

DOI: 10.11766/trxb201708240323

# 近30年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素\*

赵明松<sup>1, 2</sup> 李德成<sup>2†</sup> 王世航<sup>1</sup>

(1 安徽理工大学测绘学院, 安徽淮南 232001)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要** 利用安徽省第二次土壤普查和2010—2011年土壤数据, 运用GIS空间分析方法, 分析安徽省1980—2010年耕地土壤表层(0~20 cm)和1 m土体中有机碳密度(Soil Organic Carbon Density, SOCD)和储量时空变化特征, 并探讨了农业管理措施与SOC变化的关系。结果表明: 1980—2010年全省耕地剖面的表层SOCD平均值增加了0.28 kg m<sup>-2</sup>, 1 m土体中SOCD平均值减少了0.42 kg m<sup>-2</sup>。空间分布上, 近30年间耕地表层SOCD在空间上呈现北增南减的趋势, 增幅总体上由北向南依次减小; 1 m土体中SOCD总体上中部增南部减; 全省68%的耕地SOCD增加。1980—2010年全省耕地表层SOC储量增加35.30 × 10<sup>9</sup> kg, 1 m土体中SOC储量增加18.12 × 10<sup>9</sup> kg; 淮北平原和江淮丘陵岗地的耕地SOC储量增加, 其余区域SOC储量减少。各县市SOC变化与作物根系中的有机物质含量显著正相关, 表明肥料的大量使用增加了作物的秸秆和根系中的有机物质含量, 增加了土壤中的有机物质的输入, 促进了耕地SOC的累积。

**关键词** 土壤有机碳; 时空变化; GIS; 耕地; 安徽省

**中图分类号** S159 **文献标识码** A

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)是土壤肥力和质量的重要指标之一, 是全球碳循环过程中重要的碳库, 对于减缓温室气体排放、应对气候变化有重要作用<sup>[1-2]</sup>。耕地SOC是农田土壤碳库的重要组成部分, 研究耕地SOC及储量的变化规律对了解耕地固碳潜力、应对气候变化具有重要意义, 同时也为耕地质量管理等提供科学依据。国内外学者对耕地SOC变化做了较多的研究。如Maia等<sup>[3]</sup>采用定位实验研究了巴西亚马逊东南部不同农业耕作措施下SOC的变化。Minasny等<sup>[4]</sup>采用统计和GIS方法研究发现爪哇岛和韩国连续种

稻30年土壤表层(0~15 cm)SOCD和储量大幅度增加。

国内研究主要以第二次土壤普查资料为基础, 利用不同时期的耕地质量监测数据、采样数据、发表文献的数据、模型模拟的方法, 研究自第二次土壤普查以来国家和区域尺度上耕地SOC及储量的变化特征。如Pan等<sup>[5]</sup>利用全国第二次土壤普查和耕地质量监测数据探讨了全国水田表层SOC储量变化和固碳潜力。黄耀和孙文娟<sup>[6]</sup>、于严严等<sup>[7]</sup>、许信旺等<sup>[8]</sup>根据发表的文献数据分析了第二次土壤普查以来全国耕地表层SOC含量变化。

\* 国家自然科学基金项目(41501226)、安徽省高校自然科学研究项目(KJ2015A034)、国家科技基础性工作专项(2008FY110600)和土壤与农业可持续发展国家重点实验室开发基金项目(Y412201431)资助Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41501226), Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Anhui Province (No.KJ2015A034), the National Science and Technology Infrastructure Program (No.2008FY110600), and the Foundation of State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (No.Y412201431)

† 通讯作者Corresponding author, E-mail: dcli@issas.ac.cn

作者简介: 赵明松(1983—), 男, 安徽省淮南人, 博士, 副教授, 主要从事土壤时空变异、数字土壤制图研究。E-mail: zhaomingsonggis@163.com

收稿日期: 2017-08-24; 收到修改稿日期: 2017-12-04; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-01-09

区域尺度上多采用统计学、GIS空间分析和地统计相结合的方法,探索耕地SOC的时空变化。如张春华等<sup>[9]</sup>分析了松嫩平原耕地SOC的变化及固碳潜力。赵明松等<sup>[10]</sup>采用地统计方法研究了江苏省表层SOC的变化及影响因素。高建峰等<sup>[11]</sup>利用定位实验分析了吴江市水田表层SOC储量的变化。王相等<sup>[12]</sup>采用地统计方法研究了玛纳斯县农田表层和1 m土体SOC及储量的时空变化。Wang等<sup>[13]</sup>利用Century模型模拟了我国东部旱地SOC的动态变化。Xu等<sup>[14]</sup>利用DNDC模型模拟江苏省水稻土SOC的动态变化。虽然许信旺等<sup>[15]</sup>、程先富和谢勇<sup>[16]</sup>利用第二次土壤普查资料讨论了安徽省SOC空间分布及影响因素,但对于近30年来全省耕地SOC及储量的变化及影响因素的研究较少。

安徽省是农业大省,耕地面积为7.75万 $\text{km}^2$ (2010年),据第二次土壤普查,全省耕地肥力较低,约有31.1%的耕地有机质含量低于 $15\text{ g kg}^{-1}$ <sup>[17]</sup>。因此,本文利用安徽省第二次土壤普查和2010—2011年采样数据,采用GIS空间分析方法,探讨第二次土壤普查以来全省耕地表层(0~20 cm)和1 m土体SOC和储量的时空变化规律及与农业管理措施的关系,为提高安徽省耕地质量、增加耕地固碳潜力等提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

安徽省( $114^{\circ}54' \sim 119^{\circ}37' \text{ E}$ ,  $29^{\circ}41' \sim 34^{\circ}38' \text{ N}$ )位于长江、淮河中下游,总面积为13.96万 $\text{km}^2$ 。全省地处亚热带与暖温带的过渡地区,年均气温 $14 \sim 16^{\circ} \text{ C}$ ,年均降水量 $800 \sim 1\,800\text{ mm}$ 。全省地势西南高、东北低,地形地貌南北差异较大,由北至南分为淮北平原、江淮丘陵岗地、沿江平原区、皖西大别山区和皖南丘陵山区五个地理区域(图1)。主要的耕作土壤类型为:潮土、水稻土、砂姜黑土、黄褐土、黄棕壤等。全省耕地主要分布在淮北平原、沿江平原和江淮丘陵岗地,占耕地面积的85%以上。淮河以北以小麦—玉米(大豆)轮作为主,淮河以南以油菜(小麦)—水稻轮作为主。

### 1.2 数据来源

**1.2.1 土壤数据** 1980年土壤数据来自全国第二次土壤普查时期,《安徽土种志》<sup>[18]</sup>中记录的163个耕地土壤剖面。2010年土壤数据为国家科技基础性工作专项“我国土系调查与《中国土系志》编制”和中国科学院战略性先导科技专项子课题“华东农田固碳潜力与速率研究”中安徽省162个

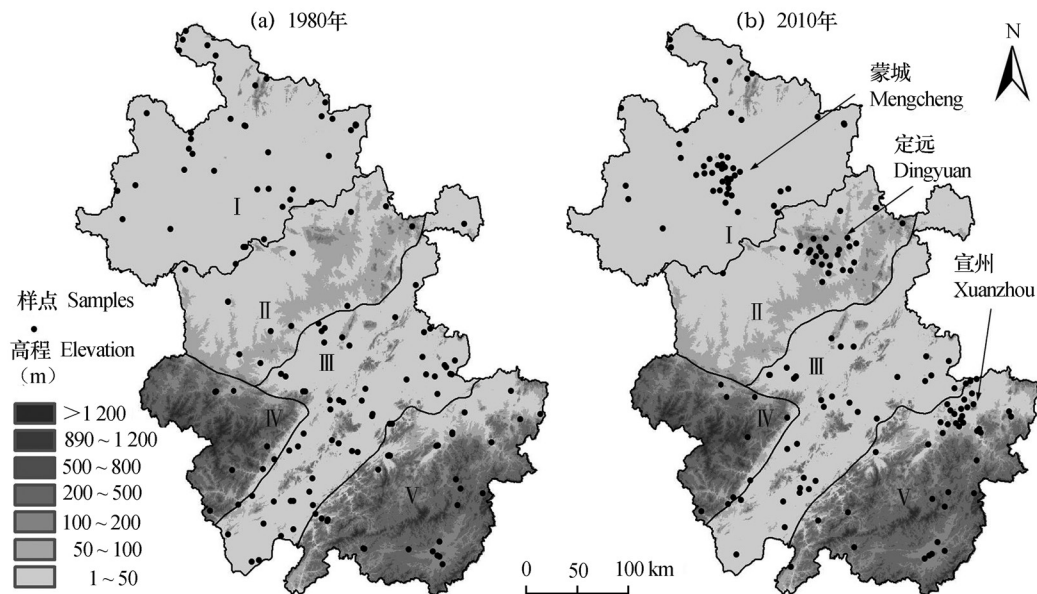


图1 耕地土壤剖面分布图 ( I. 淮北平原、II. 江淮丘陵岗地、III. 沿江平原、IV. 皖西大别山区、V. 皖南丘陵山区 )  
Fig. 1 Distribution maps of farmland soil profiles ( I. Huaibei Plain, II. Jianghuai hilly downland, III. Riverine Plain, IV. Dabieshan Mountain in West Anhui, V. South Anhui hilly area )

耕地土壤剖面。采样时间为2010—2011年，其中土系调查94个耕地土壤剖面，均在第二次土壤普查时期的典型剖面附近采集（图1）。“农田固碳潜力”课题中根据安徽省的农业耕作特点，从淮北平原、江淮丘陵岗地区和皖南低山丘陵区选取三个典型县区：蒙城县以旱作、麦—豆轮作为主，采集23个剖面；定远县以水旱轮作、小麦（油菜）—稻轮作为主，采集23个剖面；宣州区以水田、双季稻为主，采集22个剖面（图1）。土壤属性数据包括SOC含量、土层厚度、容重等数据，两个时期的SOC含量采用重铬酸钾（ $K_2Cr_2O_7$ ）氧化—滴定法测定<sup>[19]</sup>。

**1.2.2 空间数据与统计数据** 空间数据：（1）安徽省1：50万土壤类型图，ArcGIS矢量格式；（2）1980和2010年土地利用数据，来源于长江三角洲科学数据共享平台（<http://nnu.geodata.cn>），ArcGIS矢量格式；（3）安徽省地貌单元图。统计数据：《安徽省统计年鉴（2000—2011）》电子版<sup>[20]</sup>。

### 1.3 研究方法

SOCD采用式（1）估算：

$$SOCD = \sum_{i=1}^n (1 - \theta_i\%) \times \rho_i \times C_i \times T_i / 100 \quad (1)$$

式中，SOCD为一定厚度的土层的SOC密度（ $kg\ m^{-2}$ ）， $n$ 为土层数， $\theta_i$ 为 $i$ 层中 $> 2\ mm$ 砾石含量（体积百分含量）， $\rho_i$ 为 $i$ 层的土壤容重（ $g\ cm^{-3}$ ）， $C_i$ 为 $i$ 层的SOC含量（ $g\ kg^{-1}$ ）， $T_i$ 为 $i$ 层的土层厚度（ $cm$ ）。第二次土壤普查时部分土层的容重缺失，用相同土属或亚类的相应土层的容重均值代替。

SOC储量采用式（2）估算：

$$C = \sum_{i=1}^n SOCD \times S_i / 1000 \quad (2)$$

式中， $C$ 表示区域内某一种土属SOC储量（ $t$ ）， $S_i$ 表示土壤图中某一土属图斑面积（ $m^2$ ）， $n$ 表示区域内土壤图中某一土属图斑的数量。

本研究采用基于土壤学专业知识和（Pedological professional Knowledge Based, PKB）的方法，将土壤剖面与土壤类型图进行连接，该方法利用GIS技术，根据土壤类型一致与相似性、土壤成土母质相同或相近、土壤剖面点位置与同类型土壤分布区

域一致或邻近等原则，将每个土壤剖面数据与空间数据库中对应的图斑单元进行连接，生成土壤属性的空间分布图<sup>[21-22]</sup>。

从安徽省1980年、2010年土地利用图中提取耕地的分布，再与数字化土壤图叠加生成两个时期全省耕地—土壤图。根据式（1）估算1980年、2010年耕地土壤的表层和1 m土体中SOCD，利用SPSS 18.0对两个时期SOCD进行描述性统计和方差分析。然后采用PKB方法在ArcGIS中将耕地土壤的SOC数据与耕地—土壤图连接，生成安徽省耕地SOCD空间分布图，根据式（2）在数字化耕地—土壤图的属性表中利用图斑面积计算SOC储量。在ArcGIS中将1980年和2010年表层和1 m土体SOCD图转换成栅格数据（100 m分辨率），运用栅格运算和区域统计功能，分析全省和各地理区域的耕地SOCD空间格局及储量变化。最后，按照Huang等<sup>[23]</sup>的方法利用作物产量估算各县市农作物根系中的有机物质总量，探讨各县市耕地的SOC储量变化与根系中有机物质总量的关系。

## 2 结 果

### 2.1 1980—2010年全省耕地SOCD的时间变化

表1为安徽省1980年和2010年耕地SOCD及变化统计结果。从耕地表层SOCD变化看，1980—2010年全省耕地SOCD平均值增加 $0.28\ kg\ m^{-2}$ ，变异系数从57.64%降低至34.18%，表明2010年耕地SOCD的变异程度降低。不同地理区域的表层SOCD变化差异较大（表1）。淮北平原和沿江平原耕地SOCD增加较多，均高于全省平均水平；江淮丘陵岗地有少许增加；皖南丘陵山区和皖西大别山区耕地SOCD平均减少 $0.29\ kg\ m^{-2}$ 和 $0.09\ kg\ m^{-2}$ 。旱地的SOCD平均增加 $0.69\ kg\ m^{-2}$ 远高于水田的增加幅度。从耕地1 m土体中SOCD变化来看，1980年以来耕地SOCD平均值减少 $0.42\ kg\ m^{-2}$ ，其标准差和变异系数均有较大幅度的降低。不同地理区域，淮北平原和沿江平原的耕地1 m土体中SOCD增加，其余地理区域的SOCD减少。旱地1 m土体中SOCD平均增加 $0.91\ kg\ m^{-2}$ ，水田平均减少了 $0.87\ kg\ m^{-2}$ 。方差分析表明，两个时期淮北地区的耕地SOCD差异显著（表层 $F=81.29$ ， $p < 0.05$ ；1 m土体 $F=10.50$ ， $p < 0.05$ ）；旱地的表层SOCD差异显著（ $F=17.35$ ， $p < 0.05$ ）。

表1 1980—2010年耕地SOCD的统计值

Table 1 Statistics of SOCD in farmland during year 1980 to 2010

统计单元 Statistics cell	样本数 Sample size		表层SOCD ( $\text{kg m}^{-2}$ ) SOCD in surface layer			1 m土体SOCD ( $\text{kg m}^{-2}$ ) SOCD in 1-m layer		
	1980	2010	1980	2010	变化 Change	1980	2010	变化 Change
总体Total	163	162	2.88 ± 1.66 <sup>1)</sup>	3.16 ± 1.08	0.28	8.99 ± 6.42	8.57 ± 3.70	-0.42
淮北平原Huabei Plain	44	49	1.54 ± 0.57a <sup>2)</sup>	2.68 ± 0.64a	1.14	5.45 ± 2.17a	7.05 ± 2.56a	1.60
江淮丘陵岗地Jianghuai hilly downland	12	30	2.68 ± 1.39b	2.81 ± 0.96a	0.13	9.01 ± 4.93ab	8.49 ± 3.21a	-0.52
沿江平原Riverine Plain	64	31	3.22 ± 1.65b	3.78 ± 1.28b	0.56	10.72 ± 7.71b	10.77 ± 4.09b	0.05
皖西大别山区Dabieshan Mountain in West Anhui	9	9	3.45 ± 1.66b	3.36 ± 1.02b	-0.09	12.39 ± 9.64b	8.94 ± 4.01ab	-3.45
皖南丘陵山区South Anhui hilly area	34	43	3.82 ± 1.75b	3.53 ± 1.06b	-0.29	9.39 ± 5.15ab	8.44 ± 4.10a	-0.95
水田Paddy field	85	77	3.68 ± 1.52	3.80 ± 1.12	0.12	11.22 ± 7.10	10.35 ± 4.16	-0.87
旱地Upland	78	85	2.00 ± 1.32	2.69 ± 0.78	0.69	6.57 ± 4.51	7.48 ± 2.91	0.91

注：1) 统计值为：均值 ± 标准差；2) 同一列平均值后相同的字母表示不同地理区域间属性无显著性差异 ( $p < 0.05$ ) Note: 1) Value in statistics: mean and standard deviation, 2) Numbers affixed with the same letter in the each column are not significantly different ( $p < 0.05$ ) between different geographic areas in the same year, using Duncan's multiple range test

从耕地表层SOCD分布频率(图2a)来看,两个时期的SOCD均集中在1.5 ~ 3.0  $\text{kg m}^{-2}$ 和3.0 ~ 4.5  $\text{kg m}^{-2}$ 范围,30年间这两个级别的样点比例分别增加4.60%和11.88%。2010年耕地表层SOCD在< 1.5  $\text{kg m}^{-2}$ 和> 6  $\text{kg m}^{-2}$ 范围的样点比例分别减少15.31%和6.31%。从耕地1 m土体中SOCD分布(图2b)来看,30年间SOCD在4 ~ 8  $\text{kg m}^{-2}$ 、8 ~ 12  $\text{kg m}^{-2}$ 和12 ~ 16  $\text{kg m}^{-2}$ 三个级别的样点比例有不同程度的增加;其余级别的样点比例有不同程

度的减少。两个时期相比,2010年全省耕地SOCD频率分布趋于正态化。

自全国第二次土壤普查以来,我国大部分地区耕地SOC有不同程度的增加<sup>[7-10]</sup>。80年代至90年代末,全国耕地表层SOCD平均增加0.17  $\text{kg m}^{-2}$ <sup>[7]</sup>,按年变化速度来看安徽省1980—2010年耕地表层SOCD的平均增加量略高于全国平均水平。1980—2010年安徽省旱地SOCD增加量高于水田增加量,这可能与SOC的初始含量有关。在

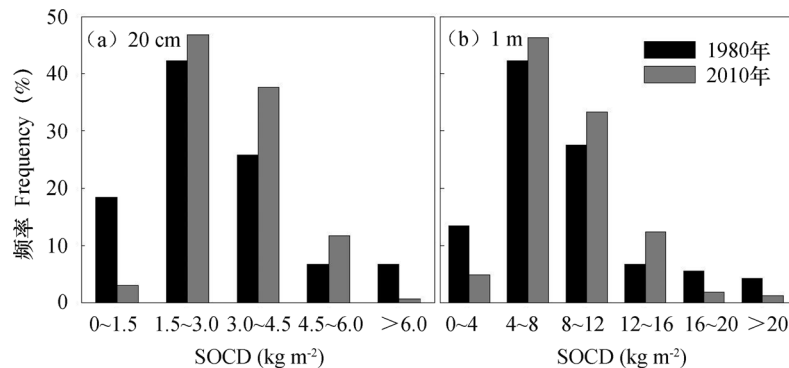


图2 耕地SOCD频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of SOCD in farmland



SOC含量较低的地区, 人们需要投入更多的肥料来提高产量, 而SOC初始值高的地区人们不重视土壤培肥, 致使SOC消耗较快。安徽省旱地表层SOCD较低 ( $2.00 \pm 1.32 \text{ kg m}^{-2}$ ), 在实际生产中投入更多的肥料才能保证粮食产量; 水田的SOCD初始含量较高 ( $3.68 \pm 1.52 \text{ kg m}^{-2}$ ), 在长期耕作中不注重培肥, 有机物料的投入不能保证SOC的更新和累积, 使得SOC增加缓慢甚至降低。这与张春华等<sup>[9]</sup>、赵明松等<sup>[10]</sup>的研究结果相似。

## 2.2 耕地SOCD空间变化特征

图3为两个时期安徽省耕地表层SOCD及变化空间分布图。1980年全省耕地表层SOCD总体上由北向南递增, 南北差异较大(图3a); 至2010年这种空间差异减小, 中部的江淮丘陵岗地和沿江平原的SOCD较高(图3b)。1980年耕地表层SOCD较低, 集中在 $1.5 \sim 3.0 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $< 1.5 \text{ kg m}^{-2}$ 两个级

别, 占耕地面积的42.82%和25.31%, 主要分布在淮北平原和江淮丘陵岗地(图3a)。2010年, 耕地表层SOCD总体上有不同程度的增加, 集中在 $3.0 \sim 4.5 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $1.5 \sim 3.0 \text{ kg m}^{-2}$ 两个级别, 占耕地面积的50.99%和36.63%, 分布在淮北平原、江淮丘陵岗地和沿江平原。1980—2010年, 耕地表层SOCD呈现北增南减的趋势, 增幅总体上由北向南依次减小(图3c), SOC D增加的面积占耕地面积的68.38%, 主要分布在淮北平原、江淮丘陵岗地西部、沿江平原的北部, 增幅在 $0 \sim 1 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $1 \sim 2 \text{ kg m}^{-2}$ 之间(图3c)。表层SOC D增幅最大( $> 2 \text{ kg m}^{-2}$ )的区域在江淮丘陵岗地的西部。表层SOC D降幅集中在 $-1 \sim 0 \text{ kg m}^{-2}$ 之间, 占耕地面积的21.50%, 主要分布在皖南丘陵山区东部、江淮丘陵岗地东部。SOC D降幅最大( $< -2 \text{ kg m}^{-2}$ )的区域分布在皖南丘陵山区的西部。

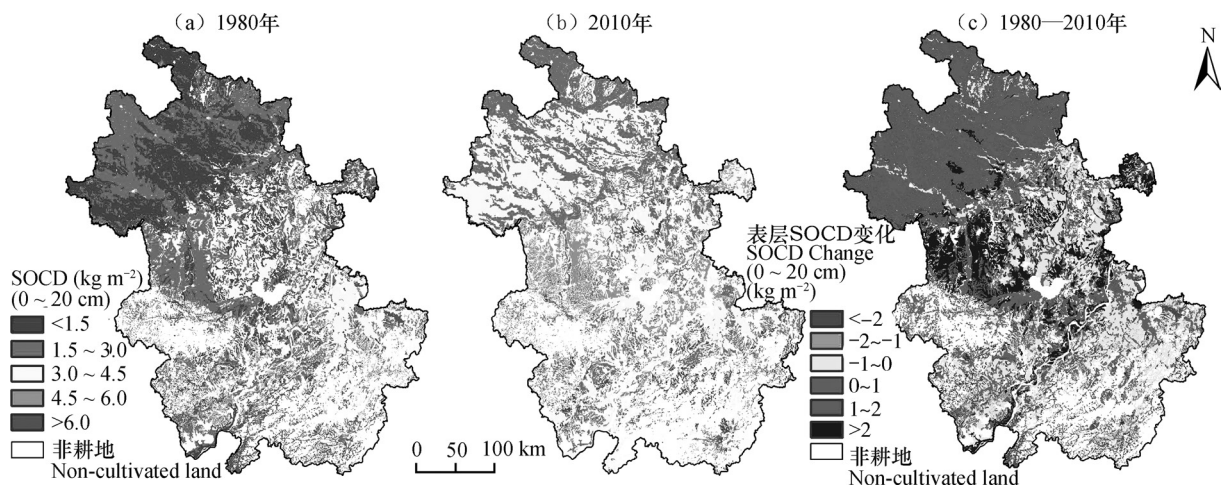


图3 1980—2010年耕地表层SOCD及变化空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution and variation of SOC D in the surface layer of the farmland

图4为两个时期耕地1 m土体中SOCD及变化空间分布图。1980年耕地1 m土体中SOCD总体上由北向南递增(图4a), 至2010年SOC D南北差异减小(图4b)。1980年耕地1 m土体中SOC D集中在 $4 \sim 8 \text{ kg m}^{-2}$ 级别, 占耕地面积的62.57%, 主要分布在淮北平原、江淮丘陵岗地、沿江平原的部分区域和皖南丘陵山区的东部(图4a)。2010年1 m土体中SOC D总体上增加, 集中在 $4 \sim 8 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $8 \sim 12 \text{ kg m}^{-2}$ 两个级别, 占总面积的52.67%和36.63%, 在各地理区域均有分布。1980—2010年, 耕地1 m土体

中SOC D总体上北增南减, 增加的面积占耕地面积的66.89%, 主要分布在淮北平原、江淮丘陵岗地和沿江平原的南部(图4c)。SOC D增幅集中在 $0 \sim 3 \text{ kg m}^{-2}$ , 占总面积的38.24%, 其次为 $3 \sim 6 \text{ kg m}^{-2}$ , 占总面积21.62%。增幅最大( $> 6 \text{ kg m}^{-2}$ )的区域分布在长江沿岸。SOC D降幅集中在 $-3 \sim 0 \text{ kg m}^{-2}$ , 占总面积的21.57%, 主要分布在皖南丘陵山区东部、淮北平原的少部分地区(图4c)。降幅最大( $< -6 \text{ kg m}^{-2}$ )的区域主要分布在沿江平原、沿江平原与皖南、皖西地区的过渡地带。

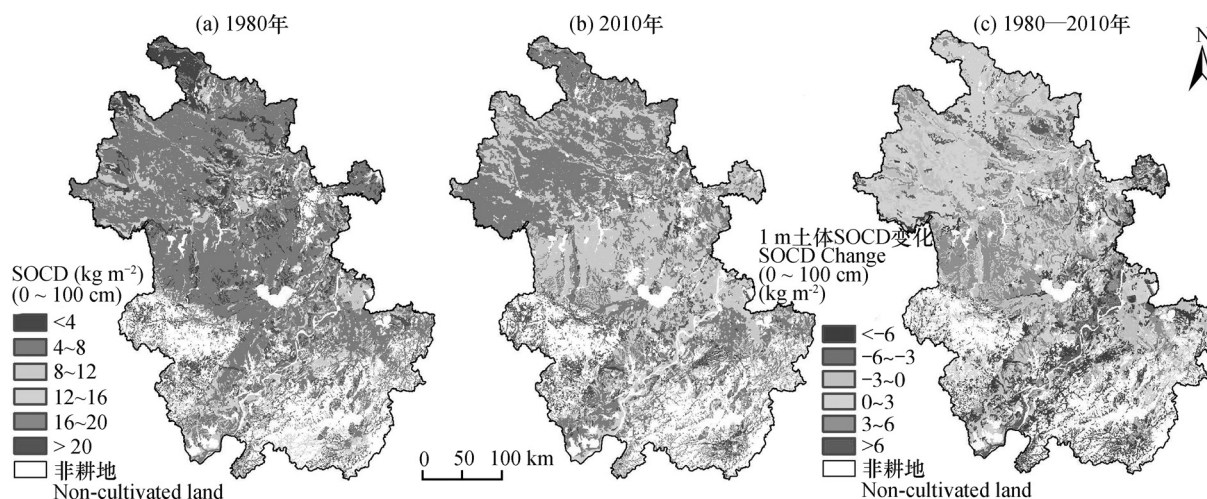


图4 1980—2010年耕地1 m土体中SOC及变化空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution and variation of SOC in the 0 ~ 100 cm soil layer of the farmland

### 2.3 1980—2010年耕地碳储量的变化

表2为1980—2010年各地理区域和土地利用的SOC储量变化统计结果。1980—2010年安徽省耕地表层SOC储量增加 $35.30 \times 10^9$  kg, 平均固碳速率为 $151.8 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ; 耕地1 m土体中SOC储量增加 $18.12 \times 10^9$  kg, 平均固碳速率为 $77.92 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。近30年间全省耕地SOC储量总体上增加, 但不同地理区域和土地利用的SOC储量的变化差异较大, 增减趋势不一。

从耕地表层SOC储量变化来看, 1980—2010年淮北平原、江淮丘陵岗地和沿江平原增加, 其中淮北平原增加最多, 为 $39.19 \times 10^9$  kg; 皖南丘陵山区和皖西大别山区分别减少 $2.69 \times 10^9$  kg和

$11.30 \times 10^9$  kg。旱地的表层SOC储量增加幅度远高于水田。从耕地表层的固碳速率来看, 不同地理区域由北至南依次减少。淮北平原耕地平均固碳速率最大, 达 $349.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ; 其次是江淮丘陵岗地, 为 $232.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 均高于全省平均水平。皖南丘陵山区耕地的固碳速率最低, 为 $-526.5 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。与耕地表层SOC储量相比, 耕地1 m土体中SOC储量变化稍有差异, 仅淮北平原和江淮丘陵岗地耕地SOC储量增加, 其他三个地理区域碳储量均减少。旱地的SOC储量增加, 水田的碳储量减少。从耕地1 m土体中的固碳速率来看, 淮北平原耕地的固碳速率高达 $547.5 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 皖西大别山区为 $-1797.0 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

表2 1980—2010年安徽省耕地SOC储量变化

Table 2 Variation of SOC storage in the farmland of Anhui Province from 1980 to 2010

统计单元 Statistics cell	表层SOC储量 ( $\times 10^9$ kg) SOC storage in surface layer			1 m土体SOC储量 ( $\times 10^9$ kg) SOC storage in 1 m layer		
	1980年	2010年	变化Change	1980年	2010年	变化Change
总体Total	211.66	246.97	35.30	624.16	642.28	18.12
淮北平原Huaibei Plain	72.57	111.76	39.19	237.21	298.67	61.46
江淮丘陵岗地Jianghuai hilly downland	27.12	34.30	7.18	73.42	87.46	14.04
沿江平原Riverine Plain	69.25	72.18	2.94	204.97	190.65	-14.33
皖西大别山区Dabieshan Mountain in West Anhui	9.18	6.49	-2.69	25.64	12.60	-13.04
皖南丘陵山区South Anhui hilly area	33.54	22.23	-11.30	82.91	52.91	-30.00
水田Paddy field	142.56	145.58	3.02	395.95	362.69	-33.26
旱地Upland	69.11	101.39	32.28	228.21	279.59	51.38

### 3 讨 论

使用肥料提高粮食产量的同时,增加了作物秸秆和根系中的有机物质含量,使得更多的有机物质进入土壤中,有利于SOC的累积<sup>[5, 23-25]</sup>。Huang等<sup>[26]</sup>研究认为肥料的大量使用促进了长江三角洲地区耕地有机质累积。Pan等<sup>[25]</sup>阐述了SOC和作物产量间的相互促进关系, SOC含量较高可以增加作物产量和生物量,较高的生物量使得更多的有机物质进入土壤,促进SOC的累积。同时推行秸秆还田能够改良土壤结构,且促进SOC累积,提升土壤固碳能力<sup>[27-28]</sup>。

1980—2010年安徽省化肥用量(N/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O)由55万t增加至320万t,平均用量由123.5 kg hm<sup>-2</sup>增加至763.8 kg hm<sup>-2</sup>,其中氮肥、磷肥、钾肥

和复合肥的用量有不同程度的增加<sup>[20]</sup>(图5)。30年间,全省复合肥和钾肥用量增加较大,分别由3.82 kg hm<sup>-2</sup>、2.86 kg hm<sup>-2</sup>增加至334.6 kg hm<sup>-2</sup>、76.05 kg hm<sup>-2</sup>;氮肥和磷肥的用量增加较平稳。在此期间,全省粮食(稻、麦、豆、薯类)产量由1 454万t增加至3 081万t,平均产量由3.27 t hm<sup>-2</sup>增加至7.37 t hm<sup>-2</sup>。参照Huang等<sup>[23]</sup>的估算方法,根据作物产量乘以草谷比、干物质比例、根冠比、根系中含碳系数等估算作物秸秆和根系中的有机物质含量。1980—2010年全省粮食作物的根系中的有机物质总量由150万t增加至319万t,平均量由338.3 kg hm<sup>-2</sup>增加至762.2 kg hm<sup>-2</sup>,全部进入土壤中。秸秆中的有机物质总量由864万t增加至1 831万t,平均量由1 931 kg hm<sup>-2</sup>增加至4 350 kg hm<sup>-2</sup>,全省积极推行秸秆还田,进入耕地土壤中的有机物质总量不断增加,促进了SOC的累积。

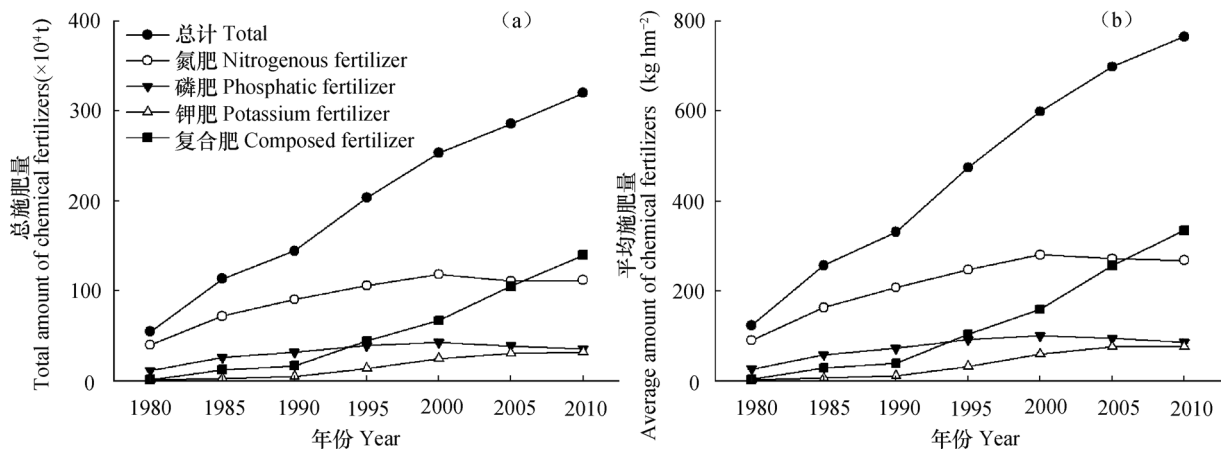


图5 1980—2010年肥料使用总量(a)和平均量(b)

Fig. 5 Total (a) and average (b) amount of chemical fertilizers applied during the period from Year 1980 to 2010

图6为安徽省各县市耕地SOC储量变化与2000—2010年粮食作物根系中有机物总量的关系,二者呈显著正相关,表明全省粮食作物根系中有机物总量对耕地表层和1 m土体中SOC储量变化的独立解释能力为69%和58%。图7显示各县市耕地SOC平均密度的相对变化率与2000—2010年粮食作物根系中有机物平均含量呈显著正相关,表明根系中有机物的平均含量对各县市表层和1 m土体中SOC平均密度相对变化率的对立解释能力为46%和31%。该结果与Liao等<sup>[29]</sup>在江苏省的研究结果相似,江苏省以农业耕作为主的行政市,表层SOC储量的增加与粮食产量的增加显著相

关。这些结果均体现了SOC和作物产量间的相互关系。

1980—2010年,全省机械耕作面积由 $1.04 \times 10^4$  km<sup>2</sup>增加至 $4.06 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,机械收割面积由 $0.06 \times 10^4$  km<sup>2</sup>增加至 $5.26 \times 10^4$  km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>。根据2010—2011年的秸秆还田调查,全省小麦和水稻以机械收割为主,留茬较高。小麦机械收割比例占95.2%,留茬高度平均为20.2 cm;早、中、晚稻机械收割比例为45.3%、78.1%、52.4%,留茬高度平均为18.2 cm、23.1 cm、18.5 cm;大豆机械收割比例为85.3%,留茬高度平均为7.8 cm。玉米机械收割比例为4.9%,留茬为11.3 cm。基本上高于安



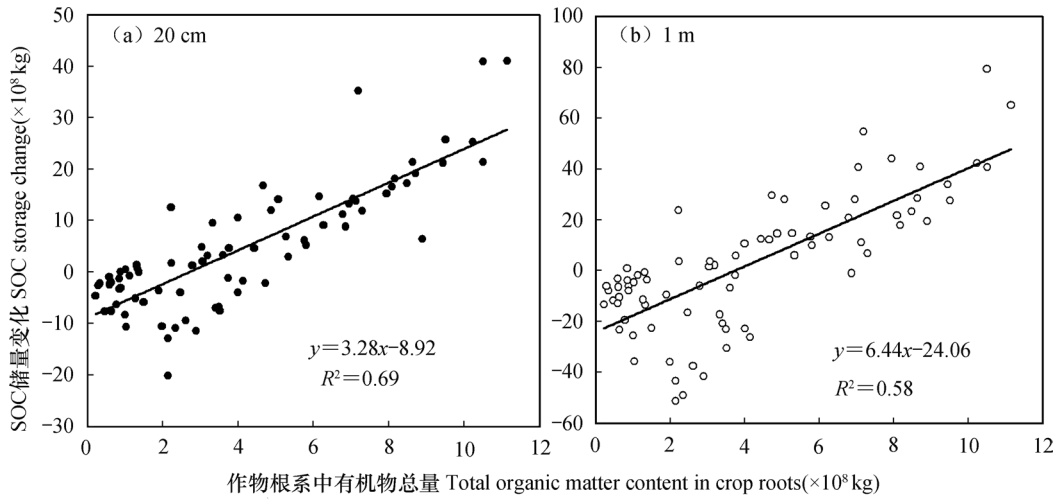


图6 各县市SOC储量变化与作物根系中有机物总量的关系

Fig. 6 Relationship between changes in SOC storage and total organic matter content in crop roots relative to county

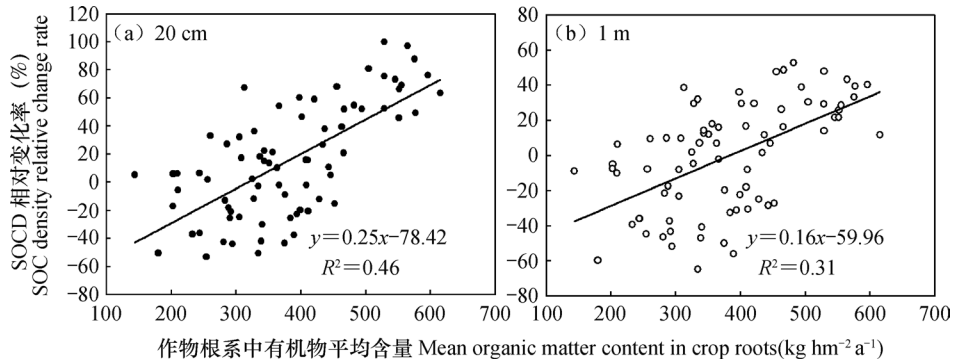


图7 各县市SOCD相对变化率与作物根系中有机物平均含量的关系

Fig. 7 Relationship between relative variation rate of SOCD and mean organic matter content in crop roots relative to county

安徽省农机作业质量标准中的15 cm留茬高度。全省积极推行秸秆还田、严禁焚烧秸秆，大部分作物留茬在机械收割中打碎还田，增加了进入土壤的有机物质含量。因此肥料的大量使用、机械耕种和收割面积增多、积极推行秸秆还田，使得进入土壤的有机物质不断增加，促进了全省耕地SOC的增加。

#### 4 结论

1980—2010年，安徽省耕地表层SOCD总体呈增加趋势，平均增加 $0.28 \text{ kg m}^{-2}$ ，1 m土体中SOCD平均减少 $0.42 \text{ kg m}^{-2}$ ；SOCD的变异程度大幅度降低，但仍属于中等变异强度。旱地的SOCD增加幅度高于水田。1980—2010年，全省耕地SOCD变化呈北增南减的趋势，淮北平原和沿江平原耕地SOCD增加较多；江淮丘陵岗地有少许增

加；皖南丘陵山区和皖西大别山区减少。全省耕地SOCD增加的面积多于减少的面积。1980—2010年，耕地表层和1 m土体中SOC储量增加了 $35.30 \times 10^9 \text{ kg}$ 和 $18.12 \times 10^9 \text{ kg}$ 。SOC储量变化的空间差异较大，淮北平原和江淮丘陵岗地的耕地SOC储量增加，其余区域的SOC储量减少。各县市SOCD和储量变化与作物根系中的有机物含量呈显著正相关。使用肥料提高粮食产量的同时增加了秸秆和根系中的有机物含量，增加了进入土壤中的有机物含量，促进了SOC的累积。

#### 参考文献

[ 1 ] Yadav V, Malanson G. Progress in soil organic matter research: Litter decomposition, modelling, monitoring and sequestration. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31 ( 2 ) : 131—154



- [ 2 ] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Biogeochemistry – Soil warming and organic carbon content. *Nature*, 2000, 408 ( 6814 ): 789—790
- [ 3 ] Maia S M F, Ogle S M, Cerri C C, et al. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106 ( 2 ): 177—184
- [ 4 ] Minasny B, McBratney A B, Hong S Y, et al. Continuous rice cropping has been sequestering carbon in soils in Java and South Korea for the past 30 years. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26 ( 3 ): 65—72
- [ 5 ] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2003, 10 ( 1 ): 79—92
- [ 6 ] 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. *科学通报*, 2006, 51 ( 7 ): 750—763  
Huang Y, Sun W J. Changes of topsoil organic carbon content in Chinese mainland in recent 20 years ( In Chinese ). *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 ( 7 ): 750—763
- [ 7 ] 于严严, 郭正堂, 吴海斌. 1980—2000年中国耕作土壤有机碳的动态变化. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26 ( 6 ): 123—130  
Yu Y Y, Guo Z T, Wu H B. Change in organic carbon of cultivated soils in China from 1980 to 2000 ( In Chinese ). *Maine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26 ( 6 ): 123—130
- [ 8 ] 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. *地理研究*, 2009, 28 ( 3 ): 601—612  
Xu X W, Pan G X, Wang Y L, et al. Research of changing characteristics and control factors of farmland topsoil organic carbon in China ( In Chinese ). *Geographical Research*, 2009, 28 ( 3 ): 601—612
- [ 9 ] 张春华, 王宗明, 任春颖, 等. 松嫩平原玉米带农田土壤有机碳时空格局. *农业工程学报*, 2010, 26 ( 增刊 ): 300—307  
Zhang C H, Wang Z M, Ren C Y, et al. Spatial and temporal dynamics of organic carbon in agricultural soil of Songnen Plain Maize Belt ( In Chinese ). *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 ( Suppl ): 300—307
- [ 10 ] 赵明松, 张甘霖, 吴运金, 等. 江苏省土壤有机质含量时空变异特征及驱动力分析. *土壤学报*, 2014, 51 ( 3 ): 448—458  
Zhao M S, Zhang G L, Wu Y J, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and its driving force in Jiangsu Province, China ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 ( 3 ): 448—458
- [ 11 ] 高建峰, 潘剑君, 刘绍贵, 等. 土地利用变化对吴江市水田土壤有机碳储量的影响分析. *地球信息科学学报*, 2011, 13 ( 2 ): 164—169  
Gao J F, Pan J J, Liu S G, et al. Influence of land use change on topsoil organic carbon storage of paddy fields in Wujiang City ( In Chinese ). *Journal of Geo-Information Science*, 2011, 13 ( 2 ): 164—169
- [ 12 ] 王相平, 杨劲松, 金雯晖, 等. 近30a玛纳斯县北部土壤有机碳储量变化. *农业工程学报*, 2012, 28 ( 17 ): 223—229  
Wang X P, Yang J S, Jin W H, et al. Change of soil organic carbon reserve in northern Manasi County in last 30 years ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 ( 17 ): 223—229
- [ 13 ] Wang S H, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Regional simulation of soil organic carbon dynamics for dry farmland in East China by coupling a 1 : 500 000 soil database with the Century model. *Pedosphere*, 2011, 21 ( 3 ): 277—287
- [ 14 ] Xu S X, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Modeling carbon dynamics in paddy soils in Jiangsu Province of China with soil databases differing in spatial resolution. *Pedosphere*, 2011, 21 ( 6 ): 696—705
- [ 15 ] 许信旺, 潘根兴, 曹志红, 等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素. *地理研究*, 2007, 26 ( 6 ): 1077—1086  
Xu X W, Pan G X, Cao Z H, et al. A study on the influence of soil organic carbon density and its spatial distribution in Anhui Province of China ( In Chinese ). *Geographical Research*, 2007, 26 ( 6 ): 1077—1086
- [ 16 ] 程先富, 谢勇. 基于GIS的安徽省土壤有机碳密度的空间分布特征. *地理科学*, 2009, 29 ( 4 ): 540—544  
Cheng X F, Xie Y. Spatial distribution of soil organic carbon density in Anhui Province based on GIS ( In Chinese ). *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29 ( 4 ): 540—544
- [ 17 ] 安徽省土壤普查办公室. 安徽土壤. 北京: 科学出版社, 1996: 51—60  
Office of Soil Survey in Anhui Province. *Soil of Anhui Province ( In Chinese )*. Beijing: Science Press, 1996: 51—60
- [ 18 ] 安徽省土壤普查办公室. 安徽土种志. 北京: 科学出版社, 1996: 10—300  
Office of Soil Survey in Anhui Province. *Soil Series*

- of Anhui Province (In Chinese). Beijing: Science Press, 1996: 10—300
- [19] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验分析方法. 北京: 科学出版社, 2012: 47—49
- Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012: 47—49
- [20] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴 (1999—2011年). [http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj\\_view.jsp?\\_index=1](http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj_view.jsp?_index=1)
- Statistical Bureau of Anhui Province. Statistical yearbooks of Anhui (1999—2011) (In Chinese). [http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj\\_view.jsp?\\_index=1](http://www.ahtjj.gov.cn/tjj/web/tjnj_view.jsp?_index=1)
- [21] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, et al. Soil database of 1 : 1 000 000 digital soil survey and reference system of the Chinese genetic soil classification system. Soil Survey Horizon, 2004, 45 (4) : 129—136
- [22] Zhao Y C, Shi X Z, Weindorf D C, et al. Map scale effects on soil organic carbon stock estimation in North China. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70 (4) : 1377—1386
- [23] Huang Y, Zhang W, Sun W J, et al. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999. Ecological Applications, 2007, 17 (3) : 692—701
- [24] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, 2004, 123 (1/2) : 1—22
- [25] Pan G X, Smith P, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129 (1/3) : 344—348
- [26] Huang B, Sun W X, Zhao Y C, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices. Geoderma, 2007, 139 (3/4) : 336—345
- [27] Fischer R A, Santiveri F, Vidal I R. Crop rotation, tillage and crop residue management for wheat and maize in the sub-humid tropical highlands I. Wheat and legume performance. Field Crops Research, 2002, 79 (2/3) : 107—122
- [28] Karlen D L, Hurley E G, Andrews S S, et al. Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. Agronomy Journal, 2006, 98 (3) : 484—495
- [29] Liao Q L, Zhang X H, Li Z P, et al. Increase in soil organic carbon stock over the last two decades in China's Jiangsu Province. Global Change Biology, 2009, 15 (4) : 861—875

## Variation of Soil Organic Carbon in Farmland of Anhui and Its Influencing Factors in The 30 Years from 1980 to 2010

ZHAO Mingsong<sup>1, 2</sup> LI Decheng<sup>2†</sup> WANG Shihang<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** 【Objective】 Soil organic carbon (SOC) is a key index in estimating soil fertility and soil C sequestration. It is, therefore, important to study changes in SOC to accurate assessment of regional soil C sequestration potential and successful sustainable utilization of soil resource. This paper was oriented to characterize spatio-temporal variation of SOC, including density and storage, in the farmland of Anhui during the 30 years after the Second National Soil Survey in the 1980s and to explore relationships between agricultural management and changes in SOC, and expected to be able to provide certain data and support for decision making related to improvement of soil quality and soil C sequestration potential in the East China. 【Method】 In this paper, Anhui Province in East China, was selected as a case for the study. Comparative study was done of the data obtained during the Second National Soil Survey and the data derived from the soil profiles collected from the farmland in 2010 and 2011, analyzing changes in soil organic carbon density (SOCD) in the surface layer (0 ~ 20 cm) and total layers (0 ~ 100 cm)

of the farmland by means of statistics. Spatio-temporal change of soil organic carbon density and storage in the different layers during 1980 and 2010 was analyzed using the pedological professional knowledge-based (PKB) method and GIS spatial analysis technique. And then relationships between agricultural management and changes in SOC were discussed. 【Result】 Results are shown as follows: (1) from 1980 to 2010, the mean of SOCD in the farmland increased by  $0.28 \text{ kg m}^{-2}$  in the surface layer, but decreased by  $0.42 \text{ kg m}^{-2}$  in the  $0 \sim 100 \text{ cm}$  layer in throughout the province. The increment of SOCD was higher in upland than in paddy field. (2) Spatially, SOCD in the surface layer increased in the northern part, but decreased in the southern part of Anhui Province during the 30-year periods, and the increment declined from north to south within the province. SOCD in the  $0 \sim 100 \text{ cm}$  soil layer increased in the middle part and decreased in the southern part of the Province. About 68% of the farmland increased in SOCD, and the farmlands were distributed mainly in the Huaibei Plain and Jianghuai hilly downland. (3) The storage of SOC in the surface layer of the farmland of the province as a whole increased by  $35.30 \times 10^9 \text{ kg}$  and that in the  $0 \sim 100 \text{ cm}$  soil layer did  $18.12 \times 10^9 \text{ kg}$ . The storage of SOC in the farmland increased mainly in the Huaibei Plain and Jianghuai hilly downland, while it went reversely in the other geographical areas. 【Conclusion】 Fertilizer application rate and straw return are the two main factors significantly influencing variation of SOC in the farmland. In this study, it was found that variation of SOC storage was significantly and positively related to organic matter content in crop roots, and that the application of large volumes of chemical fertilizers increased organic matter content in straw and roots of the crop, thus increasing the input of organic matter into the soil and contributing to accumulation of SOC in the farmland.

**Key words** Soil organic carbon; Spatio-temporal variation; GIS; Farmland; Anhui Province

(责任编辑：檀满枝)