

中国农田表土有机碳含量变化特征 ——基于国家耕地土壤监测数据

程 琨¹, 潘根兴¹, 田有国², 李恋卿¹

(1.南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095; 2.农业部全国农业技术推广中心, 北京 100026)

摘 要:通过对 299 个国家级耕地土壤监测点 20 余年数据的统计分析,评价了我国农田表土有机碳含量变化情况和固碳潜力。结果表明,全国约 80%试验点有机碳年平均相对增长率(Average relative annual increment, ARAI)在-1.5%~7.5%。中国农田表土有机碳含量整体呈上升趋势。东北、华北等 6 个地理区域分析得出,华北、华东、西南农田表土有机碳含量显著增加;华东地区有机碳增加的农田面积占全国农田比例最大,东北最小。旱地和水田有机碳含量增加显著;水田有机碳增加的试验点所占比例大于旱地;对 ARAI 与初始有机碳含量进行相关分析得出,我国旱地和水田有机碳潜在储存能力估计值分别为 17.2 和 27.7 g·kg⁻¹。农田土壤类型中水稻土和褐土有机碳含量增加显著;黑土有机碳含量下降样本所占比例最高。对我国各典型种植制度分析得出,双季稻、麦-稻、麦-玉、单季小麦种植制度下农田有机碳有了显著增加;麦玉轮作较其他种植制度的农田有机碳年平均相对增长率高。

关键词:中国农田;固碳;土壤类型;土壤有机碳;种植制度

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2476-06

Changes in Topsoil Organic Carbon of China's Cropland Evidenced from the National Soil Monitoring Network

CHENG Kun¹, PAN Gen-xing¹, TIAN You-guo², LI Lian-qing¹

(1.Institute of Resource, Ecosystem, Environment of Agriculture, Nanjing 210095, China; 2.National Agro-Tech Extension and Service Centre, Ministry of Agriculture, Beijing 100026, China)

Abstract: Soil organic carbon(SOC) is the critical parameters not only soil fertility but environmental safety also. Understanding changes in organic carbon of cropland will be needed for assessing the Carbon sequestration potential of China's croplands. In this study, we used data of topsoil SOC content from the national monitoring network to analyze the SOC dynamics and the sequestration status in China's croplands. The data set comprises 299 observations across mainland China. Topsoil SOC of China's cropland was in a general trend of accumulation with a frequency of 79.1%, which were mainly distributed in North, East and Southwest China's cropland. The difference of land use effect on soil carbon sequestration was significantly, the SOC content of paddy soils was higher significantly than that of dry croplands and the frequency of increasing SOC was also greater than that of dry cropland. The SOC content of paddy soils and cinnamon soils increased significantly; the frequency of decreasing SOC from black soils was greatest. Furthermore, topsoil SOC was greatly increased under the cropping systems of double rice, rice-wheat, wheat-corn and wheat, with the wheat-corn being the highest. Therefore, topsoil SOC storage in China's croplands had been affected profoundly by the land use type, cropping and rotation, and the dynamics and the overall sequestration capacity would be greatly masked by the land managements and agro management practices.

Keywords: China's cropland; C sequestration; soil group; soil organic carbon; cropping system

随着气候变化形势日趋严峻,农业固碳越来越成为诸多科研机构 and 政府部门所关注的焦点。联合国在

2009 年 6 月份的例会上批准了首个农业清洁发展机制(CDM)方法的广泛应用,将农业认定为应对二氧化碳排放量剧增的解决方案之一。根据 IPCC 的有关统计,农业对温室气体减排的潜力主要来自土壤有机碳的固定,全球农业减排的技术潜力高达每年 5 500~6 000 Mt CO₂ 当量^[1-2]。全球土壤有机碳贮量约为 1 550 Pg^[3],是大气碳库的 2 倍,陆地生物质碳库的

收稿日期:2009-09-22

基金项目:教育部科学技术研究重大项目(我国农田土壤有机碳库演变及其调控机制研究)

作者简介:程 琨(1986—),男,硕士研究生,主要从事土壤碳循环和全球变化研究。E-mail:gavin985@yahoo.cn

通讯作者:潘根兴 E-mail:panggenxing@yahoo.com.cn

2~4 倍^[4-5]。尽管全球土壤碳库容量十分可观,但在全球陆地生态系统碳库中,仅农业土壤是受到强烈认为干扰的且短时间可调节的碳库。因而全球农业土壤碳库储量及其固碳能力是评估近期温室气体减排潜力的重要依据^[6]。

《京都议定书》和《联合国气候变化框架公约》的签订,明确了各国政府在应对气候变化中所应承担的责任。我国是农业大国,全国有耕地面积 140 Mhm²,约占全球耕地面积的 7%,因而中国农田固碳占世界农田固碳总量的比例不可忽视。而且,中国用占世界 7%的耕地养活着世界五分之一的人口,提高农田生产力至关重要。而土壤有机碳是影响农业生产、土壤养分供应、土壤缓冲能力以及农田与大气二氧化碳交换等的重要因子之一,所以农田土壤有机碳的调控对农业发展以及气候变化有深远影响。在自然因素和农业管理措施(如:耕作、施肥和灌溉等)的作用下,农田土壤碳库在不断地变化^[8]。这种变化不仅改变土壤肥力,而且影响区域乃至全球碳循环。本文试图通过对国家级耕地监测数据的统计分析,分析近二十年来我国农田有机碳的变化情况以及固碳潜力,以期制定固碳减排国家战略提供科学依据。

1 数据来源与处理

1.1 土壤数据来源

农田耕层土壤有机质含量数据来源于农业部《国家级耕地监测点数据》共 314 个耕地试验点的数据。鉴于研究目的,我们选取试验持续年份在 5 年及以上的数据,筛选后有东北 37 个、华北 77 个、华东 42 个、华南 50 个、西北 36 个、西南 57 个共 299 个试验点数据供用(表 1)。试验点最早开始年份为 1983 年,持续时间为 5~23 a。这些试验点中,40%的试验点起始于

1988 年之前,监测的终了年份主要集中在 1998 年后,占 70%;终了年份在 1988—1997 年的试验点占 30%。所以,本文的统计结果可以揭示近 20 年来中国农田表土有机碳变化情况。

1.2 数据处理与统计方法

所有监测点数据均统一为土壤有机碳含量,将有机质含量乘以 0.58 换算之。用公式(1)定义土壤有机碳年均相对变化幅度(Average relative annual increment, ARAI):

$$ARAI(\%) = \{ \sum [(SOC_{n+1} - SOC_n) / SOC_n] \} \times 100 / n - 1 \quad (1)$$

式中: ARAI 为土壤有机碳年平均相对增长率, SOC 为土壤有机碳含量, n 为第 n 年。

数据处理与图表绘制在 EXCEL2003 支持下完成, 统计分析与检验采用 JMP7.0。显著水平为: P=0.05。

2 结果与讨论

2.1 中国农田表土有机碳含量总体变化特征

近 20 年来全国农田表土有机碳整体呈上升趋势, 这与诸多学者所得结论一致^[7,9-10]。如表 2, 全国农田土壤有机碳初始含量平均为 13.20 g·kg⁻¹, 终了含量为 14.20 g·kg⁻¹, 经检验, 差异显著, 故近 20 年中国农田有机碳含量增加明显。全国上升样本数为 234 个, 占 79.1%; 下降样本总数为 62 个, 占 20.9%。全国有大约 80% 的样本有机碳年均相对变幅在 -1.5%~7.5% (如图 1), 所有样本年均相对变幅平均值为 3.61%。

2.2 全国不同地理区域农田表土有机碳含量变化特征

由于气候条件、土壤条件、耕作管理水平的不同^[11],

表 1 试验点在各区和各时间段的分布

Table 1 Distribution of samples among regions and monitoring periods of China

地理分区	总试验点数	起始年份	结束年份	
		1988 年前	1988—1997	1998—2007
东北	37	12	13	24
华北	77	29	22	55
华东	42	14	9	33
华南	50	24	15	35
西北	36	19	12	24
西南	57	22	18	39
全国	299	120	89	210

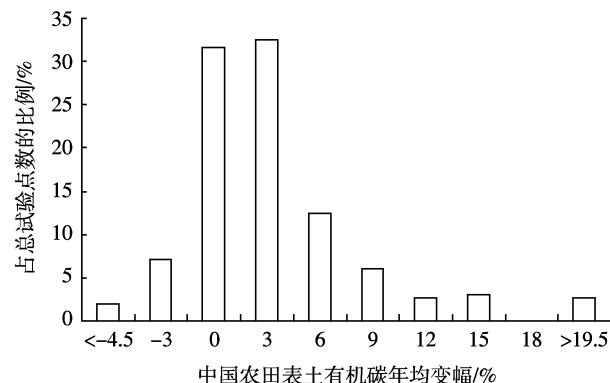


图 1 农田表层土壤有机碳年均变幅频率分布图

Figure 1 Distribution of SOC dynamics from monitoring data of China's croplands

表 2 不同地理区域农田表土有机碳变化
Table 2 Variation of SOC dynamics with geographical regions of China

地理分区	样本数	起始 SOC/g·kg ⁻¹	终了 SOC/g·kg ⁻¹	上升样本		下降样本		年均变幅/%
				样本数	增幅/%	样本数	降幅/%	
东北	37	16.88±4.73a	16.76±5.25a	22(59.5)	2.91±2.50b	15(40.5)	-1.32±1.01a	1.20±2.92b
华北	77	8.08±3.73Bb	9.15±3.56Ab	65(84.6)	6.84±8.07a	12(15.4)	-2.41±2.19ab	5.40±8.18a
华东	42	14.92±7.06Ba	16.60±7.13Aa	39(92.9)	3.96±3.27b	3(7.1)	-1.64±0.72a	3.45±3.49ab
华南	50	16.81±7.47a	18.11±9.22a	39(78)	3.89±3.80b	11(22)	-1.31±0.90a	2.83±4.01b
西北	36	8.48±3.91b	8.63±2.69b	25(69.4)	5.28±4.81ab	11(30.6)	-3.07±3.41b	2.66±5.88b
西南	57	16.32±9.85Ba	17.75±9.60Aa	45(80.4)	5.19±6.76ab	11(19.6)	-1.45±1.57a	3.88±6.64ab
全国	299	13.20±7.59B	14.20±7.89A	234(79.1)	5.09±6.04	62(20.9)	-1.84±1.99	3.61±6.13

注:括号中数字表示该样本数占所在区域总样本数的百分数;不同小写字母表示各区域间 LSD 多重比较差异显著(P<0.05),不同大写字母表示起始和终了有机碳含量 t 检验差异显著(P<0.05),下同。

使得我国不同地理区域的有机碳变化有所差异。中国东北、华北、华东、华南、西北、西南 6 大区有机碳变化情况如表 2 所示。华东、西南、华北终了有机碳含量显著高于初始含量,说明这 3 个区域有机碳含量增加显著。东北、华南、西南、华东有机碳初始含量和终了含量均显著高于西北和华北地区,体现了有机碳含量的区域性差异。有机碳含量上升样本所占比例最高的为华东地区和华北地区,分别为 92.9%和 84.6%;其次为西南(80.4%)和华南(78%);最低的为西北地区 and 东北地区,仅为 69.4%和 59.5%,均低于全国比例(79.1%)。本研究同时基于农田面积对有机碳变化进行了评价,各大区有机碳含量上升和下降占全国农田面积比用公式(2)进行计算。

$$P_n=P_i\times S_i/S \tag{2}$$
式中: P_n 为各区有机碳含量升高(下降)面积占全国农田面积比例, P_i 为各区有机碳含量增加(下降)样本数占该区样本总数的比例, S_i 为该区农田面积, S 为全国农田面积。

6 大区对比得出,华东地区有机碳含量增加的农田面积占全国农田总面积的 27.1%,为最高;东北地区有机碳含量下降的农田面积占全国农田总面积的 6.6%,为最高;该结果与表 1 中样本点数所计算的结果相似。Ogle 等^[12]分析了不同气候带土壤有机碳的变化情况,指出有机碳变化受气候影响较大,认为湿热地区有利于有机碳的积累。因此,华东、华南、西南等湿热地区有机碳含量增加的农田面积占全国农田比例大于东北、西北等地区。

对各区上升样本年均相对增幅进行比较得出,年均相对增幅最高的为华北地区,约 6.84%;而对各区下降样本年均相对降幅比较得出,年均相对降幅最大的为西北地区,约-3.07%;年均变幅为华北(5.4%)显

著高于东北(1.20%)、华南(2.83%)、西北地区(2.66%)。这可能是由于东北和华南地区有较高的初始有机碳含量而使得土壤呼吸速率也较高^[11],而西北地区较为干旱,加快了土壤呼吸,使得这 3 个地区有机碳的输入输出比低于其他地区。

2.3 旱地和水田表土有机碳含量变化特征

不同的土地利用方式会影响土壤有机碳的固定。经统计表明,水田初始有机碳含量与终了有机碳含量均显著高于旱地,水田分别为(18.43±7.72)g·kg⁻¹和(19.82±7.47)g·kg⁻¹,而旱地分别仅为(10.46±5.89)g·kg⁻¹和(11.05±6.00)g·kg⁻¹,这可能是由于水田淹水期不利于有机碳的矿化所致^[13]。经检验,水田和旱地终了有机碳含量均显著高于初始有机碳含量,说明我国水田和旱地有机碳含量均有了显著的增加。如表 3 所示,旱地有机碳上升样本比例为 78%,下降样本比例为 22%;而水田有机碳上升样本比例为 80.4%,下降样本比例为 19.6%。水田较早地上升样本比例要高。这可能与湿热地区有利于有机碳的积累^[12]和水田与旱地所在地区的农业管理水平不同有关。

将有机碳年均变幅与试验点有机碳初始含量进行回归分析,以分析土壤固碳容量,如图 3 所示。

旱地的回归方程式为:
$$ARAI=-5.551\ 7\ln(SOC_0)+15.82\ R^2=0.263\ 5^{**}$$
水田的回归方程式为:
$$ARAI=-4.100\ 9\ln(SOC_0)+14.192\ R^2=0.223\ 3^{**}$$
其中, SOC_0 为试验点起始年份的有机碳含量。

我们令 $ARAI=0$,可得出旱地有机碳初始含量为 17.3 g·kg⁻¹,水田有机碳初始含量为 31.8 g·kg⁻¹。美国学者 West 等^[14]研究得出,美国农田土壤有机碳含量在 25 g·kg⁻¹时接近饱和。相比之下,我国旱地农田较美国农田固碳容量要低,而水田有较高的固碳容量,

表 3 不同土地利用方式下农田表土有机碳变化
Table 3 Cropland SOC dynamics with different land use patterns

农田类型	样本数	起始 SOC/g·kg ⁻¹	终了 SOC/g·kg ⁻¹	上升样本		下降样本		年均变幅/%
				样本数	增幅/%	样本数	降幅/%	
旱地	187	10.46±5.89Bb	11.05±6.00Ab	145(77.5)	5.72±6.80	42(22.5)	-2.08±2.22	3.96±6.90
水田	112	18.43±7.72Ba	19.82±7.47Aa	90(80.4)	4.21±4.46	22(19.6)	-1.37±1.37	3.11±4.61

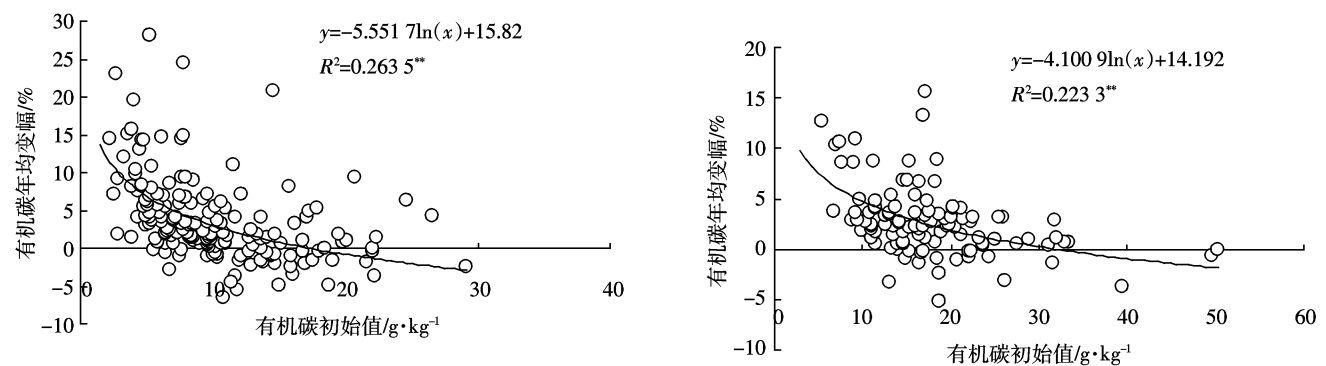


图 3 旱地(左)和水田(右)有机碳年均变幅与有机碳含量的关系
Figure 3 Observed ARAI values against the initial SOC contents(Left, Dry croplands; Right, Rice paddies)

这个结论与之前诸多学者的研究结果一致^[10,15-17]。

根据计算结果,我国旱地固碳能力约为 18 g·kg⁻¹,水田固碳能力为 32 g·kg⁻¹,而所有终了有机碳含量数据中,旱地终了有机碳含量大于 18 g·kg⁻¹ 的仅占 12%;水田终了有机碳含量大于 32 g·kg⁻¹ 的仅占 8%。这说明,无论旱地与水田,我国农田固碳潜力都是非常大的。

2.4 主要土壤类型农田表土有机碳含量变化特征

表 4 列出了水稻土、潮土等 7 种我国农田主要的土壤类型表土有机碳的变化情况。经检验,水稻土和褐土有机碳含量有显著的增加;水稻土、红壤、黑土初始和终了有机碳含量均显著高于潮土、褐土、紫色土,这与这些土类成土因素有较密切的联系。除黑土外,其他各土类表土有机碳含量上升的样本所占比例都较高;黑土上升样本所占比例仅为 63.6%,下降样本

占 36.4%。黑土相比于其他土类有机碳含量下降样本所占比例较多的结论与黄耀等^[7]的研究结果相似。各土类有机碳含量年均变幅经比较,无显著差异。

黑土区有机碳含量下降的主要原因,一为水土流失严重,有调查表明,黑龙江省黑土区垦殖初期的黑土层一般有 60~70 cm,由于水土流失,目前大部分黑土层只有 30 cm^[18];其次为不合理的耕种所致,农民掠夺式的经营方式和投入的不足使得黑土有机碳处于亏缺状态,据调查,东北黑土区耕地,每年仅有 14%~18%的土壤中肥料的投入和输出保持平衡^[19]。

水稻土是一种基于稻米生产的水耕熟化形成的人工土壤,是中国独特的土壤类型^[20]。由于其特殊性,水稻土为诸多学者所关注^[2,15]。有研究指出^[15,21],提高水稻土有机碳是减缓气候变化的一个重要的固碳措施。更有研究表明^[15],我国水稻土的固碳潜力占全国

表 4 不同土类农田表土有机碳变化
Table 4 Cropland SOC dynamics with different soil group

土类	试验点数	起始 SOC/g·kg ⁻¹	终了 SOC/g·kg ⁻¹	上升样本		下降样本		年均变幅/%
				样本数	增幅/%	样本数	降幅/%	
水稻土	89	19.11±8.22Ba	20.88±8.12Aa	68(76.4)	3.93±3.88	21(23.6)	-1.45±1.38	2.66±4.15
潮土	42	9.44±3.79d	10.23±3.21d	34(81)	5.21±4.71	3(19)	-2.78±2.15	3.69±5.36
褐土	26	7.59±3.06Bd	9.13±2.46Ad	23(88.5)	6.49±7.47	3(11.5)	-0.11±1.15	5.59±7.46
红壤	13	15.87±9.90ab	17.53±10.21ab	10(76.9)	4.16±4.81	3(23.1)	-1.2±0.37	2.92±4.78
黑土	11	13.85±2.96bc	14.56±2.97bc	7(63.6)	3.80±3.56	4(36.4)	-1.03±0.63	2.05±3.70
紫色土	11	6.51±2.38d	7.26±2.76d	10(90.9)	5.15±4.29	1(9.1)	-4.41	4.28±4.98
黄棕壤	9	8.85±2.47cd	9.87±3.10cd	8(88.9)	3.87±2.62	1(11.1)	-1.11	3.32±2.96

农田的 40%。本研究得出水稻土有机碳含量增加显著,其含量也显著高于其他土类,说明近年来水稻土固碳作用明显,但水稻土有机碳上升样本所占比例为 76.4%,还有 23.6%的样本有机碳含量下降,应当引起人们的关注。

2.5 不同种植制度下农田表土有机碳含量变化特征

本研究将我国几个主要种植制度下农田表土有机碳含量变化做了分析,如表 5 所示。双季稻、麦-稻、麦-玉、单季小麦种植制度下农田终了有机碳含量显著高于初始有机碳含量,说明这几种种植制度下农田有机碳有了显著增加。各种种植制度初始和终了有机碳含量比较所得结果相同,即单季稻、双季稻、麦-稻、绿肥-稻-稻等种植制度下农田有机碳含量显著高于单季玉米、麦-玉、单季小麦种植制度,说明了有水稻种植下的农田有机碳水平较高。有机碳含量上升样本所占比例最高的为麦-玉(87%)和稻-稻(86.2%)轮作制度下的农田,而下降样本所占比例最高的为单季水稻种植下的农田(31%)。对各种种植制度下农田所有有机碳下降样本年均降幅统计得出,降幅最大的为绿肥-稻-稻种植制度下的农田。对各种种植制度下农田有机碳年均变幅进行比较,发现绿肥-稻-稻、玉米、水稻种植制度的农田显著低于小麦、麦-玉种植制度。

不同种植制度有机碳变化不同的影响因素有以下几个:第一,不同作物残茬、根系和落叶等残留到土壤的数量和质量有所差异;第二,不同种植制度所在区域秸秆还田量和施肥量不同,使得有机碳投入量有所差异;第三,不同种植制度由于作物产量、收获次数的不同,有机碳输出量也不同。而 3 个因素共同对有机碳的投入与输出比例造成影响,从而影响了土壤中有机碳的含量及其变化。则表中绿肥-稻-稻轮作制度可能由于其相比于其他种植制度收获次数多、有机碳归还和输入量少,使得其农田有机碳下降样本年均

降幅和所有样本年均变幅均较低。

3 结论

中国农田表土有机碳含量总体呈上升趋势,上升样本占总样本数的 79.1%,全国农田年均相对变幅主要集中在-1.5%~7.5%,平均 3.61%。6 大区中,华东、西南、华北有机碳含量增加明显;有机碳含量上升样本所占比例最高的为华东和华北地区,最低为东北地区;以面积所占比例计算结果与样本点数计算结果相似。华北地区年均相对变幅最高。

水田和旱地终了有机碳含量均显著高于初始有机碳,说明水田和旱地近二十年来有机碳含量有了显著提高。水田有机碳上升样本所占比例较旱地要高。水田和旱地均有较高的固碳水平,分别为 $18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。说明我国农田固碳潜力巨大。

水稻土和褐土有机碳增加显著;水稻土、红壤、黑土有机碳含量显著高于潮土、褐土和紫色土。黑土较其他土类有机碳下降样本所占比例要大,这是由于黑土区水土流失严重和耕种方式不合理所导致。几种土壤类型年均变幅相比,无显著差异。

双季稻、麦-稻、麦-玉、单季小麦种植制度下农田有机碳含量增加显著;有水稻种植的农田有机碳含量要高于其他种植制度。绿肥-稻-稻、单季水稻、单季玉米种植制度下的农田有机碳年均变幅显著低于单季小麦、麦玉轮作制度下的农田,说明不同种植制度下农田有机碳固定有所差异,应当关注不同种植制度农田的农业投入和耕作方式的区分以更好地固碳和增产。

参考文献:

- [1] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J].

表 5 不同种植制度下农田表土有机碳变化
Table 5 Variation of SOC dynamics with different cropping systems of China

种植制度	样本数	起始 $\text{SOC}/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	终了 $\text{SOC}/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	上升样本		下降样本		年均变幅/%
				样本数	增幅/%	样本数/%	降幅/%	
水稻	29	17.38±7.38a	17.65±7.32b	20(69)	3.64±5.64	9(31)	-2.09±2.00a	1.86±5.48b
小麦	24	7.14±3.30Bd	8.18±2.93Ac	20(83.3)	7.26±6.53	4(16.7)	-1.75±1.37a	5.76±6.87a
玉米	40	10.59±3.70c	10.45±4.06c	28(70)	3.70±3.21	12(30)	-1.14±0.74a	2.25±3.51b
稻-稻	29	20.23±8.08Ba	22.96±8.89Aa	25(86.2)	4.00±2.99	4(13.8)	-0.95±0.96a	3.32±3.28ab
麦-玉	46	8.36±4.11Bcd	9.79±5.07Ac	40(87)	5.95±7.14	6(13)	-1.96±2.00a	4.92±7.20a
麦-稻	26	14.04±5.24Bb	16.54±5.21Ab	21(80.8)	5.15±5.43	5(19.2)	-1.65±1.12a	3.84±5.59ab
绿肥-稻-稻	8	17.49±6.41ab	18.58±6.34ab	6(75)	2.83±2.73	2(25)	-5.89±2.25b	0.65±4.73b

- Agriculture, Ecosystem & Environment*, 2007, 118:6–28.
- [2] 潘根兴, 李恋卿, 郑聚峰, 等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):901–914.
- PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHENG Ju-feng, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):901–914.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304:1623–1627.
- [4] Lal R. World soils and the greenhouse effect[J]. *Global Change News Letter*, 1999, 37:4–5.
- [5] Watson R T, Noble I R. Carbon and the science-policy nexus: the Kyoto challenge[C]//Steffen W, Jager J, Carson D, Bredshaw C, eds. *Challenges of a Changing Earth. Proceedings of the Global Change Open Science Conference*. Berlin: Springer, 2001:57–64.
- [6] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5):282–289.
- PAN Gen-xing. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5):282–289.
- [7] 国家统计局国民经济综合统计司. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- National Comprehensive Statistics Division of National Bureau of Statistics. China statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006.
- [8] 黄耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(7):750–763.
- HUANG Yao, SUN Wen-juan. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7):750–763.
- [9] 吴乐知, 蔡祖聪. 基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算[J]. 生态环境, 2007, 16(6):1768–1774.
- WU Le-zhi, CAI Zu-cong. Estimation of the change of topsoil organic carbon of croplands in China based on long-term experimental data[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1768–1774.
- [10] 许信旺, 潘根兴, 汪艳林, 等. 中国农田耕层土壤有机碳变化特征及控制因素[J]. 地理研究, 2009, 28(3):601–612.
- XU Xin-wang, PAN Gen-xing, WANG Yan-lin, et al. Research of changing characteristics and control factors of farmland topsoil organic carbon in China[J]. *Geographical Research*, 2009, 28(3):601–612.
- [11] Wang Ligang, Qiu Jianjun, Tang Huajun. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China[J]. *Geoderma*, 2008, 147:47–55.
- [12] Ogle S M, Breidt F J, Paustian K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 72(1):87–121.
- [13] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J]. 农村生态环境, 2005, 21(4):6–11.
- HAN Bing, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun. Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(4):6–11.
- [14] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity[J]. *Climate Change*, 80:25–41.
- [15] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10:79–921.
- [16] 许信旺, 潘根兴, 侯鹏程. 不同土地利用对表层土壤有机碳密度的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6):193–197.
- XU Xin-wang, PAN Gen-xing, HOU Peng-cheng. Impact of different land use on topsoil organic carbon density [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(6):193–197.
- [17] 李典友, 潘根兴, 陈良松, 等. 安徽六安市表层土壤有机碳的空间分布及尺度变异分析[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4):37–41.
- LI Dian-you, PAN Gen-xing, CHEN Liang-song, et al. Spatial distribution and variability of topsoil organic carbon content at different scales in Liu'an City, Anhui Province, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4):37–41.
- [18] 任宪平. 东北黑土区合理开发利用存在的问题与对策[J]. 水土保持科技情报, 2004, 2:48–49.
- REN Xian-ping. Problems and countermeasure of rational development and utilization of black soil in Northeast of China[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2004, 2:48–49.
- [19] 王玉玺, 解运杰, 王萍. 东北黑土区水土流失成因分析[J]. 水土保持科技情报, 2002, 3:27–29.
- WANG Yu-xi, XIE Yun-jie, WANG Ping. Causes of soil erosion in black soil region in Northeast of China [J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2002, 3:27–29.
- [20] 龚子同. 中国土壤系统分类 [M]. 北京: 中国科学出版社, 1999:5–215.
- GONG Zi-tong. Chinese soil taxonomic classification[M]. Beijing: China Science Press, 1999:5–215.
- [21] Gupta P K, Sharma C, Bhattacharya S, et al. Scientific basis for establishing country greenhouse gas estimates for ricebased agriculture: an Indian case study[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64:19–31.