

秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响*

于建光 李辉信 陈小云 胡 锋**

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要 在连续6年稻麦轮作的小区试验中,研究了施用秸秆(表施或混施)和接种蚯蚓对农田土壤有机碳(SOC)和不同活性有机碳的影响.结果表明:施用秸秆6年后,土壤有机碳含量显著增加,且表施秸秆比混施秸秆更有利于土壤有机碳含量增加,在不同的秸秆施用条件下,接种蚯蚓未对土壤有机碳含量产生显著影响.表施秸秆和混施秸秆均能使土壤活性有机碳含量增加或显著增加,混施秸秆较表施秸秆更有利于热水提取态碳(HWEC)、可矿化碳(PMC)、酸提取态碳(AEC)、易氧化态碳(ROC)、颗粒有机碳(POC)和轻组有机碳(LFOC)含量增加,而可溶性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC)的变化与秸秆施用方式关系不大.在施用秸秆条件下,接种蚯蚓使不同活性有机碳的响应各异,不同处理中的土壤有机碳活性表现为秸秆混施+蚯蚓>秸秆混施>秸秆表施>秸秆表施+蚯蚓>对照.秸秆的施用方式是影响土壤有机碳与活性有机碳的主要因素,而蚯蚓活动则并非对所有的土壤活性有机碳有显著影响.

关键词 秸秆 蚯蚓 土壤有机碳

文章编号 1001-9332(2007)04-0818-07 中图分类号 S154.1 文献标识码 A

Effects of straw application and earthworm inoculation on soil labile organic carbon. YU Jian-guang, LI Hui-xin, CHEN Xiao-yun, HU Feng (College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(4): 818-824.

Abstract: A six-year field plot experiment of rice-wheat rotation was conducted to study the effects of straw application and earthworm inoculation on cropland soil organic carbon and labile organic carbon. Five treatments were installed, *i. e.*, CK, straw mulch (M), straw mulch plus earthworm inoculation (ME), incorporated straw with soil (I), and incorporated straw with soil plus earthworm inoculation (IE). The results showed that soil organic carbon content increased significantly after six years straw application, and treatment I was more efficient than treatment M. Earthworm inoculation under straw application had no significant effects on soil organic carbon content. Straw application, whether straw mulch or incorporated straw with soil, increased the content of soil labile organic carbon, and incorporated straw with soil was more beneficial to the increase of the contents of hot water-extractable carbon, potentially mineralizable carbon, acid-extractable carbon, readily oxidizable carbon, particulate organic carbon, and light fraction organic carbon. There was a little relationship between the quantitative variations of soil dissoluble organic carbon and microbial biomass carbon and the patterns of straw application. Among the treatments, the activity of soil organic carbon was decreased in the order of IE > I > M > ME > CK. Straw application pattern was the main factor affecting soil organic carbon and labile organic carbon, while earthworm inoculation was not universally significantly effective to all kinds of soil labile organic carbon.

Key words: straw; earthworm; soil organic carbon.

* 国家自然科学基金资助项目(30370286).

** 通讯作者. E-mail: fhjwc@njau.edu.cn

2006-03-11 收稿, 2007-01-18 接受.

1 引言

土壤有机质在支持土壤生物群落多样性、保持土壤养分供应水平、改善土壤结构和持水性能等方面起主导作用。在全球大气 CO₂ 浓度不断升高情况下, 土壤有机碳库的碳汇作用备受关注。保持和提高土壤有机质水平、改善土壤有机质质量是实现农业生态系统长期发展及改善其生态服务功能的重要措施之一。土壤有机质作为土壤生物活动的基本能量来源, 也是维持土壤生物活性及群落功能多样性的基础。秸秆作为农业生产中的重要副产品, 有数量大、可利用性强的特点。秸秆还田既可解决秸秆的去路, 又可以降低生产成本, 增加土壤有机碳储量, 所以应大力推广。不同的秸秆还田方式所产生的效果必然不同。

在温带、热带和亚热带陆地生态系统中, 蚯蚓是最为重要的大型土壤动物, 一直受到生态学家和土壤学家的关注, 常被称为“土壤生态系统工程师”。在秸秆还田时辅以蚯蚓处理, 可加快秸秆向土壤有机碳转化。土壤活性有机碳作为土壤有机碳的活性部分, 对外界条件变化的反映更敏感, 常用于反映土壤有机碳的早期变化。表征土壤活性有机碳的指标很多。土壤活性有机碳提取方法主要有: 1) 化学法, 如酸水解、用高锰酸盐消煮提取、用热水提取; 2) 物理法, 如用重液分开轻重组、用大小筛分得颗粒有机质; 3) 生物法, 如测定土壤有机碳矿化量或测定微生物生物量^[22]。

蚯蚓对土壤有机碳的作用与影响受植被、气候、土壤质地、肥力水平、蚯蚓类型等因素的制约。尽管蚯蚓对土壤有机碳及活性有机碳的影响研究已有较多报道^[3, 6, 9, 13, 23-25], 但在秸秆施用条件下接种蚯蚓对土壤多种不同活性有机碳的影响研究还未见报道。本研究探讨了秸秆不同施用方式及接种蚯蚓对土壤有机碳和不同活性有机碳的影响, 以期为施用秸秆条件下的土壤有机碳库管理提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 供试材料

试验布置于南京农业大学校内网室, 小区为由混凝土砌成的 2.8 m × 1.0 m × 0.6 m 池子(无底), 在池内填入 50 cm 厚的土层, 供试土壤为高砂土, 填土前用孔径为 4 mm 筛子筛分, 并结合手拣分离出土壤中的蚯蚓。试验从 1999 年开始, 共设 5 种处理: 对照(CK)、秸秆表施(M)、秸秆表施 + 蚯蚓(ME)、

秸秆混施(IE)、秸秆混施 + 蚯蚓(IE), 每处理 3 个重复; 种植制度为稻麦轮作, 其中水稻为旱作, 全生育期不建立水层。稻季氮、磷和钾肥用量分别为 21.0 g · m⁻²(N)、10.5 g · m⁻²(P)和 10.5 g · m⁻²(K), 肥料品种为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 其中氮肥的 70% 作为基肥、30% 作穗肥, 磷、钾肥全部作基肥; 麦季氮、磷和钾肥用量分别为 22.5、12.0 和 12.0 g · m⁻², 其中氮肥的 60% 作为基肥, 分蘖肥和穗肥各占 20%, 磷、钾肥全作基肥。玉米秸秆(粉碎至 2 cm 左右)的施用量第 1 季为 1 500 g · m⁻², 以后各季均为 750 g · m⁻²。

试验所用蚯蚓为威廉腔环蚓(*Metaphire guillelmi*), 分类上属于 Anecic, 介于表居型(epigeics)和土居型(endogeics)之间, 生态对策上介于 r 对策与 k 对策之间^[19]; 蚯蚓种群在每季作物种植前, 结合上季作物收获时田间操作进行调查与控制, 接种蚯蚓小区保持在种植前蚯蚓生物量达 60 ~ 80 g · m⁻², 与试验土壤采集地蚯蚓自然密度相近, 不接种小区中, 蚯蚓于每季作物收获时手捡去除。

2005 年 6 月份小麦收获后, 采集各处理小区 0 ~ 20 cm 土层土样, 部分鲜样保存于 4 °C 冰箱, 其余土样风干备用。

2.2 测定方法

用 K₂Cr₂O₇ 氧化法^[26]测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC); 用半微量凯氏定氮法^[26]测定全氮(TN)。用氯仿熏蒸 K₂SO₄ 浸提法^[28, 31]测定微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC), 转换系数取 0.38。采集鲜土样, 加水使水土比 = 4:1, 振荡 2 h, 4 000 r · min⁻¹离心 5 min, 过 0.45 μm 滤膜, 然后用重铬酸钾氧化法测定可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)。潜在可矿化碳(potential mineralizable carbon, PMC)测定: 采集鲜土样, 连续培养 28 d, 用碱液吸收 CO₂, 用酸滴定吸收液。热水提取态碳(hot water extractable carbon, HWEC): 称取 < 2 mm 的风干土 4 g, 加入 20 ml 蒸馏水, 在 80 °C 水浴振荡器中振荡 16 h, 在 10 000 r · min⁻¹离心悬浮液, 收集上清液, 然后测定其有机碳含量^[10]。酸提取态碳(acid extractable carbon, AEC)测定: 称取 < 2 mm 的风干土 2 g, 加入 20 ml 的 1.5 mol · L⁻¹硫酸, 密封离心管, 放置 20 h, 在 4 000 r · min⁻¹离心 5 min, 测定上清液有机碳含量^[10]。颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)用 Cambardella 和 Elliott 方法^[8]测定: 取 10 g 过 2 mm 筛的风干土, 加 30 ml 六偏磷酸钠(5 g · L⁻¹), 振荡 12 h, 用蒸馏水使其过 53 μm

筛,收集筛上物,50 °C 烘干,测定其颗粒有机碳颗粒.高锰酸钾易氧化有机碳(readily oxidation carbon, ROC)测定^[2,21]:称取过 500 μm 土壤筛的含碳 15 mg 的风干土,加入 25 ml 333 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ KMnO_4 ,震荡 1 h,4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min,吸取上清液,稀释 250 倍,稀释液在 565 nm 波长处进行比色,同时配制标准系列浓度的 KMnO_4 溶液,也在 565 nm 处比色,根据标准曲线求得 KMnO_4 浓度,进而计算 KMnO_4 消耗量.轻组有机碳(light fraction organic carbon, LFOC)的测定^[33,35]:将过 2 mm 筛土样用 1.80 $\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$ NaI 振荡 1 h,离心,上清液过 0.45 μm 滤膜,滤纸上的轻组用 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 和蒸馏水清洗,轻组部分用水转入已称量的小玻璃杯,离心管中的残余物再用 NaI 提取 1 次,提取方法同上.2 次的轻组部分合为一起,在 50 °C 烘干,称量,得轻组质量,磨碎过 0.25 mm 筛,取样,测定其轻组中有机碳含量,再折算为土壤含量.

2.3 数据处理

所有数据均用 EXCEL 和 SPSS(11.5) 软件进行统计分析.

3 结果与分析

3.1 秸秆及蚯蚓对土壤有机碳、全氮的影响

经过连续 6 年的稻麦轮作,不同处理土壤中有有机碳和全氮含量差异明显(表 1).与对照相比,加施秸秆处理(M、ME、I、IE)土壤有机碳和全氮含量增加,其中全碳增加 25% ~ 36%、全氮增加 20% ~ 33%,且差异极显著($P < 0.01$).混施秸秆处理(I 和 IE)有机碳和全氮含量显著高于表施秸秆处理(M 和 ME).接种蚯蚓未对有机碳(SOC)与全氮产生显著影响,表明蚯蚓对有机物料的取食不会降低土壤有机碳和全氮含量.所有处理土壤碳氮比均为 10 左右,各处理间差异不显著.

表 2 秸秆施用及接种蚯蚓后土壤中不同活性有机碳含量

Tab. 2 Contents of soil labile organic carbon after straw application and earthworm inoculation

处理 Treatment	DOC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	HWEC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	PMC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 28 \text{d}^{-1}$)	MBC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	AEC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	ROC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	POC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	LFOC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	9.41 ± 4.21c	133.50 ± 4.55b	227.92 ± 21.99c	408.67 ± 19.34cd	653.60 ± 0.98c	0.96 ± 0.17c	1.07 ± 0.10d	1.64 ± 0.42c
M	22.18 ± 1.21a	201.58 ± 25.70a	255.30 ± 8.54bc	378.36 ± 51.92d	738.82 ± 31.36b	1.47 ± 0.09b	1.77 ± 0.15b	2.57 ± 0.35ab
ME	15.77 ± 3.00b	204.35 ± 19.69a	275.08 ± 13.81abc	498.83 ± 36.74b	737.57 ± 12.26b	1.49 ± 0.25b	1.53 ± 0.11c	1.76 ± 0.55bc
I	19.53 ± 0.84ab	236.49 ± 25.20a	307.54 ± 23.77ab	472.92 ± 12.82bc	824.98 ± 7.61a	1.80 ± 0.31ab	2.20 ± 0.06a	2.91 ± 0.21a
IE	23.51 ± 2.44a	238.27 ± 13.44a	315.87 ± 20.00a	586.22 ± 64.02a	822.95 ± 39.79a	1.91 ± 0.17a	1.84 ± 0.16b	3.07 ± 0.24a

DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; HWEC: 热水提取态碳 Hot water-extractable carbon; PMC: 潜在可矿化碳 Potential mine-rizable carbon; MBC: 微生物量碳 Microbial biomass carbon; AEC: 酸提取态碳 Acid-extractable carbon; ROC: 氧化有机碳 Readily oxidation carbon; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; LFOC: 轻组有机碳 Light fraction organic carbon. 下同 The same below.

表 1 不同处理土壤有机碳及全氮的变化

Tab. 1 Changes of soil organic carbon and total nitrogen under different treatments

处理 Treatment	有机碳 Soil organic carbon ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总氮 Total nitrogen ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	C: N
CK	6.88 ± 0.18c	0.69 ± 0.03c	9.99 ± 0.66a
M*	8.71 ± 0.47b	0.85 ± 0.03b	10.29 ± 0.28a
ME	8.61 ± 0.14b	0.83 ± 0.02b	10.36 ± 0.12a
I	9.24 ± 0.11a	0.92 ± 0.01a	10.05 ± 0.12a
IE	9.39 ± 0.05a	0.91 ± 0.04a	10.37 ± 0.45a

* 平均值标准差 Mean ± SD ($n = 3$); M: 秸秆表施 Straw mulched on soil surface; ME: 秸秆表施 + 蚯蚓 Mulched straw and with earthworm; I: 秸秆混施 Straw incorporated with soil; IE: 秸秆混施 + 蚯蚓 Incorporated straw and with earthworm. 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) In each column, values followed by different letter were significantly different at 0.05 level using Duncan's test. 下同 The same below.

3.2 秸秆及蚯蚓对不同活性有机碳含量的影响

与对照处理相比,加施秸秆处理 DOC、HWEC、AEC、POC、ROC 含量均显著提高 ($P < 0.01$) (表 2); 加施秸秆且接种蚯蚓处理 (ME 和 IE) 的 MBC 含量显著高于对照 ($P < 0.05$); 混施秸秆处理 PMC 含量显著高于对照 ($P < 0.05$); 加施秸秆处理 (ME 除外) LFOC 含量显著高于对照 ($P < 0.05$).

秸秆混施处理 MBC、AEC 和 POC 的含量显著高于表施处理 ($P < 0.05$), 而 2 种秸秆施用方式处理间 DOC、PMC、HWEC、ROC、LFOC 含量无显著差异. 在接种蚯蚓时, IE 处理 DOC、MBC、AEC、POC、ROC 和 LFOC 含量显著高于 ME, 两处理间 PMC 和 HWEC 含量无显著差异. 与表施秸秆处理相比, 无论是否接种蚯蚓, 混施秸秆处理 MBC、AEC 和 POC 含量均显著增加; 接种和未接种蚯蚓处理的 PMC、HWEC、ROC 和 LFOC 含量增加程度不同, DOC 含量的变化也不同.

在表施秸秆条件下, 与不接种蚯蚓 (M) 处理相比, 接种蚯蚓 (ME) 处理 MBC 含量显著提高 ($P < 0.05$), DOC 和 POC 含量显著降低 ($P < 0.05$); 两处理间 PMC、HWEC、AEC、ROC 和 LFOC 含量差异不

显著. 在混施秸秆条件下, 与不接种蚯蚓(I)处理相比, 接种蚯蚓(IE)处理 MBC 含量显著提高($P < 0.05$), 而 POC 含量显著降低($P < 0.05$); 两处理间 DOC、PMC、HWEC、AEC、ROC 和 LFOC 含量差异不显著. 无论何种秸秆施用方式, 接种蚯蚓处理 MBC 含量显著提高, POC 含量显著降低; DOC 和 LFOC 含量随不同秸秆施用方式而变化; PMC、HWEC、ROC 含量有增加趋势, 而 AEC 含量有降低趋势.

3.3 秸秆及蚯蚓对不同活性有机碳分配比例的影响

土壤活性有机碳分配比例是土壤活性有机碳含量与土壤总有机碳含量的比值^[32], 用来表征某一有机碳在该土壤中的活性. 由于不同形态有机碳在土壤碳循环与转换中的周转期、作用与地位不同, 因此, 考察其分配比例及变化是了解土壤有机碳稳定性与运转的一个重要手段.

由表 3 可以看出, 在所列 8 种形态活性有机碳中, 不论何种处理, 活性有机碳的分配比例排列顺序一般为: DOC < HWEC < PMC < MBC < AEC < ROC < POC < LFOC, 取值范围为 0.1% ~ 32.65%. 与对照处理相比, 加施秸秆处理活性有机碳 DOC 分配比例显著提高, AEC 分配比例显著降低, HWEC、POC、ROC 和 LFOC 分配比例升高, MBC 和 PMC 的分配比例变化不一. 与表施处理相比, 秸秆混施处理 POC 分配比例显著提高, DOC 分配比例显著降低, MBC、PMC、HWEC、AEC、ROC、LFOC 的分配比例在两处理间无显著差异. 接种蚯蚓时, 与 ME 处理相比, IE 处理 DOC 和 LFOC 分配比例显著提高, 而 MBC、PMC、HWEC、AEC、POC 和 ROC 分配比例在两处理间无显著差异.

在表施秸秆条件下, 与 M 处理相比, ME 处理 MBC 分配比例显著提高, DOC 和 POC 分配比例显著降低, 而 PMC、HWEC、AEC、ROC 和 LFOC 分配比例在两处理间无显著差异. 在混施秸秆条件下, 接种蚯蚓与不接种蚯蚓相比, IE 处理 DOC、MBC 的分配

比例显著提高, POC 分配比例显著降低, 而 PMC、HWEC、AEC、ROC 和 LFOC 分配比例在两处理间无显著差异.

由于不同的活性有机碳来源不同, 在受外界作用时的变化也不相同. 上述活性有机碳分配比例只能说明某一活性有机碳在土壤中的活性, 并不能说明土壤有机碳总体的活性差异. 要综合反映土壤有机碳的总体活性, 必须考虑到不同活性有机碳的分配比例. 在本研究中, 由于选取的活性有机碳因子较多, 且其分配比例的变化趋势不尽相同, 因此, 对其进行综合是一种可尝试的方法. 本文采用活性有机碳分配比例的相对值, 即以 CK 的活性有机碳分配比例为基值 1, 其它处理与其相比(归一化处理)求得相对值, 再以各活性有机碳分配比例相对值的平均值作为土壤有机碳活性的量度.

由表 4 可以看出, 土壤有机碳活性大小顺序为: IE > I > M > ME > CK. 与对照处理相比, 加施秸秆处理土壤有机碳活性增加; 混施秸秆较表施秸秆更利于提高有机碳活性. 在不同秸秆施用方式下, 接种蚯蚓对土壤有机碳活性的影响不同. 表施秸秆时, 接种蚯蚓可降低土壤有机碳活性; 混施秸秆时, 接种蚯蚓可提高土壤有机碳活性.

$$R_{ij} = f_{ij} / f_{CKj} \quad (1)$$

式中, R_{ij} 为第 i 种处理第 j 种活性有机碳分配比例相对值, f_{ij} 为第 i 种处理第 j 种活性有机碳分配比例, f_{CKj} 为 CK 处理第 j 种活性有机碳分配比例.

$$L_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{ij}$$

式中, L_i 为第 i 种处理土壤有机碳活性, n 为活性有机碳种类, $n = 8$.

3.4 不同活性有机碳的相关性

由表 5 可以看出, 总有机碳与土壤活性有机碳的相关性均达显著水平, 验证了土壤有机碳总体含量与活性有机碳含量的紧密联系. 各活性有机碳之间, 除 DOC 与 MBC、DOC 与 PMC、MBC 与 POC、

表 3 秸秆施用及接种蚯蚓对不同活性有机碳分配比例的影响

Tab.3 Effect of straw application and earthworm inoculation on the fraction of soil labile organic carbon (%)

处理 Treatment	不同活性有机碳分配比例 Fraction of soil labile organic carbon							
	DOC	HWEC	PMC	MBC	AEC	ROC	POC	LFOC
CK	0.10 ± 0.00c	1.94 ± 0.10b	3.30 ± 0.18a	5.94 ± 0.31ab	9.50 ± 0.24a	14.01 ± 2.63b	15.51 ± 1.53d	26.57 ± 2.88ab
M	0.25 ± 0.00a	2.31 ± 0.29ab	2.95 ± 0.27a	4.33 ± 0.47c	8.48 ± 0.26b	16.86 ± 0.94ab	20.31 ± 0.63b	29.45 ± 2.73ab
ME	0.20 ± 0.00b	2.37 ± 0.19a	3.20 ± 0.11a	5.80 ± 0.52ab	8.57 ± 0.11b	17.28 ± 3.11ab	17.72 ± 1.15cd	23.85 ± 4.12b
I	0.21 ± 0.01b	2.56 ± 0.28a	3.23 ± 0.33a	5.12 ± 0.10bc	8.93 ± 0.03b	19.48 ± 3.44a	23.77 ± 0.62a	31.36 ± 2.67a
IE	0.25 ± 0.03a	2.54 ± 0.15a	3.36 ± 0.06a	6.24 ± 0.65a	8.76 ± 0.38b	20.36 ± 1.71a	19.60 ± 1.78bc	32.65 ± 2.40a

表4 各处理不同活性有机碳分配比例相对值

Tab.4 Relative values of different soil labile organic carbon fraction under different treatments

处理 Treatment	不同活性有机碳分配比例相对值 Relative values of soil labile organic carbon fraction								土壤有机碳活性* Soil organic carbon activity (L_i)
	DOC	MBC	PMC	HWEC	AEC	POC	ROC	LFOC	
CK	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
M	2.55	0.73	0.89	1.19	0.89	1.31	1.20	1.11	1.23
ME	2.02	0.98	0.97	1.22	0.90	1.14	1.23	0.90	1.17
I	2.11	0.86	0.98	1.32	0.94	1.53	1.39	1.18	1.29
IE	2.51	1.05	1.02	1.31	0.92	1.26	1.45	1.23	1.34

* 以不同活性有机碳分配比例平均值进行计算 Calculating on the basis of mean fraction of labile organic carbon.

表5 不同活性有机碳的相关系数

Tab.5 Correlations between different soil labile organic carbons (r , $n=15$)

	TOC	DOC	MBC	PMC	HWEC	AEC	POC	ROC	LFOC
TOC	1	0.879**	0.545*	0.759**	0.913**	0.923**	0.885**	0.844**	0.871**
DOC		1	0.178	0.524	0.807**	0.727**	0.771**	0.656*	0.821**
MBC			1	0.632*	0.515*	0.673**	0.269	0.676**	0.543
PMC				1	0.645*	0.795**	0.633*	0.584*	0.769**
HWEC					1	0.877**	0.867**	0.865**	0.695**
AEC						1	0.853**	0.888**	0.862**
POC							1	0.758**	0.762**
ROC								1	0.807**
LFOC									1

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

表6 秸秆与蚯蚓对总有机碳及不同活性有机碳含量影响的显著性分析

Tab.6 Significant analyses of straw and earthworm on soil organic carbon and labile organic carbon

因素 Factor	SOC	DOC	MBC	PMC	HWEC	AEC	POC	ROC	LFOC
秸秆 Straw	**		**	ns	*	**	**	*	*
蚯蚓 Earthworm	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns
秸秆 + 蚯蚓 Straw + earthworm	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: $P > 0.05$.

MBC 与 LFOC 间相关不显著外,其它均显著相关。由于 DOC 和 MBC 除受土壤固相物理化学性质影响外,对环境变化的响应也很敏感^[36],因此,DOC 与 MBC 不适合作为土壤有机碳长期累积性变化的指标,适合作为指示短期瞬时变化的指标,而 PMC、HWEC、AEC、POC、ROC 和 LFOC 均可作为有机碳长期变化的累积性指标。

3.5 不同活性有机碳含量的主要影响因素

用 SPSS 的 General Linear Model 进行因素间的方差分析(不考虑对照处理),可以明确秸秆因素及蚯蚓因素是否是土壤有机碳及不同活性有机碳含量变化的主要原因。由表 6 可知,秸秆的施用方式(表施或混施)除对 DOC 与 PMC 含量无影响外,对 SOC 及其它活性有机碳含量均有显著影响,表明无论是否接种蚯蚓,秸秆施用方式均是影响土壤有机碳及不同活性有机碳含量的主要因素。

在施用秸秆条件下,接种蚯蚓除对 MBC 与 POC

含量有影响外,对土壤有机碳及其它活性有机碳含量均无显著性影响,与上述结果相吻合,即不论是何种秸秆施用方式,接种蚯蚓可显著提高 MBC 含量及分配比例,显著降低 POC 含量及分配比例。秸秆与蚯蚓间的交互作用体现在 DOC 含量变化上。

4 讨论

秸秆在土壤中的分解受土壤养分、水分、温度、秸秆本身的物理化学特性、土壤类型及土壤与秸秆间的接触程度等因素的影响^[1]。本研究经过连续 6 年的稻麦轮作,加施秸秆,使土壤有机碳的含量显著提高,与其它研究结果一致^[20,27,34]。与表施秸秆相比,混施秸秆更有利于土壤有机碳提高,与蔡晓布等^[7]的研究结果不同。这可能与所研究的区域和试验时间不同有关。例如,土壤水分含量与土壤温度是他们所选研究区域土壤有机残体分解的限制因子,而在本研究中,这二者均不是主要的限制因子。土壤

有机残体的分解与转化主要与土壤微生物和有机残体的接触程度有关^[14]。在不同的秸秆施用方式下, 接种蚯蚓未引起土壤有机碳与全氮的显著变化, 表明蚯蚓对有机物料的取食不会降低土壤有机碳和全氮含量。

在本研究中, 秸秆作为外源有机物施入土壤后, 部分被微生物分解, 部分经过腐殖化转为土壤有机质, 同时使土壤中活性有机碳含量增加, 且混施秸秆较表施秸秆更有利于除 DOC 和 MBC 外的活性有机碳含量的增加。由于 DOC 与 MBC 对外界的变化更敏感, 加之有蚯蚓因素的影响, 因此在土壤中的变化更快速与复杂。不论是何种秸秆施用方式, 接种蚯蚓均使土壤与秸秆更好地混合, 有利于改善土壤物理环境和微生物繁殖, 进而显著提高 MBC 含量^[29]。蚯蚓在土壤中必定以富含有机颗粒的土粒或植物残余为食, Koutika 等^[18]发现, 蚯蚓取食容易利用有机物颗粒。本研究也发现, 不论是何种秸秆施用方式, 接种蚯蚓均引起 POC 含量显著降低。在两种秸秆施用方式下, 接种蚯蚓均使 PMC、HWEC 与 ROC 含量增加, AEC 含量降低。在表施秸秆条件下, 接种蚯蚓处理 DOC 和 LFOC 含量降低; 在混施秸秆条件下, 接种蚯蚓处理 DOC 和 LFOC 含量增加, 表明蚯蚓的作用远比我们所考虑的复杂。

秸秆作为外源有机质引入土壤, 使土壤有机碳的活性大大增加。与表施秸秆相比, 混施秸秆由于加快了秸秆与土壤的混合, 从而促进了秸秆的分解及腐殖化^[5,11]。秸秆的分解及腐殖化的加快又促进了秸秆有机碳向土壤有机碳的转化与更新, 提高了土壤有机碳活性。在不同秸秆施用方式下, 接种蚯蚓的土壤有机碳活性变化截然不同, 这与相应土壤有机碳含量变化相一致。Bremer 等^[4]发现, 破碎作用加快了小麦秸秆碳的降解。Angers 等^[1]认为, 秸秆与土壤接触面的增加有两个相反的作用: 1) 增加土壤养分与水分交换, 使秸秆分解加快; 2) 土壤物理性保护, 使碳稳定性增加。蚯蚓可使凋落物或秸秆进入土壤或更好地与土壤混合^[12,15-17,29]。由于蚓粪中砂粒和凋落物含量增加, 改变了包被于蚓粪中的有机质降解速率^[30]。本研究中的蚯蚓体型大, 在土壤中挖穴时, 吞咽并混合植物碎片和矿物颗粒。在表施秸秆下接种蚯蚓后, 由于蚯蚓对秸秆与土壤颗粒的吞咽及包被等的物理性保护作用, 减缓了秸秆的分解和转化及土壤有机碳的矿化, 进而减缓了土壤有机碳的更新, 使土壤有机碳活性下降; 而在混施秸秆条件下, 接种蚯蚓促使秸秆颗粒更加破碎, 易与土壤混

匀, 增加了土壤颗粒与秸秆的接触, 加快了秸秆分解与腐殖化, 从而提高了土壤有机碳活性。

统计分析表明, 各活性有机碳及 SOC 之间几乎均显著相关, 说明土壤有机碳及各活性有机碳尽管在施用秸秆及蚯蚓活动作用下的变化不同, 但它们之间有着密切的联系。进一步的研究表明, 秸秆施用方式是影响土壤有机碳与活性有机碳的主要因素, 而蚯蚓活动则并非对所有的有机碳指标有显著影响。这可能与本研究中所采用的土壤质地、蚯蚓接种量或蚯蚓作用时间有关。

参考文献

- [1] Angers DA, Recous S. 1997. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. *Plant and Soil*, **189**: 197-203
- [2] Blair GJ, Lefroy RDB, Lisle L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the developments of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, **46**: 1459-1466
- [3] Boyer J, Michellon R, Chabanne A, et al. 1999. Effects of trefoil cover crop and earthworm inoculation on maize crop and soil organisms in Reunion Island. *Biology and Fertility of Soils*, **28**: 364-370
- [4] Bremer E, Van Houtum W, Kessel CV. 1991. Carbon dioxide evolution from wheat and lentil residues as affected by grinding, added nitrogen, and the absence of soil. *Biology and Fertility of Soils*, **11**: 221-227
- [5] Brown PL, Dickey DD. 1970. Losses of wheat straw residue under simulated residue conditions. *Soil Science Society of America Proceedings*, **34**: 118-121
- [6] Burtelow AE, Bohlen PJ, Groffman PM. 1998. Influence of exotic earthworm invasion on soil organic matter microbial and denitrification potential in forest soils of the northeastern United States. *Applied Soil Ecology*, **9**: 197-202
- [7] Cai X-B (蔡晓布), Qian C (钱成), Zhang Y (张元), et al. 2004. Microbial characteristics of straw-amended degraded soils in central Tibet and its effect on soil fertility. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **15**(3): 463-468 (in Chinese)
- [8] Cambardella CA, Elliott ET. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, **56**: 777-783
- [9] Caravaca F, Pera A, Masciandaro G, et al. 2005. A microcosm approach to assessing the effects of earthworm inoculation and oat cover cropping on CO₂ fluxes and biological properties in an amended semiarid soil. *Chemosphere*, **59**: 1625-1631
- [10] Chan KY, Heenan DP. 1999. Microbial-induced soil aggregate stability under different crop rotations. *Biology and Fertility of Soils*, **30**: 29-32

- [11] Chirstensen BT. 1986. Barley straw decomposition under field conditions: Effect of placement and initial nitrogen content on weight loss and nitrogen dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, **18**: 523-529
- [12] Curry JP, Byrne D. 1997. Role of earthworms in straw decomposition in a winter cereal field. *Soil Biology and Biochemistry*, **29**: 555-558
- [13] Groffman PM, Bohlen PJ, Fisk MC, *et al.* 2004. Exotic earthworm invasion and microbial biomass in temperate forest soils. *Ecosystems*, **7**: 45-54
- [14] Henriksen TM, Breland TA. 2002. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil. *Biology and Fertility of Soils*, **35**: 41-48
- [15] Isaac SR, Nair MA. 2005. Biodegradation of leaf litter in the warm humid tropics of Kerala, India. *Soil Biology and Biochemistry*, **37**: 1656-1664
- [16] Jegou D, Cluzeau D, Hallaire V, *et al.* 2000. Burrowing activity of the earthworms *Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea giardi* and consequences on C transfers in soil. *European Journal of Soil Biology*, **36**: 27-34
- [17] Jegou D, Hallaire V, Cluzeau D, *et al.* 1998. Effects of four ecological categories of earthworms on carbon transfer in soil. *Applied Soil Ecology*, **9**: 249-255
- [18] Koutika LS, Didden WAM, Marinissen JCY. 2001. Soil organic matter distribution as influenced by enchytraeid and earthworm activity. *Biology and Fertility of Soils*, **33**: 294-300
- [19] Lavelle P. 1988. Earthworm activates and the soil system. *Biology and Fertility of Soils*, **6**: 237-251
- [20] Li X-G (李小刚), Cui Z-J (崔志军), Wang L-Y (王玲英). 2002. Effect of straw on soil organic carbon constitution and structural stability. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **39**(3): 421-428 (in Chinese)
- [21] Loginow W, Wisniewski W, Gonet SS, *et al.* 1987. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, **20**: 47-52
- [22] Mclauchlan KK, Hobbie SE. 2004. Comparison of Labile soil organic matter fractionation techniques. *Soil Science Society of America Journal*, **68**(5): 1616-1624
- [23] Schindler-Wessells ML, Bohlen PJ, McCartney DA, *et al.* 1997. Earthworm effects on soil respiration in corn agroecosystems receiving different nutrient inputs. *Soil Biology and Biochemistry*, **29**: 409-412
- [24] Scullion J, Malik A. 2000. Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**: 119-126
- [25] Shuster WD, Subler S, McCoy EL. 2001. Deep-burrowing earthworm additions changed the distribution of soil organic carbon in a chisel-tilled soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**: 983-996
- [26] Society of Soil Science of China (中国土壤学会). 1999. Analysis Methods of Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press: 107-149 (in Chinese)
- [27] Song S-Y (宋述尧). 1997. Effects of uncomposed corn straw on improvement of soil with continuous cropping in plastic-house. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), **13**(1): 135-139 (in Chinese)
- [28] Sparling GP, Feltham CW, Eynolds JR, *et al.* 1990. Estimation of soil microbial C by a fumigation-extraction method: use on soils of high organic matter content, and a reassessment of the KEC-factor. *Soil Biology and Biochemistry*, **22**: 301-307
- [29] Subler S, Kirsch AS. 1998. Spring dynamics of soil carbon, nitrogen, and microbial activity in earthworm middens in a no-till cornfield. *Biology and Fertility of Soils*, **26**: 243-249
- [30] Sven M, Stefan S. 2005. Effects of sand and litter availability on organic matter decomposition in soil and in casts of *Lumbricus terrestris* L. *Geoderma*, **128**: 155-166
- [31] Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, **19**: 703-707
- [32] Wu J-G (吴建国), Zhang X-Q (张小全), Xu D-Y (徐德应). 2004. Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan Mountain forest zone. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), **28**(5): 657-664 (in Chinese)
- [33] Wu TY, Schoenau JJ, Li FM, *et al.* 2004. Influence of cultivation and fertilization on total organic carbon and carbon fractions in soils from the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, **77**: 59-68
- [34] Wu Z-J (武志杰), Zhang H-J (张海军), Xu G-S (许广山), *et al.* 2002. Effect of returning corn straw into soil on soil fertility. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **13**(5): 539-542 (in Chinese)
- [35] Yang CM, Yang LZ, Ouyang Z. 2005. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes. *Geoderma*, **124**: 133-142
- [36] Zhao J-S (赵劲松), Zhang X-D (张旭东), Yuan X (袁星), *et al.* 2003. Characteristics and environmental significance of soil dissolved organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**(1): 126-130 (in Chinese)

作者简介 于建光,男,1975年生,博士研究生.主要从事土壤生态学与恢复生态学研究,发表论文3篇. Tel: 025-84398733; E-mail: yujianguang@sohu.com

责任编辑 梁仁禄