

季风常绿阔叶林恢复演替系列地下部分 碳平衡及累积速率*

周国逸^{①**} 周存宇^① Liu Shuguang^② 唐旭利^① 欧阳学军^①
张德强^① 刘世忠^① 刘菊秀^① 闫俊华^① 温达志^① 徐国良^①
周传艳^① 罗 艳^① 官丽莉^① 刘 艳^①

(① 中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究站, 广州 510650; ② SAIC, EROS Data Center, US Geological Survey, Sioux Falls, SD 57198, USA)

摘要 在对亚热带顶极森林生态系统-季风常绿阔叶林及其自然恢复演替系列-针阔叶混交林和马尾松林的土壤有机质、凋落物与粗死木输入量和现存量以及水文学过程中可溶性有机碳长期定位监测的基础上, 结合 5 年一次的根系生物量动态观测资料和 1 年的土壤呼吸与凋落物+粗死木呼吸测定, 得到了该恢复系列地下部分碳平衡和累积速率及其时间动态变化. 结果如下: 季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林 2002 年地下部分碳库分别为 23191 ± 2538 , 16889 ± 1936 和 $12680 \pm 1854 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. 从 1978 年到 2002 年的 24 年间, 碳的年平均增长速度分别为 383 ± 97 , 193 ± 85 和 $213 \pm 86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 3 个森林类型全年都表现出碳的净增长态势, 即相对于大气来说, 3 个森林类型的地下部分总体上是碳汇, 但季节上有差异, 表现在每年的 4~6 月份是较强的碳源, 7~9 月份是较弱的碳源; 10~11 月份是较强的碳汇, 12~3 月份是较弱的碳汇.

关键词 季风常绿阔叶林 恢复演替系列 地下部分 碳库 累积速率

陆地生态系统的地下部分(belowground)是一个巨大的碳库. 据认为^[1,2], 在全球陆地生态系统 2500Gt 的总碳贮量中, 1 m 厚的表层土壤碳贮量占了 2000Gt, 是植被碳贮量 500Gt 的 4 倍. 相对于贮存在植被中的碳来说, 贮存在土壤深层中的碳较为稳定,

如果没有受到大的地质变迁, 它们将长久地保存在土壤剖面中而形成稳定的有机碳库.

森林恢复过程实际上就是土地覆盖变化过程. 在这个过程中, 地上部分植被逐步演替, 带来地下部分碳平衡及累积速率发生改变. 探讨它们之间的耦

2004-04-01 收稿, 2004-12-10 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KSCX2-SW-120)、国家自然科学基金(批准号: 30470306)资助项目

** E-mail: gyzhou@scib.ac.cn

合关系对于准确估算区域性的森林覆被对全球碳平衡的贡献具有非常重要的意义。季风常绿阔叶林是地球上一个重要的地带性顶极森林类型,主要分布于中国的亚热带。其演替类型丰富,基本包括了亚热带非地带性的主要植被类型。我国在该区域进行森林恢复而建立的大量植被群落,大多是季风常绿阔叶林的演替类型。因此,研究季风常绿阔叶林恢复演替系列地下部分碳平衡及累积速率具有广泛的代表性。

本文以鼎湖山季风常绿阔叶林及其恢复演替系列中的混交林、马松林3个群落为对象,通过全面地探讨地下部分碳密度及碳流量的大小包括考虑水文学过程中碳携带量,试图揭示亚热带森林演替过程中,各个演替阶段地下部分碳贮量及其形成过程,阐述这些植被类型与土壤碳密度的关系及其动态变化。为研究同一气候区域下,土壤碳密度受土地利用和土地覆盖影响这一科学问题提供试验依据。

1 研究对象概况

本文以南亚热带地带性顶极植被-季风常绿阔叶林及其恢复演替系列-针阔叶混交林和马尾松林为研究对象。这3种森林类型在群落自然演替系列上存在先后承继关系,即:马尾松林→针阔叶混交林→季风常绿阔叶林,它们构成了鼎湖山自然保护区海拔高度在250~300 m之间的主要森林类型。

鼎湖山生物圈保护区(112°30'39"~112°33'41"E, 23°09'21"~23°11'30"N)位于广东省中部,面积1145 hm²,是中国第一个自然保护区,自然保护的历史长。该区属亚热带季风气候,年平均气温20.9℃,年平均相对湿度为80%,年均降雨量和蒸发量分别为1929和1115 mm,4~9月份为湿季,10月份至次年3月份为旱季。年均径流系数在0.455~0.492之间。土壤为水化赤红壤,自然酸化严重,pH值在4.1~4.9之间,全区森林覆盖率在85%以上^[3]。

季风常绿阔叶林群落结构复杂,种类组成以常绿树种占绝对优势,大部分属热带亚热带成分。地上垂直结构大致可以分为5层,其中乔木3层,灌木1层,草本1层,此外还有多种藤本和附生等层间植物。该群落生物量约为38000 g·m⁻²^[4]。土壤为砂页岩发

育而来的水化赤红壤,土层厚度为80 cm左右。

针阔叶混交林是人工或自然的马尾松(*Pinus massoniana*)林由于阔叶树的自然入侵经一段时间的演替而成,目前正快速地向季风常绿阔叶林恢复演替,代表了恢复系列中间阶段的典型类型。种类组成以常绿树种为主,大部分属热带亚热带成分。地上垂直结构大致可以分为4层,其中乔木2层,灌木1层,草本1层,此外还有少量藤本和附生等层间植物。该群落地上部分生物量约为26000 g·m⁻²^[5]。土壤为砂页岩发育而来的薄层赤红壤,土层厚度在30~60 cm之间。

马尾松林已有40年以上的历史,目前正加速向针阔叶混交林方向恢复演替,代表了演替系列前期阶段的典型类型。种类组成主要以马尾松为主,间有一些南亚热带阳性树种。地上垂直结构基本分为2层,林冠开敞的乔木层和发达的灌木、草本层。该群落生物量约为12200 g·m⁻²^[4]。土壤为砂页岩发育而来的赤红壤,土层厚度为30 cm左右。

2 碳平衡过程及其研究方法

2.1 研究方法

本文将地下部分定义为地表凋落物层及其以下深达80 cm的土壤层。在这3个森林类型中,每个都设置了1个1 hm²的永久性样地,并在其周边有相对固定的土壤、根系等用于破坏性采样的采样点。

2.1.1 凋落物

包括凋落物输入量和凋落物现存量两个测定内容。在3个林型中分别设置15个1 m²的凋落物收集筐以收集凋落物输入量,同时设置15个1 m²的凋落物现存量采样点。每月进行1次凋落物收集和分选,分不同植被类型每年测定凋落物各成分的含碳百分比,根据多年的测定结果,凋落物各成分含碳量占相应成分的生物量干重百分比基本维持在50%左右。

2.1.2 粗死木

粗死木的现存量和输入量调查结合样地调查进行。对样地中所有直径≥2.5 cm,长度≥1.0 m的枯立木、倒木、残干、残枝进行测量和记录,内容包括树种、大头直径、中央直径、小头直径、残干长度。对形状不规则或部分分解的残干、残枝,则根据外形先

将整条残干分为若干段, 再按上述方法测量, 用排水法测量其密度, 详见唐旭利等^[6]. 根据我们多年的测定结果, 粗死木含碳量占其生物量干重百分比基本维持在 50% 左右.

2.1.3 根系

根系分为大根和细根两部分. 大根的净生长量和死亡率根据实测的方法得到, 在每个森林类型的破坏性采样地分别挖取 4~5 个 1 m² 的土柱, 土柱的深度到底土层, 分层收集大根, 洗净烘干, 获得大根的生物量和死亡量, 再按(1)式计算净生长量^[7,8]:

$$NPP_{cr} = (ANPP/AGB) \times B_{cr}, \quad (1)$$

式中, NPP_{cr} 为粗根净生长量, $ANPP$ 为地上部分净生长量, AGB 为地上部分生物量, B_{cr} 为大根生物量. $ANPP$ 和 AGB 根据彭少麟等^[4,5]的方法得到; B_{cr} 根据上述方法实测得到.

细根的测定于 2001~2002 年进行, 用内径 5.68 cm 的土钻在样地不同部位的各个土壤层次钻取土芯, 用流动水浸泡、漂洗、过筛, 拣出小于 5 mm 的根系. 根据根系外形、颜色和弹性来区分死活根, 风干后称重, 再取一定量的样品置于 80℃ 烘箱中烘干至恒重后称重, 得干重率^[9]. 按(2)式计算细根生物量:

$$\text{细根现存量或死亡量} (g \cdot cm^{-2}) = \frac{\text{平均每土芯根重} (g)}{(5.68/2)^2 \pi}. \quad (2)$$

细根净生产量按(3)式计算^[9,10]:

$$P = P_{max} - P_{min} + M, \quad (3)$$

(3)式中, P 为细根年净生产量, M 为年死亡量, P_{max} 和 P_{min} 分别为活细根现存量的最大和最小值.

根据多年测定的结果, 根系碳含量在季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林中平均为 42%, 54% 和 55%.

2.1.4 土壤有机质

从 1978 年开始(有些年份缺乏), 在每个森林类型选取 20 个采样点, 对全土壤剖面进行采样^[11], 用常规分析方法测定土壤有机质及其含碳量. 土壤有机质含碳百分比在 3 个森林类型中都比较相近, 平均为 58%, 将各个层次的土壤有机质取平均值得到全土壤剖面有机质的平均含量. 另外, 每 5 年进行 1 次各个采样点 3 个层次(0~20, 20~40, 40~60 cm)的土壤

容重测定.

2.1.5 地下部分 CO₂ 输出

采用以静态箱/气相色谱法为主体的标准碳通量观测方法. 在不同森林类型内进行每周 1 次观测和每个月 1 次连续 24 h 观测. 每组试验设置无地表覆盖、有凋落物和粗死木覆盖等 2 个处理. 粗死木覆盖物的选取根据各个森林类型的调查结果, 按径级大小和腐烂程度混合配置, 以分别确定凋落物+粗死木 CO₂ 的输出量和土壤 CO₂ 输出量, 再将 CO₂ 量转化成标准碳量加以计算. 土壤释放的 CO₂ 来源很复杂, 包括根系生长的自养呼吸以及土壤微生物和土壤动物的异养呼吸.

2.1.6 可溶性有机碳和固态有机碳

大气降水、林冠穿透水、树干径流和地表地下径流量按周国逸等^[3]所述的方法进行连续监测, 同时定期采取水样. 用 TOC-V 分析仪(日本岛津)测定这些过程中的可溶性有机碳和固态有机碳, TOC-V 分析仪能将样品中的可溶性有机碳和固态有机碳不加区别地一次性全部分析出来, 得到的结果是可溶性有机碳和固态有机碳的总和.

在 2001~2002 年期间, 研究区域没有出现水土流失的情况, 所以没有该项的碳支出.

2.2 地下部分碳平衡的计算

2.2.1 碳输入(I)

地下部分碳输入以凋落物输入(I_l)和粗死木输入(I_c)为主要途径, 其次为根系相关部分的输入(I_r)和通过大气降水(I_p)的输入, 以(4)式表示:

$$I = I_l + I_c + I_r + I_p. \quad (4)$$

根系的碳输入包括通过根系的净生长(I_{rg})和死亡(I_{rd})所带来的碳输入, 由(5)式表示:

$$I_r = I_{rg} + I_{rd}. \quad (5)$$

大气降水的碳输入包括穿透水(I_{pt})和树干径流(I_{ps})的碳输入量两部分, 如(6)式所示, 以往较少受到关注.

$$I_p = I_{pt} + I_{ps}. \quad (6)$$

2.2.2 碳输出(O)

地下部分碳输出以呼吸作用(O_g)为主要途径, 其

次为地表地下径流所携带的有机碳(O_n), 以(7)式表示为

$$O = O_g + O_n.$$
 (7)

本文的测定系统可以将地下部分的呼吸过程分开为凋落物+粗死木的呼吸(O_{gl})和土壤呼吸(O_{gs})两部分, 以(8)式表示:

$$O_g = O_{gl} + O_{gs}.$$
 (8)

地表地下径流所携带的有机碳包括可溶性有机碳(O_{nl})和固态有机碳(O_{ns}), 本文在通过 TOC-V 分析仪测定时, 是不加区别一并测出的.

2.2.3 碳贮量(B)

凋落物现存碳量(B_l)、粗死木现存碳量(B_c)、土壤有机质现存碳量(B_o)和根系现存碳量(B_r)构成了地下部分碳贮量(B), 用(9)式表示:

$$B = B_l + B_c + B_o + B_r.$$
 (9)

大根和细根在测定方法上是不同的, 因此, 根系碳贮量包括细根的碳贮量(B_{rf})和粗根的碳贮量(B_{rc}), 满足(10)式

$$B_r = B_{rf} + B_{rc}.$$
 (10)

3 结果与分析

3.1 2002 年碳库及其动态特征

3 种植被类型地下部分现存碳密度结果如表 1.

森林类型	季风常绿阔叶林	针阔叶混交林	马尾松林	
土壤有机质	16410(2117) ^{a)}	11129(1754)	10518(1806)	
凋落物	328(71)	497(103)	436(146)	
粗死木	1320(1283)	524(399)	10(9)	
根	细根(<5 mm)	479(114)	518(152)	516(97)
	大根(≥5 mm)	4654(545)	4222(693)	1200(382)
	总计	23191(2538)	16889(1936)	12680(1854)

a) 括号中的数字为标准差, 总计中的标准差由各部分标准差平方和的平方根得到, 下同

季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林现存土壤有机质含碳密度分别占总碳密度的 70.8%, 65.9%和 83.0%. 根的含碳密度分别占总碳密度的 22.1%, 28.1%和 13.5%. 凋落物与粗死木的含碳密度分别占总碳密度的 7.1%, 6.0%和 3.5%. 对于这 3 种植

被类型来说, 土壤有机质是相应的地下部分碳贮量的主体. 土壤有机质是相对稳定的碳载体, 占据较大的比重, 有利于生态系统的稳定.

构成地下部分现存碳密度的各个成分中, 不同植被类型间差异最大的为粗死木. 马尾松林的粗死木含碳量只有混交林的 2.0%和季风林的 0.8%, 其次为大根和土壤有机质, ANOVA 检验表明它们在森林类型间都存在极显著的差异($p<0.001$). 细根的现存碳密度在不同植被类型间非常相近. 季风常绿阔叶林与其他 2 类森林类型比较, 凋落物现存碳密度极显著地低($p<0.001$), 这与近年来季风常绿阔叶林凋落物量逐年减少和马尾松林凋落物的主要类型——松针难于分解的原因相关.

3.2 2002 年碳平衡

3.2.1 输入量

2002 年 3 种植被类型地下部分碳输入密度如表 2 所示.

表 2 2002 年地下部分碳的输入量($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)

森林类型	季风常绿阔叶林	针阔叶混交林	马尾松林	
穿透水	16(11)	29(34)	23(15)	
树干流	3(4)	3(3)	2(1)	
凋落物	357(50)	465(51)	337(64)	
粗死木	210(149)	123(83)	8(9)	
根	细根(<5 mm)净积累量	160(73)	196(117)	215(159)
	细根(<5 mm)死亡量	93(18)	110(45)	104(66)
	大根(≥5 mm)净积累量	306(82)	349(178)	84(74)
	大根(≥5 mm)死亡量	136(54)	65(21)	11(7)
总计	1281(200)	1340(242)	784(199)	

通过根的生长和死亡, 2002 年输入到季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林地下部分的碳量占总输入碳量百分比分别为 54.3%, 53.7%和 52.8%. 以凋落物和粗死木输入的碳量分别占 44.2%, 43.9%和 44.0%. 通过穿透水和树干流等水文学过程输入的碳量虽然只分别占到 1.5%, 2.4%和 3.2%, 但容易直接加入到土壤有机质库的行列, 因此具有重要的意义.

在输入到地下部分的各个碳流中, 不同植被类型间差异最大的为粗死木, 马尾松林的粗死木碳量

只有混交林的 6.5%和季风林的 3.8%. 其次为大根死亡和净积累、凋落物和细根净积累所带来的碳量, 不同的森林类型之间均存在极显著的差异($p<0.001$). 通过穿透水输入的碳量在 3 个森林类型之间有一定的差异($p<0.05$), 通过树干流输入的碳量在 3 个森林类型之间没有差异($p<0.05$).

3.2.2 输出量

输出量由土壤呼吸、凋落物+粗死木呼吸和随径流输出的可溶性和固态有机碳组成, 各部分的量由表 3 给出.

表 3 2002 年地下部分碳的输出量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)			
森林类型	季风常绿阔叶林	针阔叶混交林	马尾松林
径流	2(0.6)	2(0.4)	5(5)
凋落物和粗死木呼吸	303(79)	447(100)	198(53)
土壤呼吸	831(194)	553(161)	426(86)
总计	1136(209)	1002(190)	629(101)

土壤呼吸是地下部分碳输出的主体, 分别占季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林碳总输出的 73.1%, 55.2%和 67.7%. 凋落物呼吸分别占 26.7%, 44.6%和 31.5%. 径流输出的量极其微小.

3.2.3 碳平衡分析

由表 2, 3 可以得到 2002 年季风常绿阔叶林、针

阔叶混交林和马尾松林生态系统地下部分碳的净增量分别为 145 ± 289 , 338 ± 308 和 $155 \pm 223 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 3 个森林类型在全年碳平衡上都为汇, 增量的幅度以针阔叶混交林最高, 季风常绿阔叶林和马尾松林相近. 这些碳增量中只有少量通过穿透水和树干径流输入的可溶性和固态有机碳可以直接进入土壤有机质的行列, 而大部分是以凋落物、粗死木和根系的形态存在的, 它们只是地下部分碳库的一个“临时贮存站”, 这之中将有多大比例转化为土壤有机质决定于生物气候环境.

3.3 碳库的时间动态分析

3.3.1 年际动态

图 1 是本文所研究的 3 个森林类型 1978 年以来贮存在土壤有机质中的碳量变化过程.

从 1978 年到 2002 年的 24 年间, 季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林贮存在土壤有机质中的有机碳净增加量分别为 9199 ± 2333 , 4629 ± 2044 和 $5117 \pm 2065 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. 整个期间内, 碳的年平均增长速度分别为 383 ± 97 , 193 ± 85 和 $213 \pm 86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 根据图 1, 将这段期间分为 1978~1979, 1979~1996, 1996~1999 和 1999~2002 等 4 个时段, 每个时段碳的年平均增长速度由图 2 给出.

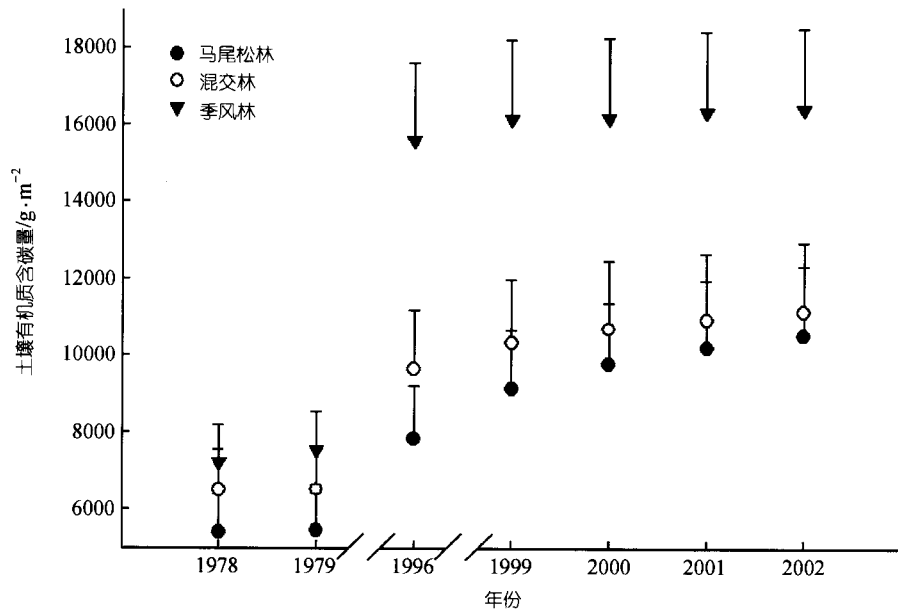


图 1 贮存在土壤有机质中碳量的历年变化趋势

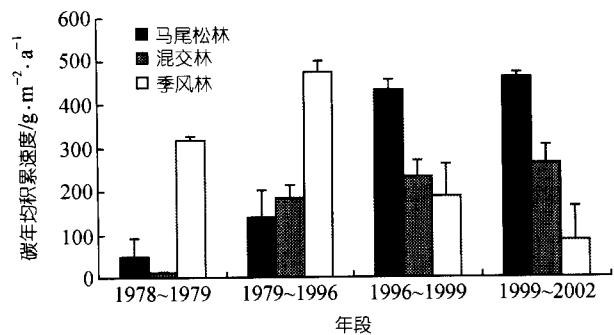


图 2 1978~2002 年各个时段土壤有机碳的年平均增长速度

从 1978 年至今, 混交林和马尾松林土壤有机质碳贮量增长速度越来越快, 不同时段之间的差异只表现在增加速度的大小上, 特别是马尾松林更明显. 季风常绿阔叶林在 1996 年以前的土壤碳贮量以较快的速度增长, 这以后的增长速度逐渐减小, 逐步接近土壤有机质碳贮量的最大限度.

图 3 给出了多年来 3 种森林的地上部分以凋落物形式输入到地下部分的碳量. 可以看到, 马尾松林凋落物碳输入量一直在逐年增加($p<0.05$), 季风常绿阔叶林和混交林凋落物碳输入量多年来基本处于稳定状态, 有下降的趋势, 但统计检验的结果表明下降的

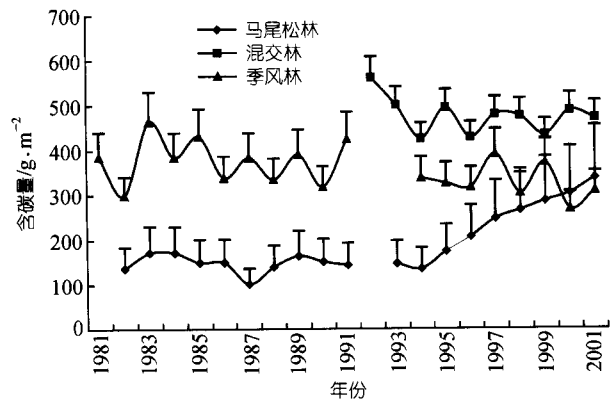


图 3 年凋落物输入的碳量

趋势不明显($p>0.05$). 季风常绿阔叶林凋落物碳输入量极显著地存在以 1 年为周期的大小年现象($p<0.001$), 大小年间平均差异达到 $65\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. 混交林表现出与季风常绿阔叶林类似的特征, 但大小年周期不稳定、凋落物碳输入量差异不显著($p>0.05$). 马尾松林凋落物碳输入量不存在大小年现象, 这可能是地带性和非地带性森林之间的差异.

从如上地下部分碳贮量年际动态结果可以知道, 地下部分碳贮量的主体是土壤有机质. 季风常绿阔叶林土壤有机质碳贮存已接近饱和状态, 净积累速度逐渐减小, 针阔叶混交林和马尾松林土壤有机质碳贮存量正在加速增加. 目前, 季风常绿阔叶林和针阔叶混交林的凋落物碳输入量已基本稳定, 只有马尾松林的还在增加. 由于在森林恢复过程中, 水文生态功能的恢复较其他功能和生态系统结构恢复来得快^[12], 本文所涉及到的 3 个森林类型的水文学过程数量关系已经基本稳定, 穿透水和树干径流量已多年没有什么变化, 因此其输入的可溶性和固态有机碳在年际间是稳定的, 除非降水环境发生改变. 与根相关的碳输入量本文没有多年的资料, 估计在季风常绿阔叶林中的年际变化不大, 而在针阔叶混交林和马尾松林为持续增加.

3.3.2 月份及季节动态

按季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林的顺序, 表 4 的结果指出全年凋落物碳量有少量的净积累, 分别为 40.8 ± 6.7 , 10.8 ± 4.0 和 $43.9\pm4.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. 净积累主要在每年的 7~11 月份, 3 个森林类型分别有 80.4 ± 3.1 , 56.4 ± 3.1 和 $57.5\pm3.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的净积累, 因此, 这期间的凋落物碳库相对于大气层来说起着汇的作用. 其他月份(12~6 月份)都是支出大于收入, 净支出分别为 -39.6 ± 3.6 , -45.6 ± 2.6 和 $-13.6\pm5.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 凋落物碳库相对于大气起着碳源的作用. 出现这种结果的主要原因是凋落物输入量主要集中在

表 4 各月份的凋落物碳平衡量(凋落物碳输入量与凋落物呼吸量之差) ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
季风林	-6.1	3.7	2.7	12.1	5.9	-54.2	16.7	13.2	20.4	22.2	8.0	-3.7	40.8 (6.7)
混交林	-3.1	1.1	-13.6	0.8	-14.6	-13.4	21.3	2.6	7.2	20.3	4.9	-2.7	10.8 (4.0)
松林	8.4	-1.0	-10.5	-19.8	-12.6	-1.6	22.0	10.3	-1.6	13.0	13.7	23.4	43.9 (4.7)

每年的 7~11 月份^[13].

图 4 所给出的土壤呼吸月变化曲线基本上遵循温度控制的规律. 温湿度高的雨季(4~9 月)占季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林地下部分全年土壤呼吸碳排放的 69.7%, 73.3% 和 74.8%.

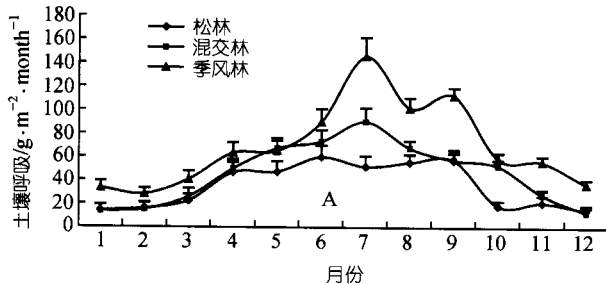


图 4 土壤呼吸 C 释放量的月变化

从如上地下部分碳贮量各分量的季节动态结果可以知道, 由于受温度高低的控制, 土壤呼吸作用的碳释放主要发生在高温多雨的 4~9 月份, 土壤碳库是大气层的碳源. 而受凋落物输入的季节变化控制, 凋落物碳库在 7~11 月份为碳汇, 12~6 月份为碳源. 综合这几方面的因素并考虑到土壤呼吸是本文 3 种森林类型地下部分碳释放的主体, 可以认为, 鼎湖山这 3 种植被类型地下部分碳库月份间的动态有一致性, 即地下部分碳库在每年的 4~6 月份是较强的碳源, 7~9 月份是较弱的碳源; 10~11 月份是较强的碳汇, 12~3 月份是较弱的碳汇.

4 讨论

4.1 误差分析和假定

精细地研究森林生态系统地下部分碳分配和碳平衡比较困难, (1)式表明根系的净生长量依赖于地上部分的生物量和净生长量, 因此, 长期而准确的地上部分生物量与生产力资料是研究地下部分碳分配与平衡的基础, 作为国家的长期定位研究站, 鼎湖山的监测资料为本文提供了条件.

土壤有机质是本文 3 个森林类型最主要的碳贮存形式, 有机质的化学测定比较可靠. 从 1978 年至今, 测定方法上尽管有所不同, 但不同方法之间所引起的偏差可以忽略. 不同年份间土壤采样偏差是存在的, 虽然每个森林类型每年的采样点都控制在 20

个左右, 但为了不至于破坏土壤结构, 每年在各林型内的采样点基本上都不一样, 这可能引起年份间土壤有机质碳贮量测量上的偏差, 这个偏差可以通过每次准确地选取反映全林型的 20 个采样点而得到消除. 因此, 本文中土壤有机质碳贮量数据是最为可靠的.

凋落物的现存量与输入量、粗死木的现存量测定不存在难度. 粗死木输入量是通过前后 2 次现存量调查的差值得到的, 虽然粗死木现存量的测定精度较高, 但前后测定结果的偏差将导致最后结果偏差的增加, 这在后面还要讨论.

水相中可溶及固态有机碳浓度的测定很直接, 这之中不会产生较大误差, 问题是对南亚热带森林生态系统水文学过程中水量的监测可能存在 10%~20% 的误差^[12], 幸运的是水相中的碳总量占很小的比重, 因此对地下部分碳分配与碳平衡的影响很小.

以封闭静态箱/气相色谱法为主体的碳通量观测方法所测定的土壤呼吸和凋落物+粗死木呼吸由于抽取气时存在一定程度的负压而可能使结果偏大, 我们的检验表明所引起的误差约为 5%. 由于呼吸作用占本文 3 种森林类型地下部分碳输出的 99.2% 以上, 因此, 地下部分呼吸作用的测定误差可能引起总输出量 4%~5% 的误差.

根系生物量、净生长量和死亡量的测定较困难, 有些研究^[14,15]根据过去的工作经验, 由配比 (allometric) 生长的原理通过地上部分相应的量乘以某一系数得到. 本文是根据实测获得大根和细根的生物量、净累积量和死亡量, 再换算成碳量的. 表 1 和 2 的结果显示, 虽然各个平行测定结果之间由于根系在空间分布的不均匀而有较大的相互偏差, 但与林分根系实际值的误差不会大于 10%^[9], 它将引起表 1 中现存碳密度误差分别为: 季风常绿阔叶林 2.2%, 针阔叶混交林 2.8%, 马尾松林 1.4%. 引起表 2 中现存碳输入量误差分别为: 季风常绿阔叶林 5.4%, 针阔叶混交林 5.4%, 马尾松林 5.3%.

本文按(11)式所述的方法根据各个分量的标准差计算总量标准差:

$$\sigma_C = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \rho\sigma_A\sigma_B}, \quad (11)$$

式中, σ_C , σ_A 和 σ_B 分别为 C , A , B 的标准差, 其中: $C = A+B$; ρ 为 A 与 B 的相关系数.

如果 A 和 B 占 C 的比例不同, 而且占比例小的分量却有较大标准差的话, 根据(11)式计算的总量标准差可能偏大. 本文表 1 中根系现存碳密度占总碳密度的百分比较小, 但前者的标准差较大, 从而可能使得表 1 中的总碳密度标准差计算结果偏大.

Giardina 等^[14]根据各个分量的标准差用各个分量及其平行测定的数目作为权重, 计算得到了总量的标准差, 本文认为有一定的合理性, 但仍然存在为题, 可能使得计算出的总量标准差偏小.

4.2 与其他研究结果的比较分析

李意德等^[16]报道了地处 18°23'~18°52'N, 108°36'~109°02'E 的热带山地雨林生态系统凋落物现存量为 590 g·m⁻², 约相当于 295 g·m⁻² 碳量, 略小于本文表 1 中季风常绿阔叶林内的值, 考虑到地理纬度的差异, 它们是很一致的. 张庆费等^[17]研究表明亚热带季风气候(29°48'N, 121°47'E)下的常绿阔叶林演替系列马尾松林、马尾松-荷木林、荷木林、栲树-荷木林、栲树林的凋落物现存量分别为 1152, 1044, 1027, 1037, 1045 g·m⁻², 约分别相当于 576, 522, 514, 519, 523 g·m⁻² 碳量, 高于表 1 中季风常绿阔叶林演替系列相应森林类型凋落物现存量的碳贮量, 地理纬度的不同可能是导致差异的主要原因.

粗死木碳贮量受森林类型和地理环境影响, 不同研究者^[6,18,19]之间的结果差异悬殊, 从粗死木现存量为 734.9 g·m⁻²(约相当于 368 g·m⁻² 碳量)^[18]到 9846 g·m⁻²(约相当于 4923 g·m⁻² 碳量)^[19]. 本文季风常绿阔叶林和针阔叶混交林的现存粗死木碳贮量值介于其中, 与唐旭利等^[6]的研究结果一致.

对长白山森林根系生物量的研究表明^[20], 长白山各类森林生态系统根系总生物量居于 2578~5155 g·m⁻² 之间, 约相当于 1289~2578 g·m⁻² 的碳贮量, 这个值比本文所研究的鼎湖山季风常绿阔叶林和针阔叶混交林要小, 比马尾松林要大, 这个差异主要是因为长白山和鼎湖山森林生态系统生物量完全不同所导致的.

本研究结果与李克让等^[2]的估算值、方精云等^[21]

和 Wang 等^[22]实测的相近林型土壤有机质碳密度如表 5 所示, 说明本研究结果均在相近林型的实测值范围内.

表 5 3 种森林类型土壤有机质碳密度(g·m⁻²)估算对比

森林类型	本研究	李克让等 ^[2]	据实测资料计算
季风常绿阔叶林	16410		
常绿阔叶林		12920	9670~19600
马尾松-阔叶混交林	11129		
混交林		22570	10130~23730
马尾松林	10518		
常绿针叶林		17980	9000~11110

杨丽韞等^[20]调查了长白山各类森林生态系统的林地(没有包括凋落物)总碳贮量, 从高海拔到低海拔不同森林类型碳贮量分别为: 15494, 21006, 19819, 14233 和 7344 g·m⁻², 这个结果与本文表 1 中的结果非常相似.

受长期资料缺乏的限制, 自然状态下森林生态系统地下部分碳积累速率的报道不多. 同时, 土地覆盖类型和气候区域的差异对地下部分碳累积速率影响很大, 不同结果之间可比性较差. Chen 等^[8]研究了澳大利亚北部(12°14'~12°42'S, 131°0'~131°10'E)4 个桉树干草原系统地下部分碳的年累积速率分别为 170~190 g·m⁻², 这个结果虽然与本文相似, 但由于植被类型和气候环境相差很大, 仅能作为参考.

5 结论

本文通过长期的定位研究, 系统地探讨了南亚热带季风常绿阔叶林及其恢复系列-针阔叶混交林和马尾松林地下部分碳库大小及其动态特征, 得到如下结果:

(1) 季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林 2002 年地下部分碳库分别为 23191 ± 2538, 16889 ± 1936 和 12680 ± 1854 g·m⁻², 其中, 土壤有机质含碳密度分别占总碳密度的 70.8%, 65.9% 和 83.0%.

(2) 2002 年季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林生态系统地下部分碳的净增量分别为 145 ± 289, 338 ± 308 和 155 ± 223 g·m⁻²·a⁻¹, 3 个森林类型的地下部分在全年碳平衡上都为汇.

(3) 从 1978 年到 2002 年的 24 年间, 季风常绿阔

叶林、针阔叶混交林和马尾松林生态系统地下部分碳的年平均增长速度分别为 383 ± 97 , 193 ± 85 和 $213 \pm 86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

(4) 本文涉及的 3 种植被类型地下部分碳库的月动态有一致性, 表现为在每年的 4~6 月份是较强的碳源, 7~9 月份是较弱的碳源, 10~11 月份是较强的碳汇, 12~3 月份是较弱的碳汇.

参 考 文 献

- 1 IPCC. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 1~51
- 2 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学, D 辑, 2003, 33(1): 72~80
- 3 周国逸, 罗 艳, 欧阳学军, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林某些沉积元素转移过程中的浓度分析. 生态学报, 2003, 23(7): 1408~1414
- 4 彭少麟, 张祝平. 鼎湖山地带性植被生物量、生产力和光能利用效率. 中国科学, B 辑, 1994, 24(5): 497~502
- 5 彭少麟, 张祝平. 鼎湖山针阔叶混交林的第一性生产力研究. 生态学报, 1994, 14(3): 300~305
- 6 唐旭利, 周国逸, 周 霞, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林粗死木质残体的研究. 植物生态学报, 2003, 27(4): 484~489
- 7 Johnson F L, Risser P G. Biomass, annual net primary production, and dynamics of six mineral elements in a post oak-blackjack oak forest. Ecology, 1974, 55: 1246~1258
- 8 Chen X Y, Hutley L B, Eamus D. Carbon balance of a tropical savanna of northern Australia. Oecologia, 2003, 137: 405~416
- 9 温达志, 魏 平, 孔国辉, 等. 鼎湖山亚热带森林细根生产力与周转. 植物生态学报, 1999, 23(4): 361~369
- 10 McClaugherty C A, Aber J D. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. Ecology, 1982, 63(5): 1481~1490
- 11 廖崇惠, 林少明, 李耀泉, 等. 森林凋落物分解研究. 热带亚热带森林生态系统研究. 北京: 气象出版社, 1998, (8): 180~185
- 12 周国逸. 生态系统水热原理及其应用. 北京: 气象出版社, 1997
- 13 屠梦照, 姚文华, 翁 轰, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物的特征. 土壤学报, 1993, 30(1): 34~42
- 14 Giardina C P, Ryan M G. Total belowground carbon allocation in a fast-growing *Eucalyptus* plantation estimated using a carbon balance approach. Ecosystems, 2002, 5: 487~499
- 15 Misra R K, Turnbull C R A, Cromer R N, et al. Below-and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation I. Biomass. Forest Ecology and Management, 1998, 106: 283~293
- 16 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. 生态学报, 1998, 18(4): 371~378
- 17 张庆费, 徐绒娣. 浙江天童常绿阔叶林演替过程的凋落物现存量. 生态学杂志, 1999, 18(2): 17~21
- 18 李凌浩, 邢雪荣, 黄大明, 等. 武夷山甜槠林粗死木质残体的贮量、动态及其功能评述. 植物生态学报, 1996, 20(2): 132~143
- 19 刘文耀, 谢寿昌, 谢克金, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物和粗死木质物的初步研究. 植物学报, 1995, 37(10): 807~814
- 20 杨丽韞, 李文华. 长白山不同生态系统地下部分生物量及地下 C 贮量的调查. 自然资源学报, 2003, 18(2): 204~209
- 21 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109~128
- 22 Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li Kerang, et al. Study on spatial distribution character analysis of the soil organic carbon reservoir in China. Journal of Geographical Sciences, 2001, 11(1): 3~13