

模拟气候变暖和林内穿透雨减少对干旱年暖温带 锐齿栎林土壤呼吸的影响

王 一, 刘彦春, 刘世荣*, 陆海波

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 研究土壤呼吸对气候变暖和干旱的响应, 阐明全球气候变化与土壤碳排放之间的反馈关系。 [方法] 采用红外辐射增温和林内穿透雨减少技术模拟气候变暖和干旱, 通过 LI-8100 土壤 CO₂ 通量测定系统对生长季土壤呼吸速率进行观测, 分析了干旱年不同处理(对照、增温+减雨、增温、减雨)对土壤呼吸速率的影响。 [结果] 显示: 生长季, 以上 4 种处理的土壤呼吸速率分别为 1.78、1.84、2.02 和 2.01 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 5 cm 土壤温度和土壤湿度分别可以解释土壤呼吸速率变异的 68.2%~87.5% 和 51.0%~66.6%。干旱期, 以上 4 种处理的土壤呼吸速率均低于生长季, 增温处理降低了土壤呼吸速率与土壤温度的相关性, 但增加了土壤呼吸速率与土壤湿度的相关性。 [结论] 干旱年内, 土壤温度和湿度是影响该区土壤呼吸速率的主要环境因子, 干旱期增温处理引起土壤湿度对土壤呼吸的限制作用削弱了气候变暖与土壤碳排放之间的正反馈作用。

关键词: 暖温带; 锐齿栎林; 土壤呼吸速率; 增温; 减雨

中图分类号: S792.18

文献标识码: A

Response of Soil Respiration to Soil Warming and Throughfall Exclusion in Warm-temperate Oak Forest in Drought Year

WANG Yi, LIU Yan-chun, LIU Shi-rong, LU Hai-bo

(Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To explore the response of soil respiration to climate warming and drought and address the feedbacks between climate change and soil carbon flux. [Method] Infrared radiation heater and throughfall exclusion were conducted to simulate warming and drought in Warm-temperate oak (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*) forest soil. The soil respiration was measured in drought year to analyze the effect of the Control, Warming + Drought, and Warming and Drought treatments on soil respiration in growing season by using LI-8100 system. [Result] The result showed that: the soil respiration of 4 treatments were 1.78 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 1.84 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 2.02 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and 2.01 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, the soil temperature and soil moisture respectively explained 68.2%~87.5% and 51.0%~66.6% of the temporal variation of soil respiration. The soil respiration in drought season was lower than that in growing season. The correlation coefficient (soil respiration vs. soil temperature) decreased in warming treatment in drought season, but increased in the relationship of soil respiration and soil moisture. [Conclusion] Soil temperature and moisture are the main factors in regulating soil respiration in drought year, and the limited effect of soil moisture to soil respiration, which is induced by warming treatment, will mitigate

收稿日期:2015-04-20; 修回日期:2016-01-20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“植物对森林生态系统碳-氮-水耦合循环的作用机制”(项目编号:31290223); 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金项目“海内外杰出学者讲习计划”(项目编号:CAFYBB2011007)

作者简介: 王 一(1986—), 在读博士, 主要研究方向为模拟气候变化背景下森林生态系统土壤碳氮循环。E-mail: wylx0830@126.com

* 通讯作者: E-mail: liusti9311@163.com

the positive feedbacks between soil carbon flux and climate warming in drought season.

Keywords: warm-temperate zone; *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; soil respiration; warming; drought

当前全球气候变化已成为一个不争的事实,全球地表平均温度在本世纪末可能会升高 1.5 ~ 2℃^[1]。气候变暖引起大气环流的变化导致全球降水格局发生明显变化。土壤温度和湿度作为重要的环境因子,气候变化引起二者的变化将会深刻影响土壤呼吸作用。土壤呼吸作为大气 CO₂ 的重要来源和土壤碳库的主要输出途径^[2],在陆地生态系统碳排放中发挥着重要的作用。陆地生态系统碳排放以反馈的形式与全球气候变化相互作用^[3],通过改变大气中 CO₂ 浓度促进或减缓全球变暖,对全球气候变化产生积极或消极的作用。中国陆地生态系统在全球碳循环中发挥着重要的碳汇作用^[4],全球气候变化是否会改变中国陆地生态系统在全球碳循环中的角色仍需进一步研究,因此研究土壤呼吸作用对模拟气候变化的响应在精确气候变化与碳循环模型中具有重要的作用。

河南省宝天曼国家级自然保护区位于北亚热带向南暖温带过渡区域。Luan 在该区域开展不同海拔土柱置换试验发现,模拟气候变暖改变土壤有机质层的分解过程,显著增加了土壤 CO₂ 通量^[5],且该区土壤异氧呼吸温度敏感性要高于自养呼吸温度敏感性,说明未来气候变化背景下该区域土壤碳库更容易受到影响^[6]。

本研究采用红外辐射增温和林内穿透雨减少技术,以确定模拟气候变暖和干旱背景下暖温带落叶阔叶林生态系统土壤呼吸的季节变化规律及其影响因素。旨在探明:(1)气候变暖和干旱背景下,土壤呼吸的季节变化规律;(2)土壤呼吸对气候变暖和干旱的响应及其调控因子,以加深理解暖温带落叶阔叶林土壤碳排放对全球气候变化的反馈特征。

1 研究区域

研究地位于河南省南阳市内乡县宝天曼国家级自然保护区(111°47′~112°04′ E, 33°20′~33°36′ N),海拔 600~1 800 m,位于北亚热带向南暖温带过渡区域,年均气温 15.1℃,年均降水量为 885.6 mm,降水多集中分布于 6—8 月。土壤垂直分布明显,海拔 1 300 m 以上为山地棕壤,海拔 800~1 300 m 为山地黄棕壤,海拔 600~800 m 为山地褐土,土壤厚度 20~60 cm^[7]。植被以锐齿栎(*Quercus alie-*

na var. *acuteserrata* Maxim.) 为优势树种,占林分树种组成的 65%,林龄 60 年,林分密度 1 276.7 株·hm⁻²;其他伴生树种主要有四照花(*Dendrobenthamia japonica* (A. P. DC.) Fang var. *chinensis* (Osborn) Fang),青皮槭(*Acer cappadocicum* Gled.)等^[8],观测年内乡县降水量为 568.0 mm,远低于该区域年均降水量。观测年试验区土壤理化性质为:土壤表层(0~10 cm)有机碳含量 48.80 ± 1.13 g·kg⁻¹,全氮含量为 3.40 ± 0.14 g·kg⁻¹,pH 值为 4.37 ± 0.07。

2 研究方法

2.1 样地设置

采用随机区组试验设计,在试验区内随机选取 3 个区组(区组间距离控制在 10 m 以上)。在每个区组内设置 4 块 3 m × 4 m (长 × 宽)样地,样地间距控制在 5 m 以上。4 种试验处理(对照、增温、减雨、增温 + 减雨)随机安排在 4 块样地内。

在增温样地内,将长 165 cm,宽 15 cm 的红外线辐射加热灯(MSR-2420, Kalglo Electronics Inc., Bethlehem, PA, USA)平行样地短边垂直悬挂于样地正中央上方,悬挂高度 2.25 m,额定功率为 2 000 瓦,全年持续供电;在对照样地内,以相同的方式安装与红外线辐射加热灯形状和大小相同的假灯,以消除遮阴等因素对试验造成的误差。在减水样地内,用直径为 30 m 的镀锌钢管搭建长 × 宽 × 高分别为 5 m × 4 m × 3 m/2.5 m 的框架(高度差以保证截持的雨水顺利流出),再将 8 片长 × 宽为 5 m × 0.4 m 的农膜两侧分别回折 5 cm 后用铁丝固定于框架上,农膜间距 10 cm,以保证林地内气流垂直和水平运动;增温减水样地建设同上,需要注意的是红外线辐射加热灯要悬挂于农膜下方。在每个子样地内部沿对角线方向布设 2 个聚氯乙烯(PVC)呼吸环(直径 19.6 cm,高 8 cm),其中 5 cm 埋于地下,呼吸环距离样地边缘垂直距离为 20 cm;整个观测期内,所有呼吸环位置保持不变。

2.2 土壤呼吸速率及土壤温湿度测定

2013 年 5 月到 2013 年 10 月,选择晴好的天气,在下午 14:00—17:00 用 Li-8100 便携式土壤呼吸测量系统(LI-COR Inc.)测定土壤呼吸(其中 2014 年 2 月土壤呼吸数据缺失)。土壤呼吸环附近 5 cm 深的

温度(T)由 Li-8100 自带的温度探头测得。土壤 5 cm 深的体积水分含量(SWC)由 MPK 便携式土壤水分仪(MPKit, Nantong, China)测得,每个呼吸环周围随机选取 3 个点测量取平均值。

2.3 数据统计分析

所有的数据都使用 SPSS 17.0 (SPSS, Chicago, USA) 进行统计,通过线性回归分析和曲线估计检验不同处理下土壤呼吸速率与土壤温度和湿度的关系;通过单因素方差分析并结合 LSD 多重比较检验不同处理下土壤温度、湿度和土壤呼吸速率和相关系数的差异是否显著。用 SigmaPlot 12.5 软件作图。

利用指数模型(1)描述土壤呼吸速率与土壤温度的关系^[9]:

$$R_s = \alpha e^{\beta T} \quad (1)$$

R_s 为土壤呼吸速率(单位: $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T 为 5 cm 土壤温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), α 和 β 是方程拟合参数。 α 是 T 为 0°C 的土壤呼吸速率, β 为温度反应系数。

利用二项式模型(2)检验土壤呼吸速率与土壤湿度的关系:

$$R_s = a \times \text{SWC}^2 + b \times \text{SWC} + c \quad (2)$$

其中 a 、 b 、 c 为方程拟合参数,如上所述, SWC 为 5 cm 土壤湿度(%)。

利用一元线性模型(3)检验干旱期土壤呼吸速率与土壤湿度的关系:

$$R_s = m \times \text{SWC} + n \quad (3)$$

其中 m 、 n 为方程拟合参数, SWC 如上所述。

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸速率季节变化规律

不同处理土壤呼吸速率具有相同的季节变化趋势。生长季中期的土壤呼吸速率要高于生长季前期和末期。对照处理、增温+减雨处理和增温处理中,土壤呼吸速率均在 8 月达到最高值,分别为:2.44、2.70 和 $3.23 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;减雨处理中,土壤呼吸速率则是在 7 月达到最高值($3.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。土壤呼吸速率季节动态与土壤 5 cm 温度和湿度季节动态具有一致性(图 1,2,3);受降雨量影响,2013 年 8—10 月土壤湿度为 7.59%~9.99%,低于生长季(5—10 月)平均土壤湿度 9.99%~13.95%(图 2)。

3.2 土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系

土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度呈极显著指数

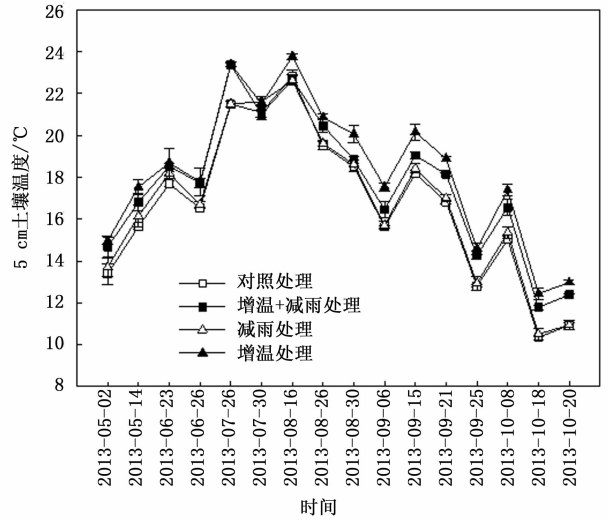


图1 土壤温度的季节动态

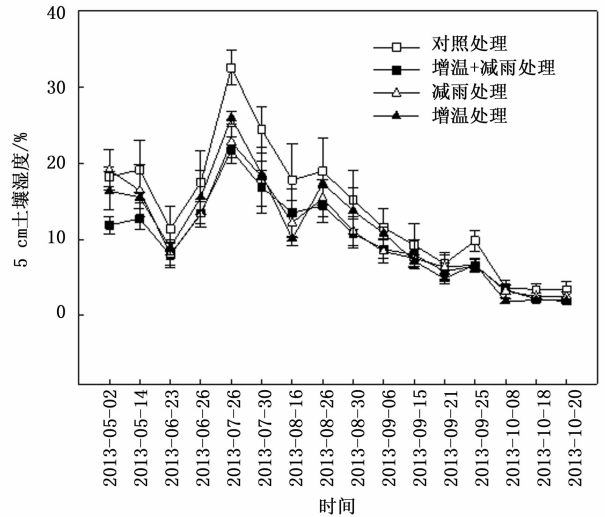


图2 土壤湿度的季节动态

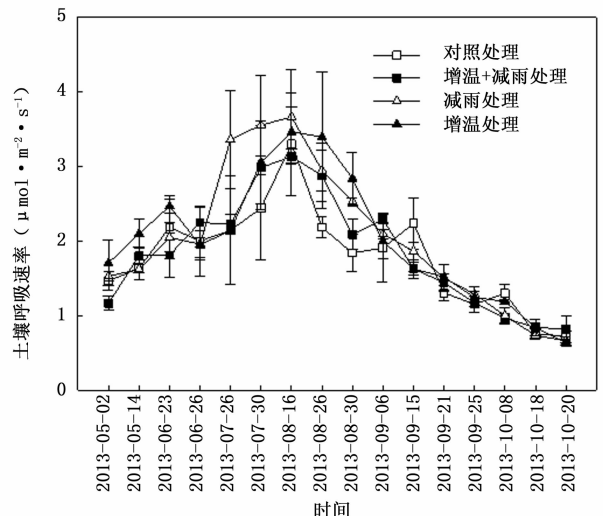


图3 土壤呼吸速率的季节动态

相关关系,5 cm 土壤温度可以解释土壤呼吸速率的 68.2%~87.5% (图 4)。土壤呼吸速率与 5 cm 土壤湿度呈显著二项式关系,5 cm 土壤湿度可以解释土壤呼吸速率的 51.0%~66.6%;当土壤湿度低于 20% 时,土壤呼吸速率随土壤湿度的增加而增加,当土壤湿度高于 20% 时,土壤呼吸速率随土壤湿度的增加而降低(图 5)。表明在观测年生长季,土壤温度和土壤湿度是影响该区域土壤呼吸速率的主要环境因子。从表 1 可知:增温 + 减雨处理和增温处理

显著提高了 5 cm 土壤温度,减雨处理降低了 5 cm 土壤湿度,但并未达到显著水平,这是由于受 2013 年 8—10 月降水的影响,降水量低于往年同期,自然降水的减少削弱了减雨处理的效果。虽土壤温度对土壤呼吸速率表现出积极的促进作用(图 4),但处理间土壤湿度差异不显著抵消了土壤温度对土壤呼吸速率的促进作用,故不同处理间土壤呼吸速率无显著差异(表 1)。

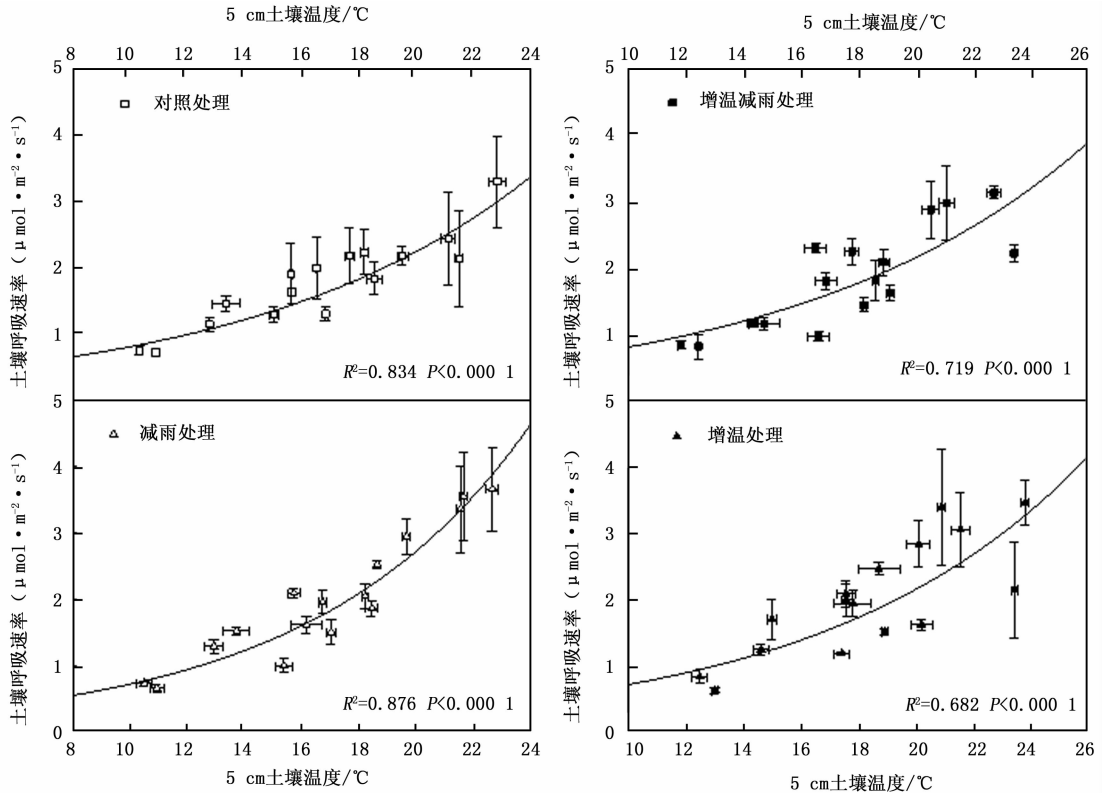


图 4 土壤呼吸速率与土壤温度的回归关系

表 1 不同处理土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸速率单因素方差分析结果

处理	土壤温度/°C	显著性	土壤湿度/%	显著性	土壤呼吸速率/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	显著性
对照	16.65(0.13)	c	13.95(2.56)	a	1.78(0.24)	a
增温 + 减雨	17.67(0.06)	b	9.99(1.46)	a	1.84(0.11)	a
减雨	16.85(0.08)	c	10.86(1.71)	a	2.02(0.13)	a
增温	18.29(0.18)	a	11.09(0.44)	a	2.01(0.12)	a

(括号内数字为标准误;不同字母表示在 0.05 水平上显著差异)

3.3 干旱时期,土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系

表 2 可知:增温 + 减雨处理和增温处理显著提高了 5 cm 土壤温度,减雨处理并未显著降低 5 cm 土壤湿度,不同处理间土壤呼吸速率差异并不显著。从土壤湿度分布规律可知:干旱期土壤湿度普遍低于 20%,故采用一元线性模型分析干旱期土壤呼吸速率与土壤湿度的关系。图 6 可知:土壤呼吸速率与土壤温度回归分析中,增温 + 减雨处理和增温处

理的拟合系数低于对照和减雨处理,可见干旱期内增温处理降低了土壤呼吸速率对土壤温度的依赖性。土壤呼吸速率与土壤湿度回归分析中,不同试验处理的拟合系数均高于对照处理,说明干旱期内增温和减雨处理不同程度增加了土壤呼吸速率对土壤湿度的依赖性。所以干旱期内土壤呼吸速率对不同处理的响应并未达到显著水平。

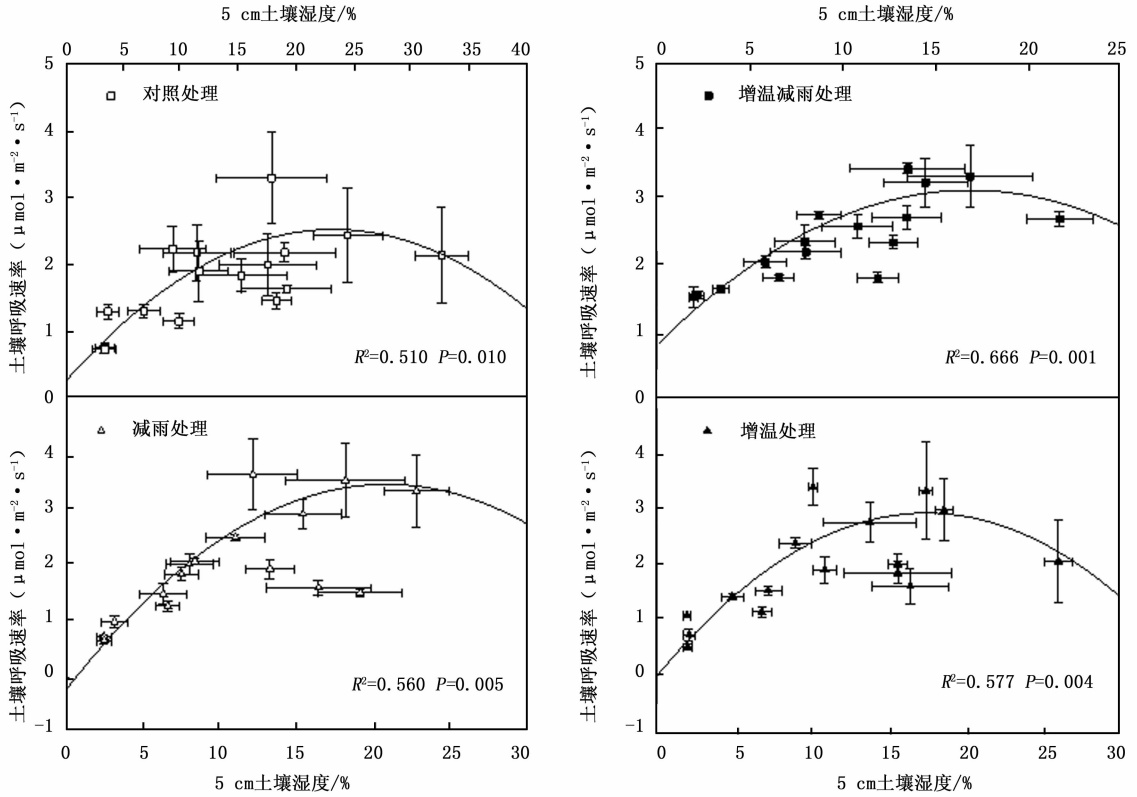


图5 土壤呼吸速率与土壤湿度的回归关系

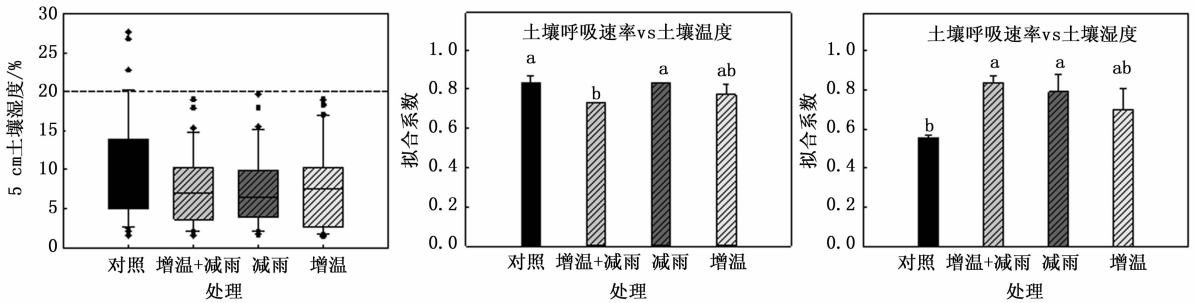


图6 干旱期内土壤湿度分布规律及土壤呼吸速率与土壤温湿度拟合系数单因素方差分析结果

表2 干旱时期不同处理土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸速率单因素方差分析结果

处理	土壤温度/℃	显著性	土壤湿度/%	显著性	土壤呼吸速率/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	显著性
对照	16.06(0.13)	c	9.99(2.39)	a	1.67(0.18)	a
增温+减雨	17.06(0.17)	b	7.53(1.29)	a	1.72(0.12)	a
减雨	16.17(0.15)	c	7.59(1.35)	a	1.83(0.07)	a
增温	17.87(0.22)	a	7.66(0.63)	a	1.87(0.13)	a

(括号内数字为标准差;不同字母表示在0.05水平上显著差异)

4 讨论

4.1 模拟气候变暖和干旱对土壤湿度的影响

红外辐射增温技术最早应用于草地生态系统中^[10],由于其具有模拟全球变暖机制更真实,对土壤物理干扰轻,不改变周围小气候等优点^[11],也被

广泛应用于农田和森林控制试验平台中。Aguilos等^[12]运用该装置在寒温带混交林中开展研究,发现5 cm土壤温度提高3℃。本文中对照处理相比,土壤增温处理显著增加了5 cm土壤温度1.00~1.81℃(表1和2)。红外辐射增温技术通过影响土壤热通量对土壤湿度产生影响,一般来说土壤温度

增加会引起土壤湿度的降低^[13],但土壤湿度的降低幅度还受试验地气象、植被和土壤等因素影响。本研究中与对照处理相比,土壤增温处理导致土壤湿度降低了2.33%~3.96%,生长季土壤湿度降低幅度要大于干旱期,但均未达到显著水平,这可能是受观测期内降雨事件影响。

已开展的水分控制试验表明,减雨处理导致土壤湿度不同程度降低^[14-16]。本研究发现,减雨处理降低了5 cm土壤湿度,但并未达到显著水平(表1和2),这是由于减雨处理通过减少林内穿透雨模拟干旱情景,但观测期内降雨量减少削弱了减雨处理的效果(该区域年均降水量为885.6 mm,但观测年降水量为568.0 mm),所以导致处理间土壤湿度差异并不显著。

4.2 土壤温湿度与土壤呼吸速率的关系

土壤温度和湿度是调控土壤呼吸的两个重要环境因子,土壤呼吸对土壤温湿度的响应因生态系统类型的不同而不同。本研究中4种处理下土壤呼吸速率的季节变化与土壤温度的季节变化较为一致(图1),土壤呼吸速率与土壤温度均在7—8月达到最大值。回归分析结果表明(图4):土壤呼吸速率与土壤温度呈极显著指数相关关系,5 cm土壤温度可以解释土壤呼吸速率变异的68.2%~87.5%,说明土壤温度是影响该区土壤呼吸的主要环境因子,该结论与栾军伟^[17]之前在该区的研究结果一致。

土壤呼吸速率与土壤湿度的回归分析结果表明(图5):土壤呼吸速率与土壤湿度呈二项式的关系,土壤湿度能够解释土壤呼吸速率变异的51.0%~66.6%,且当土壤体积含水量在20%左右时,土壤呼吸速率达到最大。该区域累计土壤呼吸通量与土壤毛管孔隙度显著负相关^[17],土壤湿度变化引起土壤毛管孔隙度持水量的变化是土壤呼吸速率受土壤湿度调控的主要原因。与Palmroth等人^[18]研究结果相似,在森林生态系统中,当土壤湿度低于20%时,土壤呼吸速率与土壤温湿度呈正相关关系;当土壤湿度高于20%时,土壤呼吸速率仅与土壤温度呈正相关关系。本研究结论与栾军伟^[17]在其观测期内的结论有所出入,后者认为与土壤温度相比,土壤湿度并不是影响该区土壤呼吸的主要环境因子。这是因为在已经开展的增温和减雨控制试验中,由于生态系统类型和年际间气候条件不同导致土壤增温和减雨对土壤呼吸的作用表现出时间和空间上的异质性^[19-21]。从表1中可知:增温和减雨处理一定程

度降低了土壤湿度,增温+减雨处理、减雨处理和增温处理中土壤呼吸速率与土壤湿度的相关性高于对照处理(图5);当土壤湿度较低时,底物可利用性、底物扩散速度和胞外酶活性的降低会增加土壤呼吸速率对土壤湿度的依赖性^[22],故导致土壤呼吸速率与5 cm土壤湿度的相关性增加。

4.3 土壤增温与减雨处理对土壤呼吸速率的影响

干旱期内,土壤增温处理显著增加了土壤温度,土壤增温和减雨处理降低了土壤湿度,不同处理间土壤呼吸速率差异并不显著(表2)。图6可知:干旱期内,土壤呼吸速率与土壤温湿度呈极显著相关关系。红外辐射增温技术通过增加土壤温度增加土壤呼吸速率,但其造成土壤湿度的下降亦会降低土壤呼吸速率,所以增温+减雨和增温处理对土壤呼吸速率的影响并不显著。土壤呼吸速率与土壤温度回归关系中,增温+减雨处理和增温处理的拟合系数低于对照和减雨处理,说明干旱事件发生时,气候变暖可以降低土壤呼吸速率和土壤温度的相关性。Wang等人^[23]研究发现当土壤体积含水量低于8%时,土壤呼吸速率与土壤温度出现解耦合现象。本研究在暖温带落叶阔叶林生态系统开展,后者在荒漠生态系统开展,由于水分因子在不同生态系统的作用不同,本试验干旱期内红外辐射增温和林内穿透雨减少技术虽降低土壤湿度,但并未造成土壤呼吸速率与土壤温度的关系解耦合。

图4和5表明:生长季土壤呼吸速率与土壤湿度的相关性低于土壤呼吸速率与土壤温度的相关性;干旱期除增温+减雨处理外,其他处理土壤呼吸速率与土壤湿度的相关性低于土壤呼吸速率与土壤温度的相关性。说明生长季降雨量的减少增加了土壤湿度对土壤呼吸的影响。进一步分析干旱期土壤呼吸速率与土壤湿度回归关系(图6),发现增温+减雨、减雨和增温处理的拟合系数均高于对照处理,表明干旱期红外辐射增温和林内穿透雨减少技术引起土壤湿度的降低增加了土壤呼吸速率与土壤湿度的相关性,说明当土壤湿度低于20%时,干旱程度越强烈,土壤呼吸速率对土壤湿度的依赖程度越高。

5 结论

(1)红外辐射增温技术显著增加了5 cm土壤温度,受自然降雨影响林内穿透雨减少技术并未显著改变5 cm土壤湿度。

(2)生长季5 cm土壤温度和湿度分别可以解释

土壤呼吸速率变异的 68.2% ~ 87.5%, 51.0% ~ 66.6%, 生长季自然降水减少引起处理间土壤湿度差异不显著是土壤呼吸速率差异不显著的主要原因。

(3) 生长季干早期 5 cm 土壤温度和湿度分别可以解释土壤呼吸速率变异的 73.0% ~ 83.3%, 55.4% ~ 83.8%, 增温处理降低了土壤呼吸速率与土壤温度的相关性, 但增温和减雨处理增加了土壤呼吸速率与土壤湿度的相关性, 干旱事件发生时气候变暖会削弱其与土壤碳排放之间的正反馈作用。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK., 2013.
- [2] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Inter annual variability in global soil respiration, 1980 - 1994 [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 800 - 12.
- [3] Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J]. *Nature*, 1998, 393 (6682): 249 - 252.
- [4] Piao S, Fang J, Ciais P, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 2009, 458 (7241): 1009 - 1013.
- [5] Luan J, Liu S, Scott X Chang, *et al.* Different effects of warming and cooling on the decomposition of soil organic matter in warm-temperate oak forests: a reciprocal translocation experiment [J]. *Biogeochemistry*, 2014, 121: 551 - 564.
- [6] Luan J, Liu S, Wang J, *et al.* Rhizospheric and heterotrophic respiration of a warm-temperate oak chronosequence in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 503 - 512.
- [7] 史作民, 程瑞梅, 刘世荣, 等. 河南宝天曼化香林特征及物种多样性 [J]. *山地学报*, 2005, 23 (3): 374 - 380.
- [8] 刘彦春. 暖温带锐齿栎林土壤呼吸及微生物群落结构对土壤增温和降雨减少的响应 [D]. 北京: 中国林业科学研究院. 2013.
- [9] Van't Hoff J H. Lectures on theoretical and physical chemistry, Part 1. Chemical Dynamics [M]. London: Edward Arnold, 1898.
- [10] Rustad L E, Fernandez I J. Experimental soil warming effects on CO₂ and CH₄ flux from a low elevation spruce-fir forest soil in Maine, USA [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4 (6): 597 - 605.
- [11] Kimball B A. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11 (11): 2041 - 2056.
- [12] Aguilos M, Takagi K, Liang N, *et al.* Soil warming in a cool-temperate mixed forest with peat soil enhanced heterotrophic and basal respiration rates but Q10 remained unchanged [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2011, 8: 6415 - 6445.
- [13] Harte J, Shaw R. Shifting dominance within a montane vegetation community: results of a climate-warming experiment [J]. *Science*, 1995, 267 (5199): 876.
- [14] Davidson E A, Nepstad D C, Ishida F Y, *et al.* Effects of an experimental drought and recovery on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14 (11): 2582 - 2590.
- [15] Brando P M, Nepstad D C, Davidson E A, *et al.* Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363 (1498): 1839 - 1848.
- [16] Sotta E D, Veldkamp E, Schwendenmann L, *et al.* Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO₂) efflux and soil CO₂ production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13 (10): 2218 - 2229.
- [17] 栾军伟. 暖温带锐齿栎林土壤呼吸时空变异及其调控机理 [D]. 北京: 中国林业科学研究院. 2010.
- [18] Palmroth S, Maier C A, McCarthy H R, *et al.* Contrasting responses to drought of forest floor CO₂ efflux in a Loblolly pine plantation and a nearby Oak-Hickory forest [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 421 - 434.
- [19] Bronson D R, Gower S T, Tanner M, *et al.* Response of soil surface CO₂ flux in a boreal forest to ecosystem warming [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14 (4): 856 - 867.
- [20] Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Jandl R. Carbon losses due to soil warming: Do autotrophic and heterotrophic soil respiration respond equally? [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15 (4): 901 - 913.
- [21] Wu Z, Dijkstra P, Koch G W, *et al.* Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17 (2): 927 - 942.
- [22] Jassal R S, Andrew Black T, Novak M D, *et al.* Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas fir stand [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 1305 - 1318.
- [23] Wang B, Zha T, Jia X, *et al.* Soil moisture modifies the response of soil respiration to temperature in a desert shrub ecosystem [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11: 259 - 268.

(责任编辑: 彭南轩)