

模拟干湿交替 对林内和林窗表土碳释放的影响

黄石德¹, 潘 辉^{1,2}, 叶功富¹, 黄传春³, 赵 凯¹

(1. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012; 2. 闽江大学, 福建 福州 350108; 3. 福建省森林资源总站, 福建 福州 350003)

摘要: 利用林内和林窗环境的表土开展干湿交替的室内培养实验, 研究水分和覆盖枯落物对土壤碳释放的影响, 同时探讨在模拟延长干旱环境下, 土壤碳释放的驱动机制。结果表明, 在模拟干湿交替培养实验中, 枯落物明显减缓了土壤水分的散失速率, 其中在林内达到显著水平 ($P < 0.05$), 而在林窗未达到显著水平 ($P > 0.05$)。林内和林窗土壤碳释放速率随着培养周期的增加而逐渐减少, 且林内和林窗间的差异亦逐渐减少, 从第 1 个培养周期的 17.51% 减少到第 3 个培养周期的 0.69%。经历半个月干旱后, 重新开始干湿交替培养实验, 发现林内和林窗土壤碳释放均有明显增加, 林内和林窗的差异重新增至 33.18%。在整个培养试验中, 无论是林内还是林窗, 枯落物覆盖处理显著增加了土壤碳释放量 ($P < 0.01$), 土壤含水量均能较好地解释土壤碳释放速率的变化 ($R^2 > 0.77$)。

关键词: 林内; 林窗; 干湿交替; 土壤水分; 枯落物

中图分类号: S714.2 S718.55+4.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2010)06-1175-05

Simulation of Alternation of Drying and Wetting Incubation Experiment with the Understory and Gap Soil

HUANG Shi-de¹, PAN Hui^{1,2}, YE Gong-fu¹, HUANG Chuan-chun³, ZHAO Kai¹

(1. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, China; 2. Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian Forest Resources Management Main Terminal, Fuzhou 350003, China)

Abstract Using the soil derived from understory and gap environment an experiment on the alternation of drying and wetting incubation was carried out which studied the influence of water content and litter cover on soil carbon release and discussed the driving mechanism of soil carbon release after stimulation of extreme drought conditions. The result showed litter obviously decreased moisture dissipation rate; the difference reached a significant level— $P < 0.05$ in the understory environment and it was not significant in the gap environment in the alternation of drying and wetting incubation experiment. The mean soil carbon release of the understory and gap decreased gradually with the incubation period. The difference of soil carbon release between understory and gap decreased gradually from 17.51% in the first incubation period to 0.69% in the third incubation period. The soil carbon release of the restarted alternation of drying and wetting increased both in the understory and gap after half month drying condition. The difference of soil carbon release between

收稿日期: 2010-06-28 修回日期: 2010-08-16

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2008J0255)、福建省重大公益类项目 (2009R10008-1) 和福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室资助项目

作者简介: 黄石德 (1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事森林生态系统碳循环方向研究, E-mail: hsd9876@126.com

understory and gap increased to 33.18%. Litter covering treatment could significantly increase soil carbon release rate— $P < 0.01$ and soil water content could well explain ($R^2 > 0.77$) the change of soil carbon release rates in the alternation of drying and wetting experiment during the entire incubation experiment.

Key words understory; gap; alternation of drying and wetting; soil water content; litter

森林循环大致划分为林窗阶段、建立阶段和成熟阶段^[1]。森林群落被认为是空间上处于不同发育阶段的斑块镶嵌体^[2]，其间包含数量众多、大小不一的林窗，且处于不断地动态变化中。林窗是森林生态系统演替的重要环节，导致环境因子的质量和分布特征发生变化^[2-3]，而林窗内热力特征的改变将影响土壤理化性质、有机物的分解和土壤微生物活性等^[2,4]，必然影响土壤有机碳库的分解进程。林窗是森林循环的起点，在森林的更新和演替中扮演着极其重要的角色，其发展方向在相当大程度上决定了未来森林更新演替过程中碳源汇地位的变化趋势。当前，气候变暖是人类目前面临的主要环境问题，它不仅导致大气温度的升高，同时还会改变降雨的数量、强度和频度，极端气候出现的频率亦越来越频繁。Rambal^[5]认为干旱问题的日益突出，并不仅仅由于降雨量的减少引起的，降雨量的年度季节分布不均亦是一个关键因素，干旱时间的延长，同时大暴雨概率增加，可能使雨水来不及渗透并贮存至土壤中成为可用水。国外开展了干湿交替和林窗碳释放状况的相关研究，Borken^[6]在模拟干湿交替循环对土壤碳释放的影响，揭示了极度干旱条件下水分对土壤有机质的制约作用，Luiza^[7]研究土壤过程对不同林窗尺度的响应，发现微生物量、微生物呼吸和氮的矿化速率在不同的林窗尺度下均无明显影响，Adachi^[8]分析了热带原始林和次生林林内和林窗环境下土壤碳释放的差异性，他们认为主要是由于细根生物量、土壤含水量及有机质含量的不同引起的，目前国内有关林窗和林内土壤碳释放差异以及对未来干湿频繁交替环境下的响应机制研究鲜见报道^[9]。鉴此，本文通过室内培养实验，模拟干湿交替和延长干旱过程，阐述在干湿交替过程中林内和林窗表土碳释放的变化格局，揭示延长干旱对林内和林窗环境下土壤碳释放的影响以及枯落物的覆盖和水分对土壤碳释放的驱动，旨在为未来气候变化森林循环过程中碳释放的精确估算奠定基础。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

实验区选在福建省福州国家森林公园 (119°61'E, 26°07'N)，全园面积 859 hm²，海拔多在 300~600 m，坡度 16°左右。公园属典型的中亚热带季风气候，气候温和，雨量充沛。年均气温 19.4℃，年降水量 1 413.7 mm，多集中春夏，秋冬较少，年均相对湿度 75%；年均无霜期为 328 d。

本研究选择木荷 (*Schinus molle*) 和马尾松 (*Pinus massoniana*) 混交林为研究对象，于 1962 年造林，林地为带状整地，初植密度为 4 500 株 / hm²。林内群落的乔木层主要树种为木荷，其次是马尾松和千年桐 (*Aleurites montana*)，灌木层和草本层主要为木荷、山苍子 (*Litsea cubeba*)、山矾 (*Symplocos sumuntia*)、木姜子 (*Litsea pungens*)、毛冬青 (*Ilex pubescens*)、肾蕨 (*Nephrolepis cordifolia Presl*) 和铁角蕨 (*Asplenium trichomanes*) 等。木荷和马尾松混交林于 1995 年进行一次间伐，形成许多大小不一的林窗，本研究选择面积约为 60 m² 的林窗作为比较对象，其灌木层和草本层主要为毛漆树 (*Toxicodendron trichocarpum*)、桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*) 和芒萁 (*Dicranopteris linearis*) 等。2008 年 11 月在林内 (understory) 和林窗 (gap) 环境下分别采取 0~10 cm 深的表土和枯落物。土壤从野外带回实验室，剔除石砾和植物残体，风干磨碎，过 2 mm 筛备用。枯落物进行烘干处理后，将其剪为大小约 1 cm × 1 cm 的碎片^[10]，贮存备用。供试土壤的基本理化性质分析结果如表 1 所示，测定方法参照文献 [11]。

1.2 实验设计

实验选取林内和林窗两种土壤，进行干湿交替培养实验，设置无枯落物和覆盖枯落物处理，分别为林内覆盖枯落物 [understory (C)]、林内无枯落物 [understory (R)]、林窗覆盖枯落物 [gap (C)] 和林窗无枯落物 [gap (R)] 4 种处理方式，每种处理各 5 个重复，共计培养 20 个高为 5 cm，内径为 20.4 cm 自制的 PVC 培养环。所有土样都放在温室内培养 5 d 使 PVC 培养环的土壤环境接近自然土壤环境，土壤

表 1 林内和林窗表层土壤 (0~10 cm) 基本理化性质

Tab 1 Physical and chemical properties of soil in the understory and gap

类型 Types	容重 / (g · cm ⁻³) Bulk density	有机碳 / (g · kg ⁻¹) Organic carbon	水解性氮 / (mg · kg ⁻¹) Hydrolyzed nitrogen	速效磷 / (mg · kg ⁻¹) Available phosphorus	有效钾 / (mg · kg ⁻¹) Available potassium
林内 Understory	1.20	15.76	192.27	11.83	98.69
林窗 Gap	1.28	14.12	185.36	6.79	123.34

微生物群落基本稳定, 之后以 10 d 为 1 个干湿交替培养周期, 共进行了 4 个培养周期。在第 1 个培养周期, 林内和林窗土壤只设置无枯落物处理方式, 在第 1 个培养周期结束后, 其中 10 个 PVC 培养环设置为覆盖枯落物处理

方式。具体操作如下: 称取相当于 1 kg 烘干土重的风干土样装入 PVC 培养环中^[12], 补充蒸馏水至土壤饱和含水量的 60%, 而后使土壤水分缓慢散失, 直至在下一个培养周期开始前重新把培养环内土壤水分调至土壤饱和含水量的 60%。林内和林窗土壤分别覆盖其所处环境的枯落物, 用量约为 10 g。在培养过程中, 始终保持室内通风。

1.3 土壤碳释放的测定

土壤碳释放速率采用 Li-8100 土壤碳通量测量系统测

定。测量时间从 2008 年 12 月 21 日起, 至 2009 年 2 月 15 日, 于每天 09:00—11:00 测定 1 次, 整个实验过程共观测了 4 个干湿交替周期。为了观测延长干旱条件下, 土壤碳释放特征的变化, 第 4 个培养周期从 2 月 5 日开始。通过称重法作为添加蒸馏水和确定 PVC 培养环土壤含水量的依据。

$$\text{土壤相对含水量} = \frac{\text{培养当时的土壤含水量}}{\text{初始的土壤含水量}} \times 100\% \quad (1)$$

1.4 数据分析

所有的统计分析都在 SPSS13.0 软件中进行, 用 One-Way ANOVA 检验不同处理、不同周期, 林窗和林内湿度和土壤碳释放差异的显著性, 回归检验土壤碳释放与土壤温度和湿度的相关性。所有统计的显著性水平均为 $P = 0.05$ 。用 Origin7.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量的动态变化

如图 1 所示, 在每个干湿交替培养的前期, Understory(R) 和 Gap(R) 的土壤含水量无明显差异, 但培养进行到后期, 出现分化, 在第 1 个周期 Understory(R) 和 Gap(R) 培养到第 8 d 土壤含水量分别为初

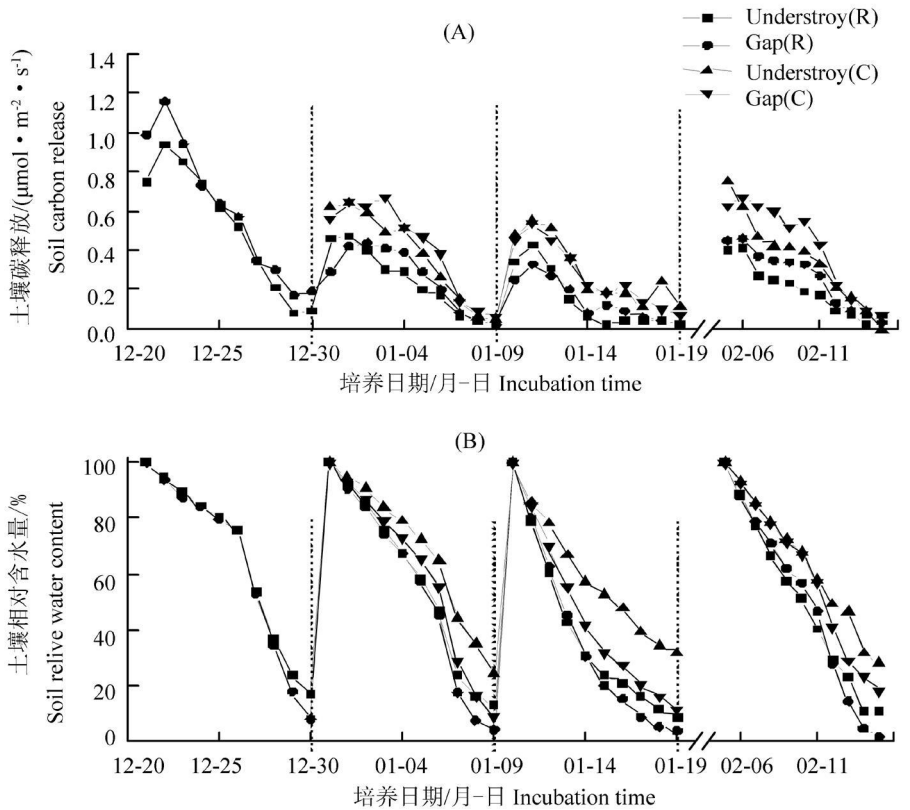


图 1 在不同干湿交替培养周期土壤碳释放 (A) 和土壤相对含水量 (B) 的动态变化

Fig 1 Dynamic of soil carbon release(A) and soil relative water content(B) in different incubation period

始含水量的 36.85% 和 34.22%，然而第 1 个培养周期结束时，则分别为 16.63% 和 7.78%；在第 2 个培养周期到第 7 d 分别为初始含水量的 46.29% 和 45.11%，而第 2 个培养周期结束时，分别为 12.57% 和 3.89%。在每个周期的培养后期，土壤含水量的差异明显增大，可能由于林窗比林内有更大的容重和更低的基质(表 1)。

森林枯落物是森林生态系统的重要组成部分，是森林水文效应的第二活动层，它的存在明显改变了土壤水分的散失状况^[13]。枯落物明显减缓了土壤水分的散失速率，达到良好保持土壤湿度的作用，其中在林内处理中，达到显著水平 ($P < 0.05$)；在林窗处理中，未达到显著水平 ($P > 0.05$)。它们间的差异可能是由于枯落物类型的不同引起的，在林内处理中覆盖以木荷为主的阔叶树枯落物，而在林窗处理中覆盖的是以马尾松、芒萁等为主的枯落物。一般认为，阔叶林明显比针叶林更强的持水能力^[14]。

2.2 土壤碳释放对干湿交替的响应

在第 1 个培养周期中，Understroy(R)和 Gap(R)在培养的第 2 d 分别达到峰值，而后随着土壤含水量的减少而迅速减少，在第 1 个培养周期土壤碳释放的平均速率分别为 $0.51, 0.60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，其中 Gap(R)比 Understroy(R)高 17.51%；而在第 2 个和第 3 个培养周期，土壤碳释放表现与第 1 个培养周期相似的变化趋势，然而培养过程的土壤碳释放显著减少。在第 2 个培养周期，Gap(R)比 Understroy(R)高 7.05%；而第 3 个培养周期，Gap(R)仅比 Understroy(R)高 0.69%，随着干湿交替培养周期的进行，林内和林窗土壤碳释放的差异逐渐减少。经历约半个多月的干旱后，在第 4 个培养周期，Understroy(R)和 Gap(R)土壤碳释放的变化趋势与培养前期类似，土壤碳释放平均速率分别为 $0.20, 0.26 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，Gap(R)比 Understroy(R)高 33.18%。在经历长期干旱后，林内和林窗土壤碳释放重新出现分化，林窗土壤碳释放明显高于林内。

在整个培养实验过程中，Understroy(C)和 Gap(C)土壤碳释放平均速率分别为 $0.34, 0.37 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，极显著高于 Understroy(R)和 Gap(R)处理 ($P < 0.01$)。两者的差异可能是由两方面的因素引起的，一方面凋落物是土壤与空气间一个良好的缓冲层，防止水分过快散失，添加枯落物处理明显比无枯落物处理有更高的土壤含水量(图 1A)，一般认为低的含水量限制养分和碳的基质在水膜中的扩散，减弱微生物的生长和活动，导致土壤碳释放速率明显降低^[6]；其次，凋落物本身也被微生物不断分解，一部分通过自身分解释放到大气中，另一部分则通过分解过程进入土壤，提高土壤中基质含量，加速土壤中碳的分解^[15]。

2.3 土壤水分对土壤碳释放的影响

如表 2 所示，从第 1 个培养周期到第 3 个培养周期，在 Understroy(R)处理的土壤含水量能解释土壤碳释放变化的 86% 以上，而在 Gap(R)处理的土壤含水量能解释土壤碳释放变化的 82% 以上。在无枯落物处理条件下，林内土壤含水量比林窗对土壤碳释放的调控表现得更为明显。而在第 3 个培养周期，在 Understroy(C)处理的土壤含水量仅能解释土壤碳释放的 77%，而在 Gap(C)处理的土壤含水量能解释土壤碳释放的 89%，土壤含水量对土壤碳释放的调控林内比林窗表现得更弱，这是由于凋落物的存在改变了林内和林窗土壤持水状况，从而影响土壤碳释放进程。

表 2 不同干湿交替培养周期土壤碳释放与土壤含水量的确定系数 (R^2)

Tab 2 Determination coefficient between soil carbon release and soil water content in different drying and wetting period

处理 Treatment	培养周期 Incubation period			
	第 1 培养周期 1st incubation period	第 2 培养周期 2nd incubation period	第 3 培养周期 3rd incubation period	第 4 培养周期 4th incubation period
林内 Understroy(R)	0.93**	0.97**	0.86**	0.96**
林窗 Gap(R)	0.83**	0.80**	0.82**	0.97**
林内 Understroy(C)	-	0.96**	0.77**	0.96**
林窗 Gap(C)	-	0.92**	0.89**	0.95**

** 表示达到极显著相关 ($P < 0.01$)。 ** is significant at the 0.01 level

而经历半个月的干旱后,土壤含水量能解释土壤碳释放速率变化的 95% 以上,表明在极端干旱条件下,土壤含水量是土壤碳释放进程最重要的因素。然而,由于本研究只是以饱和含水量的 60% 作为起点,因此对于更高的湿度条件下,土壤碳释放速率是否存在类似变化,或是受到抑制,有待于研究的深入开展。

3 结 论

林窗是森林循环的起点,是森林群落结构变化的基础。林窗形成导致资源的再分配和微生境的异质性,造成土壤结构及理化性质存在差异,必然影响土壤有机碳库的分解进程^[16]。研究结果表明,在每个干湿交替培养的前期,林内和林窗土壤相对含水量无明显差异,但培养进行到后期,它们间出现分化,林内土壤相对含水量明显高于林窗,表明经历一段时期的干旱后,林窗土壤贮存水分的能力趋于减弱。枯落物明显减缓了土壤水分的散失速率,达到良好保持土壤湿度的作用,其中在林内处理中,达到显著水平($P < 0.05$);在林窗处理中,未达到显著水平($P > 0.05$)。在干湿交替的培养实验中,林内和林窗土壤碳释放的平均速率随着培养周期的增加而逐渐减少,且林内和林窗土壤碳释放的差异逐渐减少,且林内和林窗间的差异亦逐渐减少,从第 1 个培养周期的 17.51% 减少到第 3 个培养周期的 0.69%。然而经历半个月干旱后,重新开始干湿交替培养实验,发现林内和林窗土壤碳释放均有明显增加,表明土壤重新变湿后,原先由于极端干旱环境使“暂时贮存”在土壤的那部分碳由于微生物的重新激活,在短期内又迅速地释放出来,土壤碳的释放又回到一个较高的水平。在经历半个月的干旱后,林内和林窗土壤碳释放重新出现分化,林内和林窗的差异重新增至 33.18%,表明林内土壤由于发育较为成熟,有较强抵御外界环境变化的能力;而林窗土壤由于处于森林循环的起点,其理化性质显然尚未达到稳定状态,抵御极端环境的能力较弱^[17]。在整个干湿交替培养实验过程中,覆盖枯落物处理土壤碳释放显著增加,表明枯落物亦是森林生态系统碳循环中一个重要的碳源。在无枯落物处理条件下,林内比林窗土壤含水量对土壤碳释放的调控表现得更为明显。而经历了较长的干旱后,土壤含水量与土壤碳释放速率关系更为密切。

参考文献:

- [1] 梁晓东, 叶万辉. 林窗研究进展 [J]. 热带亚热带植物学报, 2001, 9(4): 355-364.
- [2] 陈爱玲, 洪伟. 福建中亚热带常绿阔叶林林隙对土壤肥力的影响研究 [J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(5): 724-728.
- [3] 刘金福, 洪伟, 李俊清. 格氏栲林林窗更新特征的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(3): 14-19.
- [4] 朱教君, 谭辉, 李凤芹, 等. 辽东山区次生林 3 种大小林窗夏季近地面气温及土壤温度比较 [J]. 林业科学, 2009, 45(8): 161-165.
- [5] Rambal S, Debussche G. Water balance of mediterranean ecosystems under a changing climate [C]. Moreno JM, Oechel WC. Global change and mediterranean-type ecosystems. New York: Springer-Verlag, 1995: 386-407.
- [6] Boken W, Davidson E A, Savage K, et al. Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1888-1896.
- [7] Luizão E, Proctor J, Thompson J, et al. Rain forest on Maracá Island, Roraima, Brazil: Soil and litter process response to artificial gaps [J]. Forest Ecology and Management, 1998, 102(2/3): 291-303.
- [8] Adachi M, Bekku Y S, Rashidah W, et al. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 34(2-3): 258-265.
- [9] 黄石德. 林内和林窗冬季土壤呼吸特征 [J]. 福建林学院学报, 2009, 29(3): 274-279.
- [10] 陈印平, 潘开文, 吴宁, 等. 凋落物质量和分解对中亚热带栲木荷林土壤氮矿化的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(2): 146-151.
- [11] 国家林业局. 森林土壤分析方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 78-108.
- [12] 曹裕松, 李志安, 傅声雷, 等. 模拟氮沉降对鹤山 3 种人工林表土碳释放的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(1): 101-105.
- [13] 胡淑萍, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 146-150.
- [14] 王金建, 崔培学, 刘霞, 等. 小流域水土保持生态修复区森林枯落物的持水性能 [J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 48-52.
- [15] Nago J, Epron D, Brechet C. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in beech forest using 13C-depleted litter [J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1768-1776.
- [16] 徐嘉, 费世民, 何亚平, 等. 川西南山地云南松林窗更新特征 [J]. 林业科学, 2008, 44(9): 7-12.
- [17] 朱教君, 刘世荣. 森林干扰生态研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 183-209.