环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2019

Vol.40 No.3

第40卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第3期
2019年3月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第40卷 第3期 2019年3月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的响应

李一凡[1,2], 王玉杰[1,2*], 王彬[1,2], 王云琦[1,2]

(1. 北京林业大学水土保持学院, 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; 2. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 为研究酸雨对森林土壤呼吸的影响, 于2016年1月~2017年4月在重庆缙云山三峡库区针阔混交林内选取3块样地, 设置了断根与不断根两组处理, 每组处理设置pH为4.5(对照)、4.0、3.25和2.5共4个梯度的模拟酸雨处理. 试验观测模拟酸雨下土壤总呼吸与异养呼吸变化特征及土壤温度、土壤湿度, 同时采集土样, 研究土壤pH、碳氮比及细根生物量对土壤呼吸的影响. 结果表明, 土壤总呼吸与异养呼吸均表现出了季节变异趋势. 不断根样方的CK、T4.0、T3.25和T2.5处理的年均土壤呼吸速率分别为1.89、1.88、1.75和1.74 μmol·(m^2·s)$^{-1}$, 断根样方的RCCK、RCT4.0、RCT3.25和RCT2.5处理的年均土壤呼吸速率分别为1.37、1.32、1.19和1.08 μmol·(m^2·s)$^{-1}$. 季度平均土壤总呼吸与异养呼吸在2016年7月前差异不显著($P>0.05$), 2016年10月后差异均显著($P<0.01$)并呈现对照>pH4.0>pH3.25>pH2.5. 2016年的累积土壤呼吸量T4.0、T3.25和T2.5处理相比对照分别降低3.89%、9.64%和11.24%, RCT4.0、RCT3.25和RCT2.5处理相比对照分别降低6.79%、13.23%和25.56%. 与对照相比, 模拟酸雨处理降低了异养呼吸占比, 降低程度随着酸雨pH增加而加强, 说明了酸雨对于异养呼吸的抑制超过了自养呼吸. 模拟酸雨处理虽然增加了土壤呼吸的温度敏感性, 但是对土壤温度与湿度无显著影响($P>0.05$); 2016年10月之后相比对照模拟酸雨处理显著增加了土壤碳氮比、降低了细根生物量. 土壤呼吸与细根生物量有显著正相关关系, 与土壤碳氮比有显著的负相关关系. 土壤温度与水分对模拟酸雨下土壤呼吸的差异贡献不大, 细根生物量与碳氮比是酸雨处理下呼吸差异的主要影响因素.

关键词: 模拟酸雨; 土壤呼吸; 异养呼吸; Q_{10}(温度敏感性); 碳氮比; pH

中图分类号: X144; X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)03-1457-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201803170

Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area

LI Yi-fan[1,2], WANG Yu-jie[1,2*], WANG Bin[1,2], WANG Yun-qi[1,2]

(1. Jinyun Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the effects of acid rain on forest soil respiration, three plots were selected in the conifer/broad-leaved mixed forests in the Three Gorges Reservoir area of the Jinyun Mountain (Chongqing) from January 2016 to April 2017. Two groups of treatments were set up: a trenched treatment and an untrenched treatment. Each group was treated with four simulated acid rain gradients of pH 4.5 (control), 4.0, 3.25 and 2.5. The characteristics of total soil respiration and heterotrophic respiration under the four simulated acid rain treatments were measured. Soil temperature and moisture were measured during the respiration measurements, and soil samples were collected to study the effects of soil pH, the carbon-nitrogen ratio, and fine root biomass on soil respiration. The results indicated that the total soil respiration and heterotrophic respiration of trenched and untrenched plots showed a similar seasonal variation trend. The annual mean soil respiration rates of the CK, T4.0, T3.25, and T2.5 treatments were 1.89, 1.88, 1.75, and 1.74 μmol·(m^2·s^1)$^{-1}$, respectively, and the annual mean soil respiration rates of the RCCK, RCT4.0, RCT3.25 and RCT2.5 treatments were 1.37, 1.32, 1.19, 1.08 μmol·(m^2·s^1)$^{-1}$, respectively. There was no significant differences between the quarterly average of the total soil respiration and heterotrophic respiration before June 2016 ($P>0.05$). However, after October 2016, the difference was significant ($P<0.01$) with CK>pH 4.0>pH 3.25>pH 2.5. The cumulative soil CO_2 emissions of the T4.0, T3.25, and T2.5 treatments in 2016 decreased by 3.89%, 9.64%, and 11.24% respectively, compared with the control, and the RCT4.0, RCT3.25, and RCT2.5 treatments decreased by 6.79%, 13.23%, and 25.56%, respectively. The simulated acid rain treatments reduced the ratio of heterotrophic respiration in the total soil respiration, and the degree of reduction increased with the pH of the simulated acid rain, indicating that the effect of acid rain on the inhibition of heterotrophic respiration exceeded that of autotrophic respiration. Although the simulated acid rain treatments increased the temperature sensitivity of soil respiration (Q_{10}), it had no significant effect on soil temperature and humidity ($P>0.05$). The soil carbon-nitrogen ratio and fine root biomass were significantly greater in comparison to the control after October 2016. Soil respiration was significantly positively correlated with fine root biomass and significantly negatively correlated with the soil carbon-nitrogen ratio. Soil temperature and water contributed only slightly to soil respiration under the four simulated acid rain treatments. Fine root biomass and the soil carbon-nitrogen ratio were critical factors for variation of soil respiration under acid rain.

收稿日期: 2018-03-25; **修订日期**: 2018-09-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2017PT10); 林业科学技术研究项目(2017-02)

作者简介: 李一凡(1988~), 男, 博士, 主要研究方向为水土保持工程、土壤呼吸, E-mail: yfan20151003@163.com

* 通信作者, E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn

Key words: simulated acid rain; soil respiration; heterotrophic respiration; Q_{10} (temperature sensitivity); soil carbon-nitrogen ratio; pH

全球气候变化背景下，陆地生态系统碳循环与收支研究一直是国内外学者的研究重点[1]，而森林生态系统中土壤呼吸是森林碳循环的重要组成部分[2]. 目前酸雨是一个全球性问题，我国作为酸雨污染最为严重的国家之一，南方地区尤为严重，近年来降雨 pH 大多 4.5 以下甚至有达到 3.0 的极端情况出现[3,4]. 森林生态系统中，酸雨在破坏植被的同时还会对土壤微生物与理化性质产生影响，破坏碳氮循环与转化过程；如李泽[5]的研究表明酸雨淋溶下土壤 pH、有机质、可溶性有机碳、全氮、矿化氮含量均降低，Lv 等[6]发现酸雨对针叶林与阔叶林土壤微生物生物量和大部分酶活性有抑制作用，Ouyang 等[7]发现酸雨处理增强了土壤碳的矿化但是降低了氮的矿化.

森林土壤呼吸会因为土壤微生物、根系、凋落物和气候等因素产生变化[8]，而酸雨会影响土壤微生物结构与功能、植物根系状况与凋落物性质等，进而影响土壤呼吸[5,9]. 目前关于酸雨对于森林土壤呼吸的影响研究结果并不一致，如张旭[10] 2013 ~2015 年的研究表明，模拟酸雨对土壤呼吸速率产生了抑制，Liang 等[11]发现酸雨处理下土壤呼吸在第一年略有下降，第二年显著降低，而陈书涛等[12]在针阔混交林的试验观测到土壤呼吸在不同模拟酸雨处理之间无显著差异；这主要是因为野外自然状况下关于酸雨对森林土壤呼吸的影响研究较少，且存在区域与时间差异，缺乏长期野外模拟试验观测造成的. 作为土壤呼吸的组成部分，自养呼吸(根系呼吸)与异养呼吸(微生物呼吸、动物呼吸等)发生的方式不同，对于影响因素的反馈也有差异，因而对于酸雨的响应存在区别[13]. 准确区分土壤呼吸不同组分一直是地下生物学与碳循环研究中的难点与热点. 关于自养呼吸与异养呼吸对于酸雨响应的差异，陈书涛等认为模拟酸雨增加了异养呼吸在土壤呼吸的比例，即自养呼吸占比减少[11]. 目前这方面研究整体较少，结果尚不明确.

在我国三峡库区重庆是典型的酸雨区，近年来由于工业发展以及机动车辆增多，重庆酸雨由硫酸型向硫酸与硝酸混合型转化[14]. 有研究表明，2000 ~2009 年重庆降水酸化有加重趋势，酸雨频率为 90% 左右[15]；2009 ~2013 年降雨年均 pH 在 4.26 ~4.79 之间，始终低于 5.6 属于酸性降雨，酸雨频率整体呈增加趋势[16]. 近年来由于减排控制政策，降雨污染有所缓解，但是酸雨状况仍然严重，需要进一步分析降雨酸化的影响. 本文基于重庆缙云山地区针阔混交林的模拟酸雨试验，监测了土壤呼吸与土壤性质变化，研究酸雨添加下土壤呼吸与其组分变化特征，通过了解酸雨强度增加情况下亚热带森林土壤碳循环变异规律，给酸雨背景下合理管理经营森林提供理论依据，以期为政府制定相关规划与政策提供重要参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆缙云山地区(106°17′~106°24′E，29°41′~29°52′N)，属于三峡库区，海拔 170 ~950 m. 研究区气候属于典型的亚热带季风湿润气候，年均降雨量为1 611.8 mm，年均相对湿度 87%，雨季(4 ~9 月)降雨占全年的 77.2%；年均气温 13.6℃，年蒸发量为 777.1 mm. 每年 7 月末到 8 月中旬间，研究区降雨少且蒸发量大，属于伏旱期. 研究区土壤为黄壤，pH 在 3.5 ~4.5 之间，属于酸性土壤，抗侵蚀能力较弱. 植被覆盖率较高达到了 96.6%，研究区主要林分类型有针阔混交林、常绿阔叶林和竹林等(表 1). 试验选择在针阔混交林内建立样地，该林区具有多种代表性生态系统，形成缙云山地区典型的生态综合体的物种基因库，能够反映该地区的森林天然本底.

表 1 样地林分基本情况

Table 1 Basic set-up of stand in sample plots

立地因子				林分概况					主要树种
编号	海拔 /m	坡度 /(°)	坡向	起源	郁闭度	林分密度 /株·hm^{-2}	平均胸径 /cm	平均树高 /m	
1	868.4	12	西北	天然	0.88	2 185	10.22	12.74	四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、白毛新木姜子(*Neolitsea aurata*)、四川杨桐(*Adinandra bockiana*)、四川山矾(*Symplocos setchuanensis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)
2	855.3	13	西北	天然	0.87	2 200	11.45	12.55	
3	862.3	12	西北	天然	0.88	2 148	13.21	11.95	

1.2　试验设计与管理

在针阔混交林内设置 3 个立地条件相近的 40 m×40 m 的样地，在每块样地内设置 24 个 2 m×2 m 的样方进行试验，两个样方之间的距离大于 4 m，防止互相影响造成干扰. 试验采用壕沟断根法区分土壤总呼吸(R_s)与异养呼吸(R_h)：选取一半样方做断根处理，在样方四周挖壕沟(40 cm)，然后插入 PVC 板，去除样方内所有根，并保持原状土层. 断根处理样方在 2015 年 6 月～2015 年 12 月空置 6 个月，使断根完全分解腐烂，防止断根分解时产生的 CO_2 造成 R_h 测定结果偏高.

本试验分为断根与不断根两个处理组，每组设置对照(pH 4.5)、低强度酸(pH 4.0)、中强度酸(pH 3.25)和高强度酸(pH 2.5)这 4 个 pH 梯度，在不断根处理组分别表示为 CK、T4.0、T3.25 和 T2.5，断根处理组表示为 RCCK、RCT4.0、RCT3.25 和 RCT2.5. 每块样地内每个处理设置 3 个重复，共 72 个样方. 对照组按照自然状态降雨年均 pH 值 4.5 设置，pH 3.25 组按照降雨 pH 最低值设置，考虑极端状况下降雨 pH 可能降低，设置 pH 2.5 组，最后添加 pH4.0 组形成梯度[8,12]. 为了反映降雨中 S∶N 的摩尔比趋势，使用 $n(H_2SO_4)$ 和 $n(HNO_3)$ 比例 5∶1配置 pH 1.0 的酸雨母液[17]，再利用去离子水和酸雨母液混合配置至 pH 为 4.5、4.0、3.25 和 2.5. 试验时段为 2016 年 1 月～2017 年 4 月，试验期间两周施酸一次，使用喷壶人工在林地来回均匀喷洒，1 d 内喷完所有样方. 每次每样方施酸 8 L，等于 2 mm 降雨，全年施酸量等于年平均降雨量的 3.54%. 自然状态样方的全年 H^+ 负载输入为 0.429 2 $kmol \cdot hm^{-2}$，pH 2.5、pH 3.25、pH 4.0 与对照处理的样方添加的 H^+ 负载分别是自然降雨的 4、0.62、0.11 以及 0.04 倍[8,12].

1.3　土壤呼吸、温度和水分的测定

每个样方中间位置布设一个土壤环(外径 20 cm、内径 19.5 cm、高 12 cm)插入土壤，露出地面 2.5 cm，去除环内一切活物. 采用 LI-8100 开路式土壤呼吸观测系统(LI-COR，Lincoln，NE，USA)观测自然状态下不断根样方的土壤总呼吸速率和断根样方的异养呼吸速率. 试验期每个月在上、中、下旬各选取连续 2d 晴好天气在 09:00～11:00 测量两次，取平均值作为日均土壤呼吸速率，试验区之前研究已经证明这个时间段的观测值与土壤呼吸日均值接近. 每处理 9 个样方共 9 次重复. 每次施酸 2 天后观测土壤呼吸以防止喷洒使土壤呼吸脉动. 采用 Em50G 数据采集器(METER Group，Inc，U.S.A)配套 5TM 土壤水分、温度传感器测定 5 cm 深处土壤温度与土壤湿度(体积分数)，在每个样方内布设一个传感器.

1.4　样品采集与测定

2016 年 4 月、7 月、10 月以及 2017 年 1 月和 4 月，使用土钻(10 cm×7 cm)在样方内采用五点法钻取表层土(0～10 cm)土芯，五钻合一放入塑封袋标记后带回实验室处理. 用蒸馏水将土芯套筛后冲洗，将根系样品在 65℃下烘干至恒重，利用游标卡尺区分细根(d<10 mm)，称重记录细根重量，每次采集每个处理 9 个重复.

每次采集根系样品时，对表层土(0～10 cm)采用五点法用环刀取土样，装入塑封袋均匀混合后带回实验室，风干、碾磨、过筛后 4℃冷藏储存，每次采集每个处理 9 个重复. 土壤样品用来测定土壤有机碳、总氮含量及 pH. 有机碳采用重铬酸钾外加热氧化法测定，全氮消煮后采用德国 SEAL/AA3 连续流动分析仪进行测定，土壤 pH 值采用玻璃电极法(土水比为 1∶2.5). 土壤的测定结果以干重计算.

1.5　数据分析

采用重复测量方差分析(repeated-measures analysis of variance)进行差异显著性检验(P<0.05)，之后采用 LSD 法进行多重比较. 采用线性模型拟合异养呼吸与土壤总呼吸关系并分析正比例函数关系. 采用指数函数模型拟合土壤温度与土壤呼吸关系，二次函数模型拟合土壤湿度与土壤呼吸关系，加入一个相互作用项(土壤温度×土壤水分)的双因素模型拟合土壤温度、湿度与土壤呼吸的关系. 采用皮尔逊相关系数(Pearson's correlation coefficient)分析土壤 pH、碳氮比和细根生物量与土壤呼吸之间的相关性. 由于土壤呼吸是非逐日测定的，将观测的土壤呼吸和 5 cm 土壤温湿度建立拟合方程计算每日土壤呼吸速率，将每日的 CO_2 排放量相加获得累积土壤呼吸量. 上述计算、分析与图形绘制，采用 Excel 2016、SPSS 19.0 软件完成.

2　结果与分析

2.1　不同酸雨强度下土壤呼吸、土壤温度与土壤湿度变化

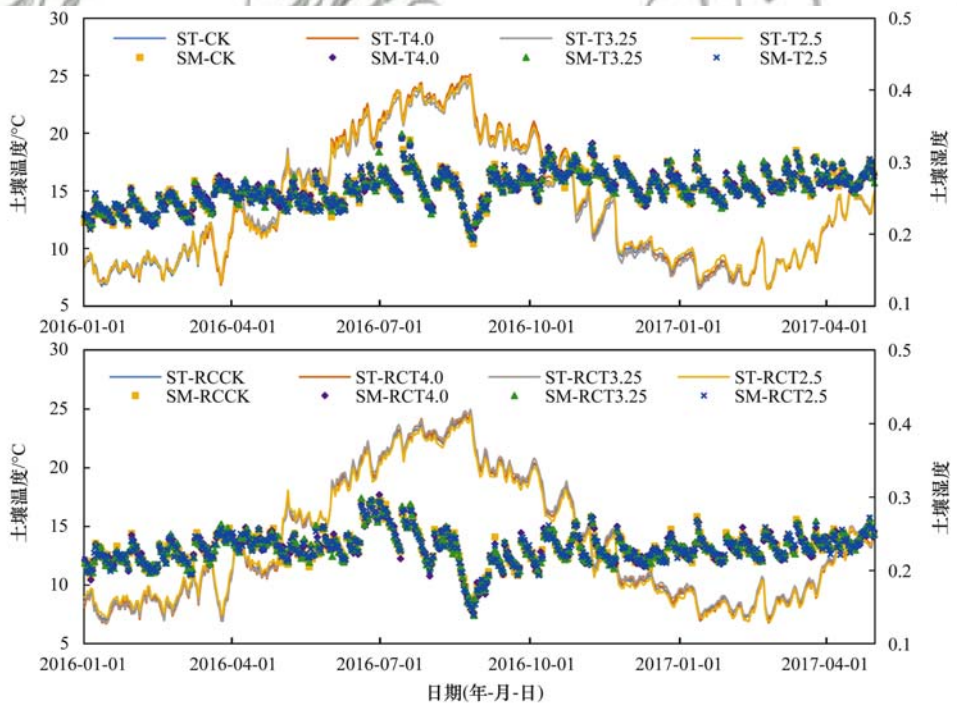
不同处理的土壤温度具有相同的季节变化趋势，夏季最高，冬季最低；土壤湿度受降雨影响波动强烈，在 8、9 月出现全年最低值(图 1). 对月均土壤温度与土壤湿度做重复测量方差分析表明，对于不断根及断根样方，时间均能显著影响土壤温度与湿度(P<0.01)，而不同模拟酸雨强度(P>0.05)及酸雨与时间的交互作用(P>0.05)均无显著影响(表 2). 不断根样方的 CK、T4.0、T3.25 和

T2.5 处理土壤温度在 6.63 ~ 24.97、6.57 ~ 25.08、6.48 ~ 24.68 和 6.46 ~ 24.95℃之间，土壤湿度分别介于 18.67% ~ 33.37%、19.70% ~ 33.30%、19.71% ~ 33.88% 和 19.26% ~ 33.29% 之间(图 1). 断根样方的 RCCK、RCT4.0、RCT3.25 和 RCT2.5 处理土壤温度在 6.99 ~ 24.51、6.70 ~ 24.90、6.77 ~ 24.98 和 6.88 ~ 24.43℃之间，土壤湿度分别介于 14.05% ~ 29.60%、14.23% ~ 30.33%、13.88% ~ 29.88% 和 13.96% ~ 29.53% 之间(图 1).

图 2 所示，在不断根与断根的样方内，各处理的土壤呼吸速率均呈现单峰变化趋势，与土壤温度的变化趋势基本一致，与土壤含水量的变化趋势相差较大. 在不断根样方中，CK、T4.0、T3.25 和 T2.5 处理的土壤呼吸速率变化范围分别为:0.95 ~ 3.35、0.94 ~ 3.36、0.63 ~ 3.22 和 0.58 ~ 3.25 μmol·(m^2·s)$^{-1}$，2016 年均值分别为 1.89、1.88、1.75 和 1.74 μmol·(m^2·s)$^{-1}$，呼吸峰值均出现在 7 月与 8 月(图 2). 在断根样方中，RCCK、RCT4.0、RCT3.25、RCT2.5 处理的土壤呼吸速率变化范围分别为 0.62 ~ 2.43、0.62 ~ 2.48、0.55 ~ 2.12 和 0.32 ~ 2.22 μmol·(m^2·s)$^{-1}$，2016 年均值分别为 1.37、1.32、1.19 和 1.08 μmol·(m^2·s)$^{-1}$，呼吸峰值均出现在 7 月与 8 月(图 2). 断根处理样方的异养呼吸速率明显低于不断根样方的土壤总呼吸速率.

对季度平均土壤呼吸速率做重复测量方差分析表明，不断根与断根样方的时间($P < 0.01$)、不同模拟酸雨处理($P < 0.01$)及酸雨与时间的交互作用($P < 0.01$)均能显著影响土壤呼吸速率(表 2). 不断根样方与断根样方的不同模拟酸雨处理在 7 月之前差异不显著($P > 0.05$)，7 ~ 9 月部分处理差异显著，10 月之后差异均显著($P < 0.01$)并呈现对照 > pH4.0 > pH3.25 > pH2.5，说明不断根与断根样方的土壤呼吸在试验开始几个月之后不同模拟酸雨处理间出现差异(图 3).

不断根样方 2016 年的累积土壤呼吸量按照 CK、T4.0、T3.25 和 T2.5 排列，范围为 628.11 ~ 707.63 g·m^{-2}，各模拟酸雨处理相比对照分别降低 3.89%、9.64% 和 11.24%；断根样方按照 RCCK、RCT4.0、RCT3.25 和 RCT2.5 排列，范围为 376.67 ~ 506.01 g·m^{-2}，各模拟酸雨处理相比对照分别降低 6.79%、13.23% 和 25.56%(图 4).



图中 ST-CK、ST-T4.0、ST-T3.25、ST-T2.5、ST-RCCK、ST-RCT4.0、ST-RCT3.25、ST-RCT2.5 表示各处理的 5 cm 土壤温度，SM-CK、SM-T4.0、SM-T3.25、SM-T2.5、SM-RCCK、SM-RCT4.0、SM-RCT3.25、SM-RCT2.5 表示各处理的 5 cm 土壤湿度

图 1 不同处理下 5 cm 土壤温度与湿度动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil temperature and soil moisture at 5 cm for different treatments

2.2 不同酸雨强度下土壤总呼吸与异养呼吸比例变化

如图 5，回归分析表明，不断根处理的土壤总呼吸与断根处理的异养呼吸之间存在极显性($P < 0.01$)的正相关关系，各处理 R^2 均在 0.8 以上. 对照、pH 4.0、pH 3.25 和 pH 2.5 处理下异养呼吸与土壤总呼吸的比例分别为 72.0%、69.3%、67% 和 61.6%，表明随着酸雨酸度的增加，异养呼吸占比

表 2　土壤呼吸、温湿度、pH、碳氮比和细根生物量的重复测量方差分析[1)]

Table 2　Repeated measures analysis of variance of soil respiration, soil temperature, soil moisture, pH, C/N ratio, and fine root biomass

变量	处理		*df*	均方	*F*	*P*
季度平均土壤呼吸速率	不断根样方	时间	4 128	18.636	6801.083	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.618	294.841	<0.01 **
		时间×酸雨	12 128	0.140	51.055	<0.01 **
	断根样方	时间	4 128	9.05	4 562.33	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.90	552.03	<0.01 **
		时间×酸雨	12 128	0.19	93.64	<0.01 **
月均土壤温度	不断根样方	时间	15 480	1 013.82	16 420.17	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.02	0.27	0.85
		时间×酸雨	45 480	0.04	0.65	0.96
	断根样方	时间	15 480	1 009.02	16 894.44	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.02	0.41	0.75
		时间×酸雨	45 480	0.02	0.38	0.98
月均土壤湿度	不断根样方	时间	15 480	0.03	175.81	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.00	0.01	0.99
		时间×酸雨	45 480	0.00	0.05	0.99
	断根样方	时间	15 480	0.01	39.09	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.00	0.06	0.98
		时间×酸雨	45 480	0.00	0.03	0.99
pH	不断根样方	时间	4 128	1.44	184.92	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.03	2.75	0.06
		时间×酸雨	12 128	0.04	4.99	<0.01 **
	断根样方	时间	4 128	0.53	82.43	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.01	1.23	0.32
		时间×酸雨	12 128	0.02	3.50	<0.01 **
C/N	不断根样方	时间	4 128	179.19	1106.85	<0.01 **
		酸雨	3 32	36.79	258.72	<0.01 **
		时间×酸雨	12 128	18.68	115.41	<0.01 **
	断根样方	时间	4 128	63.47	419.87	<0.01 **
		酸雨	3 32	30.24	200.03	<0.01 **
		时间×酸雨	12 128	95.69	394.83	<0.01 **
细根生物量	不断根样方	时间	4 128	3.82	644.00	<0.01 **
		酸雨	3 32	0.51	87.97	<0.01 **
		时间×酸雨	12 128	0.05	7.50	<0.01 **

1) * 表示 $P<0.05$ 水平差异显著，* * 表示 $P<0.01$ 水平差异显著

逐渐降低.

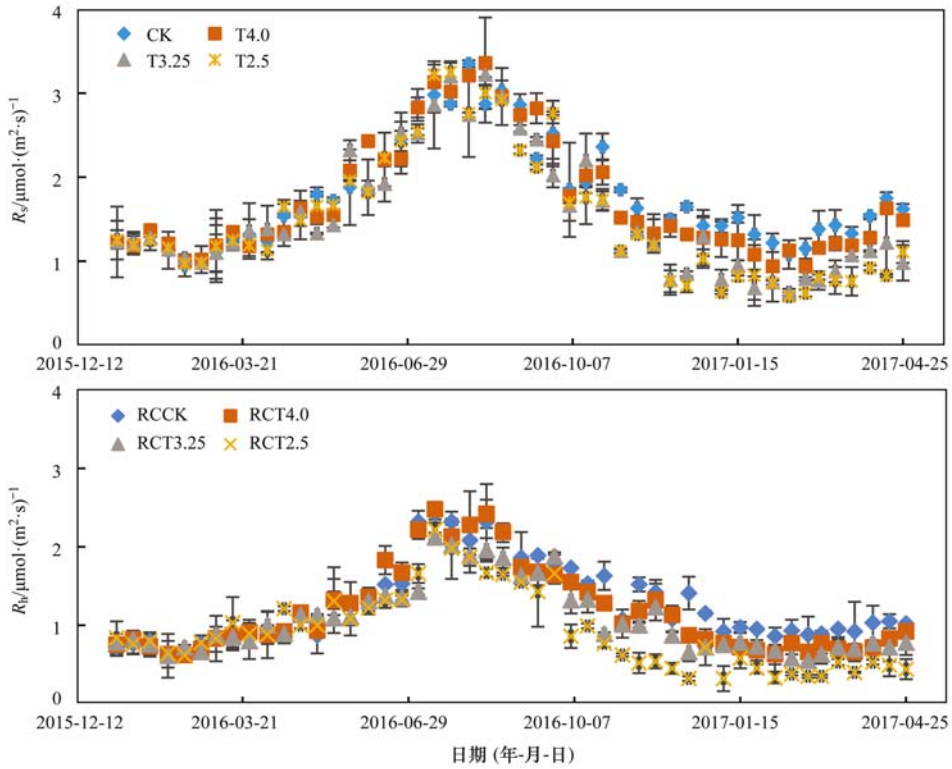
2.3　不同酸雨强度下土壤 pH、碳氮比和细根生物量变化

2.3.1　土壤 pH 变化

对于不断根及断根样方，重复测量方差分析表明，时间($P<0.01$)及时间与不同模拟酸雨处理的交互作用($P<0.01$)能显著影响土壤 pH，但是土壤 pH 在不同处理间($P>0.05$)差异不显著(表 2). 不断根样方土壤 pH 平均值为 3.97，最低值和最高值分别为 3.72 和 4.33[图 6(a1)]. 4 月与 7 月土壤 pH 在不同模拟酸雨强度间差异不显著. 10 月之后部分处理间差异显著，但是没有表现出明显规律[图 6(a)]. 断根样方土壤 pH 平均值为 3.78，最高值和最低值分别为 3.60 ~ 3.94[图 6(a2)]. 其各个时间点的土壤 pH 变化与不断根样方类似，4 月与 7 月各处理间差异不显著，10 月之后部分处理间差异显著[图 6(a)].

2.3.2　土壤碳氮比变化

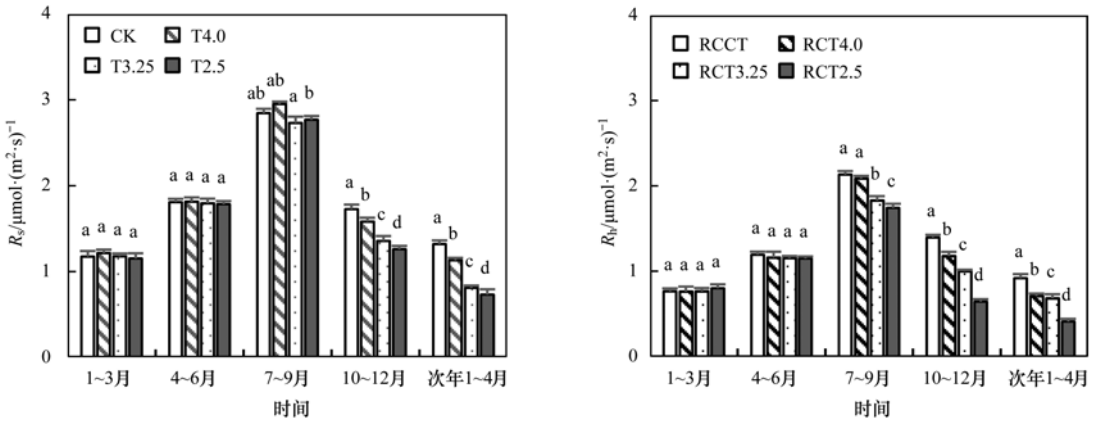
重复测量方差分析表明，时间($P<0.01$)，不同模拟酸雨强度($P<0.01$)及其交互作用($P<0.01$)均能显著影响土壤碳氮比(表 2). 对于不断根及断根样方，4 月的土壤碳氮比在不同模拟酸雨强度间差异不显著. 7 月和 10 月土壤碳氮比均有部分处理差异不显著. 10 月之后土壤碳氮比在不同梯度的酸处理间差异显著并呈现 pH 4.0 < pH 3.25 < pH 2.5，对照组与 pH 4.0 组差异不显著. 不断根样方 T3.25 和 T2.5 组相比对照提高了 23.16% ~ 47.38%，断根样方 RCT3.25 和 RCT2.5 组相比对照提高了 38.47% ~ 55.33% [图 6(b2)]. 对于不断根样方及断根样方，碳氮比范围为 8.38 ~ 19.43，



图中误差线为标准误差(SE),下同

图 2 不同处理下土壤呼吸动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil respiration for different treatments



图中不同小写字母表示同一时间不同处理间的显著性差异($P<0.05$)

图 3 不同处理下季度平均土壤呼吸

Fig. 3 Quarterly average of soil respiration for different treatments

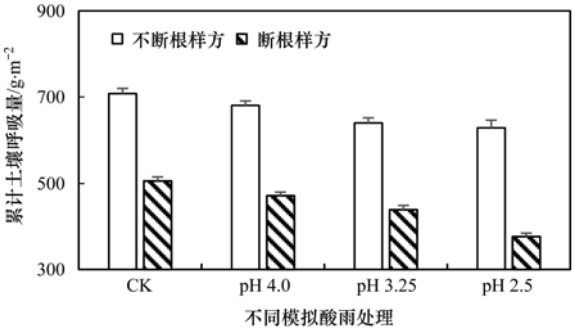


图 4 2016 年累积土壤呼吸量

Fig. 4 Cumulative soil respiration in 2016

小于 25∶1,说明土壤环境适合微生物生存,整体断根样方土壤碳氮比较不断根样方大[图 6(b)].

2.3.3 细根生物量变化

重复测量方差分析表明,时间($P<0.01$)、不同模拟酸雨强度($P<0.01$)及其交互作用($P<0.01$)均能显著影响细根生物量(表 2). 4 月的细根生物量在不同模拟酸雨强度间差异不显著. 7 月 pH 3.25 处理的细根生物量最高且对照与 pH4.0 差异不显著. 10 月及以后细根生物量在不同处理间差异显著且 CK > T4.0 > T3.25 > T2.5,相比对照 T4.0、T3.25 和 T2.5 分别降低了 1.40% ~18.67%[图 6(c)].

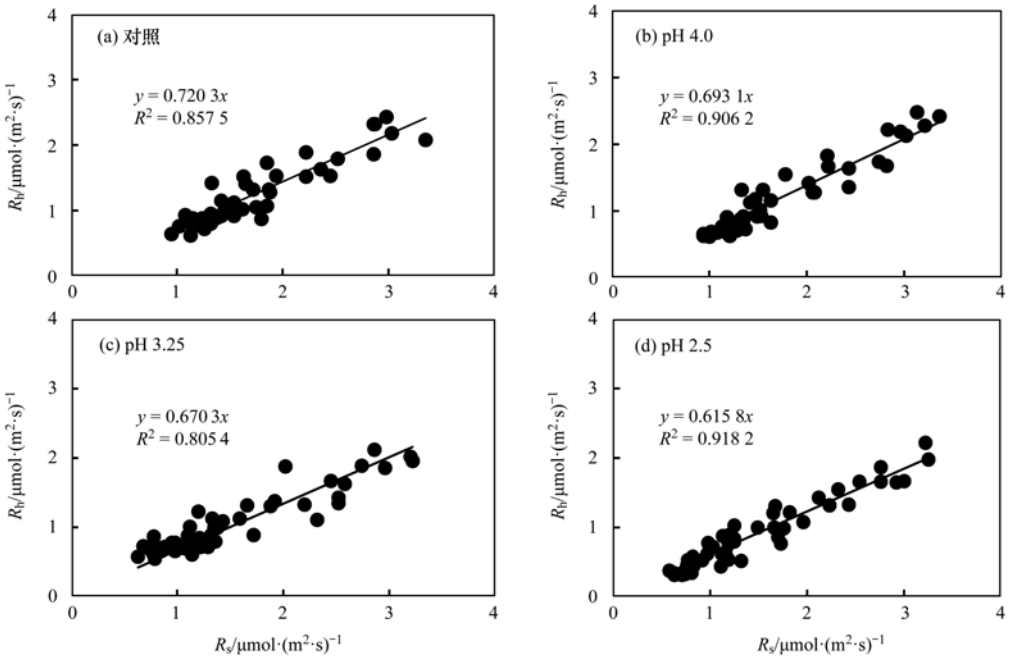
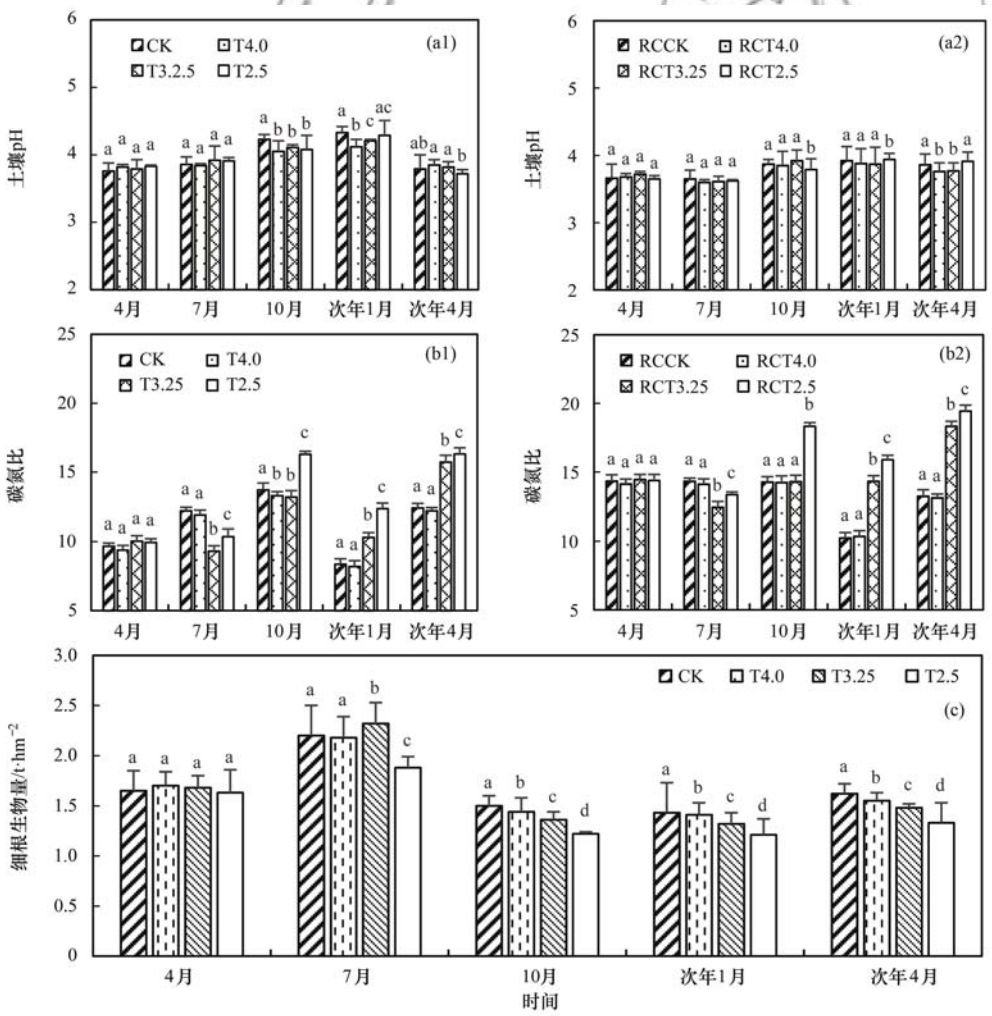


图 5　土壤总呼吸与异养呼吸关系

Fig. 5　Relationship between total soil respiration and heterotrophic respiration



图中不同小写字母表示同一时间不同处理间的显著性差异($P<0.05$)

图 6　不同处理下土壤 pH、碳氮比和细根生物量变化

Fig. 6　Variation in soil pH, C/N ratio, and fine root biomass for different treatments

2.4 相关性分析

不断根样方，季节性变化的土壤呼吸与各个模拟酸沉降处理的土壤温度均呈现极显著的指数相关（$P<0.01$，表3）．5 cm 深度的土壤温度解释了土壤呼吸季节变化的 86.9% ~93.3%．CK、T4.0、T3.25 和 T2.5 处理的土壤呼吸 Q_{10}值（温度敏感性）随酸度降低逐渐增加，分别为 1.84、1.99、2.18 和 2.39．各个处理的季节性变化土壤呼吸与土壤含水量之间没有显著的二次函数关系（$P>0.05$，表3）．断根样方与不断根类似，季节性变化的土壤呼吸与土壤温度均呈现极显著指数相关（$P<0.01$），土壤温度解释了 76.8% ~91.4% 的变化，RCCK、RCT4.0、RCT3.25 和 RCT2.5 处理的土壤 Q_{10}值分别为 1.92、2.14、2.01 和 2.32，模拟酸雨处理均要大于对照组（表3）．各处理的季节性变化土壤呼吸与土壤含水量之间有显著的二次函数关系（$P<0.05$），但是 R^2 均在 0.2 以下（表3）．另外，不管不断根样方还是断根样方，土壤温度与土壤含水量的双因素模型比单因素模型具有更高的 R^2 值（表3）．

相关分析结果（表4）表明，在不断根样方，土壤呼吸速率与细根生物量有极显著的正相关关系（$P<0.01$）；与土壤 pH 和碳氮比均有显著的负相关关系（$P<0.05$）．细根生物量与土壤 pH 和土壤 C/N 比均有显著的负相关关系（$P<0.05$，表4）．在断根样方，土壤呼吸速率与土壤 pH 和碳氮比均有极显著的负相关关系（$P<0.01$）（表4）．

表3 土壤呼吸与5 cm 土壤温湿度关系1)

Table 3 Relationship between soil respiration and soil temperature and water at 5 cm

处理		5 cm 土壤温度				5 cm 土壤含水量				5 cm 土壤温度与含水量			
		拟合方程（$y=a\times e^{b\times T}$）			Q_{10}	拟合方程（$y=cM^2+dM+e$）				拟合方程（$y=f\times e^{g\times T}\times M^h$）			
		a	b	R^2		a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
不断根样地	CK	0.73	0.06	0.89**	1.84	254.10	−121.16	15.96	0.11	1.20	0.06	0.36	0.90**
	T4.0	0.62	0.07	0.93**	1.99	131.18	−64.22	9.48	0.02	0.54	0.07	−0.11	0.93**
	T3.25	0.48	0.08	0.87**	2.18	217.92	−109.45	15.16	0.02	0.31	0.08	−0.34	0.87**
	T2.5	0.42	0.09	0.89**	2.39	317.95	−161.80	21.93	0.05	0.31	0.09	−0.23	0.89**
断根样地	RCCK	0.49	0.07	0.84**	1.92	275.66	−121.70	14.58	0.19*	0.46	0.07	−0.04	0.84**
	RCT4.0	0.38	0.08	0.91**	2.14	241.32	−108.55	13.28	0.15*	0.39	0.08	0.02	0.91**
	RCT3.25	0.39	0.07	0.86**	2.01	238.11	−107.52	13.11	0.17*	0.26	0.07	−0.26	0.86**
	RCT2.5	0.26	0.08	0.77**	2.32	219.35	−99.58	12.14	0.13*	0.29	0.08	0.06	0.77**

1）* 表示相关性达到显著水平 $P<0.05$；** 表示相关性达到极显著水平 $P<0.01$；式中，y 表示土壤呼吸速率［$\mu mol\cdot(m^2\cdot s)^{-1}$］，$T$ 表示 5 cm 土壤温度（℃），M 表示 5 cm 土壤湿度，a、b、c、d、e、f、g、h 为常数

表4 土壤呼吸与土壤 pH、C/N 和细根生物量关系1)

Table 4 Relationship between soil respiration and soil pH, C/N ratio, and fine root biomass

变量	不断根样地				断根样地		
	土壤呼吸	pH	C/N	细根生物量	土壤呼吸	pH	C/N
土壤呼吸	1				1		
pH	−0.51*	1			−0.62**	1	
C/N	−0.45*	0.12	1		−0.61**	0.47*	1
细根生物量	0.64**	−0.47*	−0.53*	1			

1）* 表示相关性达到显著水平，$P<0.05$；** 表示相关性达到极显著水平，$P<0.01$

3 讨论

3.1 酸雨强度对土壤呼吸的影响

本研究表明，在不断根与断根样方，模拟酸雨使 2016 年土壤呼吸积累量降低了 3.89% ~25.56%（图4），抑制效果随着 pH 降低而增强；试验初期（7 月前）各模拟酸雨处理的变化差异不明显，之后（10 月后）模拟酸雨对土壤呼吸逐渐产生抑制（图3）．这与梁国华等[10]和张旭等[12]的研究结果一致，与陈书涛等的研究结果模拟酸雨对土壤呼吸没有明显促进或抑制作用不一致[11]．由于模拟酸雨对与土壤温度和水分无显著影响，温度只能解释土壤呼吸的季节性变化，所以温度和水分对模拟酸雨条件下土壤呼吸的差异贡献不大．

土壤呼吸主要由根系的自养呼吸与土壤微生物的异养呼吸组成，模拟酸雨对土壤呼吸的影响是对这两种呼吸的综合影响的表现．造成土壤呼吸速率与呼吸积累量降低的原因主要是：①首先，土壤本身对于酸雨的输入具有很强的缓冲作用，酸性物质会被缓冲物质抵消一部分，对于土壤微生物和植物根系的影响也被抵消一部分，对于土壤呼吸的影响表现得不那么明显[18,19]，因而 4 月与 7 月采集的土样 pH 差异不显著［图6（a）和表2］．另外试验初期由于模拟酸雨处理施加的酸液由硫酸与硝酸配置，

NO_3^- 作为氮源添加促进了根系生长[20]，酸雨与氮素共同作用导致根系生物量变化规律不明显，如 7 月 pH 3.25 处理的细根生物量最高且对照与 pH 4.0 差异不显著[图 6(c)]，根系呼吸变化也不明显[21]．这些因素导致了前期酸雨处理对于土壤呼吸的影响较弱．②随着酸雨的持续添加，土壤中一些有害元素如活性铝被活化释放，对植物根系产生了毒害效果，降低了根系生物量[22]．模拟酸雨处理的细根生物量 10 月之后显著低于对照组，不同酸雨强度降低了 1.40% ~18.67%[图 6(c)]．根系呼吸占土壤总呼吸的 32% 左右，土壤呼吸随着根系生物量的降低而降低．③试验后期模拟酸雨对于土壤碳氮循环过程比如氨化硝化作用产生影响，改变了土壤环境，使得土壤微生物活性降低，抑制土壤异养呼吸[23,24]．一般土壤碳氮比范围在 25 以内时，土壤适合微生物对有机质的分解活动[25]．目前研究中重庆缙云山森林土壤不同季节的碳氮比在 8.53 ~25 之间[26,27]，与之类似，本研究中土壤碳氮比为 8.38 ~19.43[图 6(b)]．但是 10 月之后模拟酸雨处理的土壤碳氮比显著高于对照组，T3.25 与 T2.5 提高了 23.16% ~ 47.38%，RCT3.25 与 RCT2.5 提高了 38.47% ~55.33%[图 6(b)]．碳氮比提高不利于微生物在有机质分解的养分释放，会使微生物在分解有机质的过程中出现氮受限，从而抑制微生物呼吸[28]．不断根样方与断根样方中土壤呼吸速率与土壤碳氮比的显著负相关关系也说明了这点(表 4)．酸雨添加下土壤碳氮比的增加对于微生物有机质分解能力有负面影响，影响了微生物呼吸，抑制了土壤总呼吸．

3.2　土壤自养呼吸与异养呼吸对酸雨响应的差异

目前关于酸雨对于土壤呼吸组分影响的研究较少，特别是对于其中自养与异养部分相互关系的研究很少．陈书涛等[12]于 2015 年的研究发现，模拟酸雨增加了异养呼吸在土壤总呼吸的比例，由此表明模拟酸雨减少了自养呼吸占比．本研究结果与其不同，酸雨强度增加减少了异养呼吸占比，减少程度随着模拟酸雨 pH 降低增强(图 5)．作为土壤呼吸的组成部分，根系的自养呼吸与土壤微生物的异养呼吸发生机制不一样(由于动物呼吸占比很少，在本研究被忽略)，对于酸雨的反馈方式也有差异[13]．酸雨的输入会影响根系生长，从而影响了根系呼吸[22]．而随着酸雨的添加土壤性质发生改变，养分环境的变化会影响微生物群落与数量，微生物对于土壤微环境需要重新适应[29]．本研究中模拟酸雨处理减少了异养呼吸占比，即酸雨强度增加对于异养呼吸的抑制更加强烈，说明相比根系土壤微生物对于土壤环境改变的响应更为强烈．

3.3　土壤呼吸与环境因子关系

土壤温度是影响土壤呼吸季节性变化的最主要原因，根系和微生物的活性以及底物的分解都对土壤温度有依赖性．本研究中土壤呼吸及异养呼吸的温度敏感系数在 1.84 ~2.39 之间变异(表 3)，在 Peng 等[30]的研究中国针阔混交林的土壤呼吸温度敏感系数范围(1.82 ~3.74)内．而且研究中土壤呼吸和异养呼吸的 Q_{10} 值均随酸度降低逐渐增加，增幅为 8.37% ~29.73%(表 3)，这个结果与张勇等[31]的研究一致．模拟酸雨增加土壤呼吸的温度敏感性系数，可能是根系呼吸和微生物呼吸的温度敏感性同时增加，或者微生物呼吸的温度敏感性增幅大于根系呼吸的降幅．本研究推断极有可能是酸雨影响了呼吸底物的质量，增加了微生物呼吸的温度敏感性，从而改变了土壤呼吸敏感性[32]．土壤呼吸过程中分解呼吸底物，较复杂的底物一般较难分解，需要的能量也随之增加，具有的活化能增高，表现为温度敏感性升高．本研究中模拟酸雨处理增加了土壤的碳氮比[图 6(b)]，导致供应给微生物的底物不易分解，具有的活化能升高，表现为温度敏感性升高．另外，模拟酸雨可能影响根系的温度敏感性，虽然与对照相比，模拟酸雨降低了 1.40% ~18.67% 的根系生物量[图 6(c)]，但是根系生物量与根系呼吸温度敏感性的关系尚不清楚．区分模拟酸雨下土壤微生物与根系呼吸的温度敏感性，是下一步的研究重点．

本研究中土壤湿度与土壤呼吸的相关性较弱，水热双因子模型相对单因素模型虽然提升了 R^2 值，但是提升效果微弱(表 3)．这一方面是由于土壤湿度的季节变异性小，观测期间未有极端值出现；另一方面土壤温度能够解释大部分土壤呼吸的季节性变异，土壤湿度作用较小．

有研究表明，酸雨会显著降低土壤 pH 值，加速土壤酸化[12]，抑制根系生长，影响根系呼吸[22]，另外土壤有机碳与土壤碳氮比均会随着模拟酸雨的酸度增强而变大[33]，而土壤 pH 值、有机碳和碳氮比等土壤理化性质会影响土壤呼吸[34]．本研究中，在不断根与断根样方，土壤呼吸速率与细根生物量有显著的正相关关系，与土壤 pH 和碳氮比有显著的负相关关系(表 4)．由于研究区模拟酸雨下土壤酸化影响了根系生长以及有机质分解，改变了碳氮循环过程如氨化硝化作用等，使碳氮比等土壤性质发生变化，影响了微生物的功能、活性以及对于底物的应用，从而影响土壤呼吸[23]．

4 结论

(1) 模拟酸雨对土壤总呼吸与异养呼吸产生了抑制作用, 这种抑制在试验初期 2016 年 7 月前不显著, 之后酸雨效应累积, 2016 年 10 月后对土壤呼吸产生显著抑制.

(2) 酸雨对于异养呼吸的抑制超过了自养呼吸, 并随着酸雨酸度增加对异养呼吸产生更强的抑制.

(3) 模拟酸雨虽然增加了土壤呼吸的温度敏感性, 但是对土壤温度与湿度无显著影响. 土壤温度与水分对模拟酸雨下土壤呼吸的差异贡献不大.

(4) 模拟酸雨显著增加了土壤碳氮比、降低了细根生物量. 土壤呼吸与细根生物量有显著正相关关系, 与土壤碳氮比有显著负相关关系. 因此细根生物量与碳氮比是酸雨处理下土壤呼吸差异的主要影响因素.

参考文献:

[1] Hashimoto S, Carvalhais N, Ito A, *et al*. Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database [J]. Biogeosciences, 2015, **12**(13): 4121-4132.

[2] 王家骏, 王传宽, 韩轶. 帽儿山不同年龄森林土壤呼吸速率的影响因子[J]. 生态学报, 2018, **38**(4): 1194-1202.
Wang J J, Wang C K, Han Y. Factors affecting soil respiration in stands of different ages in the Maoershan region, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(4): 1194-1202.

[3] 王志春. 广州地区酸雨长期变化趋势分析[J]. 气象科技, 2014, **42**(5): 922-927.
Wang Z C. Trends of precipitation acidity at Guangzhou from 1992 to 2012 [J]. Meteorological Science and Technology, 2014, **42**(5): 922-927.

[4] 王文兴, 许鹏举. 中国大气降水化学研究进展[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 266-281.
Wang W X, Xu P J. Research progress in precipitation chemistry in China[J]. Progress in Chemistry, 2009, **21**(2-3): 266-281.

[5] 李泽. 模拟酸雨对红壤性水稻土碳氮磷形态影响的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
Li Z. The research of effects of simulated acid rain on the carbon, nitrogen and phosphorus in red paddy soil [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.

[6] Lv Y N, Wang C Y, Jia Y Y, *et al*. Effects of sulfuric, nitric, and mixed acid rain on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities in subtropical forests of China [J]. Applied Soil Ecology, 2014, **79**: 1-9.

[7] Ouyang X J, Zhou G Y, Huang Z L, *et al*. Effect of simulated acid rain on potential carbon and nitrogen mineralization in forest soils[J]. Pedosphere, 2008, **18**(4): 503-514.

[8] Guo J F, Yang Z J, Lin C F, *et al*. Conversion of a natural evergreen broadleaved forest into coniferous plantations in a subtropical area: effects on composition of soil microbial communities and soil respiration [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, **52**(6): 799-809.

[9] 李春龙. 模拟酸雨对紫云英种子萌发、幼苗生长、根系形态指标及根系活力的影响[J]. 种子, 2017, **36**(6): 89-91.
Li C L. Effect of simulated acid rain on seed germination, seedling growth, root morphological index and root activity of milk vetch[J]. Seed, 2017, **36**(6): 89-91.

[10] 张旭. 增温及模拟酸雨对农田土壤呼吸及酶活性的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
Zhang X. Effects of warming and simulated acid rain on soil respiration and enzyme activities in a cropland[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016.

[11] Liang G H, Hui D F, Wu X Y, *et al*. Effects of simulated acid rain on soil respiration and its components in a subtropical mixed conifer and broadleaf forest in southern China[J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2016, **18**(2): 246-255.

[12] 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 等. 模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 1235-1244.
Chen S T, Sun L, Sang L, *et al*. Effects of simulated acid rain on soil respiration and heterotrophic respiration in a secondary forest[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 1235-1244.

[13] 吴迪, 张蕊, 高升华, 等. 模拟氮沉降对长江中下游滩地杨树林土壤呼吸各组分的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(3): 717-724.
Wu D, Zhang R, Gao S H, *et al*. Effects of simulated nitrogen deposition on the each component of soil respiration in the *Populus* L. plantations in a riparian zone of the mid-lower Yangtze river[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(3): 717-724.

[14] 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 等. 重庆缙云山 4 种典型林分土壤氮素动态变化[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(1): 66-73.
Sun S Q, Wang Y J, Wang Y Q, *et al*. Dynamic variation of soil nitrogen contents in four typical forest stands on Jinyun Mountain, Chongqing[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(1): 66-73.

[15] 翟勤. 重庆主城区降水化学特征及环境政策影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Zhai Q. Study on the chemical characteristics of precipitation in Chongqing urban area and environmental policy impact [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[16] 郭平. 三峡库区酸沉降特征及其对森林土壤的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Guo P. Characteristics of acid deposition and its effects on forest soil in the Three Gorges Reservoir area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.

[17] 唐晓芬, 王彬, 王玉杰, 等. 不同酸度模拟酸雨对重庆缙云山 2 种阔叶树光合特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2015, **24**(4): 45-51.
Tang X F, Wang B, Wang Y J, *et al*. Effect of simulated acid rain with different acidities on photosynthetic characteristics of two broad-leaved trees in Jinyun Mountain of Chongqing[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2015, **24**(4): 45-51.

[18] Tanikawa T, Sobue A, Hirano Y. Acidification processes in soils with different acid buffering capacity in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* forests over two decades [J]. Forest ecology and management, 2014, **334**: 284-292.

[19] 胡波, 王云琦, 王玉杰, 等. 模拟氮沉降对土壤酸化及土壤酸缓冲能力的影响[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(3): 418-424.
Hu B, Wang Y Q, Wang Y J, *et al*. Effects of simulated nitrogen deposition on soil acidification and soil buffering capacity [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(3): 418-424.

[20] 张蕊, 王艺, 金国庆, 等. 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(12): 3611-

3621.
Zhang R, Wang Y, Jin G Q, *et al*. Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(12): 3611-3621.

[21] 姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 等. 施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1802-1809.
Jiang J S, Guo S L, Wang R, *et al*. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration and temperature sensitivity in spring maize field in semi-arid regions on loess plateau[J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1802-1809.

[22] 吴玺, 梁婵娟. 模拟酸雨对水稻根系激素含量与生长的影响[J]. 环境化学, 2016, **35**(3): 568-574.
WU X, Liang C J. Effects of simulated acid rain on hormone concentration and growth of rice roots[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(3): 568-574.

[23] Zhu T B, Meng T Z, Zhang J B, *et al*. Nitrogen mineralization, immobilization turnover, heterotrophic nitrification, and microbial groups in acid forest soils of subtropical China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, **49**(3): 323-331.

[24] Cheng Y, Wang J, Mary B, *et al*. Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **57**: 848-857.

[25] 贺若阳, 杨万勤, 杨开军, 等. 川西亚高山 3 种森林土壤碳氮磷及微生物生物量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(4): 606-611.
He R Y, Yang W Q, Yang K J, *et al*. Soil C, N, P and microbial biomass properties of three dominant subalpine forests of western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, **22**(4): 606-611.

[26] 雷利国, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2669-2677.
Lei L G, Jiang C S, Hao Q J. Impacts of land use changes on soil light fraction and particulate organic carbon and nitrogen in Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2669-2677.

[27] 杨予静. 三峡库区消落带不同人工植被土壤化学性质动态变化[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
Yang Y J. Dynamic changes of soil chemical properties under artificial vegetations in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.

[28] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(22): 6678-6691.
Wang J L, Zhong Z M, Wang Z H, *et al*. Soil C/N distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in Qinhai-Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(22): 6678-6691.

[29] Wan X H, Huang Z Q, He Z M, *et al*. Soil C:N ratio is the major determinant of soil microbial community structure in subtropical coniferous and broadleaf forest plantations[J]. Plant and Soil, 2015, **387**(1-2): 103-116.

[30] Peng S S, Piao S L, Wang T, *et al*. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(5): 1008-1014.

[31] 张勇, 王连喜, 陈书涛, 等. 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, 2011, **31**(9): 1541-1547.
Zhang Y, Wang L X, Chen S T, *et al*. Effects of simulated acid rain on soil respiration in a northern subtropical secondary forest[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(9): 1541-1547.

[32] Craine J M, Morrow C, Fierer N. Microbial nitrogen limitation increases decomposition[J]. Ecology, 2007, **88**(8): 2105-2113.

[33] 李雅红. 酸雨胁迫下 3 种典型常绿阔叶林树种土壤呼吸的特征及影响因子[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
Li Y H. Soil respiration and impact factors of three kinds of typical evergreen broad-leaved seedings under acid rain stress[D]. Chongqing: Southwest University, 2010.

[34] 张俊丽, Tanveer S K, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(18): 192-199.
Zhang J L, Tanveer S K, Wen X X, *et al*. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(18): 192-199.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2019

CONTENTS