

# 土地利用变化对吴江市水田土壤 有机碳储量的影响分析

高建峰<sup>1</sup>, 潘剑君<sup>2</sup>, 刘绍贵<sup>2</sup>, 姜小三<sup>2\*</sup>

(1. 吴江市农林局, 苏州 215000; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要:** 农业表层土壤碳库容易受人为强烈干扰,而又可以在较短的时间尺度上进行调节,当今我国经济发达地区土地利用变化必然会对土壤固碳产生重要影响。本研究以江苏省吴江市水稻土为例,利用新一代中分辨率成像光谱仪(MODIS)和 TM/ETM 影像提取了 1984 年稻田面积,以及这部分稻田在 2000 - 2005 年的土地利用变化状况。研究中以最大似然法对 TM/ETM、MODIS 影像应用归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)和陆地水分指数(LSWI)掩膜的方法作了识别提取;同时,结合第二次全国土壤普查、2003 年耕地地力调查点和吴江市农林局土肥指导站长期定位点的土壤有机碳数据估算了 1984 年和 2000 - 2005 年土壤碳库变化情况。结果表明:近 20 多年来尽管吴江市水稻土水耕熟化过程中有机碳总体呈增加的趋势,但由于大量稻田被非农用地所取代,导致土壤固碳能力大幅度下降,尤其从 2001 年开始从“碳汇”变成“碳源”。因此,在我国经济发达区应密切关注耕地转换成非农用地而导致的土壤有机碳的损失。

**关键词:** 水稻土;有机碳;土地利用;MODIS

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2011.00164

## 1 引言

陆地土壤是地球表层最大的碳库,全球 0 ~ 100 cm 表层土壤的有机碳总储量为  $1.5 \times 10^{18} - 3.0 \times 10^{18}$  g, 大约为大气 CO<sub>2</sub>-C 总量的 2 - 3 倍。全球土壤(1 m)中碳的年周转量大致与年均人类活动排放的 CO<sub>2</sub>-C 量相当。据估计,在过去 100 年期间全球土壤有机碳的损失量占同期大气圈 CO<sub>2</sub> 增加量的 20% 以上,对全球气候变化产生不可忽视的影响。农田生态系统作为陆地生态系统的一部分,无论作为全球温室气体的源还是汇,农田生态系统都对大气 CO<sub>2</sub> 浓度的年际变化有重要影响。近年来,以美国和加拿大为代表的发达国家都热衷于研究农田土壤作为大气 CO<sub>2</sub> 的“源”与“汇”的问题<sup>[1-2]</sup>。我国学者也根据上世纪 80 年代进行的第二次土壤普查数据,对农田土壤有机碳库进行了大量研究<sup>[3-9]</sup>。水稻土作为我国主要的农业土壤,在水耕熟化过程中有机碳积累是一个普遍趋势<sup>[10-12]</sup>。但在我国经济发达地

区,近年来由于稻田面积逐年减少,使用第二次土壤普查的稻田面积数据进行水稻土有机碳库的估算有很大的不确定性。本文采用遥感技术估算了经济发达地区不同土地利用方式高速变化下的土壤有机碳动态变化。作者以江苏省吴江市水稻田为例,探讨了一种采用 MODIS 影像与少量高空间分辨率遥感信息源 Landsat 影像(不仅能够免费获取且时相分辨率为 15 天)相结合来研究土地利用变化,进而估算土壤有机碳动态的新方法,以期为我国经济发达区耕地和非农用地之间的高速转换而导致的土壤有机碳变化的准确评估提供参考依据。

## 2 研究数据源和分析方法

吴江市位于江苏省东南部,北纬 30°46' ~ 31°13', 东经 120°26' ~ 120°54', 全市总面积为 1 177 km<sup>2</sup> (不包括所辖太湖水面)。全境地势低平,自东北向西南缓慢倾斜,南北高差 2m 左右。境内河道纵横,

**收稿日期:** 2010 - 04 - 26; **修回日期:** 2011 - 03 - 01.

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(40231016)。

**作者简介:** 高建峰(1970 -),江苏淮安人,博士,研究方向为土壤资源与遥感、信息系统,发表论文近 10 篇,其中,SCI 论文 1 篇。E-mail: gjf556@126.com

\* **通讯作者:** 姜小三(1967 -),男,江苏姜堰人,博士,副教授,从事资源环境信息系统方面的研究。E-mail: gis@njau.edu.cn

湖泊棋布,水域面积占全市总面积的 23%左右。土壤以壤土质黄泥土和粘土质青紫泥为主,其次为小粉土,还有少量的灰土和堆叠土。吴江市属于亚热带北缘季风区,年平均温度 15.7℃,年平均降水量 1016 mm,无霜期 226 天,全县四季分明,气候温和,

雨水充沛,气候具有南北过度的特点,光、热、水等资源丰富,十分有利于水稻种植。但由于吴江市地处我国经济最发达的长三角地区,近 20 年来建设用地扩张明显,城市面积不断扩展及小城镇发展与保护耕地的矛盾日益突出(图 1)。

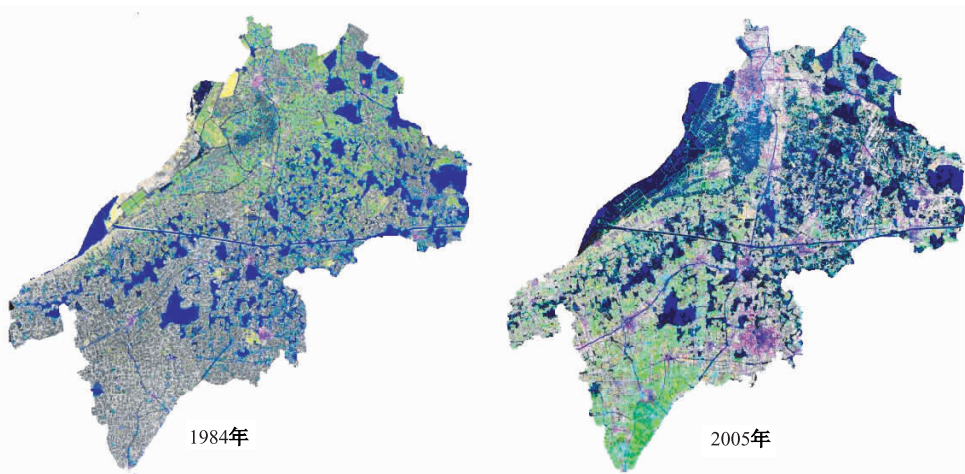


图 1 研究区位置和吴江市 1984 和 2005 年 Landsat TM/ETM 影像(5, 4, 3 合成, 图中紫色部分为建设用地,蓝色为水体)

Fig. 1 The location of the test site (Wujiang County, Jiangsu Province, China). The image was composed of bands 5, 4 and 3 of the Landsat on August 4, 1984 (left) and October 17, 2005 (right), colored blue, green and red, respectively. Urban construction land (purple in the image) has expanded rapidly during the past 20 years.

本研究利用 MODIS 影像与 TM/ETM 影像监测了土地利用的变化。遥感影像包括 1984 年 8 月 4 日和 2005 年 10 月 17 日(Path/Row; 119/38 和 119/39)Landsat 影像和 2000 - 2005 年所有 MODIS09Q1 和 MODIS09A18 天合成产品, MODIS09Q1 和 MODIS09A1 影像每年各 46 幅,均从 NASA 网站免费下载。用于影像分类的软件为 ENVI 4.3,影像的分类方法主要是应用 Xiangming Xiao<sup>[1]</sup>等人提出植被指数 NDVI、增强型植被指数 EVI 以及水分指数 LSWI 掩膜的方法,识别稻田、水体、林地等土地利用类型,并进行了变化分析。

用于遥感解译的辅助资料还包括吴江市 1 : 50 000 地形图、1 : 50 000 土壤图、2000 年 1 : 100 000 土地利用图、2000 - 2005 年气象资料和 2000 - 2004 年统计年鉴等。同时,为提高分类精度和验证分类结果,在分类过程中进行了实地调查。

### 3 吴江市水稻有机碳储量的估算与影响分析

所采用的土壤有机质资料来自于 2003 年采样

的吴江市耕地土壤质量调查数据和该市土壤肥料指导站 26 个长期定位监测资料。其中,全国耕地质量调查数据中,蔬菜地、林地(含花卉苗木地)、果园、桑园每 1000 亩取土样 1 个,稻田每 2000 亩取土样 1 个,共采得稻田土壤样品 110 个,菜地土壤样品 15 个,桑园土壤样品 26 个、果园土壤样品 10 个、林地土壤样品 33 个,以及旱地土壤样品 84 个。第二次土壤普查的数据均取自《吴江县土壤志》,包括 28 个水稻土土种,共 1236 个样点<sup>[13]</sup>。土壤有机质的测定采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法<sup>[14]</sup>。

#### 3.1 土壤有机碳密度的计算方法

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量。某一土层  $i$  的有机碳密度 DOC 计算公式如下 (Schwager & Mikhailova, 2002):

$$D_{\alpha} = SOC \times g \times H \times (1 - d_{2mm}/100) \times 10^{-1}, \quad (1)$$

式中, SOC 为有机碳的含量(%),  $g$  为容重( $g\ cm^{-3}$ );  $H$  为土层厚度(cm);  $d_{2mm}$  为大于 2mm 的石砾所占的体积百分比(%), 由于吴江为平原地区, 表层土壤

>2mm 粒径的颗粒可以忽略不计。因此,水稻土表层土壤总有机碳库,可用式(2)计算:

$$P_{\alpha}(tC)=\sum_{i=1}^ns_i\times\sum_{j=1}^nSOC_j\times\gamma_j\times H_i\times10^{-1},\tag{2}$$

式中, $j$  代表表土层(1=耕层,2=犁底层); $S_i$ 是指土种面积

对于没有容重数据的土种,笔者继续使用水稻土耕层有机碳与容重关系的回归方程(潘根兴等,2003)来估算土壤容重,方程表达式如下:

$$r(\text{gcm}^{-3})=-0.220\times\ln\text{SOC}(\text{gkg}^{-1})+1.780\\(R^2=0.157,P<0.01)\tag{3}$$

尽管大多数的研究者使用 30cm 土层厚度<sup>[14-16]</sup>或者 20~25cm 土层厚度<sup>[17-18]</sup>来估算表层土壤的有机碳储量和固碳潜能,本研究为统一起见,仍使用

2003 年全国土壤定位监测实际取样厚度 15 cm 来估算表层水稻土有机碳储量。

### 3.2 土地利用变化的遥感分析

#### 3.2.1 20 年来吴江市土地利用的变化

近 20 多年来吴江市水稻种植面积从 1984 年的 715 km<sup>2</sup>下降到 2005 年的 255 km<sup>2</sup>,减少了 60%以上(见图 2)。其变化原因:(1) 城镇扩展。20 年间,城镇用地面积增加 300%以上,这些新增的城乡建设用地最主要来源于水田;(2) 旱地减少。研究区的菜地发生了显著的空间位置变迁,而且面积也有所减少;(3) 林地面积增加;(4) 水域变化。本次所监测到的水域面积变化多是由于蓄水水位的升高而致使水库周围的一些滩涂被水体所覆盖;此外新增的水产养殖也是水域面积发生变化的原因之一。

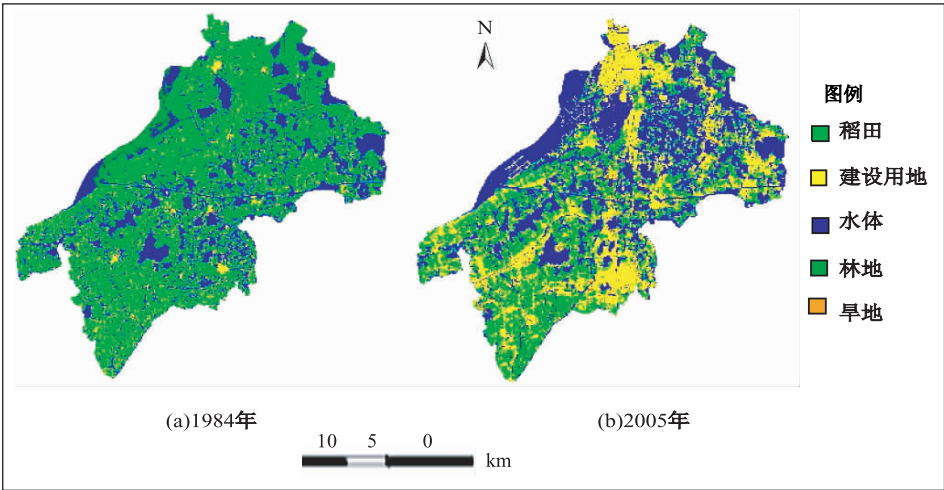


图2 1984 年和 2005 年 Landsat 影像土地利用分类图((a):1984;(b):2005)  
Fig.2 Landsat 1984 and Landsat 2005 land use class map ((a):1984;(b):2005)

#### 3.2.2 ETM、MODIS 影像识别分类结果

辅以 2005 年 Landsat 影像的 2000 - 2005 年 MODIS 影像分类的结果见表 1。可以看出,除水面面积基本上没有变化外,稻田、建设用地、林地、旱地面积均发生了较大变化。从 2000 - 2005 年 6 年间吴江市水稻总面积下降约 30%,城市建设用地的扩张仍旧是水稻种植面积减少的主要原因;另外,苏州、上海等绿化建设的需求也导致吴江市周边一部分水稻田被占用为苗木种植基地。但近些年来由于当地政府采取强制保护耕地的措施,特别是严格禁止抛荒等政策的实施,对该地区水稻田的保护也起了比较积极的作用。从遥感解译的结果来看,吴江市旱地面积 2004 年和 2005 年有明显的下降

趋势,这主要是由于一些建设用地周围的抛荒地恢复为水田的结果。

表 1 稻田部分 2000 - 2005 年土地利用的变化

Tab. 1 Areas of different soil series or land use types for paddy field in 1984 derived from Landsat images (1984, 2005) and MODIS (2000 - 2005)

| 土地利用<br>方式 | 2000<br>(km <sup>2</sup> ) | 2001<br>(km <sup>2</sup> ) | 2002<br>(km <sup>2</sup> ) | 2003<br>(km <sup>2</sup> ) | 2004<br>(km <sup>2</sup> ) | 2005<br>(km <sup>2</sup> ) |
|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 稻田         | 368.36                     | 315.21                     | 297.50                     | 237.77                     | 261.64                     | 254.79                     |
| 林地         | 33.59                      | 43.73                      | 53.36                      | 62.28                      | 82.65                      | 92.22                      |
| 旱地         | 34.02                      | 35.46                      | 39.47                      | 64.09                      | 14.43                      | 10.25                      |
| 建设用地       | 256.98                     | 296.02                     | 300.09                     | 326.28                     | 331.7                      | 336.26                     |
| 水体         | 21.67                      | 24.20                      | 24.20                      | 24.20                      | 24.20                      | 21.10                      |
| 总和         | 714.62                     | 714.62                     | 714.62                     | 714.62                     | 714.62                     | 714.62                     |

3.3 土壤有机碳含量的分布特征及变化

3.3.1 1982 年和 2003 年水稻土有机碳含量分布特征分析

图 3 是 2003 年全国耕地质量调查的土壤有机碳含量频度分布图。可以看出,2003 年土壤有机碳含量的频度分布服从正态分布,70%样本的有机碳含量在 12.5~20g/kg 之间,而 54%样本的有机碳含量在 15~20g/kg。这与潘根兴等关于中国水稻土 53%的样品有机碳含量在 15~20g/kg 和江苏水稻土 33%的有机碳含量在 15~20g/kg 的结果相类似。

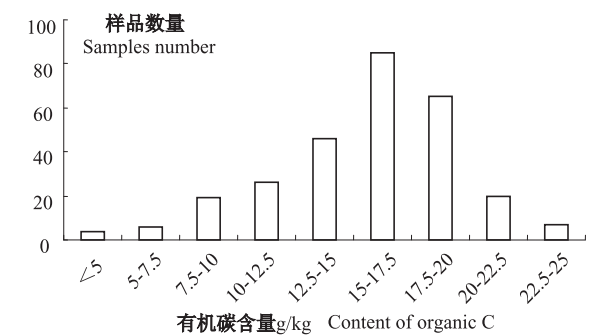


图 3 表层水稻土有机碳含量频数分布(2003 年)  
Fig. 3 The frequency distribution of soil organic carbon in topsoil of paddy fields in 2003

与 1982 第二次土壤普查结果比较,有机碳含量大于 20g/kg 样本分布基本相近,有机碳含量在 15~20g/kg 的样本比例有了较大的上升。总体来看,吴江市水稻土平均有机碳含量从 1982 年的 16.63g/kg 增加到 2003 年的 16.85g/kg。

表 2 不同土地利用方式下土壤有机碳含量及年变化率  
Tab. 2 SOC content and yearly change rate under different kinds of land use

| 土地利用方式 | 样本数(个) | 2003 年 SOC (g/kg) | 年变化率(g/kg) |
|--------|--------|-------------------|------------|
| 稻田     | 110    | 17.0              | 0.01       |
| 林地     | 33     | 14.4              | -0.06      |
| 旱地     | 84     | 14.9              | -0.03      |
| 建设用地   | —      | —                 | —          |
| 水体     | —      | —                 | —          |

3.3.2 不同土地利用方式下土壤有机碳含量的变化

表 2 可见,3 种土地利用方式下土壤有机碳含量依次为:稻田>旱地>林地。稻田土壤的有机碳近 20 多年来平均以每年 0.01g/kg 速率升高;而林地和旱地土壤有机碳则呈现不同程度的下降,每年的下降速率分别为:0.06g/kg 和 0.03g/kg;通过 T

检验表明,稻田有机碳的含量显著高于林地和旱地。本研究假定稻田转换为建设用地后其土壤有机碳含量保持不变。

3.4 土壤碳库的遥感动态监测结果

从遥感解译的结果来看,吴江市 1984 年的水稻田到 2000-2005 年被转化为稻田、建设用地、林地、旱地和水体 5 种土地利用方式。近 20 多年来因水稻种植面积减少,土壤固碳作用也大幅度下降(表 3)。1984 年水稻田固定的土壤有机碳为  $107.2 \times 10^3 \text{t}$ ,而 2000-2005 年这部分水稻田转换为不同土地利用方式后,仍为水稻田的耕地 6 年中分别固定有机碳:  $55.3 \times 10^3 \text{t}$ 、 $47.3 \times 10^3 \text{t}$ 、 $44.6 \times 10^3 \text{t}$ 、 $35.7 \times 10^3 \text{t}$ 、 $39.2 \times 10^3 \text{t}$  和  $38.2 \times 10^3 \text{t}$ ,而林地和旱地 6 年中却损失土壤有机碳:  $45.5 \times 10^3 \text{t}$ 、 $55.4 \times 10^3 \text{t}$ 、 $65.8 \times 10^3 \text{t}$ 、 $84.9 \times 10^3 \text{t}$ 、 $80.9 \times 10^3 \text{t}$ 、和  $87.6 \times 10^3 \text{t}$ 。从吴江市土壤定位监测结果来看,稻田转化为苗木用地和旱地后具有明显的碳释放效应。2000-2005 年吴江市苗木面积增加近 200%,而土壤有机碳损失量也从 2000 年  $30.2 \times 10^3 \text{t}$  增加到 2005 年  $83.0 \times 10^3 \text{t}$ 。旱地利用方式同样对土壤碳固定不利,但由于面积和损失率均小于林地,每年有机碳的损失量也相对比林地要少的多。总体而言,2001 年起林地和旱地土壤的碳损失量已经大于稻田土壤对有机碳的固定量,也就是说,从 2001 年起该地区 1984 年种植水稻的这部分土壤已经从“碳汇”变成了“碳源”。

表 3 2000-2005 年吴江市 1984 年表层水稻土有机碳固定  
Tab. 3 SOC sequestration from 2000 to 2005 of Wujiang paddy fields, taking 1984 value as the reference

| SOC  | 1984                | 2000                | 2001                | 2002                | 2003                | 2004                | 2005                |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 固定   | ( $10^3 \text{t}$ ) | ( $10^3 \text{t}$ ) | ( $10^3 \text{t}$ ) | ( $10^3 \text{t}$ ) | ( $10^3 \text{t}$ ) | ( $10^3 \text{t}$ ) | ( $10^3 \text{t}$ ) |
| 稻田   | 107                 | 55.3                | 47.3                | 44.6                | 35.7                | 39.2                | 38.2                |
| 林地   |                     | -30.2               | -39.4               | -48.0               | -56.1               | -74.4               | -83.0               |
| 旱地   |                     | -15.3               | -16.0               | -17.8               | -28.8               | -6.5                | -4.6                |
| 建设用地 |                     | —                   | —                   | —                   | —                   | —                   | —                   |
| 水体   |                     | —                   | —                   | —                   | —                   | —                   | —                   |
| 总和   | 107                 | 9.7                 | -8.0                | -21.2               | -49.2               | -41.6               | -49.4               |

4 结语

吴江市土地利用方式近 20 年来发生了很大变化,特别是水稻种植面积的大量减少和非稻田用地

的逐渐增加,已造成了该地区土壤有机碳的明显下降。从2001年起,原1984年部分稻田转化为林地、旱地所造成的有机碳损失量,已经超过了剩余耕地水田种植而固定的有机碳量。

吴江市作为中国典型经济最发达地区之一,耕地面积比较集中,人口稠密,非耕地面积与日俱增,耕地与非耕地之间的矛盾日益突出;而该地区发生的水稻土有机碳储量的减少对于全国经济发达地区水稻土碳库的变化研究具有明显的借鉴意义。因此,迫切需要采取保护性耕作和秸秆还田等措施来减少经济发达区水稻田土壤有机碳的损失是目前增加土壤“碳汇”和防止土壤碳损失的当务之急。

### 参考文献:

- [1] Xiao Xiangming, Boles T S, Liu Jiyuan. Mapping Paddy Rice Agriculture in Southern China Using Multi-temporal MODIS Images [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95, 480 - 492.
- [2] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 101 - 106.
- [3] 潘根兴. 中国土壤有机碳、无机碳库量研究[J]. 科技通报, 1999, 15(5): 330 - 332.
- [4] 潘根兴. 地球表层系统土壤学[M]. 北京: 地质出版社, 2000, 30 - 37.
- [5] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687 - 699.
- [6] 解宪丽, 孙波, 周慧珍. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35 - 43.
- [7] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究, 1999, 18(4): 349 - 356.
- [8] Pan Genxing, Li Lianqing, Zhang Xuhui, *et al.* Carbon Storage and Sequestration in Surface Soil of Jiangsu[C]. 17<sup>th</sup> WCSS Transactions, Bangkok, Thailand, 2002, 2191.
- [9] Pan Genxing, Li Lianqing, Zhang Qi, *et al.* Organic Carbon Stock in Topsoil of Jiangsu Province China and Recent Trend of Carbon Sequestration[J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(1): 1 - 7.
- [10] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题——兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(3): 100 - 109.
- [11] 许信旺, 潘根兴. 中国水稻土碳循环研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 961 - 966.
- [12] Pan Genxing, Li Lianqing, WU Laosheng and Zhang Xuhui. Storage and Sequestration Potential of Topsoil Organic Carbon in China Paddy Soils [J]. Global Change Biology, 2003, 10: 79 - 92.
- [13] 江苏省土壤普查办公室. 吴江县土壤志 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999, 12 - 288.
- [15] Schwage S J, Mikhailova E A. Estimating Variability in Soil Organic Carbon Storage Using the Method of Statistical Differentials [J]. Soil Sciences, 2002, 167: 194 - 200.
- [16] Arrouys D, Balesdent J. Increasing Carbon Stocks in French Agricultural Soils [J]. Scientific Assessment Unit for Expertise, INRA. 2002. <http://www.inra.fr/actualites/rapport-carbone.html>
- [17] Batjes N H. Carbon and Nitrogen Stocks in the Soils of Central and Eastern Europe [J]. Soil Use and Management, 2002, 18, 324 - 329.
- [18] Bernoux M, Carvalho M D S, Volkoff B, *et al.* Brazil's Soil Carbon Stocks [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66, 888 - 896.



# Influence of Land Use Change on Topsoil Organic Carbon Storage of Paddy Fields in Wujiang City

GAO Jianfeng<sup>1</sup>, PAN Jianjun<sup>2</sup>, LIU Shaogui<sup>2</sup>, JIANG Xiaosan<sup>2</sup>

(1. *Agricultural and Forestry Bureau of Wujiang City, Suzhou 215000*; 2. *College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

**Abstract:** Soil organic carbon (SOC) storage is an important parameter of soil environmental quality, and agriculture soil is easy to be interfered by human activities and also could be adjusted in a short time scales. The ongoing land-use changes in developed area in China have important influence on SOC (soil organic carbon) sequestration. In this research we take Wujiang County as a case, evaluated the influence of land-use changes on the soil carbon sequestration ability in the paddy fields. The land use classification in Wujiang County from 2000 to 2005 were conducted by a new methodology that integrates 8-day composite images (500-m and 250-m spatial resolution) from the moderate resolution imaging spectro-radiometer (MODIS) sensor with Landsat data. The maximum likelihood classification (MLC) method was used to conduct TM/ETM images classification. The vegetation index (NDVI, EVI) and land surface water index (LSWI) mask method was used to conduct MODIS images classification. The land use class map and the density of soil organic carbon (SOC) data from the 2nd State Soil Survey and the nationwide arable soil monitoring system (NASMC) along with county-level soil reconnaissance data were further used to calculate the soil carbon sequestration ability. The result showed that irrigation-based rice cultivation in the study area has induced significant enrichment of SOC storage in paddy soils. But carbon sequestration ability tended to decline over the most recent six years due to decreasing in paddy area and shifting to other land uses. The paddy soils have switched from carbon sink to carbon source since 2001. The total SOC sequestration in 0 – 15cm soils in 1984, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 and 2005 were  $107\times10^3\text{t}$ ,  $9.2\times10^3\text{t}$ ,  $-8.0\times10^3\text{t}$ ,  $-21.2\times10^3\text{t}$ ,  $-49.2\times10^3\text{t}$ ,  $-41.6\times10^3\text{t}$  and  $-49.4\times10^3\text{t}$  respectively. The results of this study suggested that land use changes have a great influence on topsoil carbon (C) sequestration, particularly on C stocks and C sequestration potential in paddy fields in developed areas of China.

**Key words:** paddy soil; SOC; land-use; MODIS