

亚热带典型景观单元土壤有机碳含量和密度特征

唐国勇^{1, 2}, 吴金水¹, 苏以荣^{1*}, 郑华¹, 李昆²

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 昆明 650224)

摘要: 以我国亚热带四类典型景观单元表层土壤为对象, 对比分析了土壤有机碳(SOC) 含量和密度特征. 结果表明, 四类景观单元 SOC 含量加权平均值差异明显, 以平原湖区加权平均值最高($25.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其次为喀斯特低山($20.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和红壤低山($17.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 红壤丘陵平均值最低($12.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 四类景观单元 SOC 含量变异系数在 24.06%~43.76% 之间, 均属于中等程度变异. 平原湖区景观 SOC 含量主要分布区高于 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其它三类景观单元主要分布区则相反. 四类景观单元 SOC 密度加权平均值大小顺序与 SOC 含量高低极为一致, 其顺序为平原湖区($6.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 喀斯特低山($4.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 红壤低山($4.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 红壤丘陵($3.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). 研究结果揭示成土母质、耕作强度、地形差异和土地利用方式比例是 SOC 含量景观变异的主要原因, 亚热带地区典型景观单元土壤可能是我国重要的碳库.

关键词: 亚热带; 景观单元; 土壤有机碳; 影响因素

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)07-2047-06

Content and Density Characteristics of Soil Organic Carbon in Typical Landscapes of Subtropical Region

TANG Guo-yong^{1, 2}, WU Jin-shui¹, SU Yi-rong¹, ZHENG Hua¹, LI Kun²

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Research Institute of Insect Resources, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China)

Abstract: The contrasts of the content and density characteristics of surface soil organic carbon among four typical landscapes of subtropical region in China were investigated. The results show that the area-weighted mean content of SOC varies widely with landscapes and the highest mean content is present in the lacustrine plain landscape ($25.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), followed by the karst landscape ($20.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and mountainous landscape ($17.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), whereas the lowest occurs in the hilly red soil landscape ($12.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The coefficient of variation of SOC content ranges from 24.06% to 43.76%, being moderate variation. The main distribution ranges of SOC content are higher than $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the lacustrine plain landscape and lower than $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the other three landscapes. The sequence of SOC density in the four landscapes is highly consistent with the sequence of SOC content, and the sequence is as follows: lacustrine plain landscape ($6.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > karst landscape ($4.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > mountainous landscape ($4.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > hilly red soil landscape ($3.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). The results reveal that the difference of soil parent material, cultivation strength, topography and proportion of land use may be the main reasons caused the variation of SOC content among the four landscapes. Surface soils in typical landscapes of subtropical region are important carbon pool in China.

Key words: subtropical region; landscape; soil organic carbon; influencing factor

大气 CO_2 浓度增加引起的全球变化是目前人们共同关注的问题. 据估计全球 0~1 m 土体内土壤有机碳(SOC) 总量约 1500~2000 Pg, 相当于大气中碳的 2~3 倍, 是陆地生态系统最重要的碳库^[1~3]. 表层 SOC 活跃地参与全球碳循环, 对环境变化极其敏感, 其微小变化可能对大气 CO_2 浓度产生深远的影响^[2, 4, 5]. 而土壤碳储量的准确估算是研究 SOC 对温室气体浓度潜在影响和模拟全球变化的基础. 目前, 全球 SOC 储量估算存在明显的不确定性^[4, 6]. 国内研究者得出的我国 SOC 储量估算值从 50~186 Pg^[7, 8]. 景观尺度是连接区域大尺度和生态系统微尺度的过渡尺度, 景观水平上 SOC 空间变异可能是大尺度上 SOC 储量估算差异的主要来源^[9]. 因此, 在景观尺度上对比研究 SOC 含量和密度特征

将更有意义, 尤其是在高密度取样的情况下.

我国亚热带大致介于北纬 $22^\circ \sim 34^\circ$ 、东经 $98^\circ \sim 123^\circ$ 之间, 相当于国土面积的四分之一. 由于亚热带地区典型景观单元内 SOC 含量和密度特征研究较少、影响因素不清, 已严重制约了该地区碳蓄积特征的认识. 基于此, 本研究在高密度取样的情况下, 对比分析了亚热带四类典型景观单元 SOC 积累现状和密度特征, 以期为进一步了解和摸清亚热带地区土壤碳蓄积特征提供参考依据.

收稿日期: 2008-08-11; 修订日期: 2008-10-24

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX-2-XB2-08-01); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403208); “十一五”国家科技支撑专题项目(2006BAD03A0304)

作者简介: 唐国勇(1980~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为土壤碳循环和生态恢复, E-mail: mushi_1@tom.com

* 通讯联系人, E-mail: yrsu@isa.ac.cn

1 材料与方法

1.1 亚热带四类典型景观单元自然状况

在我国亚热带地区选取四类典型景观, 包括平原湖区、红壤丘陵、红壤低山、喀斯特低山. 分别在湖南省沅江市和桃源县选择典型区域代表平原湖区和红壤丘陵; 在广西自治区环江县选择 2 个典型区域分别代表红壤低山和喀斯特低山. 四类景观单元具体地理位置见图 1, 其自然状况见表 1.

1.2 样品采集方法

结合各景观单元地形、土壤、植被等生态景观要素和土地利用方式等因素, 以区域 1/10 000 的地形

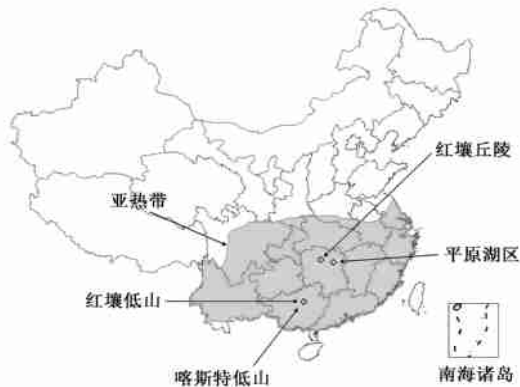


图 1 本研究中四类景观单元地理位置

Fig. 1 Location of four landscapes in the study

表 1 亚热带四类典型景观单元自然状况

Table 1 Natural characteristic of four typical landscapes in subtropical region

项目	平原湖区	红壤丘陵	红壤低山	喀斯特低山
地理位置	29°04' N, 12°24' E	29°15' N, 111°31' E	24°51' N, 108°15' E	24°46' N, 108°21' E
面积/km ²	4.5	3.6	6.5	4.7
海拔/m	26~ 31	70~ 125	205~ 396	190~ 415
年平均温/℃	16.5	16.8	19.9	19.9
年降雨量/mm	1313	1330	1389	1389
无霜期/d	265~ 270	284	320~ 340	320~ 340
太阳辐射/kJ·cm ⁻²	420.00	410.07	414.11	414.11
年日照总时数/h	1 756	1 750	1 451	1 451
主要成土母质	湖积物、河流沉积物	第四纪红色粘土、砂页岩风化物	第三纪红砂岩风化物、第四纪红色粘土	石灰岩风化物
土地利用方式 (所占比例)	水田 (81.2%)、旱地 (9.9%)、新垦旱地 (8.9%)	水田 (39.9%)、旱地 (9.3%)、林地 (35.7%)、果园 (15.1%)	水田 (7.1%)、旱地 (45.2%)、林地 (11.6%)、果园 (36.1%)	水田 (27.8%)、旱地 (35.4%)、林地 (36.8%)
主要植被	水稻、苧麻、油菜、大豆	马尾松、油茶、灌木、柑橘、柚子、花生、玉米、水稻	马尾松、灌木、蕨类、竹、白茅、柑橘、板栗、玉米、木薯、红薯、大豆、甘蔗、水稻	灌木、乔木、蕨类、白茅、甘蔗、桑叶、木薯、蔬菜、水稻

图及其航片为辅助资料, 划出具有各典型景观单元完整地貌单元和生态群落结构的样区边界. 在选定的样区以其中心点为横纵坐标轴的交叉点, 在航片上划分网格(1.0 cm × 1.0 cm)并依次编号, 按照每公顷耕地(水田和旱地)0~ 5 个土样、果园 0~ 3 个、经济林 0~ 0.5 个, 其它林地 0~ 0.2 个的采样密度, 利用随机函数抽取编号以确定采样单元. 在各采样单元内按“S”形路线多点(不少于 15 点)采集表层土样(0~ 20 cm). 于 2003 年 3 月~ 2004 年 4 月在 4 个样区共采集土样 2 648 个. 其中平原湖区、红壤丘陵、红壤低山和喀斯特低山景观分别采集 650、536、707 和 735 个.

1.3 样品处理及化学分析方法

土样采回后, 用手选法除去活体根系和可见有机物, 在室内风干、磨细过 0.15 mm 筛, 用于测定

SOC 含量. 平原湖区和喀斯特低山土壤无机碳含量较高, SOC 采用外加热重铬酸钾氧化法测定. 红壤丘陵和红壤低山土壤无机碳含量极低, SOC 采用灼烧法, 用碳/氮自动分析仪 (Vario-MAX C/N, Elementar 公司, 德国) 测定. 实验证明, 2 种方法测得的 SOC 含量相当接近, 系统误差可以忽略.

1.4 数据处理方法

对于具有一定剖面深度和岩石裸露率的土壤而言, 有机碳密度(SOCD, kg·m⁻²) 计算公式如下:

$$SOCD = d \times \theta \times C \times (1 - \delta) \times (1 - \kappa) / 100$$

(1)

式中, d 为土层厚度 (cm), θ 为土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$), C 为 SOC 含量 ($g \cdot kg^{-1}$), δ 为 > 2 mm 石砾体积分数, κ 为岩石裸露率. 本研究中土壤厚度统一取 20 cm. 在四类景观单元内按土地利用方式分别测定若

干个土样的容重(6~ 8 个), 土壤容重取值采用其景观单元内该土地利用方式下土壤容重的平均值. 平原湖区、红壤丘陵和红壤低山景观单元石砾含量极低, 可以忽略, 仅考虑喀斯特低山景观单元石砾含量, 其石砾体积分数按土地利用方式取平均值. 只考虑喀斯特低山景观单元岩石裸露率, 按林地岩石裸露率为 55%, 旱地岩石裸露率为 25%, 水田为 5% 计算(调查结果).

本研究数据统计分析均在 SPSS 11.5 软件上处理.

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量特征

为了消除各景观单元内采样密度不一致引起的

SOC 含量变异, 按利用方式所占面积权重对 SOC 含量进行加权. 我国亚热带地区四类典型景观单元表层 SOC 含量加权平均值差异明显(表 2). 其中, 平原湖区 SOC 含量最高, 达 $25.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 红壤丘陵 SOC 最低, 仅 $12.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不足平原湖区的一半; 红壤低山和喀斯特低山 SOC 含量居中, 分别为 $17.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20.84\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 四类典型景观单元中, 平原湖区、红壤丘陵和红壤低山 SOC 含量的变异系数相对接近, 在 24.06%~ 33.06% 之间; 喀斯特低山 SOC 变异系数偏大(43.76%), 但均属于中等程度变异. 这说明亚热带地区四类典型景观单元表层 SOC 含量存在明显的景观变异, 而且各景观单元内 SOC 含量也存在一定程度的空间变异, 尤其是喀斯特低山.

表 2 四类典型景观单元土壤有机碳含量
Table 2 Soil organic C content of four typical landscapes

景观单元	加权平均值 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	中数 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	偏移量 /%	变异系数 /%	P K-S
平原湖区	25.10	6.04	27.26	5.72	44.53	- 8.60	24.06	0.000
红壤丘陵	12.07	3.99	12.31	4.35	22.34	- 1.99	33.06	0.001
红壤低山	17.75	5.29	17.47	6.19	37.06	1.57	29.80	0.041
喀斯特低山	20.84	9.12	17.93	4.42	53.77	13.98	43.76	0.000

样本平均数和中数是样本数据的代表值, 表示观察值的中心位置. 通常, 样本平均数和中数之间存在一定的差异, 用偏移量表示. 从表 2 中可以看出, 四类典型景观单元内 SOC 含量的偏移量差异明显. SOC 偏移量在平原湖区和红壤丘陵为负数, 说明这 2 个景观 SOC 含量中值大于平均值, 数据分布有较长的左尾; 另外 2 个景观 SOC 中值小于平均值, 存在较长的右尾. 从偏移量绝对值的大小来看, 喀斯特低山和平原湖区 SOC 偏移量较大, 红壤丘陵和红壤低山景观较小. 这反映出在景观尺度上, 人为活动和自然过程(地形地貌、水文状况等)对不同景观单元 SOC 含量的影响程度各异.

根据我国亚热带地区 SOC 含量特征, 参考第二次全国土壤普查的评价标准和其它研究结果^[10], 本研究将 SOC 含量划分为 10 级, 其频率分布见图 2.

亚热带四类景观单元内 SOC 含量频率分布特征各异(图 2). 平原湖区 SOC 含量主要分布在 $20\sim 35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 发生频率为 84.9%; 红壤丘陵 SOC 主要分布区间为 $7\sim 19\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 发生频率为 89.7%; 红壤低山主要分布区间在 $10\sim 25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 发生频率为 85.0%; 喀斯特低山 SOC 含量分布范围较宽. 以有机碳含量 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为界^[10], 将高于此值称为高含量区间, 低于此值则为低含量区间. 据此标准平原湖

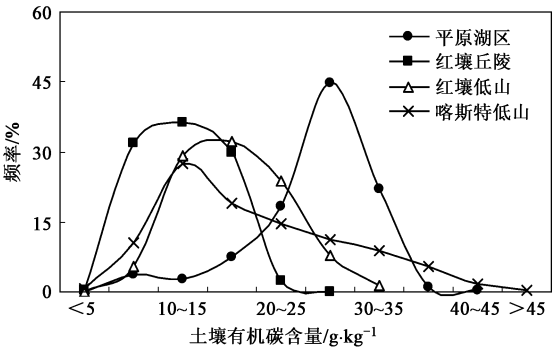


图 2 四类典型景观单元土壤有机碳含量频率分布
Fig. 2 Frequency distributions of soil organic C content of four typical landscapes

区 86.3% 的样本其有机碳含量在高值区间, 红壤丘陵 97.8% 的样本在低值区间, 红壤低山约 2/3 的样本在低值区间, 喀斯特低山 57.6% 的样本在低值区间. 平原湖区景观单元内 SOC 含量存在左侧“拖尾”现象, 经数据检验发现这部分低含量的土样大多为新垦旱地, 新垦旱地是由原来围湖的堤埂和路基推平翻转, 种植时间不足 1 a, 施肥量甚微, 其有机碳含量远低于景观单元内其它利用方式下 SOC 含量. 红壤丘陵景观单元 SOC 含量在低值区间呈现平均分布的特征, 说明有机碳强烈地受到人为活动的影响.

高有机碳含量土壤受过度利用的影响显著降低,而低有机碳含量土壤也因维持基本地力的需要而培肥, SOC 含量有向 10~ 15 g•kg⁻¹ 区间靠扰的趋势,表明 SOC 含量趋于均衡和稳定. 红壤低山景观单元 SOC 含量呈现近似正态分布的特点,样本在 10~ 25 g•kg⁻¹ 区间分布过于集中,这说明该景观单元内人为活动作用强烈. 由于该研究区域开发时间和强度均明显低于红壤丘陵景观单元,因此 SOC 含量的演变趋势无法推断;喀斯特低山景观单元 SOC 含量呈现明显的左偏分布,右侧“拖尾”现象明显,而且右侧的频率分布连线近似直线,一方面说明喀斯特低山景观单元内 SOC 含量变异程度高,另一方面也揭示了其间有强烈人为活动迹象,人为活动对不同利用方式和空间位置上 SOC 含量的影响程度差异明显. 而且有机碳含量有向高值区间演变的趋势,其原因可能与近年来水田秸秆归还量和还田面积增加有关.

需要指出的是,图 2 中 SOC 含量的组限是根据等级标准确定的,各个组限的频率连线只能相对直观地反映各景观单元 SOC 含量和分布区间的集中状况,并不能反映其统计学意义上的分布特征.

2.2 表层土壤有机碳密度特征

根据公式(1)可以获得单个采样点土壤有机碳密度(SOCD),按土地利用方式所占面积的权重可计算各景观单元表层 SOCD 加权平均值. 本研究用 Box-plot 图显示亚热带四类典型景观单元 SOCD 特征(图 3). 图 3 中箱体的上下距分别表示上下四分位点,箱体中间的横线为中位数. 上下四分位点外侧 1.5 倍箱体处的横线表示异常值截断点,称为内限. 内限以外位置圆圈表示的数据为异常值. 由图 3 可以看出,亚热带四类典型景观单元 SOCD 差异明显. 喀斯特低山景观单元 SOCD 的上下四分位距(箱体)和上下内限距(异常值截断点)均最宽,说明喀斯特低山景观单元内 SOCD 主要分布区间宽、变化范围广. 平原湖区景观单元 SOCD 存在一定数量的异常值(36 个),尤其是异常低值(34 个). 数据深度分析表明,这些异常低值中绝大部分其土地利用方式是

新垦旱地,是由原来围湖堤埂和路基推平翻转而来,因此其异常值可以接受. 红壤低山景观单元内 SOCD 存在极少量的异常值(2 个). 其它景观单元内 SOCD 不存在异常值.

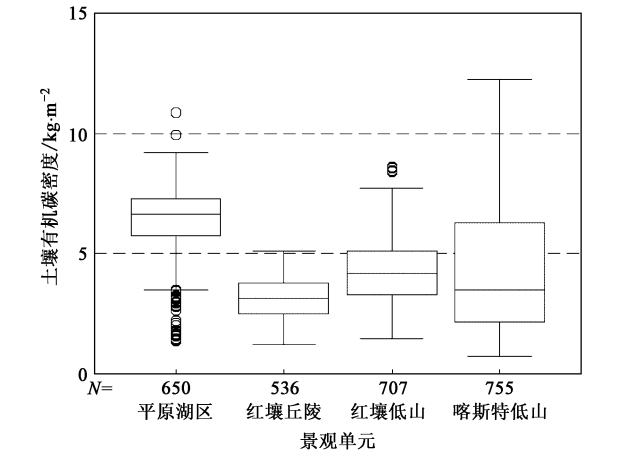


图 3 四类典型景观单元土壤有机碳密度 Box-plot 图
Fig. 3 Box-plot of soil organic C density of four typical landscapes

我国亚热带四类典型景观单元表层 SOCD 加权平均值为 4.47 kg•m⁻², 变幅在 0.75~ 12.25 kg•m⁻² 之间, 变异系数为 46.76%(表 3). 平原湖区 SOCD 加权平均值最高, 为 6.12 kg•m⁻², 其次为喀斯特低山(4.30 kg•m⁻²), 红壤低山再次之(4.25 kg•m⁻²), 红壤丘陵 SOCD 最低, 仅为 3.04 kg•m⁻², 这与 SOC 含量高低顺序极为一致. 喀斯特低山 SOC 含量显著高于红壤低山, 但 SOCD 仅略高于红壤低山, 这与喀斯特低山景观单元土壤石砾含量和岩石裸露率高有关. 喀斯特低山景观单元 SOCD 变异系数最大, 超过 60%, 其它三类景观单元 SOCD 变异系数较接近, 在 24%~ 30% 之间. 四类典型景观单元中平原湖区和红壤丘陵 SOCD 偏移量为负, 其它为正值. 各景观单元内 SOCD 偏移量与 SOC 的偏移量大小顺序类似, 但喀斯特低山 SOCD 偏移量更大, 接近 20%. 变异系数和偏移量绝对值说明 SOCD 变异在喀斯特低山表现更明显, 这可能与该景观单元局部地区土被不连续, 小生境差异明显有关^[1].

表 3 四类典型景观单元土壤有机碳密度
Table 3 Soil organic C density of four typical landscapes

景观单元	加权平均值 / kg•m ⁻²	标准差 / kg•m ⁻²	中数 / kg•m ⁻²	最小值 / kg•m ⁻²	最大值 / kg•m ⁻²	偏移量 / %	变异系数 / %
平原湖区	6.12	1.47	6.65	1.40	10.87	- 8.66	24.02
红壤丘陵	3.04	0.79	3.15	1.21	5.09	- 3.62	25.99
红壤低山	4.25	1.30	4.19	1.49	8.60	1.41	30.59
喀斯特低山	4.30	2.67	3.49	0.75	12.25	18.84	62.09
亚热带	4.47	2.09	4.20	0.75	12.25	6.04	46.76

3 讨论

3.1 土壤有机碳含量影响因素

红壤低山和喀斯特低山景观单元位于我国中亚热带南缘,平原湖区和红壤丘陵景观单元位于我国中亚热带北缘,从气候条件看,四类典型景观单元内气象要素接近(表1)。由于纬度不同,红壤低山和喀斯特低山景观单元多年平均气温比平原湖区和红壤丘陵高 $3.1\sim 3.4^{\circ}\text{C}$ 。相对高温既有利于植物生长而增加SOC含量,但也促进土壤有机质的矿化,由于四类景观单元之间年均温相差不大,其影响可能有限。四类景观单元其它气象要素,如降雨量、无霜期、太阳辐射量和日照时数等极为接近。由此可以推测,气候因素可能不是导致SOC含量景观变异的主要原因。

土壤母质是土壤形成的基础,是决定SOC含量和密度的大背景^[12, 13]。平原湖区景观单元土壤母质主要为湖积物和河流沉积物,泥沙和水体携带的大量有机碳沉积于湖区土壤,使亚热带平原湖区SOC含量通常高于同纬度地区其它土壤^[14, 15]。喀斯特低山景观单元土壤母质主要为石灰岩风化物,钙离子容易与土壤有机质形成较稳定的结合物,有利于SOC积累^[12, 16]。红壤丘陵和红壤低山景观单元土壤母质主要为第四纪红色粘土和第三纪红色砂岩风化物,由于发育过程中土壤淋溶作用强烈,盐基离子含量低,不利于SOC的积累和固持^[14]。

耕作强度和地形直接影响SOC矿化速率和土壤侵蚀强度,从而影响SOC含量。亚热带平原湖区土地耕作强度大,但由于该景观单元内地表起伏度极小,地势低,地下水位高,土壤含水量高,因而SOC矿化速率低,土壤侵蚀程度弱,有利于SOC的积累^[15]。喀斯特低山景观单元为喀斯特低山峰林谷地,地势平坦,其间有少量突兀的峰林。在耕作强度相对较低的情况下,耕地土壤侵蚀程度弱。红壤低山景观单元是移民开发区,开发时间不长(10 a),但土壤耕作强度大,加之地表起伏大,次生林破坏严重,植被覆盖和地表覆盖较差,现有的林木为20 a飞播马尾松林和新建果园,土壤侵蚀严重。红壤丘陵景观单元土地开发程度高,开垦历史长,林地全为人工林,植被覆盖和地表覆盖程度极差,水土流失极其严重。众多研究者将我国亚热带红壤丘陵低山地区SOC含量低的原因归于该区严重的水土流失^[14, 15, 17]。

土地利用方式是地形、有机物质输入量、植被类

型、耕作制度、施肥状况以及土地管理方式等因素的综合反映,对SOC含量影响明显^[15~17]。本研究中各景观单元内土地利用比例各异(表1),耕地面积比例顺序为:平原湖区(91.1%)>喀斯特低山(63.2%)>红壤低山(52.3%)>红壤丘陵(49.2%),这与SOC含量高低顺序完全一致(表2)。本研究中除平原湖区景观单元外,其它3类景观单元内均存在较大面积的林果地(面积比例约为36.8%~50.8%)。红壤丘陵和红壤低山景观单元林果地由于开发程度较高和水土流失严重,其SOC含量通常低于耕地土壤^[10, 17],尤其是红壤丘陵景观。喀斯特低山景观单元林地通常分布在地势极高、坡度较大的峰林上。由于喀斯特地区独特的岩溶作用使岩石表面因溶蚀而凹陷成槽,土壤就积累在槽中。凹槽内土壤表面相对平坦,且土壤表面低于围绕的岩石,有利于土壤碳的积累。此外喀斯特林地土壤浅薄(4.0~58 cm),影响了SOC向深层运移,导致SOC在表层积聚^[11, 16]。

由以上分析可得,成土母质、耕作强度、地形和土地利用面积比例的差异可能是亚热带四类典型景观SOC含量景观变异的主要原因。

3.2 表层土壤有机碳密度对比

近年来亚热带地区碳密度和储量估算方面的研究日益成为热点。本研究基于高密度取样,研究结果的可靠性更高。候鹏城等^[18]和张琪等^[19]研究得出太湖地区吴江市和宜兴市土壤表层碳平均密度为 $3.84\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $3.29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,明显低于本研究中同纬度的平原湖区景观($6.12\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。作物残体还田量大可能是该区SOCD较高的主要原因^[15, 20]。李忠佩等^[20]根据统计资料得出,湖南水稻单产比江西和浙江两省高5%~17%。由于作物产量不同,进入土壤的水稻根茬量也高于江西和浙江。李忠佩^[21]研究了亚热带红壤低丘SOCD特征,得出表层SOCD为 $2.06\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,稍低于本研究中红壤丘陵景观单元表层SOCD($3.04\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$),明显低于红壤低山景观单元($4.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$),这一方面可能与本研究区内耕地作物产量高、残体归还量大和绿肥种植面积广等有关;另一方面可能是由于李忠佩^[21]在研究中对碳密度较低的林果地和荒草地采样数过多,而碳密度较高的耕地采样数不足(耕地采样数仅占总采样数的12.5%),而且没有按面积进行加权平均。张文晖等^[22]研究了喀斯特岩溶地区SOCD特征,得出重庆金佛山地区(中亚热带)表层SOCD在 $4.63\sim 23.40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,绝大部分高于 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,其研究结果明

显高于本研究中喀斯特低山景观单元 SOCD 的范围和均值(表 3),这可能与本研究喀斯特景观单元耕作强度大有关.张伟等^[23]研究认为耕作强度的提高会迅速导致喀斯特地区 SOC 的降低.

总体上,本研究亚热带四类典型景观单元 SOCD 在 0.75~12.25 kg•m⁻² 之间,按景观面积的加权平均值为 4.47 kg•m⁻².相对而言,这明显高于全国表层 SOCD (2.67 kg•m⁻²)^[24] 和全国耕地耕层 SOCD (3.15 kg•m⁻²)^[25].说明我国亚热带地区典型景观单元其表层土壤可能是我国重要的碳储存库. Yu 等^[26]对我国区域碳密度分布状况进行研究时也得到类似结果.

4 结论

(1) 亚热带四类典型景观单元 SOC 含量、主要分布区间差异明显.平原湖区 SOC 含量加权平均值最高,红壤丘陵 SOC 最低,不足平原湖区的一半.四类典型景观单元 SOC 含量均属于中等程度变异,喀斯特低山景观单元变异系数偏大.平原湖区 SOC 含量主要分布在高于 20 g•kg⁻¹ 的区间,其它三类景观单元 SOC 大部分低于 20 g•kg⁻¹.成土母质、耕作强度、地形和土地利用比例差异可能是四类典型景观单元 SOC 含量景观变异的主要原因.

(2) 平原湖区 SOCD 加权平均值最高,其次为红壤低山,喀斯特低山次之,红壤丘陵 SOCD 最低.亚热带四类典型景观单元表层 SOCD 加权平均值为 4.47 kg•m⁻²,明显高于全国表层土壤碳密度和全国耕地耕层土壤有机碳密度.亚热带地区典型景观单元土壤可能是我国重要的碳库.

参考文献:

[1] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming [J]. Nature, 1991, **351**: 304-306.

[2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, **304**: 1623-1627.

[3] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems-a soil science perspective [J]. Agr Ecosyst Environ, 2004, **104**: 399-417.

[4] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. Eur J Soil Sci, 1996, **47**: 151-163.

[5] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil [J]. Nature, 1990, **348**(15): 232-234.

[6] Bolin B, Sukumar R. Global perspective [A]. In: Watson R T, Nobell R, Bolin B, *et al* (eds). Land-use, Land-use change, and Forestry. A special report of the IPCC [M]. Cambridge University

Press, MA, 2000. 23-51.

[7] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量的研究 [J]. 科学通报, 1999, **15**(5): 330-332.

[8] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库 [A]. 见: 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程 [C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996 109-128.

[9] Jackson R, Caldwell M M. The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics [J]. Ecology, 1993, **74**: 612-614.

[10] 王小利. 黄土高原和亚热带丘陵区典型生态景观单元土壤有机碳对比研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.

[11] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土壤采集方法 [J]. 土壤学报, 2007, **44**(3): 475-483.

[12] 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 [J]. 地理研究, 2007, **26**(6): 1077-1088.

[13] Tan Z X, Lal R, Smeck N E, *et al*. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables [J]. Geoderma, 2004, **121**: 187-195.

[14] 赵其国. 红壤物质循环及其调控 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[15] 彭佩钦, 刘强, 黄道友, 等. 湖南典型农田土壤有机碳含量及其演变趋势 [J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1319-1322.

[16] 岳跃民, 王克林, 张伟, 等. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤-环境关系研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1400-1405.

[17] 唐国勇, 黄道友, 童成立, 等. 红壤丘陵景观单元土壤有机碳和微生物生物量碳含量特征 [J]. 应用生态学报, 2006, **17**(3): 429-433.

[18] 候鹏程, 徐向东, 潘根兴. 不同土地利用方式对农田表土有机碳库的影响—以太湖地区吴江市为例 [J]. 南京农业大学学报, 2007, **30**(2): 68-72.

[19] 张琪, 李恋卿, 潘根兴, 等. 近 20 年来宜兴市域水稻土有机碳动态及其驱动因素 [J]. 第四纪研究, 2004, **24**(2): 236-242.

[20] 李忠佩, 张桃林, 林心雄. 红壤区土壤有机碳的循环和平衡及有机资源利用 [J]. 长江流域资源与环境, 1998, **7**(2): 140-147.

[21] 李忠佩. 低丘红壤有机碳库的密度及变异 [J]. 土壤, 2004, **36**(3): 292-297.

[22] 张文晖, 傅瓦利, 张洪, 等. 岩溶山区不同土地利用方式对石灰土基本特性的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(3): 16-21.

[23] 张伟, 陈洪松, 王克林. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因素分析 [J]. 中国农业科学, 2006, **39**(9): 1828-1835.

[24] 解宪丽, 孙波, 周慧珍. 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.

[25] 许泉, 芮雯雯, 何航, 等. 不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异 [J]. 中国农业科学, 2006, **39**(12): 2505-2510.

[26] Yu D S, Shi X Z, Wang H J, *et al*. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China [J]. J Environ Manage, 2007, **85**(3): 689-689.