

# 蚯蚓粪与化肥配施对西瓜地土壤活性 有机碳及酶活性的影响

王明友, 张红, 李士平, 薛玉剑

(德州学院 生态与园林建筑学院, 山东 德州 253023)

**摘要:** [目的] 探讨蚯蚓粪与化肥配施对西瓜种植的作用, 为土壤培肥制度的建立及西瓜生产提供参考。[方法] 以“黑彤 K-8”为试材, 通过大田试验研究了  $N_{100}$  (尿素提供 100% 的氮)、 $M_{10}N_{90}$  (蚯蚓粪和尿素分别提供 10% 和 90% 的氮)、 $M_{30}N_{70}$  (蚯蚓粪和尿素分别提供 30% 和 70% 的氮) 和  $M_{50}N_{50}$  (蚯蚓粪和尿素各提供 50% 的氮) 等不同处理对土壤活性有机碳、碳库管理指数 (CPMI)、酶活性和西瓜产量的影响。[结果] 同  $N_{100}$  处理相比, 配施蚯蚓粪处理的高活性、中活性和活性有机碳含量均明显升高;  $M_{30}N_{70}$  处理的活性有机碳含量和 CPMI 显著高于其他处理, 比  $N_{100}$  处理分别高出 30.10% 和 37.28%; 同时, 脲酶和蔗糖酶活性亦明显高于其它处理, 其中蔗糖酶活性分别较 CK,  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理提高 84.66%, 62.33%, 47.26% 和 22.46%。此外,  $M_{30}N_{70}$  处理的西瓜产量和肥料生产率最高, 它可使西瓜产量分别比  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理高出 26.49%, 13.34%, 6.27%;  $M_{30}N_{70}$  处理的肥料生产率分别比  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理高出 166.50%, 54.11%, 21.37%。相关分析结果表明, 运用土壤活性有机碳和碳库管理指数表征土壤酶活性、西瓜产量及肥料生产率的变化, 比土壤总有机碳更具灵敏性。[结论] 蚯蚓粪与化肥配施对西瓜生长具有显著的促进生长效果, 其中 3:7 比例配施的效果优于 1:9 和 5:5 比例。

**关键词:** 西瓜; 蚯蚓粪; 活性有机碳; 碳库管理指数; 酶活性; 肥料生产率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0101-06

中图分类号: S157.4<sup>+1</sup>

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.020

## Effects of Vermicompost and Inorganic Fertilizer Co-application on Soil Labile Organic Carbon and Enzyme Activity in Watermelon Farmland

WANG Mingyou, ZHANG Hong, LI Shiping, XUE Yujian

(College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of vermicompost co-applied with inorganic fertilizer were measured in a watermelon field to provide some references for soil improvement and watermelon plantation. [Methods] Five treatments with different mixture ratios of nitrogen (supplied from urea) and vermicompost were set in a field experiment they were CK (neither urea nor vermicompost was applied),  $N_{100}$  (100% of nitrogen),  $M_{10}N_{90}$  (10% vermicompost and 90% of nitrogen),  $M_{30}N_{70}$  (30% vermicompost and 70% nitrogen), and  $M_{50}N_{50}$  (50% vermicompost and 50% nitrogen). Soil labile organic carbon, carbon pool management index (CPMI), enzyme activity and yield of watermelon were measured. [Results] The contents of highly labile organic carbon, mid-labile organic carbon and labile organic carbon significantly increased under  $M_{10}N_{90}$ ,  $M_{30}N_{70}$  and  $M_{50}N_{50}$  treatments in comparison with  $N_{100}$  treatment. The labile organic carbon content and CPMI in  $M_{30}N_{70}$  treatment were obviously higher than that of other treatments, increased 30.10% and 37.28% as compared with  $N_{100}$  treatment, respectively. At the same time, the  $M_{30}N_{70}$  treatment markedly increased in urease and invertase activities in comparison with other treatments, showing 84.66%, 62.33%, 47.26% and 22.46% increments in invertase activities over the values of CK,  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  and  $M_{50}N_{50}$ , respectively. In addition, the yield and fertilizer productivity of watermelon also achieved the highest value in  $M_{30}N_{70}$  treatment and had significant differences with other treatments, obtained 26.49%, 13.34%, 6.27% and 166.50%, 54.11%,

收稿日期: 2014-05-29

修回日期: 2014-06-17

资助项目: 山东省科技发展计划项目“鲁西北地区新型日光温室及其蔬菜生产关键技术研究集成与示范”(2012GNC11108)

第一作者: 王明友(1964—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 学士, 教授, 主要从事蔬菜高产生理生态方面的教学与研究工作。E-mail: nwmy\_sd-dz@163.com。

21.37% increments as compared with the treatments of  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  and  $M_{50}N_{50}$ , respectively. Correlation analysis revealed that soil labile organic carbon and carbon pool management index may be better indicators than soil total organic carbon in reflecting the changes of soil enzyme activities, yield and fertilizer productivity of watermelon. [Conclusion] The application of vermicompost co-applied with inorganic fertilizer, especially the  $M_{30}N_{70}$  treatment, had remarkable promotion effect in watermelon plantation.

**Keywords:** watermelon; vermicompost; labile organic carbon; carbon pool management index; enzyme activity; fertilizer productivity

土壤有机碳是土壤的重要组成部分,它影响土壤的物理、化学及生物性质,在土壤肥力和植物营养中具有多方面的重要作用<sup>[1]</sup>。但土壤有机碳的数量只是一个矿化分解和合成的平衡结果,不能很好地反映转化速率和土壤有机碳质量的变化,而活性有机碳与土壤有效养分、土壤的物理性状、耕作措施等具有更密切的关系,因而成为评价土壤质量及土壤管理的一个重要指标<sup>[2-3]</sup>。目前,国内外关于活性有机碳的划分做了大量的研究,较有代表性的有 Logninow 等<sup>[4]</sup>提出  $KMnO_4$  氧化法,根据有机碳被 3 种不同浓度的  $KMnO_4$  (33, 167, 333 mmol/L) 氧化的数量,将易氧化有机碳分成高活性有机碳、中活性有机碳、活性有机碳 3 个程度不同的级别。1995 年 Blair 等<sup>[5]</sup>采用  $KMnO_4$  氧化法测定了活性有机碳,并提出土壤碳库管理指数(CPMI)。CPMI 是土壤管理措施引起土壤有机碳变化的指标,能够系统、敏感地监测土壤碳的变化,反映农作措施使土壤质量下降或更新的程度<sup>[6]</sup>。土壤酶活性作为衡量土壤质量变化的预警和敏感指标,表征了土壤的综合肥力特征及土壤养分转化进程,它反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向<sup>[7]</sup>。土壤活性有机碳和土壤酶活性这两个表征土壤质量和土壤肥力的重要指标,可用来了解或预测某些营养物质的转化情况以及土壤肥力的演变趋势。

蚯蚓粪具有良好的团粒结构,疏松适度,酸碱度中性,且有保水保肥性能;同时其矿质养分丰富,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。中国从 20 世纪 80 年代开始兴起蚯蚓养殖业,北京、河北、宁夏等地区都建有不同规模的蚯蚓养殖场,蚯蚓粪年产量达数  $1.0 \times 10^5$  t<sup>[8]</sup>。前人关于蚯蚓粪进行了大量的研究,并取得了显著的成效,但主要集中在黄瓜、花卉等作物上<sup>[9-10]</sup>,而关于蚯蚓粪在西瓜方面的研究报道较少,尤其是关于蚯蚓粪与化肥配施对西瓜地土壤活性有机碳、土壤酶活性以及它们之间的相关性分析的研究尚属空白。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活性有机碳、碳库管理指数、土壤酶活性和西瓜产量的影响,并

对它们之间的相关性进行了分析,旨在为土壤培肥制度的建立及西瓜生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与供试材料

试验地点设在德州市运河经济开发区芦庄村九龙湾生态园,供试土壤为轻壤土,土壤速效氮、磷和钾的含量分别为 92.07, 35.18, 105.49 mg/kg,有机质含量为 14.89 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 g/kg,活性有机碳含量为 105.72 g/kg;所用化肥为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含  $P_2O_5$  12%)和硫酸钾(含  $K_2O$  50%)。西瓜品种为“黑彤 K-8”,拱棚栽培,密度为 7 500 株/hm<sup>2</sup>。

### 1.2 试验设计

西瓜种子经过 40 d 的育苗后,在 2013 年 3 月 28 日移栽到拱棚里,随机区组设计,设 5 个处理:CK,不施肥; $N_{100}$ , 100% 的氮由尿素提供; $M_{10}N_{90}$ , 10% 的氮由蚯蚓粪提供, 90% 的氮由尿素提供; $M_{30}N_{70}$ , 30% 的氮由蚯蚓粪提供, 70% 的氮由尿素提供; $M_{50}N_{50}$ , 50% 的氮由蚯蚓粪提供, 50% 的氮由尿素提供。每个处理重复 3 次,每小区面积为  $3.8 \times 12 = 45.6$  m<sup>2</sup>,共计 15 个小区。除 CK 外,各处理均为等养分量, N, P 和 K 含量相当于 315, 75 和 240 kg/hm<sup>2</sup>,各处理 P 和 K 不足部分分别用过磷酸钙、硫酸钾补足。各处理的肥料均在移苗前一次性施入土壤。

### 1.3 测定项目与方法

2013 年 6 月 2 日(收获期),在各小区按 S 形选取 6 点,用土钻法取 0—20 cm 土层土样,混合均匀后带回实验室,风干过 0.25 mm 筛后测定土壤有机碳等指标,过 1 mm 筛后测定土壤酶活性。同时,每区选择有代表性的 15 棵计算产量和肥料生产率。

土壤总有机碳和土壤酶的测定:土壤总有机碳采用重铬酸钾氧化外加热法;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法;中性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法;脲酶采用靛酚蓝比色法;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[11]</sup>。

土壤活性有机碳测定及 CPMI 计算:采用 33, 167, 333 mmol/L  $\text{KMnO}_4$  氧化法分别测定土壤样品中高活性有机碳、中活性有机碳和活性有机碳含量。以对照处理土壤为参照。碳库指数及 CPMI 等相关指标参照徐明岗等<sup>[12]</sup>的方法计算:

碳库指数(CPI) = 样品总有机碳含量(g/kg)/参考土壤总有机碳含量(g/kg)

碳库活度(L) = 样品中的活性有机碳(LOC)/样品中的非活性有机碳(NLOC)

碳库活度指数(LI) = 样品碳库活度/参考土壤碳库活度

$\text{CPMI} = \text{CPI} \cdot \text{LI} \times 100$

#### 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,显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤活性有机碳和碳库管理指数

从表 1 可知,各处理土壤总有机碳含量的大小次序为: $M_{50}N_{50} > M_{30}N_{70} > M_{10}N_{90} > N_{100} \approx \text{CK}$ ,说明配施蚯蚓粪处理相比单施化肥显著提高了西瓜地土壤

的总有机碳含量,且随蚯蚓粪所占比例的增加,其总有机碳含量呈递增的趋势。 $M_{30}N_{70}$  处理的活性有机碳含量最高,并显著高于其它处理;依次是  $M_{50}N_{50}$ ,  $M_{10}N_{90}$  处理,显著高于 CK 和  $N_{100}$  处理;同  $N_{100}$  处理相比, $M_{30}N_{70}$ ,  $M_{50}N_{50}$  和  $M_{10}N_{90}$  处理的活性有机碳含量分别高出 30.10%, 24.23% 和 18.62%, 且活性有机碳占总有机碳的比重分别达到 30.56%, 27.19% 和 28.97%, 亦高于  $N_{100}$  处理(25.82%)。与活性有机碳相比,中活性有机碳和高活性有机碳含量相对较低,分别为 1.04~1.43 g/kg 和 0.36~0.58 g/kg。 $M_{30}N_{70}$ ,  $M_{50}N_{50}$  和  $M_{10}N_{90}$  处理的中活性和高活性有机碳含量较  $N_{100}$  处理显著升高,且中活性和高活性有机碳占总有机碳的比重分别由 6.92% 和 2.37% 提高到 7.91%~8.33% 和 3.07%~3.48%;同时可见,  $M_{30}N_{70}$  处理的中活性和高活性有机碳占总有机碳的比重均最高。此外,  $M_{30}N_{70}$  处理的 CPMI 显著高于其它处理,分别比  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理高出 37.28, 14.44 和 11.87;其次是  $M_{50}N_{50}$  和  $M_{10}N_{90}$  处理,亦明显高于  $N_{100}$  处理。总之,蚯蚓粪与化肥配施处理的总有机碳、3 种活性有机碳含量及碳库管理指数较对照和单施化肥得到明显提升,这表明配施蚯蚓粪不仅提高了土壤有机碳数量,而且改善了土壤有机碳质量,提高了土壤的综合生产力。

表 1 不同处理对西瓜地土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响

g/kg

处理	总有机碳	活性有机碳	中活性有机碳	高活性有机碳	碳库管理指数(CPMI)
CK	14.93±0.22 <sup>d</sup>	4.01±0.09 <sup>d</sup>	0.94±0.05 <sup>d</sup>	0.45±0.02 <sup>b</sup>	100.00±0.00 <sup>c</sup>
$N_{100}$	15.18±0.39 <sup>d</sup>	3.92±0.06 <sup>d</sup>	1.05±0.02 <sup>c</sup>	0.36±0.01 <sup>c</sup>	95.67±6.15 <sup>c</sup>
$M_{10}N_{90}$	16.05±0.14 <sup>c</sup>	4.65±0.07 <sup>c</sup>	1.27±0.04 <sup>b</sup>	0.53±0.03 <sup>a</sup>	118.51±2.48 <sup>b</sup>
$M_{30}N_{70}$	16.69±0.25 <sup>b</sup>	5.10±0.06 <sup>a</sup>	1.39±0.03 <sup>a</sup>	0.58±0.01 <sup>a</sup>	132.95±3.62 <sup>a</sup>
$M_{50}N_{50}$	17.91±0.36 <sup>a</sup>	4.87±0.04 <sup>b</sup>	1.43±0.03 <sup>a</sup>	0.55±0.02 <sup>a</sup>	121.08±4.76 <sup>b</sup>

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

### 2.2 土壤酶活性

土壤过氧化氢酶在一定程度上表征了土壤生物氧化过程的强弱和土壤微生物活动的强度,在有机质氧化和腐殖质形成过程中起着重要作用。脲酶、磷酸酶和蔗糖酶作为 3 种不同水解酶参与有机化合物的水解反应,对于丰富土壤中能被植物和微生物利用的可溶性营养物质有重要作用<sup>[13]</sup>。由表 2 可见,各处理过氧化氢酶和中性磷酸酶活性的变化规律为: $M_{30}N_{70} \approx M_{50}N_{50} > M_{10}N_{90} > N_{100} > \text{CK}$ ,得出  $M_{30}N_{70}$  与  $M_{50}N_{50}$  处理的过氧化氢酶、中性磷酸酶活性均无显著性差异,但明显高于其它处理;其次是  $M_{10}N_{90}$  处理,也明显高于 CK 和  $N_{100}$ 。 $M_{30}N_{70}$  处理的脲酶和蔗糖

酶活性最高,并显著高于其它处理,  $M_{30}N_{70}$  处理的脲酶活性分别比 CK,  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理提高了 38.13%, 16.36%, 10.98%, 8.47%,  $M_{30}N_{70}$  处理的蔗糖酶活性分别比 CK,  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理 8 提高了 4.66%, 62.33%, 47.26%, 22.46%。 $M_{50}N_{50}$  处理的蔗糖酶活性显著高于  $M_{10}N_{90}$  处理,而脲酶活性与  $M_{10}N_{90}$  处理差异不显著,但显著高于 CK 和  $N_{100}$  处理。由此可见,配施蚯蚓粪处理的过氧化氢酶、中性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性均明显高于单施化肥,而在蚯蚓粪与化肥的 3 个不同配施处理中,随着蚯蚓粪所占比重的增加,脲酶和蔗糖酶活性呈现先升高后降低的变化趋势。

表 2 不同处理对西瓜地土壤酶活性的影响

处理	过氧化氢酶	中性磷酸酶	脲酶	蔗糖酶
CK	0.78±0.04 <sup>d</sup>	1.72±0.03 <sup>d</sup>	1.39±0.05 <sup>d</sup>	1.89±0.05 <sup>e</sup>
N <sub>100</sub>	1.14±0.02 <sup>c</sup>	1.86±0.07 <sup>c</sup>	1.65±0.04 <sup>c</sup>	2.15±0.05 <sup>d</sup>
M <sub>10</sub> N <sub>90</sub>	1.22±0.04 <sup>b</sup>	2.02±0.05 <sup>b</sup>	1.73±0.03 <sup>b</sup>	2.37±0.11 <sup>c</sup>
M <sub>30</sub> N <sub>70</sub>	1.29±0.02 <sup>a</sup>	2.36±0.06 <sup>a</sup>	1.92±0.02 <sup>a</sup>	3.49±0.08 <sup>a</sup>
M <sub>50</sub> N <sub>50</sub>	1.35±0.05 <sup>a</sup>	2.29±0.05 <sup>a</sup>	1.77±0.03 <sup>b</sup>	2.85±0.09 <sup>b</sup>

注:过氧化氢酶单位为 ml/(g·h);中性磷酸酶单位为 mg/(g·24h);脲酶单位为 mg/(g·h);蔗糖酶单位为 ml/(g·h)。

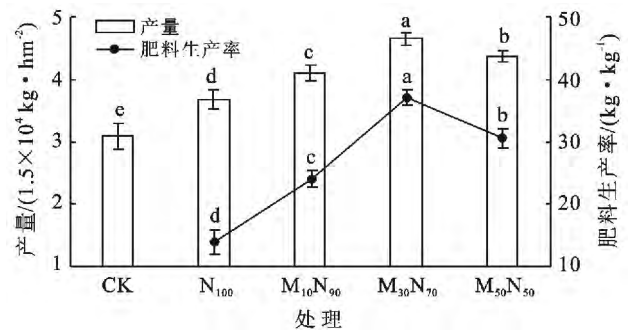
2.3 西瓜产量与肥料生产率

不同处理对西瓜产量和肥料生产率的影响如图 1 所示。由图 1 可见,施肥处理的西瓜产量相对对照均有显著的提高。在各施肥处理中,M<sub>30</sub>N<sub>70</sub> 处理的产量最高,并显著高于其它处理,分别比 N<sub>100</sub>,M<sub>10</sub>N<sub>90</sub> 和 M<sub>50</sub>N<sub>50</sub> 处理高出 26.49%,13.34%和 6.27%;依次是 M<sub>50</sub>N<sub>50</sub> 和 M<sub>10</sub>N<sub>90</sub> 处理,也明显高于 N<sub>100</sub> 处理。各施肥处理的肥料生产率大小次序为:M<sub>30</sub>N<sub>70</sub>>M<sub>50</sub>N<sub>50</sub>>M<sub>10</sub>N<sub>90</sub>>N<sub>100</sub>,且处理间差异均达显著水平。M<sub>30</sub>N<sub>70</sub> 处理的肥料生产率分别比 N<sub>100</sub>,M<sub>10</sub>N<sub>90</sub> 和 M<sub>50</sub>N<sub>50</sub> 处理提高 166.50%,54.11%和 21.37%;其次是 M<sub>50</sub>N<sub>50</sub> 和 M<sub>10</sub>N<sub>90</sub> 处理,分别比 N<sub>100</sub> 处理提高 119.58%和 72.92%,差异达显著水平。试验数据表明,与单施化肥相比,配施蚯蚓粪处理明显提高了西瓜产量和肥料生产率;而在配施蚯蚓粪的 3 个处理中,3:7 比例配施的产量和肥料生产率显著高于 1:9 和 5:5 比例,表明并非蚯蚓粪所占的比重越大,其产量和肥料生产率就越高。

2.4 相关性分析

有研究认为,绝大多数土壤酶活性与土壤有机碳

含量呈显著正相关,在很大程度上影响着土壤肥力水平<sup>[3]</sup>。对土壤 3 种不同程度的活性有机碳、总有机碳、碳库管理指数与土壤酶活性及西瓜产量、肥料生产率进行相关分析结果表明(表 3),3 种活性有机碳之间极显著相关,且与总有机碳呈显著(或极显著)相关;CPMI 与 3 种活性有机碳的相关性均高于它与总有机碳的相关性,这表明活性有机碳既区别于总有机碳又与总有机碳密切相关,是土壤总有机碳的一部分。



注:肥料生产率=(处理产量-CK产量)/处理总养分投入量

图 1 不同处理对西瓜产量及肥料生产率的影响

表 3 土壤有机碳与酶活性及西瓜产量的相关性分析

相关系数	高活性有机碳	中活性有机碳	活性有机碳	总有机碳	碳库管理指数	脲酶	过氧化氢酶	中性磷酸酶	蔗糖酶	产量	肥料生产率
高活性有机碳	1										
中活性有机碳	0.924**	1									
活性有机碳	0.917**	0.922**	1								
总有机碳	0.861*	0.948**	0.845*	1							
碳库管理指数	0.952**	0.966**	0.989**	0.815*	1						
脲酶	0.814*	0.915**	0.827*	0.806*	0.822*	1					
过氧化氢酶	0.753	0.795	0.746	0.722	0.691	0.963**	1				
中性磷酸酶	0.810*	0.969**	0.923**	0.905**	0.872*	0.879*	0.885*	1			
蔗糖酶	0.832*	0.862*	0.916**	0.810*	0.919**	0.854*	0.746	0.890*	1		
产量	0.813*	0.934**	0.925**	0.792	0.908**	0.982**	0.865*	0.942**	0.923**	1	
肥料生产率	0.876*	0.957**	0.986**	0.757	0.972**	0.991**	0.827*	0.915**	0.952**	0.981**	1

注: \* 表示显著性相关 (p<0.05), \*\* 表示极显著性相关 (p<0.01)。

土壤酶活性之间的相关分析表明,除过氧化氢酶与蔗糖酶之间相关性不显著外,其余土壤酶之间的相

关性均达到显著水平,说明土壤酶在进行酶促反应时,不但具有自身专一性,而且还存在着一些共性,可

在总体水平上反映土壤肥力水平的高低。西瓜产量、肥料生产率与中活性有机碳、活性有机碳及 CPMI 极显著相关, 与高活性有机碳显著相关, 而与总有机碳无显著相关性, 表明活性有机碳和 CPMI 更能准确反映土壤肥力和土壤质量的变化, 是描述土壤质量和评价土壤管理的良好指标; 同时还发现, 肥料生产率与高活性有机碳、中活性有机碳、活性有机碳及 CPMI 的相关性均高于产量与它们的相关性, 这说明肥料生产率相比产量, 与活性有机碳和碳库管理指数的关系更为紧密。土壤总有机碳和活性有机碳与脲酶、中性磷酸酶和蔗糖酶显著(或极显著)相关, 而与过氧化氢酶相关性不显著; 活性有机碳与土壤酶的相关性基本上高于总有机碳与土壤酶之间的相关性, 表明活性有机碳对土壤酶活性的影响更为明显。

### 3 讨论

土壤有机碳的活性成分对土壤养分、植物生长, 乃至环境都有直接的影响, 在现代土壤研究中非常重视土壤活性有机碳的作用<sup>[14]</sup>。对土壤活性有机碳及碳库管理指数的研究, 能够明确土壤管理和施肥的科学性。试验结果表明, 与单施化肥相比, 配施蚯蚓粪处理明显提高了西瓜地土壤中总有机碳、3 种活性有机碳含量及 CPMI, 这与张迪等<sup>[15]</sup>在黑土上的研究结果一致。主要原因在于: (1) 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; (2) 配施蚯蚓粪能显著促进西瓜根系和微生物的活动, 刺激了微生物活性, 从而增加了进入土壤的根系分泌物及有机残体数量, 故有利于生成活性有机碳, 并提高了 CPMI。本试验还得出, 单施化肥的 CPMI 相比对照有下降的趋势, 但未达到显著水平, 这与张继光等<sup>[16]</sup>在红壤上的研究结果不完全一致, 可能与土壤理化性状差异及西瓜生长周期短有关。同时还发现, 在配施蚯蚓粪的 3 个处理中, 蚯蚓粪与化肥以 3:7 比例配施对土壤活性有机碳和 CPMI 的提高幅度明显大于 1:9 和 5:5 比例, 这主要是因为 3:7 比例搭配能更好地调节土壤的 C/N 比, 为微生物生长创造了优越的环境。此外, 相关性分析表明, CPMI 与 3 种活性有机碳的相关性明显高于它与总有机碳的相关性, 这进一步印证了活性有机碳相比总有机碳对施肥管理措施的反映更灵敏, 对植物养分的供应也更直接, 能够更准确、更实际地反映土壤肥力和土壤物理性状的变化。

土壤酶在生态系统的有机质分解和养分循环所必需的催化反应中起着重要作用, 涉及一系列的植物、微生物、动物及其分泌物<sup>[17]</sup>; 土壤酶活性的变化能

够改变作物吸收养分的有效性, 而这些变化是土壤质量的潜在敏感指标<sup>[18]</sup>。本试验表明, 蚯蚓粪与化肥配施处理较单施化肥显著提高了西瓜地土壤的过氧化氢酶、中性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性, 这与申进文等<sup>[19]</sup>和田小明等<sup>[14]</sup>的研究结果相似。主要是由于蚯蚓粪与化肥的配施更新和增加了土壤有机质, 改良了土壤结构, 促进了土壤微粒的团聚作用, 增强了通气与水分的渗透性和保水能力, 改善了土壤微生物环境, 使土壤微生物数量增加<sup>[20]</sup>, 从而使土壤酶活性得到显著提高。本试验还发现, 配施蚯蚓粪明显提高了西瓜产量和肥料生产率, 这进一步说明配施有机肥在保持、改善和提高土壤肥力, 增强微生物活性, 促进农作物高产、优质等方面具有不可替代的作用。同时还得出, 配施蚯蚓粪处理的肥料生产率显著高于单施化肥, 这对于提高肥料的利用效率, 减轻环境污染、改善生态环境具有重要意义。进一步比较得出, 蚯蚓粪与化肥以 3:7 比例配施对土壤酶活性、西瓜产量和肥料生产率的总体促进效果明显优于 1:9 和 5:5 比例, 可能是由于 3:7 比例能较好地改善土壤理化性状和根际微域环境, 并能增强根系对养分的吸收能力, 故明显促进了西瓜的生长, 且提高了肥料利用率, 这也说明蚯蚓粪与化肥的搭配比例是关键因素。从相关性分析可知, 除过氧化氢酶以外, 土壤总有机碳和活性有机碳与中性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶均达到显著(或极显著)相关, 这表明土壤酶活性在总体上可用来指示施肥过程中土壤质量的演变过程。此外, 土壤酶活性与活性有机碳的相关性基本上高于其与总有机碳之间的相关性, 说明土壤酶活性更适合用来了解或预测某些营养物质的转化情况以及土壤肥力的演变趋势。但在其它类型土壤中或施用其它有机肥是否也具有这种相关性, 有待于进一步深入研究。

### 4 结论

与  $N_{100}$  处理相比, 配施蚯蚓粪处理的高活性、中活性和活性有机碳含量均明显升高;  $M_{30}N_{70}$  处理的活性有机碳含量和 CPMI 显著高于其他处理, 比  $N_{100}$  处理分别高出 30.10% 和 37.28%; 同时, 脲酶和蔗糖酶活性亦明显高于其它处理, 其中蔗糖酶活性分别比 CK,  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理提高了 84.66%, 62.33%, 47.26% 和 22.46%。此外,  $M_{30}N_{70}$  处理的西瓜产量和肥料生产率最高, 并明显高于其它处理,  $M_{30}N_{70}$  处理的西瓜产量分别比  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理高出 26.49%, 13.34%, 6.27%,  $M_{30}N_{70}$  处理的肥料生产率分别比 CK,  $N_{100}$ ,  $M_{10}N_{90}$  和  $M_{50}N_{50}$  处理提高了 166.50%, 54.11%, 21.37%。相关分析表明, 运用土

壤活性有机碳和碳库管理指数表征土壤酶活性、西瓜产量及肥料生产率的变化,比土壤总有机碳更具灵敏性。综合分析认为,蚯蚓粪与化肥配施在西瓜种植中具有显著的促进效果,其中 3 : 7 比例配施的效果优于 1 : 9 和 5 : 5 比例。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陆欣. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 82-293.
- [2] Lefroy R D B, Lisle L. Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1997, 48(7): 1049-1058.
- [3] Yan Dezhi, Wang Dejian, Yang Linzhang. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil [J]. *Biology and Fertility of Soil*, 2007, 44(1): 93-101.
- [4] Logninow W, Wisniewski W, Strony W M, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J]. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20(1): 47-52.
- [5] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [6] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in northwestern New South Wales [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4): 669-681.
- [7] 姜勇, 梁文举, 闻大中. 免耕对农田土壤生物学特性的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(3): 347-351.
- [8] 李欢, 向丹, 李晓林, 等. 蚯蚓粪和生物有机肥对土壤养分及夏玉米产量的调控作用[J]. *土壤通报*, 2011, 42(5): 1179-1183.
- [9] 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.
- [10] 程世平, 施江, 史国安, 等. 不同配比蚯蚓粪对桂圆菊生长发育的影响[J]. *北方园艺*, 2010(17): 62-64.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [12] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723-729.
- [13] 陈华葵, 樊庆笙. 微生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
- [14] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 不同生物有机肥用量对土壤活性有机质和酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012(1): 26-32.
- [15] 张迪, 韩晓增, 侯雪莹. 长期不同施肥管理对黑土活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 654-658.
- [16] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. *土壤*, 2010, 42(3): 364-371.
- [17] Allison V, Condron L, Peltzer D A, et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2007, 39(7): 1770-1781.
- [18] Ajwa H A, Dell C J, Rice C W. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tall grass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1999, 31(5): 769-777.
- [19] 申进文, 沈阿林, 张玉亭, 等. 平菇栽培废料等有机肥对土壤活性有机质和土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 631-636.
- [20] 李继蕊, 史庆华, 王秀峰, 等. 不同配比蚯蚓堆肥和牛粪堆肥对根际微环境及黄瓜产量、品质的影响[J]. *山东农业科学*, 2013, 45(6): 66-70.