生化尾渣蚯蚓堆肥具有更高的pH、总养分含量和过氧化氢酶(CAT)活性,较低的EC、有机质含量、碱性磷酸酶(AKP)和脲酶(UA)活性。添加骨炭较脱硫石膏提高了蚯蚓基质的pH、总养分含量和CAT活性,而降低了其EC、有机质含量、AKP和UA活性。

(3)腐熟度变化表明,蚯蚓堆肥中具有较低的C/N、NH₄⁺-N/NO₃⁻-N和较高的种子发芽指数、腐殖质、胡敏酸和富里酸含量。添加骨炭和脱硫石膏均在一定程度上提高餐厨垃圾生化尾渣蚯蚓堆肥的腐熟度,尤以骨炭添加下最优。

(4)餐厨垃圾生化尾渣中添加适量的骨炭和脱硫石膏并进行蚯蚓堆肥具有可行性,可以同时达到降低餐厨垃圾生化尾渣中盐分、提高其腐熟度、增加其总养分等效果,有望为餐厨垃圾生化尾渣的再利用提供技术依据。

参考文献:

[1] 郝晓地,周鹏,曹达啓.餐厨垃圾处置方式及其碳排放分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2):673-682. HAO X D, ZHOU P, CAO D Q. Analyses of disposal methods and carbon emissions of food wastes[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(2):673-682.

[2] 梅彩虹.餐厨垃圾固体处理与资源化利用分析[J]. 环境与发展, 2018, 30(10):56, 58. MEI C H. Analysis of solid waste treatment and resource utilization of kitchen waste[J]. Environment & Development, 2018, 30(10):56, 58.

[3] 杜志勇.城市餐厨垃圾处理技术现状与展望[J]. 农业工程, 2020, 10

表5 堆肥中腐殖质含量变化

Table 5 Changes of humus content during composting

处理 Treatment	腐殖质含量 HS/(mg·g ⁻¹)	胡敏酸含量 HA/(mg·g ⁻¹)	富里酸含量 FA/(mg·g ⁻¹)	胡敏酸含量/富里酸含量 HA/FA
CKR	258.43±0.02c	140.78±0.02c	117.65±0.11c	1.20±0.01b
T1R	262.48±0.03c	148.45±0.14c	114.03±0.08c	1.30±0.14b
T2R	270.45±0.02c	150.67±0.21c	119.78±0.11c	1.26±0.21b
CK	400.67±0.04b	263.32±0.02b	137.35±0.18b	1.92±0.36a
T1	415.23±0.07b	277.21±0.31b	138.02±0.28b	2.01±0.19a
T2	421.69±0.09b	279.82±0.51b	141.87±0.08a	1.97±0.28a
CKE	430.74±0.02a	290.72±0.88a	140.02±0.15a	2.08±0.13a
T1E	439.39±0.09a	293.29±0.46a	146.10±0.01a	2.01±0.26a
T2E	450.60±0.27a	301.71±0.31a	148.89±0.39a	2.03±0.85a

- (5):52-56. DU Z Y. Current status and prospects of urban kitchen waste treatment technology[J]. *Agricultural Engineering*, 2020, 10(5): 52-56.
- [4] 杨国清. 固体废物处理工程[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. YANG G Q. Solid waste treatment project[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [5] YUVARAJ A, THANGARAJ R, RAVINDRAN B, et al. Centrality of cattle solid wastes in vermicomposting technology: A cleaner resource recovery and biowaste recycling option for agricultural and environmental sustainability[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 268: 115688.
- [6] 毕峰, 李相儒, 韩泽东, 等. 我国农村易腐垃圾机器成肥产品质量评价——以杭州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 1016-1022. BI F, LI X R, HAN Z D, et al. Quality evaluation of mechanical composting products for putrescible wastes in rural areas in China: A case study in Hangzhou[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2018, 37(5): 1016-1022.
- [7] 金梦野, 李小华, 黄占斌, 等. 三种材料复合施用对盐碱土壤改良效果的研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 719-726. JIN M Y, LI X H, HUANG Z B, et al. Improvement of saline-alkali soil by compound application of three environmental materials[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 719-726.
- [8] PAULA D S M E, XAVIER D C A M, DELIBERALI D D C, et al. Vermicomposting with rock powder increases plant growth[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 69: 56-60.
- [9] LUSHIAN T M, PEARSON N S M, PARDON M, et al. Vermicomposting manure-paper mixture with igneous rock phosphate enhances biodegradation, phosphorus bioavailability and reduces heavy metal concentrations[J]. *Heliyon*, 2018, 4(8): e00746.
- [10] 蔡琳琳, 李素艳, 康跃, 等. 沸石、膨润土和过磷酸钙对蚯蚓堆肥园林绿化废弃物腐熟效果的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 299-309. CAI L L, LI S Y, KANG Y, et al. Effects of zeolite, bentonite and calcium superphosphate on the vermicomposting of green wastes[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(2): 299-309.
- [11] 李红, 区杰泳, 颜增光, 等. 牛骨炭与伊/蒙黏土组配改良剂对土壤中Cd的钝化效果[J]. 环境科学研究, 2018, 31(4): 725-731. LI H, QU J Y, YAN Z G, et al. Immobilization of soil cadmium using combined amendments of illite/smectite clay with cattle bone char[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(4): 725-731.
- [12] GARG P, GUPTA A, SATYA S. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97: 391-395.
- [13] 屈忠义, 孙慧慧, 杨博, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 311-318, 350. QU Z Y, SUN H H, YANG B, et al. Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing tomato in saline alkali soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 311-318, 350.
- [14] 徐峰. 骨炭对水土中重金属吸附、钝化及玉米吸收积累重金属的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013. XU F. The effect of adsorbility and passivation of heavy metal in solution, soil and heavy metal accumulation on corns by bone charcoal[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
- [15] 姚武. 畜禽蚯蚓堆肥中腐殖质形成及其结合态重金属变化规律和机理研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2015. YAO W. Investigation into the formation of humic substance and the mechanism of heavy metal variation after vermicomposting of pig manure[D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University, 2015.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. LU R K. Analysis methods of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] ZHOU J M, WANG L T, WANG H M, et al. Effects of different ratios of pig manure to fungus residue on physicochemical parameters during composting[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, 66(5): 499-507.
- [18] 张云龙, 宋明淦, 李秀芬, 等. 磷酸盐添加对快速好氧堆肥过程pH及腐熟效果的影响[J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1996-2004. ZHANG Y L, SONG M G, LI X F, et al. Effect of phosphate addition on pile pH and maturity during rapid aerobic composting process[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(7): 1996-2004.
- [19] 董莹. 植被更替及植果年限对土壤有机质和酶活性的影响[J]. 现代农业研究, 2020, 49(1): 88-89. DONG Y. Effects of vegetation replacement and fruit planting years on soil organic matter and enzyme activity[J]. *Modern Agricultural Research*, 2020, 49(1): 88-89.
- [20] 卢越, 张健琳, 杨兰芳. 不同作物生长和施肥对土壤酶活性的影响[J]. 环境生态学, 2019, 1(6): 81-85, 90. LU Y, ZHANG J L, YANG L F. Effects of growing crops and fertilization on soil enzyme activities[J]. *Environmental Ecology*, 2019, 1(6): 81-85, 90.
- [21] KUMAR B V, SINGH S, SINGH B. Biotransformation of paper mill sludge and tea waste with cow dung using vermicomposting[J]. *Biore-source Technology*, 2020, 318: 124097.
- [22] 刘顺会, 陈大志, 林秋奇, 等. 利用餐厨和绿化垃圾提高蚯蚓堆肥效率处理剩余污泥的研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 140-145. LIU S H, CHEN D Z, LIN Q Q, et al. Improving efficiency of vermicomposting on municipal sludge by using kitchen and green wastes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 140-145.
- [23] SUTTER D, CIHACEK L, RAHMAN S F. Application of flue gas desulfurization gypsum and its impact on wheat grain and soil chemistry[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(1): 303-311.
- [24] ZWETSLOOT M J, LEHMANN J, SOLOMON D. Recycling slaughterhouse waste into fertilizer: How do pyrolysis temperature and biomass additions affect phosphorus availability and chemistry?[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(2): 281-288.
- [25] 史殿龙, 张志华, 李国学, 等. 堆高对生活垃圾中15 mm筛下物堆肥腐熟的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 324-329. SHI D L, ZHANG Z H, LI G X, et al. Effect of stacking height on maturity during composting of municipal solid waste under 0-15 mm sieved[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 324-329.
- [26] EDMUNDO A, JORGE L Z, JUAN C H, et al. Growth and reproductive potential of *Eisenia foetida* (Sav) on various zoo animal dungs af-

- ter two methods of pre-composting followed by vermicomposting[J]. *Waste Management*, 2017, 64:67-78.
- [27] LASARIDI K, PROTOPAPA I, KOTSOU M, et al. Quality assessment of composts in the Greek market: The need for standards and quality assurance[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 80(1): 58-65.
- [28] KAVIRAJ, SATYAWATI S. Municipal solid waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworms[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 90(2): 169-173.
- [29] 胡敏, 屈忠义, 王丽萍, 等. 不同改良剂对河套灌区盐渍化土壤性状和葵花生长特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 316-322. HU M, QU Z Y, WANG L P, et al. Effects of different amendments on the properties of salinized soil and sunflower growth in Hetao Irrigation District[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 316-322.
- [30] 黄丽娟, 李海朝. 骨炭的应用和研究进展[J]. *应用化工*, 2018, 47(9): 2015-2019. HUANG L J, LI H C. Application and research progress of bone char[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(9): 2015-2019.
- [31] 廖梓鹏. 农田土壤微生物碱性磷酸酶基因的多样性及其对磷素响应[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. LIAO Z P. Diversity of microbial alkaline phosphatase gene in farmland soil and its response to phosphorus[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [32] 朱能武. 好氧堆肥的代谢酶变化和生物毒性物质的降解[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2005(11): 6-9. ZHU N W. Variation of metabolic enzymes and degradation of phytotoxicity materials in aerobic composting[J]. *South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2005(11): 6-9.
- [33] 于川洋. 生物炭添加污泥堆肥对土壤改良效果研究[J]. *绿色科技*, 2017(8): 95-98, 100. YU C Y. Effects on impacts of sewage sludge compost with biochar on soil improvement[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017(8): 95-98, 100.
- [34] 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 H T, DI L, LIU P, et al. Effect of earthworm bio-bed treatment on properties of cow manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 255-259.
- [35] 张婷敏, 呼世斌, 陈晓飞. 蚯蚓堆肥处理有机废弃物的研究——基于红薯秸秆、牛粪和污泥的混合物料[J]. *农机化研究*, 2012, 34(4): 110-114. ZHANG T M, HU S B, CHEN X F. Study on vermicomposting of sweet potato straw, cow dung and sewage sludge[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(4): 110-114.
- [36] 朱兰保, 盛蒂. 农业废弃物堆肥进程中理化性状的动态变化[J]. *湖北工程学院学报*, 2019, 39(3): 21-25. ZHU L B, SHENG D. Dynamic changes of physicochemical properties in the process of agricultural waste composting[J]. *Journal of Hubei Institute of Engineering*, 2019, 39(3): 21-25.
- [37] GARG V K, KAUSHIK P, DILBAGHI N. Vermiconversion of waste water sludge from textile mill mixed with plant slurry employing *Eisenia fetida*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 65: 412-419.
- [38] KAUSHIK P, GARG V K. Dynamics of biological and chemical parameters during vermicomposting of solid textile mill sludge mixed with cow dung and agricultural residues[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 94(2): 203-209.
- [39] 李思敏, 赵阳悦, 唐锋兵. 辅料对比对市政污泥堆肥效果的影响[J]. *当代化工*, 2020, 49(4): 564-567, 571. LI S M, ZHAO Y Y, TANG F B. Influence of additive ratio on municipal sludge composting effect[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(4): 564-567, 571.
- [40] ZHU F X, HONG C L, WANG W P, et al. A microbial agent effectively reduces ammonia volatilization and ensures good maggot yield from pig manure composted via housefly larvae cultivation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122373.
- [41] 龚小强, 李素艳, 魏乐, 等. 牛粪添加对园林绿化废弃物蚯蚓堆肥的影响研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(2): 285-294. GONG X Q, LI S Y, WEI L, et al. Vermicomposting of green waste using *Eisenia fetida* and as affected by addition of cow dung[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(2): 285-294.