

不同比例蚓粪对旱地土壤微生物学特性以及酶活性的影响

张池 陈旭飞 周波 张聪俐 李静娟 张静 戴军*

(华南农业大学 资源环境学院, 广州 510642)

摘要 在试验室条件下,通过将不同比例的蚓粪(0.5%、10% 和 20%)施用于赤红壤旱地土壤,进行为期 30 d 的玉米盆栽试验,研究蚓粪施用对各处理土壤的微生物学特征和酶活性的影响。蚓粪添加能够显著增加土壤溶解性碳、碱解氮和速效磷含量,提高土壤的微生物碳和氮的含量,同时降低微生物量碳氮比($P < 0.05$)。5%的蚓粪处理显著促进了微生物呼吸速率和代谢熵,同时 5%、10% 和 20% 蚓粪处理均显著增加土壤过氧化氢酶、转化酶、脲酶、酸性和碱性磷酸酶活性($P < 0.05$)。随着土壤中蚓粪比例的增加,微生物量碳氮和酶活性显著增强($P < 0.05$),其过氧化氢酶和转化酶、脲酶、酸性和碱性磷酸酶分别与溶解性碳、碱解氮和速效磷含量呈现显著正相关关系($P < 0.05$)。多元数据分析结果进一步显示:与对照和 5%的蚓粪处理相比,10% 和 20% 蚓粪处理综合生物学特征差异显著($P < 0.05$),但 10% 和 20% 蚓粪处理间差异不大($P > 0.05$)。在实际农田管理中,蚓粪的施入量应控制在 10% 以内。将蚯蚓堆制技术引入禽畜粪便处理,生产无害、高品质的有机肥-蚓粪,其对可持续农业生产、环境保护和生态循环均具有重要意义。

关键词 蚓粪; 旱地土壤; 微生物学性状; 酶活性

中图分类号 S 154; X 713

文章编号 1007-4333(2014)01-0118-07

文献标志码 A

Changes of microbial characteristics and enzyme activities in the upland soil amended with different quantities of vermicompost

ZHANG Chi, CHEN Xu-fei, ZHOU Bo, ZHANG Cong-li, LI Jing-juan, ZHANG Jing, DAI Jun*

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract The pot culture of maize was conducted for 30 days in laboratory condition with adding vermicompost at four levels of 0, 5%, 10% and 20%. Soil microbial characteristics and enzyme activities were evaluated in the soil. The results showed that adding vermicompost remarkably enhanced the contents of dissolved organic carbon, available nitrogen and phosphorus, microbial carbon and nitrogen ($P < 0.05$), while the ratio of microbial carbon and nitrogen was decreased ($P < 0.05$). Soil respiration rate and metabolic quotient were significantly improved in 5% vermicompost treatment. The enzyme activities were enhanced in 5%, 10% and 20% vermicompost treatments as well. The contents of microbial carbon and nitrogen, activities of catalase and invertase, urease, acid and alkaline phosphatase increased remarkably with increasing vermicompost rates ($P < 0.05$). There were significant positive relationships among dissolved carbon, available nitrogen and phosphorus ($P < 0.05$). Multivariate analysis showed that the biological parameters were significant higher in high dose of vermicompost (10% and 20%) than those of low dose (control and 5% vermicompost). There was not remarkable difference in soil biological properties between the treatments adding 10% and 20% vermicompost. It is thus suggested that the amount of vermicompost should be controlled within 10% in practical use. It is evident that vermicompost is a good method for treating livestock wastes and provides with a

收稿日期: 2013-06-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41201305); 广东省自然科学基金博士启动项目(S2012040007806); 中国博士后科学基金资助项目(2012M511819); 广东省教育部产学研结合项目(2011A09020003)

第一作者: 张池, 博士后, 主要从事土壤肥力、土壤生态等研究, E-mail: zhangchi121@163.com

通讯作者: 戴军, 教授, 主要从事土壤肥力、土壤生态等研究, E-mail: jundai@scau.edu.cn

harmless and high quality organic fertilizer. It is of great significances for the sustainable agriculture, environmental protection and ecological circulation.

Key words vermicompost; upland soil; microbiological characteristics; enzyme activities

广东省牛羊猪等养殖场年排放禽畜粪便总量达到 4 842 万 t, 产量的日益增多已经远远超出了农村的消纳能力, 带来严重的环境问题和资源浪费^[1]。有效提高禽畜粪便等农业有机废弃物利用率的技术逐渐受到人们关注。蚯蚓堆制技术通过蚯蚓取食、消化和排泄等活动, 将这些废弃物转化为蚓粪。由于蚓粪不仅具有良好的孔性、通气性、保肥性和排水性^[2], 而且作为微生物和小型无脊椎动物活跃的生长点, 显著影响着土壤物理、化学和生物学特征^[3-6]。因此将蚓粪作为无害和高品质的有机肥施入土壤进行培肥管理, 促进碳、氮和磷等各种营养物质吸收以及提高作物的产量和品质的措施, 已引起较多研究学者的重视。张聪俐等^[7]研究了不同蚓粪比例施入对玉米生长和土壤养分元素的影响。常青等^[8]研究了蚓粪对茄子生长和品质及土壤养分的作用。苏晓红等^[9]探讨了蚯蚓粪和磷肥配施对油菜生长和土壤性质的作用。而崔玉珍等^[10]则研究了蚯蚓粪对土壤的培肥作用及草莓产量和品质的影响。但是, 在作物种植期间, 关于不同比例蚓粪对土壤微生物性状和酶活性影响的研究目前仍较缺乏。另外, 微生物和酶在土壤中一起推动着养分的循环和转化, 影响着作物的生长。前人研究显示, 土壤微生物量碳氮、碳氮比、土壤呼吸和代谢熵等微生物特征与过氧化氢酶、转化酶、脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶等酶活性指标, 均对土壤有机质的转换和腐殖质的形成、有机无机胶体的形成、各营养元素的转化和释放有着直接的重要作用^[11]。而土壤溶解性碳、碱解氮和速效磷分别是土壤有机质分解、养分循环和微生物代谢过程中重要元素。因此, 适宜比例的蚓粪施入土壤所

带来的微生物特征和酶活性变化, 成为揭示土壤肥力提升和作物品质改善机制的重要因素。本研究在添加不同比例蚓粪的旱地土壤中进行短期玉米盆栽试验, 分析土壤溶解性碳、碱解氮和速效磷等含量变化, 微生物量碳氮、微生物呼吸和代谢熵等微生物学特性以及过氧化氢酶、转化酶、脲酶、酸性和碱性磷酸酶等酶活性的特征变化, 明确不同蚓粪比例对土壤各性质的影响, 探讨微生物性状和酶活性与土壤溶解性碳、碱解氮和速效磷的关系, 最终揭示蚓粪对土壤肥力和生物学质量的影响机理, 并试图寻找到适宜的蚓粪施用比例应用于田间生产, 以期对蚓粪培肥、改良土壤提供科学依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

制备蚓粪: 将自然堆沤后风干的牛粪湿润至饱和含水量的 60%, 按干牛粪加入赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 100 条 (鲜重约 30 g)/kg 的比例, 向牛粪中加入鲜活蚯蚓。将基质在室温条件下培养 2 个月, 使得蚯蚓充分消化所有物料, 全部转化为蚓粪。分离蚯蚓和蚓粪, 将蚓粪风干、研磨过 2 mm 筛, 备用。

供试玉米为广东省农科院蔬菜研究所的丰甜一号 (*Zea mays-Fengtian1*)。

供试土壤为发育于花岗岩的赤红壤旱地土, 采集于广州郊区华南农业大学教学农场 (E113°17', N23°8')。采样深度 0~20 cm, 自然风干后研磨过 2 mm 筛, 备用。

蚓粪以及土壤的基本理化性质如表 1 所示^[7]。

表 1 蚓粪和供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of vermicompost and the parent soil

样品 Sample	pH	含水率/% Moisture percentage	粘粒/% Clay	有机质/ (g/kg) Organic matter	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (g/kg) Total P	全钾/ (g/kg) Total K	碱解氮/ (mg/kg) Available-N	速效磷/ (mg/kg) Available-P	速效钾/ (mg/kg) Available-K
蚓 粪 Vermicompost	5.94	14.50	—	450.71	21.05	5.79	17.30	337.13	1 039.85	15 078.83
土 壤 Soil	6.87	1.50	18.90	25.80	0.88	3.12	10.50	57.27	37.79	108.40

1.2 研究方法

本试验共设置4个处理:每个处理3次重复,具体如下:1)土壤对照(以下简称为:S);2)5%蚓粪+95%土壤(5%ES);3)10%蚓粪+90%土壤(10%ES);4)20%蚓粪+80%土壤(20%ES)。

称取3000g过2mm筛蚓粪和土壤的混合物,装于4L的塑料盆中(盆高20cm,底直径15cm)。调节混合土壤水分至60%的饱和含水量。在每盆土壤中播种饱满玉米种3颗,待玉米间苗后,计时培养30d。玉米生长发育期间不进行追肥,试验每3d采用称重法调节水分含量。30d时收获,取出土壤风干,过2mm筛,备用。

1.3 土壤样品的测定方法

土壤溶解性碳的测定采用 K_2SO_4 浸提,重铬酸钾消化法测定^[12]。有效磷的测定采用 NH_4F-HCl ,钼锑抗比色法;碱解氮的测定采用碱解扩散法^[13]。

土壤微生物量碳氮采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法^[14]。土壤样品调至60%田间持水量并稳定24h后,在28℃黑暗条件下培养7d。用无酒精氯仿28℃黑暗真空条件下熏蒸24h,与不熏蒸的对照样品同时用0.5mol/L K_2SO_4 、按质量与体积比1:4土液比振荡浸提30min(200r/min),5100g力下离心10min后过滤,浸提液中的有机碳采用重铬酸钾消化法测定。土壤微生物量碳(Bc)按下列公式计算: $Bc = Ec / 0.38$ 其中,Ec为熏蒸和不熏蒸样品的浸提液中有机碳的差值;微生物量氮按下列公式计算: $Bn = En / 0.45$,其中En为熏蒸和对应不熏蒸样品的浸提液中的氮的差值^[15]。土壤呼吸测定采用NaOH吸收法,测定标准条件下微生物碳源矿化过程中 CO_2 的产生量^[16]。50g土壤样品(干重)调至60%田间持水量并稳定24h后,在28℃黑暗条件下1L玻璃瓶中密封培养,用NaOH吸收瓶中产生的 CO_2 ,在7d后用过量1mol/L $BaCl_2$ 沉淀碱吸收瓶中的 CO_3^{2-} ,用标准酸滴定剩余的NaOH以计算 CO_2 产生量。呼吸速率为单位时间内单位有机碳含量的呼吸量;另外,微生物代谢熵(q_{CO_2})以单位微生物量碳每天产生的 CO_2 量来确定^[17-18]。

土壤过氧化氢酶采用 $KMnO_4$ 容量法测定,酶活性以单位土壤质量的 $KMnO_4$ 的消耗量表示(0.02mol/L $KMnO_4$,mL/g);脲酶采用苯酚钠比色法,在578nm波长处比色测定,酶活性以37℃恒温培养24h后单位土壤质量中 NH_3-N 的质量分

数表示(NH_3-N ,mg/g 37℃,24h)。转化酶采用滴定法测定,酶活性以37℃恒温培养24h后单位土壤质量 $Na_2S_2O_3$ 的消耗量表示(0.1mol/L $Na_2S_2O_3$,mL/g,37℃,24h)。另外,磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定(酸性磷酸酶缓冲液为pH5.0醋酸盐,碱性磷酸酶缓冲液为pH9.6的硼酸盐),在578nm波长处比色测定,以上2种酶活性均以37℃恒温培养24h后单位土壤质量中酚的质量分数表示(酚,mg/g,37℃,24h)^[19]。

1.4 数据分析方法

试验数据均采用平均值±标准差,并用Duncan多重比较法进行差异显著性检验。主成分分析(Principal Components Analysis)通过在R中导入ADE-4软件包^[20-21],将各处理中相互关联的多个变量合成少数独立而又能反映总体信息的指标,并应用置换检验(Permutation test)比较不同处理间生物质量综合特征的差异;多元数据分析结果利用二维空间载荷图和得分图直观而形象的进行反映,处理间的差异显著性水平用 $P=0.05$ 表示。

2 结果与分析

2.1 土壤溶解性碳、碱解氮和速效磷变化

随着蚓粪的增加,土壤溶解性碳、碱解氮和速效磷含量显著增加($P<0.05$)。与对照土壤相比,处理5%ES、10%ES和20%ES的溶解性碳含量分别提高117%、295%和514%,碱解氮含量分别提高75%、145%和283%,速效磷含量分别提高230%、262%和949%(表2)。

表2 土壤溶解性碳、碱解氮和速效磷含量变化

Table 2 Variations of soil DOC, available N and P contents in treatments

处理 Treatment	溶解性碳/ (mg/kg) DOC	碱解氮/ (mg/kg) Available N	速效磷/ (mg/kg) Available P
OS	57.2±4.85 d	65.5±3.85 d	33.3±1.45 d
5%ES	124.0±3.17 c	115.0±6.22 c	110.0±2.85 c
10%ES	226.0±28.4 b	161.0±6.74 b	121.0±6.96 b
20%ES	351.0±19.4 a	251.0±5.91 a	349.0±5.91 a

注:平均值±标准差,重复数 $n=3$;每一列的不同字母代表该指标在不同处理中具有显著差异($P<0.05$)。下表同。

Note: Mean ± standard deviation, $n = 3$; Different small letters in each column meant significant difference in each variable at 0.05 level under different treatments. The same as below.

2.2 土壤微生物学特性变化

从表 3 可以看出,随着蚓粪施入量的增加,土壤中各处理的土壤微生物量碳氮含量显著增加($P < 0.05$),5%ES、10%ES 和 20%ES 处理的微生物量碳分别比处理 S 提高 62%、118% 和 210%,微生物量氮分别提高 179%、323% 和 927%。5%ES 的呼

吸速率显著高于 10%ES 和 20%ES($P < 0.05$),其代谢熵显著高于 S 处理 123%($P < 0.05$)。另外,5%ES、10%ES 和 20%ES 处理的土壤微生物量碳氮比显著低于对照 S 处理 9.9、10.3 和 16.7 个单位($P < 0.05$);且随着蚓粪施入量的增加,各处理微生物量碳氮比呈现下降趋势。

表 3 不同处理土壤微生物学特性变化

Table 3 Variations of soil microbial characteristics in treatments

处理 Treatment	微生物量碳/ (mg/kg) Microbial biomass-C	微生物量氮/ (mg/kg) Microbial biomass-N	微生物碳氮比 Microbial-C:N ratio	呼吸速率/ (g/(kg·d)) Respiration rate	代谢熵/ (mg(Cco ₂)/mg(C _{bio})) Metabolic quotient
S	158±6.32 d	7.52±2.48 c	22.7±8.08 a	1.63±0.58 ab	1.18±0.02 b
5%ES	256±34.9 c	21.0±4.98 bc	12.8±5.14 b	2.47±0.68 a	2.63±1.02 a
10%ES	344±37.9 b	31.8±8.39 b	12.4±2.64 b	0.97±0.37 b	1.19±0.82 b
20%ES	489±25.5 a	77.2±7.66 a	6.05±0.97 b	0.66±0.03 b	0.58±0.10 b

2.3 土壤酶活性变化

从表 4 可以看出,随着蚓粪施入量的增加,土壤各处理中土壤的酶活性显著升高($P < 0.05$)。处理 5%ES、10%ES 和 20%ES 的过氧化氢酶活性显著高于对照($P < 0.05$),并分别提高 63%、85% 和 157%;处理 10%ES 和 20%ES 的蔗糖转化酶活性显著高于对照($P < 0.05$),分别提高 369% 和

384%;处理 10%ES 和 20%ES 的脲酶活性显著高于对照($P < 0.05$),分别提高 134% 和 155%;处理 5%ES、10%ES 和 20%ES 的酸性磷酸酶活性比不添加蚓粪对照处理分别显著提高 139%、173% 和 203%($P < 0.05$);处理 5%ES、10%ES 和 20%ES 的碱性磷酸酶活性分别比对照显著提高 243%、358% 和 551%($P < 0.05$)。

表 4 不同处理土壤酶活性变化

Table 4 Variations of soil enzyme activities in treatments

处理 Treatment	过氧化氢酶/ (mL/g) Catalase	转化酶/ (mL/g) Invertase	脲酶/ (mL/g) Urease	酸性磷酸酶/ (mg/g) Acid phosphatases	碱性磷酸酶/ (mg/g) Alkaline phosphatases
OS	0.53±0.03 c	0.64±0.39 b	1.08±0.08 b	0.33±0.12 b	0.20±0.04 d
5%ES	0.87±0.06 b	1.28±0.29 b	1.14±0.16 b	0.79±0.18 a	0.69±0.12 c
10%ES	0.98±0.02 a	3.00±0.35 a	2.53±0.17 a	0.90±0.09 a	0.92±0.06 b
20%ES	1.36±0.15 a	3.10±0.18 a	2.76±0.14 a	1.00±0.07 a	1.30±0.12 a

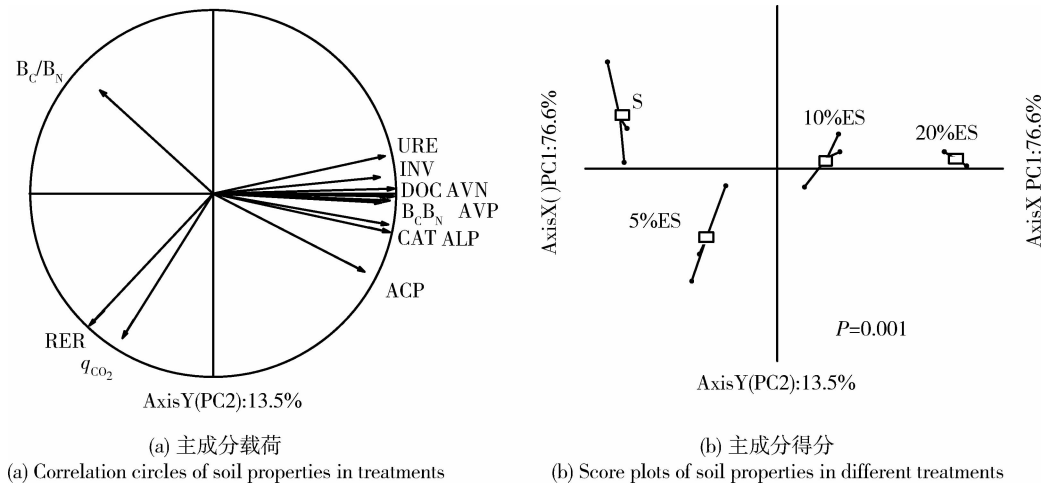
2.3 土壤各性质多元数据分析

各处理土壤性质的主成分分析结果如图 1 所示,第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的累计方差贡献率达到 90.1%,说明这 2 个独立的主成分变量可以反映原始变量的大部分信息。主成分载荷图 1(a)显示:第一主成分(PC1)的方差贡献率为 76.6%,其依次与脲酶、转化酶、DOC、碱解氮、速效

磷、B_N、B_C、过氧化氢酶、碱性磷酸酶和酸性磷酸酶密切相关。第二主成分的方差贡献率为 13.5%,其主要与呼吸速率、代谢熵和 B_C/B_N 有关。主成分得分图 2 (b)显示:土壤中处理之间的差异达到极显著水平($P = 0.001$)。处理 S 明显偏向 B_C/B_N 较高的方向,处理 5%ES 明显偏向代谢熵和呼吸速率较高的方向,处理 10%ES 和 20%ES 明显偏向脲酶、

转化酶、DOC、碱解氮、速效磷、 B_C 和 B_N 含量、过氧化氢酶、碱性磷酸酶、酸性磷酸酶活性较高的方向,同时 B_C/B_N 、代谢熵、呼吸速率较低的方向。处理 S 和 5%ES 的土壤综合生物学特征差异主要体现在第二主成分上,而处理 S 与 10%ES 和 20%ES 的土壤综合特征差异主要体现在第一主成分上。另外,

相关分析结果显示土壤的,溶解性碳、碱解氮、速效磷、微生物量碳氮含量都与过氧化氢酶、转化酶酶、脲酶、碱性磷酸酶和酸性磷酸酶活性呈显著的正相关关系,呼吸速率与代谢熵呈现显著的正相关关系,微生物量氮含量与微生物量碳氮比呈现显著的负相关关系 ($P < 0.05$)。



DOC:溶解性碳 Dissolve organic matter carbon; AVN: 碱解氮 Available N; AVP: 速效磷 Available P; RER: 呼吸速率 Respiration rate; q_{CO_2} : 代谢熵 Metabolic quotient; B_C : 微生物生物量碳 Microbial biomass-C; B_N : 微生物生物量氮 Microbial biomass-N; B_C/B_N : 微生物量碳氮比 Ratio of Microbial biomass-C and Microbial biomass-N; INV: 转化酶 Invertase; ACP: 酸性磷酸酶 Acid phosphatase; ALP: 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase; CAT: 过氧化氢酶 Catalase; URE: 脲酶 Urease。

图 1 各处理的土壤性质的主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of soil properties in treatments

3 讨论

土壤溶解性有机碳(DOC)、碱解氮和速效磷是土壤中最容易被微生物利用的碳、氮和磷素养分,与土壤养分循环、供应^[13,22]和微生物的生长繁殖密切相关^[23-24]。Aira等^[25]结果显示蚓粪具有较高的土壤DOC含量。唐超等^[26]研究结果显示蚓粪可溶性有机物较高,且其对黑麦草生长的影响优于牛粪。崔玉珍等^[10]研究结果显示化肥配施蚓粪后,种植草莓土壤的碱解氮和有效磷含量分别提高32%和434%。苏晓红等^[9]的研究指出,在种植油菜的潮褐土中配施磷肥和蚓粪,随着蚓粪施入量的增加,土壤速效磷含量显著提高。常青等^[8]研究结果显示与不施肥处理相比较,蚓粪加入显著提高茄子盛果期土壤24.2%的碱解氮含量和11.5%的速效磷含量。本研究结果表明:随着蚓粪的施入,与对照相比玉米种植土壤的溶解性有机碳、碱解氮和速效磷均明显增加,且这些元素的增加量与蚓粪的施入量成正相

关(表2)。

土壤溶解性碳和有效氮、磷含量的提高为微生物生长和生物分解提供了重要的能量来源。本研究结果显示:蚓粪施入量增加后,种植玉米的土壤微生物量碳和氮的含量均显著上升,20%处理的微生物量碳氮均处于最高水平(表2)。这一结果与前人研究发现有机肥施入量增加后土壤微生物碳氮量显著增加的研究结果一致^[27]。造成这一现象的主要原因可能是:蚓粪作为有机肥施入土壤能显著提高土壤碳氮养分的含量^[7]。其与DOC和碱解氮含量具有显著的正相关关系也进一步表明:DOC和碱解氮含量的提高有助于提供大量土壤微生物生长繁殖所需的能量,促进微生物量碳氮的增加。另外,本研究结果显示:随着蚓粪施入量的增加,土壤微生物碳氮比降低(表3)。由于微生物碳氮比的变化反映了土壤微生物群落结构的强烈变化^[28]。通常细菌的微生物量碳氮比要小于真菌^[28],因此本研究结果表明随着蚓粪的加入,种植玉米土壤的细菌量可能逐渐

增多,而真菌量逐渐减少。黎宁等^[29]提出细菌与真菌量的比可以反映土壤腐熟程度和肥力水平,细菌量越多可能土壤质量越高。因此,在种植作物土壤中,不同比例蚓粪施入对土壤微生物种群结构的影响需要再进一步深入研究。

乔云发等^[30]结果表明在玉米生长期,施用有机肥提高了土壤有机质水平,从而促进土壤呼吸、释放CO₂。刘晓雨等^[31]研究得出与不施肥处理相比,长期施用秸秆能显著提高土壤呼吸排放速率。但是,Ferreras等^[32]研究发现与普通有机肥相比,蚓粪加入后土壤的呼吸速率较低。本研究结果显示在种植玉米条件下,与对照相比,5%的蚓粪加入后土壤呼吸速率显著增加($P < 0.05$,表2和图1(b)),但是10%和20%的蚓粪加入后土壤的呼吸速率变化不大,甚至降低。造成这种现象的原因可能是:适量蚓粪加入提高了土壤有机质含量,促进了微生物的活性,因而促进了土壤呼吸;但是当蚓粪量较多时,土壤的腐殖质更加稳定,有机无机复合体因而能够吸附到粘粒上,从而防止微生物分解而造成的^[32]。另外,代谢熵为基础呼吸和微生物碳之比,其是有机碳的活性部分,比值越大说明土壤微生物群落的代谢能力越快,年轻化水平越高^[33]。本研究结果显示:与对照相比,5%蚓粪加入后,种植玉米土壤的代谢熵显著增加;而10%和20%蚓粪对其影响不明显(表2);这一现象说明5%蚓粪施加能够显著促进土壤的微生物代谢能力,增强年轻微生物种群比例。

土壤酶活性对微生物活性极其敏感。崔玉珍等^[10]研究表明:施用蚓粪可提高土壤中性磷酸酶、蛋白酶、脲酶和蔗糖酶的活性,增强了土壤供肥性能,促进草莓生长。苏晓红等^[9]的研究指出,在种植油菜的潮褐土中配合施用蚓粪和磷肥,同等磷肥施用量条件下,随着蚓粪施入量的增加,土壤碱性和酸性磷酸酶活性显著增加。本研究结果显示,在种植玉米土壤中施加蚓粪均能够显著提高各种酶活性,且酶活性20%蚓粪处理均大于10%和5%蚓粪处理(表3)。由于土壤过氧化氢酶和转化酶、脲酶、磷酸酶活性分别与溶解性碳、碱解氮、速效磷含量具有显著的正相关关系,这一结果进一步表明:蚓粪的加入使得土壤中可利用的碳、氮和磷元素迅速增加。这些碳氮磷元素极易被微生物吸收和利用,因此其含量的提高进一步刺激了土壤微生物的活性,相关碳、氮、磷元素的迁移转化和生物化学进程随之加快,供试土壤的供肥能力随之提高,最终玉米的生长

发育也得到增强^[7]。

综上所述,在种植玉米土壤中,低比例蚓粪施入有助于土壤微生物代谢能力提高,年轻微生物种群比例增强;而高比例蚓粪施入则更利于土壤碳、氮和磷等微生物极易利用养分的增强,以及微生物量和酶活性的提高。另外,根据多元数据分析结果显示:随着蚓粪含量的增高,尽管土壤DOC、碱解氮、速效磷含量、微生物碳氮和各酶活性逐渐增强,10%和20%蚓粪处理的土壤的综合生物学特征明显区别于5%蚓粪和对照处理($P < 0.05$,图1),但是20%与10%蚓粪处理之间的综合生物学特征差异不大。因此,在实际农田应用中,蚓粪的施入量控制在10%以内较为适宜。通过蚯蚓处理禽畜粪便,并依据种植作物品种,选择适宜的蚓粪施入比例构建新型环境友好的土壤培肥管理体系,将成为禽畜粪便资源化,农业生产可持续发展和生态环境良好循环的又一有效措施。

4 结 论

1)在玉米种植期间,施用蚓粪能显著提高土壤可溶性碳、碱解氮、速效磷、微生物碳和氮、呼吸速率、代谢熵,增加土壤过氧化氢酶、转化酶、脲酶以及磷酸酶的活性。

2)低比例蚓粪(5%)施入有助于土壤微生物代谢熵和呼吸速率的提高,而高比例蚓粪(10%和20%)施入则更有助于可溶性碳、碱解氮、速效磷、微生物碳氮和各种酶活性的增强。

3)10%和20%蚓粪处理的土壤综合生物学特征明显区别于5%蚓粪和对照处理,但10%和20%蚓粪处理间的综合生物学特征差异不大。在实际农田应用中,蚓粪的施入量应控制在10%以内。

4)将蚯蚓堆制技术引入禽畜粪便处理,生产无害高品质的有机肥-蚓粪,对农业生产、环境保护和生态循环均具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 罗文贱,逢玉万,欧俊,等. 广东省有机肥料市场现状及发展方向分析[J]. 广东农业科学,2011(2):66-68
- [2] Mcinemy M, Bolger J. Temperature wetting cycles and soil texture effects on carton and nitrogen dynamics in stabilized earthworm casts[J]. Soil Biol Biochem,2000,32:335-341
- [3] Mora P, Miambi E, Jiménez J J, et al. Functional complement of biogenic structures produced by earthworms, termites and ants

- in the neotropical savannas[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 1043-1048
- [4] Lavelle P, Decaens T, Aubert M, et al. Soil invertebrates and ecosystem services[J]. *Eur J Soil Biol*, 2006, 41(S1): 3-15
- [5] Jouquet P, Hartmann C, Choosai C, et al. Different effects of earthworms and ants on soil properties of paddy fields in North-East Thailand[J]. *Paddy Water Environ*, 2008(6): 381-386
- [6] Zhang C, Langlest R, Velasquez E, et al. Cast production and NIR spectral signatures of *Aporrectodea caliginosa* fed soil with different amounts of half-decomposed *Populus nigra* litter[J]. *Biol Fert Soils*, 2009, 45(8): 839-844
- [7] 张聪俐, 戴军, 周波, 等. 不同比例蚓粪对玉米生长以及土壤肥力特性的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2013, 34(2): 137-143
- [8] 常青, 杨丽娟, 周丹丹, 等. 施用蚓粪对茄子产量、品质及土壤养分的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012-02, 43(1): 94-97
- [9] 苏晓红, 高志岭, 刘建玲, 等. 蚯蚓粪和磷肥配施对油菜生长和土壤性质的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2010, 33(3): 8-12
- [10] 崔玉珍, 牛明芬. 蚯蚓粪对土壤的培肥作用及草莓产量和品质的影响[J]. *土壤通报*, 1998, 29(4): 156-157
- [11] Gil-Stores F, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Seoane S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 877-887
- [12] Dai J, Becquer T, Rouiller J H, et al. Influence of heavy metals (zinc, cadmium, lead and copper) to some micro-biological characteristics of soils[J]. *Appl Soil Ecol*, 2004, 25: 99-109
- [13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [14] 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
- [15] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. *Aust J Soil Res*, 1992, 30: 195-207
- [16] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, et al. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content[J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35: 273-284
- [17] Weaver R W, Angle S, Bottomley P, et al. Methods of Soil Analysis Part 2-Microbiological and Biochemical Properties [M]. Madison: Soil Sci Soc Am, 1994: 835-859
- [18] Anderson T H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2003, 98: 285-293
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 234-279
- [20] The R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing[M]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2007
- [21] Thioulouse J, Chessel D, Doledec S, et al. ADE-4: A multivariate analysis and graphical display software[J]. *Stat Comput*, 1997, 7: 75-83
- [22] Chantigny M H, 2003. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices[J]. *Geoderma*, 113: 357-380
- [23] Magill A H, Aber J D. Variation in soil net mineralization rates with dissolved organic carbon additions [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32: 597-601
- [24] Boyer J N, Groffman P M. Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28: 783-790
- [25] Aira M, Monroy F, Dominguez J. Detritivorous earthworms directly modify the structure, thus altering the functioning of a microdecomposer food web[J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40: 2511-2516
- [26] 唐超, 王斌, 刘满强, 等. 蚓粪水溶性有机物对黑麦草生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(9): 161-164
- [27] Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility[J]. *Agr Sci China*, 2008, 7(3): 336-343
- [28] Paul E A, Clark F E. Components of the Soil Biota[M] // Paul E A, Clark F E ed. *Soil Microbiology and Biochemistry*. 2nd. San Diego: Academic Press, 1996: 71-107
- [29] 黎宁, 李华兴, 朱凤娇, 等. 菜园土壤的理化性质和微生物生态特征与种植年限的关系[J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 925-929
- [30] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1028-1035
- [31] 刘晓雨, 潘根兴, 李恋卿, 等. 太湖地区水稻土长期不同施肥条件下油菜季土壤呼吸 CO₂ 排放[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2506-2511
- [32] Ferreras L, Gomez E, Toresani S, et al. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil [J]. *Bioresource Technol*, 2006, 97: 635-640
- [33] 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