

崔莹莹, 吴家龙, 张池, 等. 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 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(1): 83-90.
CUI Yingying, WU Jialong, ZHANG Chi, et al. Impacts of different ecological types of earthworm on aggregate distribution and stability in typical latosolic red and red soils[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(1): 83-90.

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

崔莹莹¹, 吴家龙², 张池¹, 周波³, 任宗玲¹, 戴军¹

(1 华南农业大学 资源环境学院/农业部耕地保育重点实验室/国土资源部建设用地再开发重点实验室/广东省土地利用与整治重点实验室, 广东 广州 510642; 2 广东省土地开发整治中心, 广东 广州 510635; 3 广东省农业科学院 茶业科学研究所/广东省茶树资源创新利用重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:【目的】综合分析华南地区不同生态类型蚯蚓对土壤团聚体分布、团聚体水稳定性以及土壤团聚体破坏率的影响, 以期对蚯蚓改善土壤结构提供科学依据和理论支持。【方法】采用室内盆栽培养试验, 在华南地区具有代表性的赤红壤和红壤中分别接种生态类型不同的 4 种蚯蚓: 赤子爱胜蚓 *Eisenia fetida*、南美岸蚓 *Pontoscolex corethrurus*、壮伟远盲蚓 *Amyntas robustus* 和参状远盲蚓 *A. aspergillum*, 研究不同生态类型蚯蚓对土壤结构的影响。【结果】与空白对照相比, 南美岸蚓、壮伟远盲蚓和参状远盲蚓的添加均显著增加了 2 种土壤中的大团聚体 ($d>2\ 000\ \mu\text{m}$) 比例 ($P<0.05$), 其中, 赤红壤中其分别提升了 35.20%、44.81%和 37.88%, 红壤中其分别提升了 14.92%、25.31% 和 20.18%; 与空白对照相比, 壮伟远盲蚓的添加均显著降低了赤红壤水稳性大团聚体和水稳性小团聚体 ($250\ \mu\text{m}\leq d\leq 2\ 000\ \mu\text{m}$) 的比例, 却显著提升了赤红壤水稳性微团聚体 ($d<250\ \mu\text{m}$) 的比例 (37.84%, $P<0.05$); 4 种蚯蚓的添加均显著提升了 2 种土壤的团聚体破坏率 ($P<0.05$), 其中添加参状远盲蚓的 2 种土壤的团聚体破坏率均最低。主成分分析结果显示: 在 2 种不同的土壤中, 不同蚯蚓作用后土壤的团聚体分布和稳定性之间存在显著差异 ($P<0.05$)。【结论】华南不同生态类型的蚯蚓对赤红壤和红壤的团聚体分布和稳定性的影响不同; 内栖型蚯蚓 (南美岸蚓和壮伟远盲蚓) 对土壤团聚体的形成和土壤结构的改善效果最好; 深栖型蚯蚓 (参状远盲蚓) 对土壤水稳性团聚体的破坏作用最小。

关键词: 蚯蚓; 土壤结构; 土壤团聚体; 分布; 稳定性; 团聚体破坏率
中图分类号: S151.9; S152.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)01-0083-08

Impacts of different ecological types of earthworm on aggregate distribution and stability in typical latosolic red and red soils

CUI Yingying¹, WU Jialong², ZHANG Chi¹, ZHOU Bo³, REN Zongling¹, DAI Jun¹

(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University/ Key Laboratory of Arable Land Conservation in South China, Ministry of Agriculture P. R. China/ Key Laboratory of the Ministry of Land and Resources for Construction Land Transformation/ Guangdong Province Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China; 2 Land Development and Reclamation Center of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China; 3 Tea Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/ Guangdong Key Laboratory of Tea Plant Resources Innovation and Utilization, Guangzhou 510640, China)

收稿日期: 2019-03-11 网络首发时间: 2019-12-19 14:19:00
网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20191217.1722.004.html>
作者简介: 崔莹莹 (1994—), 女, 硕士研究生, E-mail: 838998458@qq.com; 通信作者: 张池 (1980—), 女, 副研究员, 博士, E-mail: zhangchi121@163.com; 戴军 (1958—), 男, 教授, 博士, E-mail: jundai@scau.edu.cn
基金项目: 国家自然科学基金 (41601227, 41201305); 国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0201301, 2016YFD0201200, 2016YFD0800300)

Abstract: 【Objective】 To comprehensively analyze the effects of different ecological types of earthworm on soil aggregate distribution, water stability of aggregate and percentage of aggregate disruption (PAD) in South China, and provide scientific basis and theoretical support for utilizing earthworms to improve soil structure. 【Method】 The laboratory culture experiment was carried out in this study. *Eisenia fetida*, *Pontoscolex corethrurus*, *Amyntas robustus* and *A. aspergillum* were added in typical latosolic red soil and red soil in South China to study the impacts of different ecological species of earthworm on soil structure. 【Result】 Compared with the blank control, the addition of *P. corethrurus*, *A. robustus* and *A. aspergillum* significantly promoted the formation of large-aggregates ($d > 2\ 000\ \mu\text{m}$) in two soil types ($P < 0.05$). The large-aggregate proportion in latosolic red soil increased respectively by 35.20%, 44.81% and 37.88%, and increased respectively by 14.92%, 25.31% and 20.18% in red soil. *A. robustus* significantly reduced the contents of water stable large-aggregates ($d > 2\ 000\ \mu\text{m}$) and small-aggregates ($250\ \mu\text{m} \leq d \leq 2\ 000\ \mu\text{m}$) in latosolic red soil, but significantly increased the proportion of water stable micro-aggregates ($d < 250\ \mu\text{m}$, $P < 0.05$), which was 37.84% higher than that of the blank control. The addition of four types of earthworms significantly increased PAD values in both two soil types ($P < 0.05$), and the PAD value in adding *A. aspergillum* treatment was the lowest. The results of principal component analysis showed that there were significant differences in the distributions and stabilities of soil aggregates under the action of different earthworms in two different soils ($P < 0.05$). 【Conclusion】 The impacts of different earthworm types in South China on latosolic red soil and red soil aggregate distribution and stability are different. The endogenic earthworm (*P. corethrurus* and *A. robustus*) has the best impact on the improvement of soil structure. The endo-anecic (*A. aspergillum*) had the least destructive impact on water stable soil aggregate.

Key words: earthworm; soil structure; soil aggregate; distribution; stability; percentage of aggregate disruption

土壤退化已成为全球性的环境问题, 其中, 亚热带红壤区的土壤退化问题尤为严重, 并得到了广泛的关注^[1]。华南是我国赤红壤和红壤集中分布的区域, 土壤退化问题严重^[2]。土壤退化能显著降低土壤大团聚体和水稳性团聚体的含量^[3-4], 进而引起土壤孔隙性、保水性和团聚体稳定性下降以及土壤结构变差等问题^[1]。良好的土壤结构取决于土壤团聚体的形成及其稳定性, 已有研究表明, 土壤团聚体的形成与蚯蚓的生命活动密切相关^[5]。

蚯蚓属环节动物门 Annelida 寡毛纲 Oligochaeta 后孔寡毛目 Opisthopora, 是陆地生态系统中生物量最大的土壤动物^[6]。蚯蚓由于自身的生命活动需要不断吞食土壤, 经过分解、转化和聚合形成大量结构良好的土壤团聚体, 像“微型的改土车间”, 且形成土壤良好结构的速度惊人^[5]。由于不同生态类型蚯蚓的取食偏好和生境类型的差异, 所以不同生态类型蚯蚓对土壤性质的影响也可能不同^[7]。表栖类蚯蚓 (Epigeic), 生活和摄食都在土壤表层或枯枝落叶层, 对土壤结构的影响很小, 如赤子爱胜蚓 *Eisenia fetida*; 内栖类蚯蚓 (Endogeic), 生活在半永久性的垂直洞穴中, 以土壤和有机质为主要食物来

源, 对提高土壤排水性和通气性以及改良土壤结构具有重要影响, 如南美岸蚓 *Pontoscolex corethrurus* 和壮伟远盲蚓 *Amyntas robustus*; 深栖类蚯蚓 (Anecic), 即上食下栖型蚯蚓, 主要生活在 10~15 cm 的深层土壤中, 以土壤和少量有机质为主要食物来源, 对土壤深层结构有重要的影响^[8-9], 如参状远盲蚓 *A. aspergillum*。有研究结果表明, 蚯蚓的存在能显著降低土壤微团聚体 (粒径 $d < 250\ \mu\text{m}$) 的比例, 同时提高形成大团聚体 ($d > 2\ 000\ \mu\text{m}$) 和小团聚体 ($250\ \mu\text{m} \leq d \leq 2\ 000\ \mu\text{m}$) 的比例^[10-13]。也有研究发现, 蚯蚓的添加能增加土壤中稳定性团聚体的比例, 进而改善严重退化土壤的团聚体稳定性, 且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^[14]。此外, 也有研究指出蚯蚓作用能显著提升土壤团聚体的水稳性^[15-18]。综上可知, 以往研究大都只关注于某种蚯蚓对土壤结构的影响, 很少涉及到不同蚯蚓对土壤团聚体影响的差异。南美岸蚓、壮伟远盲蚓和参状远盲蚓均是华南常见的优势种蚯蚓, 赤子爱胜蚓是国内外常用的标准蚓, 以上不同生态类型蚯蚓对土壤团聚体的分布和稳定性的影响鲜见报道。

本研究采用室内盆栽试验, 以华南地区代表性的赤红壤和红壤为供试土壤, 分别接种赤子爱胜蚓、南美岸蚓、壮伟远盲蚓和参状远盲蚓, 通过测定土壤团聚体的分布及其水稳定性, 对蚯蚓作用前后 2 种土壤团聚体的分布和水稳定性的变化进行比较和研究, 以期对蚯蚓促进形成良好土壤结构提供科学依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为发育于花岗岩的赤红壤和发育于石灰岩的红壤, 分别采自广东省广州市华南农业大学树木园(赤红壤)和广东省英德市茶叶科学研究所的茶园(红壤)。采样深度 0~20 cm, 自然风干后

过 2 mm 筛, 以便破坏全部的大团聚体, 备用。其基本理化性质见表 1。

供试蚯蚓分别为赤子爱胜蚓、南美岸蚓、壮伟远盲蚓和参状远盲蚓。其基本特征^[19]如下: 赤子爱胜蚓, 表栖型, 体长 35~130 mm, 一般短于 70 mm, 宽 3~5 mm, 体节数 80~110, 其活动主要集中于腐殖质层; 南美岸蚓, 内栖型, 体长 60~120 mm, 宽 4~6 mm, 体节数可达 212, 是中国南岭以南地区唯一的外来蚯蚓^[20]; 壮伟远盲蚓, 内栖型, 体长 85~125 mm, 宽 4~7 mm, 一般活动于 5~15 cm 土层; 参状远盲蚓, 上食下栖型, 体长 115~416 mm, 宽 6~12 mm, 体节数 109~153, 体色背部紫灰, 后部稍浅, 刚毛圈稍白色。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Physicochemical properties of the soil sample

土壤类型 Soil type	pH(H ₂ O)	w/(g·kg ⁻¹)		碳/氮质量比 Carbon/nitrogen mass ratio	w(黏粒 ¹⁾ /% Clay content	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity
		有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen			
赤红壤 Latosolic red soil	4.25	27.00	1.85	14.60	22.00	12.3
红壤 Red soil	6.77	21.30	2.92	7.30	32.10	13.3

1) $d < 2\ 000\ \mu\text{m}$

1.2 试验设计

本试验共设 10 个处理: 赤红壤不接种蚯蚓(LCK), 红壤不接种蚯蚓(RCK), 赤红壤+赤子爱胜蚓(LEf), 红壤+赤子爱胜蚓(REF), 赤红壤+南美岸蚓(LPc), 红壤+南美岸蚓(RPc), 赤红壤+壮伟远盲蚓(LAr), 红壤+壮伟远盲蚓(RAR), 赤红壤+参状远盲蚓(LAa), 红壤+参状远盲蚓(RAa)。每个处理重复 5 次。将过 2 mm 筛的 500 g 土壤自然填充至塑料盆钵(直径×高=10 cm×15 cm)中, 通过称重法维持饱和含水量 40%~60% 培养 7 d。为在较短时间内获得尽可能多的土壤团聚体, 根据前人报道^[21-22], 本试验每盆接种蚯蚓的总生物量为(12±0.05) g。选取长势均一的健康蚯蚓, 依次清肠、洗净、称质量和接种。整个培养时间内维持盆钵土壤饱和含水量(w)为 40%~60%, 不提供任何有机物料, 所有盆钵置于室内阴暗处培养, 室内温度(23±2)℃。培养 40 d 后, 各处理的蚯蚓存活率均达 80% 以上, 将土壤与蚯蚓分离, 同时手工分离土壤团聚体, 风干备用。

1.3 分析与测定方法

用干筛法进行分离和测定各粒级(用粒径 d 表示)土壤团聚体的含量^[23]。将风干后的土壤样品逐一通过孔径为 2.00 和 0.25 mm 的筛组进行干筛处理,

每筛完一个土样后按照大团聚体(粒级 $d > 2\ 000\ \mu\text{m}$)、小团聚体($250\ \mu\text{m} \leq d \leq 2\ 000\ \mu\text{m}$)、微团聚体($d < 250\ \mu\text{m}$)这 3 个粒级分别称质量(精确到 0.01 g), 计算这 3 个粒级干筛团聚体的分布比例(%)。

用湿筛法进行土壤水稳性团聚体的分离和测定^[23-24]。按干筛法求得的 3 个粒级干筛团聚体的分布比例配好 50 g 样品, 倾入 1 000 mL 沉降筒中, 使其逐渐达到饱和水状态, 并将其重复倒转 10 次后, 置于一套孔径为 2.00 和 0.25 mm 的筛组上, 在水中重复提起和下降 10 次, 取出上面 2.00 mm 的筛子, 再将下面 0.25 mm 的筛子如前上下重复 5 次。留在各级筛子上的样品, 用水洗入铝盒中, 倾去上部清液, 烘干, 称质量, 即为各级水稳性团聚体质量, 计算各级水稳性团聚体百分含量。利用湿筛和干筛后 $d > 250\ \mu\text{m}$ 团聚体含量计算土壤团聚体破坏率(Percentage of aggregate disruption, PAD), 其值越大, 说明团聚体的稳定性越差^[25]。计算公式如下:

某级团聚体含量=某级团聚体的干质量/样品干质量×100%, 某级团聚体占比=某级团聚体含量/总团聚体含量×100%, PAD=[干筛土壤团聚体含量($d > 250\ \mu\text{m}$)-湿筛土壤团聚体含量($d > 250\ \mu\text{m}$)]/干筛土

壤团聚体含量 ($d > 250\ \mu\text{m}$)] $\times 100\%$ 。

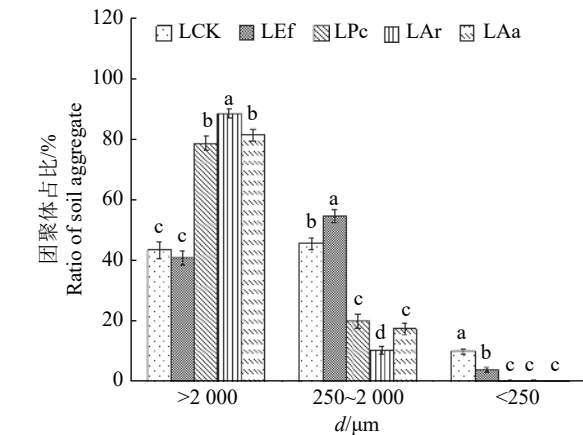
1.4 数据分析与统计

用 Excel 2003 进行数据整理, 用 SPSS 23.0 统计软件对不同处理间的差异采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Duncan's 多重比较进行数据分析, 显著性水平取 $\alpha=0.05$ 。文中数据以平均值 $\pm$ 标准误 (Mean $\pm$ standard error) 表示, $n=5$ 。通过在 R 中导入 ADE-4 软件包, 对华南 4 种不同生态类型蚯蚓影响土壤团聚体分布和稳定性的特征进行主成分分析 (Principal component analysis, PCA)^[26]。

2 结果与分析

2.1 不同生态类型蚯蚓对土壤团聚体分布的影响

2.1.1 不同生态类型蚯蚓对赤红壤团聚体分布的影响 不同生态类型蚯蚓对赤红壤团聚体分布的影响如图 1 所示。由图 1 可以看出, 赤子爱胜蚓的存在略微减少了赤红壤大团聚体 ($d>2\ 000\ \mu\text{m}$) 的比例, 但差异不显著, 而南美岸蚓、壮伟远盲蚓和参状远盲蚓的添加显著促进这一粒级团聚体的形成 ($P<0.05$), 分别比空白对照提高了 35.20%、44.81% 和 37.88%。但在赤红壤小团聚体 ($250\ \mu\text{m}\leq d\leq 2\ 000\ \mu\text{m}$) 的形成中, 赤子爱胜蚓的添加显著促进了这一粒级团聚体的形成 ($P<0.05$), 比空白对照提高了 8.89%。而南美岸蚓、壮伟远盲蚓和参状远盲蚓的存



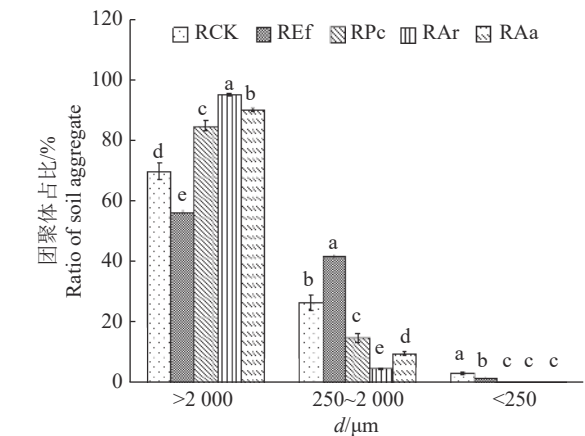
LCK: 赤红壤不接种蚯蚓; LEf: 赤红壤+赤子爱胜蚓; LPc: 赤红壤+南美岸蚓; LAr: 赤红壤+壮伟远盲蚓; LAa: 赤红壤+参状远盲蚓; 图中相同粒级柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

LCK: Latosolic red soil without earthworm; LEf: Latosolic red soil+*E. fetida*; LPc: Latosolic red soil+*P. corethrurus*; LAr: Latosolic red soil+*A. robustus*; LAa: Latosolic red soil+*A. aspergillum*. Different lowercase letters on the bars of the same graded column indicated significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

图 1 不同生态类型蚯蚓处理的赤红壤各粒级 (d) 团聚体的分布情况

Fig. 1 Distributions of latosolic red soil aggregates with different size (d) processed by different ecological types of earthworm

在则显著减少了赤红壤小团聚体的比例, 比空白对照分别降低了 25.57%、35.22% 和 28.06%。对于微团聚体 ($d<250\ \mu\text{m}$) 的形成, 4 种生态类型蚯蚓的存在均显著降低了赤红壤微团聚体的比例 ($P<0.05$)。2.1.2 不同生态类型蚯蚓对红壤团聚体分布的影响 不同生态类型蚯蚓对红壤团聚体分布的影响如图 2 所示。赤子爱胜蚓的存在对红壤 $d>2\ 000\ \mu\text{m}$ 这一粒级团聚体的形成起抑制作用, 但显著增加 $250\sim2\ 000\ \mu\text{m}$ 这一粒级团聚体的比例 ($P<0.05$), 比空白对照提高了 15.15%。而南美岸蚓、壮伟远盲蚓和参状远盲蚓的添加对红壤 $d>2\ 000\ \mu\text{m}$ 这一粒级的团聚体形成起促进作用, 比空白对照分别提高了 14.92%、25.31% 和 20.18%, 对 $250\sim2\ 000\ \mu\text{m}$ 这一粒级的团聚体形成起抑制作用, 与接种赤子爱胜蚓的作用相反。所有蚯蚓的存在均显著降低了红壤微团聚体的含量。



RCK: 红壤不接种蚯蚓; REf: 红壤+赤子爱胜蚓; RPc: 红壤+南美岸蚓; RAr: 红壤+壮伟远盲蚓; RAa: 红壤+参状远盲蚓。图中相同粒级柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

RCK: Red soil without earthworm; REf: Red soil+*E. fetida*; RPc: Red soil+*P. corethrurus*; RAr: Red soil+*A. robustus*; RAa: Red soil+*A. aspergillum*. Different lowercase letters on the bars of the same graded column indicated significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

图 2 不同生态类型蚯蚓处理的红壤各粒级 (d) 团聚体的分布情况

Fig. 2 Distributions of red soil aggregates with different size (d) processed by different ecological types of earthworm

2.2 不同生态类型蚯蚓对土壤团聚体水稳定性的影响

2.2.1 不同生态类型蚯蚓对赤红壤团聚体水稳定性的影响 由图 3 可以看出, 不同生态类型蚯蚓对赤红壤团聚体水稳定性的影响是不同的。赤子爱胜蚓的存在显著降低了赤红壤各个粒级的水稳性团聚体的比例 ($P<0.05$)。接种南美岸蚓显著降低了赤红壤 $d>250\ \mu\text{m}$ 水稳性团聚体的比例 ($P<0.05$), 但对

水稳性微团聚体的形成影响不大。壮伟远盲蚓的存在也显著降低了赤红壤 $d>250\text{ }\mu\text{m}$ 水稳性团聚体的比例, 但显著增加水稳性微团聚体的比例 ($P<0.05$), 比空白对照提高了 37.84%。参状远盲蚓对赤红壤各个粒级的水稳性团聚体的形成均无显著作用。

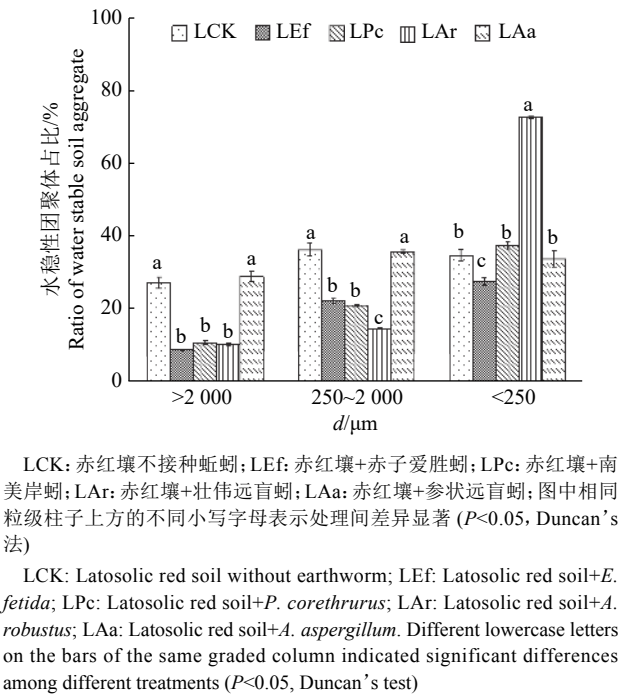


图 3 不同生态类型蚯蚓处理的赤红壤各粒级 (d) 水稳性团聚体分布情况

Fig. 3 Distributions of water stable aggregates with different size (d) in latosolic red soil processed by different ecological types of earthworm

2.2.2 不同生态类型蚯蚓对红壤团聚体水稳定性的影响 不同生态类型蚯蚓对红壤团聚体水稳定性的影响见图 4。赤子爱胜蚓和南美岸蚓的存在显著降低了红壤 $d>250\text{ }\mu\text{m}$ 水稳性团聚体的比例 ($P<0.05$), 但显著增加了水稳性微团聚体的比例 ($P<0.05$), 后者比空白对照提高了 51.85%。壮伟远盲蚓和参状远盲蚓的存在, 显著降低了红壤 $d>2000\text{ }\mu\text{m}$ 水稳性大团聚体的比例, 但是显著增加了水稳性小团聚体和微团聚体的比例 ($P<0.05$)。

2.3 不同生态类型蚯蚓对赤红壤和红壤团聚体破坏率的影响

不同生态类型蚯蚓对赤红壤和红壤团聚体破坏率的影响如图 5 所示。由图 5 可以看出, 各种生态类型蚯蚓的存在均显著提高了对土壤团聚体的破坏率, 其中, 添加赤子爱胜蚓、南美岸蚓和壮伟远盲蚓的赤红壤之间团聚体破坏率无显著差异 ($P<0.05$), 且均显著高于添加参状远盲蚓的赤红壤团聚体破坏率 ($P<0.05$)。添加不同生态类型蚯蚓处

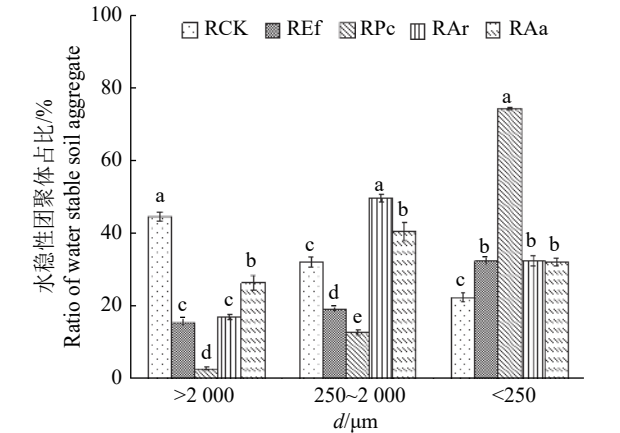


图 4 不同生态类型蚯蚓处理的红壤各粒级 (d) 水稳性团聚体分布情况

Fig. 4 Distributions of water stable aggregates with different size (d) in red soil processed by different ecological types of earthworm

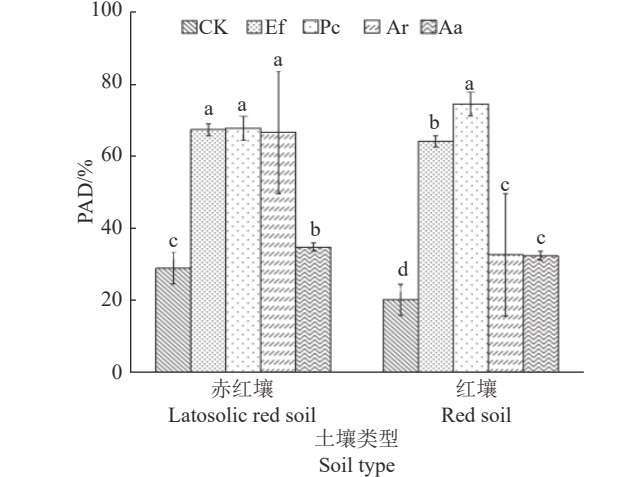


图 5 不同生态类型蚯蚓处理的土壤团聚体破坏率 (PAD)

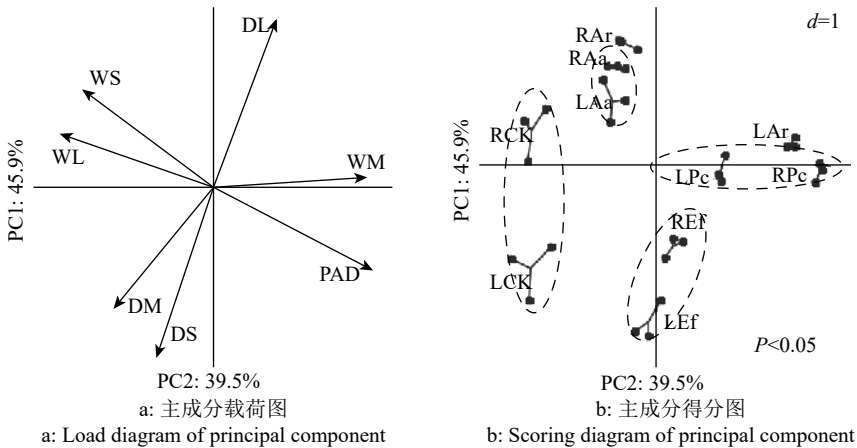
Fig. 5 Percentage of aggregate disruption(PAD) of soil aggregates processed by different ecological types of earthworm

理的红壤团聚体破坏率的排序为: 南美岸蚓>赤子爱胜蚓>壮伟远盲蚓和参状远盲蚓>CK, 且壮伟远盲蚓和参状远盲蚓之间的土壤团聚体破坏率无显著差异。

2.4 不同生态类型蚯蚓与土壤团聚体各指标的主成分分析

不同生态类型蚯蚓处理后土壤团聚体分布及稳定性的主成分分析结果如图 6 所示, 由图 6a 可知, 第 1 主成分 (PC1) 累计方差贡献率为 45.9%, 其主要与土壤水稳性团聚体含量和 PAD 的变化有关; 第 2 主成分 (PC2) 累计方差贡献率为 39.5%, 其主要与土壤团聚体含量的变化有关。第 1、2 主成分累计方差贡献率达到了 85.4%, 可以反映不同生态类型蚯蚓对土壤团聚体分布及稳定性影响的大部分信息, 且受第 1、2 主成分的综合影响, 不同处理样点空间分布差异显著 ($P<0.05$, 图 6b)。不同

生态类型蚯蚓对土壤团聚体的形成差异达到显著水平 ($P<0.05$)。接种蚯蚓处理与空白对照 (LCK、RCK) 的土壤团聚体分布及稳定性均不同; 处理 LEf、REf 明显偏向土壤小团聚体 ($250\text{ }\mu\text{m}\leq d\leq 2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$) 含量较高的方向, 赤子爱胜蚓有利于土壤小团聚体的形成; 处理 LPc、RPc 和 LAr 明显偏向水稳性微团聚体 ($d<250\text{ }\mu\text{m}$) 含量较高的方向, 说明南美岸蚓和壮伟远盲蚓对水稳性微团聚体的形成均具有一定的促进作用; LAa、RAa 均明显偏向水稳性小团聚体 ($250\text{ }\mu\text{m}\leq d\leq 2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$) 含量较高的方向, 参状远盲蚓主要影响水稳性小团聚体的形成数量, 对土壤团聚体破坏率 PAD 的破坏作用最小 (图 6b)。



DL: 大团聚体含量; DS: 小团聚体含量; DM: 微团聚体含量; WL: 水稳性大团聚体含量; WS: 水稳性小团聚体含量; WM: 水稳性微团聚体含量; PAD: 土壤团聚体破坏率; LCK: 赤红壤不接种蚯蚓; LEf: 赤红壤+赤子爱胜蚓; LPc: 赤红壤+南美岸蚓; LAr: 赤红壤+壮伟远盲蚓; LAa: 赤红壤+参状远盲蚓; RCK: 红壤不接种蚯蚓; REf: 红壤+赤子爱胜蚓; RPc: 红壤+南美岸蚓; RAr: 红壤+壮伟远盲蚓; RAa: 红壤+参状远盲蚓

DL: Large-aggregate content; DS: Small-aggregate content; DM: Micro-aggregate content; WL: Water stable large-aggregate content; WS: Water stable small-aggregate content; WM: Water stable micro-aggregate content; PAD: Percentage of aggregate disruption of soil aggregate; LCK: Latosolic red soil without earthworm; LEf: Latosolic red soil+*E. fetida*; LPc: Latosolic red soil+*P. corethrurus*; LAr: Latosolic red soil+*A. robustus*; LAa: Latosolic red soil+*A. aspergillum*; RCK: Red soil without earthworms; REf: Red soil+*E. fetida*; RPc: Red soil+*P. corethrurus*; RAr: Red soil+*A. robustus*; RAa: Red soil+*A. aspergillum*

图 6 不同生态类型蚯蚓对土壤团聚体分布及稳定性影响的主成分分析

Fig. 6 Principal component analyses of the effects of different ecological types of earthworm on the distributions and stabilities of soil aggregates

3 讨论与结论

蚯蚓能消耗和排泄植物、土壤残留物, 并将其并入土壤团聚体中, 促进土壤团聚体的形成和稳定, 对良好土壤结构的形成非常重要^[8]。蚯蚓一方面通过其自身分泌的大量黏液影响土壤团聚体的形成^[27], 另一方面通过影响土壤的理化性质间接影响团聚体的形成^[28]。一般来说, 大型蚯蚓可形成较大的土壤团聚体, 而较小的蚯蚓则可以破坏大团聚体, 并排泄较小的土壤团聚体^[29]。本研究显示, 接种蚯蚓确实显著增加了土壤中团聚体的含量。南美岸蚓、壮伟远盲蚓和参状远盲蚓的接种均显著促进了大团聚体的形成 ($P<0.05$), 而赤子爱胜蚓则显著促进了小团聚体的形成 ($P<0.05$)。在土壤中接种蚯蚓

会使稳定性团聚体含量增加, 能明显改善严重退化土壤团聚体的稳定性^[28]。赵长巍^[14]的试验研究表明, 破碎筛选过的土壤经过蚯蚓活动作用后并没有形成大的水稳性团聚体。同样地, 在含有蚯蚓的土壤中, 稳定的微团聚体在大团聚体中所占的比例也较高^[29]。本研究显示, 蚯蚓在土壤中的垂直活动与水稳性团聚体的形成密切相关。赤子爱胜蚓为表栖型蚯蚓, 主要生活在土壤表层, 对土壤水稳性团聚体的形成影响较小, 而接种内栖型蚯蚓南美岸蚓和壮伟远盲蚓可促进水稳性微团聚体的形成, 接种深栖型蚯蚓参状远盲蚓可促进水稳性小团聚体的形成, 其土壤团聚体破坏率显著小于其他蚯蚓处理的土壤团聚体破坏率。

形成良好的土壤水稳性团聚体的主要影响因素是土壤有机质的含量^[30], 有机质是土壤团聚体中的重要组分之一, 国内外已有大量的研究表明, 有机质更有利于水稳性大团聚体的形成^[31-32]。有机质的胶结作用是红壤水稳定性大团聚体形成的主要影响因素^[33]。黏粒是重要的无机胶结剂, 对黏土的团聚体稳定性影响明显^[34]。本研究显示, 蚯蚓对 2 种土壤的团聚体分布及稳定性的影响存在差异, 这可能是与这 2 种土壤本身的属性 (如土壤 pH、有机质含量和黏粒含量等) 的差异及土壤中其他微生物群落组成的差异密切相关^[35-36], 但还有待进一步研究证明。一般情况下, 蚯蚓处理过的土壤团聚体的稳定性高于没有蚯蚓处理过的土壤, 但是形成时间较长的土壤团聚体通常更加稳定, 而形成时间较短的土壤团聚体则极易分散, 因此蚯蚓处理过的土壤团聚体的稳定性有时也会低于空白处理。团聚体的稳定性在很大程度上取决于结合的强度, 由大型内栖蚯蚓新形成的土壤团聚体, 虽然具有很高的抗机械破坏能力, 但其结构稳定性却很低^[8]。经过多次湿润和干燥循环的土壤团聚体可以在数年内保持完整, 水稳性团聚体的形成非常缓慢, 但可在土壤中保存多年^[37]。本试验培养的时间不长, 在蚯蚓作用之后形成的大多是水稳性微团聚体, 且 PAD 高于空白对照。

本研究得出以下结论: 华南不同生态类型的蚯蚓对赤红壤和红壤的团聚体分布和稳定性的影响不同。内栖型蚯蚓南美岸蚓和壮伟远盲蚓对土壤团聚体的形成和土壤结构的改善效果最好; 深栖型蚯蚓参状远盲蚓对土壤水稳性团聚体的破坏作用最小。蚯蚓是否由于土壤有机质含量或微生物群落的差异而对团聚体的形成及稳定性影响不同, 仍有待进一步研究验证。

参考文献:

[1] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[2] 张凤荣. 土壤地理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 126-130.

[3] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 等. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究 [J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 263-269.

[4] 江仁涛, 李富程, 沈淞涛. 川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 36-42.

[5] 黄福珍. 论蚯蚓对土壤结构形成及性态的影响 [J]. 土壤学报, 1979, 16(3): 211-217.

[6] 张卫信, 陈迪马, 赵灿灿. 蚯蚓在生态系统中的作用 [J].

生物多样性, 2007, 15(2): 142-153.

[7] 王笑, 王帅, 滕明姣, 等. 两种代表性蚯蚓对设施菜地土壤微生物群落结构及理化性质的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5146-5156.

[8] KARACA A. Biology of earthworms[M]. London: Chapman & Hall, 2011: 39-50.

[9] 郝桂玉, 黄民生, 徐亚同. 蚯蚓及其在生态环境保护中的应用 [J]. 环境科学研究, 2004, 17(3): 75-77.

[10] 袁新田, 焦加国, 朱玲, 等. 不同秸秆施用方式下接种蚯蚓对土壤团聚体及其中碳分布的影响 [J]. 土壤, 2011, 43(6): 968-974.

[11] 于建光, 胡锋, 李辉信, 等. 接种蚯蚓对土壤团聚体分布、稳定性及有机碳赋存的影响 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 175-179.

[12] BOSSUYT H, SIX J, HENDRIX P F. Protection of soil carbon by micro-aggregates within earthworm casts[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37(2): 251-258.

[13] SCHRADER S, ZHANG H. Earthworm casting: Stabilization or destabilization of soil structure?[J]. *Soil Biol Biochem*, 1997, 29: 469-475.

[14] 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.

[15] BOSSUYT H, SIX J, HENDRIX P F. Rapid incorporation of carbon from fresh residues into newly formed stable micro-aggregates within earthworm casts[J]. *Eur J Soil Sci*, 2004, 55(2): 393-399.

[16] 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[J]. *Biol Fertil Soil*, 2001, 33(4): 279-285.

[17] WINSOME T, MCCOLL J G. Changes in chemistry and aggregation of a California forest soil worked by the earthworm *Argilophilus papillifer* eisen (megascolecidae) [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30(13): 1677-1687.

[18] SHIPITALO M J, PROTZ R. Chemistry and micro-morphology of aggregation in earthworm casts[J]. *Geoderma*, 1989, 45(3): 357-374.

[19] 徐芹, 肖能文. 中国陆栖蚯蚓[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 281-293.

[20] 黄锦华. 蚯蚓对南亚热带森林根系来源碳转化及土壤生态过程的影响[D]. 广州: 中国科学院华南植物园, 2015.

[21] ZHANG B G, LI G T, SHEN T S, et al. Changes in microbial biomass C, N, and P and enzyme activities in soil incubated with the earthworms *Metaphire guillelmi* or *Eisenia fetida*[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(14): 2055-2062.

[22] ZHANG C, MORA P, DAI J, et al. Earthworm and organic amendment effects on microbial activities and metal availability in a contaminated soil from China[J]. *Appl Soil Ecol*, 2016, 104: 54-66.

[23] 吕贻忠, 李保国. 土壤学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 88-92.

[24] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(14): 2099-2103.

[25] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1491-1494.

[26] THIOULOUSE J, CHESSEL D, DOLEDEC S, et al. ADE-4: A multivariate analysis and graphical display software[J]. *Stat Comput*, 1997(7): 75-83.

[27] SCULLION J, MALIK A. Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(1): 119-126.

[28] SPURGEON D J, KEITH A M, Schmidt O, et al. Land-use and land-management change: Relationships with earthworm and fungi communities and soil structural properties[J]. *BMC Ecol*, 2013, 13(1): 1-13.

[29] BLANCHART E, LAVELLE P, BRAUDEAU E, et al. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of cote d'ivoire[J]. *Soil Biol Biochem*, 1997, 29(3/4): 431-439.

[30] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415-421.

[31] PULLEMAN M M, SIX J, BREEMEN N V, et al. Soil organic matter distribution and micro-aggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity[J]. *Eur J Soil Sci*, 2005, 56(4): 453-467.

[32] MAGID J, KJAERGAARD C, GORISSEN A, et al. Drying and re-wetting of a loamy sand soil did not increase the turnover of native organic matter, but retarded the decomposition of added ¹⁴C-labelled plant material[J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31(4): 595-602.

[33] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响 [J]. *土壤学报*, 1997(4): 359-366.

[34] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望 [J]. *土壤*, 2018, 50(5): 4-16.

[35] 张池, 周波, 吴家龙, 等. 蚯蚓在我国南方土壤修复中的应用 [J]. *生物多样性*, 2018, 26(10): 1091-1102.

[36] 张池, 陈旭飞, 周波, 等. 华南地区壮伟环毛蚓 (*Amyntas robustus*) 和皮质远盲蚓 (*Amyntas corticis*) 对土壤酶活性和微生物学特征的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(13): 2658-2667.

[37] LAVELLE P, SPAIN A V. Soil ecology[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2001: 44-57.

【责任编辑 李晓卉】