

DOI: 10.5846/stxb201404010615

吴建平, 梁国华, 熊鑫, 褚国伟, 周国逸, 张德强. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨响应. 生态学报, 2015, 35(20): - .

Wu J P, Liang G H, Xiong X, Chu G W, Zhou G Y, Zhang D Q. Effects of simulated acid rain on soil microbial biomass carbon and total organic carbon in a monsoon evergreen broadleaved forest at the Dinghushan Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): - .

鼎湖山季风常绿阔叶林土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨的响应

吴建平^{1,2}, 梁国华^{1,2,3}, 熊鑫^{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 中国科学院大学, 北京 100049

3 华南农业大学, 广州 510642

摘要:在鼎湖山季风常绿阔叶林设置人工模拟酸雨实验,研究土壤总有机碳含量、微生物量碳含量、土壤 pH 值和土壤呼吸速率几个指标对不同酸处理梯度(CK:pH 值 4.5 的天然湖水;T1:pH 值 4.0;T2:pH 值 3.5;T3:pH 值 3.0)的响应。结果表明,在模拟酸雨的持续作用下,样地土壤酸化有加剧趋势。2011 年的 6 月(CK:(603.76±46.18) mg/kg, T1:(565.41±44.48) mg/kg, T2:(521.58±30.92) mg/kg, T3:(509.49±19.40) mg/kg)、12 月(CK:(488.92±22.71) mg/kg, T1:(379.65±49.46) mg/kg, T2:(346.08±33.81) mg/kg, T3:(318.00±52.35) mg/kg)和 2012 年 6 月(CK:(540.48±39.11) mg/kg, T1:(492.30±43.15) mg/kg, T2:(489.65±51.39) mg/kg, T3:(428.53±49.66) mg/kg) 三次测定的土壤微生物量碳含量有随模拟酸雨强度增加而显著降低的趋势,高强度的酸处理 T3 显著低于 CK 值($P<0.05$);土壤呼吸速率在各处理中的响应与土壤微生物量碳含量变化一致。由于旱季和湿季的土壤温湿度相差较大,以上各指标在旱湿两季的差异明显,表现为湿季大于旱季。由于土壤总有机碳含量变化缓慢,其在各酸梯度处理下无显著差异($P>0.05$)。以上结果显示,长期酸雨作用使土壤酸化不断加剧,并降低了土壤微生物量碳的含量,抑制了土壤的呼吸速率,有利于土壤碳的累积,但对土壤总有机碳的影响仍需长期实验研究。

关键词:模拟酸雨;土壤酸化;土壤微生物量碳;土壤有机碳

Effects of simulated acid rain on soil microbial biomass carbon and total organic carbon in a monsoon evergreen broadleaved forest at the Dinghushan Nature Reserve

WU Jianping^{1,2}, LIANG Guohua^{1,2,3}, XIONG Xin^{1,2}, CHU Guowei¹, ZHOU Guoyi¹, ZHANG Deqiang^{1,*}

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: Soil is not only a pivotal link connecting the atmosphere, hydrosphere, biosphere, and lithosphere, but also an important component of carbon cycling. Meanwhile, soil is the largest carbon pool in terrestrial ecosystems, with approximately 1500 Pg of C stored in the upper meter of soil. Even small changes in forest soil composition can result in significant consequences for carbon cycling. Soil organic carbon is easily affected by environmental conditions and its stability plays an important role in forest soil. Although soil microbial biomass carbon (SMBC), one of the soil organic

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205)

收稿日期:2014-04-01; 网络出版日期:2014-12-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangdeq@scib.ac.cn

carbon fractions, accounts for only a small fraction of soil total organic carbon (TOC), it is more sensitive to environmental change and its turnover rate is faster than that of TOC. Consequently, SMBC is considered an early indicator of changes to TOC. Many studies of SMBC and TOC responses to acid rain have been carried out in temperate forests in developed countries such as Europe and the United States. However, very few such studies have been carried out in the subtropical forests of southern China, despite the fact that acid rain is a serious environmental threat in this region. We conducted a field experiment to simulate acid rain (SAR) in a monsoon evergreen broadleaved forest (BF) in the Dinghushan Nature Reserve of southern China. We investigated the responses of SMBC, TOC, soil pH, and soil respiration rate to SAR. The SAR treatments included control (CK, pH \approx 4.5; natural lake water), T1 (pH=4.0), T2 (pH=3.5), and T3 (pH=3.0). The acidic solutions consisted of H₂SO₄ and HNO₃ (1:1 mole ratio) in natural lake water. Results showed that pH values of forest topsoil decreased gradually with the increase of acidity, indicating increased soil acidification due to SAR. This phenomenon was consistent with results from other studies conducted at the Dinghushan Nature Reserve. Concentrations of SMBC in June 2011 (603.76 \pm 46.18 mg/kg for CK, 565.41 \pm 44.48 mg/kg for T1, 521.58 \pm 30.92 mg/kg for T2, 509.49 \pm 19.40 mg/kg for T3), December 2011 (488.92 \pm 22.71 mg/kg for CK, 379.65 \pm 49.46 mg/kg for T1, 346.08 \pm 33.81 mg/kg for T2, 318.00 \pm 52.35 mg/kg for T3), and June 2012 (540.48 \pm 39.11 mg/kg for CK, 492.30 \pm 43.15 mg/kg for T1, 489.65 \pm 51.39 mg/kg for T2, 428.53 \pm 49.66 mg/kg for T3) were depressed by SAR, and SMBC contents in T3 treatments were significantly lower than in CK treatments ($P < 0.05$) at all three sampling times. Meanwhile, changes in soil respiration rates induced by SAR were similar to those in SMBC. Because soil moisture and temperature differed between seasons, all measured variables (soil pH, SMBC, TOC, and soil respiration rates) were higher in the warm-wet season than in the dry season. Due to its relative stability, concentrations of TOC did not significantly differ among the four treatments ($P > 0.05$). Our results indicate that long-term acid rain is likely to reduce the SMBC content and respiration rate of forest soil; these changes are expected to have positive effects on the accumulation of soil organic carbon. However, the effects of acid rain on TOC storage need to be further investigated.

Key Words: simulated acid rain (SAR); soil acidification; soil microbial biomass carbon (SMBC); soil total organic carbon (TOC)

土壤是连接大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的纽带,是碳循环的重要组成部分,制约着全球碳循环的动态。据估计,土壤表层碳储量约为 1500 PgC^[1],约为大气碳储量的 2 倍^[2],为陆地生物碳量的 3 倍^[3]。土壤有机碳(Total soil organic carbon, TOC)量的微小变化都可能引起大气中 CO₂浓度的巨大改变,从而对生态系统碳平衡和全球气候产生影响^[4]。国内外很多学者都将土壤有机碳和土壤微生物量碳(Soil microbial biomass carbon, SMBC)结合在一起研究^[5-7]。土壤微生物量碳作为土壤活性有机碳的一部分,虽然其分解进程的动态变化趋势与土壤有机碳相似,且只占土壤总有机碳的 1%—3%,但其周转时间较土壤有机碳更快,对外界环境变化响应较敏感,因此可作为土壤有机碳变化的早期预测指标^[7-9]。有人研究了四种森林植被下的土壤微生物量碳与土壤有机碳含量的关系,发现常绿阔叶林和马尾松林的土壤微生物量碳与总有机碳含量的相关性均达到了极显著水平^[10]。此外,土壤微生物量碳和土壤有机碳的比值(SMBC/TOC)还是衡量一个生态系统土壤有机碳累积或损失的一个重要指标^[6,11]。

自上个世纪以来,酸雨已成为当今世界上最严重的环境问题之一,其主要来源是人类活动如工业生产和汽车尾气等排放的二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)^[12-13]。尽管欧美发达国家的酸性气体排放量有所下降,但发展中国家的排放量却在增加,中国南方已成为继欧美之后的第三大酸雨区^[14]。土壤系统是陆地生态系统的基本组成部分,也是酸雨的最终受体。经过长期酸雨淋溶,土壤不断酸化,土壤中一系列的物理、化学、生物过程都会受到影响,也将引起土壤碳循环过程的变化,最终影响到土壤碳储存^[15]。土壤微生物量碳作为土壤有机碳的活性指标之一,对环境变化、管理措施及土地利用方式等的响应受到了国内外学者普遍关

注^[16-18]。然而,无论国内和国外,目前关于森林土壤微生物量碳对酸雨响应的研究非常有限,故在酸雨日益严重的中国亚热带地区,开展野外人工模拟酸雨对土壤微生物量碳等的研究格外重要。为此,本文以南亚热带具有典型代表性的季风常绿阔叶林为对象,在自然林里开展人工模拟酸雨控制试验,探讨酸雨背景下季风常绿阔叶林土壤中微生物量碳、土壤有机碳和土壤呼吸速率变化情况,为正确评估森林生态系统碳平衡及其对全球气候变化的响应提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样地概况

研究地点设在广东省中部、珠江三角洲西南的肇庆市鼎湖山国家级自然保护区(112°30′39″—112°33′41″E, 23°09′21″—23°11′30″N)内,距广州 86 km,面积 1155 hm²。该地区属亚热带季风气候,冬夏气候交替非常明显,年均气温 20.9℃,最冷月(1月)和最热月(7月)的平均气温分别为 12.6℃和 28.0℃;年均相对湿度为 82%,年均降雨量和蒸发量分别为 1927 mm 和 1115 mm,4月—9月为湿季,约占全年降雨量的 80%,10月—次年 3月为旱季^[19]。随海拔梯度升高,鼎湖山垂直分布着赤红壤、黄壤和山地灌丛草甸土 3类土壤。试验样地所处的季风常绿阔叶林土壤为发育于砂岩或砂页岩的赤红壤,表层有机质含量为 4.3%,pH 值为 4.06—4.34,酸性较强,土壤层深度为 60—90 cm。近年来鼎湖山地区大气降水 pH 值较低,变动范围为 4.35—5.65,平均值为 4.90,酸雨频率在 62.7%以上,土壤酸化较严重^[20]。

实验样地所在的季风常绿阔叶林的海拔高度为 250—400 m,是有着近 400 年保护历史的南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。群落终年常绿,垂直结构复杂,物种组成丰富,以常绿树种占绝对优势。地上垂直结构大致分为 5 层,其中乔木 3 层,灌木 1 层,草本苗木 1 层。乔木第一层主要有锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)和华润楠(*Machilus chinensis*)等;乔木第二层主要植物有厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、黄果厚壳桂和翅子树(*Pterospermum acerifolium*)等;乔木第三层主要植物有云南银柴(*Aporosa yunnanensis*)、鼎湖钓樟(*Lindera chunni*)和水石梓(*Sarcosperma laurimum*)等。灌木层植物有栢拉木(*Blastus cochinchinensis*)和罗伞树(*Ardisia quinquegona*)等,密度较大,但多为乔木幼树;草本植物有双盖蕨(*Diplazium donianum*)和山姜(*Alpinia japonica*)等^[21]。

1.2 试验样地设计

在季风常绿阔叶林分别设置 12 个 10 m×10 m 的样方,用于模拟酸雨实验。每个样方四周用 PVC (Polyvinyl chloride) 板材围起,PVC 板材插入地表下 20 cm,地上部分高出地表 5 cm,每个样方之间预留 3 m 宽的缓冲带。根据鼎湖地区近年酸雨的酸度和主要成分比例以及变化趋势,以 H₂SO₄:HNO₃=1:1 的溶液用作模拟酸雨实验材料,以 pH 值为衡量单位,设计 4 个酸雨强度处理,分别为 CK (pH 值 4.5 左右的天然湖水)、T1 (pH 值 4.0)、T2 (pH 值 3.5) 和 T3 (pH 值 3.0),每个处理设 3 个重复。2009 年 6 月份开始进行模拟酸雨处理,每月的月初和月中将配置好的 40L 模拟酸雨,人工均匀喷洒在林地上。在模拟酸雨喷淋期间,T1、T2 和 T3 接受的 H⁺输入量为 9.6,32,96 mol hm⁻² yr⁻¹,约分别相当于自然穿透雨 H⁺输入量的 0.6、2.0 和 6.0 倍^[22]。在上述每个样方随机设置两个直径 20 cm PVC 环,用作土壤呼吸测定,将 PVC 环插入土壤 5 cm 左右,砸实 PVC 环防止漏气,并保持环在整个试验期间位置不变。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集

2011 年 6 月(雨季,模拟酸雨处理 24 个月)、12 月(旱季,模拟酸雨处理 30 个月)和 2012 年 6 月(雨季,模拟酸雨处理 36 个月)在上述样地进行土壤样品采样,分别在每个样方内随机选取 2 个点,去除表土上覆盖的枯枝落叶,用内径 2.5 cm 的土钻分别取 0—10 cm 层次的土壤,每个点取 3—4 钻,混合后装入布袋并用标签做好标记,之后带回实验室。去除样品中可见的根系等动植物残体和石块,并过 2 mm 筛,然后待其自然风干

后用备用。

1.3.2 土壤基本理化性质测定

土壤 pH 值采用水土比 2.5:1 电位法测定;土壤总有机碳用浓硫酸重铬酸钾氧化加热法测定;土壤呼吸利用 LI-cor8100 开路式土壤碳通量系统测定,测定时将 LI-cor8100 的短期测量室置于 PVC 环上并用其携带的温度和湿度探针分别同步测定地表下 5 cm 处土壤温度及含水量,土壤呼吸的测定在每个月的喷酸处理之前完成。土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸提取法测定,其中转化系数为 0.33,测定方法如下:称取 15 g 新鲜土样于 100 mL 烧瓶中,并将同时盛有氯仿和氢氧化钠的小烧杯置入真空干燥器中,盖好盖子用真空泵抽气至氯仿沸腾 2 min 后关闭活塞,在 25°C 下于暗处放置 48 h。取出氯仿后,所有样品都加入 0.5 mol/L K_2SO_4 提取液 50 mL,在复式振荡机上中速振荡 1 h,过滤上层滤液置于储液瓶中。在进行熏蒸的同时,称取同样质量的土样进行浸提和测定,作为未熏蒸对照。取上层滤液 5 mL 于 50 mL 容量瓶中,加水定容后即可用 TOC 仪进行分析测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003、SigmaPlot12.0 和 SPSS 13.0 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)和最小显著性差异法(LSD)比较不同处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 不同酸梯度处理下土壤微生物量碳含量的变化

实验期间分别在 2011 年 6 月(湿季,模拟酸雨处理 24 个月后)、12 月(旱季,模拟酸雨处理 30 个月后)和 2012 年 6 月(湿季,模拟酸雨处理 36 个月后)对样地的表层土壤(0—10 cm)微生物量碳进行 3 次测定,实验结果如图 1(c)和表 1 所示,湿季的微生物量碳含量显著高于旱季($P < 0.01$);不同处理下的土壤微生物量碳在湿季和旱季的含量差异显著,表现为湿季大于旱季。在 3 次测定的结果中,土壤微生物量碳含量有随酸处理强度增加而降低的趋势,T3 处理显著低于 CK 处理($P < 0.05$)。从模拟酸雨处理下土壤微生物量碳含量的下降程度和显著性可看出,模拟酸雨降低了鼎湖山季风常绿阔叶林表层土壤微生物量碳含量,抑制了微生物活性,且旱湿两季差异明显。

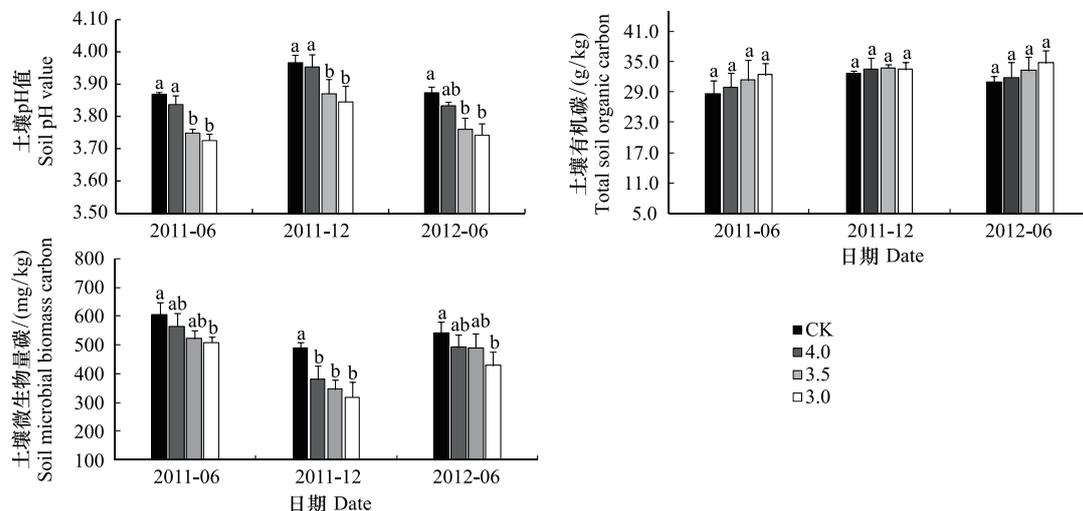


图 1 不同酸处理间土壤 pH 值 (a)、土壤有机碳 (b) 和土壤微生物量碳 (c) 含量变化

Fig.1 The dynamics of soil pH value, soil total organic carbon (TOC) and soil microbial biomass carbon (SMBC) under different acid treatments (mean \pm SD)

图中不同小写字母表示差异达到 $P = 0.05$ 显著水平

2.2 不同酸梯度处理下土壤总有机碳含量的变化

不同酸梯度处理下季风常绿阔叶林土壤总有机碳含量变化如图 1(b) 和表 1 所示。经方差分析表明,3 次测定结果中(模拟酸雨分别处理 24、30、36 个月后)土壤有机碳含量在湿季和旱季并无显著性差异($P > 0.05$),而同一时期不同处理间的测定结果也无统计学上的差异($P > 0.05$)。但从总体上看,土壤总有机碳含量有随酸强度增加而轻微上升的趋势。显然,短期的模拟酸雨处理对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机碳含量没有显著影响。

2.3 不同酸梯度处理下土壤 pH 值的变化

CK 样方在 2011 年 6 月、12 月和 2012 年 6 月的土壤 pH 值分别为 3.87 ± 0.01 、 3.97 ± 0.02 和 3.87 ± 0.02 ,为强酸性土壤。土壤 pH 值有随模拟酸雨酸梯度增加而降低的趋势,其中三次测定结果中的 T2(3.75 ± 0.01 、 3.87 ± 0.04 和 3.76 ± 0.03)和 T3(3.73 ± 0.02 、 3.85 ± 0.05 和 3.74 ± 0.04)处理都显著低于 CK(3.87 ± 0.01 、 3.97 ± 0.02 和 3.87 ± 0.02)和 T1(3.84 ± 0.03 、 3.95 ± 0.04 和 3.83 ± 0.01)处理($P < 0.05$)。可见,模拟酸雨降低了阔叶林土壤 pH 值,使得土壤酸化加剧(图 1(a))。

2.4 不同酸梯度处理下土壤呼吸速率和土壤温湿度的变化

和土壤微生物量碳一样,相同酸度处理下的土壤呼吸速率也均具有明显的季节动态,湿季的土壤呼吸速率显著高于旱季($P < 0.001$)(表 2)。而同一季节数据进行方差分析显示,2011 年 6 月和 2012 年 6 月不同处理间的土壤呼吸速率差异显著($P < 0.05$),其中 T3 处理显著低于 CK 处理($P < 0.05$),这表明模拟酸雨抑制了阔叶林的土壤呼吸,且在湿季中的抑制作用更显著。另外,阔叶林土壤温度和湿度都具有明显的季节动态,造成土壤呼吸速率在湿季较高,旱季较低($P < 0.001$)。不同处理之间的土壤温度和土壤湿度变化在湿季、旱季和全年均无显著差异($P > 0.05$),说明模拟酸雨对土壤温度和土壤湿度没有影响(表 2)。

表 1 处理间土壤微生物量碳、土壤有机碳含量的差异性(平均值 \pm 标准偏差)

Table 1 Differences in soil microbial biomass carbon and soil total organic carbon under different treatments (mean \pm SD)

碳组分 Carbon fractions	CK Control Check	T1	%变化率 % Change rate	T2	%变化率 % Change rate	T3	%变化率 % Change rate
微生物量碳 Soil microbial biomass	Jun-2011 603.76 \pm 46.18a *	565.41 \pm 44.48ab *	- 6.35	521.58 \pm 30.92ab *	- 13.61	509.49 \pm 19.40b *	- 15.61
	Dec-2011 488.92 \pm 22.71a *	379.65 \pm 49.46b *	- 22.35	346.08 \pm 33.81b *	- 29.22	318.00 \pm 52.35b *	- 34.96
carbon/(mg/kg)	Jun-2012 540.48 \pm 39.11a *	492.30 \pm 43.15ab *	- 8.92	489.65 \pm 51.39ab *	- 9.41	428.53 \pm 49.66b *	- 20.71
土壤总有机碳 Total organic	Jun-2011 28.59 \pm 2.78a	30.03 \pm 2.79a	+ 5.04	31.36 \pm 3.95a	+ 9.69	32.46 \pm 2.26a	+ 13.54
	Dec-2011 32.66 \pm 0.64a	33.62 \pm 2.10a	+ 2.94	33.84 \pm 0.64a	+ 3.61	33.51 \pm 1.51a	+ 2.60
carbon/(g/kg)	Jun-2012 30.95 \pm 1.13a	31.77 \pm 3.20a	+ 2.63	33.32 \pm 2.62a	+ 7.64	34.82 \pm 2.44a	+ 12.49

表 2 处理间土壤呼吸速率的差异性和土壤温、湿度背景(平均值 \pm 标准偏差)

Table 2 Differences in soil respiration rates under different treatments, the background of soil temperature and soil moisture (mean \pm SD)

土壤指标 Soil indexes	时间 Time	CK	T1	T2	T3
土壤呼吸速率/($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Wet season-2011	3.64 \pm 0.24a *	3.54 \pm 0.19a *	3.11 \pm 0.52ab *	2.81 \pm 0.11b *
Soil respiration rate	Dry season-2011	2.34 \pm 0.09a *	2.50 \pm 0.09a *	2.23 \pm 0.27a *	2.03 \pm 0.17a *
	Wet season-2012	3.78 \pm 0.14a *	3.55 \pm 0.13ab *	3.33 \pm 0.38ab *	3.13 \pm 0.11b *
土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$	Wet season-2011	23.54 \pm 0.05 *	23.51 \pm 0.13 *	23.48 \pm 0.15 *	23.49 \pm 0.05 *
Soil temperature	Dry season-2011	16.19 \pm 0.05 *	16.30 \pm 0.15 *	16.37 \pm 0.04 *	16.37 \pm 0.16 *
	Wet season-2012	24.38 \pm 0.04 *	24.23 \pm 0.13 *	24.13 \pm 0.07 *	24.15 \pm 0.10 *
土壤湿度(V/V%)	Wet season-2011	30.16 \pm 1.77 *	29.79 \pm 0.68 *	29.56 \pm 0.16 *	30.43 \pm 1.83 *
Soil moisture	Dry season-2011	23.50 \pm 0.85 *	22.70 \pm 0.41 *	23.00 \pm 0.91 *	23.21 \pm 0.78 *
	Wet season-2012	35.27 \pm 1.16 *	34.79 \pm 0.43 *	34.83 \pm 0.53 *	34.94 \pm 1.30 *

%变化率 = 100 ((CK 的含量 - 每个处理的含量) / CK 的含量) % (同一季节), “+”表示相对与对照增加,“-”表示相对于对照减少; 同一行中数据后不同小写字母表示差异达到 $P = 0.05$ 显著水平。同一列中数据后 * 标记者表示湿季和旱季之间差异达到 $P = 0.05$ 显著水平

3 讨论

3.1 模拟酸雨对土壤微生物量碳的影响

土壤微生物量是土壤系统的重要组成部分,也是整个生态系统中养分转化和能量循环的关键动力^[23]。土壤微生物量能较灵敏和准确地反映出微生物在土壤中的实际含量和作用潜力。土壤微生物量碳是土壤有机碳最具活性的部分,可代表微生物量的大小^[24]。影响土壤微生物量碳的因素很多,例如碳氮的限制、植被种类、土地利用方式、管理措施、土壤温度和湿度、土壤质地和性质等^[25-26],而土壤 pH 值也是其中之一。在以往的研究中,土壤微生物量往往与土壤 pH 值相关,pH 值较低的土壤中微生物量碳也相应较低^[27-29],当土壤 pH 值下降到 3 或者 2 时影响最大^[30-31];高志红等^[32]也指出,各种微生物都有最适宜的 pH 值范围,过低会对微生物产生抑制作用。酸雨对土壤微生物量碳的影响可能与酸雨胁迫下土壤持续酸化有关;有研究者在德国中部地区森林进行了土壤酸梯度实验,结果发现,当土壤 pH 值小于 5 的时候,土壤微生物量明显减少^[33]。本研究样地对照样方土壤为强酸性土壤(pH 值小于 4),表层土壤 pH 值随酸处理强度增加而下降,且 3 次测定结果中的 T2 和 T3 处理都显著低于 CK 和 T1 处理($P < 0.05$),虽然 pH 值未低于 3,但也表明原本酸化严重的土壤的酸化在持续加剧,这与一些热带和亚热带森林的模拟酸雨结果类似^[34-36]。土壤酸化的加剧直接或间接地对样地中土壤微生物量碳产生影响,从图 1(c)和表 1 可以看出,土壤微生物量碳含量随模拟酸雨强度增加而减少,且两次测定的结果中高强度的 T3 处理都显著低于对照样方($P < 0.05$),可见模拟酸雨的持续作用降低了土壤微生物量碳的含量。另一方面,研究表明酸雨加快了土壤表层盐基离子的淋溶, Ca^+ 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 大量流失导致土壤养分缺乏与进一步酸化^[37-38],而且土壤酸化还使土壤中 Al 等有害元素活化和 H^+ 浓度增加,从而对土壤微生物的生长环境产生负面效应^[39-40]。 Al^{3+} 对生物生长危害较为严重,铝毒效应可以引起植物根系生长量减少,根际微生物生长就受到一定的抑制,微生物量也相应减少。本研究中土壤呼吸速率随酸处理强度增加显著降低,这也与微生物量碳降低结果相符合。

另一方面,此次测定的土壤微生物量碳和土壤呼吸速率在湿季和旱季都存在显著的差异。王国兵等^[41]将森林土壤微生物量的季节波动划分为夏高冬低型和旱季湿季节交替循环型,季节变化主要通过温度和湿度条件对土壤微生物过程产生影响^[42-43]。鼎湖山地属南亚热带季风气候,夏季高温多雨,水热充沛,植物光合作用较强,根系生长较早季旺盛。土壤温度和湿度最高的时期也正是凋落物分解速率最快、微生物活性最高的时期,由于可供微生物利用的养分大大增加,土壤微生物活性和数量也不断增加;而旱季则刚好相反,加上土壤酸化的抑制作用,微生物量相对较低。因此湿季中土壤微生物量和土壤呼吸速率都显著高于旱季。

酸雨的长期淋溶使土壤酸化不断加剧,土壤微生物量碳含量下降及土壤呼吸速率的降低,表明土壤微生物的数量和群落组成结构将受到一定影响^[44],参与有机碳循环的微生物及相关酶活性也会受到抑制,这必将导致微生物对碳源利用率的下降,促进土壤有机碳的存埋。

3.2 模拟酸雨对土壤有机碳的影响

有研究表明,酸性淋入液使土壤有机质含量轻微下降,下降的幅度随淋入液的酸度加大而变大^[45]。但在本实验中土壤有机碳含量无论是在各酸度处理下还是在不同年份季节中并没有显著性差异($P > 0.05$),出现这样的结果可能是因森林土壤有机碳含量在短时间不会因模拟酸雨处理出现太大变化^[6]。因此在土壤有机碳含量差异不显著的情况下,用微生物商(qSMBC,即土壤微生物量碳(SMBC)与土壤有机碳(TOC)的比值)来衡量一个生态系统土壤有机碳积累或损失的效用就会失去。微生物商作为森林土壤质量变化过程的活性指标有一定的优点,可作为有机碳变化的早期指标,但它并不能完全代替土壤有机碳来反映土壤质量的变化趋势。当土壤有机碳的变化刚刚产生或未达到平衡状态时,该指标具有一定的指示作用,但当土壤有机碳达到平衡状态后该指标就需谨慎使用^[18,46]。本研究中,土壤表层 qSMBC 值在 CK 处理中的平均值为 1.85%,与处于鼎湖山顶级群落的 400 年自然林碳循环基本达到平衡状态时的 qSMBC 值 1.95%^[47]接近,说明本实验选取的季风常绿阔叶林样地属于鼎湖山森林演替系列的顶级阶段,土壤有机碳在一定程度上已达到平衡状态,

虽然受到模拟酸雨处理的影响,土壤表层及地上部分的生态小环境发生了一定的变化,但要打破这种平衡状态仍需较长时间,因此酸沉降利于生态系统有机碳累积也仍需长期实验的验证。

4 结论

在模拟酸雨处理下,鼎湖山季风常绿阔叶林土壤酸化不断加剧,土壤微生物量碳含量和土壤呼吸速率有随模拟酸雨处理强度增加而降低的趋势,且旱季和湿季的结果差异明显。在模拟酸雨背景下,土壤微生物活性受到抑制,土壤微生物量碳含量和土壤呼吸速率不断降低,这有利于土壤碳的累积。但由于实验时间较短,土壤有机碳含量在各酸度处理间无显著差异。本试验只是初步探讨了模拟酸雨对微生物量碳和土壤有机碳的影响,并初步分析了其影响机理,但要确切了解酸雨胁迫对亚热带森林土壤微生物的影响及土壤生态系统有机碳累积的情况,还需要更长的时间及更深入的研究。

参考文献 (References):

- [1] Trumbore S E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. *Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America*, 1997, 94(16):8284-8291.
- [2] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1(1):77-91.
- [3] Eswaran H, Van den Berg E, Reich R. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1):192-194.
- [4] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, Hackler J L, Lawrence K T, Chomentowski W H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 2000, 403(6767):301-304.
- [5] Powelson D S, Brookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19(2):159-164.
- [6] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30(2):195-207.
- [7] 方熊, 刘菊秀, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 赵亮. 降水变化、氮添加对鼎湖山主要森林土壤有机碳矿化和土壤微生物碳的影响. *应用与环境生物学报*, 2012, 18(4):531-538.
- [8] Powelson D S, Jenkinson D S. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. *The Journal of Agricultural Science*, 1981, 97(3):713-721.
- [9] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 刘海琴. 水旱轮作条件下土壤有机碳的分解及土壤微生物量碳的周转特征. *江苏农业学报*, 2003, 19(1):33-36.
- [10] 朱治建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较. *林业科学研究*, 2006, 19(4):523-526.
- [11] Insam H, Domsch K H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequence of reclamation sites. *Microbial Ecology*, 1989, 15(2):177-188.
- [12] Larssen T, Carmichael G R. Acid rain and acidification in China; the importance of base cation deposition. *Environmental Pollution*, 2000, 110(1):89-102.
- [13] Zhang J E, Ouyang Y, Ling D J. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from the Latosol in south China. *Chemosphere*, 2007, 67(11):2131-2137.
- [14] 王文兴, 许鹏举. 中国大气降水化学研究进展. *化学进展*, 2009, 21(2/3):266-281.
- [15] 仇荣亮, 于锡军. 陆地生态系统酸沉降缓冲机制与缓冲能力. *中山大学学报:自然科学版*, 1998, 37(2):157-161.
- [16] Mastro R E, Chhonkar P K, Singh D, Patra A K. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a subtropical inceptisol. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(7):1577-1582.
- [17] Piao H C, Liu G S, Wu Y Y, Xu W B. Relationships of soil microbial biomass carbon and organic carbon with environmental parameters in mountainous soils of southwest China. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 33(4):347-350.
- [18] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 肖和艾, 吴金水. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应. *中国农业科学*, 2006, 39(7):1411-1418.
- [19] 鼎湖山国家级自然保护区的自然条件. [2010-09-25]. www.dhs.scib.cas.cn/gkjj/qjgg_zrtj/201009/t20100925_2973528.html
- [20] 刘菊秀, 张德强, 周国逸, 温达志, 张倩媚. 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.
- [21] 彭少麟. 亚热带森林群落动态学. 北京:科学出版社, 1996, 57-71.

- [22] Liang G H, Liu X Z, Chen X M, Qiu Q Y, Zhang D Q, Chu G W, Liu J X, Liu S Z, Zhou G Y. Response of soil respiration to acid rain in forests of different maturity in southern China. *PLoS ONE*, 2013, 8(4):e62207.
- [23] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应. *南京农业大学学报*, 1996, 19(4):45-51.
- [24] Arango A S, Monteiro R T. Microbial biomass and activity in a Brazilian soil amended with untreated and composted textile sludge. *Chemosphere*, 2006, 64(6):1043-1046.
- [25] 黄辉, 陈光水, 谢锦升, 黄朝法. 土壤微生物生物量碳及其影响因子研究进展. *湖北林业科技*, 2008, (4):34-41.
- [26] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological Reviews*, 1992, 67(3):321-358.
- [27] Jenkinson D S, Davidson S A, Powlson D S. Adenosine triphosphate and microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1979, 11(2):521-527.
- [28] Cerri C C, Jenkinson D S. Formation of microbial biomass during the decomposition of ¹⁴C-labelled ryegrass in soil. *Journal of Soil Science*, 1981, 32(4):619-626.
- [29] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. Microbial biomass measurements in forest soils: the use of the chloroform fumigation-incubation technique in strongly acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6):697-702.
- [30] Killham K, Firestone M K, McColl J G. Acid rain and soil microbial activity: effects and their mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12:133-137.
- [31] Wolter V, Joergensen R G. Microbial carbon turnover in beech forest soils at different stages of acidification. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(9):897-902.
- [32] 高志红, 张万里, 张庆费. 森林凋落物生态功能研究概况及展望. *东北林业大学学报*, 2004, 32(6):79-80, 83-83.
- [33] Joergensen R G, Anderson TH, Wolters V. Carbon and nitrogen relationships in the microbial biomass of soils in beech (*Fagus sylvatica* L) forests. *Biology & Fertility of Soils*, 1995, 19(2/3):141-147.
- [34] Vanhala P, Fritze H, Neuvonen S. Prolonged simulated acid rain treatment in the subarctic: Effect on the soil respiration rate and microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 23(1):7-14.
- [35] Neuvonen S, Suomela J. The effect of simulated acid rain on pine needle and birch leaf litter decomposition. *Journal of Applied Ecology*, 1990, 27(3):857-872.
- [36] 刘菊秀, 周国逸, 张德强. 酸雨对鼎湖山土壤的累积效应及荷木的反应. *中国环境科学*, 2003, 23(1):90-94.
- [37] 高太忠, 戚鹏, 张杨, 李景印. 酸雨对土壤营养元素迁移转化的影响. *生态环境*, 2004, 13(1):23-26.
- [38] 刘滔, 尹光彩, 刘菊秀, 梁国华, 吴建平. 酸沉降对南亚热带森林土壤主要元素的影响. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(2):255-261.
- [39] Fan H B, Wang Y H. Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hardwood species growing in China. *Forest Ecology and Management*, 2000, 126(3):321-329.
- [40] 刘菊秀. 酸沉降下铅毒对森林的影响(综述). *热带亚热带植物学报*, 2000, 8(3):269-274.
- [41] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 何容. 森林土壤微生物生物量动态变化研究进展. *安徽农业大学学报*, 2009, 36(1):100-104.
- [42] Widen B. Seasonal variation in forest-floor CO₂ exchange in a Swedish coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(4):283-297.
- [43] Grayston S J, Vaughan D, Jones D. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: The importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Applied Soil Ecology*, 1997, 5(1):29-56.
- [44] 孟磊, 章家恩, 徐华勤, 徐富春, 谢俊芳, 余家瑜, 李宏哲. 模拟酸雨对广东赤红壤的中小型动物群落组成及多样性的影响. *生态学杂志*, 2012, 29(11):2204-2209.
- [45] 刘洪杰. 酸性淋洗对土壤有机质和粘粒含量的影响. *环境科学*, 1991, 12(2):42-44.
- [46] Lützow V M, Leifeld J, Kainz M, Kogel-Knabner I, Munch J C. Indications for soil organic matter quality in soils under different management. *Geoderma*, 2002, 105(3/4):243-258.
- [47] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 周丽霞, 张德强, 丁明懋. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. *生态学报*, 2003, 23(8):207-212.