

降水和凋落物对木荷马尾松混交林土壤呼吸的影响

黄石德

(福建省林业科学研究院 生态环境研究所, 福建 福州 350012)

摘要: 在未来气候变化中严重干旱事件将更加频发, 这势必对陆地生态系统的碳收支施加重大影响。采用 Li-8100 土壤碳通量仪测定木荷 *Schima superba* 和马尾松 *Pinus massoniana* 混交林的土壤呼吸, 分析延长干旱及土壤重新获得降水后, 土壤呼吸及环境因子的变化特征, 探讨土壤呼吸对环境因子变化的响应机制, 有助于弄清土壤呼吸对未来极端气候事件的响应机制。设计了 4 种不同的处理方式: ①零降水去除凋落物(NPNL); ②零降水保留凋落物(NPCL); ③自然降水去除凋落物(CPNL); ④自然降水保留凋落物(CPCL)。结果表明: 在零降水条件下, 凋落物对土壤呼吸的贡献率仅为 8.6%, 显著低于同期自然降水 ($P < 0.05$)。自然降水条件下, 去除凋落物处理(CPNL)和保留凋落物处理(CPCL)土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值分别为 2.10 和 2.01; 而采取零降水处理后, Q_{10} 值分别为 2.59 和 2.72, 表现为显著增加($P < 0.05$)。在 1 a 的零降水试验中, 去除凋落物处理(NPNL)和保留凋落物处理(NPCL)土壤呼吸碳累积量比同期自然降水均表现为显著减少($P < 0.05$); 移除透明室后, NPNL 处理和 NPCL 处理土壤呼吸碳累积量比同期自然降水处理均表现为显著增加($P < 0.05$)。研究结果表明: 延长干旱会减少土壤呼吸的释放, 然而重新获得降水后, 仍有部分碳未被释放出来, 表明干旱或许有助于增加土壤碳库。图 2 表 1 参 26

关键词: 土壤学; 土壤呼吸; 自然降水; 零降水; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2012)02-0218-08

Soil respiration with precipitation and litter treatments in *Schima superba* and *Pinus massoniana* mixed forest

HUANG Shi-de

(Institute of Ecosystem and Environment Research, Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, Fujian, China)

Abstract: Extremely dry climatic events could occur more frequently with future climate changes which, in turn, could exert a strong influence on the terrestrial ecosystem and its carbon budget. Soil respiration of a *Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest was measured in Fuzhou National Forest Park, Fujian, China using an infrared gas exchange analyzer. Characteristics of soil respiration and environmental factors after a prolonged drought followed by precipitation were analyzed and soil respiration response mechanism leading to possible changes in environmental factors also was discussed to help us to understand the response mechanism of soil respiration to future extremely climatic events. The research designed four treatments: (1) no-precipitation and no-litter (NPNL); (2) no-precipitation and conserved litter (NPCL); (3) natural precipitation and no-litter (CPNL); (4) natural precipitation and conserved litter (CPCL). Results showed that litter contributions to soil respiration with no-precipitation treatments were significantly lower than with natural precipitation treatments ($P < 0.05$). In natural precipitation, temperature sensitivity Q_{10} values had ratios of 2.10 for soil respiration to no-litter (CPNL) and 2.01 for soil respiration to conserved litter (CPCL); however, after no-precipitation, ratios were 2.59 for CPNL and 2.72 for CPCL, which depicted significant increase ($P < 0.05$). With the no-precipitation treatment, soil respiration accumulation for no-litter (NPNL) and conserved litter (NPCL) was significantly less than with the natural precipitation treatment ($P < 0.05$) in no-precipitation experimental

收稿日期: 2011-05-05; 修回日期: 2011-06-29

基金项目: 福建省重大公益类项目(2009R10008-1)

作者简介: 黄石德, 工程师, 从事森林碳循环研究。E-mail: hsd9876@126.com

process. After removing closed transparent roofs, with the no-precipitation treatment of soil respiration accumulation for NPNL and NPCL was significantly more than with the natural precipitation treatment ($P < 0.05$). Our results suggest that prolonged drought decrease releases of soil respiration, how ever, only partly released as increased respiration during regain precipitation, which show prolonged drought perhaps was help to increase soil carbon storage [Ch, 2 fig. 1 tab. 26 ref.]

Key words: soil science; soil respiration; nature precipitation; no-precipitation; soil temperature; soil moisture

全球变暖不仅会导致大气温度的升高, 而且还会改变降水的数量、强度和频度^[1]。20 世纪, 北半球的中高纬度地区的降水量已增加了 7%~12%, 然而这些变化具有很大的时空异质性, 降水时空分配更加不均匀, 未来极端降水事件更加频发, 引起干旱加剧, 将会使陆地生态系统的水文过程变化更加激烈, 进而对生态系统碳循环施加重大影响^[2-3]。目前, 土壤呼吸对全球气候变化响应的研究主要集中在二氧化碳浓度升高和全球变暖上^[4-7], 而对降水分布不均引起的干旱的响应报道较少。最近, 由于全球变暖使厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)引起的干旱现象更加频繁^[8], 干旱出现的时间越来越长, 国外也逐渐开始关注干旱对陆地生态系统碳循环的影响, 并随之开展了大量研究^[9-12], 然而, 干旱对土壤表面二氧化碳释放的影响存在诸多不确定性。鉴于此, 项目以木荷 *Schima superba* 和马尾松 *Pinus massoniana* 混交林为研究对象, 开展人工控制干旱时间的模拟试验, 分析长期干旱对土壤呼吸的影响, 探讨土壤呼吸对温度和湿度变化的响应机制; 同时, 观测土壤重新获得降水后, 土壤呼吸的变化特征, 弄清土壤碳吸存的变化状况, 为预测未来极端恶劣气候条件下, 土壤碳吸存的变化提供基础数据和理论依据。

1 试验地概况

试验地位于福州国家森林公园(26°07'N, 119°61'E), 全园面积约为 859 hm², 海拔高度为 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, 雨水充沛。年均气温为 19.4 °C, 年降水量 1 413.7 mm, 主要集中在春夏, 秋冬较少, 年均相对湿度 75 %; 年均无霜期为 328 d。研究选择木荷和马尾松混交林为研究对象, 于 1962 年造林, 林地为带状整地, 初植密度为 4 500 株·hm⁻²。2008 年调查时, 群落郁闭度为 0.7~0.9, 群落结构较简单, 乔木层主要树种为木荷, 其次是马尾松和千年桐 *Aleurites montana*, 木荷的平均胸径为 14.2 cm, 平均树高为 12.5 m, 保存密度为 775 株·hm⁻²; 马尾松的平均胸径为 18.3 cm, 平均树高为 14.0 m, 保存密度为 550 株·hm⁻²; 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* 和铁角蕨 *Asplenium trichomanes* 等。具体概况详见参考文献[13]。

2 研究方法

2.1 样地布设

选择木荷和马尾松混交林, 布设 20 m × 20 m 的标准样地, 在样地内随机设置 4 个 2 m × 2 m 的区组, 2 个作为零降水区组, 其中分别设置去除凋落物处理(NPNL)和保留凋落物处理(NPCL), 重复 3 个·处理⁻¹; 另 2 个区组作为对照(自然降水), 分别设置去除凋落物处理(CPNL)和保留凋落物处理(CP-CL), 重复 3 个·处理⁻¹。将自制的内径 20.4 cm, 高 7.5 cm 的聚氯乙烯环敲入土壤中, 共布设 24 个, 露出土壤表面约 2~3 cm, 剪去环内所有植物的地上部分。土壤呼吸测量在埋设聚氯乙烯环 24 h 后开始, 保持聚氯乙烯环在整个测定期间位置不变。在 CPNL 处理上方于 2008 年 11 月设置孔隙为 1 mm 大小的凋落物收集网, 离地面 0.5 m, 防止凋落物进入。2009 年 4 月将自制的透明密闭室置于零降水处理上方。透明密闭室设计为 1.5 m 高, 其面积为 2 m × 2 m, 其上覆盖有透明薄膜, 以此来排除大气降水。另外, 在零降水阶段中长期无大气降水时, 将其上方的透明薄膜移除, 以尽量保证零降水处理上方的通风。在其四周挖取引流槽, 减少地表径流对零降水样地的影响。2010 年 3 月, 将自制的透明密闭室移除, 继续开展土壤呼吸的野外测定。从 2009 年 4 月至 2010 年 3 月, 将每个月收集的凋落物按比例均匀的撒在 NPCL 处理的林地上。试验直至 2010 年 8 月结束。

2.2 土壤呼吸的测定

土壤呼吸速率采用 Li-8100 土壤碳通量仪测定。测定时间为 2008 年 12 月-2010 年 8 月。在每月下旬,选择晴朗天气,9:00-11:00 测定 1 次土壤呼吸。采用 Li-8100 所附带的土壤温度探头测定地下 5 cm 处土壤温度。同时在相应处理位置附近采取 0~5 cm 土样,用烘干法测定土壤湿度。

2.3 数据统计分析

用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,用 One-Way ANOVA 检验土壤呼吸、温度和湿度在不同处理之间的差异性,回归检验土壤呼吸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 Excel 2003 软件作图。

土壤呼吸与温度间关系采用指数模型^[14]: $R_s = a \times e^{bt}$; 土壤呼吸与土壤湿度间的关系分别采用线性模型或多项式模型^[15-16]: $R_s = cw + d$ 或 $R_s = ew^2 + fw + g$ 。其中: R_s 为土壤呼吸, t 为地下 5 cm 处土壤温度, w 为 0~5 cm 土壤湿度, a, b, c, d, e, f, g 为模型参数。 Q_{10} 值反映土壤呼吸温度敏感性,表示温度每升高 10 °C,土壤呼吸速率变化的倍数,通过下式确定^[17]: $Q_{10} = e^{10b}$ 。

3 结果与分析

3.1 自然降水和零降水土壤温度和湿度的季节动态

在整个试验过程中,CPNL 处理和 CPCL 处理平均土壤温度分别为 18.49 °C 和 18.50 °C,差异不显著 ($P > 0.05$) (图 1-A),表明凋落物层对土壤温度的影响有限。土壤温度表现明显的季节变化趋势,其温度的最高值一般出现在 7 月至 9 月间,而最低值则出现在 12 月至 1 月间。在整个试验过程中,CPNL 处理和 CPCL 处理的土壤湿度的变化范围分别在 10.1%~28.7% 和 10.1%~30.3%,平均湿度分别有 21.5% 和 22.2% (图 1-B); 虽然保留凋落物和去除凋落物土壤湿度的差异未达到显著水平 ($P > 0.05$),然而保留凋落物比去除凋落物表现出略高的土壤湿度,表明凋落物的存在一定程度上能起到涵养水分,减少土壤水分流失的作用^[18-19]。土壤湿度亦表现较为明显的季节变化趋势,在冬季土壤湿度较低,随着春季梅雨天气的出现和夏季台风的频繁来临,期间有较高的土壤湿度,而到了秋季由于天气大多晴好,其土壤湿度又处于较低水平。

在 1 a 的零降水试验中,NPNL 处理和 NPCL 处理的土壤温度分别为 18.81 °C 和 18.95 °C,表明在长期干旱条件下,凋落物层保持土壤温度的能力得到加强。NPNL 处理和 NPCL 处理的土壤湿度的变化范围分别为 7.0%~10.8% 和 7.3%~15.6%,平均土壤湿度分别为 8.6% 和 9.7%,分别较同期自然降水减少了 61.9% 和 58.0%。在零降水处理试验中,保留凋落物和去除凋落物的土壤湿度差异达到显著水平 ($P < 0.05$),表明在长期干旱的环境下,凋落物层作为一道屏障能更有效地阻止土壤水分向大气蒸散。

3.2 自然降水和零降水土壤呼吸的季节动态

在自然降水的条件下,如图 1-C 所示,无论是去除凋落物或是保留凋落物,土壤呼吸均表现明显的季节变化趋势。在近 2 a 的观测时间里,土壤呼吸速率的最小值一般出现在 12 月或 1 月,最高值出现在 8 月,其趋势与土壤温度的变化基本一致,呈单峰曲线。在整个土壤呼吸的观测过程中,CPNL 处理和 CPCL 处理土壤呼吸平均速率分别为 2.32 和 2.72 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变化范围分别为 1.14~4.13 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 1.19~4.82 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。假设保留凋落物与去除凋落物土壤呼吸之差为凋落物对土壤呼吸的贡献,凋落物对土壤呼吸的贡献量为 0.41 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,对土壤呼吸的贡献率达 15.0%。

如图 1-C 所示,在布设透明室前自然降水和零降水处理的土壤呼吸速率差异均不显著 ($P > 0.05$)。2009 年 4 月布设透明室后,零降水处理的土壤呼吸速率急剧下降,NPNL 处理和 NPCL 处理的土壤呼吸速率分别为 0.64 和 1.04 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,分别较自然降水减少了 60.2% 和 48.2%。在 1 a 的零降水试验中,零降水处理的土壤呼吸亦表现出与自然降水相似的季节变化,NPNL 处理和 NPCL 处理平均土壤呼吸速率分别为 1.60 和 1.75 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,分别较同期自然降水减少了 31.7% 和 36.6%。在零降水的条件下,凋落物对土壤呼吸的贡献量为 0.15 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,凋落物对土壤呼吸的贡献率仅为 8.6%,远低于同期自然降水凋落物贡献率的 20.6%。

如图 1-C 所示,2010 年 3 月移除透明室后,4 月 NPNL 处理和 NPCL 处理土壤呼吸速率比 CPNL 处理和 CPCL 处理均表现为急剧增加,分别增加了 43.1% 和 34.4%。随着试验的继续进行,NPNL 处理和

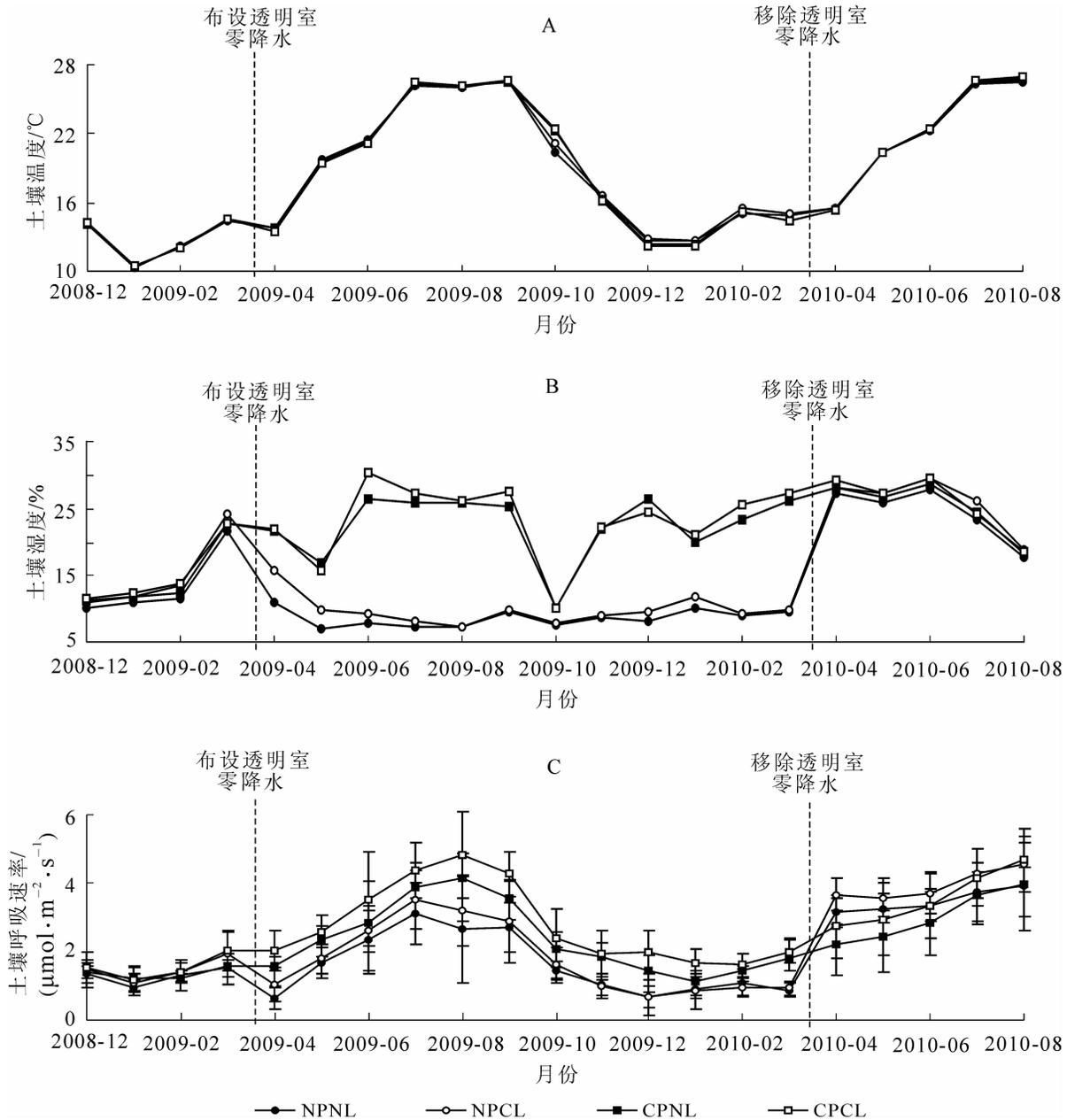


图 1 土壤温度(A)，土壤湿度(B)和土壤呼吸速率(C)的动态变化

Figure 1 Dynamic change of soil temperature (A), soil moisture (B) and soil respiration rate (C) in different treatments

NPCL 处理土壤呼吸与自然降水处理的差异逐渐减少，5 月分别增加 33.7 %和 21.4%；6 月分别增加 17.5%和 11.4%；而到了 7 月无显著差异($P>0.05$)。移除透明室后，NPNL 处理和 NPCL 处理土壤呼吸平均速率分别为 3.49 和 3.97 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，分别比自然降水增加了 15.4%和 11.0%。

3.3 土壤呼吸对土壤温度、湿度的响应机制

如图 2 所示：无论是自然降水还是零降水条件下，土壤呼吸与 5 cm 土壤温度呈显著的指数相关，能解释土壤呼吸速率变化的 85%以上。在自然降水条件下，CPNL 处理和 CPCL 处理土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为 2.10 和 2.01；而在零降水条件下，相应的 NPNL 处理和 NPCL 处理土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为 2.59 和 2.72，表现为显著增加($P<0.05$)。

土壤水分对土壤呼吸的影响主要通过对植物和微生物的生理活动、微生物的能量供应和体内再分配、土壤的透气性和气体的扩散等调节来实现。如图 2 所示：在自然降水条件下，CPNL 处理和 CPCL 处理的土壤呼吸与土壤湿度关系均未达到显著水平($P>0.05$)，分别仅能解释土壤呼吸变化的 25.4%和 30.0%；而在零降水条件下，NPNL 处理和 NPCL 处理的土壤呼吸与土壤湿度亦未达到显著水平($P>0.05$)，

分别仅能解释土壤呼吸变化的 22.1%和 28.2%。表明无论是在自然降水还是在零降水条件下, 5 cm 土壤温度是影响土壤呼吸的控制因素, 而土壤湿度对土壤呼吸变化的影响较小。

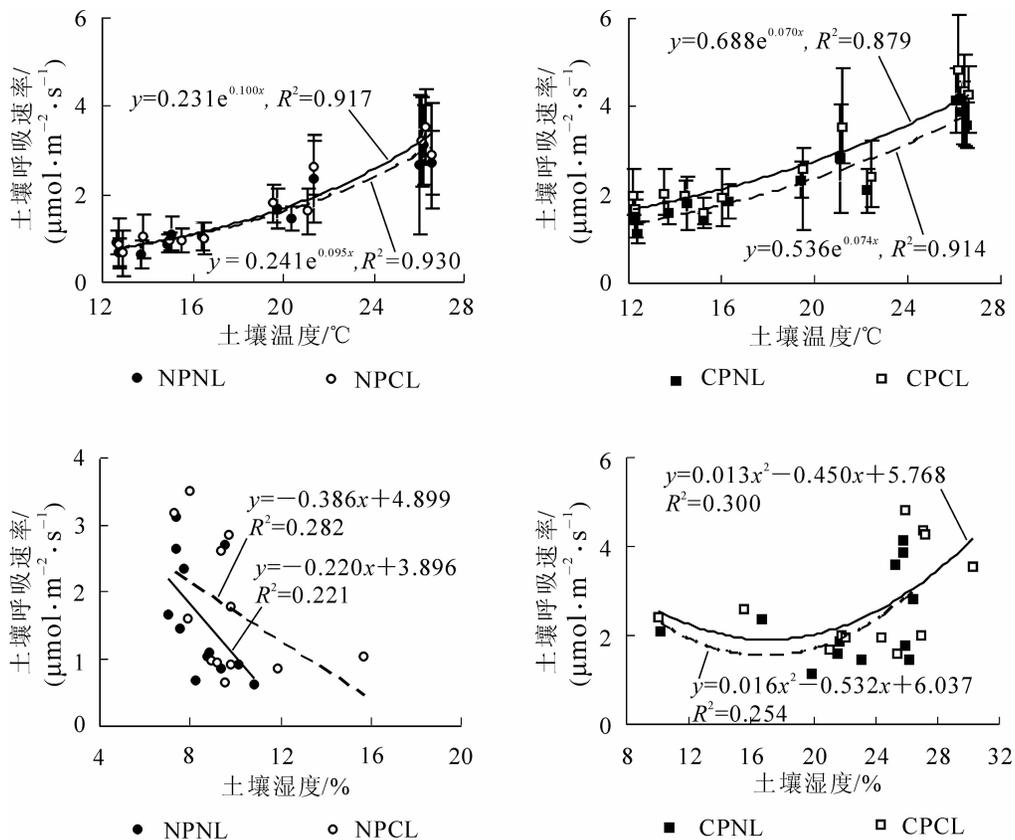


图2 零降水与自然降水土壤呼吸与土壤温湿度的关系(2009年4月至2010年3月)
Figure 2 Relation between soil respiration and environmental factor (including soil temperature and soil moisture) in no-precipitation and natural precipitation (from April 2009 to March 2010)

3.4 零降水对土壤碳吸存的影响

在布设透明室前, 零降水和自然降水处理土壤呼吸碳的累积量差异不显著($P>0.05$)。在完整 1 a 的零降水试验中, NPNL 处理和 NPCL 处理土壤呼吸碳的累积量分别为 609.48 和 666.86 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (表 1), 均比同期自然降水处理显著减少($P<0.05$), 分别减少了 283.27 和 385.60 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 占期间土壤呼吸累积量的 31.7% 和 36.6%。2010 年 3 月移除透明室后, 土壤重新获得降水, NPNL 处理和 NPCL 处理期间土壤呼吸碳的累积量分别为 554.08 和 629.69 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 比同期自然降水处理显著增加($P<0.05$), 分别增加了 73.37 和 61.63 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 占期间土壤呼吸累积量的 15.3% 和 10.9%, 表明长期干旱的土壤重新获得降水后, 原先由于干旱而被限制释放的部分碳在微生物活动的刺激下重新被释放出来。经过布设和移除透明室, 与自然降水相比 NPNL 处理和 NPCL 处理土壤碳的累积量表现为分别减少 203.90 和 323.97 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

表 1 不同试验阶段土壤呼吸的累积量的变化

Table 1 Accumulation of soil respiration in different experimental period

阶段	不同处理土壤呼吸碳的累积量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)			
	NPNL	NPCL	CPNL	CPCL
布设透明室前(2008-12-2009-03)	113.41 ± 6.84 a	126.26 ± 11.55 a	120.52 ± 9.01 a	132.07 ± 13.88 a
布设透明室(2009-04-2010-03)	609.48 ± 53.91 c	666.86 ± 56.47 c	892.75 ± 49.29 b	1052.46 ± 67.38 a
移除透明室(2010-04-2010-08)	554.08 ± 22.25 b	629.69 ± 20.51 a	480.71 ± 21.40 c	568.06 ± 30.08 b

4 讨论

4.1 降水对土壤呼吸的影响

研究表明：在 1 a 的零降水试验中，NPNL 处理和 NPCL 处理平均土壤呼吸速率分别较自然降水对应处理减少了 31.7% 和 36.6%。由于期间自然降水和零降水处理的土壤温度无明显差异，而零降水处理导致土壤呼吸速率急剧下降，可能主要是由于零降水使其土壤湿度降低所致。Borken 等^[9]，Emmett 等^[20]分别报道了在地中海灌木林中，人工延长干旱后土壤呼吸速率有显著的减少，他们都把土壤湿度认为是驱动土壤呼吸年动态和季节动态的重要因素。干旱对土壤呼吸的影响还受到期间降水量强度的影响，在湿润年份，干旱对土壤呼吸表现为更强的限制作用；而在干旱年份，干旱对土壤呼吸的影响较弱^[10]。在零降水的条件下，凋落物对土壤呼吸的贡献率仅为 8.6%，远低于同期自然降水凋落物贡献率的 20.6%。一般认为低湿度限制凋落物养分和碳基质在水膜中的扩散，可能主要是由于长期干旱，削弱了微生物的生长和活动，显著减弱了凋落物的分解进程。

移除透明室后，4 月 NPNL 处理和 NPCL 处理土壤呼吸速率分别较自然降水对应处理增加了 43.1% 和 34.4%。这种在原先干旱的环境下，土壤重新获得降水土壤呼吸激增的现象，被称为“Birch effect”^[21]。一般认为“Birch effect”的产生主要存在 2 种假设：首先是“水分替代”的假设，雨水进入土壤后，填充了土壤孔隙，使原先累积在土壤孔隙中的二氧化碳被快速的释放出来；其次是土壤结构破碎假设，降水后加速了原先土壤团聚结构的破碎化，增加了暴露给微生物的有机物的面积，使土壤微生物更易于分解土壤中可用的碳^[22-23]。然而，多数研究表明土壤呼吸的“Birch effect”仅能持续几小时至数天^[24]。本研究在移除透明室 3 个月后，零降水和自然降水的土壤呼吸才表现出无明显差异，表明其后并非仅受到“Birch effect”的影响，而是在自然降水的刺激下，原先因干旱而被限制的部分碳在微生物的刺激下又被重新释放出来。

4.2 降水对土壤呼吸响应机制的影响

与自然降水处理相比，零降水处理土壤呼吸的 Q_{10} 值表现为显著增加。这与 Borken 等^[9]研究的零降水后土壤呼吸的 Q_{10} 值从 3.9 下降到 3.0 的结果相反，可能首先与试验设计的方案的差异有关。Borken 等^[9]仅延长夏季干旱，而本研究则进行完整 1 a 的零降水试验；其次与研究区域的差异有关，Borken 等^[9]研究的区域处于温带的混交落叶林中，与本研究亚热带季风气候区的水、热因子明显不同。目前，土壤水分状况对土壤呼吸温度敏感性的影响仍存在不同观点，Dörr 等^[25]报道潮湿年份的 Q_{10} 值多数偏低，而干燥年份的 Q_{10} 值则多数较高，则与本研究在干旱条件下有较高的 Q_{10} 值结论相符。本研究所处的区域属于湿润地区，土壤湿度并非是土壤呼吸的限制因子，而在人为干旱条件下，干旱可能促使其样地根系的物候特征、微生物量及其他因素发生改变，从而引起土壤呼吸温度敏感性的显著增加。

4.3 降水对土壤碳吸存的影响

经过布设和移除透明室，与自然降水处理相比 NPNL 处理和 NPCL 处理土壤碳的累积量仍表现为分别减少 203.90 和 323.97 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。表明在长期干旱的条件下，部分的碳由于受到干旱的抑制而未被释放出来；而移除透明室后，土壤重新获得降水，则会促使原先因干旱而被限制的部分碳在微生物的刺激下又被重新释放出来。Sardans 等^[26]报道在地中海灌木林地中干旱会促使碳周转速率减慢，会促使土壤碳库的增加；Borken 等^[9]发现延长夏季干旱会减少异养呼吸，从而可能促使该森林有机碳库的增加，然而干旱激发的碳汇功能的时效性仍不能确定。本研究中干旱过程在短期内有利于减少土壤碳的释放，增加土壤碳的吸存，然而这部分碳是永久的固持在土壤中，或只是作为临时的碳库储存在土壤中，在外界强度干扰的影响下是否会迅速的释放出来？是部分释放还是全部释放？以及在长期干旱条件下，其土壤碳的组分是否已发生改变，这些问题仍有待于下一阶段研究的深入开展。

5 结论

研究结果表明：与自然降水处理相比，零降水处理对土壤温度的影响有限，然而其显著改变了土壤湿度。在 1 a 的零降水试验中，NPNL 处理和 NPCL 处理土壤湿度分别为 8.6% 和 9.7%，分别较同期自然降水减少了 61.9% 和 58.0%。在零降水的条件下，凋落物对土壤呼吸的贡献率仅为 8.6%，远低于自然降

水凋落物贡献率的 20.6%。虽然零降水处理显著降低了土壤呼吸速率,然而不同的降水处理没有改变土壤呼吸的季节格局,土壤呼吸仍然是影响土壤呼吸的控制因素,土壤湿度对土壤呼吸的影响较小。自然降水条件下,CPNL处理和CPCL处理土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为 2.10 和 2.01;而零降水后, Q_{10} 值分别为 2.59 和 2.72,在零降水的条件下,土壤呼吸的 Q_{10} 值显著增加。在 1 a 的零降水试验中, NPNL处理和 NPCL 处理土壤呼吸累积量比同期自然降水处理分别减少 283.27 和 385.60 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,占期间土壤呼吸累积量的 31.7%和 36.6%;移除透明室后, NPNL处理和 NPCL 处理土壤呼吸累积量比同期自然降水处理分别增加 73.37 和 61.63 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,占期间土壤呼吸累积量的 15.3%和 10.9%。经过布设和移除透明室,与自然降水相比 NPNL处理和 NPCL 处理土壤碳的累积量表现为分别减少 203.90 和 323.97 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

致谢: 本研究的内容主要在国家林业局南方山地用材林培育重点实验室和福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室的支持下完成,同时福建农林大学的赵凯、朱洪如和蔡燕徽等硕士研究生参与野外数据采集工作。在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 71 – 90.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2001: the scientific basis [M]//HOUGHTON J T. *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, 2001: 1 – 20.
- [3] GAUMONT-GUAY D, BLACK T A, GRIFFIS T J, *et al.* Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand [J]. *Agric For Meteorol*, 2006, **140**: 220 – 235.
- [4] KIRSCHBAUM M U F. Soil respiration under prolonged soil warming: are rate reductions caused by acclimation or substrate loss? [J]. *Global Change Biol*, 2004, **10**: 1870 – 1877.
- [5] BERNHARDT E S, BARBER J J, PIPPEN J S, *et al.* Long-term effects of free air CO_2 enrichment (FACE) on soil respiration [J]. *Biogeochemistry*, 2006, **77**: 91 – 116.
- [6] 杨玉盛,董彬,谢锦升,等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. 生态学报, 2004, **24** (3): 583 – 591.
YANG Yusheng, DONG Bin, XIE Jinsheng, *et al.* Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (3): 583 – 591.
- [7] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 土壤呼吸对温度升高的适应[J]. 生态学报, 2004, **24** (11): 2649 – 2655.
CHEN Quansheng, LI Linghao, HAN Xingguo, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (11): 2649 – 2655.
- [8] TIMMERMANN A, OBERHUBER J, BACHER A, *et al.* Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming [J]. *Nature*, 1999, **398**: 694 – 697.
- [9] BORKEN W, SAVAGE K, DAVIDSON E A, *et al.* Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil [J]. *Global Change Biol*, 2006, **12**: 177 – 193.
- [10] ASENSIO D, PEÑUELAS J, LLUSIÀ J, *et al.* Interannual and interseasonal soil CO_2 efflux and VOC exchange rates in a Mediterranean holm oak forest in response to experimental drought [J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, **39**: 2471 – 2484.
- [11] COWLING S A AND SHIN Y. Simulated ecosystem threshold responses to co-varying temperature, precipitation and atmospheric CO_2 within a region of Amazonia [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2006, **15**: 553 – 566.
- [12] JENSEN K D, BEIER C, MICHELSEN A, *et al.* Effects of experimental drought on microbial processes in two temperate heathlands at contrasting water conditions [J]. *Appl Soil Ecol*, 2003, **24**: 165 – 176.
- [13] 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.
HUANG Shide. The research on winter soil respiration characteristic in the understory and gap [J]. *J Fujian Coll For*, 2009, **29** (3): 274 – 279.
- [14] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1995, **9**: 23 – 36.

- [15] 王光军, 田大伦, 朱凡, 等. 枫香 *Liquidambar formosans* 和樟树 *Cinnamomum camphora* 人工林土壤呼吸及其影响因子的比较[J]. 生态学报, 2008, **28** (9): 4108 – 4114.
WANG Guangjun, TIAN Dalun, ZHU Fan, *et al.* Comparison of soil respiration and its controlling factors in sweet-gum and comphortree plantations in Hunan, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (9): 4108 – 4114.
- [16] REY A, PEGORARO E, TEDESCHI V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. *Global Change Biol*, 2002, **8**: 851 – 866.
- [17] XU Ming, QI Ye. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a *Sierra nevadan* forest [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2001, **15**: 687 – 696.
- [18] 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.
HU Shuping, YU Xinxiao, YUE Yongjie, *et al.* Hydrological effects of forest litters and soil in Baihua Mountain [J]. *J Soil Water Conserv*, 2008, **22** (1): 146 – 150.
- [19] 黄石德, 潘辉, 叶功富, 等. 模拟干湿交替对林内和林窗表土碳排放的影响[J]. 江西农业大学学报, 2010, **32** (6): 1175 – 1179.
HUANG Shide, PAN Hui, YE Gongfu, *et al.* Simulation of alternation of drying and wetting incubation experiment with the understory and gap soil [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2010, **32** (6): 1175 – 1179.
- [20] EMMETT B A, BEIER C, ESTIARTE M, *et al.* The response of soil processes to climate change: Results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient [J]. *Ecosystems*, 2004, **7**: 625 – 637.
- [21] BIRCH H F. Mineralisation of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions [J]. *Plant Soil*, 1964, **20**: 43 – 49.
- [22] 王义东, 王辉民, 马泽清, 等. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (5): 601 – 610.
WANG Yidong, WANG Huimin, MA Zeqing, *et al.* Review of response mechanism of soil respiration to rainfall [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (5): 601 – 610.
- [23] UNGER S, MAGUAS C, PEREIRA J S, *et al.* The influence of precipitation pulse on soil respiration the “Birch effect” by stable carbon isotope [J]. *Soil Biol Biochem*, 2010, **42**: 1800 – 1810.
- [24] BORKEN W, DAVIDSON E A, SAVAGE K, *et al.* Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, **67** (6): 1888 – 1896.
- [25] DÖRR H, MANICH K O. Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone [J]. *Tellus*, 1987, **39** (B): 114 – 121.
- [26] SARDANS J, PENUELAS J, ESTIARTE M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland [J]. *Appl Soil Ecol*, 2008, **39**: 223 – 235.