

樱桃栽培中施用蚯蚓粪对土壤有机碳氧化稳定性及碳库管理指数的影响

井大炜^{1,2}, 王明友¹, 张红¹, 郑芳¹, 李士平¹

(1. 德州学院, 山东 德州 253023; 2. 山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的] 探讨樱桃栽培中蚯蚓粪与化肥以不同比例配施对土壤有机碳、易氧化碳、氧化稳定性及碳库管理指数的影响, 为提高土壤质量管理和增强农业固碳减排潜力提供依据。[方法] 通过 5 a 的大田试验, 研究 N₁₀₀ (尿素提供 100% 的氮), M₁₀N₉₀ (蚯蚓粪和尿素分别提供 10% 和 90% 的氮), M₃₀N₇₀ (蚯蚓粪和尿素分别提供 30% 和 70% 的氮) 和 M₅₀N₅₀ (蚯蚓粪和尿素各提供 50% 的氮) 等不同施肥处理对土壤有机碳(SOC)、微生物量碳(MBC)、易氧化碳(ROC)含量、有机碳氧化稳定性及碳库管理指数(CPMI)的影响。[结果] M₃₀N₇₀ 和 M₅₀N₅₀ 处理的 SOC 含量分别比 N₁₀₀ 处理高出 12.07% 和 18.75%; M₃₀N₇₀ 处理的 MBC、ROC 含量和 CPMI 均最高, 并显著高于其它处理, 其中 ROC 含量分别比 N₁₀₀、M₁₀N₉₀ 和 M₅₀N₅₀ 处理提高 51.34%、15.16% 和 6.47%, CPMI 分别高出 73.07、30.06 和 20.71; 但 M₃₀N₇₀ 处理的有机碳氧化稳定系数明显低于其他处理, 比 N₁₀₀ 处理降低 36.22%。[结论] 在樱桃栽培中配施蚯蚓粪措施有利于改善土壤质量, 提高土壤肥力, 其中蚯蚓粪与化肥以 3:7 比例搭配的影响作用最显著。

关键词: 樱桃; 蚯蚓粪; 易氧化碳; 氧化稳定系数; 碳库管理指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0073-05

中图分类号: S157.4⁺1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.019

Effect of Vermicompost on Soil Organic Carbon Oxidation Stability and Carbon Pool Management Index in Cherry Plantation

JING Dawei^{1,2}, WANG Mingyou¹, ZHANG Hong¹, ZHENG Fang¹, LI Shiping¹

(1. Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China; 2. Resources and

Environment College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] To explore the effect of vermicompost on soil organic carbon oxidation stability and carbon pool management index in cherry plantation (*Cerasus pseudocerasus*), in order to provide scientific basis for improving soil quality management and the increase of agriculture carbon emission reduction potential. [Methods] A field experiment was conducted to determine the five treatments, CK (neither urea nor vermicompost was applied), N₁₀₀ (100% of nitrogen was provided by urea), M₁₀N₉₀ (10% and 90% of nitrogen was provided by vermicompost and urea, respectively), M₃₀N₇₀ (30% and 70% of nitrogen was provided by vermicompost and urea, respectively), and M₅₀N₅₀ (50% and 50% of nitrogen was provided by vermicompost and urea, respectively) on soil organic carbon (SOC), microbial biomass carbon (MBC), readily oxidizable carbon (ROC) contents, organic carbon oxidation stability, as well as carbon pool management index (CPMI) of *Cerasus pseudocerasus*. [Results] The SOC contents under M₃₀N₇₀ and M₅₀N₅₀ treatments increased by 12.07% and 18.75% in comparison with the N₁₀₀ treatment, respectively. The MBC and ROC contents and CPMI achieved the highest value in M₃₀N₇₀ treatment and had significant differences with other treatments, showing 51.34%, 15.16% and 6.47% increases in ROC content and 73.07, 30.06 and 20.71 increases in CPMI, respectively, compared to the treatments of N₁₀₀, M₁₀N₉₀ and M₅₀N₅₀. However, the oxidation stability index of organic carbon in M₃₀N₇₀ treatment was obviously lower than other treatments, which decreased by 36.22% compared with N₁₀₀ treatment. [Conclusion] In the cherry cultivation, application of vermicompost co-applied with inorganic fertilizer, especially the M₃₀N₇₀ treatment, was beneficial on soil quality amelioration and

收稿日期: 2014-04-20

修回日期: 2014-05-07

资助项目: 山东省科学技术发展计划攻关项目“新型经济林木生物肥的研制与开发”(2007GG2009007)

第一作者: 井大炜(1982—), 男(汉族), 陕西省绥德县人, 博士, 讲师, 主要从事植物营养机理研究。E-mail: jingdawei009@163.com。

通信作者: 王明友(1964—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 教授, 主要从事作物高产生理生态方面的教学与研究。E-mail: nmwy_sddz@163.com。

soil fertility improvement.

Keywords: *Cerasus pseudocerasus*; vermicompost; readily oxidizable carbon; oxidation stability index; carbon pool management index

土壤有机质是植物生长所需养分的源泉和微生物生命活动的能量来源,它积极地调控着土壤的物理、化学和生物学特征,而其中储藏的有机碳库为表层陆地生态系统中最大的碳库,其微小变化将对大气 CO₂ 浓度产生深远的影响^[1]。氧化稳定性是土壤有机碳的一个重要性质,与有机碳抵抗氧化的能力有关,关系到有机碳分解的难易、在土壤中存留时间和养分的释放等诸多方面^[2]。根据分解的难易程度不同,土壤有机碳可分为易氧化有机碳和难氧化有机碳,易氧化有机碳在土壤养分供应方面具有重要作用,而难氧化有机碳有利于土壤结构的稳定,在有机无机复合体的形成和土壤结构的保持方面具有重要作用,也关系到土壤有机碳的储存。袁可能提出用氧化稳定系数(Kos)来衡量土壤的氧化稳定性,Kos 值越大,氧化稳定性越大,反之,则越小^[3]。而且,土壤有机碳的背景值很高和自然土壤分异性大,整个土壤有机碳的微小变化很难发现,因此探求土壤全碳敏感指示因子很有必要。有研究认为,土壤有机碳的活性、氧化稳定性和碳库管理指数(CPMI)是反映土壤碳库的重要指标,对评价土壤有机质和土壤肥力状况具有重要意义^[4]。

施入不同配比的有机—无机肥与土壤有机碳含量、碳质量密切相关^[5]。相关研究表明,有机肥与化肥混施能增加土壤有机碳含量和 CPMI^[6]。蚯蚓粪具有良好的团粒结构,通透性好,水气调和,且有保水、保肥性能;并且其矿质养分丰富,有机质含量多,含有多种利于植物生长的酶、腐殖质和植物激素类物质^[7]。中国从 20 世纪 80 年代开始兴起蚯蚓养殖业,北京、天津、云南等地都建有不同规模的蚯蚓养殖场,蚯蚓粪年产量达数十万吨^[8]。可见,蚯蚓粪的应用已得到了高度重视。前人关于蚯蚓粪进行了大量的研究,但主要集中在草莓、黄瓜等农作物上^[9-10],而关于蚯蚓粪在大樱桃方面的研究报道还较少,尤其是关于施用蚯蚓粪对大樱桃土壤有机碳氧化稳定性及碳库管理指数的研究尚属空白。为此,本研究选用经蚯蚓吞食牛粪后产生的蚯蚓粪为供试原料,探讨蚯蚓粪与化肥以不同比例配施对土壤有机碳、易氧化碳、氧化稳定性及碳库管理指数的影响,旨在为提高土壤质量管理和增强农业固碳减排潜力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验地点设在山东农业大学南校区试验基地,供

试土壤为潮土,土壤速效氮 25.32 mg/kg,速效磷 21.89 mg/kg,速效钾 67.25 mg/kg,有机碳含量 6.58 g/kg。供试蚯蚓粪为蚯蚓吞食牛粪后的产物,全量 N、P、K 含量分别为 1.68%、1.29% 和 0.95%,有机碳含量为 196.35 mg/kg,活性有机碳含量为 105.72 mg/kg;所用化肥为尿素、过磷酸钙、氯化钾。樱桃为 3 年生‘吉塞拉’,生长一致,无病虫害。

1.2 试验设计

采用大田试验,随机区组设计,设 5 个处理:CK,不施肥;N₁₀₀,100%的氮由尿素提供;M₁₀N₉₀,10%的氮由蚯蚓粪提供(580.5 kg/hm²),90%的氮由尿素提供;M₃₀N₇₀,30%的氮由蚯蚓粪提供(174.15 kg/hm²),70%的氮由尿素提供;M₅₀N₅₀,50%的氮由蚯蚓粪提供(290.25 kg/hm²),50%的氮由尿素提供。每个处理重复 3 次,每小区面积为 10 m×9 m=90 m²,共计 15 个小区,每小区樱桃 15 株。除 CK 外,各处理均为等养分量,N、P 和 K 含量相当于 97.5、27 和 108 kg/hm²,各处理 P 和 K 不足部分分别用过磷酸钙、硫酸钾补足^[11]。试验从 2008 年开始,以后每年的施肥量随着樱桃树龄的变化进行同比例调整。

1.3 测定项目与方法

2012 年 10 月 9 日,在各小区按“S”型选取 6 点,用土钻法取 0—20 cm 土层土样,混合均匀后迅速带回实验室,用四分法取出适量土样分成两部分,一部分新鲜土样过 2 mm 筛立即进行土壤微生物量碳的测定,一部分土样风干过 1 mm 筛后进行土壤有机碳等指标的测定。土壤微生物量碳的测定采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法;土壤总有机碳的测定采用重铬酸钾氧化外加热法;易氧化碳(ROC)的测定采用袁可能法^[3]。

以试验开始前未经处理的土样相互混合作为参考土壤,其总有机碳含量为 8.92 g/kg,活性有机碳含量为 2.65 g/kg,土壤碳库管理指数的计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{碳库指数} &= \text{样品全碳含量} / \text{参考土壤全碳含量} \\ \text{碳库活度} &= \text{活性碳含量} / \text{非活性碳含量} \\ \text{碳库活度指数} &= \text{样品碳库活度} / \text{参考土壤碳库活度} \\ \text{碳库管理指数} &= \text{碳库指数} \times \text{碳库活度指数} \times 100 \\ \text{氧化稳定系数} &= \text{稳定性有机碳} / \text{易氧化碳} \\ \text{稳定性有机碳} &= \text{总有机碳} - \text{易氧化碳} \end{aligned}$$

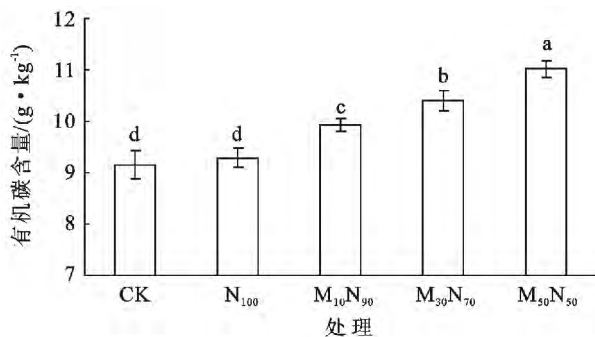
1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同处理组间的差异($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量

土壤有机碳含量是土壤中所有有机物质的总碳量。从图 1 可知,不同施肥处理对土壤有机碳含量的影响存在明显差异: N_{100} 处理与 CK 差异不显著,而配施蚯蚓粪的 3 个处理均明显升高。同 N_{100} 处理相比, $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的有机碳含量分别提高 6.90%、12.07% 和 18.75%,差异均达显著水平。可见蚯蚓粪与化肥配施对土壤有机碳的作用效果明显优于单施化肥。在配施蚯蚓粪的 3 个处理中, $M_{50}N_{50}$ 处理的有机碳含量最高,依次是 $M_{30}N_{70}$ 和 $M_{10}N_{90}$ 处理。表明随着蚯蚓粪所占比例的增加,土壤有机碳含量也呈递增的变化趋势。这可能是因为:(1) 随着加入蚯蚓粪比重的增加,带入的有机质也相应增多;(2) 蚯蚓粪与化肥以 1:9 和 3:7 比例配施,相比 5:5 比例配施能更明显地降低土壤的碳氮比,使土壤微生物活性提高更快,从而导致有机碳的矿化分解加快。



注:不同小写字母表示差异显著。下同。

图 1 配施蚯蚓粪对土壤有机碳含量的影响

2.2 土壤微生物量碳含量

土壤微生物量碳(MBC)是指土壤中体积小于 $5\sim 105\ \mu\text{m}^3$ 活的细菌、真菌、藻类和土壤微动物体内所含的碳,它能够反映土壤的生物学质量。由图 2 可见,同 CK 相比, N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 、 $M_{30}N_{70}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的 MBC 含量分别提高 19.24%、55.18%、80.98% 和 63.62%,差异均达显著水平。说明不同施肥措施均能明显提高土壤的微生物量碳。在各施肥处理中, $M_{30}N_{70}$ 处理的 MBC 含量最高,并显著高于其他处理,分别比 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理高出 51.78%、16.62% 和 10.61%;其次是 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理,两处理间无明显差异,但均显著高于 N_{100} 处理。由此可见,蚯蚓粪与化肥配施处理对土壤微生物量碳含量的提高幅度明显大于单施化肥。而在 3

个配施处理中,随着蚯蚓粪所占比例的增加,土壤微生物量碳含量呈先升高后降低的趋势,表明蚯蚓粪与化肥以 3:7 比例搭配对微生物量碳的作用效果最佳。

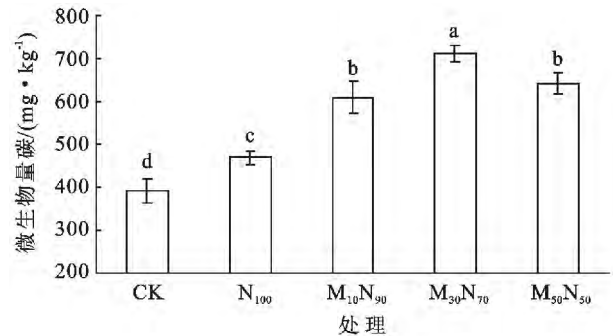


图 2 配施蚯蚓粪对土壤微生物量碳含量的影响

2.3 土壤易氧化碳及有机碳氧化稳定性

易氧化碳是土壤有机质中的活性部分,直接参与土壤生物化学转化过程的活性组分以及微生物活动能源和土壤养分的驱动力,对土壤碳及质量变化具有更高的灵敏性。由表 1 可以看出,与 CK 相比, N_{100} 处理的易氧化碳含量下降,但未达到差异显著水平,而配施蚯蚓粪处理的易氧化碳含量则显著升高,其中 $M_{30}N_{70}$ 处理最高,并显著高于其它处理,分别比 CK、 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理提高 43.12%、51.34%、15.16% 和 6.47%。从易氧化碳占有有机碳的百分比来看,各处理的大小次序为: $M_{30}N_{70} > M_{10}N_{90} \approx M_{50}N_{50} > CK > N_{100}$ 。 $M_{50}N_{50}$ 处理的稳定性有机碳含量明显高于其它处理,而其它处理之间差异均未达显著水平。

各处理的稳定性有机碳占有有机碳百分比、氧化稳定系数的变化规律均是: $N_{100} > CK > M_{50}N_{50} \approx M_{10}N_{90} > M_{30}N_{70}$,可见 N_{100} 处理最高,且明显高于其它处理;而在配施蚯蚓粪处理中, $M_{30}N_{70}$ 处理的稳定性有机碳占有有机碳百分比及氧化稳定系数均显著低于其它处理,其中氧化稳定系数分别比 CK、 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理下降 29.60%、36.22%、13.85% 和 17.27%。数据表明,单施化肥处理降低了土壤氧化碳含量且显著提高了有机碳氧化稳定系数,而配施蚯蚓粪的 3 个处理显著提高了易氧化碳含量且明显降低了氧化稳定系数,其中蚯蚓粪与化肥以 3:7 比例配施的影响作用最明显。

2.4 土壤碳库管理指数

表 2 中的 CKT 代表参考土壤,是试验开始前各个处理的土样相互混合后测定的结果。从表 2 可知,不同处理下 CPI 的变化趋势与有机碳含量基本一

致。M₃₀N₇₀处理的 A, AI 和 CPMI 均最高, 并显著高于其它处理, 其中 CPMI 分别比 N₁₀₀, M₁₀N₉₀ 和 M₅₀N₅₀ 处理高出 73.07, 30.06 和 20.71。M₁₀N₉₀ 和 M₅₀N₅₀ 处理的 A, AI 和 CPMI 亦显著高于 CK 和 N₁₀₀, 其中 M₁₀N₉₀ 与 M₅₀N₅₀ 处理之间的 A, AI 无显著性差

异, 但 M₅₀N₅₀ 处理的 CPMI 明显高于 M₁₀N₉₀。由此表明, 与单施化肥相比, 配施蚯蚓粪更有利于提高土壤碳库指数、碳库活度、碳库活度指数及碳库管理指数, 而在蚯蚓粪与化肥的不同比例搭配中, 以 3 : 7 比例搭配的效果最明显。

表 1 配施蚯蚓粪对土壤易氧化有机碳和氧化稳定系数的影响

处理	易氧化碳/ (g · kg ⁻¹)	易氧化碳/ 有机碳/%	稳定性有机碳/ (g · kg ⁻¹)	稳定性有机碳/ 有机碳/%	氧化稳定系数 Kos
CK	2.76 ± 0.08 ^d	30.16 ± 0.59 ^c	6.39 ± 0.24 ^b	69.84 ± 1.06 ^b	2.32 ± 0.05 ^b
N ₁₀₀	2.61 ± 0.15 ^d	28.13 ± 0.76 ^d	6.67 ± 0.18 ^b	71.88 ± 0.65 ^a	2.56 ± 0.07 ^a
M ₁₀ N ₉₀	3.43 ± 0.07 ^c	34.58 ± 0.73 ^b	6.49 ± 0.09 ^b	65.42 ± 0.73 ^c	1.89 ± 0.08 ^c
M ₃₀ N ₇₀	3.95 ± 0.08 ^a	37.98 ± 0.65 ^a	6.45 ± 0.13 ^b	62.02 ± 0.81 ^d	1.63 ± 0.07 ^d
M ₅₀ N ₅₀	3.71 ± 0.12 ^b	33.67 ± 0.81 ^b	7.31 ± 0.09 ^a	66.33 ± 0.85 ^c	1.97 ± 0.05 ^c

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

表 2 配施蚯蚓粪对土壤碳库管理指数的影响

处理	碳库指数 CPI	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库管理指数 CPMI
CKT	1.00 ± 0.00 ^d	0.42 ± 0.00 ^c	1.00 ± 0.00 ^c	100.00 ± 0.00 ^d
CK	1.03 ± 0.02 ^d	0.43 ± 0.03 ^c	1.03 ± 0.04 ^c	105.49 ± 3.85 ^d
N ₁₀₀	1.04 ± 0.03 ^d	0.39 ± 0.02 ^c	0.93 ± 0.02 ^d	96.93 ± 2.73 ^e
M ₁₀ N ₉₀	1.11 ± 0.02 ^c	0.53 ± 0.01 ^b	1.26 ± 0.05 ^b	139.94 ± 4.55 ^c
M ₃₀ N ₇₀	1.17 ± 0.02 ^b	0.61 ± 0.04 ^a	1.46 ± 0.07 ^a	170.00 ± 6.26 ^a
M ₅₀ N ₅₀	1.24 ± 0.03 ^a	0.51 ± 0.02 ^b	1.21 ± 0.05 ^b	149.29 ± 3.21 ^b

3 讨论

土壤有机碳的数量取决于有机碳的输入和土壤有机碳微生物分解之间的平衡。单施化肥在改变土壤有机碳含量上的作用效果说法不一: 土壤有机碳的含量可能升高、降低或保持原有平衡^[12]。施用化肥提高土壤有机碳的原因主要在于化肥促进作物生长, 增加作物根茬、枝叶等的残留量。相反, 施用化肥, 特别是氮肥, 将加快土壤原有有机碳的消耗, 使积累在土壤中有有机碳的数量减少^[13]。本研究中单施化肥对土壤有机碳含量的影响不明显, 可能与施肥时间较短有关, 有机碳积累较少。而配施蚯蚓粪处理的有机碳含量显著高于对照和单施化肥, 这与梁尧等^[14]在农田生态系统上的研究结果一致。主要是由于施用蚯蚓粪后, 增加了作物产量, 使归还土壤的根茬增多, 同时促进了根系和微生物的活动, 从而增加了进入土壤的根系分泌物和有机残体数量; 另一方面蚯蚓粪的施入, 为土壤提供了直接的有机碳源, 增加了土壤的有机碳库。可见, 配施有机肥是提高土壤碳储量的有效措施。

土壤微生物量碳是土壤中最活跃的因子之一, 它对土壤环境的变化比较敏感, 是反映土壤有机碳质量的重要指标^[15]。土壤微生物量碳与输入到土壤中有有机碳源的生物有效性密切相关。本试验得出, 同对照

和单施化肥相比, 蚯蚓粪与化肥配施处理明显提高了微生物量碳含量, 这与李娟等^[16]在褐土上的研究结果相似。本试验还得出, 蚯蚓粪与化肥以 3 : 7 比例配施的效果优于 1 : 9 和 5 : 5 比例, 原因如下。

(1) 蚯蚓粪本身是 C/N 比较低的粪肥, 而 3 : 7 比例配施能更好地调节土壤 C/N 比, 从而使较多的粪肥被微生物分解转化为低分子量的有机质, 同时这一部分有机质又被土壤微生物吸收成为其机体的一部分, 这样不仅增加了土壤中低分子量的有机碳含量, 且更大地提高了土壤微生物碳库^[17];

(2) 3 : 7 比例配施不仅补充输入了有机碳源, 提高了养分的有效性和保水能力, 同时还较好地改善土壤物理性状, 大大刺激了土壤微生物群落和活性^[18], 有利于微生物的生长和繁殖, 使微生物生物量碳明显增加。

氧化稳定性是腐殖质的一项重要性质, 它与腐殖质抵抗氧化的能力有关, 关系到腐殖质分解难易, 影响土壤肥力的发挥。Kos 值越大, 有机质的活性越低, 土壤供肥性能也就相对较差^[19]。本试验研究得出, 单施化肥处理使土壤易氧化碳含量明显下降, Kos 值增大, 说明土壤腐殖质组成及其性质均有所恶化, 土壤供肥能力降低; 而配施蚯蚓粪处理能显著提高易氧化碳含量, 并减小 Kos 值, 其中蚯蚓粪与化肥

以 3:7 比例搭配的效果最显著。这一方面表明配施蚯蚓粪能提高有机质质量,增强土壤对养分的供、贮能力,提高土壤肥力水平;同时蚯蚓粪与化肥的配施比例是关键因素。

土壤碳库管理指数结合了人为影响下土壤碳库指标和土壤中碳库活度,并能反映外界条件对土壤有机碳数量的影响和土壤活性有机碳数量的变化,因此能较为全面地反应外界条件对碳库中各组分在量和质上的变化^[20],从而反映土壤质量的下降或更新的程度。碳库管理指数越大,土壤不稳定有机碳库更新速度越快、流通量越大,土壤腐殖质和土壤的空隙、孔隙数量及土壤的通气性也明显增加和提高,有利于作物的生长发育。本试验发现,配施蚯蚓粪处理相比单施化肥明显提高了 CPMI,这进一步证明了蚯蚓粪与化肥配施对土壤具有培肥作用,使土壤处于良性管理状态;而单施化肥使土壤质量下降,管理措施不科学。本试验还发现,在蚯蚓粪与化肥的不同比例搭配中,3:7 比例配施对樱桃土壤 CPMI 的作用效果明显优于 1:9 和 5:5 比例,可能是由于 3:7 比例搭配能更好地改善土壤理化性状,为微生物的生长创造了优越环境,从而有利于生成活性有机碳,并提高 CPMI。

4 结论

$M_{30}N_{70}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理的 SOC 含量分别比 N_{100} 处理高出 12.07% 和 18.75%; $M_{30}N_{70}$ 处理的 MBC、ROC 含量和 CPMI 均最高,并显著高于其它处理,其中 ROC 含量分别比 N_{100} 、 $M_{10}N_{90}$ 和 $M_{50}N_{50}$ 处理提高 51.34%、15.16% 和 6.47%, CPMI 分别高出 73.07、30.06 和 20.71; 但 $M_{30}N_{70}$ 处理的有机碳氧化稳定系数明显低于其它处理,比 N_{100} 处理降低 36.22%。以上分析可知,在樱桃栽培中配施蚯蚓粪措施有利于改善土壤质量,提高土壤肥力,其中蚯蚓粪与化肥以 3:7 比例搭配的影响作用最显著。

[参 考 文 献]

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [2] 张春霞,郝明德,魏孝荣,等. 黑垆土长期轮作培肥土壤有机质氧化稳定性的研究[J]. *土壤肥料*, 2004(3):10-16.
- [3] 袁可能. 土壤有机矿质复合体的研究 I: 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J]. *土壤学报*, 1963, 18(2):286-293.
- [4] Hassink J. Relationship between the amount and the activity of the microbial biomass in Dutch grassland soils: Comparison of the substrate-incubation method and the substrate-induced respiration method[J]. *Soil Biochemistry*, 1993, 25(5):533-538.
- [5] 佟小刚,徐明岗,张文菊,等. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(11):3664-3671.
- [6] Elson J. A comparison of the effect of fertilizer and manure, organic matter, and carbon-nitrogen ratio on water-stable soil aggregates[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1942(6):86-90.
- [7] 徐魁梧,戴杏庭. 蚯蚓人工养殖与利用新技术[M]. 南京:南京出版社,1998:22-34.
- [8] 尚庆茂,张志刚. 蚯蚓粪在番茄育苗上的应用效果[J]. *中国蔬菜*, 2005(9):10-12.
- [9] 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.
- [10] 胡艳霞,孙振钧,孙永明,等. 蚯蚓粪对黄瓜炭疽病的系统诱导抗性作用[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(8):1358-1362.
- [11] 陈波,马海林,刘方春,等. 生物有机肥对樱桃生长及根际土壤生物学特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2):267-271.
- [12] 王旭东,张一平,吕家珑,等. 不同施肥条件对土壤有机质及胡敏酸特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(2):75-81.
- [13] 刘骅,佟小刚,马兴旺,等. 长期施肥下灰漠土矿物颗粒结合有机碳的含量及其演变特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1):84-90.
- [14] 梁尧,韩晓增,王凤菊,等. 草地和农田生态系统中黑土活性有机碳的特征[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4):864-871.
- [15] Böhme L, Böhme F. Soil microbiological and biochemical properties affected by plant growth and different long-term fertilization[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006(42):1-12.
- [16] 李娟,赵秉强,李秀英,等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1):144-152.
- [17] Bol R, Kandeler E, Amelung W, et al. Short-term effects of dairy slurry amendment on carbon sequestration and enzyme activities in a temperate grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003(35):1411-1421.
- [18] Jackson L E, Calderon F J, Steenwerth K L, et al. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality[J]. *Geoderma*, 2003, 114(3):305-317.
- [19] 袁喆,罗承德,李贤伟,等. 间伐强度对川西亚高山人工云杉林土壤易氧化碳及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6):127-131.
- [20] 戴全厚,刘国彬,薛蕙,等. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤碳库及其管理指数的影响[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(3):61-64.