



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

模拟酸雨对我国亚热带森林土壤有机碳矿化的影响研究

程锦萍, 王鹭, 唐志珍, 史文竹, 李庆, 项剑, 王艮梅, 张焕朝

引用本文:

程锦萍,王鹭,唐志珍,史文竹,李庆,项剑,王艮梅,张焕朝. 模拟酸雨对我国亚热带森林土壤有机碳矿化的影响研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 520–526.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0093>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施用生物质炭5年后夏玉米土壤呼吸研究

马雯琪, 蒋靖佰伦, 李典鹏, 唐光木, 徐万里, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 111–118 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0044>

油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914–923 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566>

不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响

黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 张轩畅, 常贵蒋, 冯巍仑

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 894–903 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0455>

降雨对于干旱半干旱区湿地和农田土壤CO₂短期释放的影响

朱新萍, 贾宏涛, 周建勤, 蒋平安, 克热木阿依, 张雨佳, 张岚

农业资源与环境学报. 2017, 34(1): 54–58 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0109>

小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响

任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119–126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程锦萍, 王鹭, 唐志珍, 等. 模拟酸雨对我国亚热带森林土壤有机碳矿化的影响研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 520–526.

CHENG J P, WANG L, TANG Z Z, et al. Effects of simulated acid rain on soil organic carbon mineralization in the subtropical forests of China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 520–526.



开放科学 OSID

模拟酸雨对我国亚热带森林土壤有机碳矿化的影响研究

程锦萍, 王鹭, 唐志珍, 史文竹, 李庆, 项剑*, 王艮梅, 张焕朝*

(南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学林学院, 南京 210037)

摘要: 酸雨污染已成为威胁土壤和植物健康的全球性环境问题。为探究酸雨对我国亚热带森林土壤有机碳矿化的影响, 选取南京紫金山区域酸碱性不同的森林土壤, 通过室内培养试验, 以仅添加纯水(CK)和纯水+凋落叶(T0)为对照, 模拟凋落叶添加后, pH 分别为 1.65(T1)、3.67(T2)、5.55(T3)的酸雨对土壤有机碳矿化的影响。结果表明, 碱性土壤条件下, 各处理 CO₂ 累积排放量为 1.67~3.35 g·kg⁻¹, 表现为 T3>T2>T1>T0>CK; 而在酸性土壤中, CO₂ 累积排放量为 0.99~3.90 g·kg⁻¹, 表现为 T3>T0>T2>CK>T1。与 CK 相比, 添加凋落叶(T0)后, 酸性、碱性土壤 CO₂ 累积排放量分别增加了 41.20% 和 71.72%。轻度酸雨(T3)能促进 CO₂ 排放, 加快凋落叶的分解; 重度酸雨(T1)会显著抑制酸性土壤有机碳和凋落叶的矿化($P<0.05$), 但加速了碱性土壤有机碳和凋落叶的矿化; 而中度酸雨(T2)对两类土壤的土壤呼吸、凋落叶分解的抑制或促进作用均未达显著水平。凋落叶的添加会显著增加碱性土壤的 CO₂ 排放, 但对酸性土壤 CO₂ 排放的影响因模拟酸雨 pH 的差异而不同。总体而言, 不同强度的酸雨对碱性土壤有机碳矿化有促进作用; 而在酸性土壤中, 除轻度酸雨外, 其他强度的酸雨均抑制了土壤有机碳矿化。

关键词: 模拟酸雨; 土壤呼吸; 凋落叶分解; 有机碳矿化

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2022)03-0520-07

doi: 10.13254/j.jare.2021.0093

Effects of simulated acid rain on soil organic carbon mineralization in the subtropical forests of China

CHENG Jinping, WANG Lu, TANG Zhizhen, SHI Wenzhu, LI Qing, XIANG Jian*, WANG Genmei, ZHANG Huanchao*

(Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Forest, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Acid rain, one of the major global environmental problems, is severely endangering soil health and plant growth. To explore the effects of acid rain on soil organic carbon mineralization in the subtropical forests of China, in this study, two forest soils with different acidity were selected from the Zijin Mountain in Nanjing, only distilled water (CK) and distilled water + litters (T0) as controls, and incubated in microcosms to investigate the effects of simulated acid rain with the gradient pH levels of 1.65(T1), 3.67(T2), and 5.55(T3) on soil organic carbon mineralization under the addition of litters. The results showed that, CO₂ emission from the alkaline soil was 1.67~3.35 g·kg⁻¹, with the trend: T3>T2>T1>T0>CK; while in the acid soil, CO₂ emission was 0.99~3.90 g·kg⁻¹, and changed with: T3>T0>T2>CK>T1. The cumulative CO₂ emission of T0 treatment increased by 41.20% and 71.72% in the acid and alkaline soil, respectively compared with that of CK. High pH-simulated acid rain (T3) enhanced carbon dioxide (CO₂) emission and accelerated litter decomposition. Severe simulated acid rain (T1) with lower pH significantly inhibited organic carbon mineralization and litter decomposition in the acidic soil ($P<0.05$), and reduced CO₂ emissions; while enhanced the decomposition rates of organic carbon and litter in the alkaline soils. However, the effects of moderate simulated acid rain (T2) on soil respiration and litter decomposition in both two soils were not statistically significant. Leaf litter addition significantly increased CO₂ emissions from the alkaline while CO₂ emissions from the acidic soils were varied with the pH of stimulated acid rain. In summary, simulated acid rain with different pH stimulated organic carbon mineralization in alkaline soil; albeit with an inhibition effect in acid soil except the treatment of high pH acid rain.

Keywords: simulated acid rain; soil respiration; litter decomposition; organic carbon mineralization

收稿日期: 2021-02-08 录用日期: 2021-04-27

作者简介: 程锦萍 (1997—), 女, 安徽绩溪人, 硕士研究生, 从事土壤碳氮循环研究。E-mail: chengjinp@njfu.edu.cn

*通信作者: 项剑 E-mail: xiangjian@njfu.edu.cn; 张焕朝 E-mail: hc Zhang@njfu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41801073); 江苏省高等学校自然科学基金项目 (18KJB210009)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (41801073); The Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (18KJB210009)

酸雨(Acid rain)指 $\text{pH}<5.60$ 的降水,可分为硫酸型、硝酸型和混合型三种。我国目前的酸雨类型逐渐由以硫酸型为主转变为以混合型为主^[1-2],受酸雨污染的面积约占国土面积的40%^[3],其中以亚热带地区最为严重^[4],且随着工农业的发展, SO_2 、 NO_x 排放不断增加,污染面积进一步扩大^[5]。在酸雨的淋溶作用下,森林植被的叶片遭腐蚀,叶肉细胞受损导致光合作用减缓。此外,土壤 pH 下降导致土壤逐渐酸化,土壤结构及理化性质的变化、养分的流失对土壤微生物活动、土壤呼吸速率和植物生长发育状况均产生重要影响^[6],使得碳循环和转化发生改变,最终影响土壤有机碳封存^[7]。

土壤作为陆地生态系统中最大的有机碳库^[8-9],其细微的变化会对生态系统的碳平衡和温室效应造成显著的影响。土壤呼吸碳排放是陆地生态系统碳循环中仅次于总光合作用的主要途径^[10],其中土壤有机碳转化和凋落物的分解起到至关重要的作用。凋落物的分解是森林生态系统中林木养分归还土壤的重要途径^[11-13],其影响因素主要包括凋落物本身性质^[14]、微生物活动^[15]、酶活性^[16]和环境因子等。不同树种叶片的碳、氮含量存在差异,一般而言,阔叶树种凋落叶片分解易于针叶树种,碳氮比越小越易分解^[17];而温度^[13]、 pH ^[18]、降水和氮沉降^[19]等因素会对凋落物的分解起到促进或抑制的作用。同时,不同土壤微生物对土壤酸化的耐受性不同,不同凋落物对 H^+ 的缓冲能力也因其类型的不同而不同,因对酸雨的响应差异较大^[20]。南京地区酸雨中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 浓度的比值逐年下降^[21-22],而氮元素的输入可能会降低碳氮比^[23],从而促进林地凋落叶片分解。

近年来,关于酸雨对土壤理化性质和植物生长发育影响的研究报道相对较多,而其对凋落物分解、土壤呼吸的影响还存在较大争议,研究结果呈现促进作用^[24]、抑制作用^[25]、先促进后抑制^[4]或无显著性影响^[16]等,差异较大,仍需进一步研究。本研究以添加凋落物的酸性、碱性土壤为研究对象,通过室内培养试验模拟不同酸雨处理下土壤 CO_2 的排放,探究酸雨对凋落物分解和土壤呼吸的影响,为制定森林土壤应对酸雨沉降的措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

土壤样品取自南京紫金山北麓枇杷林地和女贞林地($32^{\circ}04' \text{ N}$, $118^{\circ}48' \text{ E}$),本地区属亚热带季风气候,

四季分明,年平均降水量达1 106.5 mm。2019年4月,在两处林地各随机选取三点采集表层(0~20 cm)土壤,分别等量混合,一部分用于测定理化性质,一部分进行为期1个月的培养试验。试验中添加的凋落物选取采样地主要树种的新鲜凋落叶片,分别为枇杷(*Eriobotrya japonica*)叶片、女贞(*Ligustrum lucidum*)叶片,带回实验室洗净,于40℃烘干后粉碎备用。

土壤有机碳(SOC)测定采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法;全氮(TN)测定采用凯氏定氮法;pH值的测定选用电位法。叶片有机碳采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法;全氮用浓 H_2SO_4 - H_2O_2 消煮,凯氏定氮法进行测定。具体步骤参见文献[26]。土壤与凋落叶的基本性质见表1。

表1 土壤和凋落叶的基本性质

Table 1 Properties of the soil and leaf litter

项目 Item	有机碳 Organic carbon/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳氮比 C/N	含水量 Water content/%	pH
枇杷林地土壤	6.38	1.31	4.87	4.51	7.78
女贞林地土壤	5.52	1.39	3.97	3.31	5.98
枇杷凋落叶	466.30	8.50	54.86	—	—
女贞凋落叶	466.30	16.10	28.96	—	—

1.2 试验设计

SO_4^{2-} 与 NO_3^- 按浓度比为2:1配制母液,分别加去离子水稀释得到pH值为1.65、3.67、5.55的溶液T1、T2、T3,并以 $\text{pH}=6.73$ 的去离子水T0作为对照。

试验共分为10组处理,每组处理设置3个重复。取5组250 mL的培养瓶,分别加入50 g风干后过2 mm筛孔的枇杷林地土壤,从中随机选取1组加入20 mL去离子水作为对照(SCK),其余4个处理在50 g土壤的基础上依次添加5 g枇杷凋落叶片,与土壤充分混匀,并分别加入20 mL去离子水(ST0)、T1溶液(ST1)、T2溶液(ST2)、T3溶液(ST3)。同理,取5组50 g风干后过2 mm筛孔的女贞林地土壤,随机选取1组加入20 mL去离子水作为对照(NCK),其余4组处理在50 g土壤的基础上依次添加5 g女贞凋落叶片,与土壤充分混匀,并分别加入20 mL去离子水(NT0)、T1溶液(NT1)、T2溶液(NT2)、T3溶液(NT3)。

培养瓶用保鲜膜封口,扎小孔以保持瓶内空气流通,放置于25℃的恒温培养箱中进行避光培养,每隔3 d补充去离子水以保持适宜的土壤含水量(40%)。

1.3 CO₂排放通量的测定

分别于培养的第1、3、5、7、10、15、20、31天测定CO₂排放通量。采用岛津GC-2014B气相色谱仪测定CO₂浓度,检测器为氢气火焰离子(FID)检测器,载气为氮气,氢气为燃气,以空气助燃。气体测定前将培养瓶的保鲜膜换成硅胶塞形成密封环境,随即从瓶中抽取1 mL气体以测定CO₂浓度,密封培养3 h后进行第二次测气,测定后换回原先的保鲜膜放置于培养箱继续培养。

通过测气当日2次CO₂浓度差值与时间间隔(3 h)的斜率计算出各处理下CO₂排放通量,计算公式^[27]如下:

$$F = \rho \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times V \times \frac{273}{273 + T} / m \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: F 为CO₂排放通量,mg·kg⁻¹·h⁻¹; ρ 为标准状态下CO₂的密度(1.964 kg·m⁻³); ΔC 为CO₂浓度差,μg·kg⁻¹; Δt 表示采气的时间间隔,3 h; V 代表培养瓶的有效体积,250 mL; T 为培养温度,℃; m 为土壤样品质量,kg。

CO₂累积排放量的计算公式^[27]为:

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times 24 \times (t_{i+1} - t_i) \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: M 为CO₂累积排放量,g·kg⁻¹; F 为CO₂排放通量,mg·kg⁻¹·h⁻¹; i 表示采气次数; t 为培养天数。

凋落叶碳的总分解量的估算采用差减法,计算公式为:

$$P = \left[(M_j - M_0) \times m_1 \times \frac{12}{44} \right] / m_2 \quad (3)$$

式中: P 为凋落叶C分解量,g·kg⁻¹; M 为CO₂累积排放量,g·kg⁻¹; M_j 表示不同处理下CO₂累积排放量,g·kg⁻¹; M_0 表示未添加凋落叶的对照组CO₂累积排放量,g·kg⁻¹; m_1 和 m_2 为添加的土壤和凋落叶质量,kg。

1.4 数据处理

用Excel 2010对数据进行整理分析,采用SPSS 20.0的单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行多重比较,分析不同处理在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平下的差异显著性,并用Origin 2019制图。

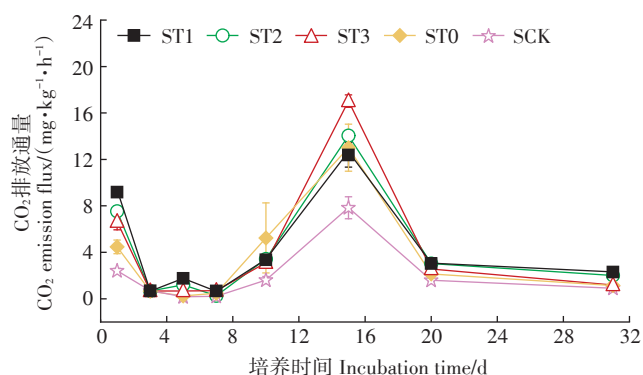
2 结果与分析

2.1 CO₂排放通量的动态变化

为期1个月的室内培养试验期间,不同处理下枇杷林地碱性土壤CO₂排放通量呈先减小后增大最终减小并趋于稳定的变化(图1)。培养1 d时,ST1处理的CO₂排放通量最高,达9.18 mg·kg⁻¹·h⁻¹,与其他各

组均有显著差异($P < 0.05$),约为ST0的2.05倍,是SCK的3.79倍。培养15 d后,各处理CO₂排放通量均达到峰值,最高为ST3,达17.03 mg·kg⁻¹·h⁻¹,分别为ST0、SCK、ST1和ST2的1.31、2.17、1.38和1.21倍,重度酸雨ST1抑制了CO₂的释放。总体而言,ST0的CO₂排放通量均值为3.42 mg·kg⁻¹·h⁻¹,显著高于SCK($P < 0.05$),枇杷凋落叶的添加促进了CO₂排放;而不同程度酸雨处理(ST1、ST2、ST3)的CO₂平均排放通量均显著高于ST0,模拟酸雨促进了土壤CO₂排放。

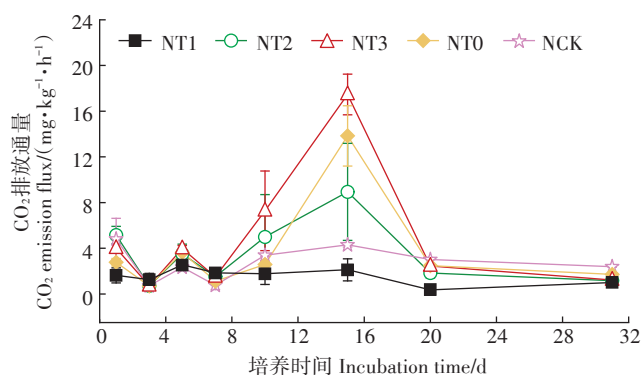
而对于女贞林地酸性土壤而言,不同酸雨处理下的CO₂排放通量则呈现先增大后减小的趋势(图2)。重度酸雨NT1处理在培养过程中明显抑制了CO₂排放,培养15 d时的排放通量仅为2.11 mg·kg⁻¹·h⁻¹,显



ST1:pH1.65+凋落叶;ST2:pH3.67+凋落叶;ST3:pH5.55+凋落叶;
ST0:pH6.73+凋落叶;SCK:pH6.73,对照组。下同
ST1:pH1.65+leaf litter;ST2:pH3.67+ leaf litter;ST3:pH5.55+ leaf litter;
ST0:pH6.73+ leaf litter;SCK:pH6.73, the control. The same below

图1 模拟酸雨处理对枇杷林土壤CO₂排放通量的影响

Figure 1 Effects of simulated acid rain treatments on soil CO₂ emission flux in *Eriobotrya japonica* forest



NT1:pH1.65+凋落叶;NT2:pH3.67+凋落叶;NT3:pH5.55+凋落叶;
NT0:pH6.73+凋落叶;NCK:pH6.73,对照组。下同
NT1:pH1.65+leaf litter;NT2:pH3.67+ leaf litter;NT3:pH5.55+ leaf litter;
NT0:pH6.73+ leaf litter;NCK:pH6.73, the control. The same below

图2 模拟酸雨处理对女贞林土壤CO₂排放通量的影响

Figure 2 Effects of simulated acid rain treatments on soil CO₂ emission flux in *Ligustrum lucidum* forest

著低于其他酸雨处理($P<0.05$),且在培养 20 d 时表现为极显著差异($P<0.01$)。而 NT3 处理下 CO_2 排放通量较高,培养 15 d 时达到峰值,排放通量为 $17.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,分别为 NT0、NCK、NT1 和 NT2 的 1.26、4.06、8.27 和 1.95 倍。与 NCK 相比,添加女贞凋落叶片(NT0)对 CO_2 排放的促进作用主要发生在培养中期,尤其在 15 d 时显著增加了 CO_2 的排放通量($P<0.05$)。总体而言, CO_2 排放通量均值为 $1.57 \sim 4.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,表现为 $\text{NT3}>\text{NT0}>\text{NT2}>\text{NCK}>\text{NT1}$,与 NT0 相比,NT3 处理显著促进了 CO_2 排放,而重度酸雨处理(NT1)则对 CO_2 排放有极显著的抑制作用。

2.2 CO_2 累积排放量变化

枇杷林地碱性土壤在培养初期 CO_2 排放量较少,且 ST1 处理显著高于其他处理(图 3)。培养 1 个月后各处理 CO_2 累积排放量为 $1.67 \sim 3.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表现为 $\text{ST3}>\text{ST2}>\text{ST1}>\text{ST0}>\text{SCK}$ 。相比 SCK 而言,添加枇杷凋落叶的处理均显著增加了 CO_2 累积排放量($P<0.05$),

且随着时间的推移差异逐渐变大。同时,与 ST0($2.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比,模拟酸雨处理(ST1、ST2 和 ST3)均促进了 CO_2 的释放,其中,ST3 处理显著高于 ST0($P<0.05$),促进作用最大;而 ST1、ST2 的累积排放量分别达到 3.21、3.26 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但与 ST0 差异不显著。

女贞林地酸性土壤的 CO_2 累积排放量对不同强度的酸雨响应结果相差较大(图 4)。培养 1 个月后各处理 CO_2 累积排放量为 $0.99 \sim 3.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表现为 $\text{NT3}>\text{NT0}>\text{NT2}>\text{NCK}>\text{NT1}$,其中,NT3 的 CO_2 累积排放量约为 NT1 的 4 倍,二者的差值达 $2.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,差异极显著($P<0.01$)。相比于 NCK 而言,添加女贞凋落叶的处理 NT0 前期抑制了 CO_2 的释放,培养 20 d 后则表现为促进作用,但最终并未显著增加 CO_2 的累积排放量。同时,与 NT0($3.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比,NT3、NT2 处理对 CO_2 累积排放量的促进或抑制均未达显著水平($P>0.05$),而 NT1($0.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理则显著抑制了 CO_2 的释放。

本研究中,酸性土和碱性土的本底 CO_2 累积排放

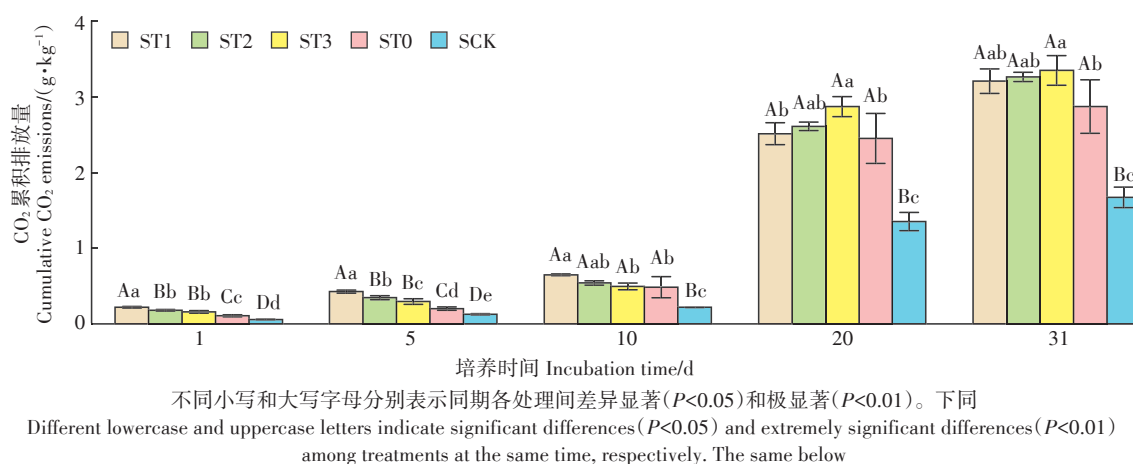


图3 枇杷林地土壤 CO_2 的累积排放量

Figure 3 Cumulative CO_2 emission from soil of *Eriobotrya japonica* forest

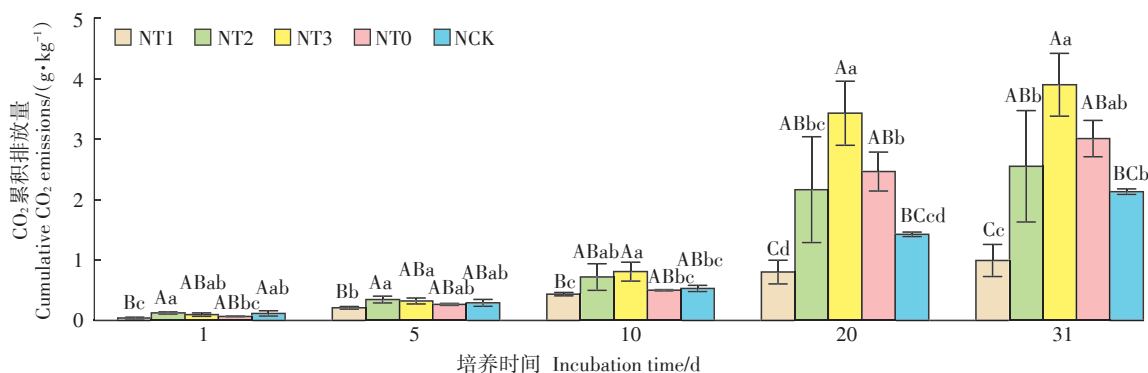


图4 女贞林地土壤 CO_2 的累积排放量

Figure 4 Cumulative CO_2 emission from soil of *Ligustrum lucidum* forest

量相差不大,且添加凋落叶后的变化趋势一致,分别增加了41.20%和71.72%。然而,不同pH模拟酸雨处理对二者CO₂排放的影响差异较明显。CO₂累积排放量均在酸度最低的T3处理(pH 5.55)最高,酸性土和碱性土分别较纯水处理(T0)增加了29.58%和16.62%。而pH 3.67的酸雨条件下,酸性土的CO₂排放较纯水处理降低了15.23%,碱性土则上升了13.62%。强酸性T1处理(pH 1.65)下,两种土壤的CO₂排放差异进一步扩大,其中,酸性土的CO₂排放较纯水处理下降67.00%;而碱性土则较纯水处理上升了约11.69%,达3.21 g·kg⁻¹,为酸性土(0.99 g·kg⁻¹)的3.24倍。由此可见,不同强度酸雨对酸性和碱性土壤CO₂排放的影响不同。

2.3 凋落叶的总分解量对不同模拟酸雨处理的响应

室内培养1个月后,枇杷林地碱性土壤中添加的枇杷凋落叶在不同程度的酸雨作用下损失碳的总量约为3.27~4.57 g·kg⁻¹,表现为ST3>ST2>ST1>ST0(图5a)。与ST0相比,模拟酸雨处理(ST1、ST2、ST3)均增加了枇杷凋落叶的分解。其中,ST3处理下的碳分解量达4.57 g·kg⁻¹,是ST0的1.40倍,二者差异显著($P<0.05$);而ST1(4.19 g·kg⁻¹)、ST2(4.34 g·kg⁻¹)虽在一定程度上也促进了叶片的分解,但与ST0差异未达显著水平。

酸性土壤女贞凋落叶的分解量则表现为NT3>NT0>NT2>NT1的规律(图5b)。其中,NT1处理的女贞凋落叶碳损失量为-3.10 g·kg⁻¹,极显著地抑制了土壤中女贞凋落叶的分解($P<0.01$),说明重度酸雨有效地增加了土壤有机碳的累积。NT3处理的女贞凋落叶碳损失量最大,达4.82 g·kg⁻¹,显著高于NT2(1.14 g·kg⁻¹, $P<0.05$),但与NT0(2.40 g·kg⁻¹)差异未达显著水平。总体而言,酸性土壤中凋落叶的分解量随着酸雨pH的升高而增加。

3 讨论

3.1 不同处理对CO₂排放的影响

本研究中,相对于CK而言,凋落叶添加处理促进了土壤CO₂排放,尤其是对碱性土壤促进作用明显,其CO₂累积排放量显著提高。这与WANG等^[28]的研究结果一致,凋落物分解产生的CO₂对土壤呼吸的贡献达33%。添加凋落叶增加了土壤微生物的碳源供应^[29],对土壤原有有机碳的矿化起到了“激发效应”,且凋落叶本身的分解也会产生大量CO₂^[30],从而明显增加CO₂的排放。

然而,凋落叶添加后的土壤CO₂排放随模拟酸雨强度的差异表现出不同的变化规律,这可能与酸雨pH、土壤本身性质、凋落叶分解特征有关。但无论是酸性土壤还是碱性土壤,轻度酸雨(pH 5.55)处理下的CO₂排放通量均在培养15 d时出现最大值,且累积排放量高于其他处理。研究表明,弱酸环境会提高土壤微生物的群落多样性^[4],随着微生物活动程度加大,叶片的易分解物质不断被分解,从而使得产生的CO₂排放量迅速增多。总体而言,短期的低强度酸雨不一定会显著抑制土壤呼吸,反而有可能促进CO₂排放^[3]。而重度酸雨(pH 1.65)对两种土壤的影响差异较大,因土壤对H⁺的缓冲能力随其酸碱性不同而有所差异,碱性土壤受酸雨影响较小,pH下降较为缓慢^[31];相反,酸性土壤因其对H⁺的缓冲能力有限,土壤pH值变化较大^[32],重度酸雨会使土壤酸化,而H⁺过多会对微生物产生毒害作用^[33],导致土壤微生物种类、结构和活性的改变,从而抑制土壤有机碳的矿化和凋落物的分解,降低CO₂的释放^[21]。

3.2 凋落叶分解特征差异

本研究中,凋落叶分解后以CO₂排放形式损失的

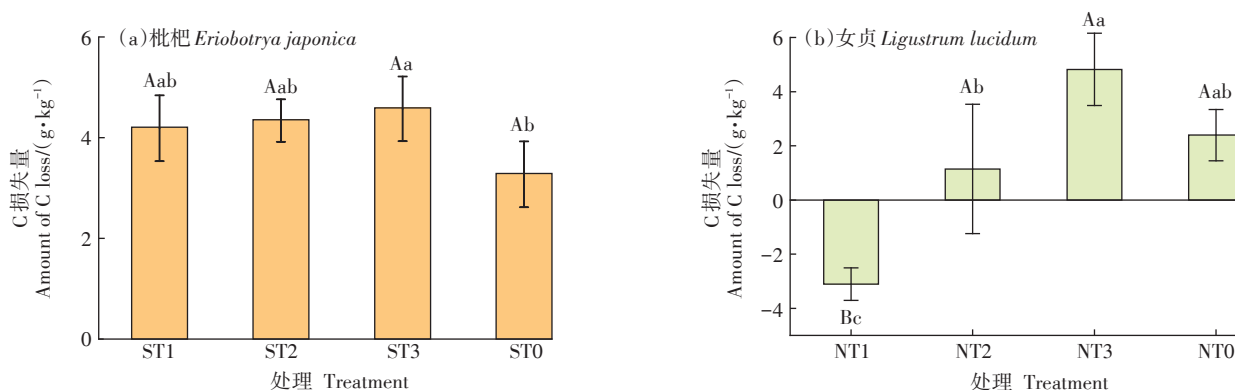


图5 模拟酸雨处理对枇杷和女贞凋落叶分解C损失量的影响

Figure 5 Effects of simulated acid rain treatments on decomposition C loss of leaf litter of *Eriobotrya japonica* and *Ligustrum lucidum*

碳量因土壤酸碱性不同而有明显差异。其中,不同强度的酸雨均增加了碱性土壤凋落叶分解的碳损失量,且pH 5.55的酸雨处理最为明显。这可能是由于轻度酸雨为碱性土壤中微生物活动创造了适宜的环境,从而加快了凋落叶的分解速率^[4]。

而酸性土壤中,女贞凋落叶分解的碳损失量对不同酸雨的响应不同。轻度酸雨(pH 5.55)对凋落叶分解有一定的促进作用,而重度酸雨(pH 1.65)则明显抑制了凋落叶分解。因为,随着酸雨酸性的增强,输入土壤中的 H^+ 不断增加,进而加重土壤酸化程度,导致微生物活性受到抑制,从而减缓凋落叶的分解速率^[2]。相关研究表明,不同酸雨处理会降低凋落物分解,抑制土壤呼吸和微生物活性^[21],但土壤总有机碳含量会显著上升^[8]。WU等^[25]通过长期模拟试验证实,不同酸雨对凋落物的养分释放有延缓作用,可显著降低土壤微生物量和凋落物的分解速率,促进有机碳的积累,对亚热带森林土壤有机碳固存具有重要意义。

酸雨强度、微生物活动和土壤类型都可能是导致凋落叶分解碳损失量出现差异的原因,故酸雨中 H^+ 对凋落物分解的影响取决于森林生态系统中土壤理化性质^[34]。此外,酸雨本身并不影响凋落物碳、氮释放,而土壤碳、氮的减少可能与酸雨沉降和土壤微生物的取食偏好有关^[5]。

4 结论

(1)轻度酸雨能促进土壤呼吸,增加凋落叶的分解,加快有机碳矿化;而重度酸雨会显著抑制酸性土壤有机碳矿化,减缓凋落叶分解,从而降低 CO_2 的排放量,但对碱性土壤的有机碳矿化无抑制作用,反而增加了 CO_2 的排放量;中度酸雨对两类土壤的呼吸、凋落叶分解的影响均不明显。

(2)凋落叶的添加会显著增加碱性土壤的 CO_2 排放量,但对酸性土壤 CO_2 排放的影响因模拟酸雨pH的不同而有所差异。

参考文献:

[1] 解淑艳,王胜杰,于洋,等. 2003—2018年全国酸雨状况变化趋势研究[J]. 中国环境监测, 2020(4): 80–88. XIE S Y, WANG S J, YU Y, et al. Analysis on acid rain status and its change trends in China from 2003 to 2018[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020(4): 80–88.

[2] LIU X, ZHANG B, ZHAO W R, et al. Comparative effects of sulfuric and nitric acid rain on litter decomposition and soil microbial community in subtropical plantation of Yangtze River Delta region[J]. *Science of*

the Total Environment, 2017, 601: 669–678.

[3] 刘自强,危晖,章家恩,等. 酸雨对土壤呼吸的影响机制研究进展与展望[J]. 土壤, 2019, 51(5): 843–853. LIU Z Q, WEI H, ZHANG J E, et al. Effects of acid rain on soil respiration and underlying mechanisms: A review[J]. *Soils*, 2019, 51(5): 843–853.

[4] 王楠,潘小承,白尚斌. 模拟酸雨对我国亚热带毛竹林土壤呼吸及微生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3420–3430. WANG N, PAN X C, BAI S B. Effects of simulated acid rain on soil respiration and microbial diversity in Moso bamboo forest in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3420–3430.

[5] WEI H, MA R, ZHANG J E, et al. Quality dependence of litter decomposition and its carbon, nitrogen and phosphorus release under simulated acid rain treatments[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(16): 19858–19868.

[6] 张月全,张海燕,谢书妮,等. 酸雨区杉木人工林土壤盐基离子含量动态[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(2): 188–194. ZHANG Y Q, ZHANG H Y, XIE S N, et al. Dynamics of the soil base cations in Chinese fir plantations in acid rain region[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2016, 36(2): 188–194.

[7] 吴建平,梁国华,熊鑫,等. 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[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6686–6693. WU J P, LIANG G H, XIONG X, et al. 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 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6686–6693.

[8] 张慧玲,吴建平,熊鑫,等. 亚热带森林土壤碳库稳定性与碳库管理指数对模拟酸雨的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 657–667. ZHANG H L, WU J P, XIONG X, et al. Effects of simulated acid rain on soil labile organic carbon and carbon management index in subtropical forests of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 657–667.

[9] 吕富成,王小丹. 凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展[J]. 土壤, 2017, 49(2): 225–231. LÜ F C, WANG X D. Contribution of litters to soil respiration: A review[J]. *Soils*, 2017, 49(2): 225–231.

[10] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579–582.

[11] 秦倩倩,王海燕. 森林凋落物养分空间变异及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1318–1329. QIN Q Q, WANG H Y. Spatial variation of forest litter nutrients and its controlling factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1318–1329.

[12] 杨关吕,黎建强,左嫚,等. 滇中高原磨盘山云南松林凋落物输入动态及养分归还量研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2158–2164. YANG G L, LI J Q, ZUO M, et al. Litter production variation and nutrient return of *Pinus yunnanensis* forest in Mopan Mountain in central Yunnan Plateau[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(11): 2158–2164.

[13] 李振华,于澎涛,王彦辉,等. 重庆酸雨区受害马尾松林凋落物特征及其环境因子响应[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 19–24. LI Z H, YU P T, WANG Y H, et al. Characters of litter-fall in damaged pinus massoniana forests and its responses to environmental factors in the acid rain region of Chongqing, China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011,

- 47(8):19-24.
- [14] 唐黎, 林永慧, 何兴兵. 杉木和香樟酸雨酸解底物的分解格局[J]. 生态学报, 2017, 37(18):6038-6052. TANG L, LIN Y H, HE X B. The patterns of responses of litter decomposition of *Cunninghamia* needles and *Cinnamomum* leaves to substrate acidolysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18):6038-6052.
- [15] 李姗姗, 王正文, 杨俊杰. 凋落物分解过程中土壤微生物群落的变化[J]. 生物多样性, 2016, 24(2):195-204. LI S S, WANG Z W, YANG J J. Changes in soil microbial communities during litter decomposition[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(2):195-204.
- [16] ZHENG W H, LI R S, YANG Q P, et al. Short-term response of soil respiration to simulated acid rain in *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* plantations[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3):1239-1249.
- [17] 杨林, 邓长春, 陈亚梅, 等. 川西高山林线交错带凋落叶分解速率与初始质量的关系[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12):3602-3610. YANG L, DENG C C, CHEN Y M, et al. Relationships between decomposition rate of leaf litter and initial quality across the alpine timberline ecotone in western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12):3602-3610.
- [18] 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 南亚热带不同演替阶段森林土壤呼吸对模拟酸雨的响应[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1):125-134. LIANG G H, WU J P, XIONG X, et al. Response of soil respiration to simulated acid rain in three successional subtropical forests in southern China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(1):125-134.
- [19] 沈芳芳, 刘文飞, 吴建平, 等. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(21):8078-8090. SHEN F F, LIU W F, WU J P, et al. Litter decomposition in a Chinese fir plantation in response to nitrogen deposition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21):8078-8090.
- [20] 李一凡. 缙云山典型林分土壤环境与土壤呼吸对酸雨的响应[D]. 北京:北京林业大学, 2019. LI Y F. Response of soil environment and soil respiration to acid rain in typical forest stands in Jinyun Mountain[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2019.
- [21] LÜ Y, 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.
- [22] 高俊, 郑有飞, 陈书涛. 2007—2008年南京江北工业区大气降水化学特征[J]. 大气科学学报, 2012, 35(6):697-701. GAO J, ZHENG Y F, CHEN S T. Chemical characteristics of precipitation in the industrial area to the north of the Yangtze River in Nanjing in 2007—2008[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2012, 35(6):697-701.
- [23] 刘文飞, 樊后保. 杉木人工林凋落物C、N、P归还量对氮沉降的响应[J]. 林业科学, 2011, 47(3):89-95. LIU W F, FAN H B. Impacts of nitrogen deposition on C, N, and P fluxes in the litterfall of Chinese fir plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(3):89-95.
- [24] FANGUEIRO D, SURGY S, COUTINHO J, et al. Impact of cattle slurry acidification on carbon and nitrogen dynamics during storage and after soil incorporation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(4):540-550.
- [25] WU J P, LIANG G, HUI D F, et al. Prolonged acid rain facilitates soil organic carbon accumulation in a mature forest in southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544:94-102.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2000:638. LU R K. Soil agricultural chemical analysis methods[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000:638.
- [27] FARZANA D, MARIKO S, RYUSUKE H. Effects of soil aggregate size, moisture content and fertilizer management on nitrous oxide production in a volcanic ash soil[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57(5):733-747.
- [28] WANG Q K, HE T X, WANG S L, et al. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178:152-160.
- [29] 卢晓蓉, 尹艳, 冯竞仙, 等. 杉木凋落物及其生物质炭对土壤原有有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4):943-953. LU X R, YIN Y, FENG J X, et al. Effects of Chinese fir litter and its biochar addition on mineralization of native soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4):943-953.
- [30] CROW S E, LAJTHA K, BOWDEN R D, et al. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(10):2224-2232.
- [31] 杨忠芳, 余涛, 唐金荣, 等. 湖南洞庭湖地区土壤酸化特征及机理研究[J]. 地学前缘, 2006(1):105-112. YANG Z F, YU T, TANG J R, et al. A study of the characteristics and mechanisms of soil acidification in the Dongting Lake region in Hunan Province, south China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006(1):105-112.
- [32] 朱雪竹, 黄耀, 杨新中. 模拟酸雨对不同土壤有机碳和作物秸秆分解的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2):480-484. ZHU X Z, HUANG Y, YANG X Z. Effects of simulated acid rain on decomposition of soil organic carbon and crop straw[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2):480-484.
- [33] 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.
- [34] TANG L, LIN Y H, HE X B, et al. Acid rain decelerates the decomposition of *Cunninghamia lanceolata* needle and *Cinnamomum camphora* leaf litters in a karst region in China[J]. *Ecological Research*, 2019, 34(1):193-200.