

鼎湖山三种主要林型水文学过程中总有机碳浓度对比

罗 艳, 周国逸*, 张德强, 官丽莉, 欧阳学军, 褚国伟

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要:为了解碳在森林内部以及群落演替过程中的转运动态,对鼎湖山 3 种主要林型(马尾松林,马尾松针阔混交林和季风常绿阔叶林)森林水文学过程中总有机碳(total organic carbon, TOC)浓度进行了一个雨季的观测,结果发现:(1)穿透水中 TOC 浓度相对大气降水中 TOC 浓度的增量为:季风常绿阔叶林>马尾松针阔混交林 1>马尾松针阔混交林 2>马尾松林;(2)树干茎流平均 TOC 浓度为:马尾松林>马尾松针阔混交林 2>马尾松针阔混交林 1>季风常绿阔叶林;(3)各林内土壤水 TOC 浓度差异不明显,但根系层(25~30cm)土壤水 TOC 浓度均大于母质层(50~80cm)TOC 浓度;(4)马尾松林的溪水具有较高的 TOC 浓度和较大的月际波动;(5)总体上,整个森林水文学过程中,3 种林型 TOC 浓度变化趋势相似,均为:树干茎流>穿透水>根系层土壤水>母质层土壤水>溪水,但变化幅度不同:马尾松林的变化幅度最大,季风林的最小,而两个混交林居中。这表明,(1)森林演替过程中,林冠层结构、树种构成等的改变可能引起森林水文学过程中 TOC 浓度的变化;(2)森林水文学过程转运的碳主要储存在森林内部;(3)成熟森林的抗干扰能力高于先锋群落。

关键词:总有机碳;浓度;鼎湖山;演替;森林水文学过程

Study on the concentration of total organic carbon in the forest hydrological processes of three main forest types in Dinghushan during a rain season

LUO Yan, ZHOU Guo-Yi, ZHANG De-Qiang, GUAN Li-Li, OUYANG Xue-Jun, CHU Guo-Wei (South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2973~2978.

Abstract: There is significant importance of total organic carbon (TOC) transport during the hydrological processes in forest ecosystem, for which plays an important role at intra-ecosystem carbon dynamics and carbon dynamics during successions. It is probably helpful in finding "missing carbon sink", too. This research was conducted in Dinghushan Biosphere Reserve (DHSBR), which is located in lower subtropical China. There are three main forest types including *Pinus massoniana* forest (PMF), pine and broadleaf mixed forest (PBMF), monsoon evergreen broadleaf forest (MEBF) in Dinghushan, which represent three stages of a series of forest succession. Water samples from 6 hydrological processes, *ie*, precipitation, throughfall, stemflow, soil water of As-horizon (25~30cm in depth, SW1), soil water of C-horizon (50~80cm in depth, SW2) and stream flow of PMF, PBMF1, PBMF2 and MEBF were collected on a rain event bases from May 2003 to September 2003. TOC concentrations were determined by TOC analyzer (TOC-V, Shimadzu, Japan) in order to reveal the changes of TOC concentration in a single forest and during successions. The results showed (1) the relative increment of TOC concentration in throughfall versus that in precipitation happened in the three main forest types was expressed as MEBF > PBMF 1 > PBMF 2 > PMF; (2) TOC concentration of stemflow was expressed as PMF > PBMF 2 > PBMF 1 > MEBF; (3) TOC concentration of SW1 is much higher than that of SW2; (4) the stream water in the *Pinus massoniana* forest has the

基金项目:中国科学院创新重要方向性资助项目(KSCX2-SW-120);国家科技部 973 前期资助项目(2001CCB00600);中国科学院海外杰出青年学者基金资助项目;广东省自然科学基金重点资助项目(010567)

收稿日期:2003-10-29;**修订日期:**2004-08-20

作者简介:罗艳(1979~),女,湖南黔阳人,硕士生,主要从事森林生态系统研究。E-mail: yluo@scib.ac.cn

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

Foundation item: the Innovation Fund from Chinese Academy of Sciences (No. KSCX2-SW-120), the "973" Priority Fund under the auspices of the National Science and Technology Department (No. 2001CCB00600), Outstanding Chinese Youth Scholar Fund from Chinese Academy of Sciences and the Key Project of Guangdong Natural Science Foundation (No. 010567)

Received date: 2003-10-29; **Accepted date:** 2004-08-20

Biography: LUO Yan, Master, mainly engaged in forest ecosystem ecology.

highest TOC concentration; (5) There were similar tendency of TOC concentrations during the hydrological processes in three main forest types, which were stemflow > throughfall > SW1 > SW2 > stream water. But variation of TOC concentrations during the hydrological processes in MEBF was the lowest in the three forest types while that in PMF was the highest. All of the results indicated that (1) changes of canopy structure and tree species during successions can affect the concentration of TOC during the hydrological processes; (2) TOC transported during hydrological processes was mostly stored in the forest ecosystem; (3) the resistance of mature forest was higher than that of pioneer community.

Key words: TOC; concentration; Dinghushan; succession; forest hydrological processes

文章编号:1000-0933(2004)12-2973-06 中图分类号:Q948 文献标识码:A

森林水文学过程是指在森林生态系统中,水分受森林的影响而表现出来的水分分配和运动过程^[1],包括大气降水、林冠截留、穿透水、树干茎流、地表径流等。

总有机碳(total organic carbon, TOC)指的是水中溶解性和悬浮性有机物中存在的全部碳。在森林水文学过程中,它主要来源于以下 3 个方面:(1)气态和颗粒态的干沉降^[2];(2)植被,包括凋落物直接输入以及活植物体和凋落物的淋溶输入;(3)土壤,主要来自微生物代谢、根分泌物以及土壤有机物的淋溶和侵蚀^[3]。

目前有关森林在全球碳平衡的贡献看法各异。有研究表明,陆地植被生态系统越成熟,群落的净生产力越小^[4~6]。这可能是由于人们对碳被植物吸收到最后贮存于大气、海洋、土壤和沉积物中这一过程的具体变化缺乏了解所致。以往的研究只注重了单个系统内植被、土壤与大气界面上的碳交换,对于非气态碳的搬运、沉淀和沉积过程的研究甚少,这部分碳到底占该系统净同化碳量的多大比例,这个比例是如何随陆地植被生态系统的成熟度的变化而变化等重要科学问题均未受到关注,而这可能是解决成熟森林 CO₂ 吸收能力“越来越低”的关键,这也可能是弄清全球碳失汇问题的一个重要突破口。

鼎湖山 3 种主要林型包括马尾松林、马尾松针阔叶混交林和季风常绿阔叶林,它们构成了植被演替系列:早期阶段为马尾松林,中期发展为马尾松针阔叶混交林,顶极群落为季风常绿阔叶林。本文通过分析鼎湖山森林生态系统 3 种主要林型水文学过程中 TOC 浓度的变化情况,初步探讨森林生态系统内非气态碳的搬运情况以及不同成熟度森林非气态碳搬运过程的差异。

1 研究地概况

鼎湖山自然保护区位于珠江三角洲西南(112°30'39"~112°33'41"E, 23°09'21"~23°11'30"N),离广州 86km。本区属南亚热带季风湿润型气候,年平均气温 21.0℃,年平均相对湿度为 80%,年平均降雨量为 1927.3mm,4~9 月份为雨季,10 月至次年 3 月为旱季^[7]。全区森林覆盖率达 85%以上^[8],3 种主要森林类型(马尾松林、马尾松针阔混交林和季风常绿阔叶林)的年平均径流系数为 0.455~0.492 之间^[9]。鼎湖山大气降水 pH 值很低,变动范围为 4.35~5.65,平均值 4.90,酸雨频率在 62.7%以上^[10]。全区由东、西两条羽毛状水系组成,皆自西北流向东南,在保护区入口汇合流入西江。

马尾松林(*Pinus massoniana* forest, PMF)位于保护区东南角过渡区,1990 年建立试验样地。母岩为砂页岩,土壤为赤红壤,土层深度一般较浅^[11],表土层有机质含量 1.33%~2.97%。坡度为 25~30°,坡向南 10°西,海拔 250~300m。马尾松林为半自然林型,林龄约 66a。群落分乔、灌、草 3 层,乔木为马尾松,郁闭度为 0.7 左右;灌层为阳生性种类,主要有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)、三叉苦(*Evodia lepta*)等,盖度 40%;草本层以芒萁(*Dicranopteris lineais* var. *dichotoma*)为主,盖度达 60%以上。藤本植物及附生植物极少^[12]。

马尾松针阔叶混交林(Pine and broadleaf mixed forest, PBMF)有两个永久样地。

(1)针阔叶混交林 I 号永久样地(以下简称混交林 1, PBMF1)位于保护区缓冲区内的旱坑,1980 年建立永久样地。海拔 200~300m,母岩为砂页岩,土壤为赤红壤,土层较薄,且多含碎石块,一般厚度为 30cm^[13],表土层有机质含量 1.90%~3.51%。坡度 30°,坡向为南 10°西。森林起源于 20 世纪 30 年代营造的马尾松林,因阔叶树种入侵而自然形成。样地距居民区远,人为干扰轻。

(2)针阔叶混交林 II 号永久样地(以下简称混交林 2, PBMF2)位于保护区缓冲区内的飞天燕,1999 年设立样地。为人工种植的马尾松林因阔叶树种入侵而自然形成的针阔叶混交林。坡向南,海拔约 250m,坡度 30°,土壤为发育在砂页岩母质的赤红壤,土层厚薄不均,表土有机质含量 2.00%~5.20%,有近 70~80a 的历史。此样地为马尾松+锥栗(*Castanopsis chinensis*) + 荷木(*Schima superba*)群落。该样地位于路边,受人为干扰较多。

季风常绿阔叶林(Monsoon evergreen broadleaf forest, MEBF, 以下简称季风林),位于保护区的核心区内,年龄约 400a,坡度 30°,坡向为北 34°东,海拔 270~300 m,土壤为发育在砂页岩母质的赤红壤,土层厚度达 60~90cm,表土有机质含量 2.73%~5.95%。此样地属南亚热带阔叶林的锥栗+黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*) + 荷木+肖蒲桃(*Acmena acuminatissima*)群落^[14]。

2 研究方法

2.1 水样采集

本研究以中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究站长期监测资料为基础,于 2003 年 5 月至 2003 年 9 月在 4 个永久样地(季风林、混交林 1、混交林 2 和马尾松林)内收集穿透水、树干茎流、根系层土壤水(约 25~30cm,以下简称土壤水 1;soil water 1,SW1)和母质层土壤水(约 50~80cm,以下简称土壤水 2;soil water 2,SW2)和溪水,同时在气象观测站同步收集每场降水。大气降水使用 APS-2B 型降水降尘自动采样器收集。穿透水、树干茎流采用定位站已安装的收集装置进行收集。穿透水:马尾松林、混交林 1 和季风林利用自制大型穿透水承接盆收集,每林 2 个(面积分别为 0.75 m² 和 1.25m²),再通过聚乙烯管导入密封容器中。混交林 2 有所不同,穿透水采用在标地内放置四根条状承雨槽收集,承雨槽用两根 4m 长、内径 200mm 的 PVC 排水管剖开做成,槽口平面距地面约 80cm,将收集的水用一根导水管导入承水装置中,用孔径 3mm 的塑料筛网盖住承雨槽和导水管的接口,以防止树叶、小树枝和虫子进入。树干茎流采集器由内径 4cm 长约 100cm 的聚乙烯管以及盛水容器组成,在树干约 1.3m 处用聚氯乙烯胶管蛇形环绕树干,蛇形管末端接密封口的容器。马尾松林、混交林 1 和季风林选标准木为每林 6 棵,混交林 2 选择标准树 5 株,均为林内优势树种。直接在集水区采集溪水样。利用自制土壤水取样器收集重力水,它由一个承接器(25×30cm²)、一根塑料管和一个聚乙烯塑料桶组成。每个样地埋 3 个样点,每个样点埋 2 层:根系层和土壤母质层,收集的水样由塑料管导入外接的聚乙烯塑料桶中。

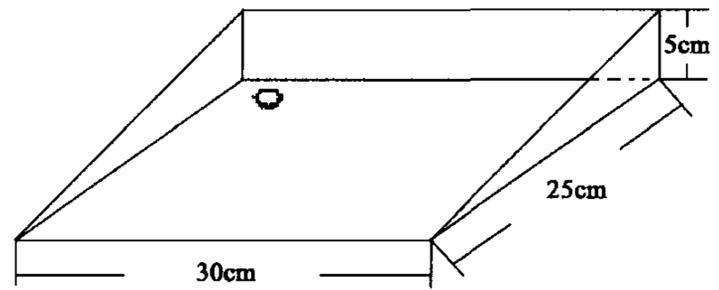


图 1 自制土壤水承接器

Fig. 1 A sketch of soil water collector

2.2 采样及运输

使用 125ml 棕色玻璃瓶盛装水样。在第一次使用前,用 10%(V/V)盐酸(或硝酸)浸泡约 24h,然后用自来水冲洗干净,再用去离子水冲洗 3~5 次,晾干备用。直接从承接器中取样,装入棕色玻璃瓶中,加硫酸至 pH 值小于 2,用专用箱放置样品(箱内放冰块以制冷),运回实验室放冰箱冷藏待测(样品最长放置时间不超过 7d)。

2.3 TOC 浓度分析

采用日本岛津公司生产的 TOC-V 分析仪进行测定。

3 结果与分析

雨季大气降水 TOC 平均浓度为 2.4±1.2mg/L,进入马尾松林、混交林 2、混交林 1 和季风林后,其平均浓度分别为:12.9±7.9 mg/L,13.2±13.1 mg/L,14.2±13.6 mg/L,14.6±12.2 mg/L。3 种林型水文学过程中 TOC 平均浓度如表 1 所示。

3.1 各林内穿透水与大气降水 TOC 浓度对比研究

大气降水进入森林后,其 TOC 浓度显著增高,但不同的森林类型增加程度不同。表 2 列出了历次降水过程中 4 个样地穿透水 TOC 浓度相对大气降水浓度的平均增量、最大增量、最小增量以及变化幅度。

由表 2 可以看出,随着森林类型向顶级群落演替,其穿透水 TOC 浓度相对大气降水而言,增加量也越来越大。大气降水进入森林后,碳浓度的增加是由于降水对叶面的淋洗^[15]和淋溶^[16],因而林冠层结构和组成是影响穿透水 TOC 浓度的主要因素。马尾松林作为群落演替的先锋林,其林冠结构单一,其分泌物的种类和组成相对比较简单,郁闭度也比较低;随着演替的顺行进行,林冠层结构越来越复杂,其分泌物种类和成分更加多样化,郁闭度也有所提高,这就使得穿透水 TOC 浓度越来越高。雨水对针叶和的淋洗和淋溶能力较阔叶小,这也是造成马尾松林穿透水 TOC 浓度较低的原因之一。此外,有迹象表明,土壤肥力也会影响穿透水的化学性质^[17]。季风林土

表 1 雨季 3 种林型水文学过程中 TOC 平均浓度(mg/L)

Table 1 Mean concentrations of TOC in the hydrological processes of the three main forest types during a rain season

水样类型 Water types	马尾松林 PMF	混交林 2 PBMF2	混交林 1 PBMF1	季风林 MEBF
大气降水 Precipitation	2.4±1.2	2.4±1.2	2.4±1.2	2.4±1.2
穿透水 Throughfall	12.9±7.9	13.2±13.1	14.2±13.6	14.6±12.2
树干茎流 Stemflow	52.1±25.6	23.9±11.8	21.5±10.7	18.6±9.7
土壤水 1 SW 1	12.8±4.4	11.9±5.3	13.6±4.3	10.8±8.3
土壤水 2 SW 2	12.1±6.8	6.4±2.9	10.2±5.7	5.5±1.5
溪水 Stream water	5.1±5.3	—	1.8±0.7	2.0±0.5

表 2 雨季历次降水过程各林型穿透水 TOC 浓度相对增量对比研究(%)

Table 2 Contrasting study on TOC concentration of throughfall in the three main forest types during a rain season

项目 Item	马尾松林 PMF	混交林 2 PBMF2	混交林 1 PBMF1	季风林 MEBF
平均增量 Average	442.9	456.0	501.7	516.1
最大增量 Maximum	1282.0	1965.6	1306.6	1131.8
最小增量 Minimum	195.9	37.2	73.2	58.1
变化幅度 Variation	1086.2	1928.4	1233.4	1073.7

* 相对增量=(穿透水浓度-大气降水浓度)/大气降水浓度×100%
Relative increment=(TOC concentration of throughfall - TOC concentration of precipitation)/TOC concentration of precipitation×100%

壤有机质含量高于其他 3 个样地,这可能也是其具有最高的相对增量的原因之一。

在不同的大气降水过程中,TOC 浓度的增加也存在着很大不同,这与雨强、降雨持续时间都有关系,但不同演替阶段林冠层结构的差异也可能影响到这种变异性。整个雨季中,混交林中的 TOC 浓度变化幅度较大,而且尤以混交林 2 的 TOC 浓度变化幅度最大。而马尾松林和季风林中的则相对较小,这可能是由于混交林具有更大的林冠异质性,而混交林 2 处于更大的人为干扰中所致。

3.2 各林内树干茎流 TOC 浓度的对比研究

由于林分结构不同,各林内树干茎流 TOC 浓度存在很大差异(图 2)。

由图 2 可以看出,总体上,随着森林由先锋群落向顶级群落发展,其树干茎流 TOC 浓度呈逐步下降的趋势。由于树干茎流的碳浓度受大气降水在树皮中的保持时间控制,这表明树皮形态是影响树干茎流碳浓度的主要因素^[18,19]。马尾松的树皮粗糙,并且具有复层结构,故相对其它树种而言,可以更长时间将雨水保存其中,导致其具有较高的 TOC 浓度;而其它树种的这种保存能力则相对较差,故它们树干茎流 TOC 浓度也相对较低。上升到群落水平则表现为:季风林(无马尾松)树干茎流 TOC 浓度最低,2 个混交林(有马尾松)的树干茎流 TOC 浓度居中,而马尾松纯林则具有最高的树干茎流 TOC 浓度。此外,马尾松林位于保护区外围,其干沉降量高于位于缓冲区的混交林 1 和 2 以及核心区的季风林,这可能也是马尾松林树干茎流浓度较高的原因之一。

月变化方面,随着时间的推移,3 种林型树干茎流 TOC 均表现出下降趋势,这可能是由于雨季期间,降雨频率高,降雨量大,雨水长期持续的冲刷,导致积聚在树皮的有机物越来越少的结果。

3.3 各林内土壤水 TOC 浓度的对比研究

对历次降水过程中的土壤水平均浓度进行比较,得到图 3。

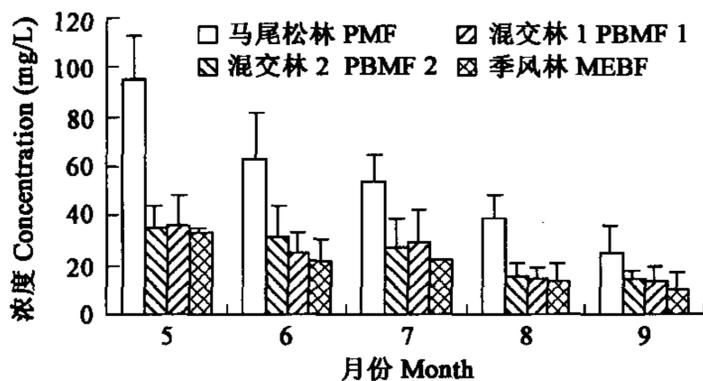


图 2 雨季中各林内树干茎流 TOC 浓度月变化

Fig. 2 Monthly concentration of TOC in the stemflow of the three main forest types during a rain season

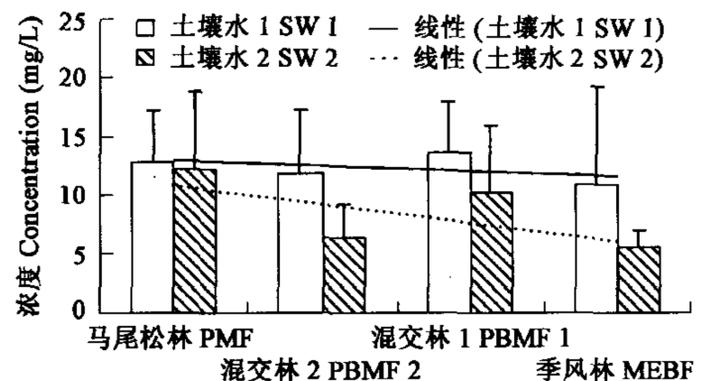


图 3 雨季历次降水各林内土壤水平均 TOC 浓度

Fig. 3 Mean concentration of TOC in the soil water of the three main forest types during a rain season

从图 3 得知,在马尾松林、混交林 2、混交林 1 和季风林中,从平均水平来看,均为土壤水 1 的 TOC 浓度高于土壤水 2,在 Denaix^[20]等的研究中也发现,随着土层深度的增加,其 TOC 浓度呈下降趋势。这可能是因为,根系层土壤有机质含量较母质层丰富,此外土壤颗粒对 TOC 的吸附作用也是造成 1 土壤水 1 的 TOC 浓度高于土壤水 2 的因素之一。从演替过程来看,随着演替的顺行进行,土壤水 1 和土壤水 2 的 TOC 平均浓度均呈现下降趋势,但这种下降的趋势不明显,这可能与样地坡度以及土壤质地差异有关。4 个样地的坡度(30°左右)、土壤类型(赤红壤)和母质(砂页岩)相同或相近,赤红壤具有渗透性能良好,保水保肥性能差的特点^[21],导致 4 个样地土壤水平均浓度差异不大。此外,土壤有机质含量方面表现为:季风林>混交林 2>混交林 1>马尾松林,季风林的土壤水 1 与 2 的 TOC 浓度却都是最低的。根据同期进行的土壤呼吸实验发现,CO₂ 排放量为季风林>混交林>马尾松林,可能正是由于这种差异,使得季风林的土壤水 1 与 2 的 TOC 浓度最低。

月变化方面,3 种林型存在一定差异(图 4),这可能与林分组成、凋落物质量、土壤蓄水能力等方面的差异有关。

3.4 各林内溪水中 TOC 浓度的对比研究

马尾松林、混交林 1 和季风林内的溪水浓度(混交林 2 中无溪流)分别为:5.1±5.3,1.8±0.7,2.0±0.5 mg/L,其中以马尾松林中的溪水浓度为最高,而混交林 1 和季风林中的差别不大。月变化方面,马尾松林溪水 TOC 浓度的月际波动也高于混交林 1 和季风林(图 5),这主要与 3 个集水区的特性有关。马尾松林溪水很大程度上受大气降水影响,在长期无降雨时甚至出现断流现象;而混交林 1 和季风林的溪水四季常流不断,水质也相当稳定。

3.5 各林内主要水文学过程中雨季平均 TOC 浓度的对比

雨季森林水文学过程中平均 TOC 浓度存在很大的变异性(图 6)。

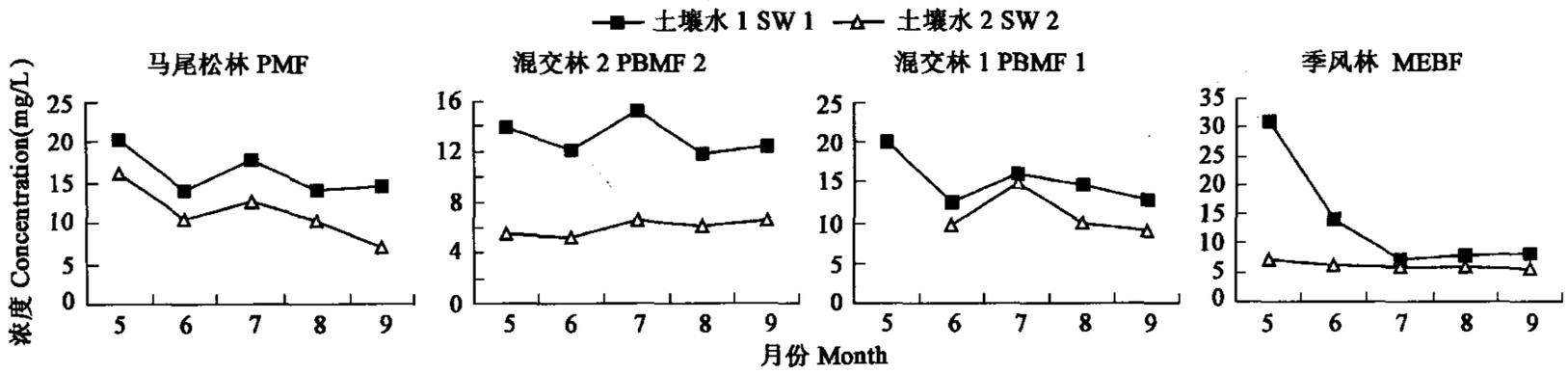


图 4 雨季各林土壤水 TOC 浓度月变化

Fig. 4 Monthly concentration of TOC in the soil water of the three main forest types during a rain season

总体上,整个森林水文学过程中,3 种林型 TOC 浓度的变化趋势相似,即:大气降水进入森林后,TOC 浓度显著升高,流过树干后进一步升高,进入土壤后有所下降,在溪水中最低。但是不同的林型,变化幅度有所不同,以马尾松林的变化幅度最大,其次是混交林 2,再次混交林 1,变化幅度最小的是季风林。这可能是由于马尾松林作为演替的初级阶段,其物种丰富度、郁闭度都与顶级群落以及中间群落有很大差别,而这种差异导致了 TOC 浓度在进入森林后发生不同程度的变化。而混交林 2 由于受到人为扰动比较大,故表现出的变化程度较混交林 1 高。而季风林由于处于群落演替的顶级阶段,结构和功能都处于比较稳定的阶段,表现在水文学过程中的 TOC 浓度上,也是变化幅度比较小。

4 小结

通过对鼎湖山 3 种主要林型水文学过程中 TOC 浓度一个雨季的监测,利用空间代替时间的方法,可以得出以下几个初步的结论:

(1)整个森林水文学过程中,TOC 浓度的变化趋势相似,均为:树干茎流>穿透水>根系层土壤水>母质层土壤水>溪水,反映出碳主要还是储存于森林内部。

(2)季风林由于林冠结构比较复杂,郁闭度高,因而其穿透水的 TOC 浓度相对大气降水而言,增加程度最高;而马尾松林处于演替的初级阶段,其林冠结构单一,郁闭度相对也较低,故其穿透水的 TOC 浓度的增量最小;混交林则居于二者之间。此外林冠结构的异质性和人为干扰会对这一增量的变化范围产生影响。

(3)随着森林由先锋群落向顶级群落发展,其树干茎流 TOC 浓度表现出逐步下降的趋势,这主要与树木本身特性、林分组成、林地位置等因素有关;

(4)由于土壤有机质含量的差异以及土壤颗粒的吸附作用,导致根系层土壤的 TOC 浓度高于母质层土壤,这也反映出群落中有很大一部分碳是储存在土壤中的。

总体来说,在群落的演替过程中,森林水文学过程中的 TOC 浓度变化幅度可能越来越小,反映出群落抵抗外界干扰的能力是逐渐增大的。即森林水文学过程中的 TOC 浓度和森林群落的演替过程之间是存在着一定的相关性,它可能在一定程度上反映群落的稳定性。

此外,不同林内水文学过程中 TOC 浓度的变化可以从一个侧面反映森林内部以及森林群落演替过程中碳的转运动态,但是碳在森林内具体的转运情况还需对参与森林水文学过程的碳进行定量化研究。

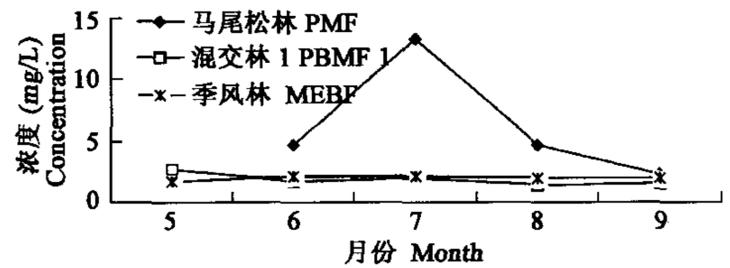


图 5 雨季各林溪水 TOC 浓度月变化

Fig. 5 Monthly concentration of TOC in the stream water of the three main forest types during a rain season

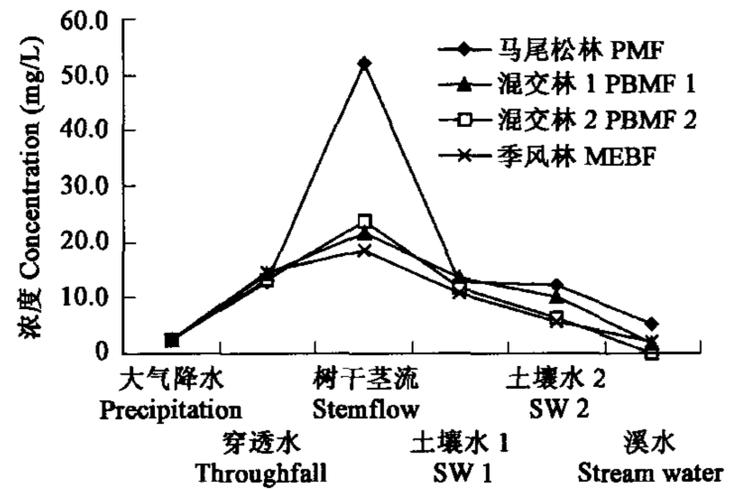


图 6 各林内主要森林水文学过程中雨季平均 TOC 浓度

Fig. 6 Mean concentration of TOC in the hydrological process of the three main forest types during a rain season

References:

[1] Gao J R, Xiao B, Zhang D S, et al. Review on Forest Hydrology Study in World. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15

- (5): 61~64, 75.
- [2] Wilcke W, Yasin S, Valarezo C, *et al.* Change in water quality during the passage through a tropical montane rain forest in Ecuador. *Biogeochemistry*, 2001, **55**: 45~72.
- [3] Hope D, Billett M F, Cresser M S. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environmental Pollution*, 1994, **84**: 301~324.
- [4] Schimel D S, Ciais P, Peylin P, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, **414**: 169~172.
- [5] Hurtt G C, Pacala S W, Moorcroft P R, *et al.* Projecting the future of the U. S. carbon sink. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2002, **99**: 1389~1394.
- [6] Song C H, Woodcock C E. A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and landuse history. *Ecological Modelling*, 2003, **164**(1): 33~47.
- [7] Huang Z F, Fan Z G. The climate of Dinghushan. *Tropical and subtropical forest ecosystem*, 1982, **1**: 11~16.
- [8] Wang ZH, He DQ, Song SD *et al.* The vegetation of Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and subtropical forest ecosystem*, 1982, **1**: 77~141.
- [9] Zhou G Y, Yan J H. The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21** (12): 2002~2012.
- [10] Liu J X, Zhang D Q, Zhou G Y, *et al.* Preliminary study on the chemical properties of bulk precipitation, throughfall, stemflow and surface water in major forest types at Dinghushan under acid deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(8):1223~1228.
- [11] He C H, Chen S Q, Liang Y E. The soils of Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and subtropical forest ecosystem*, 1982, **1**: 25~37.
- [12] Cao H L, Huang Z L, Zhang L Y, *et al.* Vegetation map of Dinghu Mountain Nature Reserve. *Tropical and subtropical forest ecosystem*, 2002, **9**: 1~9.
- [13] Peng S L, Zhang Z P. Studies on the biomass, primary productivity and energy use efficiency of the mixed forest community in Mt. Dinghushan, Guangdong. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, **14**(3): 300~305.
- [14] Tang X L, Zhou G Y, Wen D Z, *et al.* Distribution of carbon storage in a lower subtropical monsoon ever-green broad-leaved forest in Dinghushan Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(1): 90~97.
- [15] McDowell W H and Likens G E. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley. *Ecological Monographs*, 1988, **58**: 77~195.
- [16] Turkey H B. The leaching of substances from plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 1970, **21**: 305~324.
- [17] Parker G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv. Ecol. Res.*, 1983, **13**:57~133.
- [18] Inagaki M, Sakai M, Ohnuki Y. The effects of organic carbon on acid rain in a temperate forest in Japan. *Water, Air & Soil Pollution*, 1995, **85**:2345~2350.
- [19] Liu C P, Sheu B H. Dissolved organic carbon in precipitation, throughfall, stemflow, soil solution, and streamwater at the Guandaushi subtropical forest in Taiwan. *Forest Ecology and Management*, 2003, **172**: 315~325.
- [20] Denaix L, Semlali R M, Douay F. Dissolved and colloidal transport of Cd, Pb, and Zn in a silt loam soil affected by atmospheric industrial deposition. *Environmental Pollution*, 2001, **113**: 29~38.
- [21] Office of general survey on soil. *China Soil*. Beijing: Agriculture Press, 1998.

参考文献:

- [1] 高甲荣, 肖斌, 张东升, 等. 国外森林水文研究进展评述. *水土保持学报*, 2001, **15**(5): 61~64, 75.
- [7] 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**: 11~16.
- [8] 王铸豪, 何道泉, 等. 鼎湖山自然保护区的植被. *热带亚热带森林生态系统研究*, 1982, **1**: 77~141.
- [9] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2002~2012.
- [10] 刘菊秀, 张德强, 周国逸, 等. 鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究. *应用生态学报*, 2003, **14**(8):1223~1228.
- [11] 何金海, 陈兆其, 梁永炅. 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**: 25~137.
- [12] 曹洪麟, 黄忠良, 张林艳, 等. 鼎湖山自然保护区植被类型. *热带亚热带森林生态系统研究*, 2002, **9**: 1~9.
- [13] 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.
- [14] 唐旭利, 周国逸, 温达志, 等. 鼎湖山南亚热带季风常绿阔叶林 C 贮量分布. *生态学报*, 2003, **23**(1): 90~97.
- [21] 全国土壤普查办公室. *中国土壤*. 北京: 中国农业出版社, 1998.