

## 秸秆还田对小麦—玉米轮作田土壤 有机碳质量的影响

高翔<sup>1</sup>, 沈阿林<sup>2\*</sup>, 寇长林<sup>2</sup>, 马政华<sup>2</sup>, 王文亮<sup>1</sup>, 郭战玲<sup>2</sup>

(1. 河南农业大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450002;

2. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 利用小麦—玉米轮作条件下不同秸秆还田方式进行定位试验, 对不同秸秆还田方式下土壤有机碳和活性有机碳含量进行了 6 a 11 季连续监测, 结果表明: 单施化肥和秸秆还田配施化肥均能提高土壤有机碳含量; 3 种还田方式均能显著提高活性有机碳和碳库管理指数, 表现为玉米秸秆还田 > 两季秸秆还田 > 小麦秸秆还田; 3 种秸秆还田处理的土壤有机碳增长速率为玉米秸秆还田 > 两季秸秆还田 > 小麦秸秆还田。小麦季玉米秸秆还田对有机碳活性提升效果优于两季秸秆还田和玉米季小麦秸秆还田。

**关键词:** 连续耕作; 秸秆还田; 小麦—玉米轮作; 土壤有机碳; 活性有机碳

**中图分类号:** S153.6<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2012)09-0063-05

## Effects of Straw Application on Soil Organic Carbon and Active Organic Carbon in Wheat-corn Rotation System

GAO Xiang<sup>1</sup>, SHEN A-lin<sup>2\*</sup>, KOU Chang-lin<sup>2</sup>, MA Zheng-Hua<sup>2</sup>,

WANG Wen-liang<sup>1</sup>, GUO Zhan-ling<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Institute of Plant Nutrition, Resources and Environmental Sciences, Henan Academy of Agricultural  
Sciences, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A 6-year field experiment was carried out to study the effects of corn stover or/and wheat straw incorporated with chemical fertilizers on organic carbon and active organic carbon in soil in a wheat and corn rotation system. The results showed that the treatments of chemical fertilizer applied only and chemical fertilizer applied with straw returning increased the active organic carbon proportion in soil. All three methods of straw returning significantly improved the quantity of labile organic carbon(LOC) and (carbon management index)(CMI), which was in the follow order: corn straw application > corn and wheat straw application > wheat straw application. And for the total organic carbon(TOC) increase speed was corn straw applied > corn stover and wheat straw applied > wheat straw applied. There was higher organic carbon activity in the treatment of returning corn straw in wheat season than the treatment of both corn stover and wheat straw applied in two seasons or the treatment of wheat straw applied in corn season.

**Key words:** continuous cultivation; straw returned; wheat-corn rotation system; soil organic carbon; active organic carbon

秸秆还田是近年来我国推行农田地力培肥的一项重要技术。连续的秸秆还田能够提高土壤有机碳

含量,改善土壤品质<sup>[1-2]</sup>, 同时还能减少因秸秆焚烧给环境带来的污染。土壤有机碳(TOC)作为土壤的重

收稿日期: 2012-04-10

基金项目: 国家小麦产业技术体系(CARS-3); 农业部公益性行业(农业)科研专项(200803030, 201103003)

作者简介: 高翔(1987-), 男, 河南郑州人, 在读硕士研究生, 研究方向: 植物营养。E-mail: gaoliang86@163.com

\* 通讯作者: 沈阿林(1962-), 男, 浙江富阳人, 研究员, 博士, 主要从事土壤化学和植物营养研究。E-mail: shenalin\_123@126.com

要组成部分,能够为作物提供养分,有助于形成土壤团聚体改善土壤结构<sup>[3]</sup>,因此,土壤有机质(碳)含量往往作为土壤肥力高低的一个重要表征指标。但这一指标对土壤管理变化的反应不够敏感,难以快速、准确和全面地反映农田管理措施变化对土壤肥力产生的实际影响。鉴于此,近年来很多学者提出了土壤活性有机质的概念,试图对有机质进行分组,找到能灵敏反映土壤管理带来的肥力变化、表征土壤综合活力水平的指标<sup>[4]</sup>。有研究者把活性有机碳分为易氧化有机碳(LOC)、溶解有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、生物量有机碳(MBOC)等<sup>[2]</sup>,其中 LOC 是指土壤与氧化剂作用后,易被氧化、不稳定的那部分有机碳<sup>[5]</sup>。Logninow 等<sup>[6]</sup>提出,通过不同浓度的高锰酸钾与有机碳反应,根据土壤有机碳对高锰酸钾的敏感程度可进行土壤有机碳活性的分级。Lefroy 等<sup>[7]</sup>研究发现,能被 333 mmol/L 高锰酸钾氧化的有机碳在种植作物时变化最大,而且在此浓度下测定的有机碳变异系数小,也具有操作简便、快速准确等优点<sup>[8]</sup>。因此,很多研究者都把能被 333 mmol/L 高锰酸钾氧化的有机碳部分称之为活性有机碳,而剩余部分称为非活性有机碳。Blair 等<sup>[9]</sup>在上述研究基础上提出了土壤碳库管理指数(CMI)这一概念,CMI 是指土壤有机碳与对照土壤有机碳的比值乘以土壤有机碳的活度指数,它将 TOC 和 LOC 整合成为一个整体的量化概念,不仅能指示出土壤管理措施引起的土壤有机碳变化,而且还能反映农作措施使土壤质量下降或更新的程度。相比而言,CMI 是一种更系统、更敏感的监测土壤碳变化和有机碳质量变化的方法<sup>[10-11]</sup>。

小麦—玉米轮作是黄淮海地区主要的轮作制度,近年来随着各类化学肥料投入量的增加,无论是作物的生物产量还是子实产量都得到稳定提高,秸秆还田的面积和数量也迅速增加。有报道认为,在室内模拟条件下,玉米秸秆比小麦秸秆更易腐解,不同秸秆对土壤有机碳提升能力不同,表现为玉米秸秆>玉米、小麦秸秆混合>小麦秸秆<sup>[12]</sup>。本研究依托小麦玉米轮作下秸秆还田长期试验,对不同秸秆还田方式下的土壤有机碳和活性有机碳的变化进行了 6 a 的连续监测,从有机培肥角度讨论秸秆还田方式对土壤有机碳质量的影响,以期丰富秸秆还田培肥理论与技术提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试土壤

秸秆还田定位试验设置在河南省浚县黎阳镇付庄村,位于北纬 35°38′03.26″,东经 114°29′34.03″,

种植模式为小麦—玉米轮作。试验共设 5 个处理,分别为:(1)CK 处理——秸秆不还田不施化肥;(2)单施化肥处理——小麦、玉米季秸秆均不还田,单施化肥;(3)两季秸秆还田处理——小麦、玉米两季秸秆均还田配施化肥;(4)小麦秸秆还田处理——玉米季小麦秸秆还田配施化肥,小麦季单施化肥;(5)玉米秸秆还田处理——小麦季玉米秸秆还田配施化肥,玉米季单施化肥。

除 CK 外,其余各处理具体施肥方案均为:小麦季氮肥 225 kg/hm<sup>2</sup>,60%用作底肥,40%拔节期追施;磷肥 120 kg/hm<sup>2</sup> 和钾肥 120 kg/hm<sup>2</sup> 作小麦底肥施入。玉米季氮肥 225 kg/hm<sup>2</sup>,40%用作基肥或于苗期追施,60%于大喇叭口期(播后 40~45 d)追施;磷肥 90 kg/hm<sup>2</sup> 和钾肥 120 kg/hm<sup>2</sup> 作底肥施入。

田间小区面积为 4 m×5 m,重复 3 次,随机排列。每季还田的秸秆均为当季小区内作物收获后剩余秸秆,秸秆粉碎后深耕 25~30 cm。不还田处理的小区秸秆通过人工清除出小区。试验地基础土壤理化性质为:土壤有机碳 8.93 g/kg,全氮 0.71 g/kg,碱解氮 75.25 mg/kg,速效磷 6.49 mg/kg,速效钾 109.45 mg/kg。

试验自 2005 年小麦季开始至 2011 年玉米季结束。从 2006 年 9 月开始采集小麦收获时和玉米收获时共计 11 季的耕层土样(0~30 cm),供测试分析用。

### 1.2 测定指标及方法

土壤有机碳采用丘林法测定。土壤活性有机碳(易氧化有机碳)测定参照于荣等<sup>[8]</sup>的方法,即:称取约含 15 mg 碳的土壤样品于 50 mL 塑料旋盖的离心管中;加入 25 mL 333 mmol/L 的高锰酸钾,振荡 1 h,然后在 2 000 r/min 下离心 5 min,将上清液用去离子水以 1:500 比例稀释,在分光光度计 565 nm 下测定稀释样品的吸光率,由不加土壤的空白与土壤样品的吸光率之差,计算出高锰酸钾浓度的变化,并进而计算出氧化的碳量(氧化过程中 1 mmol 高锰酸钾消耗 0.75 mmol 或 9 mg 碳)。

所有的土壤均以基础土样为参照土壤。根据参照土壤和样品的有机碳、活性有机碳含量计算土壤碳库指数(CMI),具体计算方法为:

$$CMI = \frac{TOC}{OTOC} \times \left( \frac{LOC}{TOC-LOC} \div \frac{OLOC}{OTOC-OLOC} \right) \times 100\%$$

式中:CMI 为碳库管理指数;OTOC 为参照土壤总碳含量;OLOC 为参照土壤活性碳含量;TOC 为样品总碳含量;LOC 为样品活性碳含量。

2 结果与分析

2.1 不同方式秸秆还田 6 a 后 TOC、LOC 及 CMI 的变化

从表 1 可看出,在单季作物施用纯氮 225 kg/hm<sup>2</sup>并配施磷钾肥的基础上,连续 6 a 单施化肥和连续 6 a 进行一季或两季秸秆还田后,TOC 较试验前耕层土壤(2005 年 10 月)均有所增加,两季秸秆还田、玉米秸秆还田、小麦秸秆还田、单施化肥处理的 TOC 增加幅度由大到小依次为 18.14%、15.12%、9.07%和 7.05%,而既不施肥又不进行秸秆还田的 CK 处理,土壤 TOC 较初始土样显著下降了 6.83% ( $P<0.05$ )。

表 1 不同方式秸秆还田 6 a 后耕层土壤(0~30 cm)TOC、LOC、CMI 的变化

处理	TOC/(g/kg)	LOC/(g/kg)	CMI
试验前	8.93a	1.04d	100
CK	8.32±0.10b	1.14±0.21d	112.07
单施化肥	9.56±0.22a	1.04±0.29d	98.77
两季秸秆还田	10.55±0.02a	1.70±0.16b	172.51
小麦秸秆还田	9.74±0.21a	1.53±0.27c	154.78
玉米秸秆还田	10.28±0.09a	1.81±0.27a	186.47

注:“±”符号后为标准差;同列数字后不同小写字母表明 5% 水平上差异显著。

对耕层土壤 LOC 连续 6 a 观察发现,3 种还田方式均能显著提高土壤 LOC,而且不同还田方式间土壤 LOC 含量差异显著,表现为玉米秸秆还田>两季秸秆还田>小麦秸秆还田,LOC 的提升幅度分别为 74.04%、63.46%、47.12%,而 CK 和单施化肥的 LOC 与原始土壤相比差异不显著。CMI 的变化

趋势与 LOC 相同,为玉米秸秆还田>两季秸秆还田>小麦秸秆还田>CK>单施化肥。

以上结果说明,不同秸秆还田方式与单施化肥均能提高 TOC,但对土壤 LOC 的贡献表现出较明显差异,玉米还田秸秆对土壤 LOC 的积累贡献大于小麦秸秆还田。长期单施化肥处理的土壤 LOC 变化不明显,但 CMI 出现下降。

2.2 不同方式连续秸秆还田下 TOC 及 LOC 的动态变化

TOC 的变化反映出土壤中有机碳矿化、分解与形成之间的平衡状况。由图 1 可知,CK 处理试验 2 a 后 TOC 在较低水平呈现波动,其含量在 7.12~8.27 g/kg;秸秆不还田下单施化肥处理的 TOC 波动范围较大,在作物季间和年际间呈现较大变化,其变化范围在 8.09~9.95 g/kg;3 种方式连续秸秆还田下土壤 TOC 变化范围在 7.12~10.68 g/kg,在试验初期 3 种还田方式的 TOC 含量均低于秸秆未还田处理,但在连续数年秸秆还田后整体上呈现出不断增长的趋势,说明连续秸秆还田能够使 TOC 持续增加。从 2006 年 9 月到 2011 年 10 月的 6 a 间,对小麦秸秆还田、两季秸秆还田、玉米秸秆还田 3 个处理,以时间( $x$ )和 TOC 含量( $y$ )进行线性拟合,得到方程分别为  $y=0.2586x+7.3039(R^2=0.8466)$ 、 $y=0.2695x+7.7829(R^2=0.9285)$ 、 $y=0.3702x+6.5832(R^2=0.9398)$ ,从方程斜率可以看出 TOC 增长速率为:玉米秸秆还田>两季秸秆还田>小麦秸秆还田。小麦季玉米秸秆还田下 TOC 增速最大,玉米季小麦秸秆还田处理的 TOC 增速较小。

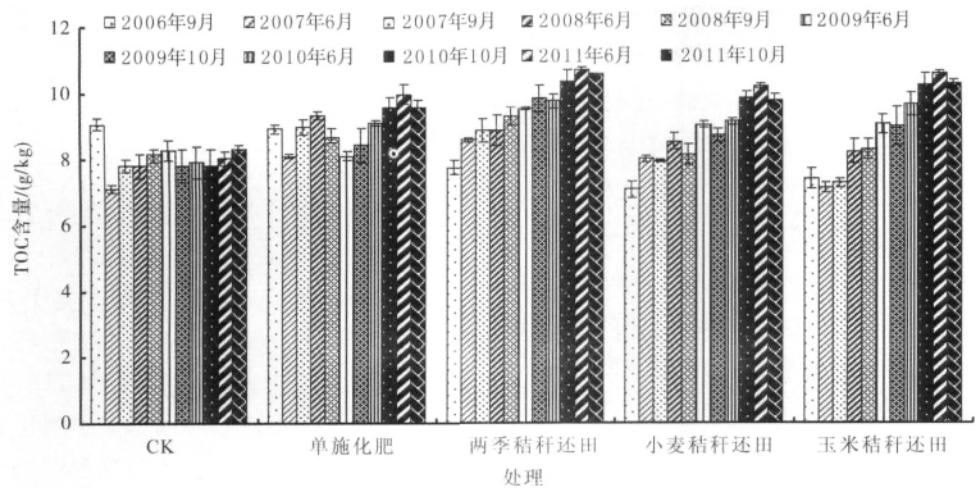


图 1 不同方式秸秆还田耕层 TOC 的动态变化

LOC 是 TOC 中活性较高、参与当季作物养分循环的有机碳。从图 2 中可以看出,相对于 TOC 总量而言,LOC 的变化幅度更大,规律更加明显。CK 的 LOC 变化范围为 0.64~1.15 g/kg,前期平均含量低于后期。单施化肥处理的 LOC 变化范围为 1.01~1.38 g/kg,在试验前 2 a(2008 年 6 月前)相对稳定,之后缓慢减少。3 种还田处理的 LOC 都在不断增加,从 2006 年 9 月到

2011 年 10 月对小麦秸秆还田、两季秸秆还田、玉米秸秆还田处理分别以时间( $x$ )和 LOC 含量( $y$ )进行线性拟合,得到方程分别为: $y=0.0871x+0.6998(R^2=0.8634)$ 、 $y=0.0942x+0.7758(R^2=0.9247)$ 、 $y=0.1066x+0.7068(R^2=0.9023)$ ,斜率分别为 0.0871、0.0942、0.1066,可以看出 LOC 增长速率玉米秸秆还田>两季秸秆还田>小麦秸秆还田。

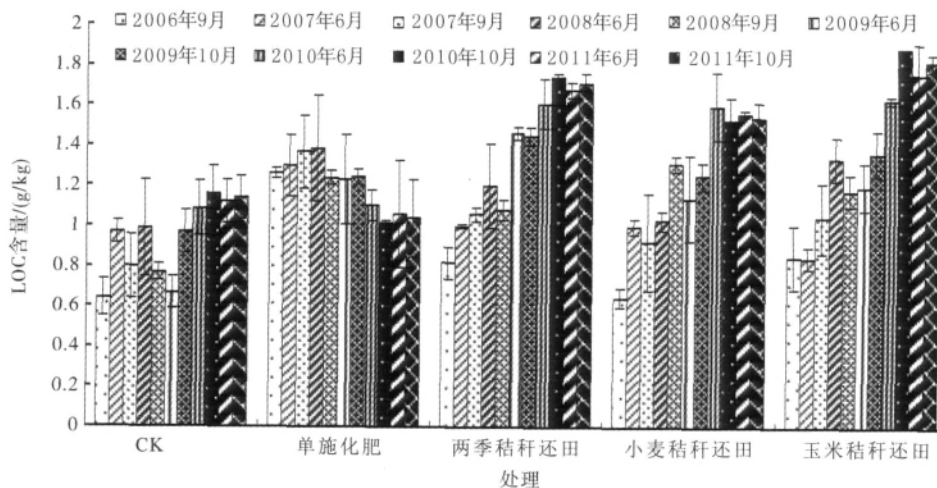


图 2 不同方式秸秆还田耕层 LOC 的动态变化

通过以上分析可以看出:①单施化肥能够提高 TOC,但 LOC 比例下降,且两者变化幅度均较小。说明土壤非活性有机碳正在增加,有机碳缓慢趋于钝化,随着时间推移将造成土壤有机碳质量下降,影响土壤中养分元素的转化与释放。②连续投入新鲜秸秆,TOC 能够得到不断提升;不同秸秆还田方式处理的 TOC 变化规律较为相似,均随着耕作年限不断增加,且同一时期不同处理间差异较小。这可能是由于秸秆还田后有机物料在土壤中发生了腐解转化和合成腐殖质等复杂的生化过程,该过程除了受投入新鲜秸秆类型与数量的影响外,还受到农田所处的特定生态环境的影响。③LOC 随着耕作年限不断增加,不同还田方式下 LOC 的增速依次为玉米秸秆还田>两季秸秆还田>小麦秸秆还田,这说明 LOC 的变化可能与秸秆类型有关。有研究通过盆栽试验,发现玉米秸秆比小麦秸秆更易腐解;小麦秸秆、玉米秸秆、2 种秸秆混合还田均能显著提高土壤有机碳和微生物量,且数量上表现为:玉米秸秆>两种秸秆混合>小麦秸秆的趋势<sup>[12]</sup>。本试验中 3 种还田方式对 LOC 的提升作用同样表现为玉米秸秆还田>两季秸秆还田>小麦秸秆还田,但处理间 TOC 的差异不显著。

### 2.3 不同方式连续秸秆还田下小麦收获期与玉米收获期 TOC、LOC 的均值比较

TOC 作为有机碳矿化、分解与再合成的平衡结果,受到合成与分解的双向作用与影响。一方面,添加新鲜有机碳能够产生激发效应,影响原有有机碳矿化速率。另一方面,小麦玉米两季之间气候条件和种植条件差异均较大,通常认为,玉米生长季气温、降水量等均高于小麦生长季,土壤微生物活性强,因此会引起年际内土壤 TOC 的较大波动。通过比较玉米收获期和小麦收获期 TOC、LOC 的均值,来分析玉米季与小麦季不同还田处理对 TOC、LOC 影响的差异。

将连续不同秸秆还田后 TOC、LOC 数据进行整理,按照小麦、玉米不同收获时期分别求得各处理玉米收获时期、小麦收获时期的 TOC、LOC 平均值(表 2)。结果显示,玉米收获期各处理 TOC 均值依次为两季秸秆还田>单施化肥>小麦秸秆还田>玉米秸秆还田>CK,小麦收获期各处理 TOC 均值依次为两季秸秆还田>小麦秸秆还田>单施化肥=玉米秸秆还田>CK,2 个收获期 TOC 测定结果的序列略有不同;除 CK 外,小麦收获期各处理土壤 TOC 均大于相对应的玉米收获期测定结果,单施化肥、两季秸秆还田、小麦秸秆还田、玉米秸秆还田分别高出 0.11、

0.39、0.41、0.52 g/kg。玉米季气候湿热有利于有机物质的分解,而小麦季气候更有利于有机碳的积累。

玉米收获期各处理土壤 LOC 均值依次为玉米秸秆还田>两季秸秆还田>单施化肥>小麦秸秆还田>CK;小麦收获期依次为两季秸秆还田>玉米秸秆还田>小麦秸秆还田>单施化肥>CK;CK、两季

秸秆还田、小麦秸秆还田、玉米秸秆还田 4 个处理的 LOC 均值均为小麦收获期均值大于玉米收获期,分别高出 0.10、0.15、0.14、0.09 g/kg;而单施化肥的 LOC 均值则表现为小麦收获期小于玉米收获期,差值为 0.01 g/kg。这说明土壤 LOC 可能受还田秸秆种类、数量和方式等多种因素的影响。

表 2 连续秸秆还田 6 a 后玉米收获期与小麦收获期 TOC、LOC 的平均值 g/kg

项目	收获期	CK	单施化肥	两季秸秆还田	小麦秸秆还田	玉米秸秆还田
TOC	玉米收获期	8.08	8.81	9.09	8.56	8.40
	小麦收获期	7.83	8.92	9.48	8.97	8.92
LOC	玉米收获期	0.87	1.22	1.23	1.12	1.26
	小麦收获期	0.97	1.21	1.38	1.26	1.35

3 结论

1) 连续不同方式秸秆还田均能够使 TOC 和 LOC 逐年增加,连续试验 6 a 后,以一年两熟秸秆均还田方式下土壤 TOC 升高最多,小麦季玉米秸秆还田方式下土壤 LOC 升高最多。

2) 不同还田方式中,小麦季玉米秸秆还田措施下土壤有机碳活性较高,因为小麦生长时期有利于土壤 TOC 的积累。

参考文献:

[1] 文炯,罗尊长,李明德,等. 土壤活性有机碳及其与土壤养分的关系[J]. 湖南农业科学,2009(1):57-60.

[2] 王永生,杨世琦. 活性有机碳有关指标及其与土壤养分关系研究进展[J]. 中国农学通报,2010,26(14):198-203.

[3] 奚森. 土壤有机质[M]. 北京:科学出版社,2010:295-299.

[4] 徐明岗,于荣,王伯仁. 土壤活性有机碳的研究进展[J]. 土壤,2000(1):3-7.

[5] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志,1999,18(3):32-38.

[6] Logninow W, Wisniewski W, Strong W M, *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J]. Polish J of Soil Sci, 1987, 20: 47-52.

[7] Lefroy R D B, Blair G, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and <sup>13</sup>C natural isotope abundance [J]. Plant and Soil, 1993, 155-156: 399-402.

[8] 于荣,徐明岗,王伯仁. 土壤活性有机质测定方法的比较[J]. 土壤肥料,2005(2):49-52.

[9] Blair G J, Lefroy 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 [J]. Australian J of Agric Res, 1995, 46: 1459-1466.

[10] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报,2006,43(5):723-729.

[11] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales [J]. Australian J of Soil Res, 1998, 36: 669-681.

[12] 南雄雄,田霄鸿,张琳,等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(3):626-633.