

DOI: 10.5846/stxb202105141266

田慧敏, 刘彦春, 刘世荣. 暖温带麻栎林凋落物调节土壤碳排放通量对降雨脉冲的响应. 生态学报, 2022, 42(10): 3889-3896.

Tian H M, Liu Y C, Liu S R. Litter regulates the response of soil CO₂ emission to precipitation pulse in warm temperate *Quercus acutissima* forest. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3889-3896.

暖温带麻栎林凋落物调节土壤碳排放通量对降雨脉冲的响应

田慧敏¹, 刘彦春^{1,*}, 刘世荣²

1 河南大学生命科学学院, 河南省全球变化生态学国际联合实验室, 开封 475004

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

摘要:凋落物既是森林生态系统养分循环的重要构件, 又是森林土壤环境和功能的关键调节因子。降雨脉冲导致的土壤碳排放变异是陆地生态系统碳汇能力评价的不确定性来源之一。凋落物在调节土壤碳排放对降雨脉冲的响应中的作用仍缺乏科学的评价。通过在暖温带栎类落叶阔叶林中设置不同凋落物处理(对照、去除凋落物和加倍凋落物)和降雨模拟实验以阐明凋落物数量变化对土壤呼吸脉冲的影响。结果表明:模拟降雨脉冲之前,不同凋落物处理下的土壤呼吸存在显著差异;与对照相比,加倍凋落物导致土壤呼吸速率显著增加 57.6%,然而,去除凋落物则对土壤呼吸无显著影响。模拟降雨后 52 小时内,对照、去除凋落物和加倍凋落物样方的土壤累积碳排放量分别为 251.69 gC/m², 250.93 gC/m² 和 409.01 gC/m², 加倍凋落物处理下的土壤碳排放量显著高于对照和去除凋落物处理;然而,去除凋落物与对照之间无显著差异。此外,不同凋落物处理下土壤呼吸的脉冲持续时间存在显著差异;加倍凋落物显著提高降雨后土壤呼吸脉冲的持续时间,分别比对照和去除凋落物高出 262% 和 158%。多元逐步回归分析表明,土壤总碳排放通量和土壤呼吸的脉冲持续时间与土壤理化特征密切相关;土壤微生物量氮含量可解释土壤总碳排放通量变异的 30.3%,而土壤硝态氮和有机碳含量则共同解释了呼吸脉冲持续时间变异的 69.5%。该研究表明森林凋落物的数量及其对降雨的滞留作用是调控土壤碳排放通量的重要因素,凋落物对森林生态系统碳循环过程的影响须考量凋落物对土壤微环境的间接作用。

关键词:凋落物;脉冲降雨;土壤呼吸;土壤微生物

Litter regulates the response of soil CO₂ emission to precipitation pulse in warm temperate *Quercus acutissima* forest

TIAN Huimin¹, LIU Yanchun^{1,*}, LIU Shirong²

1 International Joint Research Laboratory for Global Change Ecology, School of Life Sciences, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, China's National Forestry and Grassland Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Litter is not only a critical component for nutrient cycling in forest ecosystem, but also an important regulator of soil environment and function in forests. The variation in soil CO₂ emission caused by precipitation pulse is one of the sources of uncertainty for carbon sink evaluation in the terrestrial ecosystem. The role of forest litter in regulating the response of soil CO₂ emissions to precipitation pulses remains unclear. To clarify the influence of litter quantity change on the response of soil respiration to precipitation pulse, we carried out an experiment with precipitation pulse applied on different litter treated plots (control, litter removed, and litter doubled treatments) in a *Quercus acutissima* forest in the

基金项目:国家自然科学基金(31971454, 31600379); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2020)

收稿日期:2021-05-14; **网络出版日期:**2022-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanchunliu@henu.edu.cn

warm temperate zone (Jigong Mountain at Henan Province). The results showed that there were significant differences in soil respiration between plots with different litter treatments before the application of precipitation pulse. Specifically, compared with the control, litter doubled treatment significantly increased soil respiration rate by 57.6%, however, litter removed treatment showed no significant effect on soil respiration. Within 52 hours after the application of precipitation pulse, the cumulative soil CO₂ emissions were 251.69 gC/m², 250.93 gC/m², and 409.01 gC/m² under control, litter removed, and litter doubled treatments, respectively. In addition, soil CO₂ emissions under litter doubled treatment were significantly higher than those in both control and litter removed treatment; however, there was no significant difference between litter removed treatment and the control. Moreover, substantial differences in the duration time of soil respiration after precipitation pulse were found between plots with different litter treatments. Litter doubled treatment substantially elevated the duration time of soil respiration after precipitation pulse, showing 262% and 158% higher than the control and litter removed treatment, respectively. Multiple stepwise regression analysis indicated that cumulative soil CO₂ emissions and the duration time of soil respiration were closely related to the soil physicochemical properties. Soil microbial biomass nitrogen alone was responsible for 30.3% variations in cumulative soil CO₂ emission, while soil nitrate nitrogen content and soil organic carbon content together accounted for 69.5% variations in the duration time of soil respiration after the precipitation pulse. The findings in this study suggest that the forest litter quantity and its interception effect on rainfall play an important role in regulating soil CO₂ emission. Therefore, the potential indirect effect of forest litter on soil microclimate should be taken into account while assessing the effects of litter on carbon cycling processes in forest ecosystems.

Key Words: litter; precipitation pulse; soil respiration; soil microorganism

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分,其经过复杂的分解过程释放出大量的营养元素,在维持土壤肥力、促进植物生长以及生态系统物质循环和养分平衡等方面起着重要作用^[1]。研究表明,森林植物吸收的养分中,有 90% 以上的氮和磷元素来自于凋落物分解所释放的养分^[2]。此外,凋落物在维持土壤物理结构和改善土壤微环境等方面也发挥着举足轻重的作用。有报道显示,覆盖在土壤表面的凋落物可以通过阻挡土壤与大气的热量交换,而增加冬季森林土壤的温度,从而推迟森林土壤冻结的时间^[3]。另一方面,凋落物有较强的水分吸收和拦截能力,进而减少地表水分蒸发,延长水分在土壤中的停滞时间,对森林水分再分配和蓄水保水具有重要作用^[4]。

土壤是全球第二大碳库,土壤碳排放在全球碳循环中起着至关重要的作用,其细微的波动都会改变大气中 CO₂ 的浓度^[5]。有研究表明土壤呼吸排放的 CO₂ 量远高于化石燃料燃烧释放的 CO₂ 量^[6]。植物凋落物作为土壤碳的主要来源之一,可为土壤微生物提供必须的营养物质,又可以调节土壤的微环境,进而影响土壤呼吸速率^[7]。Raich 等^[8] 研究表明,在森林生态系统中凋落物对土壤呼吸的贡献率高达 33%。在一定范围内,土壤呼吸速率通常会随着凋落物量的增加而升高,并且加倍凋落物引起的土壤呼吸的增加量远远大于去除凋落物引起的土壤呼吸降低量^[9-10]。作为调节土壤呼吸的重要非生物因子,土壤湿度的高低主要受自然降水的影响。自然降水可以在短时间内快速提升土壤水分含量,进而显著增加土壤呼吸^[11]。学者们把降雨接触地表及水分下渗过程中引起土壤短时间内释放大量 CO₂ 的现象称为脉冲效应^[12]。从全球尺度来看,降雨脉冲导致的土壤呼吸增量约占全年土壤呼吸的 6%—21%^[11,13]。森林生态系统发达的凋落物层对自然降水有显著的阻截作用,导致自然降水(尤其是低强度降水)并不能快速进入土壤,而是在凋落物层停滞一段时间后再入渗到土壤中,进而对土壤微生物以及碳排放产生影响。然而,针对土壤呼吸响应降雨脉冲的研究往往忽略了地表凋落物所发挥的作用,导致土壤碳排放及相关过程的评价仍不全面。

本研究以暖温带典型的落叶阔叶林—麻栎(*Quercus acutissima*)林为研究对象,通过在林下设置 3 种不同量级的凋落物处理水平,在模拟 5 mm 的自然降水后测定土壤累积碳排放量、脉冲持续时间、土壤生物理化指标,以阐明森林生态系统中凋落物在调节土壤呼吸与降雨脉冲关系中所发挥的作用。该研究对于全面科学评

估森林生态系统碳排放过程具有重要的参考意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河南省信阳市鸡公山国家级自然保护区(31°46′—31°52′N, 114°01′—114°06′E), 平均海拔高度为 210 m。该地区处于中国南北的分水岭, 受东亚季风气候的影响, 具有北亚热带向暖温带过渡的季风气候和山地气候的特征, 这里四季分明, 光、热、水同期, 年平均气温 15.2℃, 极端最高气温 40.9℃, 极端最低气温 -20.0℃, 年平均降水量 1118.7 mm。植被类型以亚热带植物为主, 兼有暖温带的物种。植被地带性表现出典型的由北亚热带常绿阔叶林与落叶阔叶林地带向暖温带落叶阔叶林地带过渡的特征, 是多种区系成分的交汇带。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布置及处理

于 2014 年 8 月 2 日, 在鸡公山国家级自然保护区选取麻栎为优势种的次生林开展研究, 林龄约为 40 a, 冠层高度约 18.5 m, 林冠郁闭度约 90%。选取地势相对平坦且土壤质地和植被类型相对均一的区域, 设置 3 个 20 m×20 m 的实验区组。在每个区组内随机布置 3 个 1 m×1 m 的实验样方, 样方彼此间隔 8—10 m, 样方内无乔木、灌木的生长。于 2014 年 9 月 5 日, 采用手动添加和去除凋落物的方式进行凋落物处理。3 种凋落物处理方式分别为: (1) 对照: 保持原状态, 不进行任何处理; (2) 去除凋落物(简称去凋): 将小样方内地表可见的凋落物如凋落叶片、树枝和枯草等进行收集, 并移除样方, 凋落物(以干重计)的平均去除量为 1224 g/m²; (3) 加倍凋落物(简称加凋): 将同一区组内去凋样方中收集的凋落物均匀撒在加凋样方内。在整个实验过程中, 每周对去凋样方进行 1 次清理, 将收集出来的凋落物均匀放入加凋处理样方。

1.2.2 土壤呼吸及土壤理化性质的测定

2014 年 9 月 5 日, 即凋落物初次处理的当天, 在每个 1 m×1 m 的样方中心安装 1 个内径为 10 cm、高为 10 cm 的 PVC 土壤呼吸环, 呼吸环埋入土壤的深度为 7 cm。在土壤扰动完全恢复后, 于 10 月 1 日和 10 日采用 LI-8100 土壤 CO₂ 通量全自动测量系统(LI-COR 公司, 美国)各测定一次土壤呼吸, 做为模拟降雨处理前的背景呼吸值。

试验地区自 2014 年 10 月 1 至 20 日期间内未发生降雨, 于 10 月 16 日对所有样方进行模拟降雨处理。在每个样方采用喷壶手工喷撒的方法模拟降雨强度为 5 mm 的自然降雨(5 L/m²), 该强度的降雨发生频率约占信阳全年降雨事件的 60%, 具有较高的代表性。喷施速率以地表不发生明显径流为宜, 且样方内无明显积水, 下渗时间约为 5—8 min, 处理方法可参考胡梦君^[14]。在 5 mm 自然降雨喷施完成后的 0、10、15、20、25、35、45、65、85、115、145、205、265、385、565、925、1285、1645、2005、2365 min 和 3085 min, 采用 LI-8100 土壤 CO₂ 通量全自动测量系统测定每个样方的土壤呼吸速率。

土壤呼吸测定全部完成后, 采用 5 cm 内径的土壤钻在每个样方内分 3 个点采集 0—10 cm 土壤样品并充分混合, 带回实验室进行土壤理化性质分析。土壤样品首先用 2 mm 土壤筛进行筛分, 将剩余在筛内的植物残体和砂石进行分类, 根据颜色分检出直径 < 2 mm 的植物细根, 清洗干净后在 60℃ 下烘干 48 小时, 并称重。通过 2 mm 土壤筛的鲜土, 一部分采用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提法测定土壤微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)^[15], 采用全自动间断化学分析仪(SmartChem200, Alliance, France)测定土壤硝态氮和铵态氮^[16]; 一部分自然风干后, 过 100 目土壤筛, 用元素分析仪(Vario Macro Cube, Germany)测定土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)^[17]。

1.2.3 数据处理

采用面积累积法核算各个样方在模拟降雨后 0—3085 min 土壤总碳排放量(gC/m²)。降雨脉冲后的土壤碳排放动态过程采用 Liu^[18] 中的方程($Y=Y_0+ate^{-bt}$)进行描述。其方程中的 b 值代表呼吸脉冲达到峰值后

恢复到初始状态(模拟降雨脉冲处理之前的呼吸水平)所需的时间,即脉冲持续时间。所有数据在正态性和方差齐性检验后,采用单因素方差分析检验不同凋落物处理之间的统计显著性差异,采用线性回归分析土壤环境因子与土壤总碳排放及脉冲持续时间之间的关系,并进一步用多元逐步回归分析检测环境因子对土壤碳排放的贡献率。所有统计分析在 SPSS 19.0 中完成,做图在 Microsoft Excel 2013 中完成。

2 结果

2.1 凋落物处理对土壤呼吸的影响

在凋落物处理近 30 天之后,模拟降雨脉冲之前测定的土壤呼吸在不同凋落物处理之间存在显著差异 ($P<0.05$,图 1)。与对照样方相比,加倍凋落物导致土壤呼吸速率显著增加 57.6%,然而去除凋落物在短期内则对土壤呼吸无显著影响(图 1)。此外,加倍凋落物下的土壤呼吸速率显著高于去除凋落物样方。

2.2 土壤碳排放通量与脉冲持续时间

分析表明,不同凋落物处理导致土壤碳排放量对 5 mm 降雨的响应差异显著(图 2)。模拟 5 mm 降雨后,对照、去除凋落物和加倍凋落物下的土壤碳排放量分别是 251.69 gC/m², 250.93 gC/m² 和 409.01 gC/m²。加倍凋落物下的土壤碳排放量比对照和去除凋落物分别高出 62.5% 和 63.0% ($P<0.05$)。然而,相对于对照样方,5 mm 降雨对去除凋落物样方土壤碳排放无显著影响 ($P>0.05$;图 2)。

不同凋落物处理对土壤呼吸的脉冲持续时间的的影响差异显著(图 2)。模拟 5 mm 降雨后,对照、去除凋落物和加倍凋落物下的土壤呼吸脉冲持续时间分别为 18.83h, 26.33h 和 68.00h。加倍凋落物下的呼吸脉冲持续时间比对照和去除凋落物分别高出 262% 和 158% ($P<0.05$)。然而,土壤呼吸脉冲持续时间在对照样方和去凋样方之间并无显著差异 ($P>0.05$;图 2)。

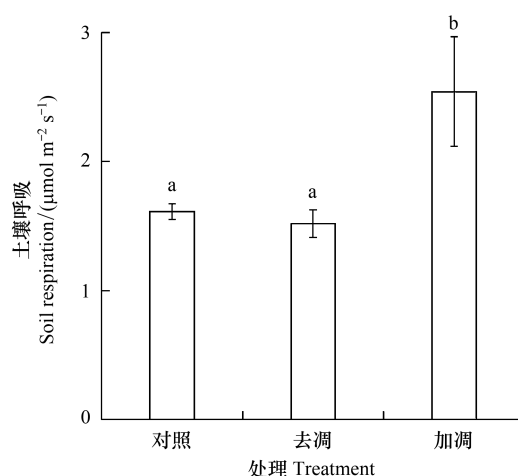


图 1 模拟降雨脉冲前不同凋落物处理样方土壤呼吸的差异(平均值±标准误, $n=3$)

Fig. 1 Differences in soil respiration between plots under different litter treatments before precipitation pulse (mean ± S.E., $n=3$)

图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

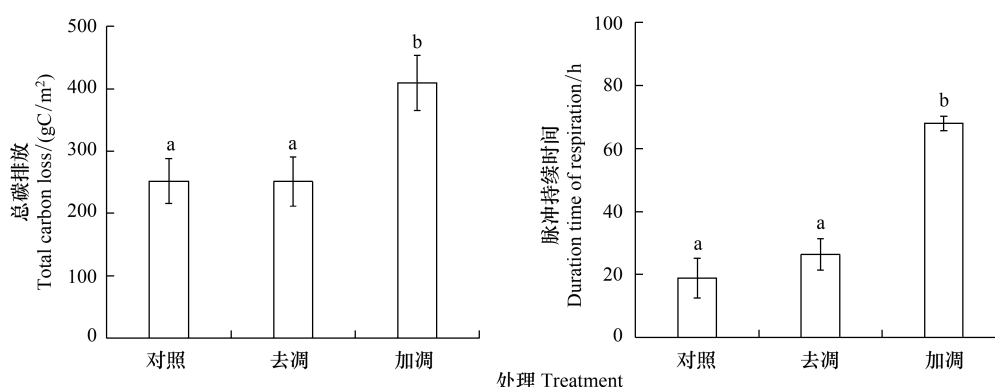


图 2 凋落物变化对土壤碳排放和脉冲持续时间的影响(平均值±标准误, $n=3$)

Fig. 2 Effects of different treatments of changing litter on soil total carbon loss and duration time of respiration pulse (mean ± S.E., $n=3$)

图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

2.3 土壤微生物量碳和氮含量

对照样方土壤微生物量碳为 92.15 mg/kg, 去除凋落物样方土壤微生物量碳为 79.80 mg/kg, 比对照样方的土壤微生物量碳降低 13.4%; 加倍凋落物样方土壤微生物量碳为 101.59 mg/kg, 较对照样方高 10.24%, 但均未达到显著差异 ($P>0.05$); 加倍凋落物比去除凋落物土壤微生物量碳高 27.3%, 接近显著水平 ($0.05<P<0.10$) (图 3)。去除凋落物样方土壤微生物量氮为 14.13 mg/kg, 比对照样方土壤微生物量氮 (16.12 mg/kg) 低 12.35%; 加倍凋落物样方土壤微生物量氮为 18.28 mg/kg, 较对照样方增加了 13.41%, 但均未达到显著差异 ($P>0.05$; 图 3)。

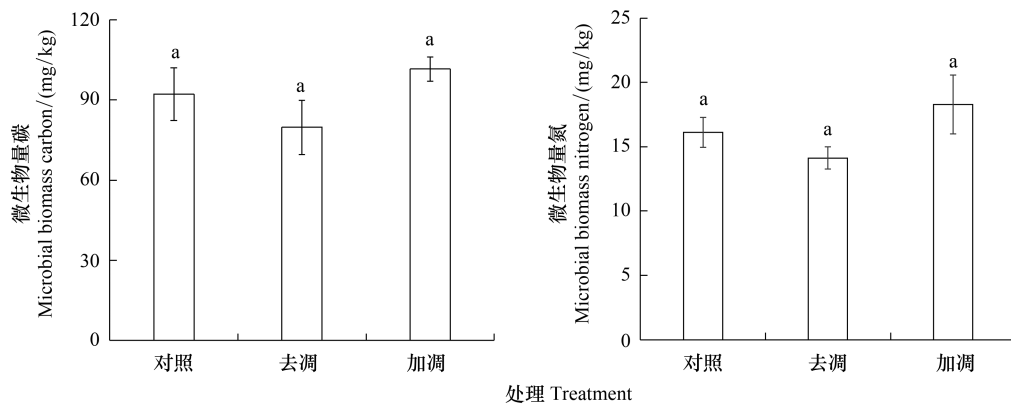


图 3 凋落物变化对土壤微生物量碳和氮的影响 (平均值 $\pm$ 标准误, $n=3$)

Fig.3 Effects of changing litter input on microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen (mean $\pm$ S.E., $n=3$)

图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

2.4 环境因子对土壤碳排放的影响

通过简单线性回归分析发现, 土壤总碳排放量与土壤理化性质关系密切。土壤总碳排放通量与土壤总氮含量呈显著负相关关系 ($R^2 = 0.4157$; 图 4), 而与土壤有机碳含量 ($R^2 = 0.4925$) 呈显著的正相关关系 ($P<0.05$); 土壤总碳排放通量与土壤微生物量氮 ($R^2 = 0.3901$) 呈接近显著的正相关关系 (图 4)。

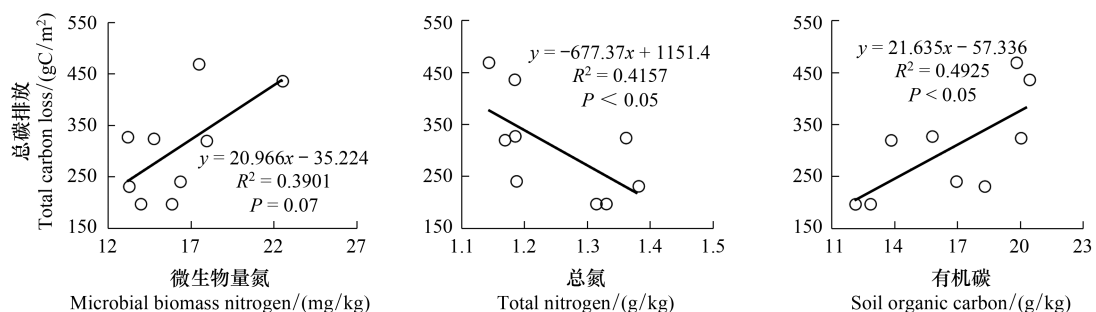


图 4 土壤碳排放通量与土壤微生物量氮, 总氮和有机碳之间的关系

Fig.4 Relationships between the content of soil total carbon loss and microbial biomass nitrogen, soil total nitrogen, and soil organic carbon

土壤呼吸的脉冲持续时间, 则与土壤硝态氮含量 ($R^2 = 0.6221$) 和土壤有机碳含量 ($R^2 = 0.6135$) 均呈显著的正相关 ($P<0.05$), 与细根生物量则呈接近显著的负相关 ($R^2 = 0.3526$, $P<0.10$; 图 5)。通过多元逐步回归分析显示, 土壤微生物量氮是决定土壤总碳排放通量的主要环境因子, 其解释率达到 30.3%; 土壤硝态氮含量和有机碳含量则分别贡献了 29.7% 和 39.8% 脉冲持续时间的变异 (表 1)。

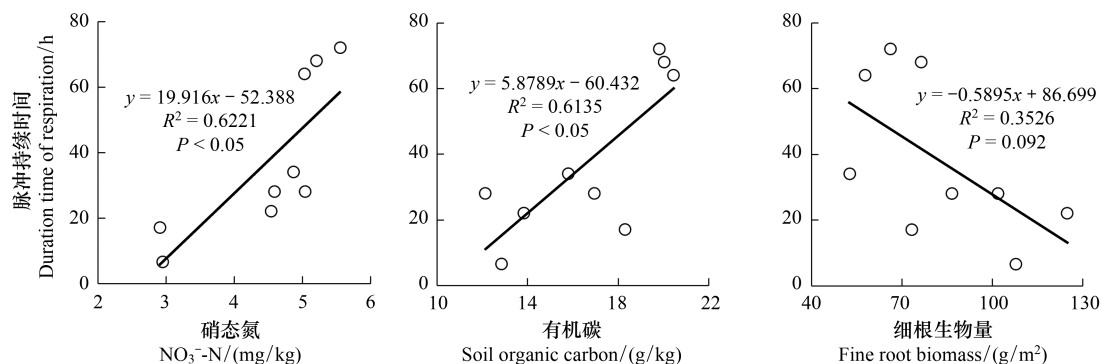


图5 土壤呼吸脉冲持续时间与硝态氮、有机碳和细根生物量之间的关系

Fig.5 Relationships between the duration time of soil respiration and NO_3^- -N, soil organic carbon, and fine root biomass

表1 土壤总碳排放通量和脉冲持续时间与土壤环境因子的多元逐步回归分析结果

Table 1 Results of multiple stepwise regression on the relationships between soil total carbon loss and duration time with soil environmental factors

因子 Parameters	Partial R^2	Model R^2	F	P
土壤总碳排放 Soil total carbon loss				
土壤微生物量氮 Soil microbial biomass nitrogen	0.303	0.303	4.471	0.072
脉冲持续时间 Duration time of respiration				
硝态氮 NO_3^- -N	0.297	0.297	4.383	0.075
土壤有机碳 Soil organic carbon	0.398	0.695	10.101	0.012

3 讨论

3.1 土壤总碳排放通量

该研究表明土壤碳排放通量对降雨脉冲的响应因凋落物处理方式而异。具体而言,与对照样方相比,加倍凋落物导致土壤碳排放通量显著增加 62.50%,而去除凋落物仅使土壤碳排放量降低 0.3%。这一结果与其它在森林生态系统中开展的凋落物处理实验相近^[19-20]。韩尚军等^[21]研究表明加倍凋落物处理显著提高土壤呼吸速率,去除凋落物处理显著降低土壤呼吸速率;彭信浩等^[22]在华北落叶松人工林中的研究也发现凋落物加倍可使土壤呼吸显著提高 16.1%,然而去除凋落物使土壤呼吸显著降低 40.2%。本研究的重点是探究凋落物如何调节土壤呼吸对降雨脉冲的响应过程,笔者通过对比模拟降雨前后的平均土壤呼吸发现,降雨脉冲可分别导致对照、去凋和加凋样方平均土壤呼吸增加 235.1%,225.7%和 301.2%^[14],这意味着去凋导致土壤呼吸对降雨脉冲的响应减弱;而加凋则显著提高土壤呼吸对降雨脉冲的响应。这种差异性响应可能是由以下原因导致的:(1) 与对照和去凋样方相比,凋落物加倍通常会不同程度的提高土壤温度^[13,23],进而使土壤微生物保持较高的代谢活性,模拟降雨引起的土壤水分改善有助于微生物快速复苏,并开始利用有机物。(2) 凋落物是土壤养分的重要来源,凋落物数量决定土壤碳氮含量^[24-25],本研究也证实加倍凋落物使土壤总氮含量增加,去除凋落物使土壤有机碳含量减少。当雨水接触到凋落物时,一方面会导致凋落物中易淋溶养分随雨水进入土壤而直接被微生物利用,另一方面,易淋溶养分进入土壤对土壤中现存碳氮养分具有刺激作用,也会导致土壤碳排放的加剧^[26]。(3) 降雨脉冲导致的土壤碳排放量增加有相当一部分是源于土壤孔隙中暂时保存的 CO_2 ,因此土壤碳排放量级与土壤物理结构密切相关,而森林地表凋落物的增加为土壤动物提供了充分的食物和栖息地,进而有助于降低土壤容重和提高土壤孔隙度^[27]。(4) 降雨脉冲导致的土壤呼吸增量有一部分源于微生物介导的异养呼吸,因此土壤微生物活性与呼吸脉冲关系密切。与诸多凋落物管理实验结

果^[28-29]相似,本研究也发现凋落物加倍导致土壤微生物量碳氮明显增加,微生物量氮是解释土壤碳排放的主要环境因子(表1),土壤有效水分的改善可进一步提高微生物的活性^[30],进而增加土壤碳排放。

3.2 土壤呼吸脉冲持续时间

降雨导致的土壤总碳排放量除了受脉冲峰值的影响,还与脉冲持续时间密切相关。本研究发现,不同凋落物处理下土壤呼吸的脉冲持续时间存在显著差异。主要表现在加倍凋落物下的呼吸脉冲持续时间比对照和去除凋落物分别高出262%和158%。这意味着自然降雨导致的森林土壤碳排放量与地表凋落物数量呈正相关。凋落物加倍既可以增加地表的蓄水保水特性,又能降低土壤水分的蒸发速率,进而增加土壤水分对微生物和植物根系的作用时间。本研究发现呼吸脉冲持续时间与土壤硝态氮含量和有机碳含量呈显著正相关关系,硝态氮是植物可以直接吸收和利用的氮形态,一定程度上其量级大小与植物活动呈正相关,因而有助于自养呼吸组分的增加和维持。硝态氮含量的升高还会提高土壤的酶活性,进而增加土壤微生物群落活性而延长呼吸脉冲持续时间^[31-32]。然而,本研究还发现,呼吸脉冲持续时间与细根生物量呈显著的负相关。这是由于植物细根具有较强的水分吸收和运输能力,一定范围内土壤水分随细根生物量的增加而降低,因而会降低水分在土壤中的停滞时间,使微生物活动周期缩短^[33-34]。

4 结论

凋落物是生态系统养分回收和循环的重要环节,同时对自然降水具有再分配作用,进而影响土壤碳排放对降雨的响应规律。本研究以暖温带栎类落叶阔叶林为例,分析了地表凋落物数量对降雨脉冲的调节作用。研究证实,与对照相比,凋落物加倍导致降雨后土壤碳排放通量和脉冲持续时间均显著上升,然而凋落物去除则对土壤碳排放通量和持续时间无显著影响。该研究暗示森林生态系统地表凋落物分布的空间异质性在调控土壤碳排放对降雨脉冲响应的过程中发挥重要作用。森林生态系统土壤碳排放的核算要充分考虑凋落物数量及其与降雨脉冲的交互作用。

参考文献(References):

- [1] 秦倩倩,王海燕. 森林凋落物养分空间变异及其影响因素. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1318-1329.
- [2] 郭剑芬,杨玉盛,陈光水,林鹏,谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. 林业科学, 2006, 42(4): 93-100.
- [3] 王金悦,邓羽松,林立文,黄娟,蒋代华,黄智刚. 南亚热带5种典型人工林凋落物水文效应. 水土保持学报, 2020, 34(5): 169-175.
- [4] 杨霞,陈丽华,康影丽,弓文艳,郑学良. 辽东低山区5种典型水源涵养林枯落物持水特性. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2662-2670.
- [5] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.
- [6] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.
- [7] 吕富成,王小丹. 凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展. 土壤, 2017, 49(2): 225-231.
- [8] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. Ecology, 1989, 70(5): 1346-1354.
- [9] Fang X, Zhao L, Zhou G Y, Huang W J, Liu J X. Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests. Plant and Soil, 2015, 392(1/2): 139-153.
- [10] Chen X L, Chen H Y H. Global effects of plant litter alterations on soil CO₂ to the atmosphere. Global Change Biology, 2018, 24(8): 3462-3471.
- [11] Liu Y C, Liu S R, Miao R H, Liu Y Z, Wang D, Zhao C C. Seasonal variations in the response of soil CO₂ efflux to precipitation pulse under mild drought in a temperate oak (*Quercus variabilis*) forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 271: 240-250.
- [12] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant and Soil, 1958, 10(1): 9-31.
- [13] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Mo W H, Koizumi H. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest. Ecological Research, 2002, 17(3): 401-409.
- [14] 胡梦君,王佳丽,尚晴,刘银占. 鸡公山麻栎林和水杉林不同凋落物处理下土壤呼吸对降雨强度的响应. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2): 166-173.
- [15] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [16] 崔振岭,徐久飞,石立委,陈新平,张福锁,李俊良. 土壤剖面硝态氮含量的快速测试方法. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 10-12, 25.

- [17] Chen C R, Xu Z H, Mathers N J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(1): 282-291.
- [18] Liu X Z, Wan S Q, Su B, Hui D F, Luo Y Q. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 213-223.
- [19] 李亚非, 胡宗达, 余昊, 胡璟, 刘兴良, 罗明霞, 欧定华, 吴德勇. 改变凋落物输入对川西亚高山天然次生林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2021, 41(7): 2687-2697.
- [20] 高明磊, 满秀玲, 段北星. 林下植被和凋落物对我国寒温带天然林土壤 CO₂ 通量的短期影响. *北京林业大学学报*, 2021, 43(3): 55-65.
- [21] 韩尚君, 韩海荣, 程小琴, 董玲玲, 蔡锰柯, 商添雄. 改变凋落物输入对不同林龄油松林土壤呼吸的影响. *生态学杂志*, 2020, 39(11): 3576-3587.
- [22] 彭信浩, 韩海荣, 徐小芳, 蔡锰柯, 白英辰, 程小琴. 间伐和改变凋落物输入对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5351-5361.
- [23] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778-785.
- [24] 黄彩凤, 梁晶晶, 张燕林, 周垂帆. 森林凋落物特性及对土壤生态功能影响研究进展. *世界林业研究*, 2021, 34(4): 20-25.
- [25] Miao R H, Ma J, Liu Y Z, Liu Y C, Yang Z L, Guo M X. Variability of aboveground litter inputs alters soil carbon and nitrogen in a coniferous-broadleaf mixed forest of Central China. *Forests*, 2019, 10(2): 188.
- [26] Sayer E J, Heard M S, Grant H K, Marthews T R, Tanner E V J. Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litterfall. *Nature Climate Change*, 2011, 1(6): 304-307.
- [27] 夏丽丹, 张虹, 杨靖宇, 于姣姣, 周垂帆. 杉木凋落物土壤生态功能研究进展. *世界林业研究*, 2019, 32(2): 7-12.
- [28] 王巍巍, 赵琼, 赵欣然, 曾德慧, 艾桂艳. 凋落物管理对樟子松人工林土壤微生物群落结构的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2605-2612.
- [29] 徐晓, 徐瑾, 曹国华, 王国兵. 接种蚯蚓与添加凋落物对杨树人工林土壤理化性质和微生物生物量的影响. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2021, 50(2): 264-269.
- [30] 朱义族, 李雅颖, 韩继刚, 姚槐应. 水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4323-4332.
- [31] 李晓杰, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 林廷武, 施友文, 谢锦升, 杨玉盛. 中亚热带杉木人工林和米槠次生林凋落物添加与去除对土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 447-457.
- [32] Wei Y, Wang Z Q, Zhang X Y, Yang H, Liu X Y, Liu W J. Enzyme activities and microbial communities in subtropical forest soil aggregates to ammonium and nitrate-nitrogen additions. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(3): 258-267.
- [33] 冯棋, 杨磊, 王晶, 石学圆, 汪亚峰. 黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应. *生态学报*, 2019, 39(18): 6598-6609.
- [34] 张小朋, 殷有, 于立忠, 姚立海, 英慧, 张娜. 土壤水分与养分对树木细根生物量及生产力的影响. *浙江林学院学报*, 2010, 27(4): 606-613.