

不同区域的人口密集农村地区土壤有机碳的分布

焦加国^{1,2}, 杨林章², 武俊喜³, 李辉信^{1,*}, Erle C. Ellis⁴

(1. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;

3. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100094; 4. 马里兰大学地理与环境系统系, 巴尔的摩 21250, 马里兰, 美国)

摘要: 基于 IKONOS 高分辨率 (1m) 卫星遥感图, 根据 Ellis 提出的村级景观分类体系, 研究我国 5 个不同宏观生态区域 (高邑、宜兴、金堂、益阳和电白) 的村级景观细微尺度上土地利用、土地覆盖、生态立地各层次上土壤表层 (0~30cm) 有机碳的密度和储量, 结果表明: 高邑、宜兴、金堂、益阳和电白 5 个地区的土壤有机碳密度分别为: 2.62、3.47、2.24、2.86 kg/m² 和 2.70 kg/m², 平均土壤有机碳密度为 2.78 kg/m²。土地利用景观中, 高邑地区的水浇地和其它地区的水田和林地的土壤有机碳密度较高, 高邑、宜兴、金堂、益阳和电白 5 个地区土壤有机碳储量最高的土地利用景观分别为水浇地、水田、旱地、水田和林地、林地; 土地覆盖景观中, 1 年生和多年生植被覆盖景观的土壤有机碳密度最高。在由高邑至宜兴, 最后至电白的纬度逐渐降低过程中, 1 年生植被覆盖景观的土壤有机碳储量逐渐减少, 而多年生土地覆盖景观呈相反趋势。

关键词: 中国; 村级景观; 土地利用; 土地覆盖; 生态立地; 土壤有机碳

文章编号: 1000-0933 (2007) 05-1969-09 中图分类号: Q149, S154.1 文献标识码: A

Soil organic carbon distribution in densely populated village landscape of different regions

JIAO Jia-Guo^{1,2}, YANG Lin-Zhang², WU Jun-Xi³, LI Hui-Xin^{1,*}, Erle C. Ellis⁴

1 College of Resources & Environmental Sciences, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

3 College of Agronomy & Agroecology, China Agricultural University, Beijing 100094, China

4 Department of Geography and Environmental Systems, University of Maryland, Baltimore County 21250, Maryland, USA

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (5): 1969 ~ 1977.

Abstract: China's densely populated village landscapes play a significant role in global environmental processes because of their vast area and population. Here we investigate the influence of land use on soil carbon stocks (top 0–30 cm) within and across these densely populated landscapes based on measurements at five research sites in environmentally distinct regions across China: the North China Plain (Gaoyi County, Hebei Province), Yangtze Plain (Yixing County, Jiangsu Province), Sichuan Hilly Region (Jintang County, Sichuan Province), Subtropical Hilly Region (Yiyang County, Hunan Province), and Tropical Hilly Region (Dianbai County, Guangdong Province). Village landscapes were first stratified into ecologically-distinct components (ecotopes) by high spatial resolution mapping (1 m) in a set of 12 regionally-representative 500 500 m landscape quadrats (sample cells) in each site (total = 60) using IKONOS satellite imagery and

基金项目: 美国国家科学基金资助项目 (DEB-0075617)

收稿日期: 2006-02-19; **修订日期:** 2006-07-27

作者简介: 焦加国 (1981~), 男, 江苏连云港人, 博士生, 主要从事 GIS 和土壤生态研究. E-mail: jiaguojiao@yahoo.com.cn

* **通讯作者** Corresponding author E-mail: huixinli@njau.edu.cn

致谢: 该项目由美国马里兰大学 Ellis 博士主持, 与中国科学院南京土壤研究所杨林章教授、中国科学院地理所欧阳华教授、中国农业大学农学与生物技术学院程序教授合作, 特此致谢

Foundation item: The project was financially supported by US National Science Foundation (No. DEB-0075617)

Received date: 2006-02-19; **Accepted date:** 2006-07-27

Biography: JIAO Jia-Guo, Ph. D. candidate, mainly engaged in the GIS and soil ecology E-mail: jiaguojiao@yahoo.com.cn

<http://www.ecologica.cn>

fieldwork. Samples of ecotope features were then selected for soil sampling and analysis of soil organic carbon (SOC) by a stratified sampling design based on the areas of each landscape class. Results demonstrate that SOC density in Gaoyi, Yixing, Jintang, Yiyang, and Dianbai, was 2.62, 3.47, 2.24, 2.86 kg/m², and 2.70 kg/m², respectively. Soils under paddy and forestry land use had the highest SOC density in all sites except Gaoyi, where irrigated use had the highest SOC. The lowest SOC s were associated with constructed, fallow and other land use classes with thin vegetation cover. The land use class with the highest stock of SOC was irrigated in Gaoyi, paddy in Yixing, rainfed agriculture in Jintang, paddy and forestry in Yiyang, and forestry in Dianbai. In terms of land cover, the annual and perennial cover classes had the highest SOC density across sites (2.94, 3.13 kg/m², respectively) and also had the highest SOC stocks in every site. SOC stocks increased with latitude under annual cover, but the contrary trend was observed for perennial cover. Ecotope-level analysis showed that SOC distribution was more complex within and across sites, and SOC density distribution was affected by many factors, including climate, land use, land cover, and specific human activities.

Key Words: China; village landscapes; land use; land cover; ecotope; soil organic carbon

土壤有机碳库在全球变化研究中具有重要地位。全球土壤呼吸作用的碳流量为 68 ~ 77 Gt/a^[11], 是全球碳循环中的一个主要流通途径。全球有 1400 ~ 1500 Gt 的碳是以有机质形式储存于土壤中, 是陆地植被碳库 (500 ~ 600 Gt) 的 2 ~ 3 倍, 是全球大气碳库 (750 Gt) 的 2 倍多, 土壤贡献于大气 CO₂ 的年通量是化石燃料燃烧贡献量的 10 倍^[2,3]。人类对自然资源的滥用, 尤其是无节制地燃烧化石燃料、毁灭森林和改变土地利用方式等活动, 对碳在地球各圈层特别是气圈与土圈之间的平衡机制有相当显著的影响, 造成二氧化碳浓度的持续增高^[4]。土壤中的有机碳储量是进入土壤的生物残体等有机物质的输入与以土壤微生物分解作用为主的有机物质的损失之间的平衡^[5]。土壤有机碳储量受气候、植被、地形、土壤理化特性以及人类活动等诸多物理、生物和人为因素的影响^[6]。

国际上“迷失的碳汇”存在很多不确定性因子, 小尺度研究村级景观有助于减少碳循环研究中存在的某些不确定因素。通常的土壤碳研究往往应用土壤类型法, 而没有对小尺度的村级景观中的土地利用覆被给予应有的重视。村级景观, 作为地球上最早出现且分布最广的人为景观, 是由自然和人类经营斑块共同组成的嵌块体, 它既受自然环境条件的制约, 又受人类经营活动和经营策略的影响。FAO^[7]估算出大气中 70% 的 CH₄ 和 90% 的 NO₂ 来源于乡村农业活动和土地利用方式的转换等过程; 全球大面积的土地转化为耕地, 导致了 CO₂ 汇功能的大幅度减弱和土壤呼吸的加强^[8]; 此外, 村级景观大量生物量的燃烧也会释放 CO₂。运用我国人口密度数据和农业面积比例数据, Ellis 计算出我国村级景观面积为 2.31 × 10⁶ km², 占全球村级景观面积的 26%; 乡村人口 5.2 亿, 占全球 29%^[9], 庞大的农业人口和广阔的乡村面积使我国村级景观在全球变化研究中占有重要地位。村级景观, 作为农业发展的主要空间, 其人为干扰作用十分强烈, 生态过程复杂, 农户水平细微尺度的土地利用变化和资源管理行为多样化, 村级景观内土地利用呈现高度的异质性。我国多数乡村景观的土地利用转换并不在于乡村景观面积的大幅度增减, 而在于乡村景观内部的小尺度转换^[10]。这使得用通常景观大中尺度研究的方法来获取小尺度多样化变得十分困难, 易掩盖微小景观的细微特征变化, 如树林、房舍、旱地、小道和沟渠^[11-13]。要在如此小的尺度上进行复杂的景观生态学研究面临严峻的挑战。

本研究借助高分辨 (1m) 的 (IKONOS) 影像, 同时运用多层次景观分类和制图方法进行综合分析^[9], 研究我国 5 个不同宏观生态区域的村级景观细微尺度上不同土地利用、植被覆盖、生态立地条件下土壤 (0 ~ 30 cm) 有机碳密度及储量情况, 了解气候环境、人为管理措施等因子对土壤有机碳分布差异的影响。

1 研究方法

1.1 宏观生态区域 (sites) 的选择

村级景观生态区域划分的目的在于从我国复杂多样的景观中提取人口密集 (250 ~ 1500 人 / km²) 的村级

景观生态区,本项目景观生态区域的划分借助荷兰科学家 Verburg发展的基于 GIS的统计分析方法^[14],根据文献资料和专家知识,选取两类最重要的乡村景观分类指标:景观自然特征(Biogophysical)和作物种植特征(Cropping system)。得到5个高度相似性的人口密集的景观生态区:黄淮海平原景观生态区、长江中下游平原景观生态区、江南山地丘陵景观生态区、四川盆地丘陵景观生态区和华南山地丘陵景观生态区。聚类得到的区域约占我国65%的乡村人口和约50%的耕地面积,具有广泛的代表性(表1)。

表1 5个地区概况^[16]Table 1 The basic description of five sites^[16]

| 研究地区 Research site | 经纬度 Longitude, latitude | 省份 Provinces | 区域名称 Region | 主要土壤类型 Main soil type | 人口密度 Population density (P/km) | 年降水量 Annual precipitation (mm) | 年平均气温 Annual mean temperature () |
|-----------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 高邑 Gaoyi | 114. 5600 E, 37. 6440 N | 河北 Hebei | 黄河冲积平原 North China Plain | 潮土 Caotu | 460 | 645 | 13. 0 |
| 宜兴 Yixing | 119. 6033 E, 31. 3812 N | 江苏 Jiangsu | 长江中下游平原 Yangtze Plain | 水稻土 Paddy soil | 456 | 1312 | 16. 6 |
| 金堂 Jintang | 104. 7558 E, 30. 5482 N | 四川 Sichuan | 四川盆地 Sichuan Hilly | 紫色土 Purple soil | 311 | 950 | 16. 7 |
| 益阳 Yiyang | 112. 4643 E, 28. 3316 N | 湖南 Hunan | 江南山地丘陵 Subtropical Hilly | 黄壤,黄棕壤 xanthozem | 203 | 1426 | 17. 3 |
| 电白 Dianbai | 111. 3134 E, 21. 6366 N | 广东 Guangdong | 华南山地丘陵 Tropical Hilly | 红壤 latosol | 241 | 1651 | 23. 6 |

1.2 研究地区 AOI(Area of Interest)的选取

在5个人口密集的乡村景观区域范围内,将近期覆盖区域中部分地区的Landsat遥感影像(分辨率为28.5m)进行土地覆被监督分类,并将其分类图划分为500m×500m的单元网格,剔除了水域>75%或城镇面积>25%的单元格后,进行聚类分析并在IKONOS遥感影像覆被的100km²范围内,选取12个500m×500m的具有区域代表性的景观样方,并基于1m分辨率的IKONOS遥感影像通过直接解译和实地检验对边界清晰的均质景观缀块进行分类和绘图。

1.3 景观分类制图

Ellis等制定了以地形(landform)、土地覆被(land cover)、土地利用(land use)、景观分类单元组共同组合构成的生态立地(ecotope)分层分类规则^[9,15]。生态立地表示景观中最小的均质斑块,并至少近期连续两年稳定的最小的均质斑块^[15]。所有层次的类型最终以生态立地(ecotope)为基本单元来表达。该系统是一逻辑的层次系统,即可在每一等级上分出不同的乡村景观类型;同时也可用综合的属性来表达每个景观单元,即每一景观单元具有多级层次的属性特征。例如:生态立地“SLTPd02”表示地形为斜坡(landform = SL = Sloping),土地利用为林地(land use = T = Forestry),土地覆盖为多年生(land cover = P = Perennial)的次生闭合落叶树(group + type = dt02)(表2)。

1.4 样点布设及田间采样

土壤取样是基于生态立地为单元的景观分类图及景观分类组合的区域权重面积系数(MWP)来设计。根据生态立地(Ecotope),地形与土地利用/覆被组合(FUC = FROM + USE + COVER)以及土地利用和覆被组合(UC = USE + COVER)3种分类层次的区域权重面积比率(MWP_Area%),确定并调整土壤取样点的在不同景观分类组合的数量。并按照此顺序先后进行取样,如果前面的取样结果包含后面的景观分类组合,则不再重复取样。各景观分类组合均按照计算值取样,最少3个样,最多10个样,最后利用GIS软件在相应土地利用覆盖图上确定样点位置,将由GIS生成的样点输入GPS,根据GPS导航定位和每个样点所属的生态立地景观类型准确找到每个样点(Waypoint)的位置。然后去除样点表面的杂草、石头等杂物,用直径5.08cm的分

裂式采样器 (AMS, American Falls, Idaho)进行采样,土壤取样器是由一可以滑动的手柄和一圆柱体组成,土壤采样器是依靠手柄的自重用手慢慢敲打下去,装土样的圆柱体可以打开,土样分为两层,分别为 0~15cm 和 15~30cm,然后分别装入定制的布袋中,采回的土样及时风干。

表 2 村级景观 4级分类描述^[16]Table 2 Ecotope classification levels and classes for village landscapes^[16]

| 地形 Land form | | 土地利用 Land use | | 土地覆盖 Land cover | |
|--------------|---------------------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 代码 Code | 描述 Description | 代码 Code | 描述 Description | 代码 Code | 描述 Description |
| AN | 人工地段 Anthropogenic | A | 水产用地 Aquaculture | A | 一年生植被 Annual |
| BP | 台地 Bench plateau | C | 建设用地 Constructed | E | 裸露地面 Bare soil |
| EX | 挖掘地 Excavated | D | 干扰地 Disturbed | M | 混合覆被 Mixed |
| FP | 冲积平原 Floodplain | F | 闲置地 Fallow | P | 多年生植被 Perennial |
| FS | 山麓 Foot slope | H | 园艺用地 Horticulture | S | 硬化地面 Sealed |
| SL | 斜坡 Sloping | I | 水浇地 Irrigated | V | 变化的 Variable |
| SR | 季节性河 Seasonal river | M | 开采或填埋地 Mine & Fill | W | 水面 Water |
| SS | 陡坡 Steep slope | O | 观赏园林 Ornamental | X | 荒地 Barren |
| SU | 山顶 Summit | P | 水田 Paddy | | |
| TS | 梯田 Terraced slope | R | 旱地 Rainfed | | |
| CA | 小运河 Small canal | T | 人工林地或草地 Forestry | | |
| CB | 大运河 Large canal | V | 变化的 Variable | | |
| CM | 运河边缘 River margin | | | | |
| MA | 沼泽地 Marsh | | | | |
| PA | 小池塘 Small pond | | | | |
| PB | 大池塘 Large pond | | | | |

1.5 样品处理及实验室分析

过筛前,称量风干土重,然后全部过 2mm 筛,过筛过程中,剔除植物根系、石子和昆虫等杂物,再次称量过筛后风干土重(计算有机碳储量)。取约 80g 过 2mm 的土样,再过 0.25mm 筛,用于实验室分析。容重测量用土壤烘干重(过 2mm 筛)除以土钻体积(3.14 × 2.54² × 30cm³或 3.14 × 2.54² × 15cm³);有机质测定采用外加热重铬酸钾容量法。测定过程中运用了标样 7416 来确保测定的准确性。

土壤有机碳密度是有机碳含量、土壤容重和土壤深度的乘积,整个地区有机碳密度是由生态立地(最细分类水平)面积加权平均而得,有机碳储量是有机碳密度和面积的乘积,有机质和有机碳的转化系数为 1.724。土壤全氮和全磷密度的计算和土壤有机碳密度相同:

$$SOC = \sum_i BD_i \times C_i \times d_i \quad (1)$$

SOC 为土壤有机碳密度 (kg/m²), BD_i 为土壤容重 (g/cm³), C_i 为土壤有机碳含量 (g/kg), d_i 为土壤深度 (m)。

采用单因素的方差分析 (ANOVA) 来检验土壤属性在不同土地利用类型之间的差异。如果有显著性差异,进一步进行多重比较。

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用景观与土壤有机碳密度和储量的关系

2.1.1 同种土地利用景观条件下土壤有机碳密度在不同地区间的变异

分析结果表明(表 3),干扰地 (D)、闲置地 (F)、观赏园林 (O)、水田 (P) 和旱地 (R) 6 种土地利用景观的土壤有机碳密度在不同地区间均有显著差异,而建设用地 (C)、水浇地 (I)、开采用地 (M) 和林地 (T) 的土壤有机碳密度在不同地区间均无显著差异。宜兴地区的干扰地、闲置地和旱地的土壤有机碳密度均为 5 个地区中最高,分别为 3.49、2.37kg/m² 和 3.62kg/m²;水田土壤有机碳密度最高的在益阳地区,为 4.20kg/m²。周涛

等学者研究报道^[17],在 $10 < T < 20$ 的地区,土壤有机碳与温度和降雨量表现出一种正相关性,但在本研究中,此规律并没有出现,例如,宜兴地区的温度和降雨量均居中,但该地区土壤有机碳密度高于其它四个地区,这主要是因为受人类活动的影响,使得土壤有机碳受气候因子影响强度降低了,甚至人为因素占了主导作用。同时,植被方式也会影响土壤有机碳,例如,高邑、宜兴、金堂、益阳、电白五个地区的旱地所种植的作物分别为:小麦、小麦和桑树、小麦和脐橙、蔬菜和茶树、龙眼和荔枝,即同种土地利用景观下的作物类型在不同地区区间也有差异。

2.1.2 各地区不同土地利用景观下的土壤有机碳密度的变异

从各个地区土壤有机碳密度的分布来看(表3),高邑地区,土壤有机碳密度最高的为行道林地($4.84\text{kg}/\text{m}^2$),水浇地、旱地、干扰地、温室菜地和建设用地居中,土壤有机碳密度均在 $2\sim 3\text{kg}/\text{m}^2$,最低的为闲置地($0.79\text{kg}/\text{m}^2$)和变化用地($1.15\text{kg}/\text{m}^2$);宜兴地区,土壤有机碳密度最高的是水田($4.00\text{kg}/\text{m}^2$)、旱地($3.62\text{kg}/\text{m}^2$)、水浇地($3.37\text{kg}/\text{m}^2$)、干扰地($3.49\text{kg}/\text{m}^2$),其次是建设用地($2.85\text{kg}/\text{m}^2$)、闲耕地($2.37\text{kg}/\text{m}^2$)和水产用地($2.53\text{kg}/\text{m}^2$),最低的是观赏园艺地($1.86\text{kg}/\text{m}^2$);金堂地区,水田土壤有机碳密度最高,为 $2.86\text{kg}/\text{m}^2$,其它土地利用景观的土壤有机碳密度均在 $2\sim 2.5\text{kg}/\text{m}^2$;益阳地区的土壤有机碳密度分布和金堂地区大致相同,只是多了开采用地($0.49\text{kg}/\text{m}^2$)和闲耕地($1.20\text{kg}/\text{m}^2$)两种土壤有机碳密度很低的土地利用景观;电白地区,土壤有机碳密度最高的是水田($2.85\text{kg}/\text{m}^2$)和林地($2.81\text{kg}/\text{m}^2$),其次是旱地($2.54\text{kg}/\text{m}^2$)、建设用地($2.15\text{kg}/\text{m}^2$)、干扰地($2.08\text{kg}/\text{m}^2$),最低的是开采用地($0.36\text{kg}/\text{m}^2$)。综合5个地区,在主要的土地利用景观中,土壤有机碳密度最高的是水田($3.48\text{kg}/\text{m}^2$)、和水浇地($3.11\text{kg}/\text{m}^2$),最低是开采用地($0.43\text{kg}/\text{m}^2$)。

表3 3个地区土地利用景观下土壤有机碳密度和储量的比较

Table 3 Comparison of SOC densities and stocks between land use in five sites

| 土地利用 Land use | 有机碳密度 Soil organic carbon density (kg/m^2) | | | | | | 有机碳储量 Soil organic carbon stock (%) | | | | |
|--------------------|--|--------------|---------------|--------------|---------------|------------|-------------------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | 高邑 Gaoyi | 宜兴 Yixing | 金堂 Jintang | 益阳 Yiyang | 电白 Dianbai | 平均 Mean | 高邑 Gaoyi | 宜兴 Yixing | 金堂 Jintang | 益阳 Yiyang | 电白 Dianbai |
| 水产用地 Aquaculture | - | 2.53 | - | - | - | 2.53 | - | 8.29 | - | - | - |
| 建设用地 Constructed | 2.41 | 2.85 | 2.16 | 2.10 | 2.15 | 2.33 | 11.37 | 9.01 | 5.56 | 6.04 | 0.96 |
| 干扰地 Disturbed | 2.38 b | 3.49 a | 2.37 b | 2.35 b | 2.08 b | 2.53 | 1.17 | 3.75 | 3.63 | 4.79 | 8.94 |
| 闲置地 Fallow | 0.79 c | 2.37 a | - | 1.20 b | - | 1.45 | 1.73 | 4.08 | - | 0.15 | - |
| 园艺用地 Horticulture | 2.73 | - | - | - | - | 2.73 | 0.30 | - | - | - | - |
| 水浇地 Irrigated | 2.85 | 3.37 | - | - | - | 3.11 | 74.38 | 6.50 | - | - | - |
| 开采,填埋地 Mine & Fill | - | - | - | 0.49 | 0.36 | 0.43 | - | - | - | 0.15 | 0.15 |
| 观赏园林 Ornamental | 4.84 a | 1.86 b | - | - | - | 3.35 | 1.24 | 0.04 | - | - | - |
| 水田 Paddy | - | 4.00 a | 2.86 b | 4.20 a | 2.85 b | 3.48 | - | 51.13 | 14.93 | 38.40 | 17.51 |
| 旱地 Rainfed | 2.27 b | 3.62 a | 2.05 b | 2.46 b | 2.54 b | 2.59 | 2.47 | 9.09 | 48.07 | 8.89 | 31.07 |
| 林地 Forestry | - | - | 2.39 | 2.30 | 2.81 | 2.50 | - | - | 18.55 | 32.24 | 30.37 |
| 变化的 Variable | 1.15 | - | - | - | - | 1.15 | 1.73 | - | - | - | - |
| 所有样点 All Samples | 2.62 | 3.47 | 2.24 | 2.86 | 2.70 | 2.78 | 94.39 | 91.89 | 90.74 | 90.67 | 89.01 |

显著性检验用 Duncan方法,表中英文字母 a, b, c标明 ANOVA 检验的显著程度 ($P < 0.05$),是同一土地利用景观在不同地区间的比较;“-”:该地区没有这种土地利用景观或面积很小而被忽略;下同

Means of land use types with different letters are statistically significantly different ($P < 0.05$) as tested using Duncan test from ANOVA; “-”: represent the land use type is inexistent or enough small to be neglected; the same below

从以上分析可以看出,除高邑外的其它4个地区,林地和水田的土壤有机碳密度均较高。这在其他研究中也有相同的报道^[18]。水田处于淹水条件下,有机质分解速率慢,加之水稻根茬和有机肥施用较多,土壤有机质含量高;林地是由于植被的阻留减少了水土和养分流失,对雨蚀抵御能力强,以及枯枝落叶的分解,有利于土壤有机质的积累。开采用地为当地建设的砖场,表土已被挖去,且没有植被覆盖,养分自然很低。所以,当自然植被下的林地转变为非自然植被的耕地(除水田外)、建筑用地及其它土地利用景观时,土壤有机碳的密度均有不同程度的降低^[18,20]。

2.1.3 各地区不同土地利用景观土壤有机碳的储量

不同土地利用景观的土壤有机碳储量主要取决于该景观的面积和其土壤有机碳密度。高邑地区,水浇地

的土壤有机碳储量(5395Mg)最高,面积百分数和储量百分数分别 64.39%、74.38%,其它土地利用景观的土壤有机碳储量均比较低;宜兴地区,土壤有机碳储量最高的是水田(5326Mg),占宜兴地区土壤有机碳储量的 51.13%,高于其面积百分数(44.36%),其余土地利用方式的土壤有机碳储量百分数均低于 10%;金堂地区,土壤有机碳储量最高的是旱地(5467Mg),储量百分数为 48.07%,低于其面积百分数(54.13%),此外,林地(1486Mg)和水田(1266Mg)的土壤有机碳储量也较高,储量百分数分别为 18.55%和 14.93%;益阳地区,土壤有机碳储量最高的是水田(3277Mg)和林地(2844Mg),水田的土壤有机碳储量百分数(38.40%)远大于其面积百分数(25.58%),而林地的土壤有机碳储量百分数(32.24%)低于其面积百分数(39.95%);电白地区,土壤有机碳储量最高的是旱地(1893Mg)和林地(1845Mg),储量百分数分别为 31.07%和 30.37%,土壤有机碳储量比较高的还有水田(1016Mg)。

每个地区含有最高土壤有机碳储量的土地利用景观并不相同,高邑、宜兴、金堂、益阳、电白五个地区土壤有机碳储量最高的土地利用景观分别为水浇地、水田、旱地、水田与林地、林地。高邑地区土壤有机碳储量分布最为单一,水浇地土壤有机碳储量占了高邑地区的 74.38%,电白地区土壤有机碳储量分布则相对分散,主要是旱地和林地两种景观,其它 3 个地区土壤有机碳储量分布均匀程度介于高邑和电白之间。高邑和宜兴两个平原地区建设用地的有机碳储量百分数分别为 11.37%、9.01%,高于金堂(5.56%)、益阳(6.04%)和电白(0.96%) 3 个丘陵区,由表 1 可知,两个平原区的人口密度均高于 3 个丘陵区,因为人口的增加会占用更多房屋和道路,进而增加建设用地土壤有机碳的储量。

2.2 不同土地覆盖景观与土壤有机碳密度和储量的关系

2.2.1 同种土地覆盖景观条件下土壤有机碳密度在不同地区间的变异

统计结果表明,1年生植被(A)、多年生植被(P)、硬化地面(S) 3 种土地覆盖景观的土壤有机碳密度在不同地区间有显著差异。电白和金堂地区 1 年生植被的土壤有机碳密度最低,分别为 2.30、2.40 kg/m²,与高邑(2.82 kg/m²)、宜兴(3.15 kg/m²)和益阳(3.12 kg/m²) 3 个地区有显著差异;多年生植被土壤有机碳密度最高的是宜兴地区(3.84 kg/m²),与金堂(2.50 kg/m²)、益阳(2.35 kg/m²)和电白(2.70 kg/m²) 3 个低山丘陵区达到显著差异;硬化地面土壤有机碳密度最高的也是宜兴地区(2.85 kg/m²),最低的是益阳地区(1.83 kg/m²)。造成这些差异主要是由于不同地区的气候条件差异很大,气候条件影响植被的生产力,从而决定输入土壤的有机碳量,同时,气候通过水分和温度等条件的变化来影响生物对有机碳的分解和转化^[19]。同时,人为管理措施也是影响土壤有机碳在不同地区分布的重要原因。例如,在不同地区的多年生植被中,除林地外,其它多年生植被差别很大,宜兴地区大多为桑树,金堂地区主要为脐橙,益阳地区为茶树;电白地区主要是龙眼和荔枝,不同多年生植被所需的施肥水平和耕作措施不同。

2.2.2 各地区不同土地覆盖景观下土壤有机碳密度的变异

从各个地区土壤有机碳密度分布可以看出(表 4),高邑、宜兴、金堂和电白地区,土壤有机碳密度最高的均为多年生土地覆盖景观,分别为 3.36、3.84、2.50 kg/m²和 2.70 kg/m²,而益阳地区土壤有机碳密度最高的则为 1 年生植被覆盖景(3.12 kg/m²)。5 个地区中,1 年生植被主要为小麦和水稻,每年均有大量的死亡的根系进入土壤碳循环过程,还有人人为的耕作施肥,所以 1 年生植被的土壤有机碳密度主要是受人人为因素的影响;而多年生植被主要为受人人为影响较小的林地,土壤有机碳的主要来源为枯枝落叶的腐烂,且树叶的阻留和枯枝落叶的保水,减少了地表径流,使得雨蚀程度降低。所以 1 年生和多年生土地覆盖景观土壤有机碳密度均较高,但两者的影响因素却完全不同。由于人为因素对 1 年生植被影响程度的差异,如耕作措施、施肥、种植制度等,导致了不同地区间的土壤有机碳密度的差别,这也是造成益阳地区 1 年生植被覆盖景观的土壤有机碳密度最高,而其它 4 个地区多年生土地覆盖景观土壤有机碳密度最高的一个重要原因。5 个地区中,电白地区无地表覆盖的荒地的土壤有机碳密度最低,仅为 0.36 kg/m²,高邑地区的变化用地的土壤有机碳密度(0.97 kg/m²)也比较低,因为高邑地区的变化用地主要是河床,大部分由沙子组成。有植被的土壤有机碳密度之所以高于无植被的土壤有机碳密度,是因为地表植被可以改变生态系统生物量和微环境条件,如光、热、

水和土壤生物等,增加微生物活动,同时还会降低土壤侵蚀,改善土壤质量,进而提高有机质水平^[21,22]。

表 4 5个地区土地覆盖景观下土壤有机碳密度和储量的比较

Table 4 Comparison of SOC densities and stocks between land cover in five sites

| 土地覆盖 Land cover | 有机碳密度 Soil organic carbon density (kg/m ²) | | | | | | 土壤有机碳储量 Soil organic carbon stock (%) | | | | |
|--------------------|--|--------------|---------------|--------------|---------------|------------|---------------------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | 高邑 Gaoyi | 宜兴 Yixing | 金堂 Jintang | 益阳 Yiyang | 电白 Dianbai | 平均 Mean | 高邑 Gaoyi | 宜兴 Yixing | 金堂 Jintang | 益阳 Yiyang | 电白 Dianbai |
| 1年生植被 Annual | 2.82 a | 3.15 a | 2.40 b | 3.12 a | 2.30 b | 2.76 | 75.85 | 62.43 | 55.10 | 45.07 | 21.06 |
| 裸露地面 Bare soil | 3.10 | 2.85 | 2.49 | 1.76 | - | 2.55 | 2.69 | 0.41 | 1.35 | 1.86 | - |
| 混合植被 Mixed | 2.45 | 2.56 | 2.11 | 2.46 | 2.74 | 2.46 | 1.59 | 1.56 | 2.08 | 1.35 | 30.08 |
| 多年生植被 Perennial | 3.36 ab | 3.84 a | 2.50 c | 2.35 c | 2.70 c | 2.95 | 1.81 | 7.33 | 28.00 | 38.05 | 36.75 |
| 硬化地面 Sealed | 2.29 ab | 2.85 a | 2.05 ab | 1.83 b | 2.09 ab | 2.22 | 8.98 | 8.60 | 4.21 | 4.34 | 0.96 |
| 变化的 Variable | 0.97 | - | - | - | - | 0.97 | 3.46 | - | - | - | - |
| 水面 Water | - | 2.29 | - | - | - | 2.29 | - | 11.56 | - | - | - |
| 荒地 Barren | - | - | - | - | 0.36 | 0.36 | - | - | - | - | 0.15 |
| 所有样点 All Samples | 2.62 | 3.47 | 2.24 | 2.86 | 2.70 | 2.78 | 94.39 | 91.89 | 90.74 | 90.67 | 89.01 |

2.2.3 各地区不同植被覆盖景观土壤有机碳的储量

不同地区土地覆盖景观的土壤有机碳储量有很大的差别。高邑和宜兴两个平原地区,土壤有机碳储量最高的均为1年生植被覆盖景观,其储量分别为5502Mg、5975Mg,储量百分数分别为75.85%、62.43%,面积百分数分别为65.89%、56.47%;金堂地区,土壤有机碳储量最高的为1年生植被覆盖景观(3707Mg),储量百分数和面积百分数分别为55.10%、58.71%,其次,多年生土地覆盖景观的土壤有机碳储量百分数也较高(28.00%);益阳地区,土壤有机碳储量较高的是1年生(3861Mg)和多年生(3179Mg)土地覆盖景观,储量百分数分别为45.07%、38.05%;电白地区,土壤有机碳储量最高的是多年生土地覆盖景观(2970Mg),储量百分数和面积百分数分别为36.75%、36.15%。通过以上分析可知,5个地区的土壤有机碳储量均集中在1年生和多年生土地覆盖景观中,其它土地覆盖景观的土壤有机碳储量很少。在由高邑至宜兴,最后至电白的纬度逐渐降低过程中,1年生植被覆盖景观的土壤有机碳储量逐渐减少,多年生土地覆盖景观的土壤有机碳储量逐渐增加。

2.3 生态立地景观土壤有机碳密度和储量

由于各个地区生态立地景观类型复杂多样,全部列出篇幅太大,现仅列出每个地区土壤有机碳储量最高的前5位(表5)。高邑地区,土壤有机碳储量最高的生态立地景观为中型水浇地(FPIAc05),储量百分数为68.16%,其它景观类型土壤有机碳储量百分数均不足7%;宜兴地区,土壤有机碳储量最高的为平原两季水田(FPPAr01),储量百分数为51.13%,其它景观储量百分数为2%~7%;金堂地区,土壤有机碳储量最高的为斜坡小型旱地(BPRAc04),储量百分数为29.31%;益阳地区,土壤有机碳储量最高的为山麓两季水田(FSPAr01),储量百分数为34.75%,此外,斜坡次生常绿针叶林(SLTPen02)和斜坡种植常绿针叶林(SLTPen01)的土壤有机碳储量也比较高,储量百分数分别为11.86%、10.31%;电白地区,土壤有机碳储量最高的为山麓两季水田(FSPAr01)。在由高邑至宜兴,最后至电白的纬度逐渐降低过程中,每个地区的最高土壤有机碳储量百分数逐渐减少,这说明随着纬度的降低,生态立地景观下土壤有机碳储量的分布由单一逐渐分散。

通过生态立地景观(最小分类单元)面积加权平均计算出(表3,表4)高邑、宜兴、金堂、益阳和电白的土壤有机碳密度分别为:2.62、3.47、2.24、2.86kg/m²和2.70kg/m²,宜兴土壤有机碳密度最高,金堂最低,其它3个地区居中。5个地区平均土壤有机碳密度为2.78kg/m²。采用单一的土地利用或土地覆盖分类方法估算区域性的土壤养分储量易造成较大的偏差,用生态立地(ecotope)来表述土地利用和土地覆盖的组成,能够精确地反映村级景观格局实际,对不同层次景观的养分含量变化及其储量能够作更细致精确的研究。且可以结合

高精度的遥感图像来对区域乃至整个中国人口密集农村地区的有机碳储量作出精确的估算。

表 5 各地区有机碳储量最高的前 5 位生态立地景观

Table 5 The five ecotopes of highest stocks of SOC in every sites

| 研究地区 Research site | 生态立地 Ecotope | 注解 Description | 地形 Land form | 土地 利用 Land use | 土地 覆盖 Land cover | 样点数 Number | 有机碳密度 Soil organic carbon density (kg/m ²) | 面积百分数 Area percentage (%) | 有机碳储量 Soil organic carbon stock (%) |
|-----------------------|-----------------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|---------------|---|------------------------------------|--|
| 高邑 | FPIAc05 | 中型水浇地 | FP | I | A | 15 | 2.99 | 58.46 | 68.16 |
| Gaoyi | ANCSho03 | 相连居民建筑 | AN | C | S | 8 | 1.84 | 8.51 | 6.12 |
| | ANCEt01 | 乡村土路 | AN | C | E | 5 | 3.10 | 2.22 | 2.69 |
| | FPIAc04 | 小型水浇地作物 | FP | I | A | 5 | 2.48 | 2.10 | 2.04 |
| | FPIAc01 | 小型水浇地菜地 | FP | I | A | 5 | 3.24 | 1.61 | 2.03 |
| | 宜兴 | FPPAri01 | 平原两季水田 | FP | P | A | 10 | 4.00 | 44.36 |
| Yixing | ANCSho04 | 相连居民建筑 | AN | C | S | 10 | 2.96 | 7.97 | 6.79 |
| | PBAWaq08 | 大池塘,水产养殖水域 | PB | A | W | 7 | 2.51 | 5.53 | 4.00 |
| | FPRPdw39 | 平原旱地,桑树 | FP | R | P | 10 | 3.52 | 3.79 | 3.85 |
| | FPRAc04 | 小型旱地作物 | FP | R | A | 8 | 3.20 | 3.42 | 3.15 |
| 金堂 | BPRAc04 | 斜坡小型旱地作物 | BP | R | A | 10 | 1.98 | 39.64 | 29.31 |
| Jintang | SSTPen03 | 陡坡,种植次生常绿针叶林 | SS | T | P | 10 | 2.83 | 10.90 | 11.55 |
| | FSPAri01 | 山麓两季水田 | FS | P | A | 8 | 2.62 | 7.15 | 7.00 |
| | BPRPoe33 | 斜坡小面积成熟脐橙 | BP | R | P | 8 | 2.42 | 5.81 | 5.26 |
| | FSPAri03 | 山麓冬季水田 | FS | P | A | 9 | 3.07 | 3.21 | 3.69 |
| 益阳 | FSPAri01 | 山麓两季水田 | FS | P | A | 10 | 4.32 | 22.98 | 34.75 |
| Yiyang | SLTPen02 | 斜坡次生常绿针叶林 | SL | T | P | 10 | 2.48 | 13.66 | 11.86 |
| | SLTPen01 | 斜坡种植常绿针叶林 | SL | T | P | 10 | 2.26 | 13.06 | 10.31 |
| | SLTPm02 | 斜坡次生混合林 | SL | T | P | 10 | 2.26 | 9.90 | 7.84 |
| | SLDPdb08 | 斜坡,有垃圾的干扰地 | SL | D | P | 6 | 2.51 | 5.05 | 4.43 |
| 电白 | FSPAri01 | 山麓两季水田 | FS | P | A | 10 | 2.91 | 16.21 | 17.51 |
| Dianbai | SLTPob02 | 斜坡次生灌木 | SL | T | P | 10 | 2.74 | 11.94 | 12.11 |
| | SLRPoe41 | 斜坡大面积成熟荔枝 | SL | R | P | 10 | 2.85 | 8.03 | 8.49 |
| | SLRMoe38 | 斜坡大面积未成熟荔枝 | SL | R | M | 4 | 3.04 | 7.22 | 8.14 |
| | SLTMow02 | 斜坡敞开次生林 | SL | T | M | 10 | 3.10 | 6.04 | 6.94 |

3 结语

研究表明,气候、土地覆盖影响土壤有机碳在不同地区间的分布,但人为活动,如土地利用方式、耕作措施,使得土壤有机碳分布变得更为复杂。土地利用景观中,高邑地区的行道树林地和水浇地有机碳密度较高,其它地区的水田和林地的土壤有机碳密度均较高。土地覆盖景观中,高邑、宜兴和电白地区,多年生土地覆盖景观的土壤有机碳密度最高,金堂和益阳地区,1年生土地覆盖景观的土壤有机碳密度最高。电白地区,土壤有机碳储量最高为多年生植被覆盖景观,而其它四个地区均为1年生植被覆盖景观。在由高邑至宜兴,最后至电白的纬度逐渐降低过程中,1年生土地覆盖景观的土壤有机碳储量逐渐减少,多年生土地覆盖景观曾相反趋势。高邑地区的土壤有机碳储量主要集中分布在单一的土地利用、土地覆盖和生态立地景观中;而其它4个地区土壤有机碳储量分布于多种土地利用、土地覆盖和生态立地景观中。

在人口密集的农村地区,人类活动主要是通过影响土地利用方式或土地覆盖的变化来影响土壤有机碳的分布差异。由于不同地区的经济制度和耕作管理措施存在很大差异,农村地区间的生态结构也不同。因此,必须采用准确的研究方法来研究并掌握我国不同地区人口密集的农村地区的生态结构变化和养分循环过程,并及时采取有效的措施来消除和制止人口密集农村区域扩张过程所带来的负面影响。

References:

- [1] Peng S L, Li Y L, Ren H, *et al* Progress in research on soil respiration under the global change. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 17(5): 705—712.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al* Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(8): 156—159.
- [3] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil. *Nature*, 1990, 248(15): 232—234.
- [4] Jin F, Yang H, Zhao Q G. Advances in factors of soil organic carbon stocks. *Soils*, 2000, (1): 11—17.
- [5] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al* Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 687—699.
- [6] Tan Z X, Lal R, Smeck N E, *et al* Relationships between soil organic carbon pool and site variables in Ohio. *Geoderma*, 2004, 121: 187—195.
- [7] FAO. Measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture. A joint undertaking by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Atomic Energy Agency. Vienna, 1992, 5—6.
- [8] Houghton J T, Bacollander S. Climate changes the supplement air report to the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [9] Ellis E C. Long-term ecological changes in the densely populated rural landscapes of China. In: DeFries, R S, Asner G P, Houghton R A. eds. *Ecosystems and Land Use Change*. American Geophysical Union, Washington, DC, 2004, 303—320.
- [10] Xu G, Peel L J. *The Agriculture of China*, Oxford: Oxford University Press, 1991.
- [11] Ellis E C, Li R G, Yang L Z, *et al* *Agroecosystem sustainability: developing practical strategies*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2000, 95—104.
- [12] Ellis E C, Wang S M. Sustainable traditional agriculture in the Tai lake region of China. *Agriculture, Ecosystem and environment*, 1997, 61: 177—193.
- [13] Vitousek P M. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 1997, 277(25): 494—499.
- [14] Verburg P H, Veldkamp A, Fresco L O. Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China. *Applied Geography*, 1999, 19(3): 211—233.
- [15] Ellis E C, Li Ronggang, Yang Linzhang, *et al* Long-term change in village scale ecosystems in China using landscape and statistical methods. *Ecol Appl*, 2000, 10(4): 1057—1073.
- [16] Ellis E C, Wang H, Xiao H S, Peng K, Liu X P, Li S C, Ouyang H, Cheng X, Yang L Z. Measuring long-term ecological changes in densely populated landscapes using current and historical high resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100: 457—473.
- [17] Zhou T, Shi P J, Wang S Q. Impacts of climate change and human activities on soil carbon storage in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 727—734.
- [18] Wang H J, Li X W, Shi X Z, *et al* Distribution of soil nutrient under different land use and relationship between soil nutrient and soil granule composition. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2): 44—47.
- [19] Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 99—105.
- [20] Guo L B, Lgifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *GI Change Biol*, 2002, 8: 345—360.
- [21] Ainju U M, Whitehead W F, Singh B P. Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools. *Can. J. Soil Sci*, 2003, 83: 155—165.
- [22] Gong J, Chen L D, Fu B J, *et al* Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2292—2296.

参考文献:

- [1] 彭少麟, 李跃林, 任海, 等. 全球变化条件下的土壤呼吸效应. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 705—712.
- [4] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. *土壤*, 2000, (1): 11—17.
- [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. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687—699.
- [17] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响. *地理学报*, 2003, 58(5): 727—734.
- [18] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 44—47.
- [19] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99—105.
- [22] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2292—2296.