

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^①

袁新田^{1,2}, 焦加国¹, 朱玲¹, 刘满强¹, 李辉信¹, 胡锋^{1*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 宿州学院地球科学与工程学院, 安徽宿州 234000)

摘要: 通过室内培养试验, 研究在施用有机物条件下接种蚯蚓对土壤团聚体的分布、团聚体的水稳性以及不同粒径的水稳性团聚体中有机碳含量的影响。干筛结果表明, 不同秸秆施用方式下, 蚯蚓接种能显著促进各个处理中 $>2\text{ mm}$ 团聚体含量的增加, 且在秸秆混施的处理中表现得尤为明显, 团聚体含量增加了2.95倍; 湿筛结果表明, 蚯蚓在不施和混施秸秆的处理中能显著降低土壤黏砂粒含量, 即增加土壤中水稳性团聚体的含量, 但是在表施秸秆的处理中显著降低了 $0.25\sim 0.053\text{ mm}$ 粒级团聚体含量, 使之分散为黏砂粒。蚯蚓和秸秆对土壤团聚体分布和水稳性的影响都达到显著水平。蚯蚓对水稳性微团聚体的影响极显著, 而秸秆的作用更多地表现在水稳性大团聚体上。在秸秆表施和秸秆混施条件下, 接种蚯蚓均显著促进了微团聚体碳含量的增加, 分别为相应对照的2.1和1.2倍。蚯蚓作用能显著降低黏砂粒有机碳在全碳中含量, 增加团聚体有机碳含量, 主要是由于蚯蚓的作用能促进黏砂粒黏结为团聚体。

关键词: 蚯蚓; 秸秆; 团聚体; 有机碳

中图分类号: S154.5

土壤结构关系到土壤中水分的运移和保持、耕作的难易、根系在土壤中的伸展以及土壤的抗蚀性能等。土壤结构好坏常用的表示方式是土壤团聚的稳定性。稳定的团聚体为土壤传输养分水分和空气提供良好的运移通道, 并可以对其内部有机碳的分解起物理性的保护作用。不稳定的团聚体产生更小、可迁移的颗粒在土壤表面形成结壳堵塞土壤孔隙, 加剧土表径流和土壤侵蚀^[1]。

蚯蚓作为极为重要的大型土壤动物之一, 其活动对土壤结构的影响不容忽视。Darwin 早在 1881 年就意识到蚯蚓在改良土壤物理结构方面的积极作用。一方面蚯蚓钻穴能改良土壤水气条件^[2-3]; 另一方面, 由于混合、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的稳定性更高^[4-5]。蚯蚓活动与团聚体的稳定性密切相关, 有研究表明蚯蚓活动对微团聚体的形成有重要作用, 蚓粪中包含大量水稳性 (Wet MWD) 大团聚体和微团聚体, 这些水稳性团聚体的含量被作为蚓粪稳定性的一个重要指标^[1, 6]。高结构稳定性还与蚓粪中高有机碳含量相关。蚯蚓对土壤中有有机物的取食和运移, 有利于有机物质与无机的土壤矿物颗粒充分混合。因此, 由于蚯蚓对土壤碳的保护作用而受到越来越多研究者的重视, 已成为

当前的研究热点之一。但是关于不同有机物施用条件下蚯蚓活动对土壤团聚体及其碳分布的影响却鲜有报道。

本试验结合有机物不同的施用方式 (混施和表施), 研究蚯蚓活动对土壤结构的影响, 包括团聚体分级、水稳性团聚体含量以及土壤有机碳在水稳性团聚体中的分布。研究结果对于进一步阐明蚯蚓的生态功能及寻找最佳的有机物施用方式、选择适宜的土壤生物管理措施有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自江苏省如皋县搬经镇, 是长江冲积物形成的高沙土, 质地砂壤, 有机碳含量 5.86 g/kg , 全 N 含量 0.70 g/kg ; 接种蚓种为在土壤原采样地获得的优势种威廉腔环蚓 (*Metaphire guillelmi*); 施用有机物为玉米秸秆, 有机碳含量 452.13 g/kg , 全 N 含量 7.96 g/kg 。

1.2 试验设计

采集的湿土去除可见的植物残体和砾石后过 2 mm 筛, 风干, 调节土壤湿度至 60% 的田间持水量。静置 48 h 达平衡。称重装钵, 每钵 1 kg 。秸秆风干后

^①基金项目: 南京农业大学青年科技创新基金项目 (KJ09008) 和国家自然科学基金项目 (41171206) 资助。

* 通讯作者 (fenghu@njau.edu.cn)

作者简介: 袁新田 (1963-), 男, 安徽阜阳人, 副教授, 主要从事土壤生态和土壤地理方面的研究。E-mail: yxstuzh@163.com

粉碎过 2 mm 筛, 施用量为 20 g/kg。表施处理将秸秆均匀平铺在盆钵中土壤表面; 混施处理将土壤与秸秆分别称重混匀装钵。选取大小一致的成熟蚓, 蒸馏水中洗净, 在铺有湿润滤纸的周转箱内于黑暗处培养 24 h, 排空其内容物后称重接种到盆钵中, 每钵接种 4 条, 总重量 (7.00 ± 0.05) g。共设立 6 个处理: S: 不施用玉米残茬, 不接种蚯蚓的空白; SE: 接种蚯蚓, 不施用秸秆; SRC: 表施秸秆不接种蚯蚓; SRCE: 表施秸秆并接种蚯蚓; SRM: 混施秸秆不接种蚯蚓; SRME: 混施秸秆并接种蚯蚓。各处理 4 个重复。培养的第 10 周破坏性采样。蚯蚓用水洗净拭干后称重。土样轻轻掰碎过 10 mm 筛, 风干, 测定团聚体分布和水稳性。对湿筛后不同粒级土壤测定团聚体有机碳含

量。

团聚体分布采用干筛法测定, 团聚体稳定性采用 Yoder 湿筛法测定^[7-8], 湿筛法分级得到的团聚体的有机碳测定用重铬酸钾氧化法。数据统计分析采用 SPSS 软件进行。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓和秸秆对土壤团聚体分布的影响

表 1 表明, 各粒径团聚体含量在不同处理中都表现出相似的规律, 即团聚体都主要集中在 >2 mm 的大型大团聚体和 0.25 ~ 0.053 mm 的微团聚体部分, 含量最少的部分是 <0.053 mm 的黏砂粒, 除了 SRM 处理, 差异都达到了显著水平 ($p < 0.05$)。

表 1 不同处理土壤中团聚体分布
Table 1 Distribution of soil aggregates in different treatments

处理	团聚体含量 (g/kg)					回收率 (%)
	>2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm	
S	217.3 ± 23.8 d B	108.7 ± 17.7 b D	151.7 ± 16.1 b C	426.8 ± 12.8 a A	95.6 ± 12.3 a D	99.57
SE	419.9 ± 116.2 c A	108.4 ± 54.5 b B	80.1 ± 35.7 c B	328.1 ± 27.1 b A	63.6 ± 24.0 a B	99.52
SRC	478.6 ± 54.2 bc A	65.8 ± 13.9 b C	54.3 ± 11.4 c C	332.4 ± 27.7 b B	68.8 ± 14.5 a C	99.33
SRCE	570.9 ± 126.1 ab A	73.7 ± 32.0 b C	65.4 ± 32.5 c C	260.4 ± 49.9 c B	29.6 ± 32.7 b C	99.48
SRM	166.6 ± 28.1 d C	179.4 ± 3.9 a C	246.4 ± 18.1 a B	342.4 ± 14.1 b A	65.2 ± 28.4 a D	99.65
SRME	658.3 ± 36.0 a A	87.7 ± 27.6 b C	52.6 ± 15.7 c D	194.4 ± 8.4 d B	7.0 ± 1.8 b E	99.01

注: 表中同一列小写字母不同表示同一粒径团聚体含量在不同处理中差异显著 ($p < 0.05$, 邓肯法), 同一行大写字母不同表明同一处理中各粒级团聚体含量差异显著 ($p < 0.05$, 邓肯法), 下表同。

蚯蚓的作用显著促进 >2 mm 粒级的大团聚体含量的增加, 秸秆表施也促进 >2 mm 粒级团聚体含量的增加, 但秸秆混施却降低了 >2 mm 粒级团聚体含量。对于 2 ~ 1 mm 和 1 ~ 0.25 mm 的大团聚体, 蚯蚓在不施秸秆和混施秸秆的处理中显著降低此粒级团聚体含量, 但在表施秸秆处理中有所增加。而对于 0.25 ~ 0.053 mm 的微团聚体和 <0.053 mm 的黏砂粒, 蚯蚓活动和秸秆施用都显著抑制了此粒级含量的增加。

为了比较干筛得到的不同粒级团聚体的稳定性, 进行平均当量直径 (mean weight diameter, MWD) 和标准化平均当量直径 (normalized mean weight diameter, NMWD) 的转化, 其值越低表示团聚体的稳定性越小^[9]。

由图 1 看出, 除混施秸秆处理外, 其他所有处理的土壤团聚体稳定性都显著增加。很多研究都表明长期施用有机物能改善土壤的结构^[10-11], 在混施秸秆的处理中, 虽然微生物繁殖迅速, 土壤活性碳含量也很高 (数据未列出), 但此处理的土壤结构是

本试验中所有处理中最差的, 主要原因可能是培养时间短, 秸秆对土壤结构的影响还没有表现出来, 反而混施秸秆后土壤变得疏松, 难以形成较好的结构。

接种蚯蚓也能显著促进团聚体稳定性的增加, 与不接种蚯蚓的相应对照 (S, SRC 和 SRM) 相比, 团聚体稳定性分别提高 70.55% (SE), 18.69% (SRCE) 和 180% (SRME)。蚯蚓对 >2 mm 团聚体含量的促进作用主要是由于蚯蚓排泄的蚓粪^[12-13], 相比原土的团聚体, 蚓粪富集了黏粒、有机质和高价阳离子。Shipitalo 和 Protz^[14]认为在通过蚯蚓肠道的时候微团聚体形成一个有机质的核心, 这些有机无机复合体被作为蚓粪排泄出来, 由于受到挤压, 水分损失, 有机和无机组份之间的联系加强, 从而提高其稳定性。所以在没有有机物施用的情况下, 蚯蚓对土壤的取食在很大程度上提高了全土的稳定性 (SE 处理)。比较不同秸秆施用方式下蚯蚓作用的差异, 发现混施秸秆处理中蚯蚓作用最为显著, 尽管在 SRCE 处理中蚯蚓的活性和生

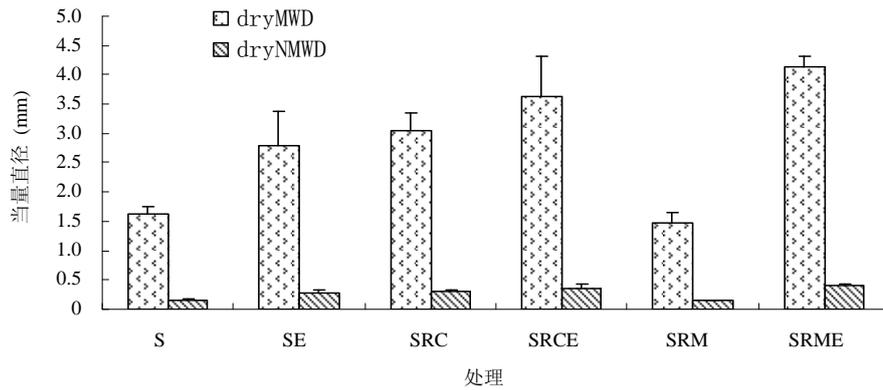


图 1 不同处理土壤团聚体稳定性

Fig. 1 MWD and NMWD of soil aggregates in different treatments

物量都最高，可能是由于在 SRME 处理中，土壤微生物活动对土壤稳定性有促进作用，相关性分析表明 dryWMD 以及干筛后 >2 mm 的团聚体含量和土壤中细菌数分别有着 0.586** 和 0.559* 的显著相关性。同时，接种蚯蚓后与 SRM 处理相比土壤大团聚体的显著增加也说明蚯蚓肠道挤压和掺混土壤与有机质对土壤稳定性提高的重要作用。

2.2 蚯蚓和秸秆对土壤团聚体水稳定性的影响

湿筛的结果表明（表 2），虽然在培养土壤中存在大量的大团聚体，但是水稳定性的大团聚体含量很低，水稳性的团聚体更多的是在 0.25 ~ 0.053 mm 范围内。但 Winsome 和 Mccoll^[15]观察到蚓粪中的团聚体几乎（90%）都是水稳性的。这可能是由于试验时间短，蚓粪在全土中的比例少，其对土壤稳定性的贡献被非蚓粪土壤所掩盖，另一方面可能是蚓粪团聚体结构的稳定性只有在蚯蚓经历老化和干燥过程后才明显提高^[14,16]。

表 2 不同处理土壤中水稳性团聚体分布

Table 2 Distribution of water-stable aggregates in different treatments

处理	团聚体含量 (g/kg)			回收率 (%)
	>0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	<0.053 mm	
S	1.5 ± 0.6 d	305.2 ± 74.7 e	693.3 ± 74.1 a	95.52
SE	2.6 ± 0.4 cd	787.8 ± 25.5 a	209.6 ± 25.5 e	97.13
SRC	4.5 ± 1.3 cd	669.2 ± 39.0 bc	326.3 ± 40.2 cd	97.19
SRCE	8.2 ± 5.3 bc	598.8 ± 38.4 c	393.0 ± 35.2 bc	95.82
SRM	31.7 ± 7.7 a	498.8 ± 42.4 d	469.4 ± 49.6 b	93.48
SRME	11.1 ± 0.8 b	732.5 ± 85.9 ab	256.4 ± 85.9 de	96.11

蚯蚓的作用显著促使土壤中 0.25 ~ 0.053 mm 粒级团聚体含量的增加。很多研究表明通过蚯蚓肠道后土壤原来的微结构被破坏，取而代之的是蚓粪中的微团聚体^[17-19]。除表施秸秆的处理外，接种蚯蚓后与未接种的对照（S，SRM）相比，微团聚体含量分别增加 1.6（SE）和 0.5（SRME）倍，黏砂粒含量降低 69.8% 和 45.4%。与 SRC 处理相比，SRCE 处理中微团聚体含量是其 89.5%，黏砂粒含量是其 1.2 倍。

利用湿筛和干筛后 >0.25 mm 团聚体含量的值计算团聚体结构破坏率（PAD），其值越大，说明团聚体的稳定性越差^[10]。通过分析 MWD 和 PAD 值发现（图 2），SRM 处理两个指标都显著高于其他处理， >0.25 mm 粒级团聚体含量也非常高，这是由于在秸秆混施处理中，在测定前预处理时很难在不破坏土壤结构的

同时将土壤中残留未分解的秸秆去除干净，在湿筛时， >0.25 mm 粒级的团聚体有一部分是与土壤集结的半分解状态的有机物。但是比较 SE 和 S 处理，还是可以很明显地看出蚯蚓活动对土壤团聚体结构稳定性的显著促进作用。而秸秆的施用也显著提高团聚体水稳性。

2.3 蚯蚓和秸秆对土壤团聚体碳分布的影响

研究结果发现（图 3），S 和 SRME 处理的微团聚体（0.25 ~ 0.053 mm）的有机碳含量和黏砂粒的（ <0.053 mm）相当，除此以外，在 SE，SRC 和 SRME 处理中黏砂粒有机碳含量要显著高于微团聚体，如很多研究报道一样，土壤黏粒部分有机碳含量最高^[20-21]。且在不同的处理中不同粒级团聚体中碳的存在形式有差异^[22-23]。

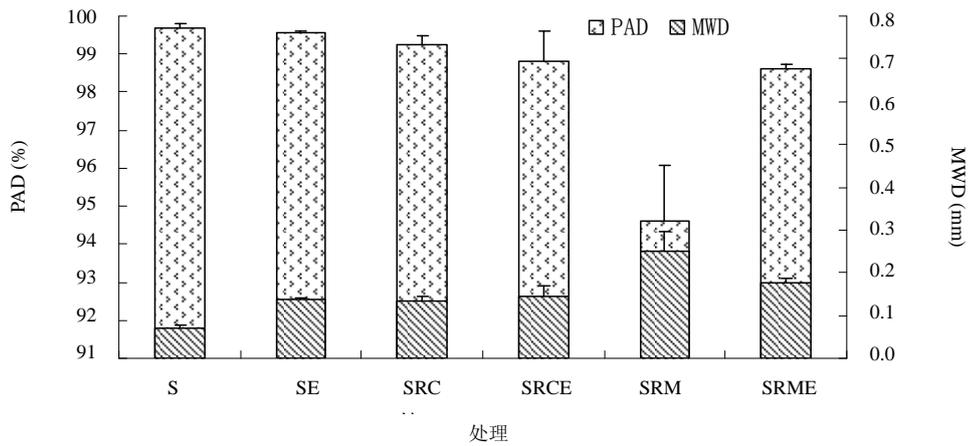


图 2 不同处理土壤团聚体水稳性

Fig. 2 MWD and PAD of water-stable aggregates in different treatments

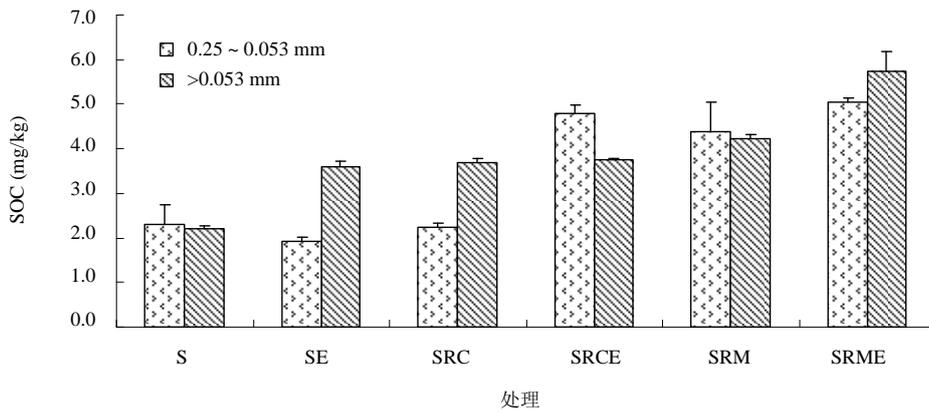


图 3 不同处理的土壤水稳性团聚体有机碳含量

Fig. 3 Contents of organic carbon in water-stable aggregates in different treatments

接种蚯蚓后，微团聚体碳含量在有秸秆施用的情况下显著增加，SRCE 和 SRME 处理分别是相应对照（SRC 和 SRM）的 2.1 和 1.2 倍。Bossuyt^[6]研究表明，蚓粪中的微团聚体对土壤碳有保护作用。接种蚯蚓后，黏砂粒的有机碳含量也有增加，并且除表施秸秆的处理外都达到极显著水平。秸秆的施用显著促进了微团聚体和黏砂粒这两个粒级的土壤有机碳含量的增加，且以秸秆混施的最为明显。

计算团聚体中碳含量在全土总碳含量的比例以消除由于秸秆未挑干净等外在因素造成的测定误差，并可以得知各粒级团聚体中碳含量对土壤总碳的贡献（图 4）。研究表明，除空白 S 处理外，其他各处理土壤碳均以团聚体碳为主，达到总碳含量的

50% 以上。蚯蚓的作用能显著促进微团聚体碳在土壤中碳中的比例，一方面是通过促进微团聚体数量的增加，另一方面是提高微团聚体中的碳含量。在 SE 处理中蚯蚓作用最显著，土壤碳中微团聚体碳比重提高了一倍。在秸秆施用的处理中，秸秆施用处理本身也显著提高了微团聚体碳的含量，这可能会对蚯蚓的作用有一定的掩盖，但是与对照（SRC，SRM）相比，微团聚体碳含量的比重分别增加了 16.3% 和 32.7%。蚯蚓作用后，土壤黏砂粒中碳含量都有增加，但是土壤黏砂粒碳所占比重下降，在不施、表施和混施秸秆的处理中降幅分别高达 46.4%，23.7% 和 43.7%，这也说明蚯蚓活动促进土壤的黏砂粒向微团聚体的转变。

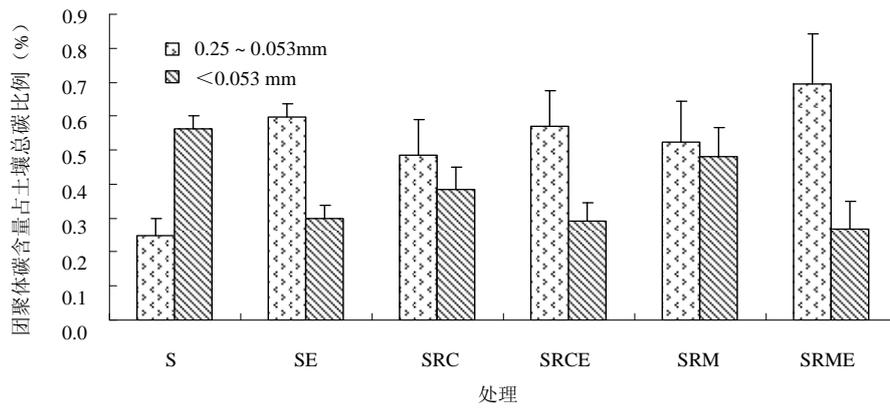


图 4 不同处理的土壤水稳性团聚体有机碳含量在土壤总有机碳中的比例

Fig. 4 Ratios between organic carbon in water-stable aggregates and SOC in different treatments

2.4 蚯蚓和秸秆对土壤团聚体分布、团聚体水稳定性和团聚体碳分布影响的方差分析

通过方差分析得出，蚯蚓和秸秆对土壤团聚体分布、土壤团聚体水稳性均有显著影响（表 3）。其中蚯蚓对 >2 mm, 1 ~ 0.25 mm, 0.25 ~ 0.053 mm 和 MWD 的方差解释比例 (v) 分别达到 83.0%, 72.2%, 73.0% 和 83.1%；对水稳性微团聚体含量影响极显著，方差

解释比例达到 94%；蚯蚓对土壤碳在不同粒径颗粒中的分布有显著影响，特别是对于黏砂粒中有机碳含量的方差解释比例达到 40.4%，对黏砂粒中有机碳占土壤全碳比变化的贡献更是达到 93.1%。秸秆的作用更多地表现在大团聚体上，团聚体的水稳性主要还是受到秸秆的影响，因为在大团聚体和 MWD 之间存在着高达 0.931** 的极显著相关（表 4）。

表 3 土壤团聚体分布测定项目的方差分析结果

Table 3 A three-way ANOVA showing effects of earthworm and residues on results of dry sieving

变异来源	df	干筛								湿筛					
		>2 mm		2 ~ 1 mm		1 ~ 0.25 mm		0.25 ~ 0.053 mm		>0.25 mm		0.25 ~ 0.053 mm		<0.053 mm	
		M.S.	Sig.	M.S.	Sig.	M.S.	Sig.	M.S.	Sig.	M.S.	Sig.	M.S.	Sig.	M.S.	Sig.
蚯蚓 (E)	1	4 125	***	47	*	431	***	677	***	2	**	2 781	***	2 646	***
秸秆 (R)	2	852	***	83	**	164	**	257	***	8	***	170	*	217	**
E×R	2	851	***	61	***	213	***	30	***	3	***	1 534	***	1 515	***
Error	18	58		9		5		7		0.1		31		31	

注：M.S.代表 Means squares；***、**、* 分别代表达到 p<0.001、p<0.01 和 p<0.05 显著水平。

表 4 土壤结构稳定性指标之间的相关性

Table 4 Correlations between MWD, PAD and contents of soil aggregates and water-stable aggregates

因子	wet MWD	dry MWD	PAD
湿筛	>0.25 mm	0.931**	-0.994**
	0.25 ~ 0.053 mm	0.260	0.663**
	<0.053 mm	-0.322	-0.645**
干筛	>2 mm	-0.117	0.999**
	2 ~ 1 mm	0.506*	-0.730**
	1 ~ 0.25 mm	0.431*	-0.869**
	0.25 ~ 0.053 mm	-0.327	-0.851**
	<0.053 mm	-0.217	-0.804**
dry MWD	-0.080	1	0.417*
PAD	-0.908**	0.417*	1

注：**、* 分别代表达到 p<0.01 和 p<0.05 显著水平，下表同。

通过以上的分析表明，秸秆施用方式和蚯蚓活动两者之间存在着强烈的交互作用，共同影响土壤团聚体及其碳的分布。在不同的秸秆施用方式中，蚯蚓活动对试验结果的影响不一致，在不施、表施和混施秸秆下，与不接种蚯蚓的相应对照 (S, SRC 和 SRM) 相比，蚯蚓作用使得团聚体稳定性分别提高 70.5%，18.7% 和 180.0%。

2.5 不同土壤结构稳定性指标之间的相关性

对所测定的土壤结构稳定性指标之间相关性进行研究发现，水稳性团聚体的稳定性主要与 >0.25 mm 的水稳性团聚体含量相关，而土壤干筛后得到的 >2 mm 的团聚体含量是决定土壤结构稳定性的最主要因素。土壤的结构破坏率与水稳性团聚体含量之间存在显著负相关，但与土壤结构稳定性 (dry MWD) 之间有一定的正相关作用。

表5 土壤水稳性团聚体稳定性与团聚体有机碳之间的相关性

Table 5 Correlations among number of the wet MWD, PAD and the organic carbon in water-stable aggregates

因子	SOC (0.25 ~ 0.053 mm)	SOC (<0.053 mm)	SOC% (0.25 ~ 0.053 mm)	SOC% (<0.053 mm)
湿筛 0.25 ~ 0.053 mm	0.042	0.610**	0.781**	-0.847**
湿筛 <0.053 mm	-0.076	-0.639**	-0.797**	0.843**
wet MWD	0.518**	0.618**	0.477*	-0.183
PAD	-0.428*	-0.314	-0.125	-0.179
总 SOC	0.870**	0.653**	0.297	-0.480*
SOC (<0.053 mm)	0.669**	1	0.760**	-0.563**
SOC% (0.25 ~ 0.053 mm)	0.484*	0.760**	1	-0.618**
SOC% (<0.053 mm)	-0.263	-0.563**	-0.618**	1

注: SOC (<0.053 mm) 表示的是<0.053 mm 的 SOC 含量, SOC% (<0.053 mm) 表示的是<0.053 mm 的 SOC 占总 SOC 的百分数, 其他粒级同。

3 结论

研究结果表明接种蚯蚓能显著增加各处理中 >2 mm 团聚体的含量, 且以混施秸秆的处理最为突出。蚯蚓在不施和混施秸秆的处理中能显著增加土壤中水稳性团聚体的含量, 但是在表施秸秆的处理中蚯蚓作用明显降低了 0.25 ~ 0.053 mm 粒级的水稳性团聚体含量, 使之分散为黏砂粒。土壤团聚体水稳性主要受到水稳性大团聚体含量的影响。接种蚯蚓能显著降低黏砂粒有机碳含量在整个土壤有机碳含量中的比例, 而相应增加团聚体有机碳含量, 主要是由于蚯蚓的作用能促进黏砂粒黏结为团聚体。除 SRCM 处理外, <0.053 mm 土壤中碳含量都要高于水稳性团聚体中碳含量。表施秸秆也能促进土壤大团聚体含量的增加, 但是混施秸秆的处理中土壤 >2 mm 大团聚体含量极显著降低, 而主要是以 1 ~ 0.25 mm 团聚体存在。

参考文献:

- [1] Bossuyt H, Six J, Hendrix PF. Rapid incorporation of fresh residue-derived carbon into newly formed microaggregates within earthworm casts. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55: 393-399
- [2] 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): 175-180
- [3] Ehlers W. Observations on earthworm burrows and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, 1975, 119: 242-249
- [4] Parle JN. A microbiological study of earthworm casts. *Journal of General Microbiology*, 1963, 31: 1-11
- [5] Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 1982, 33: 141-163
- [6] Bossuyt H, Six J, Hendrix PF. Interactive effects of functionally different earthworm species on aggregation and incorporation and decomposition of newly added residue carbon. *Geoderma*, 2006, 130: 14-25
- [7] Cerda A. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena*, 1998, 32: 73-86
- [8] Barral MT, Arias M, Guerif J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil & Tillage Res.*, 1998, 46: 261-272
- [9] 郑晓萍, 卢升高. 富铁土团聚体稳定性的表征及其物理学机制. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2005, 31(3): 305-310
- [10] 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. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1491-1494
- [11] 苗淑杰, 周连仁, 乔云发, 曲均峰, 徐文越. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响. *土壤学报*, 2009, 46(6): 1068-1075
- [12] Scullion J, Malik A. Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soil restored after opencast mining for coal. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32: 119-126
- [13] Marinissen JYC. Earthworms and stability of soil structure: A study in a silt loam soil in a young Dutch polder. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1994, 51: 75-87
- [14] Shipitalo MJ, Protz R. Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts. *Geoderma*, 1989, 45: 357-374
- [15] Winsome T, Mccoll JG. Changes in chemistry and aggregation of a California forest soil worked by the earthworm *Argilophilus papillifer* Eisen (Megascolecidae). *Soil Biol. Biochem.*, 1998, 30(13): 1677-1687
- [16] Hindell RP, McKenzie BM, Tisdall JM. Influence of drying and ageing on the stabilization of earthworm (Lumbricidae) casts. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 25: 27-35
- [17] Shipitalo MJ, Protz R. Factors influencing the dispersibility of

- clay in worm casts. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52: 764-769
- [18] Barois I, Villemin G, Lavelle P. Transformation of the soil structure through *Pontoscolex corethrurus* (Oligochaeta) intestinal tract. *Geoderma*, 1993, 56: 57-66
- [19] Jongmans AG, Pulleman MM, Marinissen JCY. Soil structure and earthworm activity in a marine silt loam under pasture versus arable land. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 33: 279-285
- [20] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响. *生态学报*, 2004, 24: 2961-2966
- [21] Schulten HR, Leinweber P, Sorge C. Composition of organic matter in particle-size fractions of an agriculture soil. *Journal of Soil Science*, 1993, 44: 667-691
- [22] Tarchitzky J, Hatcher PG, Chen Y. Properties and distribution of humic substances and inorganic structure-stabilizing components in particle-size fractions of cultivated Mediterranean soils. *Soil Science*, 1989, 165(4): 328-342
- [23] 魏朝富, 陈世正, 谢德体. 长期施用有机肥料对紫色水稻土有机无机复合性状的的影响. *土壤学报*, 1995, 32: 159-166

Effects of Earthworm Activity on Soil Aggregates' Stability and Organic Carbon Distribution Under Different Manipulations of Corn Straw

YUAN Xin-tian^{1,2}, JIAO Jia-guo¹, ZHU Ling¹, LIU Man-qiang¹, LI Hui-xin¹, HU Feng¹

(1 *College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;*

2 School of Earth Science and Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000, China)

Abstract: This short-term laboratory experiment conducted to determine the effects of earthworm activity under residues using on the distribution and water stable ability of soil aggregates and the distribution of soil organic carbon in water stable aggregates with different diameter. The results showed that earthworm inoculation significantly increased the content of large-macro aggregates in all the treatments ($p < 0.05$), while decreased the content of other aggregates with no significant differences, which implied that earthworms transformed clay and micro-aggregates into macro aggregates (by dry sieving), especially in SRME treatment. Earthworm inoculation also increased the content of soil water-stable aggregates when no residues used or the residue mixed (by wet sieving), and the result was opposite when residue covered and in SRCE treatment, the content of water-stable aggregates (0.25 - 0.053 mm) was seriously decreased by the earthworm inoculation. The content of total organic carbon in clays was higher than that in water-stable aggregates except in SRCE treatment, and earthworm inoculation could decrease the percentage of clay carbon and increase the percentage of aggregate carbon. Earthworm inoculation and residues application could significantly affect the distribution and water stable ability of soil aggregates. Earthworm inoculation mainly affected water stable micro-aggregates, while the residues application mainly affected macro-aggregates, and there were significant correlation between the water stable aggregates and MWD, so it can be concluded that the residues application was the main factors affecting water stable aggregates. Further, earthworm inoculation significantly affected the distributions of soil organic carbon in soil aggregates with different diameters.

Key words: Earthworms, Residues, Aggregate, Organic carbon