

鼎湖山针阔叶混交林水文学过程中总有机碳动态^{*}

尹光彩^{1,2} 周国逸² 张德强² 王 旭^{2**} 褚国伟² 刘 艳²

(¹ 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510090; ² 中国科学院华南植物园, 广州 510650)

【摘要】 2002年7月~2003年7月对鼎湖山针阔叶混交林生态系统水文学过程中总有机碳(TOC)总量和浓度进行了初步研究. 结果表明, 观测期间, 林外大气降水输入的 TOC 总量为 $41.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 地表径流和地下水(50 cm 土壤渗透水)输出分别为 17.54 和 $1.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 输入输出之差为 $22.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 系统 TOC 为正平衡. 各类型水中 TOC 总量月动态基本上与大气降水月动态变化趋势一致. 大气降水的 TOC 平均浓度为 $3.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 经过森林林冠淋洗和树干淋溶后, 穿透雨和树干流中 TOC 的平均浓度分别比大气降水中 TOC 浓度增加了 6.10 倍和 7.39 倍. 地表径流、25 cm 和 50 cm 土壤渗透水中 TOC 平均浓度分别为 12.72 、 7.905 和 $3.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 穿透雨和树干流中 TOC 浓度的月变化相似, 生长季初(3月), TOC 浓度开始增加, 9月后逐渐下降, 12月又有所回升. 降水量较大的月份地表径流中 TOC 浓度较高. 25 cm 和 50 cm 土壤渗透水中 TOC 浓度无明显的月变化规律. 不同树种树干流中 TOC 浓度差异很大. 大气降水、穿透雨、25 cm 和 50 cm 土壤中 TOC 浓度随降水量的增加而规律性递减, 树干流和地表径流中 TOC 浓度与大气降水量之间无明显相关关系; 除树干流和土壤水外, 水文过程各分量水中 TOC 浓度随着大气降水强度的变化呈现规律性波动.

关键词 针阔叶混交林 水文学 总有机碳(TOC)

文章编号 1001-9332(2005)09-1655-06 **中图分类号** Q148;S715 **文献标识码** A

Dynamics of total organic carbon (TOC) in hydrological processes in coniferous and broadleaved mixed forest of Dinghushan. YIN Guangcai^{1,2}, ZHOU Guoyi², ZHANG Deqiang², Wang Xu², CHU Guowei², LIU Yan² (¹ College of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China; ² South China Botanic Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(9): 1655 ~ 1660.

The total flux and concentration of total organic carbon (TOC) in hydrological processes in coniferous and broadleaved mixed forest of Dinghushan were measured from July 2002 to July 2003. The results showed that the TOC input by precipitation was $41.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, while its output by surface runoff and groundwater (soil solution at 50 cm depth) was 17.54 and $1.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, respectively. The difference between input and output was $22.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, indicating that the ecosystem TOC was in positive balance. The monthly variation of TOC flux in hydrological processes was very similar to that in precipitation. The mean TOC concentration in precipitation was $3.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, while that in throughfall and stemflow increased 6.10 and 7.39 times after rain passed through the tree canopies and barks. The mean TOC concentration in surface runoff and in soil solution at 25 and 50 cm depths was 12.72 , 7.905 and $3.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The monthly TOC concentration in throughfall and stemflow had a similar changing tendency, showing an increase at the beginning of growth season (March), a decrease after September, and a little increase in December. The TOC concentration in runoff was much higher during high precipitation months. No obvious monthly variation was observed in soil solution TOC concentration (25 and 50 cm below the surface). Stemflow TOC concentration differed greatly between different tree species. The TOC concentration in precipitation, throughfall, and soil solution (25 and 50 cm depths) decreased with increasing precipitation, and no significant relationship existed between the TOC concentrations in stemflow, surface runoff and precipitation. The TOC concentrations in the hydrological processes fluctuated with precipitation intensity, except for that in stemflow and soil solutions.

Key words Coniferous and broad-leaved mixed forest, Hydrology, Total organic carbon (TOC).

1 引言

森林生态系统水文过程中的碳循环是森林生态系统结构和功能研究的重要内容之一. 研究系统碳的输入输出, 是对森林生态系统健康稳定发展做出准确的评价和预测的基础. 全球变化中的碳源碳汇问题是当今气候学、环境学、生态学及生物地球化学

循环等领域的研究热点, 已引起世界各国政府的高度重视. 陆地生态系统在整个碳循环中的作用问题

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB1115)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-120)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-01A3)、广东省重点学科基金项目(SZ2003005)和广东工业大学博士基金资助项目(043027).

^{**} 通讯联系人. E-mail: wxdick@scbg.ac.cn
2005-04-08 收稿, 2005-05-25 接受.

存在很大的不确定性^[28],且大部分工作都集中在系统植被、土壤以及以气体为媒介的碳循环研究方面^[19,22],很少有人涉及系统内部以水为媒介的碳循环研究,而水文学过程又是连接土壤-植被-大气中碳的一个关键环节,是碳由陆地生态系统到河流沉积的主要途径.研究表明,“未知汇”极有可能大部分归诸北半球中高纬度带森林在升高了的大气 CO₂ 浓度强迫下的再生长(regrowth)过程,并最终固定在陆地生态系统及其因流域侵蚀而向河口和近海水域输出的沉积物中^[7].本研究将为进一步了解“未知汇”提供理论依据和数据支撑.

森林生态系统中的总有机碳(TOC)由可溶性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)两部分组成^[8].DOC主要包括一些腐殖质、多糖、多肽和胶体物质等,还有其它一些碳氢化合物、氨基酸和脂类等^[6].最近,不少学者对温带和热带森林生态系统大气降水、穿透雨、树干流、土壤溶液和河流水中的DOC进行过一些报道^[1,10,17],但很少涉及南方亚热带森林生态系统水文学过程中TOC动态^[2].研究表明,TOC对湖泊、河流等淡水水域的食物链贡献较大,且海洋、河流、湖泊等水体中DOC的含量占绝大部分,而POC仅占很小的部分^[12,13].DOC不仅在物质元素循环中起着重要的作用,而且很大一部分DOC是由腐殖酸和棕黄酸等有机酸组成的.而这些有机酸在中和阳离子、重金属离子的分解、矿物的风化以及酸性离子的解吸等方面都具有不可低估的作用^[15].DOC还与一些金属元素(如Al、Hg等)的迁移有关^[4,24].同时,DOC还是控制水颜色的重要因子之一^[20].观测结果表明^[16],鼎湖山针阔叶混交林大气降水中DOC浓度为3.53 mg L⁻¹,约为同期大气降水中TOC浓度的97%,穿透雨、树干流、25 cm和50 cm土壤水中DOC浓度分别占相应TOC浓度的47%、48%、96%和52%.因此,研究森林生态系统水循环过程中的TOC,不仅可以更好地了解碳以及其它物质元素在系统内部以水为介质的迁移规律,还为研究森林对水质的影响提供有力的证据.

本文旨在研究鼎湖山面积最大的植被类型——针阔叶混交林水生态系统内部水文学过程中TOC的浓度变化及其迁移分配规律.

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

研究地点位于广东省肇庆市鼎湖山国家级自然保护区境内(112°34'E,23°10'N).本区气候为亚热带季风型湿润

气候,全年干湿季交替明显,水热条件丰富,年平均气温21.4℃,最热月(7月)25.9℃;最冷月(1月)11.0℃,极端最高气温36.1℃(1979年7月),极端最低气温-0.2℃(1975年12月),年平均降雨量1956 mm,76%的大气降水集中在4~9月,且多台风暴雨;年蒸发量1115 mm,年均相对湿度81%左右^[9,14].试验样地为飞天燕针阔叶混交林II号永久样地,坡向南,海拔约250 m,坡度30°,面积为1 hm²,由20世纪50年代初人工种植的马尾松林(*Pinus massoniana*)在自然保护状态下,因阔叶树种入侵演替而来.该群落可分为乔木层、灌木层和草本层3层.乔木上层主要有马尾松(*Pinus massoniana*)、荷木(*Schima superba*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)等.林下植被种类复杂,主要有荷木(*Schima superba*)、豺皮樟(*Litsea rotundifolia*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、九节(*Psychotria rubra*)、黄牛木(*Cratogeomys cochinchinensis*)和变叶榕(*Ficus variolosa*)等.土壤为砂质壤土,土层厚薄不均,表土有机质含量2.94%~4.27%.

2.2 研究方法

2.2.1 采样方法 1)在混交林样地外开阔地段放置APS-2型降水降尘自动采样器采集大气降水,雨季每周取样一次.2)林内穿透雨采用在标地内放置4根条状承雨槽收集.承雨槽用两根4 m长、内径200 mm的PVC排水管剖开做成,槽口平面距地面约80 cm,取样时间和方法同上.3)树干流采集器由内径4 cm、长约100 cm的聚乙烯管以及盛水容器组成,将聚乙烯管一端剖开,在树干约1.3 m处环绕样树,选择标准树5株(锥栗和荷木各2株、马尾松1株),采样时间和方法同上.3)在样地内选取具有代表性的地段,设置面积为5 m×10 m的3个坡面试验径流测定场(植被未受干扰),径流场四周筑互不透水的隔水墙.在径流场顺坡下方设集流槽和100 cm×100 cm×100 cm的盛水箱.水样采集时间和方法同上.4)采用自制的底面积为25 cm×30 cm的梯形土壤渗透水收集器收集不同深度的土壤渗透水.该取样器材为不锈钢,一端高5 cm,另一端则削成刀刃状,取样器底端钻一直径约2 cm的圆孔,用一根导水管将收集到的土壤渗透水导至于地面的盛水容器中,在样地外围附近不同深度(25 cm和50 cm)土壤中各随机埋设3个土壤渗透水取样器.土壤渗透水的采样时间和方法同上.

2.2.2 分析方法 采用日本岛津公司生产的5000A型TOC分析仪对所有水样进行分析,采用燃烧氧化——非分散红外吸收法测定水体中有机碳总量(TOC).

3 结果与分析

3.1 鼎湖山针阔叶混交林降水输入与输出

2002年7月~2003年7月,鼎湖山针阔叶混交林降水输入输出模式如图1所示,系统TOC为正平衡.林内雨和林外大气降水中TOC总量之差为97.69 kg·hm⁻²·yr⁻¹,说明针阔混交林生态系统中很大一部分TOC来自大气降水对林冠和树干的淋

溶.其中穿透雨中 TOC 总量为 $122.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$,树干流量中 TOC 总量为 $17.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$.

雨水对林冠层淋洗后 TOC 浓度会增加.该样地林外雨水中 TOC 的平均浓度为 $3.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,经过森林林冠淋洗和树干淋溶后,穿透雨和树干流中 TOC 的平均浓度分别比大气降水中 TOC 浓度增加了 6.10 倍和 7.39 倍.地表径流中 TOC 浓度为 $12.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,明显低于林内雨水中 TOC 的平均浓度,但高于 25 cm 和 50 cm 土壤水中 TOC 平均浓度(7.905 和 $3.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

图 1 鼎湖山针阔叶混交林生态系统 TOC 输入输出模式图

Fig. 1 TOC input and output in the coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan.

3.2 鼎湖山针阔叶混交林各水文分量中 TOC 总量和浓度的月动态

3.2.1 TOC 总量月动态 观测结果表明,鼎湖山针阔叶混交林大气降水、穿透雨、树干流、地表径流和土壤渗透水(25 cm 和 50 cm)中 TOC 总量月变化差异较大(图 2),各类型水中 TOC 总量基本上与大气降水的月动态变化趋势一致,降水量大的月份,各水文分量的水量也大,所以 TOC 总量也高.但林内雨水中月 TOC 总量要高于同期林外大气降水,这表明该林地系统水文循环过程对有机碳的淋洗量较大.8 月和 10 月地表径流和土壤渗透水(25 cm 和 50 cm)中 TOC 总量均较高.这一方面是由于较大的大气水量增加了地表径流和土壤渗透水(25 cm)的量;另一方面可能是由于秋季枯枝落叶和小动物的尸体增多,林内雨水中溶入了其有机物质,从而引起地表径流和 25 cm 土壤渗透水中 TOC 总量增加.降水量最小的 1 月和 2 月,地表径流和土壤渗透水量很小,TOC 总量近似等于 0.

3.2.2 TOC 浓度月动态 降雨时,空气中漂浮着的各种含碳微粒会随雨水沉降.降水量越大,持续时间越长,大气降水中 TOC 浓度越小,即“稀释效应”.降雨量的大小还影响整个水文过程各分量 TOC 浓度.降雨不仅会淋洗粘附在植物体表面的有机碳,而且

图 2 大气降水量和水文过程中 TOC 总量的月动态

Fig. 2 Monthly precipitation depth and total TOC for different hydrological process.

a) 大气降水 Precipitation; b) 穿透雨 Throughfall; c) 树干流 Stemflow; d) 地表径流 Surface runoff; e) 25 cm 土壤水 Soil water at 25 cm depth; f) 50 cm 土壤水 Soil water at 50 cm depth; g) 大气降水量 Monthly precipitation. 下同 The same below.

会淋洗由于植物体和附着在植物体上的微生物分泌的部分有机碳,以及小动物的尸体.因此,穿透雨和树干流中 TOC 浓度要远远高于林外大气降水中 TOC 浓度(图 3).由图 3 可以看出,穿透雨和树干流中 TOC 浓度的月变化相似,生长季初(3 月),TOC 浓度开始增加,9 月后逐渐下降,至 12 月,由于旱季降水量少,植物体表面集聚了大量的有机碳微粒,因此穿透雨和树干流中 TOC 的浓度又有所回升.

此外,树干流中 TOC 浓度还受树种的影响.整个观测期间,同一样地内 TOC 的平均浓度表现为马尾松($46.612 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 锥栗($34.351 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 荷木($14.224 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).这可能是由于树皮开裂多、粗糙,其树干流中 TOC 浓度会较高;也可能与不同树种的分泌特性有关.

图 3 大气降水量和各水文过程中 TOC 浓度的月动态

Fig. 3 Monthly precipitation and TOC concentrations for different hydrological processes.

地表径流中 TOC 浓度比林内雨水中浓度,但明显高于 25 cm 和 50 cm 土壤水,尤其是 7、8 月份,地表径流中 TOC 浓度较其它月份高得多.这一方面是由于林地表面的枯枝落叶层和土壤表层有机碳含量活跃,容易随水的运动而迁移;另一方面是由于 7、8 月份高温高湿,林地该界面微生物活性高,有机质分解快,可能使地表径流 TOC 的浓度增加.同时,微生物的分泌物以及一些动植物残体被水带走,从而提高了地表径流中 TOC 浓度(图 3).这说明在计算汇入河流湖泊的有机碳时,地表径流悬浮质中的 TOC 是不能忽略的.

25 cm 和 50 cm 土壤渗透水中 TOC 浓度无明显的月变化规律,但 25 cm 土壤渗透水中 TOC 的浓度要高于 50 cm 土壤渗透水(图 3).这表明大部分有机碳在上层土壤中滞留,变成了系统碳库的一部分.从某种意义上讲,这是一个重要的“碳汇”.

3.3 鼎湖山针阔混交林 TOC 浓度与大气降水量的关系

大气降水中 TOC 浓度随降水量的增加呈对数规律下降,穿透雨中 TOC 浓度与大气降水量之间也存在类似的相关关系(图 4).

树干流和地表径流中 TOC 浓度与大气降水量之间无明显相关关系;25 cm 和 50 cm 土壤水中 TOC 浓度随大气降水量(x)的增加呈指数递减的趋势.

一般而言,随着大气降水频率和降水量的增加,空气中漂浮着的各种颗粒有机碳含量逐渐减少,从而使大气降水和穿透雨中 TOC 的浓度降低,但对土壤以及其上层凋落物层的淋洗时间会延长,从而导致土壤溶液中 TOC 的浓度升高.

3.4 鼎湖山针阔混交林 TOC 浓度与降水强度的关系

水文过程各分量水中 TOC 浓度随着大气降水强度的变化会出现规律性的波动.观测表明,穿透雨中 TOC 浓度与大气降水强度之间存在二次曲线关系,地表径流中 TOC 浓度随大气降水强度的增加以对数曲线方式增加,大气降水中 TOC 浓度随降水强度的增加呈对数规律递减(图 5),但相关系数(R^2)只有 0.1463.这表明人为干扰活动对大气降水中 TOC 浓度的影响要远大于大气降水强度波动的影响.

树干流和土壤水中 TOC 浓度与大气降水强度无明显相关关系(图 5),表明树干流和土壤水中 TOC 浓度的升高可能与树干的分泌特性和土壤表

面的枯枝落叶层分解状况以及微生物的活动等有关.

图 4 各类型水中 TOC 浓度与大气降水量的关系

Fig. 4 Relationship between TOC content in hydrological processes and precipitation.

图 5 各类型水中 TOC 浓度与降雨强度的关系

Fig. 5 Relationship between TOC content in hydrological processes and precipitation intensity.

4 讨 论

刘艳观测表明^[16],鼎湖山针阔叶混交林大气降水中 DOC 浓度为 $3.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,约为同期大气降水中 TOC 浓度的 97%,因此本文结果可与其它文献中 DOC 的研究结果进行比较.本研究大气降水中 TOC 的浓度与台湾中部的 Guandaushi 森林大气降水中 DOC 的浓度 ($4.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 相近,但要高于 Luquillo Mountain 热带雨林 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和一些温带森林林外大气降水中 DOC 的浓度 ($1.0 \sim 2.9 \pm 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[2].本研究大气降水中 TOC 总量也明显高于一些温带森林林外大气降水中 DOC 的总量 ($13.8 \sim 34.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)^[1,18,21],但大大低于台湾中部 Guandaushi 森林林外大气降水中 DOC 总量 ($142.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$).

由于雨水对树叶的淋洗^[25]和冲刷^[18],穿透雨和树干流中 TOC 浓度会增加.其中由于一些有机颗粒的溶入,POC 的比率也相应增加,而 DOC 的比率有所下降,鼎湖山针阔叶混交林穿透雨、树干流中 DOC 浓度分别占相应 TOC 浓度的 47%和 48%.穿透雨中 TOC 浓度要高于一些温带和热带地区的针叶林和硬叶林生态系统,以及台湾中部 Guandaushi 的针叶林和硬叶林生态系统穿透雨中 DOC 浓度,但较美国 New Hampshire 和 Massachusetts 地区硬叶林穿透雨中 DOC 的浓度低(分别为 33.9 和 $29 \pm 6.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$);而 TOC 含量与美国 Massachusetts 地区的硬叶林和针叶林穿透雨中 DOC 含量相近.鼎湖山针阔叶混交林树干流中 TOC 浓度和总量或近似、或高、或低于其它一些地区森林树干流中 DOC 浓度^[2].这表明树干流中 TOC 浓度与树种的不同形态学特征有关^[10].在一定程度上,鼎湖山针阔叶混交林穿透雨和树干流中较高的 TOC 总量不仅可以为林下微生物生长提供大量的能量,还会增强微生物和植物体之间的生化相互促进作用.

鼎湖山针阔叶混交生态系统林内雨水中 TOC 总量较高 ($139.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$),但通过地表径流输出的 TOC 量较少 ($17.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$),说明绝大部分有机碳被森林土壤所吸附.这也是该生态系统正在向顶级演替阶段——季风常绿阔叶林阶段演替的一个有力的佐证,与前人研究结果相吻合.研究表明,土壤碳是陆地碳库的主要组成部分,全球土壤有机碳总量达 $1\,270 \text{ Gt}$ ^[23],中国陆地土壤有机碳蓄积量处于 $615.19 \times 10^{14} \sim 1\,211.37 \times 10^{14} \text{ g}$ 之间^[26],广东省陆地土壤有机碳储量约为 17.52×10^8

t ^[5].海南尖峰岭热带山地雨林原始林下土壤有机碳储量为 $104.696 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,热带山地雨林更新林下土壤有机碳储量为 $105.803 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[27].Dalva 等^[3]的研究也表明,有机质含量低,交换性铁、铝含量高的土壤具有很强的吸附有机碳能力.这从水文学的角度解释了中国南方亚热带森林生态系统作为一个重要的陆地碳“汇”生态功能的形成机理.

25 cm 土壤渗透水中 TOC 的平均浓度要高于 50 cm 深度土壤渗透水中 TOC 的平均浓度,与前人的研究结果一致^[2].这主要是因为除了林冠和树干输入有机碳外,土壤有机质降解和凋落物的分解也释放很大一部分有机碳.因此上层土壤渗透水中 TOC 含量与土壤有机质含量密切相关.另外,增加土壤酸性会降低腐殖质层或者上层土壤渗透水中有机碳浓度^[11].本研究中 25 cm 深度土壤水中 TOC 的平均浓度 ($7.905 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 大大低于美国 Wisconsin 地区针叶林同深度土壤水中的 DOC 浓度 ($27.5 \pm 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),表明鼎湖山土壤受酸雨污染比较严重,表层土壤水中 TOC 的浓度可以作为衡量土壤酸化情况的一个水文指标.

大气降水、穿透雨和土壤水中 TOC 浓度均随大气降水量的增加而递减,主要是由于大气降水量的增加对水文学过程中的 TOC 浓度起到稀释作用.这在土壤水(溶液)中表现得更明显,表明大气降水量对土壤水溶液中 TOC 浓度产生直接的影响,而穿透雨中 TOC 浓度可能更多地受树冠吸附碳颗粒能力的影响.大气降水中 TOC 浓度随大气降水强度的增加而递减但相关性不显著,这可能是由于大气降水中 TOC 浓度主要受制于大气干、湿沉降量.穿透雨和地表径流中 TOC 浓度随大气降水强度增加而显著增加,可能与高强度的大气降水增加了对林冠的淋洗和土壤的冲刷有关.

致谢 中国科学院华南植物园陈少薇老师、广东省生态环境与土壤研究所高原雪女士、鼎湖山定位站莫定升给予帮助.

参考文献

- Currie WS, Aber JD, McDowell WH, et al. 1996. Vertical transport of dissolved organic C and N under long-term N amendments in pine and hardwood forests. *Biogeochemistry*, **30**: 1 ~ 35
- Chiung Pin Liu, Bor Hung Sheu. 2003. Dissolved organic carbon in precipitation, throughfall, stemflow, soil solution, and stream water at the Guandaushi subtropical forest in Taiwan. *For Ecol Man*, **172**: 315 ~ 325
- Dalva M, Moore TR. 1991. Sources and sinks of dissolved organic carbon in a forested swamp catchment. *Biogeochemistry*, **30**: 1 ~ 35
- Driscoll CT, Blette V, Yan C, et al. 1995. The role of dissolved organic carbon in the chemistry and bioavailability of mercury in remote Adirondack lakes. *Water Air Soil Poll*, **80**: 499 ~ 508

- 5 Gan H-H(甘海华), Wu S-H(吴顺辉), Fan X-D(范秀丹). 2003. Reserves and spatial distribution characteristics of soil organic carbon in Guangdong Province. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14** (9): 1499 ~ 1502 (in Chinese)
- 6 Gao Q-Z(高全洲), Shen C-D(沈承德). 1998. Riverine carbon flux and continental erosion. *Adv Earth Sci* (地球科学进展), **13** (4): 369 ~ 375 (in Chinese)
- 7 Gao Q-Z(高全洲), Tao Z(陶 贞). 2003. Advances in studies on transported flux and properties of riverine organic carbon. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14** (6): 1000 ~ 1002 (in Chinese)
- 8 Greenberg AE. 1992. Standard Methods for Examination of Waters and Watersheds. Washington, DC: American Public Health Association.
- 9 Huang Z-L(黄忠良), Meng M-L(蒙满林), Zhang Y-C(张佑昌). 1998. The climate in Dinghushan Biosphere Reserve. *Trop Subtrop For Ecosyst* (热带亚热带森林生态系统研究), **8**: 134 ~ 139 (in Chinese)
- 10 Inagaki M, Sakai M, Ohnuki Y. 1995. The effect of organic carbon on acid rain in a temperate forest in Japan. *Water Air Soil Poll*, **85**: 2345 ~ 2350
- 11 James BR, Riha SJ. 1986. pH buffering in forest soil organic horizons: Relevance to acid precipitation. *J Environ Qual*, **15**: 229 ~ 234
- 12 Jones RL, Grey J, Sleep D, et al. 1998. An assessment, using stable isotopes, of the importance of allochthonous organic carbon source to the pelagic food web in Loch Ness. *J Proc Roy Soc London B*, **265**: 105 ~ 111
- 13 Koestler P, McArthur JV, Leff LG. 1997. Spatial and temporal response of stream bacteria to sources of dissolved organic carbon in a blackwater stream system. *Freshwater Biol*, **37**: 79 ~ 89
- 14 Kong GH, Liang C, Wu HM, et al. 1993. Dinghushan Biosphere Reserve—Ecological Research History and Perspective. Beijing: Science Press. 3 ~ 7
- 15 Liechty HO, Kuuseoks E, Morz GD. 1995. Dissolve organic carbon in northern hardwood stands with differing acidic inputs and temperature regimes. *J Environ Qual*, **24**: 927 ~ 933
- 16 Liu Y(刘 艳). 2005. Concentration and Fluxes of Dissolved Organic Matter During Forest Hydrological Processes of Three Main Forest Types in Dinghushan. A thesis submitted for the Degree of Master. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- 17 McDowell WH. 1998. Internal nutrient fluxes in a Puerto Rican rain forest. *J Trop Ecol*, **14**: 521 ~ 536
- 18 McDowell WH, Likens GE. 1988. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley. *Ecol Monogr*, **58**: 177 ~ 195
- 19 Melillo JM, McGuire AD, Kicklighter DW, et al. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, **363**: 234 ~ 240
- 20 Molot LA, Dillon PJ. 1997. Colour mass balances and colour-dissolved organic carbon relationships in lakes and streams in central Ontario. *Can J Fish Aquat Sci*, **54**: 2789 ~ 2795
- 21 Moore TR, Jackson RJ. 1989. Dynamics of dissolved organic carbon in forested and disturbed catchments, Westland, New Zealand. 2. Larry River. *Water Resour Res*, **25**: 1331 ~ 1339
- 22 Raich JW, Schlesinger WH. 1992. The Global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation. *Tellus*, **44B**: 81 ~ 99
- 23 Sombroek WG, Nachtergaele FO, Hebel A. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *AMBIO*, **22**: 417 ~ 425
- 24 Tipping E, Backes CA, Hurley MA. 1989. Modelling the interactions of Al species, protons and Ca^{2+} with humic substances in acid waters and soils. In: Lewis TE, ed. Environmental Chemistry and Toxicology of Aluminium. Michigan: Chelsea. 83 ~ 105
- 25 Turkey HB. 1970. The leaching of substances from plants. *Ann Rev Plant Physiol*, **21**: 305 ~ 324
- 26 Wang S-Q(王绍强), Liu J-Y(刘纪远), Yu G-R(于贵瑞). 2003. Error analysis of estimating terrestrial soil organic carbon storage in China. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14** (5): 797 ~ 802 (in Chinese)
- 27 Wu Z-M(吴仲民), Li Y-D(李意德), Zeng Q-B(曾庆波), et al. 1998. Carbon pool of tropical mountain rain forests in Jianfengling and effect of clear cutting on it. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **9** (4): 341 ~ 344 (in Chinese)
- 28 Yang X(杨 昕), Wang M-X(王明星). 2001. Reviews of several aspects of terrestrial carbon cycling. *Adv Earth Sci* (地球科学进展), **16** (3): 427 ~ 435 (in Chinese)

作者简介 尹光彩,女,1973年10月生,博士.主要从事生态系统生态学、生态水文学等方面的研究,发表论文14篇. Tel: 020-31246830; E-mail: gcyin@scbg.ac.cn
