

长期耕种土壤剖面累积有机碳量的空间分布及影响因素

周建斌¹, 王春阳¹, 梁斌¹, 刘晓军¹, Kalbitz K²

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.德国拜罗伊特大学土壤生态系, 德国 拜罗伊特 D-95448)

摘要:以陕西关中地区古老的耕种土壤——壤土(系统分类属土垫旱耕人为土)为对象,研究了长期耕种及施肥对土壤剖面有机碳贮量及分布的影响。结果表明,供试的7个土壤剖面由于人为生产活动形成的覆盖层的厚度在40~71 cm之间(平均59 cm),其中有机碳贮量平均达59 268 kg·hm⁻²,占0~100 cm土壤剖面有机碳贮量的69%。与同一区域由黄土母质新垦殖的土壤相比,长期耕种壤土剖面有机碳的贮量显著增加;为期7 a的定位试验也发现,施用有机肥显著提高了0~100 cm土壤剖面有机碳贮量,说明长期耕种及施用有机肥在增加土壤剖面有机碳贮量方面具有突出的效应,几千年的农业生产显著增加了土壤有机碳贮量。在全球气候变暖的情况下,壤土这一古老的农业土壤为实现农业生产与环境保护“双赢”的目的,为进一步研究这类土壤有机碳累积及稳定性的机理,以及大量施用化肥特别是氮肥对土壤剖面不同层次累积有机碳的转化的影响等问题,提供了理想的研究材料。

关键词:长期耕种土壤;土壤剖面;有机碳贮量;施肥

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2540-05

Stock and Distribution of Organic Carbon in the Profiles of Soil with Long Cultivating History

ZHOU Jian-bin¹, WANG Chun-yang¹, LIANG Bin¹, LIU Xiao-jun¹, Kalbitz K²

(1.College of Resource & Environment Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Department of Soil Ecology, University of Bayreuth, Bayreuth 95440, Germany)

Abstract: The Lou soil (Typ -Eum -Orthic Anthrosols) located at Guanzhong plain, Shaanxi Province, was sampled to investigate the effects of cultivation and fertilization on the stock and distribution of organic carbon in the soil profiles. Results showed that the depths of anthropogenic layer of 7 soil profiles were in range of 40 to 71 cm (averaging 59 cm); and organic C stocks in this layer was 59 268 kg·hm⁻², accounting for 69% of organic C stocks in 0~100 cm soil profiles. Organic C stocks in Lou soil was higher than that in the newly cultivated soil developed from loess parent materials. 7-year fertilization field experiment indicated that the application of organic fertilizer significantly increased the organic C stocks in 0~100 cm soil profiles. It indicated that long-term cultivation and manuring had positive roles in increasing organic C stocks in soil profile. It is needed to study the mechanism of the accumulation and stabilization of organic C in the soil to balance agricultural production and C sequestration.

Keywords: soil with long cultivating history; soil profile; organic C stock; fertilization

温室效应的加剧,使得减少向大气中排放CO₂等温室效应气体成为全球关注的重要问题。全球土壤碳库的贮量是植物碳库的3倍,大气碳库的2倍^[1]。因此,土壤碳库的贮量及其动态变化是研究者关注的重要问题。自然土壤开垦为农田后降低了土壤碳贮量,其中温带土壤碳库的消减量可达60%,热带土壤高达

75%^[2]。据估计,由于农业耕作,全球农田土壤损失的碳量约50 Pg,甚至更多^[1]。在全球气候变化的情况下,如何在满足人类对农产品需求的同时增加土壤碳固持^[3],实现农业生产与环境保护“双赢”的目的是值得研究的问题。

黄土高原南部的关中地区是我国古代农业的发源地之一,具有悠久的施用农家肥的历史。基于这一地区农业生产实践为基础,距今两千余年前完成的我国现存最古的一部农书——《汜胜之书》就有“凡耕之本,在于趣时,和土,务粪泽”以及施用基肥、追肥和漫种的记载^[4]。由于长期施用土粪,在原地带性土壤——

收稿日期:2009-09-22

基金项目:中德合作科研项目(DAAD,CSC);国家自然科学基金项目(40571087);西北农林科技大学拔尖人才支持计划(2006)

作者简介:周建斌(1964—),男,陕西大荔人,博士,教授,主要从事土壤碳、氮转化与植物营养方面的研究。

E-mail:jzhou@nwsuaf.edu.cn

褐土剖面的基础上形成了厚度变化一般在 50~100 cm 的覆盖层^[5-7],形成了我国古老的耕种土壤之一——塿土(系统分类属土垫旱耕人为土)。关于这一土壤的形成特性及肥力特征已进行了大量的研究^[8],而对这一土壤剖面累积有机碳特性及其影响因素的研究尚少见报道。因此,本文以位于关中平原西部的杨凌示范区不同土壤为研究对象,对这一问题进行了研究。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

杨凌示范区位于陕西关中平原西部,属暖温带半湿润季风气候,年降水量 633 mm,多集中在 6、7、8 三个月,占年降水量的 50%以上。全年无霜期 315 d,全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为 4 184 $^{\circ}\text{C}$ 。长期以来,农业生产中实行小麦-玉米轮作一年两熟的种植方式。

1.2 不同土壤剖面有机碳贮量的研究

选择杨凌示范区位于渭河三级阶地的杜寨村(N:34°17'43.3",E:108°03'52.5")为研究对象,于2007年11月15—20日沿该村西南和西北两个方向由近及远分别采集0~200 cm土壤剖面样品,其中西南方向(用A代表)具体采样点为:A1(N34°17'41.3",E108°03'57.2")、A2(N34°17'28.8",E108°03'51.2")、A3(N34°17'23.8",E108°03'34.5")、A4(N34°17'22.6",E108°03'39.0");西北方向(用B代表)具体采样点为:B1(N34°17'47.0",E108°03'44.1")、B2(N34°17'50.7",E108°03'36.0")、B3(N34°17'50.9",E108°03'38.2"),其中A2、A4和B1采样时挖200 cm土壤剖面,按塿土发生层次^[7],即耕作层、犁底层、老耕层、固耕层、黏化层、钙积层和母质层采样,每一层的样品由3点汇合而成;同时测定各层次土壤容重(重复3次)。其余土壤剖面样品采样时,先挖100 cm土壤剖面,采集不同层次土壤样品;100 cm以下土层采用土钻采集。

在采集上述土壤剖面样品的同时,在采样区域选择因建筑挖去2.5~3 m上层土壤仅残留黄土母质、耕种时间不同的2个土壤剖面(耕种时间分别为2年和50余年,样点的位置分别为:N34°17'23.8",E108°03'28.3"和N34°17'25.3",E108°03'33.2"),采用上述方法采集土壤0~200 cm剖面样品。

采回的土样经风干、磨碎过筛后,采用TOC法测定有机碳含量,根据各层次土壤容重及层次厚度计算土壤有机碳贮量。

1.3 长期施肥对土壤剖面有机碳贮量的影响

以在西北农林科技大学农作一站塿土上已进行

的7a的小麦-玉米轮作肥料定位试验^[9]为研究对象,选择其中未施及施用有机肥时不施化肥、施用磷肥(P)、氮肥(N)及氮磷肥(NP)等组成的8个处理,采集土壤0~100 cm土壤剖面样品(每20 cm为一层),风干过筛后,采用外加热法测定土壤有机碳含量,根据各层次土壤容重及层次厚度计算土壤有机碳贮量。不同施肥处理有机肥及磷肥每年于小麦秋播前结合整地施用一次,全年有机肥用量为150 t·hm⁻²(有机肥养分含量为有机质85.3 g·kg⁻¹,全氮4.67 g·kg⁻¹,全磷3.55 g·kg⁻¹),全年磷肥(P₂O₅)的用量为150 kg·hm⁻²;氮肥(N)每季作物均施用,每季用量为157.5 kg·hm⁻²。

2 结果与分析

2.1 塿土不同土壤剖面及土层累积的有机碳数量

一般认为,塿土剖面的覆盖层(或土垫层)从上到下可分为耕层、犁底层和老耕层^[5,8]。由表1可以看出,供试的7个土壤剖面覆盖层的厚度在40~71 cm之间,平均59 cm。从覆盖层的厚度看,西南方向(A系列)距离村庄近的A1、A2剖面覆盖层的厚度大于距离村庄远的A3、A4剖面;西北方向(B系列)距离村庄近的B1剖面覆盖层的厚度深达71 cm,而距离村庄远的B3剖面覆盖层的厚度为51 cm。除B2剖面外,两个方向土壤剖面覆盖层的厚度有随距离村庄近厚度增加的趋势,这与长期耕种过程中农家肥优先施用于村庄较近的田块有关。

表 1 不同土壤剖面各发生层的深度(cm)

Table 1 Depths of the different horizons of soil profiles(cm)

层次	剖面编号 Soil profile						
Horizon	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
耕 层	0~20	0~16	0~23	0~22	0~17	0~16	0~13
犁底层	20~39	16~31	23~41	22~38	17~31	16~30	13~38
老耕层	39~60	31~63	41~56	38~50	31~71	30~40	38~51
古耕层	60~80	63~80	56~81	50~61	71~85	40~54	51~69
粘化层	80~160	80~142	81~157	61~135	85~166	54~140	69~140
钙积层	160~200	142~200	157~200	135~200	166~200	140~200	140~200

由表2可以看出,不同土壤剖面覆盖层累积的有机碳的贮量在51 973~76 160 kg·hm⁻²之间,平均59 268 kg·hm⁻²。0~100 cm土壤剖面累积有机碳的含量在73 746~91 667 kg·hm⁻²之间,平均85 523 kg·hm⁻²。耕层累积有机碳的量平均占0~100 cm土壤剖面累积有机碳的比例为32%,说明耕层土壤有机碳贮量占土壤剖面有机碳贮量比例显著高于其他层次。覆盖层有机碳贮量占0~100 cm土壤剖面有机碳贮量的

表 2 不同土壤剖面各层次累积有机碳的数量(kg·hm⁻²)
Table 2 Organic carbon stocks in the different horizons of soil profiles(kg·hm⁻²)

层次 Horizon	剖面编号 Soil profile							
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	平均 Average
耕 层	29 258	20 610	34 055	29 115	27 211	25 698	23 124	27 010
犁底层	16 840	12 718	21 324	13 982	23 016	16 587	25 350	18 545
老耕层	14 009	18 779	11 163	8 876	25 933	6 875	10 356	13 713
覆盖层合计	60 107	52 107	66 542	51 973	76 160	49 160	58 830	59 268
0~100 cm 土层	82 036	73 746	94 515	83 510	91 667	84 466	88 718	85 523
覆盖层累积有机碳占 0~100 cm 土层的比例/%	73.27	70.66	70.40	62.24	83.08	58.20	66.31	69.17

69%,占 0~200 cm 土壤剖面有机碳贮量的 45%,说明长期耕种形成的覆盖层有机碳贮量在塿土剖面有机碳贮量中占有重要作用。

不同土壤剖面累积有机碳量相比,B 系列(西北方向)距离村庄近的 B1 剖面覆盖层土壤有机碳的贮量显著高于距离村庄远的 B2 和 B3 剖面,分别比 B2 和 B3 剖面高出约 55%和 29%。A 系列(西南方向)中距离村庄近的 A1 剖面覆盖层土壤有机碳的贮量,明显高于距离村庄较远的 A2 和 A4 剖面,低于 A3 剖面有机碳贮量。

2.2 新开垦的土壤与塿土土壤剖面累积有机碳数量的比较

由图 1 可以看出,长期耕种的塿土 0~200 cm 土层,特别是 0~100 cm 各土层有机碳的贮量显著高于同一区域由黄土母质新垦殖的土壤。采集的 7 个长期耕种塿土 0~100 cm 剖面有机碳的贮量平均 84 567 kg·hm⁻²,而黄土母质耕种约 50 a 土壤 0~100 cm 剖面有机碳的贮量为 59 488 kg·hm⁻²,耕种 2 a 的土壤为 46 259 kg·hm⁻²;耕种约 50 a 土壤 0~100 cm 剖面有机碳的贮量较耕种 2 a 土壤的高 28%。塿土土壤剖面有

机碳贮量的增加反映了长期土壤发育过程及耕种的综合影响,而同是黄土母质、耕种时间不同两个土壤剖面有机碳贮量的差异反映了耕种对土壤有机碳贮量的影响。可见,长期耕种提高了土壤剖面有机碳的贮量,这与耕种后通过植物残体及施用的肥料加入到土壤中的有机物质数量多有关。

2.3 长期施肥对土壤剖面有机碳累积量的影响

由图 2 可以看出,与未施有机肥处理相比,连续 7 a 施用有机肥各处理显著提高了土壤 0~100 cm 剖面各土层有机碳贮量,其中以 0~20 cm 土层有机碳贮量的增加最为显著,平均较未施有机肥处理增幅达近一倍。*t* 检验表明,0~100 cm 各土层土壤有机碳的贮量的增加均达显著或极显著水平,说明增施有机肥不仅增加了土壤耕层有机碳贮量,而且增加了耕层以下土壤剖面有机碳贮量。

未施有机肥时,与未施肥对照(CK)及单施磷肥处理(P)相比,施用氮肥或氮磷肥配合处理(N,NP)明显增加了土壤 0~100 cm 各土层有机碳的贮量;N 及 NP 处理土壤 0~100 cm 剖面有机碳贮量比 CK 和 P 处理平均增加了 17%。施用有机肥时(M),氮磷肥配合处

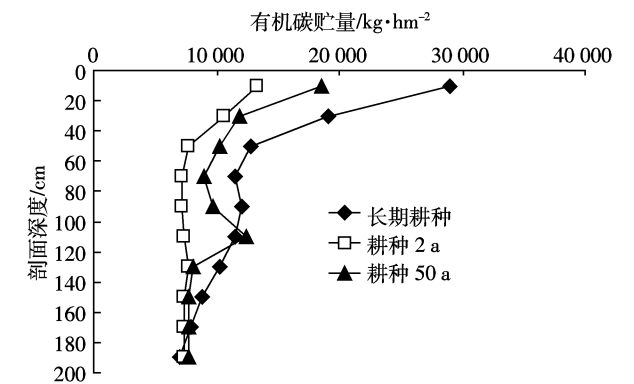


图 1 新开垦土壤与塿土剖面累积有机碳贮量的比较
Figure 1 Comparisons of organic carbon stocks in the profiles of soil with different cultivating history

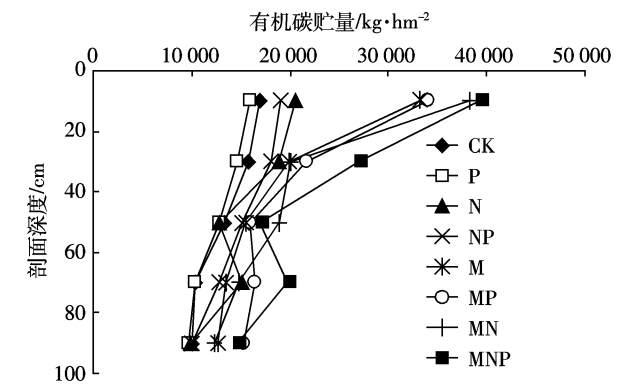


图 2 不同施肥处理对土壤剖面 0~100 cm 土层有机碳贮量的影响
Figure 2 Effects of different fertilizer treatments on organic carbon stocks in 0~100 cm soil profiles

理也显著提高了土壤 0~100 cm 有机碳的贮量。不同处理相比,以氮磷肥与有机肥配合施用处理 (MNP) 0~100 cm 土壤剖面有机碳贮量最高,达 117 543 kg·hm⁻²。

3 讨论

作为我国典型的农业土壤之一,壤土是在这一地区原地带性土壤——褐土剖面的基础上长期施用土粪,不断迭加而形成的;覆盖层的厚度与距离村庄的远近密切相关,距村庄近土层厚,远则薄^[5-8]。本研究中,供试的 7 个土壤剖面覆盖层的厚度在 40~71 cm 之间(平均 59 cm),处在已报道的范围^[8]。土壤剖面覆盖层的厚度也有随距离村庄近而增加的趋势。

本研究测定的 7 个土壤剖面覆盖层有机碳贮量平均达 59 268 kg·hm⁻²,占 0~100 cm 土壤剖面累积有机碳比例的 69%,0~200 cm 土层的 45%。覆盖层的形成是长期农业生产中不断施用土粪形成的^[5],说明长期耕种及施肥增加了土壤剖面有机碳贮量,覆盖层有机碳贮量在壤土剖面有机碳贮量中占有重要地位。与同一区域由黄土母质新垦殖的土壤相比,长期耕种壤土剖面有机碳的贮量显著增加(图 1)。为期 7 a 的定位试验研究表明(图 2),施用有机肥显著提高了土壤 0~100 cm 有机碳贮量,与未施有机肥相比,增加幅度达 49%。这些数据均佐证了长期耕种及施用有机肥在增加土壤剖面有机碳贮量方面的效应。这与国外报道的,农业生产导致农田土壤剖面有机碳贮量降低有所不同^[2]。国内学者对稻田土地利用对陆地碳循环与应对气候变化的特殊贡献研究发现^[10-11],作为我国特殊的农业土地利用方式,稻田不但是最重要的粮食生产保障,也是我国农业固碳减排十分重要的土壤类型和农作系统。因此,在全球气候不断变暖的大背景下,有必要深入研究具有我国特色的不同生态系统及土壤类型固碳的特性,以在满足人类对农产品需求的同时增加土壤碳固持。

与不同土壤剖面覆盖层厚度随距离村庄远近呈较明显的变化趋势相比,土壤剖面有机碳贮量随距离村庄远近的变化趋势相对较小,这一方面可能与不同田块长期施用土粪的质量、耕作方式等的差异有关;另一方面,与采集的土壤剖面样品数量少有关。有必要加大采样密度,进一步查明距离村庄不同区域土壤剖面有机碳的空间分布特性。

耕层土壤有机碳含量高,受耕作施肥等影响大。因此,这一层有机碳含量及其动态变化是研究者关注的重点。本研究供试土壤 20 cm 以下土壤剖面有机碳

贮量占 0~100 cm 有机碳总贮量的 65.7%;100 cm 以下剖面有机碳的贮量占 0~200 cm 有机碳总贮量的 35%。有研究表明,温带草地 20 cm 以下土层碳贮量占 100 cm 土层碳贮量的 59%^[12]。据估计,100 cm 以下土壤剖面的碳贮量在 760~1 520 Pg 之间^[13]。因此,耕层以下土壤有机碳贮量及其变化,也是值得关注的问题。在美国进行的长期定位试验发现,施用氮或磷肥促进了亚表层(16~46 cm)土壤有机碳的矿化,降低了 0~46 cm 土层碳贮量^[14]。Fontaine 等^[15]研究发现,供应新鲜的植物碳源,促进了 60~80 cm 土层具有约(2 567±226)a 历史有机碳的矿化,因而认为任何影响新鲜有机碳源在土壤剖面分布的农业栽培措施或土地利用方式的变化均会导致土壤剖面累积的有机碳的损失。与全国的情况类似,研究区域自上世纪六七十年代起,大量施用化肥,其对土壤剖面长期以来累积的有机碳转化及稳定性的影响如何,是值得研究的问题。

参考文献:

- [1] Janzen H H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 419-424.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5): 1623-1627.
- [3] Lal R. Soil science and the carbon civilization [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 2007, 71(5): 1425-1437.
- [4] 石声汉. 汜胜之书今释 [M]. 北京: 科学出版社, 1956.
SHENG Sheng-han. Explanation of the book written by FAN Shengzhi [M]. Beijing: Science Press, 1956.
- [5] 朱显谟. 壤土 [M]. 北京: 农业出版社, 1963.
ZHU Xian-mo. Lou soils [M]. Beijing: Agricultural Press, 1963.
- [6] 贾恒义, 雍绍萍. 土垫旱耕人为土地化学特征 [J]. *土壤*, 1996, 28(5): 267-273.
JIA Heng-yi, YONG Shao-ping. Geo-chemical characteristics of eum-orthic anthrosoils [J]. *Soil*, 1996, 28(5): 267-273.
- [7] 贾恒义, 雍绍萍. 土垫旱耕人为土系统分类初步研究 [J]. *土壤*, 1998, 30(5): 258-260.
JIA Heng-yi, YONG Shao-ping. Research on eum-orthic anthrosoils taxonomy [J]. *Soil*, 1998, 30(5): 258-260.
- [8] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Came from Office of Soil Investigation in Shannxi Province. Soils in Shannxi Province [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [9] 周建斌, 李昌伟, 赵伯善, 等. 长期施肥对壤土底土养分含量的影响 [J]. *土壤通报*, 1993, 24(1): 21-23.
ZHOU Jian-bin, LI Chang-wei, ZHAO Bo-shan, et al. The effects of long-term fertilization on nutrients content in Lou soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1993, 24(1): 21-23.
- [10] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题 [J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 609-618.
PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHANG Xu-hui, et al. Soil organic car-

- bon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands[J]. *Advance in Earth Science*, 2003, 18(4):609–618.
- [11] 潘根兴, 周 萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2), 327–337.
- PAN Gen-xing, ZHOU Ping, LI Lian-qing, et al. Core issues and re-search progress of soil science of C sequestration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2):327–337.
- [12] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):423–436.
- [13] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 88:35–66.
- [14] Khan S A, Mulvaney R L, Ellsworth T R, et al. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(6):1821–1832.
- [15] Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(7167):277–280.
- 致谢: 德国拜罗伊特大学土壤生态系的研究生 Stefan Strohmeier 和 Weiyuan Li 参与了土壤样品的采集, 土壤有机碳的测定在拜罗伊特大学土壤环境研究所中心实验室进行, 在此一并致谢。