

降水变率对森林土壤有机碳组分与分布格局的影响*

陈小梅^{1,2} 刘菊秀² 邓琦^{1,2} 褚国伟¹ 周国逸¹ 张德强^{1**}

(¹ 中国科学院华南植物园, 广州 510650; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 2006年12月—2008年6月,通过加倍降水、自然降水和去除降水3种处理的人工控制试验,研究了降水变率改变对南亚热带不同演替阶段的季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松针叶林土壤有机碳组分与空间分布格局的影响。结果表明:在3种降水强度条件下,相同森林类型的同一层次土壤总有机碳(TOC)含量差异不显著($P>0.05$);去除降水处理下土壤表层(0~10 cm)颗粒有机碳(POC)和轻组有机碳(LFOC)含量有明显的积累趋势,加倍降水和自然降水处理下增加了POC、LFOC向下层土壤(10~20 cm、20~30 cm、30~50 cm)的运输;去除降水处理下,马尾松林土壤易氧化有机碳(ROC)含量显著高于降水处理($P<0.05$);演替早期森林土壤的POC、ROC、LFOC占总有机碳的比例大于演替后期土壤,不利于土壤有机碳的存埋。森林土壤总有机碳含量变化缓慢,而其活性有机碳组分(POC、LFOC、ROC)对降水变率改变的响应更敏感。

关键词 降水变率 土壤有机碳 颗粒有机碳 易氧化有机碳 轻组有机碳

文章编号 1001-9332(2010)05-1210-07 **中图分类号** Q148; S153.6 **文献标识码** A

Effects of precipitation intensity on soil organic carbon fractions and their distribution under subtropical forests of South China. CHEN Xiao-mei^{1,2}, LIU Ju-xiu², DENG Qi^{1,2}, CHU Guo-wei¹, ZHOU Guo-yi¹, ZHANG De-qiang¹ (¹South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(5): 1210-1216.

Abstract: From December 2006 to June 2008, a field experiment was conducted to study the effects of natural precipitation, doubled precipitation, and no precipitation on the soil organic carbon fractions and their distribution under a successional series of monsoon evergreen broad-leaf forest, pine and broad-leaf mixed forest, and pine forest in Dinghushan Mountain of Southern China. Different precipitation treatments had no significant effects on the total organic carbon (TOC) concentration in the same soil layer under the same forest type ($P>0.05$). In treatment no precipitation, particulate organic carbon (POC) and light fraction organic carbon (LFOC) were mainly accumulated in surface soil layer (0-10 cm); but in treatments natural precipitation and doubled precipitation, the two fractions were infiltrated to deeper soil layers. Under pine forest, soil readily oxidizable organic carbon (ROC) was significantly higher in treatment no precipitation than in treatments natural precipitation and doubled precipitation ($P<0.05$). The percentage of soil POC, ROC, and LFOC to soil TOC was much greater under the forests at early successional stage than at climax stage, suggesting that the forest at early successional stage might not be an ideal place for soil organic carbon storage. Precipitation intensity less affected TOC, but had greater effects on the labile components POC, ROC, and LFOC.

Key words: precipitation intensity; soil organic carbon; particulate organic carbon; readily oxidizable organic carbon; light fraction organic carbon.

* 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421101)、国家自然科学基金项目(40730102)、国家杰出青年基金项目(30725006)和广东省自然科学基金项目(8351065005000001)资助。

** 通讯作者. E-mail: zhangdeq@scib.ac.cn

2009-11-14 收稿, 2010-03-01 接受。

全球变化对陆地生态系统的影响是全球变化研究的核心内容,也是 GCTE (global change and terrestrial ecosystem) 研究计划的主要目标^[1]. 陆地土壤作为全球最大的碳库,其有机碳储量为 1395×10^{15} g, 是植物碳储量的 2~3 倍^[2-3],土壤每年 CO_2 排放量约是化石燃料燃烧释放 CO_2 量的 10 倍^[2,4]. 因此,开展陆地土壤有机碳的分布、转化及其对环境变化的响应研究,是正确理解陆地生态系统碳的生物地球化学循环过程的关键.

全球气候变化除导致温度发生变化之外,也使得全球水分/降水分布状况发生改变^[5-6]. 在中国东南部地区,降水变化呈增加趋势,而且集中在每年的 6—9 月^[7-8]. 季节间的降水变率增加将影响土壤的结构、微生物活性和有机碳的迁移与淋溶过程,并最终影响土壤有机碳的分布格局. 目前,国内外有关降水变化对土壤呼吸方面的影响研究报道较多^[9-10],但对土壤有机碳形态和分布格局等的研究资料极其有限. 因此,开展降水变率改变对土壤有机碳分布格局的影响研究,对于丰富全球变化研究的内涵具有重要意义.

研究表明,尽管土壤有机碳周转缓慢,其总量的微小变化难于发现,但是,成熟森林土壤可以持续积累有机碳,而且不同演替阶段的森林生态系统地下部分同样具有碳汇功能^[11-13]. 有学者对成熟森林土壤有机碳积累过程进行了有益的探讨^[14],而森林土壤积累有机碳的机理仍不清楚. 土壤有机碳分为惰性有机碳和活性有机碳. 活性有机碳(颗粒有机碳、易氧化有机碳和轻组有机碳等)容易受植物生长动态、微生物活性等的影响,有一定的溶解性,而且在土壤中移动较快,易氧化、分解和矿化,其形态和空间位置对环境变化响应敏感^[15],研究这部分有机碳含量变化及其分布格局,有助于揭示土壤总有机碳对环境变化的响应规律,加深对碳循环过程的理解.

鼎湖山国家自然保护区地处亚热带,不仅较好地保存了地带性植被——亚热带季风常绿阔叶林,还分布有演替前期和过渡时期的马尾松林和针阔叶混交林. 本文以鼎湖山亚热带不同演替阶段森林的土壤为研究对象,运用人工控制试验,探讨降水变率变化对不同类型森林土壤活性有机碳含量及其分布格局的影响,阐明森林土壤有机碳积累的机理,以为生态系统碳平衡的研究提供数据支持.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在广东省鼎湖山自然保护区 ($112^{\circ}30'$

$39''$ — $112^{\circ}33'41''$ E, $23^{\circ}09'21''$ — $23^{\circ}11'30''$ N) 内进行. 该区属亚热带季风性气候,年平均降雨量为 1927 mm,其中 75% 降雨分布在 3—8 月,而 12 月至翌年 2 月仅占 6%. 年平均相对湿度为 80%,年平均气温 21.4°C ,最冷月(1 月)和最热月(7 月)的平均气温分别为 12.6°C 和 28.0°C ^[16]. 保护区面积约 1100 hm^2 ,主要分布着不同群落演替阶段的 3 种森林^[17-18]: 马尾松针叶林、针阔叶混交林和季风常绿阔叶林. 1) 马尾松针叶林(简称马尾松林, PF): 林地海拔 50~200 m,为 1960 年前人工种植的马尾松纯林,马尾松 (*Pinus massoniana*) 是现存唯一乔木层,林下灌木主要为桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、三叉苦 (*Euodia lepta*) 等,偶见荷木 (*Schima superba*) 等阔叶树种幼苗. 该森林群落处在亚热带森林群落演替的初级阶段. 2) 针阔叶混交林(简称混交林, MF): 林地海拔 100~250 m,由人工种植的马尾松群落被先锋阔叶树种入侵后自然演变而成,是马尾松群落向季风常绿阔叶林演替的一个中间过渡类型. 针叶树为马尾松,阔叶树种主要有荷木、锥栗 (*Castanopsis chinensis*)、红皮紫棱 (*Craibiodendron kwangtungense*) 和藜蒴 (*Castanopsis fissa*) 等,针、阔叶树的比例约为 4:6.3) 季风常绿阔叶林(简称季风林, BF): 林地海拔 250~400 m,是有着近 400 年保护历史的亚热带地带性植被类型,整个群落处于由阳性植物占优势的森林向中生性和耐阴性植物占优势的演替顶极群落类型演变的最后阶段^[17]. 群落终年常绿,垂直结构复杂,群落优势树种主要有锥栗、荷木、厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis*)、黄果厚壳桂 (*Cryptocarya concinna*) 和鼎湖钓樟 (*Lindera chunii*) 等^[19]. 该区土壤由不同颜色、硬度与质地的砂岩、砂页岩、页岩和石英砂岩发育而成,主要土壤类型为赤红壤和黄壤. 本文所研究的 3 种森林下的土壤均为赤红壤^[20].

1.2 研究方法

1.2.1 野外试验设计 2006 年 12 月,在马尾松林、混交林和季风林 3 种类型森林中,分别设置坡度、坡向、坡位和地上植物结构基本一致的观测样地,每个样地设 3 种处理:去除降水、加倍降水和自然降水(对照)处理,每种处理 3 个重复. 其中去除降水和加倍降水处理的设计如下:在 3 种林地分别设置 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的样方,四周用 PVC 板材围起,PVC 板插入地面 15 cm,可阻止地表径流的流入,但不影响深层土壤的水分交流. 在样方上端离地 1.0~1.5 m 处,用凹槽瓦面状透明 PVC 板材搭建等面积的挡雨面,

以阻止雨水进入样方,形成去除降水的处理.挡雨面收集的雨水(穿透水)汇流至汇流槽,汇流槽两端封口使水流不外流.汇流槽收集的雨水经若干PVC管分流,将雨水平均分配到下坡位等面积(3 m×3 m)的样方,加上自然降水,形成加倍降水处理的格局.

1.2.2 样品采集 2008年7月下旬,在每个样地内随机选取3个点,用土钻分别取0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~50 cm 4个层次的土壤样品,装入布袋,带回实验室处理.由于松林30~50 cm土层多为大块石头,故不采集其土壤.去除样品中可见的根系等动植物残体和石块,并过2 mm筛,自然风干后备测.

1.2.3 样品分析 颗粒有机碳测定采用颗粒大小分组法.取过2 mm筛干土10 g,放入100 ml塑料瓶后,加50 ml (NaPO₃)₆ (5 g·L⁻¹)的水溶液中,手摇15 min后,用90 r·min⁻¹振荡器振荡18 h.把土壤悬液过53 μm筛,用蒸馏水反复冲洗,把留在筛子上的所有物质,在60℃下烘干称量,计算该部分占整个土壤样品质量的比例.通过分析烘干样品中有机碳含量,计算颗粒有机质中的有机碳含量,再换算为单位质量土壤样品的对应组分有机碳含量^[21-22].

易氧化有机碳为能被333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化的有机碳^[23-24].取过100目筛,约含有15~30 mg有机碳的风干土样,装入100 ml离心管,加333 mmol·L⁻¹高锰酸钾溶液25 ml,密封瓶口,以250 r·min⁻¹振荡1 h,空白和土壤样品一样.振荡后的样品以3000 r·min⁻¹离心5 min,然后取上清液用去离子水按1:250稀释,在565 nm的分光光度计上比色,根据高锰酸钾的消耗量,可求出易氧化土壤样品的含碳量^[23].

轻组有机碳测定采用相对密度分组法.称取过2 mm筛的风干土样10 g置于100 ml离心管中,加

入50 ml NaI溶液(密度1.70 g·cm⁻³),摇匀,混合物在往复振荡机上振荡60 min,震速为1 min往复250次.分散后的悬浮液在1000 r·min⁻¹离心机上离心10 min.将混合物表面悬浮的轻组有机质通过微孔滤膜过滤,在剩余的重组残留物中加入50 ml NaI,重复上述过程2~3次,直至没有可见的轻组物质.用75~100 ml 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂冲洗轻组物质去除NaI,另加100~150 ml去离子水冲洗.然后将滤纸上的轻组物质在60℃下烘干12 h,获得轻组有机质干质量.计算这些烘干样品质量占总土壤样品质量的比例后,再取出部分样品用于分析有机碳含量.根据计算的比例和有机碳含量,计算轻组中有机碳在整个样品中的含量^[25-27].

1.3 数据处理

采用Excel 2003和SPSS 11.5统计分析软件对所有数据进行处理和作图,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同处理间的差异.

2 结果与分析

2.1 不同降水强度下土壤总有机碳含量的变化

由图1可以看出,经过18个月的试验处理,相同林型同一层次的土壤总有机碳含量(TOC)没有统计学上的差异($P>0.05$),但不同类型森林之间对降水变率改变的响应有所不同.在去除降水条件下,季风林和马尾松林表层土壤有机碳含量有增加趋势,主要是由于缺乏雨水的淋溶,有机质难以下渗,使得有机质在土壤表层积累.而3种类型森林深层土壤有机碳含量的分布对不同降水强度处理的响应有相似的规律,由于缺乏雨水的淋溶,去除降水处理的下层土壤有机碳难以得到补充,其含量比正常和加倍降水处理的下降速率更快.这说明干旱(去除降水)

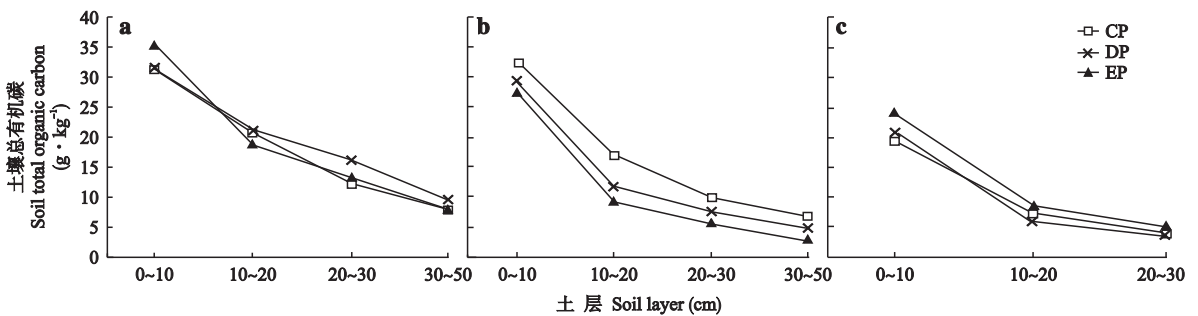


图1 不同降水强度下土壤总有机碳的变化

Fig. 1 Changes of soil total organic carbon under different precipitation intensity.

DP:加倍降水 Double precipitation; CP:自然降水(对照) Natural precipitation (Control); EP:去除降水 No precipitation; a)季风林 Monsoon evergreen broad-leaf forest; b)针阔混交林 Pine and broad-leaf mixed forest; c)马尾松林 Pine forest. 下同 The same below.

能促使有机碳在土壤表层积累,不利于土壤有机碳的存埋. 由于试验时间相对较短,不同降水条件下土壤总有机碳含量没有显著差异.

2.2 不同降水强度下土壤有机碳组分分布格局

2.2.1 土壤颗粒有机碳 (POC) 分布格局

在季风林、混交林土壤表层(0~10 cm),去除降水处理下 POC 含量显著高于自然降水和加倍降水处理($P < 0.05$)(图 2);马尾松林土壤表层土壤 POC 含量各处理间无统计学差异($P > 0.05$),但去除降水处理下有明显的积累趋势. 表明去除降水导致土壤 POC 在表层积累,不利于有机碳的存埋. 从表层土(0~10 cm) POC 含量下降幅度大小来看,降水淋溶作用对土壤颗粒有机碳剖面垂直分布格局的影响明显(图 2). 土壤 POC 绝对含量呈现季风林>混交林>马尾松林,但从 POC 占 TOC 比例的大小来看,却呈现相反的趋势,且在表层土表现得尤为明显(图 3). 而 3

种类型森林土壤各土层在不同处理间 POC/TOC 比值有着相同的规律,即去除降水处理的比值最高. 这表明在土壤类型相同的条件下,森林土壤 POC 含量主要受森林类型与结构的影响^[28-29],而 POC 的空间分布格局则与降水强度关系更为密切.

2.2.2 土壤轻组有机碳 (LFOC) 分布格局

由图 2 可以看出,季风林土壤剖面的轻组有机碳含量的分布格局在 3 种降水强度下,均随剖面深度的增加,下层土壤(20~30 cm、30~50 cm)土壤轻组有机碳含量呈现上升趋势. 混交林在降水处理下土壤底层轻组有机碳含量呈上升趋势,但在无降水处理下,土壤轻组有机碳含量随剖面深度增加而下降;松林土壤轻组有机碳随土壤剖面深度增加而明显下降,特别是去除降水处理. 3 种森林土壤对降水变率改变响应的差异可能主要是由表层土壤密度不同引起的. 据鼎湖山站 2008 年的调查结果,季风林、混交林和

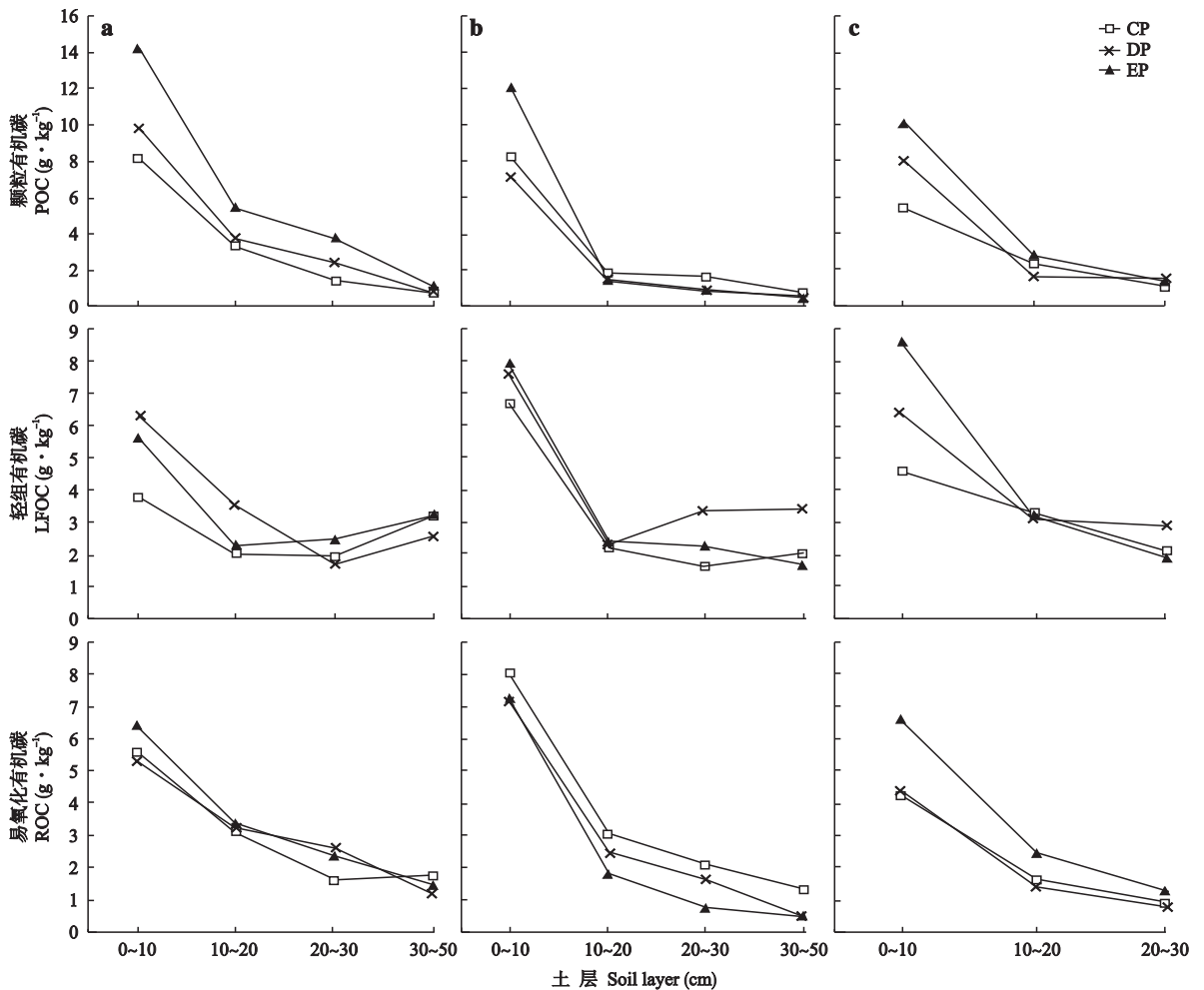


图 2 不同降水强度下森林土壤有机碳组分含量的变化

Fig. 2 Changes of soil organic carbon fractions under different precipitation intensity.

POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; LFOC: 轻组有机碳 Light fraction organic carbon; ROC: 易氧化有机碳 Readily oxidation organic carbon. 下同 The same below.

马尾松针叶林 0 ~ 10 cm 土壤容重分别为 0.901、1.031 和 1.323 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 低容重的土壤更有利于轻组有机碳向下迁移. 3 种林型 LFOC/TOC 百分比顺序为: 马尾松林 > 混交林 > 季风林; 季风林土壤 LFOC 占 TOC 的比例对降水变率响应较小, 而混交林与马尾松林的响应较大 (图 3). 这表明森林土壤 LFOC 含量受森林类型限制^[29], 但降水淋溶作用影响其剖面分布格局.

2.2.3 土壤易氧化有机碳 (ROC) 分布格局 3 种类型森林土壤易氧化有机碳分布格局对降水变率改变与总有机碳有相似的响应格局 (图 2). 季风林同一层次土壤易氧化有机碳含量在 3 种降水强度下无统计学差异 ($P > 0.05$), 其剖面分布格局较一致, 而混交林也呈相同现象 (图 2), 表明季风林与混交林土壤 ROC 含量对降水变率改变的缓冲性较强. 去除降水处理下马尾松土壤 (0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm) 易氧化有机碳含量明显高于自然降水和加倍降水 (图 2), 其占总有机碳的比例也明显高于加倍降水和自然降水 (图 3). 表明松林土壤在去除降水 (干旱环境) 处理条件下易氧化有机碳趋于积累趋势, 尤其

是在表层土, 不利于有机碳存埋. 3 种林型 ROC 占 TOC 的比例大小顺序为: 马尾松林 > 混交林 > 季风林 (图 3), 与 POC、LFOC 占 TOC 的比例趋势一致. 土壤易氧化有机碳含量在很大程度上取决于森林类型, 而雨水的淋溶作用对 ROC 的空间分布格局有重要影响.

3 讨 论

3.1 降水变率改变对森林土壤颗粒有机碳的影响

降水淋溶作用影响土壤颗粒大小的垂直分布, 增加了有机碳向下运输能力. 在干旱环境 (无降水处理) 条件下, 由于缺少雨水的淋溶, 颗粒有机碳在表层土 (0 ~ 10 cm) 积累, 减少了对下层土壤的供给, 土壤颗粒有机碳含量随剖面深度增加而下降剧烈, 不利于有机碳的深层积累; 而降水处理下的土壤颗粒有机碳含量随剖面变化趋势较缓和. 颗粒有机碳占总有机碳的比例可以反映土壤有机碳的稳定性^[28]. 根据 POC/TOC 百分比 (图 3) 变化, 马尾松林土壤有机碳稳定性低于季风林与混交林. 当处于无降水处理时, 季风林、混交林 POC/TOC 百分比明显升高, 且接近马尾松林, 说明土壤水分含量的下降将增加土壤非保护性有机碳比例, 使土壤有机碳稳定性下降, 不利于土壤有机碳的积累.

3.2 森林土壤轻组有机碳对降水变率改变的响应与适应

土壤轻组有机碳是与矿质部分结合相对松散的部分^[30], 降水淋溶作用将促进其向下层土壤迁移, 有利于底层土壤有机碳的积累, 而在无降水条件下, 土壤轻组有机碳则趋于表层 (0 ~ 10 cm) 积累, 使表层土壤有机碳的稳定性下降. 土壤轻组有机碳通过淋溶作用向下迁移的速率取决于土壤容重的大小, 季风林和混交林表层土容重小, 孔隙度较大, 有利于轻组有机碳在雨水的淋溶作用下向下迁移, 使得下层土壤轻组有机碳含量呈一定的积累趋势 (图 2). 而马尾松林由于表层土壤容重较大, 雨水下渗相对困难, 下层土壤轻组有机碳难以得到补充, 不利于有机碳的深层存埋. 季风林作为地带性植被, 结果复杂, 系统稳定, 对外界环境变化有较好的缓冲性^[31], LFOC/TOC 的比值较低, 即土壤有机碳的稳定性较高. 而马尾松针叶林由于林冠稀疏, 结果单一, 对环境变化响应敏感, LFOC/TOC 比值较高, 即土壤的稳定性较差. 显然, 随着森林植被正向演替的进行, 土壤有机碳的稳定性趋于增加, 有利于土壤有机碳的积累.

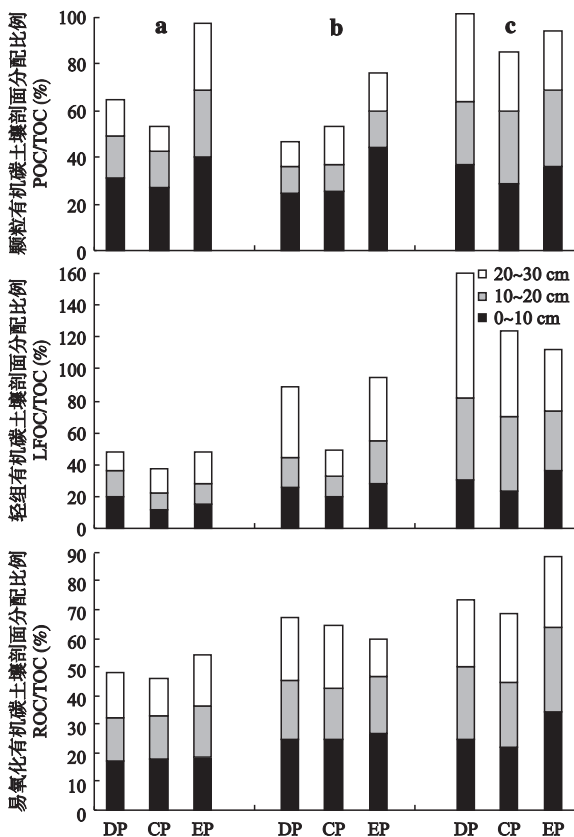


图 3 不同降水强度下森林土壤各层次有机碳组分占总有机碳的比例

Fig. 3 Changes of the percent of soil organic carbon fractions under different precipitation intensity (%).

3.3 森林土壤易氧化有机碳对降水改变的响应与适应

易氧化有机碳为土壤有机碳中易被氧化、分解的部分^[23], 随土壤湿度波动大。在季风林、混交林中, 3 种降水强度下各层次土壤易氧化有机碳含量差异不明显, 可能由于季风林、混交林结构较马尾松林复杂, 小气候环境较稳定^[32], 对林外环境条件的变化有较强的缓冲作用, 对降水变率的改变响应不明显。而马尾松林林冠稀疏, 大部分降水直达林地, 去除降水能显著减少雨水的淋溶, 增加了有机碳在表层土壤的积累。森林植被由松林向季风林演替过程中, 土壤 ROC/TOC 百分比含量下降, 表明惰性碳库增加趋势大于活性碳库, 反映了土壤有机碳的稳定性不断增加^[33-34], 这说明演替后期的森林土壤积累有机碳的速率大于前期的森林。

4 结 论

干旱环境(无降水处理)增加了非保护性有机碳(颗粒有机碳、轻组有机碳)的表层积累, 降低了土壤有机碳的稳定性; 湿润环境(降水处理)增加了非保护性有机碳的深层积累, 有利于有机碳的深层存埋。马尾松林对降水的缓冲能力弱, 土壤易氧化有机碳在无降水处理下剖面分布变化剧烈。南亚热带森林由松林向季风林过渡, 土壤活性有机碳所占比例下降, 土壤稳定性增加。土壤活性有机碳组含量与森林类型关系密切, 而降水变率是影响其空间分布格局的重要因素。土壤总有机碳变化缓慢, 对环境变化的响应不明显, 而其活性有机碳组分(颗粒有机碳、轻组有机碳和易氧化有机碳)对环境变化的响应更灵敏。利用这些指标能更好地揭示土壤有机碳对全球气候变化的响应规律。

参考文献

- [1] Walker BH. Landscape to regional scale response of terrestrial ecosystems to global change. *Ambio*, 1994, **23**: 67-73
- [2] Post WM, Emanuel R, Zinke PJ. Soil carbon pools and life zones. *Nature*, 1982, **298**: 156-159
- [3] Post WM, Peng TH, Emanuel WR, *et al.* The global carbon cycle. *American Scientist*, 1990, **78**: 310-326
- [4] Mooney HA, Vitourek PM, Maston PA. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *Science*, 1987, **238**: 926-932
- [5] Houghton JT, Jenkins GJ, Ephraums JJ. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessments*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- [6] IPCC. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 1-18
- [7] Wang Y (王 英), Cao M-K (曹明奎), Tao B (陶波), *et al.* The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change. *Geographical Research (地理研究)*, 2006, **25**(6): 1031-1041 (in Chinese)
- [8] Tian G-Z (田国珍), Wu Y-L (武永利), Ma X-L (马秀兰). The temporal-spatial characteristics of precipitation of China in recent 40 years. *Shanxi Meteorological Quarterly (山西气象)*, 2008(2): 11-28 (in Chinese)
- [9] Hstedt U, Nordgren A, Palmer A. Optimum soil water for soil respiration before and after amendment with glucose in humid tropical Acrisols and a boreal mor layer. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 1591-1599
- [10] Zhou XH, Sherry RA, Yuan A, *et al.* Main and interactive effects of warming, clipping, and doubled precipitation on soil CO₂ efflux in a grassland ecosystem. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, **20**, GB1003, doi: 10.1029/2005GB002526
- [11] Zhou GY, Liu SHG, Li ZHA, *et al.* Old-growth forests can accumulate carbon in soil. *Science*, 2006, **314**: 1417
- [12] Zhou GY, Zhou CY, Liu SHG, *et al.* Belowground carbon balance and carbon accumulation rate in the successional series of monsoon evergreen broad-leaved forest. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006b, **49**: 311-321
- [13] Ouyang X-J (欧阳学军), Zhou G-Y (周国逸), Wei S-G (魏识广), *et al.* Soil organic carbon and nitrogen mineralization along a forest successional gradient in Southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2007, **18**(8): 1688-1694 (in Chinese)
- [14] Mo JM, Zhang W, Zhu WX, *et al.* Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 403-412
- [15] Chen H (沈 宏), Cao Z-H (曹志宏), Hu Z-Y (胡正义). Characteristics and ecological effects of active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 1999, **18**(3): 32-38 (in Chinese)
- [16] Kong GH, Liang C, Wu HM, *et al.* Dinghushan Biosphere Reserve, Ecological Research History and Perspective. Beijing: Science Press, 1993: 1-25
- [17] Peng S-L (彭少麟). *Forest Community Dynamics in South Subtropics*. Beijing: Science Press, 1996: 57-71 (in Chinese)
- [18] Wang B-S (王柏荪), Ma M-J (马曼杰). The succession of the forest community in Dinghushan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带亚热带森林生态系统研究)*, 1982, **1**: 142-156 (in Chinese)
- [19] Wang Z-H (王铸豪), He D-Q (何道泉), Song S-D (宋绍教), *et al.* The vegetation of Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem (热带亚热带森林生态系统研究)*, 1982, **1**: 77-

- 144 (in Chinese)
- [20] He J-H (何金海), Chen Z-Q (陈兆其), Liang Y-E (梁永奕). The soils of Dinghushan Biosphere Reserve. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem* (热带亚热带森林生态系统研究), 1982, **1**: 25-37 (in Chinese)
- [21] Garten JCT, Post WM, Hanson PJ, *et al.* Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern appellation mountains. *Biogeochemistry*, 1999, **45**: 115-145
- [22] Fang H-J (方华军), Yang X-M (杨学明), Zhang X-P (张小平), *et al.* Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the black soil region, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26** (9): 2847-2854 (in Chinese)
- [23] Lv G-H (吕国红), Zhou G-S (周广胜), Zhou L (周莉), *et al.* Methods of soil dissolved organic carbon measurement and their applications. *Journal of Meteorology and Environment* (气象与环境学报), 2006, **22** (2): 51-55 (in Chinese)
- [24] Blair GJ, Lefroy RDB, Lisle L. Soil carbon fraction based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**: 1459-1466
- [25] Wu T-Y (武天云), Schoenau JJ, Li F-M (李凤明), *et al.* Concepts and relative analytical techniques of organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(4): 717-722 (in Chinese)
- [26] Xie J-S (谢锦升), Yang Y-S (杨玉盛), Yang Z-J (杨智杰), *et al.* Seasonal variation of light fraction organic matter in degraded red soil after vegetation restoration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 557-563 (in Chinese)
- [27] Janzen HH, Campbell CA, Brandt SA, *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**: 1799-1806
- [28] Jiang F-Y (姜发艳), Sun H (孙辉), Liu Q (刘庆), *et al.* Dynamic changes of topsoil organic in subalpine spruce plantation at different succession stages in western Sichuan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(11): 2581-2587 (in Chinese)
- [29] Yang YS, Guo JF, Chen GS, *et al.* Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. *Plant and Soil*, 2009, **323**: 153-162
- [30] Wu J-G (邬建国), Zhang X-Q (张小全), Wang Y-H (王彦辉), *et al.* The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fraction of soil. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2002, **38** (4): 19-29 (in Chinese)
- [31] Zhang DQ, Sun XM, Zhou GY, *et al.* Seasonal dynamics of soil CO₂ effluxes with responses to environmental factors in lower subtropical forest of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, **49**(suppl. II): 139-149
- [32] Zhang D-Q (张德强), Ye W-H (叶万辉), Yu Q-F (余清发), *et al.* The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(6): 938-944 (in Chinese)
- [33] Wang J-X (王建新), Zhang R-Z (张仁陟), Bi D-M (毕冬梅), *et al.* Effects of conservation tillage on soil organic carbon fractions. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(2): 115-121 (in Chinese)
- [34] Zhu Z-J (朱志建), Jiang P-K (姜培坤), Xu Q-F (徐秋芳). Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation. *Forest Research* (林业科学研究), 2006, **19**(4): 523-526 (in Chinese)

作者简介 陈小梅,女,1985年生,硕士研究生.主要从事森林生态系统生态学研究. E-mail: chxm-009@163.com

责任编辑 李凤琴
