

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201504032

梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 模拟酸雨对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤呼吸的初期影响[J]. 广西植物, 2016, 36(2):145-153

LIANG GH, WU JP, XIONG X, et al. Effects of simulated acid rain on soil respiration in a monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan Nature Reserve[J]. Guihaia, 2016, 36(2):145-153

模拟酸雨对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤呼吸的初期影响

梁国华¹, 吴建平^{2,3}, 熊鑫^{2,3}, 吴小映¹, 褚国伟²,
周国逸², 曾任森¹, 张德强^{2*}

(1. 华南农业大学, 广州 510642; 2. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 通过在鼎湖山季风常绿阔叶林(季风林)进行野外模拟酸雨试验, 对不同酸雨强度处理下的林地土壤呼吸速率进行原位测定, 探讨酸雨对南亚热带森林土壤呼吸的初期影响。结果表明: 在两年的测定周期内, 4个酸雨水平: 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) 处理下的年平均土壤呼吸速率分别为 (3.07 ± 0.08) 、 (3.06 ± 0.17) 、 (2.78 ± 0.29) 和 $(2.56 \pm 0.08) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 T3 处理显著低于 CK 和 T1 处理 ($P < 0.05$), 说明模拟酸雨抑制了季风林土壤呼吸。这种抑制作用大体上随处理时间的延长而逐渐显著, 处理间的差异只在测定周期的第二年达到显著水平, 且抑制作用的差异显著性只出现在湿季 ($P < 0.05$)。模拟酸雨对土壤呼吸的抑制作用可能与其胁迫下土壤酸化而导致土壤微生物异养呼吸及凋落物 CO_2 释放量下降有关。表现为模拟酸雨导致土壤 pH 值降低, 使得土壤酸化加剧; 降低了土壤微生物量碳、氮含量, 抑制了微生物活性; 提高了凋落物质量残留率, 抑制了凋落物分解。还与土壤呼吸结果相对应, 上述指标对模拟酸雨的响应也大体上随处理时间的延长而逐渐显著。另外, 土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 值随处理 pH 值降低有下降的趋势, 表明酸雨处理在一定程度上降低了土壤呼吸的温度敏感性。

关键词: 模拟酸雨, 土壤呼吸, 土壤 pH 值, 土壤微生物活性, 凋落物分解, 季风常绿阔叶林

中图分类号: Q948.113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)02-0145-09

Effects of simulated acid rain on soil respiration in a monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan Nature Reserve

LIANG Guo-Hua¹, WU Jian-Ping^{2,3}, XIONG Xin^{2,3}, WU Xiao-Ying¹,
CHU Guo-Wei², ZHOU Guo-Yi², Zeng Ren-Sen¹, ZHANG De-Qiang^{2*}

(1. South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Determining the effects of elevated acid rain on forest soil respiration can provide useful information for understanding of the process of carbon cycle of forest ecosystem and its response to global change. Therefore, a simulated acid rain (SAR) experiment was conducted in a monsoon evergreen broad-leaved forest at the Dinghushan Nature Reserve. SAR treatments included CK (the local lake water, pH4.5), T1 (pH4.0), T2 (pH3.5), T3 (pH3.0) with three

收稿日期: 2015-04-23 修回日期: 2015-08-07

基金项目: 广东省科技计划项目(2014A020216031); 中国博士后科学基金(2014M552207); 国家自然科学基金(31500353, 31428001, 41430529) [Supported by Guangdong Science and Technology Development (2014A020216031); Science Foundation for Post Doctorate Research of China (2014M552207); National Natural Science Foundation of China (31500353, 31428001, 41430529)].

作者简介: 梁国华(1985-), 男, 广东江门人, 博士, 主要从事森林生态学研究, (E-mail) lianggh@scbg.ac.cn.

* **通讯作者:** 张德强, 研究员, 博士生导师, 主要从事陆地生态系统对全球变化的响应与适应研究, (E-mail) zhangdeq@scib.ac.cn.

replicates. SAR experiments were initiated in June 2009 and were sprayed twice a month during the study period. Responses of soil respiration to SAR were studied from April 2010 to March 2012 with a LI-8100 soil CO₂ efflux system. The results showed that mean annual soil respiration rates for the CK, T1, T2, and T3 treatments were (3.07 ± 0.08) , (3.06 ± 0.17) , (2.78 ± 0.29) , (2.56 ± 0.08) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, and the T3 treatment was significant lower than the CK and T1 treatments ($P < 0.05$), indicating that soil respiration was depressed under SAR. These negative effects were evident in the warm-wet seasons ($P < 0.05$), but not in the cool-dry ones. In addition, by analyzing the annual soil respiration of each year, we found that these negative effects had been strengthened over time with significant difference among treatments occurred only in the second year. The depression of soil respiration may be related to the reduction of heterotrophic respiration and CO₂ production from litter caused by soil acidification under SAR, as we found that soil pH value and soil microbial biomass carbon and nitrogen significantly decreased after exposure to SAR for two years; and litter decomposition rate was also depressed during the study period. Coincide with the situation of soil respiration, the negative effects SAR on these index had been strengthened over time with significant differences among treatments mostly occurring in the later stage of the study period. Furthermore, we found the effects of SAR on the temperature response of soil respiration, with a decline in Q_{10} during the study period, suggesting that SAR would decrease the temperature sensitivity of soil respiration. According to the results of this study, soil carbon in forests of subtropical China would accumulate as the reduction of soil respiration under the continued acid rain in the future.

Key words: simulated acid rain, soil respiration, soil pH value, soil microbial activities, litter decomposition, monsoon evergreen broad-leaved forest

大气中温室气体浓度上升而导致的全球变暖是人类目前面临的主要环境问题之一,而 CO₂ 是最重要的温室气体,其对全球变暖的贡献率在 60% 以上(杨玉盛等,2004)。土壤呼吸是生态系统碳循环的重要环节,也是全球碳循环的一个主要流通过程。每年全球土壤由于土壤呼吸作用向大气释放的碳为 68 Pg,仅次于全球总初级生产力(相当于碳量 100 ~ 120 Pg · a⁻¹),而超过全球陆地生态系统的净初级生产力(相当于碳量 50 ~ 60 Pg · a⁻¹)(Raich & Schlesinger, 1992),是化石燃料燃烧释放碳量(5.2 Pg · a⁻¹)的 10 多倍(Marland & Rotty, 1984)。所以,土壤呼吸即使发生微小的变化,其对全球碳循环,尤其是对大气 CO₂ 浓度的变化将产生巨大的影响。正因为如此,关于土壤呼吸的研究近几十年来受到科学界的高度关注(彭少麟等,2002),并成为全球碳循环研究的重要内容之一(Schimel et al, 1995)。森林土壤碳是全球碳库的重要组成部分,占全球土壤碳(1 400 Pg)的 73%(Post et al, 1982; Jenkinson et al, 1991),是森林植被碳库的 2 倍多(Dixon et al, 1994),在全球碳循环方面发挥重要作用。由于全球森林过度采伐和土地利用变化而导致土壤 CO₂ 的释放,大约占过去两个世纪以来因人类活动释放的 CO₂ 总量的一半(Post et al, 1982; 杨玉盛等, 2004)。故探索森林土壤呼吸的动态变化及其调控机理,了解全球变化背景下森林土壤作为碳源还是碳汇的

问题具有现实的指导意义。

自 20 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所排放的大气污染物二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)(Larssen et al, 2000; Zhang et al, 2007)。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(王文兴和许鹏举, 2009)。森林作为陆地生态系统的主体,也是酸雨的主要受体。日益严重的酸雨问题必然会影响森林生态系统的结构和功能,其导致森林土壤酸化所带来的直接或间接的影响已有很多报道(刘菊秀等, 2003a; Laverman et al, 2001);而土壤呼吸作为全球碳循环流通的关键环节之一,其对酸雨增加的响应亦受到国内外学者的关注(刘源月等, 2010; Vanhala et al, 1996)。然而,不同的研究者关于酸雨对土壤呼吸影响的报道结果往往不一致(Vanhala, 2002)。目前酸雨对森林土壤呼吸影响的研究多见于北美和欧洲这些经济发达的温带区域(Laverman et al, 2001)。Salonius(1990)在 20 世纪 80 年代研究了云杉林土壤有机层呼吸速率对模拟酸雨的响应,发现只有在重度酸雨(pH2.6)下才抑制了微生物呼吸。Vanhala et al(1996)在芬兰亚寒带森林进行了长期(8 a)的模拟酸雨对土壤呼吸及土壤微生物影响的研究,发现微生物多样性未受到酸雨的显

著影响,但强酸雨却使土壤呼吸降低了 20%。与北美和欧洲这些温带区域相比,酸雨对中国热带和亚热带森林土壤呼吸影响的研究起步较晚、报道较少(张勇等,2011;Chen et al,2012),且受野外实验条件的限制,研究方法大多以室内盆栽培养模拟实验为主(谢小赞等,2009),其研究结果能否适用于野外自然状况还难以定论。故在酸雨日益严重的中国南亚热带地区,开展野外人工模拟酸雨实验并深入研究酸雨对森林土壤呼吸的影响显得非常紧迫。为此,我们在鼎湖山以南亚热带具有典型代表性的季风常绿阔叶林为研究对象,通过在自然林里开展人工模拟酸雨控制试验,对土壤呼吸速率及其相关环境因子进行观测,主要探讨季风常绿阔叶林土壤呼吸在酸雨胁迫下的响应规律如何?响应规律的机理是什么?研究结果将为正确评估森林生态系统中的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 研究区与样地概况

研究地设在广东省中部、珠江三角洲西南的肇庆市鼎湖山国家级自然保护区(112°30′~112°33′E, 23°09′~23°11′N)内,距广州 86 km,面积为 1 113 hm²。该地区属南亚热带季风气候,年均气温 20.9℃,最冷月(1月)和最热月(7月)的平均温度分别为 12.6℃和 28.0℃,年均相对湿度为 80%,年均降雨量和蒸发量分别为 1 929 mm 和 1 115 mm,4~9 月为湿季,10 月至次年 3 月为旱季(刘菊秀等,2003b)。保护区内有着群落演替进程处于不同阶段的 3 种森林(马尾松针叶林、马尾松针阔混交林和季风常绿阔叶林),本实验样地所在的季风常绿阔叶林海拔 250~400 m,是有着近 400 a 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,群落优势树种主要有锥栗、荷木、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、黄果厚壳桂(*C. concinna*)和鼎湖钓樟(*Lindera chunni*)等(任海等,1996)。

1.2 试验样地设计

2009 年初在季风林分别设置 12 个 10 m×10 m 的样方用于模拟酸雨实验。每个样方四周用水泥板材围起,水泥板材插入地表下 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其变化趋势,以 H₂SO₄:HNO₃=1:1 的溶液用作为模拟酸雨实验材料,以 pH 值为衡量单位,设计 4 个酸雨强度处理,分别为 CK (pH4.5 左右的天然湖水)、T1 (pH4.0)、T2 (pH3.5)和 T3 (pH3.0),每处理设 3 个重复。2009 年 6 月开始进行模拟酸雨处理,每月初和月中将配置好的 40 L 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,分别约相当于自然穿透雨 H⁺输入量的 0.3、1.0 和 3.0 倍。在上述的每个样方随机设置 2 个直径 20 cm 的 PVC 环用作土壤呼吸实验,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 土壤呼吸速率的测定

经上述处理 10 个月后(土壤呼吸实验进行期间继续同样的处理),于 2010 年 4 月至 2012 年 3 月,利用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统测定模拟酸雨胁迫下季风林的土壤呼吸速率,每月初和月中进行 2 次测定,测定时间为 9:00~12:00,测定时将 LI-8100 的短期测量室置于 PVC 环之上,并用其携带的温、湿度探针同步测定地表下 5 cm 处土壤温度及 5 cm 处土壤含水量。

1.4 土壤 pH 值、土壤微生物量碳、氮的测定

于 2010 年 6 月和 2011 年 6 月(分别为模拟酸雨 1 a 和 2 a 后),在上述样地进行土壤样品采集,每个样方随机选取 4 个点,去除表土上覆盖的枯枝落叶,用内径 2.5 cm 的土钻取 0~10 cm 层次土壤,每个点取 4 钻,混合后装入布袋并用标签做好标记带回实验室,去除样品中可见的根系和石块等,过 2 mm 筛。土壤微生物量碳、氮含量测定采用新鲜土,用氯仿熏蒸提取法,其中转化系数为 0.45;土壤 pH 值采用自然风干土,以 1 mol·L⁻¹氯化钾浸提(水土比为 2.5:1)后用 pH 计测定。

1.5 凋落物分解速率的测定

收集季风林优势种锥栗的新鲜凋落叶,风干,充分混匀,一次性分装在尼龙网缝制的分解袋中,每个分解袋装 12 g,装袋时另取部分凋落叶测定含水量。分解袋规格为 15 cm×20 cm,尼龙网孔径大小为上表面 2 mm,下表面 0.5 mm。2009 年 10 月布置分解袋,在每个样方中放入 14 个分解袋。放置凋落物分解袋时,先清除地表凋落物层,再将分解袋紧贴地面

放置,表面简单覆盖一层凋落物。此后每隔 3 个月取 1 次样,每样方每次取 2 袋,试验期间共收集 7 次。收集的分解袋拿回实验室,小心清除凋落物表面的泥土,65 ℃烘干称重。

1.6 数据的分析

用统计软件 SAS8.0 进行数据处理分析,用 Repeated measured ANOVA 检验土壤呼吸、土壤温度、土壤湿度和凋落物质量残留率在处理间的差异显著性,利用 One-Way ANOVA 检验年均土壤呼吸速率、土壤 pH 值、土壤微生物量碳、氮含量和凋落物质量残留率的差异显著性,用回归分析方法建立土壤温度、土壤湿度与土壤呼吸之间的统计关系。土壤呼吸与温度之间关系采用指数模型: $y = ae^{bt}$ 。式中, y 为土壤呼吸速率; T 为土壤温度; a 是温度为 0 ℃时的土壤呼吸 (Luo et al, 2001); b 为温度反应系数。 Q_{10} 值通过下式确定 (Xu & Qi, 2001): $Q_{10} = e^{10b}$ 。式中, b 同上式。凋落物的分解速率采用负指数衰减模型计算: $y = ae^{-kt}$ 。式中, y 为质量残留率(%), t 为时间,通常以年或月表示, a 为拟合参数, k 即为年分解速率常数($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)。某一时刻凋落物残留率 = (某一时间凋落物干质量/初始时间干质量) × 100%。用 SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨对土壤温度与土壤湿度的影响

季风林土壤温度和土壤湿度在不同处理下都具有明显的季节动态,湿季(4-9 月)较高,旱季(10 月至翌年 3 月)较低($P < 0.05$),对照样方的年均土壤温度和年均土壤湿度分别为 $(20.00 \pm 0.04)^\circ\text{C}$ 和 $(27.68 \pm 0.70)\%$ 。两年的测定周期内,不同处理间的土壤温度和土壤湿度在湿季、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无影响(图 1:A,B)。

2.2 模拟酸雨对土壤呼吸速率的影响

由图 1:C 及表 1 可知,不同处理下的土壤呼吸速率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($P < 0.05$);对两年观测周期内的数据进行重复测量方差分析显示,不同处理间的土壤呼吸差异显著($P < 0.05$)。CK、T1、T2 和 T3 处理下的年均土壤呼吸速率分别为 (3.07 ± 0.08) 、 (3.06 ± 0.17) 、 (2.78 ± 0.29) 和 $(2.56 \pm 0.08) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其中 T3 处理显著低于 CK 和 T1 处理($P < 0.05$),这

表明模拟酸雨抑制了季风林的土壤呼吸。这种抑制作用大体上随处理时间的延长而逐渐显著,表现为在测定周期的第一年,与 CK 相比,T1、T2 和 T3 处理下的年均土壤呼吸速率分别降低 2.0%、7.8% 和 13.6%,各处理间差异不显著;而在第二年,下降幅度明显增大,分别为 -0.9、10.9% 和 19.3%,各处理间差异显著($P < 0.05$)。但模拟酸雨对土壤呼吸的抑制作用具有季节差异性,处理间的差异性只出现在湿季,如在第二年的湿季,与 CK 相比,T3 的下降幅度达 22.96% ($P < 0.05$);各处理间的土壤呼吸速率在旱季无显著差异。

2.3 模拟酸雨对土壤 pH 值、土壤微生物量碳、氮含量的影响

实验期间的两次测定中,土壤 pH 值、土壤微生物量碳、氮含量的平均值在对照样方分别为 (3.89 ± 0.03) 、 (570.25 ± 57.06) 和 $(98.33 \pm 16.94) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2,图 3)。方差分析表明,模拟酸雨对 2010 年 6 月测定(模拟酸雨 1 a 后)的土壤 pH 值、土壤微生物量碳、氮含量均无显著影响($P > 0.05$),但模拟酸雨却均显著地降低了 2011 年 6 月测定(模拟酸雨 2 a 后)的这三个指标($P < 0.05$)。在后一次的测定中,与 CK 相比,土壤 pH 值在 T1、T2 和 T3 处理分别下降了 0.05、0.14 和 0.16,其中 T2 和 T3 处理显著低于 CK;土壤微生物量碳含量分别下降了 6.4%、13.6% 和 15.6%,其中 T2 和 T3 处理显著低于 CK;土壤微生物量氮含量则分别下降了 12.5%、20.0% 和 29.6%,其中 T3 处理显著低于 CK。可见,模拟酸雨降低了森林土壤的 pH 值,使得土壤酸化加剧;同时,降低了土壤微生物量碳、氮含量,抑制了土壤微生物活性。与土壤呼吸结果对应,模拟酸雨对土壤的酸化效应和对微生物活性的抑制效应会随着模拟酸雨处理时间的延长而逐渐显著。

2.4 模拟酸雨对凋落物质量残留率的影响

图 4 是季风林优势树种锥栗叶凋落叶在不同酸雨处理下的质量残留率变化情况,在整个观测阶段,质量残留率(经历相同分解时间相比较)在酸处理样方均大于 CK,可见模拟酸雨处理对凋落物分解有不同程度的抑制作用。经过 21 个月的分解,CK、T1、T2 和 T3 处理的质量残留率分别为 13.92%、15.31%、16.58% 和 21.22%,为 $\text{CK} < \text{T1} < \text{T2} < \text{T3}$ 。模拟酸雨对质量残留率的影响与酸雨处理时间有关。分解实验开始后的第 3 个月,T1、T2 和 T3 的质量残留率与 CK 的差值在整个分解阶段为最小,随着模

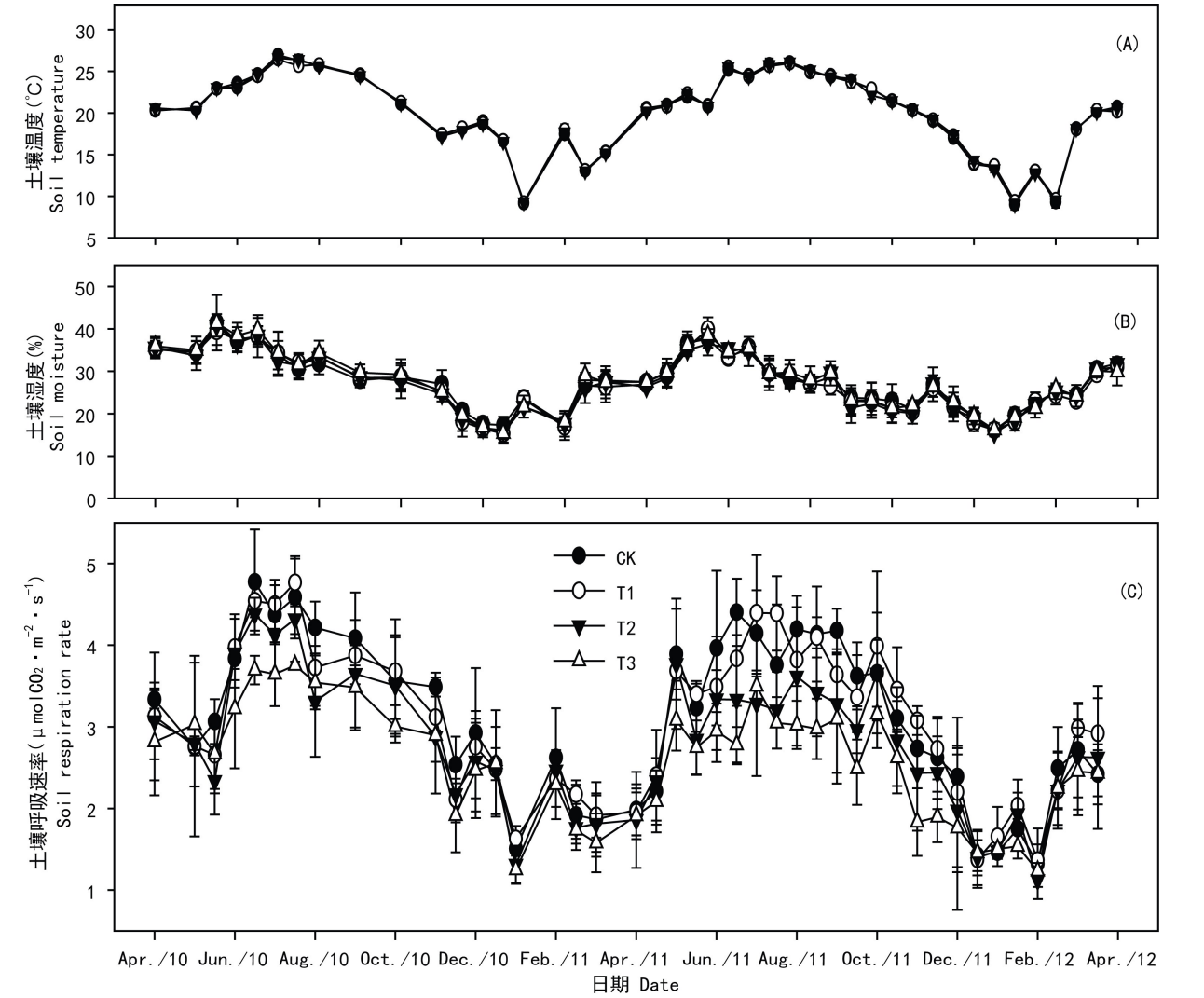


图 1 不同处理间土壤温度(A)、土壤湿度(B)和土壤呼吸速率(C)的季节动态(2010 年 4 月-2012 年 3 月)
Fig. 1 Seasonal dynamics of soil temperatures (A), soil moistures (B), and soil respiration rates (C) under different treatments (from April 2010 to March 2012)

表 1 土壤呼吸速率在不同处理间的差异性 (平均值±标准偏差)
Table 1 Differences in soil respiration rates under different treatments (mean±SD, μmol · m⁻² · s⁻¹)

年份 Year	季节 Season	CK	T1	%	T2	%	T3	%
第一年 The 1 st year	湿季 Wet season	3.82±0.19a *	3.77±0.39a *	-1.2	3.54±0.29a *	-7.2	3.32±0.08a *	-13.1
	旱季 Dry season	2.55±0.05a *	2.47±0.10a *	-3.2	2.33±0.31a *	-8.7	2.19±0.28a *	-14.3
	年平均 Annual Mean	3.18±0.12a	3.12±0.22a	-2.0	2.94±0.19a	-7.8	2.75±0.14a	-13.6
第二年 The 2 nd year	湿季 Wet season	3.64±0.24a *	3.54±0.19a *	-2.8	3.11±0.52ab *	-14.8	2.81±0.11b *	-23.0
	旱季 Dry season	2.34±0.09a *	2.50±0.09a *	+6.8	2.23±0.27a *	-4.8	2.03±0.17a *	-13.5
	年平均 Annual Mean	2.99±0.14a	3.02±0.13a	+0.9	2.67±0.38ab	-10.9	2.42±0.11b	-19.3

注：%(相对与对照变化)=(CK 的含量-每个处理的含量)/CK 的含量)×100% (同一时间段);“+”表示相对于对照增加;“-”表示相对于对照减少。同一行中不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。同一列中用 * 标记者表示其旱湿季之间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。
Note: %(change related to CK)=(contents of the CK-contents of each treatment) / contents of the CK)×100% (in the same period), “+” indicates increasing and “-” indicates decreasing related to CK. Values within the same row with different lowercase letters show significant difference at $P<0.05$. Values within the same column indicated by the asterisk show significant differences between wet season and dry season at $P<0.05$ level. The same below.

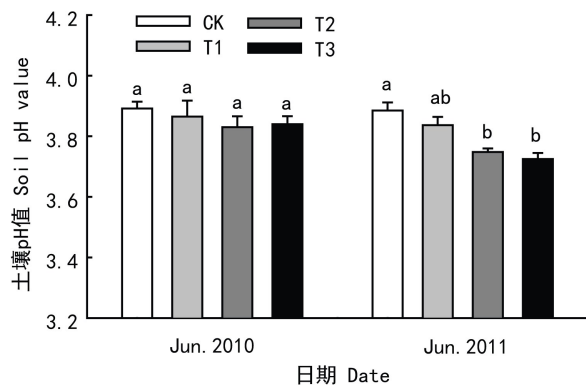


图2 不同处理间的土壤 pH 值

Fig. 2 Soil pH value under different treatments

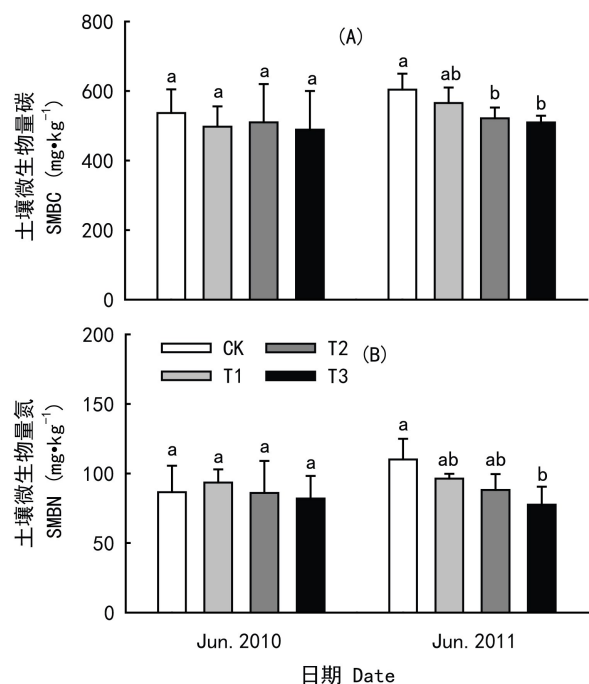


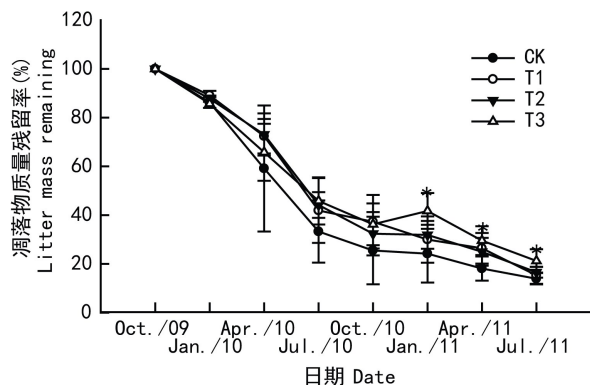
图3 不同处理间的土壤微生物量碳(A)和土壤微生物量氮(B)

Fig. 3 Soil microbial biomass carbon (SMBC) (A) and soil microbial biomass nitrogen (SMBN) (B) under different treatments

拟酸雨的进行,酸雨处理对凋落物分解的影响逐渐明显,在分解实验的第15、第18和第21个月,质量残留率在各处理间出现显著差异。

2.5 土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系

各个处理的土壤呼吸速率与地下5 cm 温度之间均呈显著指数回归关系($P < 0.001$),对应的方程可决系数为0.55~0.71,而各个处理与地下5 cm 湿度之间均呈显著直线回归关系($P < 0.001$),对应的

图4 不同处理间优势树种锥栗(*Castanopsis chinensis*)凋落叶分解质量残留率(%)动态Fig. 4 Changes in mass remaining (%) of leaf litter of the dominant species *Castanopsis chinensis* in different treatments

方程可决系数为0.17~0.19(图5)。利用CK、T1、T2和T3处理土壤呼吸速率与土壤温度之间的指数回归关系可得其对应的土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 值(即土壤温度每升高10℃,土壤呼吸速率变为未增温前呼吸速率的倍数)分别为1.99、1.88、1.76和1.71(图4), Q_{10} 呈随酸处理pH值降低有下降的趋势,表明酸雨处理降低了土壤呼吸的温度敏感性。

3 讨论与结论

亚热带常绿阔叶林区域占全国森林总面积的45.56%,其土壤层碳库C为4.12 Pg,占全国森林总土壤碳库的39.24%(方精云等,2002)。因此,在该区域进行森林土壤呼吸及其对环境变化的响应研究,对认识我国森林生态系统碳收支具有重要意义。本研究所在地鼎湖山季风常绿阔叶林是南亚热带地带性植被类型,鉴于此林型在该区域的典型代表性,近年来已有不少研究者陆续在此开展土壤呼吸相关的研究。如Tang et al(2006)对该林型土壤呼吸的年际和日变化规律进行了研究;另外,环境变化如氮沉降(Mo et al,2008)和降水改变(Deng et al,2012)对土壤呼吸的影响也有研究报道。近年来,我国南亚热带森林酸雨和森林土壤酸化问题尤其严重,如本研究所林型的酸雨频率由2003年的63%增至2009年的96%,大气降雨年均pH值则由2003年4.90降至2007年的4.10(刘菊秀等,2003b),并且整个森林土壤剖面pH值都低小于4.5,土壤自然酸化非常严重(刘菊秀等,2003a)。但酸雨加剧对该林型土壤呼吸影响的研究却鲜有报道。

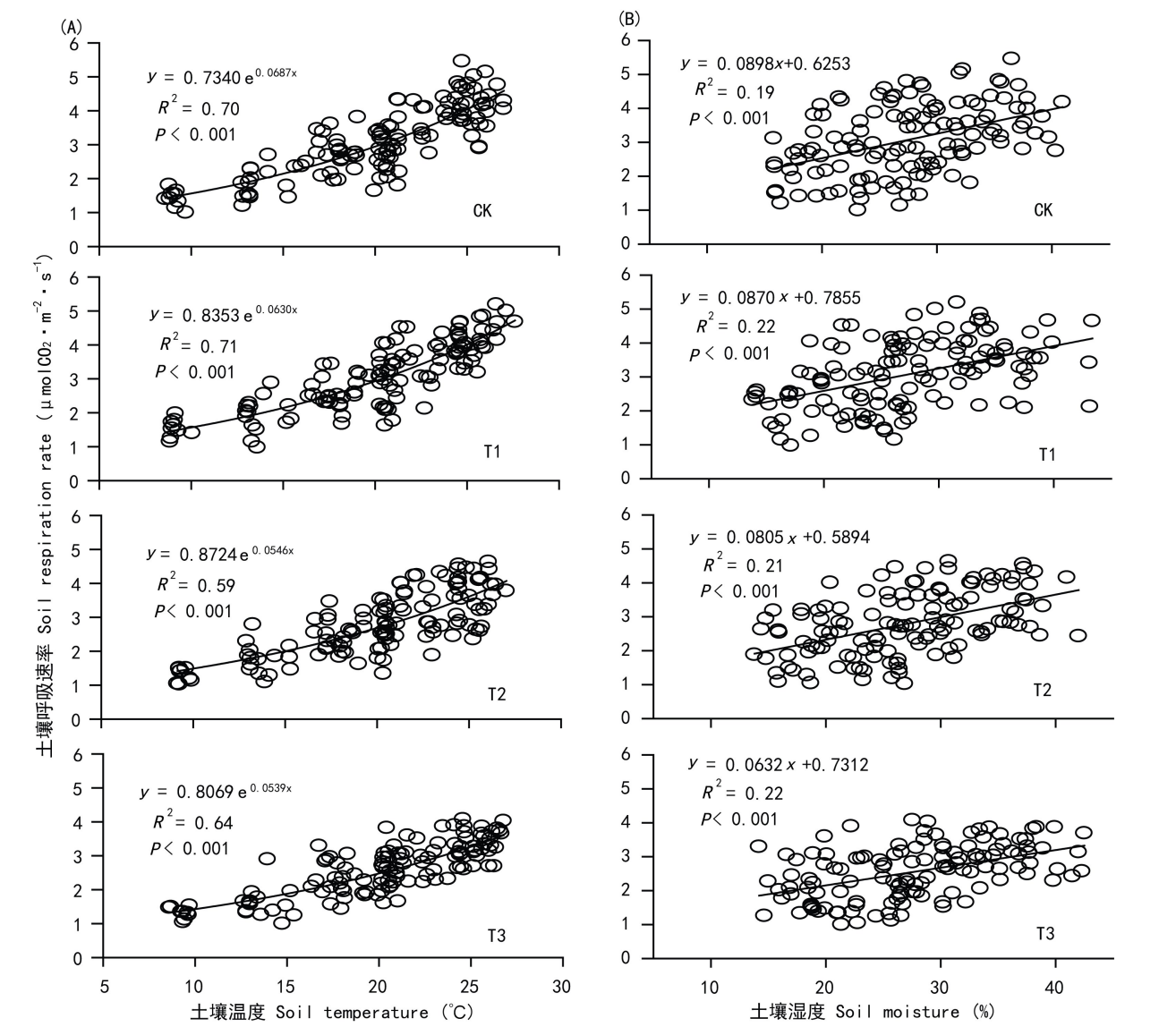


图 5 不同处理下土壤呼吸与土壤温度(A)和土壤湿度(B)的相关关系

Fig. 5 Relationship of soil respiration rate with soil temperature (A) or soil moisture (B) under different treatments

由于各研究区域的气候条件,土壤营养状况以及植被类型等不同,酸雨对森林土壤呼吸影响的研究结果往往存在差异。如 Will et al (1986) 报道模拟酸雨并未影响土壤呼吸;刘源月等 (2010) 研究表明,模拟酸雨在短期内就能抑制土壤呼吸,而且重度酸雨 (pH2.5) 使土壤呼吸持续减弱;欧阳学军等 (2005) 的结果表明,一定的酸化累积促进 CO₂ 排放,当累积到某值时又抑制 CO₂ 的排放。本研究中,模拟酸雨抑制了季风林的土壤呼吸,抑制效应随着处理时间的延长而逐渐显著,且只有高强度模拟酸雨 T3 处理在湿季显著的抑制了土壤呼吸。

模拟酸雨对土壤呼吸的抑制作用可能与其胁迫

下土壤酸化从而导致土壤微生物活性和凋落物分解速率下降有关。本研究样地 CK 样方的土壤为强酸性土壤 (pH 值小于 4),而经过 25 个月的模拟酸雨处理,土壤 pH 值显著降低,这表明原本酸化严重的土壤酸化加剧,这与刘源月等 (2010) 热带和亚热带森林的模拟酸雨结果类似。一方面,土壤呼吸与土壤有机物的转化与循环密切相关,有赖于专性微生物活化才能完成,酸化的土壤由于 H⁺ 的毒害作用,从而改变了土壤分解者微生物的种类,结构以及生物活性 (Falappi et al, 1994)。高志红等 (2004) 指出各种微生物都有最适宜的 pH 范围, pH 过低会对微生物活性产生抑制作用。本研究中模拟酸雨降低了

土壤微生物量碳、氮含量,这表明土壤微生物活性受到抑制,从而抑制了微生物异氧呼吸。另一方面,凋落物分解过程是土壤呼吸的一个重要途径,土壤微生物活性的降低会导致凋落物分解速率的降低,因此导致凋落物分解产生的 CO_2 减少 (Wolters, 1991)。Raich & Schlesinger (1992) 估算的全球土壤呼吸通量约为 $68 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中 $50 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 来自于凋落物和土壤有机质分解,因此凋落物数量及其分解速率在很大程度上影响着土壤 CO_2 通量 (Wan et al, 2007)。邓琦等 (2007) 的研究结果表明,松林、混交林和季风林的凋落物对土壤呼吸年平均贡献率分别为 36.35%、33.29% 和 27.82%, 这证明了凋落物的碳输入是鼎湖山森林土壤呼吸的一个重要的影响因素。本研究中,模拟酸雨减缓了季风林优势树种锥栗叶凋落物的分解速率,从而抑制凋落物 CO_2 的释放,这与马元丹等 (2010) 在亚热带和温度森林的研究结果相一致。

土壤温度和土壤湿度是影响土壤呼吸的两个最主要环境因子。在热带和亚热带的森林,土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度的关系一般分别用指数回归方程和直线回归方程来描述 (Sotta et al, 2004; Cleveland & Townsend, 2006)。本研究不同处理下的土壤呼吸速率均与土壤温度呈显著的指数回归关系,与土壤湿度呈显著的直线回归关系,这种土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸共同控制的关系与本区域雨热同期的季风气候有关 (Kong et al, 1997)。模拟酸雨对土壤呼吸的抑制效应主要出现在湿季,这是由于本区域湿季水热充沛,植物光合作用较强,根系生长较早季旺盛,微生物活性较高,因此酸雨在湿季对它们的抑制作用会更明显 (Yang et al, 2004; 张勇等, 2011)。另外,我们发现模拟酸雨影响了土壤呼吸对温度的响应,表现为 Q_{10} 值在酸处理下有下降的趋势,表明模拟酸雨降低了土壤呼吸的温度敏感性,这与北亚热带天然次生林的模拟酸雨结果一致 (Yang et al, 2004), 推测原因可能是由于土壤 pH 值的改变引起根系呼吸强度、土壤酶活性的改变而导致 (谢小赞等, 2009)。

由于土壤在短期内对酸雨具有一定的缓冲能力,所以在实验的初期模拟酸雨没有显著降低土壤 pH 值,而随着模拟酸雨处理的时间延长这种下降效应才变得显著,这与刘菊秀等 (2003a) 的研究结果相应,表明模拟酸雨下森林的土壤酸化是个逐渐累积的过程。同时,土壤呼吸影响因子,包括土壤微生物

活性和凋落物分解速率对模拟酸雨的响应也随着酸处理时间的延长而逐渐显著,因此,森林土壤呼吸对模拟酸雨的响应也呈现相同的规律。此外,土壤微生物活性和凋落物分解速率大体上是在强酸雨 T3 处理下才达到处理效应的显著水平,相应地,只有 T3 处理显著地抑制了土壤呼吸速率。

根据本研究结果,在酸雨日益严重的南亚热带地区,森林土壤呼吸速率的降低将有利于土壤有机碳的积累,这可能是成熟森林可持续积累有机碳的机理之一 (Zhou et al, 2006)。但酸雨对土壤生态系统的影响是个长期累积的过程,本试验两年多的模拟酸雨喷淋可能仍比较短,而且对土壤微生物量碳、氮含量和凋落物分解速率的测定也比较初步,未来在继续探讨酸雨对土壤呼吸的长期效应同时,应该对土壤理化性质发生的变化进行长期和连续的监测分析,以使研究结果能够更好地说明酸雨对土壤呼吸产生的综合影响。

参考文献:

- CHEN ST, SHEN XH, HU ZH, et al, 2012. Effects of simulated acid rain on soil CO_2 emission in a secondary forest in subtropical China [J]. *Geoderma*, 189: 65–71.
- CLEVELAND CC, TOWNSEND AR, 2006. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 103: 10 316–10 321.
- DENG Q, LIU SZ, LIU JX, et al, 2007. Contributions of litter-fall to soil respiration and its affecting factors in southern subtropical forests of China [J]. *Adv Earth Sci*, 22(9): 976–986. [邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等, 2007. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素 [J]. *地球科学进展*, 22(9): 976–986.]
- DENG Q, HUI DF, ZHANG DQ, et al, 2012. Effects of precipitation increase on soil respiration: a three-year field experiment in subtropical forests in China [J]. *PLoS One*, 7(7): e41493.
- DIXON RK, BROWN S, HOUGHTON RA, et al, 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystem [J]. *Science*, 263: 185–190.
- FALAPPI D, FARINI A, RANALLI G, et al, 1994. Effects of simulated acid rain on some microbiological parameters of subacid soil [J]. *Chemosphere*, 28(6): 1 087–1 095.
- FANG JY, SONG YC, LIU HY, et al, 2002. 植被气候关系与我国的植被分区 [J]. *Acta Bot Sin*, 44(9): 11 105–11 122. [方精云, 宋永昌, 刘鸿雁, 等, 2002. 植被气候关系与我国的植被分区 [J]. *植物学报*, 44(9): 11 105–11 122.]
- GAO ZH, ZHANG WL, ZHANG QF, 2004. 森林凋落物生态功能研究概况及展望 [J]. *J NE For Univ*, 32(6): 79–83. [高志红, 张万里, 张庆费, 2004. 森林凋落物生态功能研究概况及展望 [J]. *东北林业大学学报*, 32(6): 79–83.]
- JENKINSON DS, ADAMS DE, WILD A, 1991. Model estimates of CO_2 emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 351: 304–306.
- KONG GH, HUANG ZL, ZHANG QM, et al, 1997. Type, structure,

- dynamics and management of the lower subtropical evergreen broad-leaved forest in the Dinghushan Biosphere Reserve of China [J]. *Tropics*, 6:335–350.
- LARSEN T, CARMICHAEL GR, 2000. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition [J]. *Environ Poll*, 110(1):89–102.
- LAVERMAN AM, ZOOMER HR, VERHOEF HA, 2001. The effect of oxygen, pH and organic carbon on soil-layer specific denitrifying capacity in acid coniferous forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 33(4–5):683–687.
- LIU JX, ZHANG DQ, ZHOU GY, et al, 2003a. A preliminary study on the chemical properties of precipitation, throughfall, stemflow and surface run-off in major forest types at Dinghushan under acid deposition [J]. *Chin J Appl Ecol*, 14(8):1 223–1 228. [刘菊秀, 张德强, 周国逸, 等, 2003a. 鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究 [J]. *应用生态学报*, 14(8):1 223–1 228.]
- LIU JX, ZHOU GY, ZHANG DQ, 2003b. The cumulative effects of acid rain on the soil and responses of *Schima superba* at Dinghushan [J]. *Chin Environ Sci*, 23(1):90–94. [刘菊秀, 周国逸, 张德强, 2003b. 酸雨对鼎湖山土壤的累积效应及荷木的反应 [J]. *中国环境科学*, 23(1):90–94.]
- LIU YY, JIANG H, LI YH, 2010. A short-term effect of simulated acid rain on the soil respiration of the compound system of Chinese fir seedling-soil [J]. *Acta Ecol Sin*, 30(8):2 010–2 017. [刘源月, 江洪, 李雅红, 2010. 模拟酸雨对杉木幼苗-土壤复合体系土壤呼吸的短期效应 [J]. *生态学报*, 30(8):2 010–2 017.]
- LUO YQ, WAN SQ, HUI DF, et al, 2001. Acclimatization of soil respiration to warming in a tallgrass prairie [J]. *Nature*, 413:622–625.
- MA YD, JIANG H, YU SQ, et al, 2010. Effects of simulated acid rain on the decomposition of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 49(2):95–99. [马元丹, 江洪, 余树全, 等, 2010. 模拟酸雨对毛竹凋落物分解的影响 [J]. *中山大学学报·自然科学版*, 49(2):95–99.]
- MARLAND G, ROTTY RM, 1984. Carbon dioxide emission from fossil fuels: a procedure for estimation and results for 1950–1982 [J]. *Tellus*, 36B:232–261.
- MO JM, ZHANG W, ZHU WX, et al, 2008. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China [J]. *Glob Change Biol*, 14(2):403–412.
- OUYANG XJ, ZHOU GY, HUANG ZL, et al, 2008. Effect of simulated acid rain on potential carbon and nitrogen mineralization in forest soils [J]. *Pedosphere*, 18(4):503–514.
- PENG SL, LI YL, REN H, et al, 2002. Progress in research on soil respiration under the global change [J]. *地球科学进展*, 17(5):706–713. [彭少麟, 李跃林, 任海, 等, 2002. 全球变化条件下的土壤呼吸效应 [J]. *地球科学进展*, 17(5):706–713.]
- POST WM, EMANUEL WR, ZINKE PJ, et al, 1982. Soil pool and world life zones [J]. *Nature*, 298:156–159.
- RAICH JW, SCHLESINGER WH, 1992. The global carbon dioxide efflux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 44(2):81–99.
- REN H, PENG SL, ZHANG ZP, 1996. Study on canopy structure and canopy radiation of monsoon evergreen broad leaf forest in dinghushan biosphere reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 16(2):174–179. [任海, 彭少麟, 张祝平, 1996. 鼎湖山季风常绿阔叶林林冠结构与冠层辐射研究 [J]. *生态学报*, 16(2):174–179.]
- SALONIUS PO, 1990. Respiration rates in forest soil organic horizon materials treated with simulated acid rain [J]. *Can J For Res*, 20:910–913.
- SCHIMEL DS, BRASWEL BH, HOLLAND EA, et al, 1994. Climatic, edaphic and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils [J]. *Glob Biogeochem CY*, 8(3):279–293.
- SOTTA ED, MEIR P, MALHI Y, et al, 2004. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon [J]. *Glob Change Biol*, 10:601–617.
- TANG XL, LIU SG, ZHOU GY, et al, 2006. Soil atmospheric exchange of CO₂, CH₄ and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China [J]. *Glob Change Biol*, 12(3):546–560.
- VANHALA P, FRITZE H, NEUVONEN S, 1996. Prolonged simulated acid rain treatment in the subarctic: Effect on the soil respiration rate and microbial biomass [J]. *Biol Fert Soils*, 23(1):7–14.
- VANHALA P, 2002. Seasonal variation in the soil respiration rate in coniferous forest soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 34(9):1 375–1 379.
- WAN SQ, NORBY RJ, LEDFORD J, et al, 2007. Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland [J]. *Glob Change Biol*, 13(11):2 411–2 424.
- WANG WX, XU PJ, 2009. Research progress in precipitation chemistry in China [J]. *Prog Chem*, 21(2–3):266–281. [王文兴, 许鹏举, 2009. 中国大气降水化学研究进展 [J]. *化学进展*, 21(2–3):266–281.]
- WILL ME, GRAETZ DA, ROOF BS, 1986. Effect of simulated acid precipitation on soil microbial activity in a typical quartzipsamment [J]. *J Environ Qual*, 15:399–403.
- WOLTERS V, 1991. Effects of acid rain on leaf-litter decomposition in a beech forest on calcareous soil [J]. *Biol Fert Soils*, 11(2):151–156.
- XIE XZ, JIANG H, YU SQ, et al, 2009. Effect of simulated acid rain on soil respiration of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Acta Ecol Sin*, 29(10):5 713–5 720. [谢小赞, 江洪, 余树全, 等, 2009. 模拟酸雨胁迫对马尾松和杉木幼苗土壤呼吸的影响 [J]. *生态学报*, 29(10):5 713–5 720.]
- XU M, QI Y, 2001. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a *Sierra Nevada* forest [J]. *Glob Biogeochem CY*, 15(3):687–696.
- YANG XH, NIE CR, MAI ZM, 2004. Effect of acid rain on the main microbial strains of peanut soil in South China [J]. *J Peanut Sci*, 33(2):26–29.
- YANG YS, DONG B, XIE JS, et al, 2004. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. *Acta Ecol Sin*, 24(3):583–591. [杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等, 2004. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应 [J]. *生态学报*, 24(3):583–591.]
- ZHANG JE, OUYANG Y, LING DJ, 2007. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from the Latosol in south China [J]. *Chemosphere*, 67(11):2 131–2 137.
- ZHANG Y, WANG LX, CHEN ST, et al, 2011. Effects of simulated acid rain on soil respiration in a northern subtropical secondary forest [J]. *Chin Environ Sci*, 31(9):1 541–1 547. [张勇, 王连喜, 陈书涛, 等, 2011. 模拟酸雨对北亚热带天然次生林土壤呼吸的影响 [J]. *中国环境科学*, 31(9):1 541–1 547.]
- ZHOU GY, LIU SG, LI ZA, et al, 2006. Old-growth forests can accumulate carbon in soils [J]. *Science*, 314(5804):1 417.