

稻秸蚯蚓堆制后的物理、化学及微生物特性变化

于建光¹, 常志州^{1*}, 沈磊², 张建英¹, 杜静¹, 徐跃定¹

(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 江苏农林职业技术学院生物工程系, 江苏句容 212400)

摘要: 利用水稻秸秆与畜禽粪便(牛粪、猪粪和鸡粪)等干重混合物(RCD、RPM、RCE)接种蚯蚓(*Eisenia foetida*)进行堆制, 研究堆肥产物的物理、化学及微生物特性变化。结果表明, 蚯蚓堆制 30 d 后, 稻秸牛粪、稻秸猪粪堆肥产物 MBC 含量显著下降; 3 种稻秸粪便混合物经蚯蚓堆制后, 堆肥产物微生物代谢熵、脱氢酶和碱性磷酸酶活性增加, 尤以 RCD 的变化明显。稻秸牛粪、稻秸猪粪及稻秸鸡粪混合物经蚯蚓堆制后, 总固形物平均重量损失分别增加 6.45%、4.22% 和 3.82%; pH 值均降低, 其中 RCD 显著降低。蚯蚓堆制有助于提高堆肥产物全氮、全磷和全钾含量, 同时使碳氮比降低。水稻秸秆混入部分畜禽粪便经蚯蚓堆制可减少堆肥时间并提高堆肥质量, 混入的粪便以牛粪最好, 猪粪次之, 鸡粪最差。

关键词: 水稻秸秆; 蚯蚓堆制; 物理化学特性; 微生物

中图分类号: S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)06-1503-06

Changes in physical-chemical and microbial properties of rice straw through vermicomposting

YU Jian-guang¹, CHANG Zhi-zhou^{1*}, SHENG Lei², ZHANG Jian-ying¹, DU Jing¹, XU Yao-ding¹

(1 Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of

Agricultural Science, Nanjing, Jiangsu 210014, China;

2 Department of Bioengineering, Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong, Jiangsu 212400, China)

Abstract: Vermicomposting is a popular technique used for waste treatment (e. g. cow dung, pig manure and chicken excrement). In order to evaluate the feasibility of vermicomposting used for rice straw treatment, three kinds of rice straw and dung mixture (straw:dung = 1:1, dry weight) were set up: rice straw plus cattle dung (RCD), rice straw plus pig manure (RPM) and rice straw plus chicken excrement (RCE). The physical-chemical and microbial properties of end products obtained through composting and vermicomposting were analyzed respectively. The results indicated that vermicomposting decreased the microbial biomass carbon (MBC) in the end products of RCD and RPM significantly after thirty days, while increased the microbial respiration quotient (qCO_2), dehydrogenase and alkaline phosphatase activities in the end products of RCD, RPM and RCE, especially for RCD. The total solid loss (TS loss) in the RCD, RPM and RCE were increased through vermicomposting by 6.45%, 4.22% and 3.82%, respectively. Vermicomposting decreased the pH in the end products of three straw and dung mixture. The vermicompost obtained from RCD, RPM and RCE increased the contents of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK), while reduced C:N ratio compared with compost. The vermicomposting effects used for rice straw was followed with the order: RCD > RPM > RCE. The best dung suitable for vermicomposting was cattle dung followed by pig manure and chicken excrement.

Key words: rice straw; vermicomposting; physical-chemical property; microbe

收稿日期: 2009-11-17 接受日期: 2010-05-19

基金项目: 中国博士后科学基金(20080431110); 国家科技支撑计划(2006BAD17B01-01)资助。

作者简介: 于建光(1975—), 男, 山西忻州人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业废弃物处理与处置研究。

Tel: 025-84390243, E-mail: yujg@jaas.ac.cn * 通讯作者 Tel: 025-84390238, E-mail: czhizhou@hotmail.com

秸秆养分含量丰富,直接还田有利于提高土壤的肥力与质量^[1-2],但大量秸秆还田会对作物生长产生不利影响。秸秆堆肥后再还田有助于克服上述矛盾,但秸秆堆肥进程受到堆肥材料质量、环境、参与分解生物等的影响。通过将秸秆和畜禽粪便、城市污泥、生活垃圾等混合堆制,有助于降低秸秆的碳氮比以及木质素、纤维素和多酚含量,进而促进物料的腐熟与稳定^[1,3]。水稻秸秆由于本身体积大以及具结晶状纤维结构,即便与畜禽粪便混合堆肥,在堆肥过程中因吸水困难导致微生物难以深入秸秆内部,如不粉碎,需较长时间才能达到腐熟程度。

蚯蚓常被称为“生态系统工程师”^[4],可加快土壤中植物性材料的分解与转化^[5]。利用蚯蚓处理有机废弃物,如树叶、城市污泥、生活垃圾、牲畜粪便、粪便秸秆混合物等作为原料进行堆制均取得了较好的效果^[6-13];而且堆肥产品也有利于作物生长和土传病害的控制^[14-15]。接种蚯蚓用于各种废弃物堆肥化的过程称为“蚯蚓堆制”(Vermicomposting),蚯蚓通过混合、加工与破碎堆肥材料并改变其微生物群落的组成和活性而起作用^[16-17]。上述报道涉及了部分秸秆的堆肥处理,秸秆在堆肥材料中所占比例较小,而接种蚯蚓用于秸秆为主要物料进行堆制处理的研究还少有报道。本研究拟通过蚯蚓与稻秸粪便混合物进行堆肥处理,以期构建水稻秸秆蚯蚓堆制与综合评价体系,推广成本低、简单实用的稻秸堆肥技术提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

供试水稻秸秆和畜禽粪便均来自南京市周边农场或养殖场。水稻秸秆风干切碎至 5 cm 左右,粪便风干粉碎过 4 mm 筛,水稻秸秆和粪便的基本性状见表 1。供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),购自南京市某蚯蚓养殖场,个体平均鲜重 0.275 g。

试验选用 3 种堆肥物料:水稻秸秆和牛粪等干重混合物(Rice straw plus cattle dung, RCD,二者干重比为 1:1,下同)、水稻秸秆和猪粪等干重混合物(Rice straw plus pig manure, RPM)、水稻秸秆和鸡粪等干重混合物(Rice straw plus chicken excrement, RCE)。每种堆肥物料设 4 次重复用于常规堆肥(Composting),4 次重复用于蚯蚓堆肥(Vermicomposting)。

所有物料在试验开始前均初始堆制 30 d 以便达到热稳定、初始微生物降解与软化,堆制后堆肥物

表 1 供试物料基本性状

Table 1 Chemical properties of experiment material

物料 Material	总有机碳 TOC (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	全磷 TP (g/kg)	全钾 TK (g/kg)	碳氮比 C/N
稻秸 RS	421.99	8.49	0.85	4.37	49.70
牛粪 CD	326.23	19.35	8.06	12.60	16.86
猪粪 PM	329.52	8.05	8.41	0.45	40.93
鸡粪 CE	298.81	14.79	6.37	19.56	20.20

注(Note): RS—Rice straw; CD—Cattle dung; PM—Pig manure; CE—Chicken excrement. TOC—Total organic carbon; TN—Total N; TP—Total P; TK—Total K.

料的理化性状见表 2。初始堆制所用容器长×宽×高为 1.2 m×0.6 m×0.5 m 的塑料箱,加水调节物料含水量为 75%,置于温室培养。试验地大气日均温是 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,分装于 25 cm×25 cm(直径×高)塑料盆钵中,依各物料含水率分别使每盆物料干重为 1 kg(湿物料 4 kg 左右),加水调节物料含水率为 75%;在接种蚯蚓处理盆钵中接种蚯蚓。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。物料湿度通过每 2 d 浇水或喷水维持含水率为 75%。30 d 后破坏性采样,充分混匀,捡取蚯蚓并称鲜重,部分堆肥终产物鲜样保存于 4℃冰箱用于微生物指标测定,部分鲜样于 60℃烘干粉碎用于理化性状测定。

1.2 测定项目与方法

微生物量碳(MBC):采用氯仿熏蒸浸提法^[8,18]。即称取 5 g 鲜样,加 100 mL K₂SO₄,振荡浸提和过滤后用 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校正后为 MBC($k_c = 2.64$)。

基础呼吸(BR)采用 28℃恒温培养 24 h 碱液吸收法;代谢熵(qCO_2)为基础呼吸与微生物量碳之比;脱氢酶采用 TTC 法;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^[19]。堆肥总固形物(TS)通过 80℃烘干 23 h 测定^[21];pH 值和电导率通过将样品于 1:10 的蒸馏水中振荡 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]: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

表 2 蚯蚓堆制前各堆肥物料的理化性状

Table 2 Physical-chemical properties of bedding material at the start of experiment

物料 Material	pH	电导率 EC (mS/cm)	总有机碳 TOC (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	全磷 TP (g/kg)	全钾 TK (g/kg)	碳氮比 C/N
RCD	9.37	1.26	337.86	14.25	5.72	20.90	23.71
RPM	9.14	1.01	369.80	9.85	6.50	12.23	37.54
RCE	9.19	1.53	317.41	12.28	5.68	21.77	25.85

注(Notes): RCD—水稻秸秆和牛粪等干重混合物 Rice straw plus cattle dung; RPM—水稻秸秆和猪粪等干重混合物 Rice straw plus pig manure; RCE—水稻秸秆和鸡粪等干重混合物 Rice straw plus chicken excrement.

$H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮—铝锑抗比色法; 全钾(TK)采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮—火焰光度法测定。

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)。

2 结果与讨论

2.1 蚯蚓生物量变化

蚯蚓堆制 30 d 后,RCD、RPM 和 RCE 中蚯蚓鲜重均增加,分别比试验开始时增加 $61.08\% \pm 9.3\%$ 、 $48.82\% \pm 2.83\%$ 和 $8.7\% \pm 0.91\%$ 。表明在 30 d 的蚯蚓堆制中,稻秸牛粪混合物更适于蚯蚓生长,而稻秸猪粪混合物次之,稻秸鸡粪混合物最差。其原因可能与不同粪便重金属、抗生素含量以及堆肥释放有毒有害物质的差异有关^[23-25]。

2.2 堆肥产物微生物特性变化

在秸秆粪便混合物蚯蚓堆制过程中,蚯蚓与微生物的相互作用过程非常复杂,微生物量既表征微生物的数量,又是有效养分的供应源和储存库。相比于常规堆肥,蚯蚓堆制 30 d 后 RCD 和 RPM 处理的微生物量碳(MBC)含量显著减少($P < 0.05$),与 Aira 等^[19]的结果一致。而 RCE 处理的 MBC 含量增加,但差异未达显著水平($P = 0.174$)。蚯蚓堆制使 RCD 和 RPM 中 MBC 含量减少的原因可能是蚯蚓部分以微生物为食或者由于堆肥养分的耗竭所致^[19, 26]; 而 RCE 的 MBC 含量增加可能源于蚯蚓作用后堆肥材料含有较多的易利用养分所致(表 3)。

基础呼吸(BR)是微生物群落对基质整体利用能力的表征。蚯蚓堆制能使 RCD 和 RPM 的 BR 下降,而使 RCE 的 BR 升高,其变化与 MBC 变化相呼应,二者间呈现较好的相关性($r = 0.646$, $P < 0.01$)。蚯蚓堆制使 3 种堆肥产物的代谢熵(qCO_2)增大,其中 RCD 的增幅显著($P < 0.05$),RPM 极显著($P < 0.01$),与张宝贵等^[27]的结果一致。 qCO_2

表征单位微生物的代谢能力,蚯蚓堆制使 qCO_2 增大表明物料微生物群落的年轻化或微生物群落结构的改变^[28]。

脱氢酶能促进糖类与有机酸的脱氢反应,脱氢酶活性是指示微生物活性的重要指标^[29],其活性大小取决于基质碳、氮、磷等的含量。表 3 还看出,蚯蚓堆制使 3 种堆肥物料的脱氢酶活性升高,其中 RCD 的增幅显著($P < 0.05$),脱氢酶活性升高表明堆肥微生物活性的提高。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,RCD 和 RPM 均因接种蚯蚓而使其纤维素酶活性升高,其中 RCD 增幅显著($P < 0.05$),相反 RCE 经蚯蚓堆制后纤维素酶活性显著降低($P < 0.05$),原因尚不明了。磷酸酶催化有机磷为无机磷^[30],蚯蚓堆制使 3 种堆肥物料的碱性磷酸酶活性升高,其中 RCD 极显著升高($P < 0.05$); 碱性磷酸酶活性的提高有助于提升堆肥的品质,因为堆肥产品施用于土壤后,其中所含有的磷酸酶可继续发挥酶促作用,促进土壤中有机磷的活化。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,但堆肥微生物活动影响酶的活性为不争的事实。蚯蚓一方面通过堆肥材料的混合、吞咽及排粪等行为影响微生物,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^[31]。

2.3 堆肥产物物理化学性质变化

总固形物(Total solids, TS)重量损失可较直观地评价堆肥的效果与进程,蚯蚓堆制使堆肥进程加快,促进了秸秆的减容减量(表 4); 蚯蚓堆制后较多的蚯蚓生物量(鲜重)有助于增加堆肥物料 TS 重量损失。

相比于常规堆肥,3 种稻秸粪便混合物经蚯蚓堆制后 TS 的重量损失均增加,其中 RCD 增加了 6.45%,差异显著; RPM 和 RCE 分别增加了 4.22%

表 3 蚯蚓堆制对堆肥产物微生物特性的影响
Table 3 Microbial properties of end products of experiment

材料 Composting material	微生物量碳 (MBC) (mg/kg)			基础呼吸 (BR) [CO ₂ -C mg/(kg·d)]			代谢熵 (q CO ₂) [μg/(mg·h)]		
	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test
RCD	18759 ± 688	16417 ± 1211	0.033 *	2824 ± 202	2701 ± 180	0.397	6.29 ± 0.59	7.62 ± 0.53	0.041 *
RPM	15845 ± 2580	11458 ± 1390	0.034 *	2065 ± 172	2045 ± 106	0.851	5.51 ± 0.76	7.50 ± 0.76	0.010 **
RCE	15331 ± 2034	18026 ± 174	0.174	2523 ± 120	2776 ± 299	0.168	6.17 ± 0.56	7.27 ± 0.95	0.247

材料 Composting material	脱氢酶 Dehydrogenase [TPF mg/(g·d)]			纤维素酶 Cellulase [Glu. mg/(g·d)]			碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase [Phen. mg/(g·d)]		
	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test
RCD	29.52 ± 1.05	32.12 ± 0.65	0.021 *	3.20 ± 0.05	3.46 ± 0.12	0.050 *	7.69 ± 0.24	12.15 ± 1.25	0.001 *
RPM	26.83 ± 1.82	26.95 ± 1.52	0.931	2.82 ± 0.05	2.96 ± 0.14	0.169	8.11 ± 0.87	9.64 ± 1.23	0.201
RCE	29.74 ± 2.14	29.83 ± 0.74	0.947	4.50 ± 0.27	3.90 ± 0.10	0.024 *	9.82 ± 0.18	13.08 ± 1.88	0.082

注 (Note): n=4; * P<0.05; ** P<0.01. RCD—水稻秸秆和牛粪等干重混合物 Rice straw plus cattle dung; RPM—水稻秸秆和猪粪等干重混合物 Rice straw plus pig manure; RCE—水稻秸秆和鸡粪等干重混合物 Rice straw plus chicken excrement. MBC—Microbial biomass carbon; BR—Basal respiration; qCO₂—Respiration quotient.

表 4 蚯蚓堆制对堆肥产物物理与化学性质的影响
Table 4 Physical-chemical properties of end products of experiment

材料 Composting material	总固形物损失 TS loss (%)			pH			电导率 EC (mS/cm)		
	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test
RCD	25.41 ± 2.90	31.86 ± 1.34	0.038 *	9.25 ± 0.05	9.08 ± 0.03	0.017 *	1.72 ± 0.01	1.75 ± 0.02	0.081
RPM	17.93 ± 3.01	22.15 ± 2.12	0.062	9.00 ± 0.08	8.88 ± 0.07	0.058	1.33 ± 0.04	1.34 ± 0.04	0.912
RCE	21.91 ± 2.79	25.74 ± 1.13	0.753	9.00 ± 0.10	8.97 ± 0.05	0.531	2.02 ± 0.07	2.03 ± 0.11	0.915

材料 Composting material	总有机碳 TOC (g/kg)			全氮 TN (g/kg)			全磷 TP (g/kg)		
	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test
RCD	314.0 ± 7.5	310.3 ± 8.5	0.529	17.05 ± 1.00	20.28 ± 1.08	0.009 **	7.79 (0.52)	9.01 ± 0.15	0.004 **
RPM	333.2 ± 5.9	321.0 ± 2.8	0.014 *	9.42 ± 0.52	10.16 ± 0.64	0.124	8.77 (1.01)	9.23 ± 0.47	0.444
RCE	307.2 ± 7.6	294.3 ± 2.8	0.019 *	16.16 ± 0.43	16.70 ± 1.97	0.681	9.04 (0.28)	9.04 ± 0.60	0.994

材料 Composting material	全钾 TK (g/kg)			碳氮比 C/N		
	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test	常规堆肥 Compost	蚯蚓堆制 Vermicompost	t-test
RCD	25.73 ± 1.22	31.22 ± 0.98	0.023 *	18.24 ± 1.16	15.65 ± 1.14	0.032 *
RPM	15.23 ± 1.06	18.34 ± 0.83	0.004 **	34.15 ± 1.75	33.03 ± 2.32	0.493
RCE	29.09 ± 1.47	30.52 ± 0.88	0.167	18.22 ± 0.50	18.13 ± 1.92	0.776

注 (Note): n=4; * P<0.05; ** P<0.01. RCD—水稻秸秆和牛粪等干重混合物 Rice straw plus cattle dung; RPM—水稻秸秆和猪粪等干重混合物 Rice straw plus pig manure; RCE—水稻秸秆和鸡粪等干重混合物 Rice straw plus chicken excrement.

和 3.82%。从表 2 和表 4 可以看出,稻秸粪便混合物经常规堆肥后,pH 值均较初始值降低,蚯蚓堆制加快了 pH 值的下降,其中 RCD 的降幅显著,与 Suthar 的结果一致^[15]。pH 值变化可能源于蚯蚓堆制过程有机质分解产生 CO₂ 与有机酸的增加所致^[32]。电导率表征堆肥浸提液的导电性能,常规堆肥与蚯蚓堆制使 3 种稻秸粪便混合物的电导率增大,但二者间差异均不显著。堆肥电导率的增大归功于微生物或蚯蚓在分解有机质时离子与矿物元素的增加。

常规堆肥和蚯蚓堆制后的有机碳含量均较堆肥开始时降低,这是因为堆肥过程有机碳以 CO₂ 形式排放。蚯蚓堆制比常规堆肥降低了堆肥产物有机碳含量,其中 RPM 与 RCE 降幅显著,蚯蚓堆制是蚯蚓取食有机质与微生物降解的过程,蚯蚓由于自身需求及其活动均会对有机质的矿化产生积极作用。常规堆肥及蚯蚓堆制后的全氮含量则比堆肥开始时增加,而蚯蚓堆制增加了全氮含量,其中 RCD 增幅显著。其原因可能是蚯蚓通过富含氮排泄物的产生增加了堆肥产物氮含量,另外的原因可能是蚯蚓堆制产物中低的 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 种稻秸粪便混合物经堆肥后的全磷和全钾含量均升高,蚯蚓堆制相比常规堆肥进一步提高了 RCD 和 RPM 的全磷和全钾含量,其中 RCD 的全磷和全钾含量达极显著和显著增加;RPM 全钾含量极显著增加(表 4)。试验中全钾含量变化与 Garg 等^[34]进行的 7 种动物粪便堆制后全钾因淋失而下降的结果不同,本试验由于容器底部密闭没有产生淋失。堆肥磷、钾元素与氮不同,在堆肥过程中几乎没有气态损失,堆肥全磷与全钾含量增加主要应归功于 TS 下降所导致的“浓缩效应”。

堆肥产物碳氮比表征常规堆肥和蚯蚓堆制后有机底物的矿化与稳定^[15]。3 种稻秸粪便混合物初始碳氮比经常规堆肥后均显著下降,蚯蚓堆制进一步降低了其碳氮比,RCD 降幅最大,差异显著,其次为 RPM 与 RCE。蚯蚓堆制使产物碳氮比降低原因主要是蚯蚓通过加快有机碳的呼吸释放及富含氮素排泄物的产生增加了底物氮含量所致。稻秸牛粪混合物和稻秸鸡粪混合物均可经常规与蚯蚓堆制使其碳氮比低于 20,而产物碳氮比降到 20 以下时,表明有机质较稳定,已达腐熟要求^[35]。由于试验选用的猪粪碳氮比较高,因此稻秸猪粪混合物初始碳氮比较高,经常规与蚯蚓堆制 30 d 仍显不足,需延长堆腐时间。

3 结论

1) 蚯蚓堆制 30 d 后,蚯蚓鲜重分别比试验开

始前平均增加 61.08%、48.82% 和 8.7%,以蚯蚓增殖为评价指标,适合于水稻秸秆蚯蚓堆制的粪便为:牛粪 > 猪粪 > 鸡粪。

2) 稻秸牛粪和稻秸猪粪等干重混合物经蚯蚓堆制后,MBC 含量显著下降,而稻秸鸡粪混合物经蚯蚓堆制后 MBC 含量升高;3 种混合物经蚯蚓堆制后,微生物代谢熵、脱氢酶和碱性磷酸酶活性均增加,尤以 RCD 增加明显。

3) 蚯蚓堆制后,总固形物平均重量损失增加,RCD、RPM 和 RCE 分别增加 6.45%、4.22% 和 3.82%;3 种混合物经蚯蚓堆制后,pH 值下降,其中稻秸牛粪混合物下降显著;蚯蚓堆制有助于提高堆肥产物全氮、全磷和全钾含量,同时使其碳氮比下降,各堆肥物料适用于蚯蚓堆制的顺序依次为 RCD > RPM > RCE。

参考文献:

- [1] Iranzo M, Canizares J V, Roca-Perez L. Characteristics of rice straw and sewage sludge as composting materials in Valencia (Spain)[J]. *Bioresour. Techn.*, 2004, 95: 107-112.
- [2] 武志杰,张海军,许广山,张玉华,等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. *应用生态学报*,2002,13(5): 539-542.
Wu Z J, Zhang H J, Xu G S, Zhang Y H *et al.* Effect of returning corn straw into soil on soil fertility[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, 13(5): 539-542.
- [3] Li X, Zhang R, Pang Y. Characteristics of dairy manure composting with rice straw[J]. *Bioresour. Techn.*, 2008, 99: 359-367.
- [4] Decans T, Rangel A F, Asakawa N, Thomas R J. Carbon and nitrogen dynamics in ageing earthworm casts in grasslands of the eastern plains of Colombia[J]. *Biol. Fert. Soils*, 1999, 30: 20-28.
- [5] Uyl A, Didden W, Marinissen J. Earthworm activity and decomposition of ¹⁴C-labelled grass root systems[J]. *Biol. Fert. Soils*, 2002, 36: 447-455.
- [6] 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 H X, Hu F, Cang L *et al.* Effect of vermicomposting on characteristics of cattle manure[J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2004, 23(3): 588-593.
- [7] Manna M C, Jha S, Ghosh P K, Acharya C L. Comparative efficacy of three epigeic earthworms under different deciduous forest litters decomposition[J]. *Bioresour. Techn.*, 2003, 88: 197-206.
- [8] Aira M, Monroy F, Domínguez J. Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry[J]. *Sci. Total Environ.*, 2007, 85: 252-261.
- [9] Ndegwa P M, Thompson S A. Effects of C-to-N ratio on vermicom-

- posting of biosolids[J]. *Bioresour. Tech.*, 2000, 75: 7-12.
- [10] 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.
Chen Y C, Pi G J, Huang L X *et al.* Factor optimization for municipal domestic wastes treatment by earthworms and its concentration of heavy metals[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(11): 2006-2010.
- [11] Sangwan P, Kaushik C P, Garg V K. Feasibility of utilization of horse dung spiked filter cake in vermicomposters using exotic earthworm *Eisenia foetida*[J]. *Bioresour. Technol.*, 2008, 99: 2442-2448.
- [12] Tripathi G, Bhardwaj P. Comparative studies on biomass production, life cycles and composting efficiency of *Eisenia fetida* (*Savigny*) and *Lampito mauritii* (*Kinberg*)[J]. *Bioresour. Tech.*, 2004, 92: 275-283.
- [13] Suthar S. Bioconversion of post harvest crop residues and cattle shed manure into value-added products using earthworm *Eudrilus eugeniae* Kinberg[J]. *Ecol. Eng.*, 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,孙永明. 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.
Hu Y X, Sun Z J, Wang D H, Sun Y M. Analysis of antagonistic microorganism in vermicompost[J]. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 2004, 10(1): 99-103.
- [16] Pati S S, Sahu S K. CO₂ evolution and enzyme activities (dehydrogenase, protease and amylase) of fly ash amended soil in the presence and absence of earthworms (*Drawida willsi* Michaelsen) under laboratory conditions[J]. *Geoderma*, 2004, 118: 289-301.
- [17] Welke S E, Parkinson D. Effect of *Apporrectodea trapezoids* activity on seeding growth of *Pseudosuga menziesii*, nutrient dynamics and microbial activity in different forest soils[J]. *For. Ecol. Manag.*, 2003, 173: 169-186.
- [18] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19(6): 703-707.
- [19] Aira M, Monroy F, Domínguez J, Mato, S. How earthworm density affects microbial biomass and activity in pig manure[J]. *Eur. J. Soil Biol.*, 2002, 38: 7-10.
- [20] Aira M, Monroy F, Domínguez J. Changes in microbial biomass and microbial activity of pig slurry after the transit through the gut of the earthworm *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867)[J]. *Biol. Fert. Soils*, 2006, 42: 371-376.
- [21] Ndegwa, P M, Thompson S A. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids[J]. *Bioresour. Tech.*, 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.
Bao S D. *Soil agro-chemistry analysis methods* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007. 433-437.
- [23] 刘荣乐,李书田,王秀斌,王敏. 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.
Liu R L, Li S T, Wang X B, Wang M. Content of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2005, 24(2): 392-397.
- [24] 匡光伟,孙志良,陈小军,等. 四环素类抗菌药物在鸡粪中的降解研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5): 1784-1788.
Kuang G W, Sun Z L, Chen X J *et al.* Degradation of tetracyclines in chicken feces[J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2007, 26(5): 1784-1788.
- [25] 杨世关,刘亚纳,张百良. 赤子爱胜蚓处理鸡粪的试验研究[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1): 55-57.
Yang S G, Liu Y N, Zhang B L. Experiment on *Eisenia foetida* for compost of chook manure[J]. *Chin. J. Eco-Agric.*, 2007, 15(1): 55-57.
- [26] Dominguez J. State of the art and new perspectives in vermicomposting research[A]. Edwards C A (Ed.). *Earthworm ecology* [M]. Boca Raton, Florida, US: CRC Press, 2004. 401-425.
- [27] 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.
Zhang B G, Li G T, Shen T S. Influence of the earthworm *pheretima guillelmi* on soil microbial biomass and activity[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2000, 20(1): 168-172.
- [28] Santruckova H, Straskaba M. On the relationship between specific respiration, activity and microbial biomass in soils[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1990, 23(6): 525-531.
- [29] Garcia C, Hernandez T, Costa F. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils[J]. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 1997, 28: 123-134.
- [30] Alef K, Nannipieri P, Trazar-Cepeda C. Phosphatase activity [A]. Alef K, Nannipieri P (Eds.). *Methods in applied soil microbiology and biochemical* [M]. London: Academic Press, 1995. 335-344.
- [31] 张宝贵. 蚯蚓与微生物的相互作用[J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 556-560.
Zhang B G. Interaction between earthworms and microorganisms [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 1997, 17(5): 556-560.
- [32] Ndegwa P M, Thompson S A, Das K C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids[J]. *Bioresour. Tech.*, 2000, 71: 5-12.
- [33] Hartenstein R, Hartenstein F. Physic-chemical changes affected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida*[J]. *J. Environ. Qual.*, 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]. *Environ.*, 2006, 26: 269-276.
- [35] Senesi N. Composted materials as organic fertilizers[J]. *Sci. Tot. Environ.*, 1989, 81/82: 521-52.