

DOI: 10.20103/j.stxb.202211093225

张香凝, 史福刚, 李太魁, 郭战玲, 寇长林. 接种蚯蚓对有机茶园土壤结构及有机碳库的影响. 生态学报, 2024, 44(4): 1747-1754.

Zhang X N, Shi F G, Li T K, Guo Z L, Kou C L. Soil structure and soil organic carbon distribution in organic tea plantation following earthworm inoculation. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1747-1754.

## 接种蚯蚓对有机茶园土壤结构及有机碳库的影响

张香凝\*, 史福刚, 李太魁, 郭战玲, 寇长林

河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002

**摘要:**为探讨接种蚯蚓对有机茶园土壤团聚体、孔隙分布及有机碳库的影响, 设置 375 条/m<sup>2</sup>, 250 条/m<sup>2</sup>, 125 条/m<sup>2</sup> 三种蚯蚓投放密度, 将威廉腔环蚓接种于信阳有机茶园土壤中。结果表明: 接种蚯蚓能显著提升 >2mm 大团聚体的比例而降低 <0.25mm 粒径的微团聚体的比例; 提高水稳性小团聚体 (0.25mm ≤ d ≤ 2mm) 比例, 但对水稳性大团聚体 d > 2mm 的影响不显著; 高密度蚯蚓处理平均重量直径 (MWD), 平均几何直径 (NWD) 以及分型维数 (D), 团聚体破坏率 (PAD) 显著高于其他密度处理及对照 (CK)。接种蚯蚓使得结构性孔隙 (土壤颗粒间和团聚体间孔隙) 所占比重增加, 其中以团聚体间孔隙增加最为显著, 其次为颗粒间孔隙, 对由粘粒及矿物层间形成的毛管孔隙分布无显著影响; 随着接种密度的增加, 颗粒间孔隙度变化不显著而团聚体间孔隙度的相对值和绝对值均显著增加。添加蚯蚓能显著增加土壤活性有机库总量。接种密度的增加对活性有机碳库总量影响不大, 但对土壤呼吸速率提升较多, 故从温室气体排放角度考虑低接种密度更合适。可见, 有机茶园中少量接种蚯蚓即能达到改良土壤结构的效果, 并能缓解由于采茶造成的土壤压实问题。

**关键词:** 蚯蚓; 土壤团聚体; 土壤孔径分布; 土壤有机碳库; 有机茶园

## Soil structure and soil organic carbon distribution in organic tea plantation following earthworm inoculation

ZHANG Xiangning\*, SHI Fugang, LI Taikui, GUO Zhanling, KOU Changlin

Institute of Plant Nutrition, Agriculture Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China

**Abstract:** Due to the restriction of chemical fertilizer in organic agricultural systems, soil degradation featured with poor soil structure and insufficient fertility is a bottleneck limiting the quality and yield improvement of organic tea plantation. Earthworms play a vital role in the regulation of soil ecosystem services. This study aimed to find an effective method for sustainable utilization of organic tea garden soil structure improvement and fertility improvement. In order to investigate the effects of earthworms on soil structure and soil carbon distribution in organic tea plantation, we inoculated *Metaphire guillelmi* into the soil with different densities, 375/m<sup>2</sup>, 250/m<sup>2</sup>, 125/m<sup>2</sup> respectively. The results showed that the earthworm inoculation affected soil aggregate size distribution. It significantly increased the proportion of large aggregates (d > 2mm) and reduced the proportion of micro aggregates (d < 0.25mm). The proportion of small water-stable aggregates (0.25mm ≤ d ≤ 2mm) was also increased. But for large water-stable aggregates (d > 2mm), Here was no significant influence. Mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (NWD), dimension (D), and percentage of aggregate disruption (PAD) of high-density earthworm treatment were significantly higher than those treatments of lower densities and Control (CK). <sup>1</sup>H nuclear magnetic resonance (NMR) relaxometry could be used to study pore size distributions in soil samples efficiently and non-destructively. The distribution of soil porosity (pore size distribution) was

基金项目: 河南省四优四化项目 (20220701003, 20200703005); 河南省农科院自主创新项目 (2021ZC32)

收稿日期: 2022-11-09; 网络出版日期: 2023-11-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxiangninggp@163.com

more important than the total porosity. To measure the distribution of soil pores, the nuclear magnetic resonance method was introduced in this study, which made up for the defect of the traditional methods that could not distinguish capillary pores. Earthworm inoculation increased the proportion of structural pores (the intergranular and interaggregate pores), among which the increase of pores between aggregates was the most significant, followed by intergranular pores. Here was no significant effect on the abundance of interlayer space between clay particles and mineral layers. With the increase of inoculation density, the relative and absolute values of porosity between aggregates increased significantly, while the difference of porosity between particles was not significant. Therefore, earthworm inoculation could improve the aeration and water permeability of soil. Earthworm inoculation could significantly increase soil respiration, soil microbial entropy, and total amount of soil active organic pool. That is, earthworm activity accelerated the renewal of soil organic carbon. The increase of inoculation density had little effect on the total amount of active organic carbon pool, but it had more effect on the soil respiration rate. Therefore, it is more appropriate to consider low inoculation density from the perspective of greenhouse gas emission. It can be concluded that a small amount of earthworm inoculation in the organic tea garden are enough to improve the soil structure and improve the soil fertility. It can also alleviate the structural problems of soil compaction caused by trampling and compaction when tea leaves are picked.

**Key Words:** earthworm; soil aggregates; soil pore size distribution; soil organic carbon; organic tea garden

信阳新县是信阳毛尖茶的主产区之一。境内多丘陵山地,森林覆盖率 80%以上,粮食作物比重小,受化肥农药影响较小,自然生境条件好,适合打造有机茶园。但有机茶园由于农业投入品限制性问题的,土壤施肥基本以菜籽饼肥为主,饼肥价格高,很多有机茶园选择不施肥,同时由于采茶基本都是人工,茶园土壤遭踩踏严重,因而有机茶园土壤地力退化,结构差成为制约有机茶园品质及产量提高的瓶颈。

蚯蚓是生物量最大的土壤动物<sup>[1]</sup>,也是土壤动物中与土壤结构关系最为密切的动物。蚯蚓通过取食、掘穴、排泄等活动影响土壤团聚体、通气性及土壤水分入渗<sup>[2-3]</sup>,其分泌物和排泄物有利于土粒的聚合,从而形成良好的土壤结构<sup>[5]</sup>,蚯蚓能加速有机物料分解和土壤养分循环<sup>[4]</sup>。已有研究发现,土壤团聚体的水稳性可能与蚯蚓本身分泌的大量黏液有关<sup>[6]</sup>,蚯蚓的添加能增加土壤中稳定性团聚体的比例,能显著降低土壤微团聚体(粒径  $d < 0.25\text{mm}$ )的比例,同时提高形成大团聚体( $d > 2\text{mm}$ )和小团聚体( $0.25\text{mm} \leq d \leq 2\text{mm}$ )的比例<sup>[7-10]</sup>,进而改善退化土壤的团聚体稳定性<sup>[11-12]</sup>,土壤团聚体作为土壤结构的基本组成单元,其质量和数量不仅决定土壤肥力的高低,而且还与土壤的抗蚀能力和固碳潜力等有直接关系。因此,接种蚯蚓在土壤有机碳循环与固持、土壤养分供给、水土保持等方面都发挥着积极的作用<sup>[7]</sup>。

由于化肥农药及不适当耕作,农田生态系统蚯蚓数量的大幅度下降<sup>[13]</sup>,而有机茶园没有农药和化肥的施用且耕作少,适合蚯蚓存活。因此有机农耕系统可以通过蚯蚓减少长期耕作造成的土壤压实及土壤退化<sup>[14-15]</sup>支撑生态系统功能。目前关于有机茶园土壤地力提升方面的研究较少。基于此,本研究以信阳有机茶园为研究区域,在有机茶园中接种蚯蚓,探寻不同接种密度对茶园土壤团聚体、孔径分布及土壤碳库的影响,以期有机茶园土壤结构改良,肥力提升寻找一种可持续利用的有效办法,并为有机茶园固碳增汇的提供理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地点为信阳新县香山湖茶场,茶场面积  $140\text{hm}^2$ ,东经  $114.87924$ ,北纬  $31.64386$  之间。该区气候条件属亚热带向暖温带过渡区,气候类型为北亚热带季风大陆性气候,年平均气温  $15.2\text{—}15.5^\circ\text{C}$ ,年平均气温  $\geq 10^\circ\text{C}$  活动积温  $4900\text{—}5200^\circ\text{C}$ ,年降雨量  $900\text{—}1500\text{mm}$ ,相对湿度年均  $77\%$ ;年日照时数  $1940\text{—}2180\text{h}$ ,太阳总辐射  $4700\text{—}5100\text{MJ}/\text{m}^2$ ,无霜期  $220\text{—}245\text{d}$ ,茶场土质弱酸性( $\text{pH}4.69\text{—}5.53$ ),养分含量较低,有机质平均含量

分别为 1.3%—2.3%, 全氮 0.74—0.87g/kg, 全磷 0.273—0.642g/kg, 全钾 12.88—17.49g/kg, 速效钾 72—134mg/kg, 有效磷 2.8—13.4mg/kg。茶场茶树均为信阳群体种(有性系), 树龄 50 年, 蓬面宽度 1.5m。

## 1.2 材料

依据调查的茶园蚯蚓本底值(75 条/m<sup>2</sup>), 设置高中低三种不同蚯蚓投放密度, 接种密度为: 375 条/m<sup>2</sup> (H), 250 条/m<sup>2</sup> (M), 125 条/m<sup>2</sup> (L)。每密度设置三个重复同时做未接种蚯蚓的对照处理(CK), 共 12 个小区, 小区之间插入 PVC 板隔开, (小区面积 1.5m×3m, 每个小区里包含茶树 2—3 株), 2020 年 4 月接种, 2021 年 5 月底, 蚯蚓旺盛活动期即将结束时采样。所接种蚯蚓为威廉腔环蚓(*Metaphire guillelmi*)。在分类上介于表栖类(*epigeic*) 和内栖类(*endogeic*) 之间属于内居种, 食性上属于土蚯蚓, 活动范围 5—15cm。

## 1.3 方法

### 1.3.1 样品采集

每个小区取 3 个土样混合, 依据威廉腔环蚓的主要活动范围设置取样深度为 5—15cm, 共得到 12 个混合土壤样品。一部分置于-80℃ 冰箱保存, 用于测定微生物量碳; 将另一份将每个混合土壤样品沿自然结构轻轻掰开并过 5mm 筛, 除去动植物残体和小石块等, 用于测定土壤团聚体分布及稳定性; 每个小区用容量为 60mL 的环刀采集一个原状土用于土壤孔隙度测定。

### 1.3.2 测定项目及方法

土壤 pH 值用 pH 计(ORION3STAR, Hemo, 美国) 测定; 土壤有机碳含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定。土壤微生物量碳氮采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取法测定; 土壤呼吸测定用 LCI-SD 土壤呼吸测定仪测定, 测定时间: 上午 10:00—11:00; 团聚体分布采用干筛法<sup>[16]</sup> 测定, 团聚体稳定性采用 Yoder 湿筛法测定<sup>[17]</sup>, 采用上海德码 zy200 型土壤团粒分析仪进行分离; 有机碳组分测定方法: 六偏磷酸钠溶液(0.5%) 分散法。孔隙分布测定方法: 质子核磁共振弛豫分析法。原状土放入真空容器中在真空状态下去离子水饱和, 之后立即取出称重并进行测试<sup>[18]</sup>。核磁共振测试参数: 磁场强度 0.55T (共振频率 11.826MHz), 采用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG) 序列<sup>[19]</sup>, 回波间隔时间 160μs。用迭代重建算法(SIRT) 拟合得到出拟合得出样品不同大小孔隙中水的横向弛豫时间(*T*<sub>2</sub>) 的分布曲线。

## 1.4 数据处理分析

土壤团聚体平均重量直径 MWD, 平均几何直径 GMD 计算方法<sup>[20]</sup>:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i; \quad GMD = \exp \left( \sum_{i=1}^n W_i \ln X_i / \sum_{i=1}^n W_i \right)$$

分型维数 *D* 计算方法:  $D = 3 - \log \left( \frac{W_i}{W_0} \right) / \log \left( \frac{d_i}{d_{max}} \right)$

*R*<sub>0.25</sub> (>0.25mm 团聚体含量) 计算方法:  $R = \frac{M_r}{M_t} \times 100\%$

*X<sub>i</sub>* 每一粒级的平均直径(mm), *W<sub>i</sub>* 对应于 *X<sub>i</sub>* 的团聚体百分含量, *W<sub>0</sub>* 各粒级质量总和, *d<sub>i</sub>* 某级团聚体的平均直径, *d<sub>max</sub>* 最大粒径团聚体平均直径。

团聚体破坏率(PAD):

$$PAD = \frac{\text{干筛团聚体含量}(d > 0.25\text{mm}) - \text{湿筛团聚体含量}(d > 0.25\text{mm})}{\text{干筛团聚体含量}(d > 0.25\text{mm})} \times 100\%$$

土壤微生物熵(qMB) 计算方法:  $qMB = \frac{MBC}{TOC}$

## 2 结果与分析

### 2.1 不同蚯蚓接种密度对土壤团聚体分布的影响

从图 1 可以看出接种蚯蚓对土壤团聚体分布影响较为显著。整体来看, 接种蚯蚓与未接种蚯蚓处理间差

异显著,不同密度处理间团聚体各级分配比例差异不显著。接种蚯蚓能显著提升 $>5\text{mm}$ 大团聚体的比例而降低 $<0.25\text{mm}$ 的微团聚体粒径的比例,而对于 $0.25\text{--}5\text{mm}$ 之间的团聚体比例影响不大。CK中 $<0.25\text{mm}$ 微团聚体占 $37.11\%$ ,接种蚯蚓处理后 $<0.25\text{mm}$ 粒径微团聚体比例降为 $4.85\%$ — $6.23\%$ ,比CK降低了 $82.21\%$ ,CK中 $>5\text{mm}$ 大团聚体比例为 $31.19\%$ ,接种蚯蚓后 $>5\text{mm}$ 大团聚体所占比例变为 $43.74\%$ — $49.25\%$ ,比CK增加了 $60\%$ 左右; $>2\text{mm}$ 大团聚体所占比例变为 $68.26\%$ — $72.15\%$ ,比CK增加了 $38.23\%$ — $46.11\%$ 。

从图2可以看出,接种蚯蚓对土壤团聚体水稳性团聚体分布影响较为显著,各处理间差异显著。随着接种密度的增加,水稳性团聚体各级分配比例更加均匀化。随着接种密度的提高,水稳性微团聚体( $d < 0.25\text{mm}$ )的比例逐渐下降,其中H处理水稳性微团聚体比例为 $25.22\%$ ,比CK减少 $46.61\%$ ,比L减少 $27.01\%$ ;同时,接种蚯蚓能显著提高水稳性小团聚体( $0.25\text{mm} \leq d \leq 2\text{mm}$ )比例,各密度处理之间差异不显著,但比CK分别提高 $79.79\%$ — $83.80\%$ ;接种蚯蚓后,土壤团聚体组成以 $d > 1\text{mm}$ 粒径的团聚体为主,且接种密度越高,这部分比例越大,最高达到 $44.98\%$ ;但是接种蚯蚓处理对水稳性大团聚体 $d > 2\text{mm}$ 的影响不显著,L处理反而显著降低了水稳性大团聚体的比例,这与崔莹莹2020等的研究相似<sup>[21]</sup>,随着接种密度的提高,水稳性大团聚体比例逐渐增加,H的水稳性大团聚体比例为 $32.33\%$ 与CK基本接近。

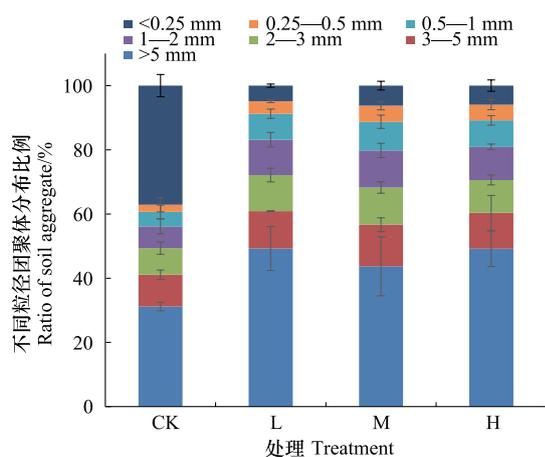


图1 不同接种密度对土壤各级团聚体分布的影响

Fig.1 Distribution of soil aggregates at different sizes

H: 高密度处理; M: 中密度处理; L: 低密度处理; CK: 对照

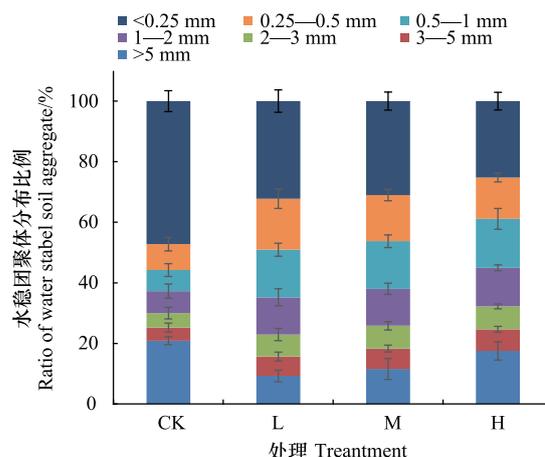


图2 不同接种密度对土壤水稳性团聚体分布的影响

Fig.2 Distribution of water stable aggregates at different sizes.

## 2.2 不同蚯蚓接种密度对土壤团聚体稳定特征指标的影响

MWD及GWD是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,其值越大,团聚体稳定性越强。 $D$ 可以表明土壤颗粒的大小、分布及其均一程度,其值越小,土壤越具有良好的结构与稳定性,抗蚀能力越强<sup>[22-23]</sup>。从表1可以看出,H处理显著提高土壤团聚体的MWD值,M与L处理的MWD值与CK无显著差异;各处理之间及与CK之间的土壤GWD值均有显著差异,其中以H的GWD值最大,CK的GWD值最小; $D$ 数值以CK最高,H最低,M与L与CK在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,但二者之间差异不显著,H与其余处理差异均显著; $R > 0.25\text{mm}$ 的CK最低,H最高,M与L与CK在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,但二者之间差异不显著,H与其余处理差异均显著;各个密度的蚯蚓处理PAD值均显著大于CK,各密度处理之间差异不显著但与CK均成极显著差异。

## 2.3 不同蚯蚓接种密度对土壤孔径分布的影响

孔隙中氢质子的横向弛豫时间( $T_2$ )分布显示了充分膨胀时总的孔径分布。本研究土壤饱和状态的 $T_2$ 分布曲线是三峰的,这可能是胀缩性土壤多级结构的结果,分别为粘土矿物层间、颗粒间(即团聚体内部孔隙)和团聚体间孔隙存在的表现<sup>[24-25]</sup>,即最左边弛豫时间较短的峰是层间水所产生的信号(peak1)另外两个弛豫时间较长的峰可以看作土壤颗粒间孔隙水(peak2)和团聚体间大孔隙水(peak3)所产生的信号<sup>[24-25]</sup>。由

图 3 可以看出,各处理的 Peak1 面积基本一致,分别为(99.93,99.98,98,26,100.08),Peak 2 面积分别为(56.20,66.80,67.65,70.95),CK 显著低于与其余处理,但是各蚯蚓处理之间峰面积差异不显著;Peak3 的面积差异最大分别为(11.87,27.40,22.88,51.62),显示各处理之间及各处理与 CK 之间差异均显著。可见,接种蚯蚓处理对 Peak3 的改变最为显著,即孔径分布状况的改变以团聚体间孔隙改变为主。

表 1 不同接种密度对土壤团聚体稳定性的影响

Table 1 Effect of earHworm introduction on stable of soil aggregates

处理 Treatment	团聚体平均重量直径 MWD	团聚体平均几何直径 GWD	分型维数 D	> 0.25mm 团聚体含量 $R_{0.25}$	团聚体破坏率 PAD
H	1.90±0.02aA	1.38±0.03aA	2.61±0.034aA	74.78±2.73bA	21.62±2.39aA
M	1.57±0.08bB	1.23±0.03bAB	2.66±0.03abA	68.96±2.32bAB	26.44±2.75aA
L	1.45±0.17bB	1.16±0.11bB	2.67±0.039bA	67.79±3.13bB	27.27±2.21bA
CK	1.66±0.15bB	0.75±0.087cC	2.80±0.014cA	52.76±1.79cC	16.11±1.16bcB

多重比较采用 LSD 法检验,同一列后字母不同表示差异显著,大小写字母分别表示差异达 0.01 和 0.05 的显著水平;MWD: 平均重量直径 Mean weight diameter; GWD: 平均几何直径 Geometric mean diameter; D: 分型维数 Dimension; PAD: 团聚体破坏率 Percentage of aggregate disruption; H: 高密度处理; M: 中密度处理; L: 低密度处理; CK: 对照 Control

根据土壤容重换算成单位土体各种孔隙量比例结果如下:粘土矿物层间孔隙占总孔隙度比例分别为(27.66%,25.85%,25.74%,24.08%),土壤颗粒间孔隙占总孔隙度的比例分别为(15.56%,17.27%,17.72%,17.07%),团聚体间大孔隙占土壤总孔隙度的比例分别为(3.28%,7.08%,5.99%,12.42%)。可见,接种蚯蚓处理对矿物层间孔隙度所占比例无显著改变,总孔隙度的改变主要来自于颗粒间孔隙以及团聚体间孔隙度的增加。随着接种密度的增加,颗粒间孔隙度及团聚体间孔隙度的相对值和绝对值都有所增加,但是颗粒间孔隙度各密度处理之间差异不显著,团聚体间大孔隙度总量和比例增加显著,尤其以高密度增加最为显著。

#### 2.4 不同蚯蚓接种密度对土壤碳库组分分布及土壤呼吸的影响

从表 2 可以看出,DOC 含量在整个土壤 TOC 中比例偏低,含量在 2.89%—3.37%之间,随着接种蚯蚓量的增加,TOC 总量差异不大,DOC 含量略有增加, MBC, DOC, 土壤呼吸,均有不同程度的增加。其中 CK 与各处理之间 MBC、DOC 差异极其显著,而各密度处理间差异不显著。随着接种密度的增加,土壤呼吸增加的比例较多,L,M,H 分别比 CK 增加了 49.3%,172.39%,222.54%。

表 2 不同蚯蚓接种密度对土壤碳库化学组分分布的影响

Table 2 Effect of earHworm introduction on distribution of chemical components in soil carbon pool

处理 Treatment	土壤总有机碳 TOC/(mg/kg)	可溶性有机碳 DOC/(mg/kg)	微生物量碳 MBC/(mg/kg)	土壤呼吸 Ce/(mol/m <sup>2</sup> /s)
CK	3030aA	97.9aA	157.53aA	3.55aA
L	3640aA	105.27bB	206.5bB	5.3bB
M	3290aA	106.88bB	206.29bB	9.67cB
H	3510aA	118.24cB	216.62bB	11.45Cc

多重比较采用 LSD 法检验,同一列后字母不同表示差异显著,大小写字母分别表示差异达 0.01 和 0.05 的显著水平;TOC: 土壤总有机碳 Total organic carbon/(mg/kg); DOC: 土壤可溶性有机碳 Dissolved organic carbon/(mg/kg); MBC: 微生物量碳 Soil microbial biomass organic carbon/(mg/kg); Ce: 土壤呼吸 Soil Respiration/(mol/m<sup>2</sup>/s)

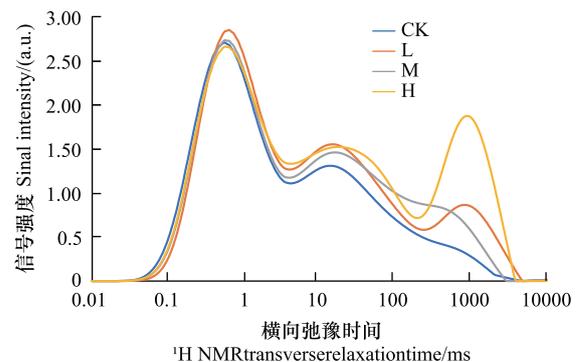


图 3 土壤孔隙中氢质子的横向弛豫时间分布图

Fig.3 Distribution of <sup>1</sup>H NMR transverse relaxation time in soil pores

### 3 讨论

#### 3.1 接种蚯蚓对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,具有保证和协调土壤水肥气热、影响土壤微生物活性、酶的种类和活性、稳定土壤疏松熟化层三方面作用。团聚体稳定性是指团聚体抵抗外力或当外部环境条件发生变化时其保持原有形态的一种能力<sup>[26]</sup>,土壤结构的指示因子<sup>[27]</sup>。本研究显示,接种蚯蚓特别是高密度处理对土壤团聚体分布及稳定性影响较为显著,团聚体分布及分型维数表现的趋势一致,该结论与现有的大多数研究结果一致<sup>[10,26]</sup>。蚯蚓一方面通过吞噬土壤,混合、挤压及黏蛋白黏多糖对土壤颗粒的胶结作用,使经过蚯蚓肠道后的蚓粪比原土稳定性更高<sup>[4-5]</sup>;另一方面通过影响土壤理化性质间接影响团聚体形成<sup>[28]</sup>。一般来说,大型蚯蚓可形成较大土壤团聚体,而较小的蚯蚓则可以破坏大团聚体,并排泄较小的团聚体<sup>[29]</sup>。本文接种的威廉环毛蚓属于较大型蚯蚓,研究结果显示有助于形成较大的团聚体,这与大多数人的研究结果符合,但对水稳性大团聚体的影响不显著,可能由于接种时间不长,形成了大团聚体但未形成水稳性大团聚体。可见,蚯蚓活动能提升大团聚体比例,促进土壤的黏砂粒向微团转变,而这部分粒径的团聚体对与土壤养分的保持以及结构稳定最为重要,故而接种蚯蚓对土壤结构改良及地力提升作用很大,特别是山地茶园这种退化性土壤。

#### 3.2 接种蚯蚓对土壤孔隙分布的影响

土壤的孔隙状况包括两方面,一是土壤孔隙的总容积即总孔隙度,另一方面是各级粗细不同孔径孔隙占总容积的百分数即土壤孔径分布。作为物质在土壤中运输的通道,土壤孔隙度的分布(孔径分布)较总孔隙度更为重要,因为粗孔隙和细孔隙对土壤水和空气的传导以及植物根的穿插和吸水作用不同。但是传统的孔隙度测定方法无法区分大小孔隙的分布状况,同时蚯蚓对于土壤总孔隙度的改变显而易见,但是对于孔径分布的影响还没见到具体的研究,如果想彻底摸清接种蚯蚓对土壤物理结构的改变原理,土壤孔径分布是不可缺少的一部分,因此本研究引入核磁共振法测定土壤孔隙分布,弥补了传统方法中无法区别毛管孔隙的缺陷。质子核磁共振(<sup>1</sup>H NMR)最初在土壤学科中用来测定土壤样品的含水量<sup>[30]</sup>,它分析速度快且测定的孔隙范围更广<sup>[31-32]</sup>,曾经被用以研究粘粒束缚水<sup>[33]</sup>和蒙脱石矿物的层间水<sup>[34]</sup>。研究表明总的核磁共振信号强度和重量含水量之间呈较好的线性关系,相关系数  $R = 0.9995$ <sup>[18]</sup>,且回归线经过原点,说明测得的孔隙分布包括了所有可以充水的孔隙体积。故而,核磁共振弛豫分析的  $T_2$  分布很好的描述了土壤中充水孔隙的大小及分布情况。

结果显示,接种蚯蚓使得结构性孔隙(土壤颗粒间和团聚体间孔隙)所占比重增加,对由粘粒及矿物层间形成的毛管孔隙(即非活性孔隙)分布无显著影响,故接种蚯蚓能提高土壤的通气 and 透水性,适合茶树种植需要,且接种密度越大土壤孔径分布状况越好,增加接种密度对改善茶园土壤孔隙状况有利。随着接种密度增加,颗粒间孔隙度差异不显著而团聚体间孔隙度的相对值和绝对值均显著增加,该趋势与接种蚯蚓后土壤团聚体分布变化趋势完全一致。可能由于接种蚯蚓改变了土壤团粒结构,而团粒结构的改变引起土壤比表面积及孔隙状况的改变,团粒的稳定性和粒径分布决定着上述作用的程度。因此蚯蚓一方面通过穿行穴道等物理作用改变着土壤大孔隙,另一方面,通过团粒结构的改变影响着土壤孔径分布状况。

#### 3.3 接种蚯蚓对土壤碳库的影响

与 TOC 相比,MBC、DOC 对施肥管理措施更为敏感<sup>[35]</sup>,可以做为 TOC 变化的早期指标。本研究结果显

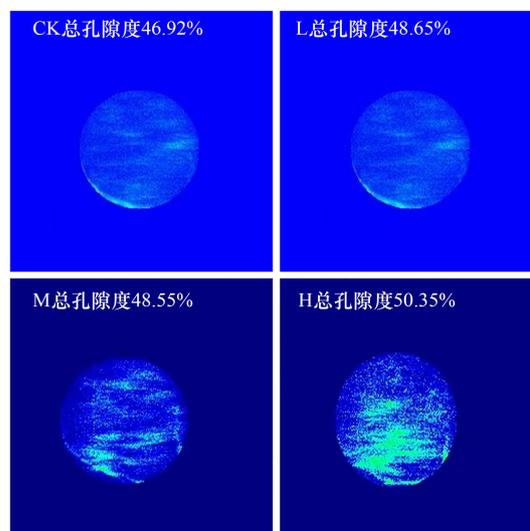


图4 不同蚯蚓接种密度下土壤孔隙分布成像图

Fig.4 Images of soil pore distribution

示,接种蚯蚓后,茶园土壤 TOC, MBC, DOC,  $C_e$  以及 qMB 均成增加趋势,在提升总有机碳的同时也提升了易利用有机碳,但是总体固定碳的量增加。可见,蚯蚓机械破碎并摄入和排泄凋落物,将其输入土壤,从而导致土壤有机质的重新分布。一方面土壤可溶性有机碳含量和组成结构的变化会刺激土壤微生物活性的变化方面<sup>[35]</sup>,土壤中微生物又有助于激发有机质的活性功能<sup>[8]</sup>,故而表现为土壤微生物活性及土壤活性有机碳库的同时增加。这与于建光<sup>[7]</sup>的研究结果类似即蚯蚓活动加快了土壤有机碳的更新,因此接种蚯蚓对于改善有机茶园茶树养分状况十分有利。但是接种密度对活性碳库总量影响差异不大,H 处理对于土壤呼吸速率提升较,故从土壤碳排放方面考虑,低接种密度更为合适。

### 3.4 土壤团聚体稳定性指标与土壤碳库组分相关关系分析

表 3 可以看出,GWD 与  $C_e$  相关系数最大为 0.689,MWD 及  $R$  与  $C_e$  相关系数也较大,分别为 0.610 和 0.672,分型维数  $D$  与  $C_e$  成较强的负相关,但  $D$  值越小土壤团聚体稳定性越高,故而均表现为团聚体稳定性与土壤呼吸相关关系显著。DOC 与团聚体稳定性指标的相关性最高,而与 TOC 相关度不大,即大粒径团聚体比例的增加与土壤活性碳库增加相关性较大,这与已有研究结果类似<sup>[7,36]</sup>。土壤有机碳对团聚体的数量和分布有重要影响,反之,团聚体的形成也影响着土壤有机质平衡和矿化速率的微观表征<sup>[7]</sup>。

表 3 土壤团聚体稳定性指标与土壤碳库组分相关关系

Table 3 Proximity Matrix between soil carbon fractions and Stability index of soil aggregates

指标 Index	MWD	GMD	$D$	$R_{0.25}$	DOC	TOC	MBC	$C_e$
MWD	1.000	0.526	-0.509	0.480	0.434	0.080	-0.252	0.610
GMD	0.526	1.000	-0.891	0.935	0.366	0.189	0.019	0.689
$D$	-0.509	-0.891	1.000	-0.988	-0.127	-0.314	-0.243	-0.637
$R_{0.25}$	0.480	0.935	-0.988	1.000	0.188	0.290	0.198	0.672
DOC	0.434	0.366	-0.127	0.188	1.000	0.330	-0.672	0.510
TOC	0.080	0.189	-0.314	0.290	0.330	1.000	-0.489	0.440
MBC	-0.252	0.019	-0.243	0.198	-0.672	-0.489	1.000	-0.462
$C_e$	0.610	0.689	-0.637	0.672	0.510	0.440	-0.462	1.000

## 4 结论

接种蚯蚓能够促进土壤团粒结构的形成,显著提升>5mm 大团聚体的比例而降低>0.25mm 的微团聚体粒径的比例,增加了土壤稳定性及抗侵蚀能力。

接种蚯蚓使得结构性孔隙(土壤颗粒间和团聚体间孔隙)所占比重增加,土壤活性碳库总量增加。接种密度的增加对活性有机碳库总量影响不大,但对土壤呼吸速率提升较多,故从温室气体排放角度考虑低接种密度更为合适。由此可见,有机茶园中少量接种蚯蚓即能达到改良土壤结构,提升肥力的显著效果,并能缓解由于采茶造成的土壤踩踏压实而引起的结构问题,但具体接种密度的稳定性还需要经过较长时间的验证。

### 参考文献(References):

- [1] 张卫信,陈迪马,赵灿灿. 蚯蚓在生态系统中的作用. 生物多样性, 2007, 15(2): 142-153.
- [2] Angst Š, Mueller C W, Cajthaml T, Angst G, Lhotáková Z, Bartuška M, Špaldonová A, Frouz J. Stabilization of soil organic matter by earthworms is connected with physical protection rather than with chemical changes of organic matter. Geoderma, 2017, 289: 29-35.
- [3] Gong X, Wang S, Wang Z W, Jiang Y J, Hu Z K, Zheng Y, Chen X Y, Li H X, Hu F, Liu M Q, Scheu S. Earthworms modify soil bacterial and fungal communities through enhancing aggregation and buffering pH. Geoderma, 2019, 347: 59-69.
- [4] Piron D, Boizard H, Heddadj D, Pérès G, Hallaire V, Cluzeau D. Indicators of earthworm bioturbation to improve visual assessment of soil structure. Soil and Tillage Research, 2017, 173: 53-63.
- [5] Price-Christenson G J, Johnston M R, Herrick B M, Yannarell A C. Influence of invasive earthworms (*Amyntas* spp.) on Wisconsin forest soil microbial communities and soil chemistry. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 149: 107955.
- [6] Bossuyt H, Six J, Hendrix P F. Rapid incorporation of carbon from fresh residues into newly formed stable microaggregates within earthworm casts.

- European Journal of Soil Science, 2004, 55(2): 393-399.
- [ 7 ] 于建光, 胡锋, 李辉信, 王前进, 王同. 接种蚯蚓对土壤团聚体分布、稳定性及有机碳赋存的影响. 水土保持学报, 2010, 24(3): 175-179, 184.
- [ 8 ] Bossuyt H, Six J, Hendrix P F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(2): 251-258.
- [ 9 ] Schrader S, Rogasik H, Onasch I, Jégou D. Assessment of soil structural differentiation around earthworm burrows by means of X-ray computed tomography and scanning electron microscopy. Geoderma, 2007, 137(3/4): 378-387.
- [ 10 ] 赵长巍. 接种蚯蚓对黑土水稳性团聚体含量及有机碳蓄积的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2007.
- [ 11 ] Jongmans A G, Pulleman M M, Marinissen J C Y. Soil structure and earthworm activity in a marine silt loam under pasture versus arable land. Biology and Fertility of Soils, 2001, 33(4): 279-285.
- [ 12 ] Winsome T, McColl J G. Changes in chemistry and aggregation of a California forest soil worked by the earthworm *Argilophilus papillifer* eisen (Megascolecidae). Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(13): 1677-1687.
- [ 13 ] Uwizeyimana H, Wang M E, Chen W P, Khan K. The eco-toxic effects of pesticide and heavy metal mixtures towards earthworms in soil. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2017, 55: 20-29.
- [ 14 ] Briones M J I, Schmidt O. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. Global Change Biology, 2017, 23(10): 4396-4419.
- [ 15 ] Bender S F, Wagg C, van der Heijden M G A. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. Trends in Ecology & Evolution, 2016, 31(6): 440-452.
- [ 16 ] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [ 17 ] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [ 18 ] Shi F G, Zhang C Z, Zhang J B, Zhang X N, Yao J. The changing pore size distribution of swelling and shrinking soil revealed by nuclear magnetic resonance relaxometry. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(1): 61-69.
- [ 19 ] Meiboom S, Gill D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times. Review of Scientific Instruments, 1958, 29(8): 688-691.
- [ 20 ] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [ 21 ] 崔莹莹, 吴家龙, 张弛, 周波, 任宗玲, 戴军. 不同生态类型蚯蚓对赤红壤和红壤团聚体分布和稳定性的影响. 华南农业大学学报, 2020, 41(1): 83-90.
- [ 22 ] Wiesmeier M, Steffens M, Mueller C W, Kölbl A, Reszkowska A, Peth S, Horn R, Kögel-Knabner I. Aggregate stability and physical protection of soil organic carbon in semi-arid steppe soils. European Journal of Soil Science, 2012, 63(1): 22-31.
- [ 23 ] An S S, Mentler A, Mayer H, Blum W E H. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. CATENA, 2010, 81(3): 226-233.
- [ 24 ] Jullien M, Raynal J, Kohler, Bildstein O. Physicochemical reactivity in clay-rich materials: tools for safety assessment. Oil & Gas Science and Technology, 2005, 60(1): 107-120.
- [ 25 ] Salles F, Bildstein O, Douillard J M, Jullien M, Raynal J, Van Damme H. On the cation dependence of interlamellar and interparticular water and swelling in smectite clays. Langmuir, 2010, 26(7): 5028-5037.
- [ 26 ] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [ 27 ] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [ 28 ] Spurgeon D J, Keith A M, Schmidt O, Lammertsma D R, Faber J H. Land-use and land-management change: relationships with earthworm and fungi communities and soil structural properties. BMC Ecology, 2013, 13(1): 1-13.
- [ 29 ] Blanchart E, Lavelle P, Braudeau E, Le Bissonnais Y, Valentin C. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(3/4): 431-439.
- [ 30 ] Prebble R E, Currie J A. Soil water measurement by a low-resolution nuclear magnetic resonance technique. Journal of Soil Science, 1970, 21(2): 273-288.
- [ 31 ] Sleutel S, Cnudde V, Masschaele B, Vlassenbroek J, Dierick M, Van Hoorebeke L, Jacobs P, De Neve S. Comparison of different nano- and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. Computers & Geosciences, 2008, 34(8): 931-938.
- [ 32 ] Hinedi Z R, Kabala Z J, Skaggs T H, Borchardt D B, Lee R W K, Chang A C. Probing soil and aquifer material porosity with nuclear magnetic resonance. Water Resources Research, 1993, 29(12): 3861-3866.
- [ 33 ] Matteson A, Tomanic J, Herron M M. NMR relaxation of clay/brine mixtures. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(5): 408-413.
- [ 34 ] Fleury M, Kohler E, Norrant F, Gautier S, M'Hamdi J, Barré L. Characterization and quantification of water in smectites with low-field NMR. The Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117(9): 4551-4560.
- [ 35 ] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S, Fan M S, Yang H F, Lal R, Kuzyakov Y. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 92(1): 21-33.
- [ 36 ] 王晟强, 张喆, 叶绍明. 桂南茶园土壤团聚体酶活性对植茶年限的响应. 生态学报, 2020, 40(18): 6532-6541.