

鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征

方运霆¹, 莫江明^{1*}, Sandra Brown², 周国逸¹, 张倩媚¹, 李德军¹

(1. 中国科学院华南植物研究所鼎湖山森林生态系统定位研究站, 广东 肇庆 526070;

2. Winrock International, 1621 N. Kent St., Suite 1200, Arlington, VA 22209, USA)

摘要: 基于 61 个土壤剖面的数据, 分析了鼎湖山自然保护区 4 种自然植被类型(沟谷雨林、季风常绿阔叶林、山地常绿阔叶林和山地灌木草丛)和 4 种次生植被类型(马尾松针叶林、针阔混交林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛)的土壤有机碳贮量及其分配特征。结果如下: (1) 各植被类型土壤有机碳含量随深度增加而减少, 但植被类型不同其减少程度不同。除 > 40cm 土层外, 自然植被类型的土壤有机碳含量明显高于次生植被类型。(2) 土壤碳密度和土壤有机碳含量一样随深度增加而减少。两大植被类型间比较, 除山地灌木草丛 > 40cm 土层外, 自然植被类型各个土层土壤碳密度都高于所有的次生植被类型对应的碳密度。对于整个土层而言, 各植被类型土壤碳密度在 30.9~127.9 t/hm² 间, 总平均为 73.9 t/hm²。(3) 各植被类型的土壤厚度平均为 36.7~73.3cm, 总平均为 56.4cm。除了山地常绿阔叶林外, 土壤厚度基本上随海拔高度增加而减少。(4) 保护区各植被类型总面积为 1028.4 hm², 土壤总碳贮量为 72287.0 t, 其中 0~10、10~20、20~40cm 和 > 40cm 四个土层分别占 32.0%、20.6%、25.8% 和 21.6%。自然植被土壤碳贮量在表层(0~20cm)的比重比次生植被的高。所有的植被类型中, 混交林碳贮量贡献最大, 季风常绿阔叶林次之。自然植被类型土壤在碳贮存方面发挥积极的作用。(5) 通过比较, 鼎湖山保护区土壤碳密度整体较低, 表层土壤碳贮量贡献较大。分析表明人为干扰是制约土壤碳贮存量大小的重要因素。

关键词: 土壤有机碳含量; 土壤碳密度; 碳贮量; 碳分配; 鼎湖山

Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan Biosphere Reserve

FANG Yun-Ting¹, MO Jiang-Ming^{1*}, Sandra Brown², ZHOU Guo-Yi¹, ZHANG Qian-Mei¹, LI De-Jun¹

(1. Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Garden of Botany, Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing, Guangdong 526070, China; 2. Winrock International, 1621 N. Kent St., Suite 1200, Arlington, VA 22209, USA). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 135~142

Abstract Land-use change that influences soil carbon storage and release within the tropics can have large implications for global carbon cycling. Changes in soil carbon following land-use change have become an international policy concern in terms of both sustained production at a local or regional scale, and the global consequences relating to increased emissions of CO₂ from terrestrial systems.

There are eight types of vegetation in Dinghushan Biosphere Reserve (DHSBR), Guangdong province, and these vegetations can be divided into two classes: natural vegetation types (Ravine Rain Forest, Monsoon Evergreen Broad-leaved Forest, Mountain Evergreen Broad-leaved Forest, and Mountain Shrubby Grassland) and secondary vegetation types (Pine Forest, Pine and Broad-leaved Mixed Forest, Secondary Monsoon Evergreen Broad-leaved Forest, and Evergreen Shrub). In this paper, the storage and distribution of soil organic carbon for these classes of vegetation was studied based on 61 soil profiles. The objectives of our study were to provide basic data for the estimation of the soil carbon pool in subtropical China, and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30270283); 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目; 中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目; 广东省自然科学基金资助项目(021524)

收稿日期: 2003-01-23; **修订日期:** 2003-11-21

作者简介: 方运霆(1976~), 男, 博士生, 助理研究员, 主要从事森林生态系统 C、N 循环及其与全球变化的关系研究。

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: mojm@scib.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30270283); Director Foundation of South China Institute of Botany, CAS; Field Frontiers Project of CAS Knowledge Innovation Program; and the Provincial Natural Science Foundation of Guangdong, China (No. 021524)

Received date: 2003-01-23; **Accepted date:** 2003-11-21

Biography: FANG Yun-Ting, Ph.D. candidate, Assistant professor, Research field: carbon and nitrogen cycling in forest ecosystems and their relationships with global changes

to provide information for the evaluation of ecological benefits contributed by nature reserves. The results were as follows:

(1) Soil organic carbon concentration generally decreased with depth (2.46%, 1.52%, 0.96% and 0.53% for 0~10, 0~20, 20~40 and >40cm soil depth interval, respectively, with a range of 1.03~3.92%, 0.71~2.64%, 0.43~1.89% and 0.34~0.53%) in all vegetation type. Soil organic carbon concentrations under natural vegetation were significantly higher than that under secondary vegetation (1.7, 2.2 and 2.0 times for 0~10cm, 0~20cm and 20~40cm soil depth interval), except >40cm depth interval.

(2) Soil carbon density (t/hm^2) for four soil depth intervals varied from 15.64 to 29.09, 9.25 to 24.86, 10.84 to 33.69 and 4.59 to 34.09, and their mean values (t/hm^2) were 23.46, 16.94, 21.20 and 17.75, respectively. For the whole soil profile, the carbon density was 53.56~111.46 t/hm^2 , with a total mean of 73.92 t/hm^2 . The highest carbon density value occurred in Pine Forest, and the lowest occurred in Mountain Evergreen Broad-leaved Forest. Except for the Mountain Shrubby Grassland, soil carbon density in natural vegetation was significantly higher than that in secondary vegetation (1.7 to 2.3 times for four soil depth intervals).

(3) The average soil thickness for all types of vegetation was 36.67~73.25cm, with a total mean of 51.99cm, decreasing with altitude.

(4) The total carbon storage was 72287.0 t in the area of 1028.4 hm^2 , with 32.0%, 20.6%, 25.8% and 21.6% in 0~10, 10~20, 20~40 and >40cm soil depth interval, respectively. It was found that natural vegetation had slightly higher proportion of organic carbon in the top 10cm of soil than the secondary vegetation. Of total soil carbon in DHSBR, 35.0% and 14.5% was contributed by Pine and Broad-leaved Forest and Monsoon Evergreen Broad-leaved Forest, respectively.

(5) By comparisons, DHSBR had lower soil carbon densities, and had higher proportion of carbon contained in the upper 20cm of soil than other regions. These results showed that human impact was one of factors that made soil organic carbon content in secondary vegetation types lower than in natural vegetation types.

Key words: soil organic carbon concentration; soil carbon density; carbon storage; carbon distribution; Dinghushan Biosphere Reserve

文章编号: 1000-0933(2004)01-0135-08 中图分类号: Q 143, Q 718.51+6 文献标识码: A

由于石化燃料的大量使用和土地利用变化,大气中的 CO_2 浓度已由工业革命前之 $280m l/m^3$ 上升到现在的 $360m l/m^3$,而且目前每年仍以 $0.5m l/m^3$ 的速度快速增加。预计未来100a这种趋势将会继续,甚至可能变得更为强烈^[1,2]。 CO_2 在大气层中的积累引起了全球变暖、降水格局改变和海平面上升等全球性问题的发生,威胁着全球生态环境和人类自身生存与发展,因而引起国际社会普遍关注^[1,2]。在维护区域生态环境和全球碳平衡方面,森林生态系统起着极其重要的作用^[3-5]。减少森林破坏、增加森林面积等森林管理措施可以增加森林植被和土壤的碳贮存量,从而减缓 CO_2 在大气中的积累速度^[1,4,5]。尽管全球森林土壤碳库是其植被碳库的两倍多^[1,5,6],但人们更多的把这种作用归功于森林植被生长过程的碳贮存^[4,5],而忽视了土壤的功效。这可能是因为土壤是个非常复杂的三维体,又是大气圈、水圈、岩石圈和生物圈共同作用的界面,时空变异大,估算土壤碳贮量及其变化等存在很大的不确定性。此外,人类活动的干扰,如石化燃料使用、环境污染和土地利用变化等又是影响土壤碳库及其循环的因子,这些因子也增加了精确估计的难度^[7-9]。

近些年来,许多生态学家在致力于陆地生态系统土壤碳贮存及其分配的研究^[3,7,8,10,11]。我国对土壤有机碳库的研究工作也取得了一些成果,如方精云等^[12]和王绍强等^[9]分别利用土壤普查资料对我国土壤有机碳库进行了估算,周玉荣等^[6]在广泛收集文献资料的基础上估算了我国主要森林土壤碳贮量。尽管如此,由于区域性研究对象广泛而复杂,基础数据不完善,无论是对我国还是对全球范围内的研究还存在很大的不确定性,不同研究者的结果还相差很大^[9]。有关土壤碳贮量和分配研究的不足严重影响对陆地生态系统碳循环的理解和全球气候变化的预测,因此在全球范围内开展土壤碳循环及其平衡研究意义重大^[7,8,11]。

与世界其它许多地区一样,我国亚热带地区由于社会经济快速发展、人口剧增等因素,同样经受土地利用变化等干扰活动的影响,几乎所有森林均受到不同程度的破坏^[13-16]。虽然地带性森林是全球森林碳循环研究不可缺少的重要组成部分,但关于该地带的森林土壤碳素贮量和分配格局还未见报道。地处南亚热带的鼎湖山国家级自然保护区,由于地理、历史和社会文化等原因,不仅较完好保存了地带性植被——亚热带常绿阔叶林,还分布有沟谷雨林、山地常绿阔叶林、山地灌木草丛、马尾松针叶林、针阔混交林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛等其它8种植被类型^[17,18],为研究亚热带森林土壤贮量和分配特征提供了良好的基础。本文选择鼎湖山保护区8种植被类型为对象,研究其土壤有机碳含量和分配特征,探讨人为干扰对土壤碳贮量和分配格局的影响,目的是为我国区域性森林土壤碳库的估算提供数据支持,为评价自然保护区生态效益和进一步评价森林

土壤在全球碳循环的贡献等提供素材。

1 样地概况

鼎湖山国家级自然保护区始建于 1956 年, 位于广东省肇庆市东北郊, 东经 112°33', 北纬 23°10', 总面积约为 1155 km²。保护区气候具有明显的季风性, 年平均降雨量为 1927 mm, 其中 75% 分布在 3 月到 8 月份, 而 12 月到次年 2 月仅占 6%。年平均相对湿度为 80%。年平均温度为 21.4℃, 最冷月(1 月份)和最热月(7 月份)的平均温度分别为 12.6℃ 和 28.0℃^[19]。

鼎湖山国家级自然保护区 8 种主要的植被类型可分为两大类: 自然植被和次生植被^[18]。自然植被有沟谷雨林、季风常绿阔叶林、山地常绿阔叶林和山地灌木草丛等 4 种类型。次生植被有马尾松针叶林、针阔混交林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛等 4 种类型。沟谷雨林一般分布海拔 300 m 以下的地方, 林内气候温暖、阴湿和静风, 群落组成和外貌结构较复杂。季风常绿阔叶林分布在低山和丘陵地上, 生境温暖、湿润, 是南亚热带所特有的森林类型。山地常绿阔叶林分布在鼎湖山外围山地, 地势空旷, 夏温暖、湿润, 冬凉湿, 群落外貌终年常绿。山地灌木草丛分布的海拔最高, 灌木呈丛状生长, 高度 80~110 cm。沟谷雨林和季风常绿阔叶林虽然分布的海拔较低, 但一直受到寺庙的保护, 没有遭到人为干扰。山地常绿阔叶林和山地灌木草丛由于分布的海拔位置较高也没有受到人为干扰。次生植被均为自然林遭到破坏后重新造林或自然更新形成。马尾松针叶林、针阔混交林起源于 20 世纪 30~40 年代人工营造的马尾松林, 其中马尾松针叶林在 20 世纪 60~80 年代受到收割林下层植物凋落物和修枝等人为干扰^[13~16]。次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛分别是季风常绿阔叶林和山地常绿阔叶林破坏后自然更新而形成。这些植被面积合计 1028.4 km²^[17,18], 占整个保护区总面积的 90%。

保护区地形属山地和丘陵, 最高山峰鸡笼山海拔 1000.3 m。随海拔高度升高, 植被类型更替明显。就保护区的成土条件、成土过程和土壤性质的差异, 其土壤分为赤红壤(砖红壤性红壤或砖红壤化红壤, 简称为赤红壤, 海拔 300 m 以下)、黄壤(海拔 300~900 m)和山地灌丛草甸土(海拔 900~1000 m)^[20]。沟谷雨林、马尾松针叶林、针阔混交林和季风常绿阔叶林多为赤红壤, 山地常绿阔叶林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛多为黄壤, 而山地灌木草丛为山地灌丛草甸土。

2 研究方法

2.1 数据来源

所使用的数据来源于 1980~1982 年保护区土壤本底调查数据^[20,21]和 2001 年 5 月与 10 月大量的测定数据, 共计土壤剖面 61 个。1980~1982 年的数据为研究土壤类型和性质时所测。取样覆盖了保护区所有植被类型, 按土壤发生层采样, 数据记录了土壤类型、土壤有机质含量和采样地点等, 土壤剖面共 19 个。2001 年 5 月, 挖取针叶林、混交林和季风常绿阔叶林 3 种类型森林土壤剖面 32 个, 记录土壤厚度和所处的海拔高度。然后, 分别按 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 >40 cm 4 个层次采集各土层的土壤样品, 测定土壤有机碳含量和容重。同年 10 月, 挖取保护区主要的 7 种植被类型土壤剖面 10 个, 按土壤发生层取样, 测定土壤有机碳含量。

2.2 实验方法

采用土壤环刀法测定土壤容重, 重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量^[22]。

2.3 数据处理

1980~1982 年和 2001 年 10 月份测定了土壤有机碳含量, 但没有测定相应的土壤容重, 而土壤容重对估算土壤碳密度和贮量又是必不可少。一些研究表明土壤容重、土层、土壤有机质含量间存在相关关系^[11, 23]。根据 2001 年对针叶林、针阔混交林和季风常绿阔叶林 3 个永久样地的 15 个土壤剖面测得的资料, 建立土壤有机碳含量和土壤容重关系的散点图, 经线性拟合, 发现二者具有良好直线关系(图 1)。该关系表明, 土壤有机碳含量与土壤容重密切相关, 土壤有机碳含量随土壤容重增加递减。依据 1980~1982 年和 2001 年 10 月份测定的土壤有机碳含量, 按上关系式推算其土壤容重。

此外, 1980~1982 年和 2001 年 10 月份取样是按土壤发生层取样, 为比较各类型土壤有机碳含量在同一土层的差别, 必须对这些数据略作处理。即, 根据这些土壤剖面记录的土壤发生层厚度和土壤有机碳含量, 转变为在 0~10、10~20、20~40 cm 和 >40 cm 4 个物理层次的土壤有机碳含量, 然后分别计算其土壤碳密度。

2.4 土壤碳密度和碳贮量的计算

碳密度是指单位面积的碳贮量, 一般用 t/hm² 或 kg/m² 表示^[6,9]。本研究各个土壤剖面的碳密度是各土壤剖面的土壤容

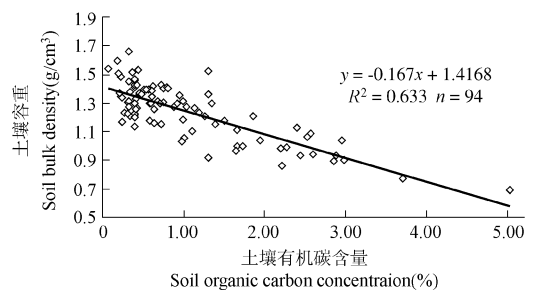


图 1 鼎湖山保护区森林土壤容重与有机碳含量间关系

Fig. 1 Relationship between soil organic carbon concentration and soil bulk density in forests of Dinghushan Biosphere Reserve (DHS-BR). The relationship was based on 94 soil samples and was significant at $P < 0.05$.

重、有机碳含量和实际厚度 3 者的乘积; 各植被类型土壤碳贮量为各植被类型土壤碳密度的平均值与其分布面积的乘积(仅指土壤颗粒直径 < 2mm 部分的有机碳含量, 不包括地表现存凋落物层等)。

3 结果和分析

3.1 土壤有机碳含量

0~ 10、10~ 20、20~ 40 cm 和 > 40cm 4 个土层土壤有机碳含量总平均为 2.46%、1.52%、0.96% 和 0.53%, 其中 10~ 20、20~ 40cm 和 > 40cm 3 个土层的土壤有机碳含量平均值分别是 0~ 10cm 土层的 61.8%、39.0% 和 21.5%。所有植被类型的土壤有机碳含量随土壤深度增加而减少, 但自然植被和曾经受到干扰的次生植被类型的有机碳含量随土壤深度增加而减少的程度不同。沟谷雨林、季风常绿阔叶林、山地常绿阔叶林和山地灌木草丛 4 种自然植被类型的 4 土层由浅到深, 土壤有机碳含量依次明显地减少, 其中沟谷雨林和山地灌木草丛表现得尤为明显。而对于马尾松针叶林、针阔混交林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛等 4 种类型次生植被, 各土层土壤有机碳含量虽然依次减少, 但 10cm 以下的 3 个土层间差距不大(图 2)。可见, 自然植被和次生植被两类型的土壤有机碳含量在各土层的分布格局不同。

同一土层, 植被类型不同其土壤有机碳含量也不同(图 2)。对于 0~ 10cm 和 10~ 20cm 2 个土层, 自然植被类型的土壤有机碳含量显著高于次生植被类型(自然植被 0~ 10cm 和 10~ 20cm 2 个土层平均值分别是次生植被的 1.7 倍和 2.2 倍), 而自然植被与自然植被之间、次生植被与次生植被之间差异均不显著; 对于 20~ 40cm 土层, 自然植被土壤碳含量平均值是次生植被的 2.0 倍, 主要是由于山地灌木草丛和沟谷雨林两种类型比其它类型高得多而引起。对于 > 40cm 土层各植被类型土壤有机碳含量差异最小, 自然植被类型平均值仅为次生植被类型的 1.1 倍。各植被类型在该土层的差异较小, 也从侧面反映了这些植被类型土壤起源的母质性质较为接近。可见, 各植被类型间的土壤碳含量的差异主要表现在 0~ 40cm 土层。

3.2 土壤碳密度

土壤碳密度和土壤有机碳含量一样随深度增加而减少(表 1), 如所有类型土壤在 10~ 20cm 土层的碳密度是 0~ 10cm 土层的 47.7%~ 100.0% (平均 71.7%)。两大植被类型间比较, 除山地灌木草丛 > 40cm 土层外, 自然植被类型各个土层土壤碳密度均高于次生植被类型(0~ 10、10~ 20、20~ 40cm 和 > 40cm, 4 个土层自然植被土壤碳密度平均值分别是次生植被的 1.4、1.8、1.8 和 2.3 倍, 表 1)。其中, 对于 > 40cm, 因为各植被类型间土壤碳含量的差异也很小, 土壤碳密度高低主要取决于该土层厚度的大小, 所以土层较薄的次生季风常绿阔叶林、常绿灌丛和山地灌木草丛土壤碳密度明显的低于其它植被类型。

就整个土层而言, 各植被类型土壤碳密度在 30.9~ 127.9 t/hm²间, 平均以马尾松林最低(53.6 t/hm²), 以山地常绿阔叶林最高(111.5 t/hm²), 总平均为 73.9 t/hm²。自然植被类型土壤碳密度平均值高于次生植被类型, 前者(92.0 t/hm²)是后者(55.8 t/hm²)的 1.6 倍(表 1)。

从表 1 还可知, 同一植被类型不同土层间、同一土层不同植被类型间的土壤碳密度的变异程度不同, 最高达 99.7%, 而最低仅为 0.4%, 说明各植被类型和土层间的质地均匀程度不一。总体而言, 同一植被类型土壤碳密度的变异系数随深度增加而增大, 同一土层基本上表现为次生植被的变异系数高于自然植被, 其中后者可能与马尾松林和混交林等处处在低海拔, 容易遭受人

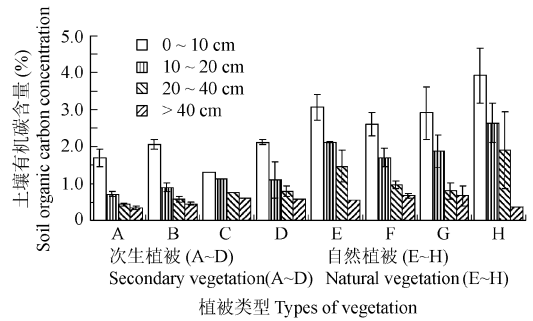


图 2 鼎湖山保护区次生植被(A~ D)和自然植被(E~ H)土壤有机碳含量

Fig. 2 Soil organic carbon concentration for four depth intervals in natural(A~ D) and secondary(E~ H)vegetation of DHSBR

A~ D 分别表示马尾松针叶林、混交林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛次生植被, E~ H 分别表示沟谷雨林、季风常绿阔叶林、山地常绿阔叶林和山地灌木草丛自然植被; 误差线表示标准误 The letters of A~ D represent Pine forest, Pine and broad-leaved mixed forest, Secondary monsoon evergreen broad-leaved forest and Evergreen shrub. The letters of E~ H represent Ravine rain forest, Monsoon evergreen broad-leaved forest, Mountain evergreen broad-leaved forest and Mountain shrubby grassland, respectively; Every error bar represents one standard error

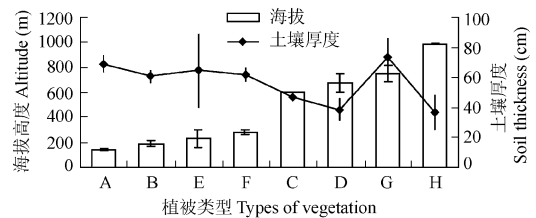


图 3 鼎湖山保护区各植被类型分布的海拔高度和土壤厚度

Fig. 3 Altitude and soil thickness for all types of vegetation in Dinghushan Biosphere Reserve (DHSBR)

A~ H 分别表示植被类型, 与图 2 相同, 误差线表示标准误 The letters of A~ H represent vegetation types, respectively; Every error bar represents one standard error

为干扰有关。但土层不同,不同植被碳密度差异产生的原因不同。对于0~10cm、10~20cm和20~40cm 3个土层来说,因为土壤厚度相同,碳密度差异主要取决于土壤有机碳含量的差异,而对于>40cm 土层,碳密度差异主要取决于土壤厚度,因为不同类型间土壤有机碳含量在该层的差异已很小了(图2)。

从以上分析中可知,自然植被和次生植被两类型土壤有机碳含量和碳密度的差异主要表现在0~40cm 土层的差异和在各土层的分配比重不同上,也同时表明了人为干扰对鼎湖山森林土壤的碳贮量的改变主要发生在该土层上。

表1 鼎湖山保护区植被土壤各层碳密度

Table 1 Soil carbon density for four depth intervals under different types of vegetation in DHSBR

土壤层 Soil(cm)	变化范围 Range (t/hm ²)				Total	平均值 Mean (t/hm ²)				Total	变异系数 C. V. (%)				
	0~10	10~20	20~40	>40		0~10	10~20	20~40	>40		0~10	10~20	20~40	>40	Total
次生植被 Secondary vegetation															
A (16)	3.1~30.7	5.7~14.7	5.8~18.7	2.3~33.4	30.9~90.9	19.4	9.3	10.8	17.1	53.6	36.0	27.2	36.0	61.1	33.4
B (18)	7.4~27.8	3.3~25.0	2.9~38.6	0.3~31.0	30.9~107.1	21.3	10.9	14.5	15.8	59.0	24.8	45.4	55.3	53.1	32.3
C (1)						15.6	15.6	19.7	5.6	56.5					
D (3)	22.1~23.0	7.7~18.1	9.2~23.7		39.0~69.3	22.5	12.9	16.4	4.6	54.1	3.0	56.7	62.3		39.6
平均 Mean (10)						19.7	12.2	15.4	10.8	55.8	21.2	43.1	51.2	57.1	35.1
自然植被 Natural vegetation															
E (3)	26.1~28.9	22.5~22.6	25.7~41.6	36.5	93.0~110.9	27.5	22.5	33.7	36.5	101.9	7.3	0.4	33.4	12.2	
F (13)	16.4~34.6	8.5~27.5	15.4~36.1	1.6~43.5	53.6~125.5	24.2	17.6	23.6	18.4	82.1	21.8	34.4	27.3	70.1	24.9
G (4)	28.3~29.9	20.5~23.2	19.4~33.5	58.1~10.1	95.0~127.9	29.1	21.9	26.4	34.1	111.5	3.8	8.5	37.8	99.7	20.9
H (3)	25.7~29.9	18.6~28.8	21.6~27.2		44.3~90.4	28.1	24.9	24.4	10.0	72.6	7.8	22.1	16.0		34.2
平均 Mean (6)				36.5		27.2	21.7	27.0	24.7	92.0	10.2	16.3	28.6	84.9	23.0
总平均 Total mean (8)						23.5	16.9	21.2	17.8	73.9	13.1	24.3	33.5	35.5	24.6

* A~H 表示植被类型,与图2相同 Denote vegetation types, see fig. 2; 括号里为样本数 Numbers of sample in the parentheses

3.3 土壤厚度

所取的土壤剖面厚度在18~105cm间,较多的集中在45~80cm。各植被类型的平均值为36.7~73.0cm,总平均为56.4cm。分布在海拔最高的山地灌木草丛,土层较薄(20~60cm)。马尾松林多分布于山脚,土层较厚(45~100cm)。除了山地常绿阔叶林外,土壤厚度基本上沿海拔高度增加而减少(图3)。

3.4 土壤碳贮量及其分配

保护区各植被类型总面积为1028.4 hm²,其土壤总碳贮量为72120.1t(表2),其中0~10、10~20、20~40cm和>40cm 4个土层分别占32.0%、20.6%、25.8%和21.6%。自然植被和次生植被土壤碳贮量在各层的分布比重不同,对0~10cm 土层前者大于后者,而对于10~20cm和20~40cm 2个土层则是前者小于后者,对于>40cm 土层两者相近(表2)。造成土壤碳贮量在自然植被和次生植被土壤的分配格局的差异,原因可能有两方面:(1)自然植被土壤在10cm 以下的土层土壤有机碳含量较高,自然植被10~20cm和20~40cm 2个土层土壤碳含量分别是0~10cm 土层的66.8%和41.0%,而次生植被相对应为53.1%和35.4%;(2)次生植被由于曾经受到人为干扰,使0~40cm 这段土壤有机碳含量减少,但是由于近30年来植被得到很好的保护,土壤表层(0~10cm)有机碳含量比其底层积累快。

各植被类型土壤碳贮量的贡献主要取决于其面积的大小,其中占总面积39.3%的混交林贡献最大(35.0%),占总面积12.1%的季风常绿阔叶林次之(14.5%),占总面积3.7%的沟谷雨林和7.8%的次生季风常绿阔叶林贡献很小(均为6.3%)。从表2还可知,占保护区总面积30.4%的自然植被类型土壤碳贮量贡献为40.6%,而占总面积69.6%的次生植被的碳贮量贡献为59.4%,说明自然植被类型的土壤在碳贮存方面发挥积极的作用。

4 讨论

4.1 鼎湖山保护区土壤碳密度较低

鼎湖山保护区土壤主要属砖红壤、赤红壤类型^[20]。本研究结果显示,保护区土壤碳密度总平均值73.92 t/hm²,明显低于我国东部地区该类型土壤碳密度(两者依次为88.6 t/hm²、122.8 t/hm²)^[9]。所研究的季风常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林等植被类型,其土壤碳密度同样也低于周玉荣等报道我国类似森林类型土壤碳密度平均水平(分别为205.23t/hm²、335.58t/hm²和101.30 t/hm²)^[6]。可见,鼎湖山保护区土壤碳密度总体上较低,究其原因,可能是:

(1)土层较薄 考虑到人为干扰和全球变化对土壤的影响的深度一般不超过1m,一些研究对土壤碳库的计算,传统上是根据1m 以内的含量得出。鼎湖山保护区最高峰海拔1000.3m,与低谷相差950余m,地形起伏大,土壤土层深浅不一,土层深度多集中在45~80cm,低于40cm 也有一定的比重(图3)。通过对土壤碳密度与土层厚度间的关系分析表明鼎湖山土壤碳密度随

土层厚度增加而增加。保护区土层较薄(平均为 51.99cm)限制了土壤碳密度。

表 2 鼎湖山保护区各植被类型土壤碳储量及其分配

Table 2 Soil carbon storage and distribution for all types of vegetation in DHSBR

植被类型 Veget types	面积 Area		0~ 10cm		10~ 20cm		20~ 40cm		> 40cm		合计 Total	
	面积 Area (hm ²)	占总面 积比 Percent of total area (%)	碳储量 Carbon storage (t)	占该类 型总量 比* (%)	碳储量 Carbon storage (t)	占该类 型总量 比* (%)	碳储量 Carbon storage (t)	占该类 型总量 比* (%)	碳储量 Carbon storage (t)	占该类 型总量 比* (%)	碳储量 Carbon storage (t)	占总碳贮 量比 Percent of total (%)
次生植被 Secondary vegetation												
A	112.47	10.9	2181.9	34.3	1040.4	16.4	1219.2	19.2	1918.7	30.2	6360.2	8.8
B	403.67	39.3	8602.2	34.1	4400.0	17.4	5861.3	23.2	6390.1	25.3	25253.6	35.0
C	79.87	7.8	1249.2	27.7	1249.2	27.7	1573.4	34.8	444.1	9.8	4515.9	6.3
D	119.27	11.6	2686.0	39.9	1538.6	22.9	1959.6	29.1	547.5	8.1	6731.6	9.3
小计 Subtotal	715.3	69.6	14719.3	34.4	8228.1	19.2	10613.5	24.8	9300.4	21.7	42861.3	59.4
自然植被 Natural vegetation												
E	37.80	3.7	1038.7	22.9	851.6	18.7	1273.5	28.0	1379.7	30.4	4543.6	6.3
F	124.87	12.1	3016.9	28.9	2191.5	21.0	2945.7	28.2	2291.4	21.9	10445.4	14.5
G	46.73	4.5	1359.4	26.1	1021.1	19.6	1235.5	23.7	1593.0	30.6	5209.0	7.2
H	103.67	10.1	2912.1	32.1	2577.2	28.4	2531.6	27.9	1039.8	11.5	9060.8	12.6
小计 Subtotal	313.07	30.4	8327.1	28.5	6641.4	22.7	7986.3	27.3	6303.9	21.5	29258.8	40.6
合计 Total	1028.4	100.0	23046.3	32.0	14869.5	20.6	18599.8	25.8	15604.3	21.6	72120.1	100.0

A~H 表示植被类型,与图 2 相同 Denote vegetation types, see fig. 2; * 占该类型总量比例, Percent of total of this vegetation type

(2) 研究方法的差异 对森林土壤碳储量的估算,大部分是基于土壤普查^[9],或收集一些文献上的数据^[6]而成,两者皆因土壤调查时对山区或山体较高位置的抽样较少,或报道的森林生态系统类型选择偏向性而使其研究结果偏高。

(3) 南亚热带水热条件不利于土壤有机碳积累 鼎湖山保护区位于南亚热带地区,全年热量丰富,雨量丰沛,生物循环旺盛,有机物质代谢快,不利于土壤有机质积累^[20,21]。蚁伟民等^[24]对鼎湖山阔叶林凋落物的研究,发现凋落物失重率在水热条件优越的月份较快,而在低温和土壤干旱的月份则较慢。另外,本研究结果也显示,处在最高海拔的山地灌木草丛表层土壤有机碳含量最高(图 2),说明水热因子是限制土壤碳密度大小的重要因素。

4.2 鼎湖山保护区森林土壤表层土壤碳储量贡献大

根据 Baties^[11]对全球各类型土壤碳储量的研究,0~ 100cm 的土壤碳储量中,0~ 30cm 和 0~ 50cm 所占的比例在 37%~ 59% 和 62%~ 81% 间,平均为 49% 和 67%。另根据 Detwiler^[10]的热带和亚热带地区土地利用变化对土壤碳库影响的研究,0~ 40cm 所贮存的碳占 0~ 100cm 的比例为 35%~ 80%,平均为 57%。对于鼎湖山保护区土壤碳储量的分配,0~ 10、0~ 20 和 0~ 40cm 的土壤碳贡献率为 22.9%~ 39.9%、41.6%~ 62.8% 和 69.4%~ 91.9%,平均 32.0%、52.3% 和 79.0% (表 2)。可见,我国南亚热带地区森林土壤在 0~ 40cm,特别是 0~ 20cm 所贮存的碳量的比重相对于其它地区要大,从侧面反映出土壤更加脆弱,人为干扰活动更容易造成土壤碳损失,这也可能正是鼎湖山针叶林和混交林等次生植被类型在 0~ 40cm 土层的土壤碳含量大大低于具 400 多年历史的季风常绿阔叶林的主要原因。

4.3 人为干扰对森林土壤碳储量的影响

在鼎湖山保护区,人类活动的干扰是影响植被类型的重要因素之一。例如,本研究中马尾松针叶林、针阔混交林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛 4 种次生植被均为自然林遭到破坏后重新造林或自然更新形成^[17,18]。人类活动驱动的土地利用和土地覆盖变化是森林碳库和碳循环最直接的影响因子^[2,4]。在热带森林或疏林皆伐后变为耕地,上层土壤 20%~ 50% 的有机碳会损失掉^[8]。在鼎湖山保护区,无论是各土层土壤有机碳含量,还是土壤碳密度都表现为:针叶林、混交林、次生常绿阔叶林和常绿灌丛等曾经受到人为干扰的次生植被类型明显低于山地常绿阔叶林、山地灌木草丛、沟谷雨林和季风常绿阔叶林自然植被类型(图 2 和表 1)。这些表明保护区过去的人为活动(森林植被类型转换、收割林下层植物凋落物等)对土壤碳含量造成了一定的影响。例如,受到人为干扰的马尾松针叶林各土层的土壤碳含量只有具 400 多年历史的季风常绿阔叶林的 41.0%~ 65.0% (表 2),土壤碳损失率达 35.0%~ 59.0%。可见,在鼎湖山保护区,人为干扰对土壤有机碳含量的影响非常大,与热带森林转化为耕地的表层土壤的碳损失程度(20%~ 50%)相当。

此外,本研究也表明,森林所承受的人为干扰程度不同,其土壤有机碳含量也不同。如,尽管针叶林和混交林都是起源于 20 世纪 30~ 40 年代中期人工营造的马尾松林,但由于针叶林受到人为干扰较混交林严重,目前仍然停留在针叶林阶段。本研究结

果显示, 针叶林无论哪个土层有机碳含量都低于混交林(针叶林是混交林的 75.4% ~ 82.0%)。在鼎湖山保护区, 人为干扰较多的是指农村居民为满足对燃料的需求而进行收割林下层植物和凋落物的活动, 在我国亚热带地区和一些东南亚国家有一定的普遍性^[13~15]。这种人为干扰活动对不同林分的作用强度和濒度因与林分的距离不同而异。较为典型是这种活动每年会从森林中带走 2.4 t/hm² 的林下层植物和 0.9 t/hm² 的凋落物^[15], 折合有机碳为 1.05 t/hm² 和 0.49 t/hm², 即每年向土壤层输入的有机碳量减少了 1.54 t/hm² 碳。此外, 人为收割林下层植物和凋落物还会造成两个更深层次的影响: (1) 林下层变得稀疏, 乔木层植物得不到补充, 林分生产力下降, 导致地上和地下凋落物输入减少; (2) 表层土壤水土流失, 土壤呼吸增强, 深层土壤可溶性碳和有效养分的丧失。这两方面又更进一步的制约森林物质生产和森林演替进程, 不利于其碳积累。

总而言之, 人为活动的干扰是造成鼎湖山保护区马尾松针叶林、针阔混交林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛等 4 种类型次生植被土壤的有机碳含量、土壤碳密度及其变异程度低于沟谷雨林、季风常绿阔叶林、山地常绿阔叶林和山地灌木草丛等 4 种类型自然植被的主要因素。此外, 我国南亚热带地区森林土壤在 0~40cm, 特别是 0~20cm 所贮存的碳量的比重相对于其它地区要大, 从侧面反映出该地带的土壤更为脆弱, 人为干扰活动更容易造成土壤碳损失, 因此减少人为对森林的干扰活动, 加强对森林植被的保护以维持和增加土壤碳贮量, 对维护全球气候变化, 特别是减缓大气 CO₂ 浓度上升等方面有着重大的意义。

References

- [1] IPCC. Land use, land-use change, and forestry, Summary for Policymakers, a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2001. 1~20. Available from <http://www.ipcc.ch/pub/srllulucf-e.pdf>
- [2] IPCC. Climate change 2001: the science of climate change. Summary for policymakers, a report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2001. 1~98. Available from <http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>
- [3] Brown S and Lugo A E. Storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, 1982, **14**: 161~187.
- [4] Brown S, Sathaye J, Cannell M, et al. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: Watson R T, Zinyowera M C, and Moss R H, eds. *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Scientific-Technical Analyses*. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1996.
- [5] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystem. *Science*, 1994, **263**: 185~190.
- [6] Zhou Y R, Yu Z L and Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **24**(5): 518~522.
- [7] Sampson R N, Apps M and Brown S. Terrestrial biosphere carbon fluxes quantification of sinks and sources of CO₂. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, **70**: 3~15.
- [8] Sombroek W G, Nachtergaele F O and Hebel A. Amount, dynamics and sequestrating of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*, 1993, **22**(7): 417~426.
- [9] Wang S Q, Zhou C F, and Li K R. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(5): 533~544.
- [10] Detwiler R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soil. *Biogeochemistry*, 1986, **2**: 67~93.
- [11] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 151~163.
- [12] Fang J Y, Tang Y H, Lin J D, et al. *Global ecology: climate change and ecological response*. Higher Education Press, Springer Press, 2000. 135~141.
- [13] Mo J M, Brown S, Lenart M T, et al. Nutrient dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB reserve of subtropical China. *Biotropica*, 1995, **27**(3): 290~304.
- [14] Mo J M, Kong G H, Sandra Brown, et al. Litterfall response to human impacts in a Dinghushan pine forest. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(6): 656~664.
- [15] Mo J M, Brown S, Peng S L, et al. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China. *Forest Ecology and Management*, 2003, **175**: 573~583.
- [16] Brown S, Lenart M T, Mo J M, et al. Structure and organic matter dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB reserve of subtropical China. *Biotropica*, 1995, **27**(3): 276~289.
- [17] Wang Z H, He D Q, Song S D, et al. The vegetation of Ding Hu Shan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1982, **1**: 11~23.
- [18] Zhou H C, Li M J, Zhou Y R, et al. The vegetation map of Ding Hu Shan Biosphere Reserve with reference to its illustration. *Tropical*

- and Subtropical Forest Ecosystem*, 1986, 4: 43~ 52
- [19] Huang Z F and Fan Z G. The climate of Ding Hu Shan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1982, 1: 11~ 23
- [20] He J H, Chen Z Q and Liang Y A. The soil of Ding Hu Shan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 1982, 1: 25~ 38
- [21] He Y G. The soil of Ding Hu Shan Mountain Natural Reservation, Guangdong Province. *Journal of South China Normal University*, 1983, 1: 87~ 96
- [22] Anderson J M and Ingram J S. *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*. CAB International, Wallingford, Oxford, England, 1989.
- [23] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al*. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156~ 159
- [24] Yi W M, Ding M M, Zhang Z P, *et al*. Litter mass and its nitrogen dynamic of *Cryptocarya Concinna* community in the Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 18(3): 228~ 235

参考文献:

- [6] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518~ 522
- [9] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533~ 544
- [12] 方精云, 唐艳鸿, 林俊达, 等. 全球生态学——气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 施普林格出版社, 2000. 135~ 141.
- [14] 莫江明, 孔国辉, Sandra Brown, 等. 鼎湖山马尾松林凋落物及其对人类干扰的响应研究. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 656~ 664
- [17] 王铸豪, 何道泉, 宋绍敦, 等. 鼎湖山保护区的植被. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982, 1: 77~ 141.
- [18] 周厚诚, 李明佳, 周远瑞, 等. 鼎湖山自然保护区植被图及说明书. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1986, 4: 43~ 52
- [19] 黄展帆, 范征广. 鼎湖山的气候. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982, 1: 11~ 23
- [20] 何金海, 陈兆其, 梁永不. 鼎湖山自然保护区之土壤. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982, 1: 25~ 38
- [21] 何宜庚. 广东省鼎湖山自然保护区的土壤. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 1983, 1: 87~ 96
- [24] 蚁伟民, 丁明懋, 张祝平, 等. 鼎湖山黄果厚壳桂群落的凋落物及其氮素动态. *植物生态学报*, 1994, 18(3): 228~ 235