

# 秸秆施用及蚯蚓活动下土壤有机碳变化 表征指标的筛选\*

于建光 李辉信 胡 锋<sup>†</sup>

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要** 在长期连续稻-麦轮作的小区试验中,通过运用主成分分析法与聚类分析法等,对施用秸秆与接种蚯蚓(*Metaphire guillelmi*)后土壤有机碳变化表征指标的敏感性进行了分析与评价。结果表明,不同土壤有机碳变化表征指标对农田施用秸秆与蚯蚓活动的响应不同,用所选取12种指标可较完整地表达土壤有机碳的含量与组成变化,但较多的信息及信息的不一致影响进一步的分析。各指标可依主成分分析与聚类分析结果分为两大类,一类为与土壤有机碳含量密切相关的指标,如可溶性有机碳(DOC)、热水提取态碳(HWEC)、潜在可矿化碳(PMC)、基础呼吸(BR)、酸提取态碳(AEC)、易氧化有机碳(ROC)、颗粒有机碳(POC)、轻组有机碳(LFOC)、总有机碳(TOC);另一类为与微生物密切相关的潜在影响土壤有机碳的指标,如微生物熵(Mq)、代谢熵( $q_{CO_2}$ )与微生物生物量碳(MBC)。运用与土壤有机碳含量密切相关的指标可用于评价秸秆施用对土壤有机碳的影响,且不必全部测定,只需选测一种或两种指标,而其他指标可通过回归方程获得。与微生物密切相关的指标可用于评价蚯蚓活动对土壤有机碳的潜在影响。

**关键词** 指标;土壤有机碳;秸秆;蚯蚓;筛选

**中图分类号** S154.1

**文献标识码** A

土壤有机质是植物生长主要的养分来源,土壤有机碳库是陆地生态系统中最重要碳库之一<sup>[1]</sup>,对于全球碳循环与环境变化有重要影响,增加土壤有机碳库储量可有效地减缓温室效应与增加作物生产。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,通过农业管理方式如增加作物秸秆归还量被认为是一项重要的“固碳”措施<sup>[2-4]</sup>。蚯蚓是温带、热带和亚热带陆地生态系统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”<sup>[5]</sup>,在秸秆还田时辅以蚯蚓处理,可加快秸秆向土壤有机碳的转化。

土壤有机碳通常由于高的背景水平和自然土壤的变异,土壤总有机碳的较小变化不易查觉,因此可用土壤有机碳的某一组分含量作为有机碳变化的更敏感指标<sup>[6]</sup>。已有的研究大多选取两到三个活性碳指标来指示土壤有机碳的变化,对于阐明土壤某一特定变化有一定的指示意义,但不免会存在指示不完整的现象,况且不同研究结果之间的可比性不强。从1999年开始,我们在南京农业大学开始进行施用

秸秆与接种蚯蚓的小区试验,以期通过长期试验来明确农田增施秸秆对土壤有机碳的贡献,以及在增施秸秆时接种蚯蚓对秸秆及土壤有机碳的转化与影响。试验中选取12种常用于反映土壤有机碳变化的观测指标进行测定,力求较全面反映土壤有机碳的变化,并试图以简化与优选指标为目的,运用统计学方法对全部指标进行分析与归类,筛选出对秸秆施用及蚯蚓活动敏感且有代表性的能反映有机碳变化的指标,在以后的土壤有机碳经常性动态监测与评价中加以应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验布置于南京农业大学校内网室,小区由混凝土砌成2.8 m × 1.0 m × 0.6 m的池子(无底),在池内填入50 cm厚的土层,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,并在每季结束后进行蚯蚓种群调查与控制,接

\* 国家自然科学基金项目(30370286)资助

<sup>†</sup> 通讯作者, E-mail: fhjwc@njau.edu.cn

作者简介:于建光(1975~),男,博士研究生,研究方向为土壤生态学与恢复生态学。Tel:025-84398733;E-mail:yujianguang@sohu.com

收稿日期:2006-07-24;收到修改稿日期:2007-03-01

种蚯蚓小区保持在种植前蚯蚓生物量达  $60 \sim 80 \text{ g m}^{-2}$ 。试验从 1999 年开始, 共设 5 种处理, 分别为: 对照 (CK)、秸秆表施 (M)、秸秆表施 + 蚯蚓 (ME)、秸秆混施 (I)、秸秆混施 + 蚯蚓 (IE); 种植制度为稻麦轮作, 其中水稻为旱作, 全生育期不淹水。稻季氮、磷和钾肥用量分别为  $210 \text{ kg hm}^{-2}$  (纯 N)、 $105 \text{ kg hm}^{-2}$  (纯 P) 和  $105 \text{ kg hm}^{-2}$  (纯 K), 肥料品种为尿素、过磷酸钙和氯化钾; 麦季氮、磷和钾肥用量分别为  $225$ 、 $120$  和  $120 \text{ kg hm}^{-2}$ 。玉米秸秆 (粉碎至  $2 \text{ cm}$  左右) 的施用量第一季为  $15\,000 \text{ kg hm}^{-2}$ , 以后各季均为  $7\,500 \text{ kg hm}^{-2}$ 。试验所用蚯蚓为威廉腔环蚓 (*Metaphire guillelmi*), 2005 年 6 月份小麦收获后, 采集各处理小区  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土层土样, 部分鲜样保存于  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  冰箱, 其余土样风干备用。

## 1.2 分析与测定方法

可溶性有机碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC): 采用鲜土样, 纯水振荡浸提并离心, 过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜, 滤液用 TOC 仪 (Shimadzu 5000A) 测定。

热水提取态碳 (Hot Water Extractable Carbon, HWEC): 称取  $< 2 \text{ mm}$  的风干土  $4 \text{ g}$ , 加入  $20 \text{ ml}$  的蒸馏水, 在  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  的振荡器中振荡  $16 \text{ h}$ , 悬浮液在  $10\,000 \text{ r min}^{-1}$  离心  $10 \text{ min}$ , 收集上清液, 然后测定上清液中的有机碳<sup>[7]</sup>。

潜在可矿化碳 (Potentially Mineralizable Carbon, PMC): 鲜土样  $28 \text{ d}$  连续培养, 碱液吸收  $\text{CO}_2$ , 酸滴定吸收液。

酸提取态碳 (Acid Extractable Carbon, AEC): 称取  $< 2 \text{ mm}$  的风干土  $2 \text{ g}$ , 加入  $20 \text{ ml}$  的  $1.5 \text{ mol L}^{-1}$  的硫酸, 密封离心管, 放置  $20 \text{ h}$ , 然后在  $4\,000 \text{ r min}^{-1}$  离心  $5 \text{ min}$ , 测定上清液中的有机碳含量<sup>[7]</sup>。

高锰酸钾易氧化有机碳 (Readily Oxidation Carbon, ROC)<sup>[6, 8]</sup>: 称取过  $500 \mu\text{m}$  土壤筛的含碳  $15 \text{ mg}$  的风干土, 加入  $25 \text{ ml}$  的  $333 \text{ mmol L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ , 震荡  $1 \text{ h}$ , 震荡后在  $4\,000 \text{ r min}^{-1}$  离心  $5 \text{ min}$ , 吸取上清液稀释  $250$  倍, 稀释液在  $565 \text{ nm}$  波长处进行比色, 同时配制标准系列浓度的  $\text{KMnO}_4$  溶液, 也在  $565 \text{ nm}$  处比色, 依标准曲线得  $\text{KMnO}_4$  浓度, 进而求得消耗  $\text{KMnO}_4$  量, 再推算出土样消耗碳。

颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC): 参照 Cambardella 和 Elliott<sup>[9]</sup> 的方法, 过  $2 \text{ mm}$  风干土, 六偏磷酸钠溶液 ( $5 \text{ g L}^{-1}$ ) 振荡  $12 \text{ h}$ , 然后用蒸馏水洗过  $53 \mu\text{m}$  筛, 收集筛上物,  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干, 测定其有机碳含量。

轻组有机碳 (Light Fraction Organic Carbon, LFOC)<sup>[10, 11]</sup>: 过  $2 \text{ mm}$  筛土样用  $1.80 \text{ g ml}^{-1} \text{ NaI}$  振荡  $1 \text{ h}$  且离心, 上清液过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜, 滤纸上的轻组用  $0.01 \text{ mol L}^{-1}$  的  $\text{CaCl}_2$  和蒸馏水清洗, 轻组部分用水转入已称重的小玻璃杯, 离心管中的残余物再用  $\text{NaI}$  提取一次, 提取方法同上, 两次的轻组部分合为一起, 在  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干称重得轻组重, 磨碎过  $0.25 \text{ mm}$  筛, 取样测轻组中有机碳的含量, 再折算为土壤中含量。

土壤总有机碳 (Total Organic Carbon, TOC): 采用  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  氧化法<sup>[12]</sup>。

微生物生物量碳 (Microbial Biomass Carbon, MBC): 采用氯仿熏蒸  $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提法<sup>[13, 14]</sup>。

基础呼吸 (Basal respiration, BR): 采用碱液呼吸法<sup>[12]</sup>。

微生物熵 (Microbial quotient, Mq) 为微生物量碳与土壤有机碳比值。代谢熵 ( $q\text{CO}_2$ ) 为基础呼吸与微生物生物量碳之比。

## 1.3 数据统计与分析

运用 SPSS 软件的 ANOVA 对处理间差异进行显著性分析, 指标选取与优化采用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和聚类分析 (Cluster Analysis, CA) 方法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同处理下各种形态有机碳变化

经过连续六年的稻麦轮作, 小区中施用秸秆 (表施或混施) 使 DOC 含量显著增加 ( $p < 0.05$ , 表 1), 在秸秆表施下, 接种蚯蚓使 DOC 含量显著降低而在秸秆混施下接种蚯蚓使 DOC 含量升高。施用秸秆使 HWEC 含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 在秸秆表施和秸秆混施下, 接种蚯蚓均使其含量略有增加。施用秸秆使 PMC 含量增加, 不同秸秆施用方式下, 接种蚯蚓均使其含量增加。施用秸秆使 AEC 含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 而在秸秆施用下接种蚯蚓均使其含量略有下降。施用秸秆使 ROC 含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 在施用秸秆下接种蚯蚓均使其含量略有上升。施用秸秆使 POC 含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 在施用秸秆下接种蚯蚓均使其含量显著减少 ( $p < 0.05$ )。施用秸秆使 LFOC 含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 在秸秆表施下接种蚯蚓使其含量降低, 而在秸秆混施下接种蚯蚓使其含量增加。施用秸秆使 TOC 含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 在秸秆表施下接种蚯蚓使

TOC 含量略有下降,而在秸秆混施条件下,接种蚯蚓使 TOC 含量略有上升。

## 2.2 不同处理下与微生物活性相关指标的变化

与微生物活动相关的指标如 MBC、BR、Mq 及  $q\text{CO}_2$  对不同处理的反应各异(表 1)。MBC 对施用秸秆反应不一,秸秆表施使 MBC 含量略有下降,而秸秆混施则使其含量增加;在不同秸秆施用方式下,接

种蚯蚓均使其含量显著增加( $p < 0.05$ )。施用秸秆使 BR 值增大,在秸秆表施时接种蚯蚓使其值下降,而在秸秆混施时接种蚯蚓使其值显著上升( $p < 0.05$ )。施用秸秆使 Mq 值下降,在秸秆表施时接种蚯蚓使其值增大,而在秸秆混施时接种蚯蚓使其值增大。施用秸秆使  $q\text{CO}_2$  值增大,而在秸秆施用下接种蚯蚓均使其值下降。

表 1 各种指标所表征秸秆施用及蚯蚓活动下土壤有机碳的变化

Table 1 Changes in organic carbon in soils subject to straw incorporation and earthworm activity as reflected by indices

处理 Treatment	DOC ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	HWEC ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	PMC ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	AEC ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	ROC ( $\text{g kg}^{-1}$ )	POC ( $\text{g kg}^{-1}$ )
对照 CK	9.41 $\pm$ 4.21 c	133.50 $\pm$ 4.55 b	227.92 $\pm$ 21.99 c	653.60 $\pm$ 0.98 c	0.96 $\pm$ 0.17 c	1.07 $\pm$ 0.10 d
秸秆表施 M	22.18 $\pm$ 1.21 a	201.58 $\pm$ 25.70 a	255.30 $\pm$ 8.54 bc	738.82 $\pm$ 31.36 b	1.47 $\pm$ 0.09 b	1.77 $\pm$ 0.15 b
秸秆表施 + 蚯蚓 ME	15.77 $\pm$ 3.00 b	204.35 $\pm$ 19.69 a	275.08 $\pm$ 13.81 abc	737.57 $\pm$ 12.26 b	1.49 $\pm$ 0.25 b	1.53 $\pm$ 0.11 c
秸秆混施 I	19.53 $\pm$ 0.84 ab	19.53 $\pm$ 0.84 ab	307.54 $\pm$ 23.77 ab	824.98 $\pm$ 7.61 a	1.80 $\pm$ 0.31 ab	2.20 $\pm$ 0.06 a
秸秆混施 + 蚯蚓 IE	23.51 $\pm$ 2.44 a	23.51 $\pm$ 2.44 a	315.87 $\pm$ 20.00 a	822.95 $\pm$ 39.79 a	1.91 $\pm$ 0.17 a	1.84 $\pm$ 0.16 b

处理 Treatment	LFOC ( $\text{g kg}^{-1}$ )	TOC ( $\text{g kg}^{-1}$ )	MBC ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	BR ( $\text{CO}_2\text{-C mg kg}^{-1}\text{d}^{-1}$ )	Mq (%)	$q\text{CO}_2$ ( $\text{CO}_2\text{-C } \mu\text{g mg}^{-1}\text{h}^{-1}$ )
对照 CK	1.64 $\pm$ 0.42 c	6.88 $\pm$ 0.18 c	408.67 $\pm$ 19.34 cd	38.18 $\pm$ 4.87 c	5.94 $\pm$ 0.31 ab	3.89 $\pm$ 0.36 a
秸秆表施 M	2.57 $\pm$ 0.35 ab	8.71 $\pm$ 0.47 b	378.36 $\pm$ 51.92 d	45.49 $\pm$ 5.71 bc	4.33 $\pm$ 0.47 c	5.08 $\pm$ 0.92 a
秸秆表施 + 蚯蚓 ME	1.76 $\pm$ 0.55 bc	8.61 $\pm$ 0.14 b	498.83 $\pm$ 36.74 b	45.30 $\pm$ 0.65 bc	5.80 $\pm$ 0.52 ab	3.80 $\pm$ 0.25 a
秸秆混施 I	2.91 $\pm$ 0.21 a	9.24 $\pm$ 0.11 a	472.92 $\pm$ 12.82 bc	46.45 $\pm$ 3.08 b	5.12 $\pm$ 0.10 bc	4.17 $\pm$ 0.49 a
秸秆混施 + 蚯蚓 IE	3.07 $\pm$ 0.24 a	9.39 $\pm$ 0.05 a	586.22 $\pm$ 64.02 a	54.68 $\pm$ 4.38 a	6.24 $\pm$ 0.65 a	3.89 $\pm$ 0.14 a

Straw mulched on soil surface; Mulched straw and with earthworm; Straw incorporated with soil; Incorporated straw and with earthworm; 平均值  $\pm$  标准差,  $n = 3$ , 同行不同字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ ) Means  $\pm$  std.  $n = 3$ . In each row, values followed by different letters are significantly different at  $p < 0.05$  using Duncan's test

## 2.3 秸秆施用及蚯蚓活动对各指标的影响

秸秆进入土壤中,由于受土壤养分、水分有效性、温度、秸秆本身的物理与化学特性、土壤类型及土壤与秸秆间的接触程度等因素的影响,分解过程相当复杂<sup>[15]</sup>。本研究中,作为外源有机质的秸秆经过 6 a 的连续施用后,部分被微生物分解,部分经过腐殖化转为土壤有机质,使土壤中大多数形态有机碳的含量发生显著变化,这与他人的研究结果一致<sup>[16, 17]</sup>。混施秸秆相比于表施秸秆由于加快了秸秆与土壤的混合,从而促使了秸秆的分解及腐殖化的加快<sup>[18, 19]</sup>,秸秆的分解及腐殖化的加快又使秸秆有机碳向土壤有机碳的转化与更新加快,进而反映在指示有机碳变化的各指标上。研究表明蚯蚓可显

著促使凋落物或秸秆进入土壤或更好地与土壤混合<sup>[20~24]</sup>;接种蚯蚓后,蚯蚓对秸秆与土壤的混合、吞咽、包被及结构体如蚓粪、蚓穴等的形成<sup>[25]</sup>,加上不同秸秆施用方式下秸秆与土壤的接触方式不同,使得不同指标对蚯蚓活动的响应出现明显分异。总之,运用多种指标可全面地指示土壤有机碳变化对秸秆施用及蚯蚓活动的响应,但较多的信息与信息的不一致影响进一步的分析,对多种指标进行归并与分类有助于对结果的解释。

## 2.4 各指标的主成分分析

通过主成分分析各指标,得到反映整个有机碳变化指标的两个公因子 PC1 (principal component 1) 与 PC2 (principal component 2),两公因子的累积提取

率为 84.4 % (如图 1), 代表了各样本的绝大部分信息。DOC、HWEC、PMC、AEC、ROC、POC、LFOC、TOC 与 BR 都集中于 X 轴一侧, 是 PC1 信息的主要来源, 而  $M_q$ 、 $qCO_2$  位于 Y 轴两侧, 是 PC2 信息的主要来源, 而 MBC 位于两坐标轴之间, 但更倾向于 PC2。DOC 的来源主要包括凋落物、腐殖质、微生物生物量和根际分泌物等<sup>[26]</sup>; 热水提取有机质来源于土壤生物量和根渗出物以及溶出物, 存在于土壤溶液中, 松散地吸附于矿物表面, 与腐殖质高分子结合或陷于其中<sup>[27]</sup>; PMC 用于表征土壤有机质被微生物可降解的程度; AEC 与土壤中碳水化合物相关<sup>[28]</sup>; ROC 是用温和氧化剂高锰酸钾来模拟微生物对土壤有机质的降解<sup>[8]</sup>; 电子显微镜扫描表明 POM 主要由不同降解时期的根碎片组成<sup>[9]</sup>; LFOC 主要由未分解的植物残余以及植物残余部分降解的产物组成<sup>[29]</sup>; TOC 表明土壤中全部有机碳的总和; BR 表明微生物矿化土壤有机碳的速率, 反映固有微生物库总的活性或能量消耗。可见 PC1 代表了指标中的大多数信息, 主要由反映土壤中各形态有机碳含量的指标, 因此可称 PC1 为含量因子。PC2 的主要贡献指标均与微生物有关, 如 MBC 直接表征土壤中微生物的生物量或者数量,  $M_q$  表征土壤有机碳可转化为微生物生物量碳的比例, 与土壤表层所留存的植物残余的质量有关, 同时与输入土壤的有机质的化学多样性高低有关,  $qCO_2$  可用于确定环境变化对微生物群落的影响<sup>[30]</sup>, 因此可称 PC2 为微生物因子, 影响土壤有机碳分解与潜在变化。

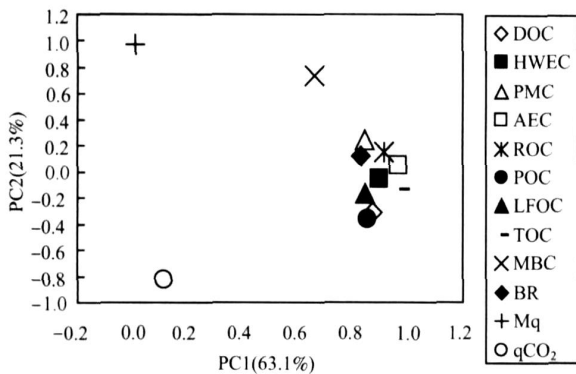


图 1 各土壤有机碳变化指标主成分分析的因子载荷图  
Fig. 1 Ordination plot based on PCA of all soil organic carbon indices

以 PC1 与 PC2 为指示因子, 可反映处理间土壤有机碳差异。由图 2 可知, 相比于 CK, 施用秸秆处理 (M、) 在 PC1 上的差异显著, 即农田施用秸秆后明显改变了土壤各种形态有机碳含量与组成, 有利

于 DOC、HWEC、PMC、AEC、ROC、POC、LFOC 与 TOC 含量提高以及 BR 值的增加; 混施秸秆 (I) 与表施秸秆 (M) 也表现出明显分异, 混施秸秆更有利于 DOC、HWEC、PMC、AEC、ROC、POC、LFOC 与 TOC 含量提高以及 BR 值的增加; 组成 PC1 主要信息的指标 DOC、HWEC、PMC、BR、AEC、ROC、POC、LFOC 与 TOC 在指示秸秆施用及施用方式上作用相近或相关。在两种秸秆施用方式下, 接种蚯蚓在 PC1 上的差异不明显, 但在 PC2 上表现出明显差异, 且均为接种蚯蚓有利于 PC2 的增大, 也即  $M_q$ 、 $qCO_2$  与 MBC 等微生物指标对接种蚯蚓的指示作用较明显, 这 3 项指标均可用于指示接种蚯蚓后对有机碳的潜在影响。

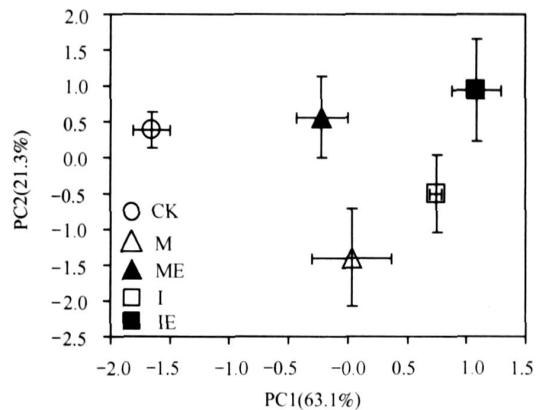


图 2 各样品在主成分提取公因子上的载荷图  
Fig. 2 Ordination plot based on PCA of all soils

### 2.5 各指标的聚类分析

运用指标聚类分析 (Cluster Analysis) 对所选的 12 种指标进行聚类合并, 以便在众多指标中选择出优先观测的指标。12 类指标经聚类后可得到各指标的树形结构图 (图 3), 由图可知: 指标 TOC 与 AEC、

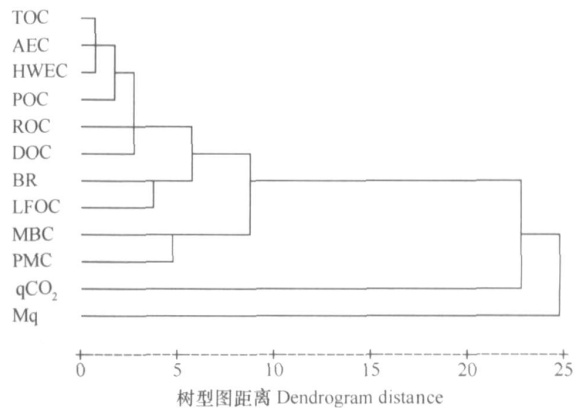


图 3 土壤有机碳变化指标聚类分析树形图  
Fig. 3 Cluster analysis dendrogram of soil organic carbon indices using average linkage (between Groups)

HWEC, ROC 与 DOC, BR 与 LFOC, MBC 与 PMC 先行合并, 然后它们的合并项或其他指标再进行合并, 最后可合并为两大类指标。换言之, 在对所研究土壤有机碳评价时,  $M_q$  是必选的指标, 其余指标可任选一个即可对有机碳的动态进行粗略评价。若要在上述粗略评价外, 更进一步观测有机碳细微变化与组成变化, 则可加测  $qCO_2$ , 依次类推。

## 2.6 各指标间的线性回归

基于上述主成分分析结果, 对 PC1 信息主要

来源的各指标进一步分析表明, PC1 类的各指标除 BR 与 POC 间的相关系数较低, 为 0.508 外, 其余各指标间均显著相关 ( $p < 0.05$  或  $p < 0.01$ , 数据未列出), 因此可求得各指标间的线性回归方程 (见表 2)。在以后的测定中, 在某一指标已测得的情况下, 其他指标可用线性回归方程求得并用于估算与预测, 以此来简化工作量。而对于 PC2 信息主要来源的指标较少且相互间相关性较差, 可全部通过测定求得。

表 2 各指标间的线性回归方程

Table 2 Regression equations between different indices

自变量指标 Independent indices		TOC	DOC	HWEC	PMC	BR	AEC	ROC	POC	LFOC
TOC	a	—	- 34.21	- 148.6	35.15	0.637	179.2	- 1.430	- 1.528	- 2.344
	b	—	6.047	41.02	27.49	5.297	67.28	0.345	0.374	0.552
	$R^2$	—	0.783	0.833	0.599	0.604	0.853	0.713	0.783	0.579
DOC	a	6.160	—	101.8	209.2	33.53	603.6	0.727	0.798	1.015
	b	0.137	—	5.743	3.491	0.710	8.635	0.045	0.050	0.078
	$R^2$	0.827	—	0.721	0.447	0.480	0.621	0.546	0.621	0.509
HWEC	a	4.450	- 7.886	—	164.3	28.99	467.2	- 0.068	0.025	0.339
	b	0.020	0.126	—	0.524	0.084	1.422	0.008	0.008	0.010
	$R^2$	0.833	0.721	—	0.461	0.307	0.770	0.747	0.752	0.390
PMC	a	2.391	- 17.08	- 35.17	—	4.531	297.0	- 0.653	- 0.263	- 1.068
	b	0.023	0.128	0.879	—	0.153	1.695	0.008	0.007	0.013
	$R^2$	0.627	0.447	0.461	—	0.609	0.652	0.468	0.347	0.372
BR	a	3.318	- 13.51	34.73	87.68	—	386.8	- 0.368	0.228	- 1.464
	b	0.114	0.676	3.653	3.976	—	8.013	0.041	0.032	0.084
	$R^2$	0.604	0.480	0.307	0.609	—	0.562	0.471	0.258	0.617
AEC	a	- 1.010	- 36.74	- 206.2	- 19.90	- 6.952	—	- 2.237	- 2.065	- 3.698
	b	0.013	0.072	0.541	0.385	0.070	—	0.005	0.005	0.008
	$R^2$	0.853	0.621	0.770	0.652	0.562	—	0.788	0.728	0.653
ROC	a	5.414	- 0.751	57.71	182.0	28.55	514.0	—	0.482	0.245
	b	2.066	12.02	95.10	58.07	11.48	158.3	—	0.785	1.402
	$R^2$	0.713	0.546	0.747	0.468	0.471	0.788	—	0.575	0.623
POC	a	5.053	- 3.207	48.05	189.5	32.27	508.7	0.295	—	0.228
	b	2.092	12.38	92.12	48.31	8.184	146.9	0.732	—	1.284
	$R^2$	0.783	0.621	0.752	0.347	0.258	0.728	0.575	—	0.560
LFOC	a	6.067	2.007	110.5	201.1	28.43	562.0	0.466	0.639	—
	b	1.048	6.537	38.71	29.18	7.376	81.16	0.445	0.436	—
	$R^2$	0.579	0.509	0.390	0.372	0.617	0.653	0.623	0.560	—

注: a 和 b 分别指代回归方程  $y = a + bx$  中的常量,  $R^2$  为决定系数 Notes: a and b mean the constant in the regression equation  $y = a + bx$ , and  $R^2$  means the determinant coefficient

## 3 结论

施用秸秆使土壤各种形态有机碳含量增加, 而不同秸秆施用方式对不同形态有机碳的影响各异; 在施用秸秆下接种蚯蚓使土壤微生物活性发生显著变化, 且不同秸秆施用方式下接种蚯蚓的差异不同。12 类土壤有机碳变化的表征指标在指示农田土壤加施秸秆和接种蚯蚓的影响时, 可以全面与综合地

反映土壤有机碳的数量变化与组成变化, 但在日常性的测定与评价时则不必全部选用。依据研究目的可选用不同指标来指示土壤有机碳的变化, 如要了解秸秆施用对有机碳含量与组成的影响, 则可选用与土壤有机碳含量有关的指标如 DOC、HWEC、PMC、BR、AEC、ROC、POC、LFOC 与 TOC 对土壤有机碳变化加以测定与评价, 且可只选取一种或两种指标进行测定, 其他指标可通过回归方程求得; 若要了解秸秆施用下蚯蚓活动对土壤有机碳变化的影响, 则应

选用与微生物有关的指标如 MBC、Mq 与  $qCO_2$  进行测定与评价。

## 参考文献

- [ 1 ] Zhao Y C, Shi X Z, Yu D S, *et al.* Soil organic carbon density in Hebei Province, China: Estimates and uncertainty. *Pedosphere*, 2005, 15(3): 293 ~ 300
- [ 2 ] Bruce J P, Frome M, Haites E, *et al.* Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 54(1): 382 ~ 389
- [ 3 ] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123: 1 ~ 22
- [ 4 ] 李萍, 熊伟, 冯平, 等. 秸秆还田对西藏中部退化农田土壤的影响. *土壤*, 2004, 36(6): 685 ~ 687. Li P, Xiong W, Feng P, *et al.* Effect of straw application on degraded soil in central Tibet (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(6): 685 ~ 687
- [ 5 ] Lavelle P, Bignell D, Lepage M, *et al.* Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 1997, 33(4): 159 ~ 193
- [ 6 ] Blair G J, Lefrog 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. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1 459 ~ 1 466
- [ 7 ] Chan K Y, Heenan D P. Microbial-induced soil aggregate stability under different crop rotations. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30: 29 ~ 32
- [ 8 ] Loginow W, Wisniewski W, Gonet S S, *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20: 47 ~ 52
- [ 9 ] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of American Journal*, 1992, 56: 777 ~ 783
- [ 10 ] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, *et al.* Influence of cultivation and fertilization on total organic carbon and carbon fractions in soils from the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77: 59 ~ 68
- [ 11 ] Yang C M, Yang L Z, Zhu O Y. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes. *Geoderma*, 2005, 124: 133 ~ 142
- [ 12 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 107 ~ 108. Lu R K. Analytical Methods of Soil and Agrochemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. 107 ~ 108
- [ 13 ] Sparling G P, Feltham C W, Eynolds J R, *et al.* Estimation of soil microbial C by a fumigation-extraction method: Use on soils of high organic matter content and a reassessment of the K<sub>ec</sub>-Factor. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(3): 301 ~ 307
- [ 14 ] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703 ~ 707
- [ 15 ] Angers D A, Recous S. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. *Plant and Soil*, 1997, 189: 197 ~ 203
- [ 16 ] 李小刚, 崔志军, 王玲英. 施用秸秆对土壤有机碳组成和结构稳定性的影响. *土壤学报*, 2002, 39(3): 421 ~ 428. Li X G, Cui Z J, Wang L Y. Effect of straw on soil organic carbon constitution and structural stability (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 421 ~ 428
- [ 17 ] 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 539 ~ 542. Wu Z J, Zhang H J, Xu G S, *et al.* Effect of returning corn straw into soil on soil fertility (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 539 ~ 542
- [ 18 ] Brown P L, Dickey D D. Losses of wheat straw residue under simulated residue conditions. *Soil Science Society of American Proceeding*, 1970, 34: 118 ~ 121
- [ 19 ] Christensen B T. Barley straw decomposition under field conditions: Effects of placement and initial nitrogen contents on weight loss and nitrogen dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 1986, 18: 523 ~ 529
- [ 20 ] Curry J P, Byrne D. Role of earthworms in straw decomposition in a winter cereal field. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 29(314): 555 ~ 558
- [ 21 ] Isaac S R, Nair M A. Biodegradation of leaf litter in the warm humid tropics of Kerala, India. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1 656 ~ 1 664
- [ 22 ] Jéou D, Cluzeau D, Balesdent J, *et al.* Effects of four ecological categories of earthworms on carbon transfer in soil. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9: 249 ~ 255
- [ 23 ] Jéou D, Cluzeau D, Hallaire V, *et al.* Burrowing activity of the earthworms *Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea giardi* and consequences on C transfers in soil. *European Journal of Soil Biology*, 2000, 36: 27 ~ 34
- [ 24 ] Subler S, Kirsch A S. Spring dynamics of soil carbon, nitrogen, and microbial activity in earthworm middens in a no-till cornfield. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26: 243 ~ 249
- [ 25 ] Marhan S, Scheu S. Effects of sand and litter availability on organic matter decomposition in soil and in casts of *Lumbricus terrestris* L. *Geoderma*, 2005, 128: 155 ~ 166
- [ 26 ] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Contrals on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, 165: 277 ~ 304
- [ 27 ] Leinweber P, Schulten H R, Korschens M. Hot water extracted organic matter: Chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 20: 17 ~ 23
- [ 28 ] Angers D A, Mehuys G R. Barley and alfalfa cropping effects on carbohydrate contents of a clay soil and its size fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 285 ~ 288
- [ 29 ] Spycher G, Sollins P, Rose S. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: Vertical distribution and seasonal patterns. *Soil Science*, 1983, 135: 79 ~ 87
- [ 30 ] Anderson T H, Domsch K H. Application of eco-physiological quotients ( $qCO_2$  and  $qD$ ) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(2): 251 ~ 255

## INDICES FOR CHANGES IN ORGANIC CARBON IN SOILS SUBJECT TO STRAW APPLICATION AND EARTHWORM ACTIVITY

Yu Jianguang Li Huixin Hu Feng<sup>†</sup>

( College of Resources and Environmental Sciences , Nanjing Agricultural University , Nanjing 210095 , China)

**Abstract** Through use of the principal component analysis (PCA) and cluster analysis (CA) methods ,sensitivity was analyzed of characteristic indices of changes in organic carbon in soils subject to straw application and earthworm (*Metaphire guillelmi*) activity in a long-term rice-wheat rotation field experiment. Results show that these indices varied in response to straw application and earthworm activity. When all the indices chosen were used , the changes in content and composition of soil organic carbon could be reflected relatively inextenso ,but too much information and inconsistency of the information embarrassed further analysis. According to the principal component analysis (PCA) and cluster analysis (CA) methods ,these indices could be divided into two groups ,one related to soil organic carbon content ,including dissolved organic carbon (DOC) ,hot water extractable carbon (HWEC) ,potentially mineralizable carbon (PMC) ,basal respiration (BR) ,acid extractable carbon (AEC) ,readily oxidation carbon (ROC) ,particulate organic carbon (POC) ,light fraction organic carbon (LFOC) ,total organic carbon (TOC) ,and the other related to microbes and having some potential influence on soil organic carbon ,including microbial quotient (Mq) , $qCO_2$  and microbial biomass carbon (MBC) . The former could be used to evaluate effect of straw application on soil organic carbon ,and the latter to evaluate potential effect of earthworm activity on soil organic carbon.

**Key words** Index ;Soil organic carbon ;Straw ;Earthworm ;Selection