

模拟增温对大兴安岭兴安落叶松林土壤 CO₂ 通量的影响¹⁾

张茹 马秀枝 杜金玲 李长生 梁芝 吴天龙

(内蒙古农业大学 呼和浩特 010020) (呼伦贝尔市气象局) (呼和浩特市气象局) (内蒙古农业大学)

摘要 采用开顶增温室(OTC)对大兴安岭兴安落叶松林进行模拟增温,研究气温升高对土壤呼吸季节变化、月变化、昼夜变化规律的影响,同时通过同步测定环境因子的变化,分析增温导致土壤呼吸变化的机理。结果表明:增温处理的大气温度年均增温 1.2℃,大气湿度降低 2.5%,土壤 5 cm 增温 0.5℃,土壤 10 cm 增温 1.1℃,土壤 20 cm 温度下降 0.08℃,土壤各层湿度分别下降 2.9%、4.9%、8.8%。增温及各土层土壤温度月均值呈单峰值趋势,7、8 月达到温度峰值,生长季土壤湿度也呈现逐渐升高趋势,增温使土壤湿度减少。土壤温度与土壤呼吸呈显著相关关系,土壤湿度和土壤呼吸呈负相关关系,相关性不显著;生长季增温样地 CO₂ 通量变化的范围在(45.9±12.8~476.8±158.2) mg·m⁻²·h⁻¹,对照样地 CO₂ 通量变化的范围在(27.3±12.2~356.3±131.1) mg·m⁻²·h⁻¹。增温处理使生长季期间土壤呼吸速率平均提高 5.76 mg·m⁻²·h⁻¹;CO₂ 排放速率随着土壤深度的增加对温度的敏感性在不断增大,在整个研究期间对照样地土壤呼吸的 Q₁₀(5 cm) 为 4.02、Q₁₀(10 cm) 为 4.00、Q₁₀(20 cm) 为 4.66,增温样地整体显著大于对照样地 Q₁₀ 值,分别为 5.91、5.41 和 6.67。

关键词 模拟增温;兴安落叶松林;土壤呼吸

分类号 S719

Effect of Simulated Temperature Increase on Soil CO₂ Flux in *Larix gmelinii* Forests in the Daxing' an Mountains//Zhang Ru, Ma Xiuzhi(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, P. R. China); Du Jinling (Meteorological Bureau of Hulunbuir); Li Changsheng(Meteorological Bureau of Hohhot); Liang Zhi, Wu Tianlong(Inner Mongolia Agricultural University) //Journal of Northeast Forestry University 2022, 50(8): 83-88.

Soil carbon emissions from *Larix olgensis* forests in the Daxing' an Mountains under the background of global warming are crucial for the accurate calculation of regional carbon budgets. The Open-Top Chamber (OTC) is used to simulate the warming of *L. olgensis* forests in the Daxing' an Mountains to study the influence of temperature rise on the seasonal, monthly, and diurnal changes of soil respiration. At the same time, the effects of environmental factors are measured simultaneously. The mechanism of soil respiration changes caused by warming was analyzed. The average annual temperature increase of the temperature increase is 1.2℃, the atmospheric humidity decreases by 2.5%, the soil temperature increases by 0.5℃ for 5 cm, the soil temperature increases by 1.1℃ for 10 cm, and the soil temperature decreases by 0.08℃ for 20 cm. The humidity of each layer of soil decrease by 2.9%, 4.9%, and 8.8%, respectively. The increase in temperature and the monthly average value of soil temperature in each soil layer showed a single peak trend, reaching the peak temperature in July and August, and the soil moisture in the growing season also showed a gradual increase trend. Increasing temperature reduced the soil moisture. There is a significant correlation between soil temperature and soil respiration, and a negative correlation between soil moisture and soil respiration, and the correlation is not significant; the variation range of CO₂ flux in the growing season warming plot is (45.9±12.8-476.8±158.2) mg·m⁻²·h⁻¹, and the change range of CO₂ flux in the control plot is (27.3±12.2-356.3±131.1) mg·m⁻²·h⁻¹. The warming treatment increased the soil respiration rate during the growing season by an average of 5.76 mg·m⁻²·h⁻¹; the CO₂ emission rate increased with the increase of soil depth and its sensitivity to temperature increased. During the entire study period, the soil of the control plot of the breathing Q₁₀(5 cm) was 4.02, Q₁₀(10 cm) was 4.00, and Q₁₀(20 cm) was 4.66, and the Q₁₀ value of the warming plot was significantly greater than that of the control plot, which were 5.91, 5.41 and 6.67, respectively.

Keywords Simulated warming; *Larix gmelinii* forest; Soil respiration

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2022.08.012

据 IPCC 第五次评估报告,全球平均温度表面上升了约 0.85℃,升高趋势明显^[1],并且 21 世纪也将持续上升,中国的年平均温度在过去的百年间已经上升了 0.9~1.5℃,中国年平均温度上升幅度大于全球平均温度,21 世纪末将再上升 1.3~5.0℃^[2]。由于工业发展加速,化石燃料燃烧量大大增加,导致温室气体排放量逐渐升高^[3]。造成气候变

暖的关键因素是 CO₂、CH₄、N₂O 等由土壤向大气排放的温室气体^[4-6]。生态系统里的碳氮循环与温室气体的浓度有着紧密的关系,其源库关系直接影响生态系统对气候的响应和反馈^[7]。对大兴安岭兴安落叶松林土壤呼吸的研究能够为其提供森林碳循环的相关理论知识^[8-9],并且能够为寒温带森林在气候变暖背景下土壤呼吸的变化趋势及相关影响因素进行研究分析。森林土壤碳循环对未来全球变暖具有重要作用,土壤碳循环的多个环节都会受到温度的影响^[10-11],与气候变暖问题紧密相连,因此土壤碳循环也是目前全球气候变化研究的重要研究方向^[12]。目前,关于土壤碳循环的研究发现,增温试

1) 内蒙古引进国外智力成果示范项目(2022YFYZ0003)。

第一作者简介:张茹,女,1995 年 7 月生,内蒙古农业大学林学院,硕士研究生。E-mail: 1418031297@qq.com。

通信作者:马秀枝,内蒙古农业大学林学院,教授。E-mail: luck-mxy@imau.edu.cn。

收稿日期:2021 年 6 月 23 日。

责任编辑:潘 华。

验成为土壤碳库循环的重要内容,关于气候变暖与土壤碳循环之间的研究大量开展^[13-14]。研究表明,增温会降低土壤中有机碳含量,这是因为温度升高,土壤有机质分解速率加快从而降低土壤有机碳含量^[15]。长期持续增温试验发现,土壤碳长期缺失可能会缓解温度升高的速率^[16-17]。因此,土壤呼吸环节中土壤微生物含量、土壤温湿度等各种微量变动都会影响二氧化碳的排放速率,从而造成全球温度变化的影响^[18-20]。

鉴于此本研究选择我国大兴安岭兴安落叶松林为研究对象,以气候变暖为背景,通过设置人工控制增温试验,利用开顶式增温箱 OTC 模拟未来气温上升,通过测量温室气体排放速率、环境因子以及土壤理化性质等指标,测取 CO₂ 气体排放速率与环境因子和土壤理化性质等,探讨气温上升对土壤呼吸的影响,分析影响 CO₂ 排放量的主要因素,明确增温对土壤中养分的影响^[21]。结合土壤温湿度和土壤温室气体 CO₂ 排放通量之间的相关性分析,为大兴安岭森林生态系统土壤碳循环的变化以及对碳平衡的评估提供科学理论依据^[22]。

1 研究区概况

试验地点位于内蒙古自治区呼伦贝尔市根河林业局潮查林场内,属大兴安岭西北坡中山地带。该地区为高纬度寒温带林区,属寒温带半湿润气候,夏季高温时间短暂且凉爽多雨,冬季酷冷且低温时间漫长,年均气温约-5℃,7月常出现最高温度,1月常出现最低温度。该研究区具有丰富的植物资源,植物多样性较高,主要林型为杜香-兴安落叶松林。

2 研究方法

2.1 样地设置

实验样地选取于内蒙古大兴安岭兴安落叶松林内,在林内选取地形、植被相对比较一致的生境,设置3个20m×20m的样方,每个样方靠近中心位置设置1个增温装置(OTC)。增温装置采用聚碳酸酯(透光率为90%)为材料制作八面体开顶增温室,其规格为底部直径为2.75m,顶部直径1.50m,高2.42m。在每个样方内设置OTC增温处理的对照小区。该试验设置了对照(CK)及增温(OTC)2个处理组,分别做3个重复。3次重复中的其中一组分别配置土壤和大气温湿度监测设备,用于动态监测两个处理的土壤各层温度和大气温度。该增温设备已于2019年7月下旬安装,目前已稳定1a左右,监测结果显示土壤各层温度(5、10、20cm)和空气温度,本

试验中,稳定1a左右的OTC增温使土壤温度平均升高0.80℃,基本符合我们试验的预期(IPCC指出全球近百年来大气温度平均增加0.86℃),这表明本试验的开顶箱可以很好地模拟气候变暖。

2.2 气体采集

该试验于2020年6—10月生长季期间开展,选择晴天作为试验日,在09:00—11:00进行气体采集,对土壤CO₂排放量采用静态箱-气相色谱法进行气体采集实验,采集气体时使用医用注射器,将试验盖箱的三通阀与注射器进行连接,使用气袋抽取30~60mL气体,采集气体的同时将时间记录下来,采集的气体带回实验室使用气象色谱仪获取气体通量峰面积,通过采集气体30min内的峰面积变化来算出气体通量值,采样频率为每5d取样,每月月中进行1次昼夜的采集,如遇特殊天气稍做调整。

2.3 环境因子监测

随机选取一个增温和一个对照小区安装温湿度监测仪(Watchdog 2400),全年监测空气和土壤的温湿度变化,记录土壤5、10、20cm处温度和湿度及空气温湿度(1.5m)进行全年动态观测。每次收集气体时用手持气象风速仪测定当时空气温度、湿度及风速。

2.4 公式计算

气体通量的计算公式以单位时间内通过单位峰面积的物理量,所取气体的浓度采用以下公式计算:

$$C_s = A_s \cdot C_0 / A_0 \quad (1)$$

式中: C_0 为标气浓度; A_s 为所测样品峰面积; A_0 为标气峰面积。

通量是指单位时间通过某单位面积界面输送的物理量。气体交换通量(F)计算公式:

$$F = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot V \cdot \Delta c}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot H \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: ρ 为箱内气体密度; Δm 和 Δc 分别为 Δt 时间内箱内气体质量和混合比浓度的变化; A 、 V 、 H 分别为采样箱的底面积、体积和气室高度; $\Delta c / \Delta t$ 为箱内气体浓度变化。当 F 为负值时表示吸收, F 为正值时表示排放。气体通量计算过程中,通过公式中引入箱内温度和气压值,对气体浓度进行校正。

土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})表示温度每升高10℃土壤呼吸速率增加的倍数,其不仅受土壤温度、湿度的影响,同时也受植被类型、土壤微生物、呼吸底物的影响。增温与对照状态下土壤呼吸速率与大气和土壤温度之间的关系,采用指数模型进行模拟:

$$R = \alpha e^{\beta T} \quad (3)$$

式中: R 是土壤呼吸, T 是对应呼吸组分的土壤温度, α 、 β 是方程拟合参数。土壤呼吸及其不同组分

的温度敏感性(Q_{10}) 计算公式:

$$Q_{10} = e^{10\theta} \quad (4)$$

2.5 数据处理

用 Microsoft Excel 软件对数据进行初步整理,用 SPSS 统计软件对数据进行分析,用 origin 软件对数据进行图像分析。

3 结果与分析

3.1 模拟增温下大气及土壤各层温湿度的变化

如图 1 所示,经过对比 1 a 的温度变化,增温使大气温度增长了 1.2 °C。大气湿度呈现出生长季低,与土壤温度相反的变化趋势。2019 年 11 月—2020 年 3 月较为稳定处于高值,4—7 月之间降为低值,8 月温湿度均达到高值,此时土壤呼吸速率也达到最强,温度变化趋势相同,均在 8 月最高温度,且均在 8 月 19 日和 9 月 25 日骤降后迅速上升,增温和对照状态下大气温湿度差异不显著,湿度整体变化较为平坦。

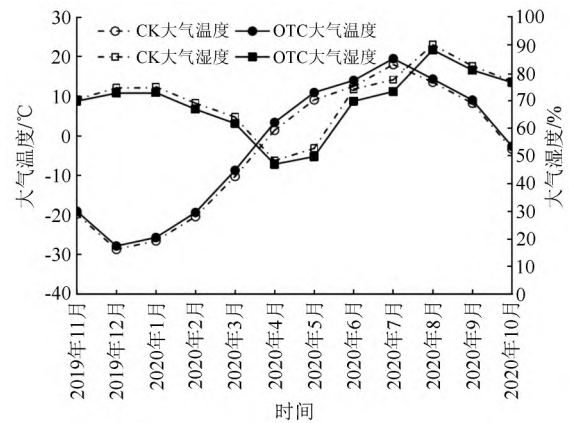


图 1 增温对大气温湿度的季节变化

如图 2 所示,增温处理下土壤 5、10 cm 处年平均温度分别为 1.17、2.07 °C。与对照相比,增温使平均温度分别增加了 0.5 和 1.1 °C。土壤 5 cm 处温度增幅在非生长季较大,生长季期间增温效果不明显,与对照状态温度相比较为一致,土壤各层温度差异不显著。土壤 10 cm 土层在生长季期间增温幅度最大。在 11 月至次年 1 月,土壤温度也有明显升高,平均增加了 1.0 °C。

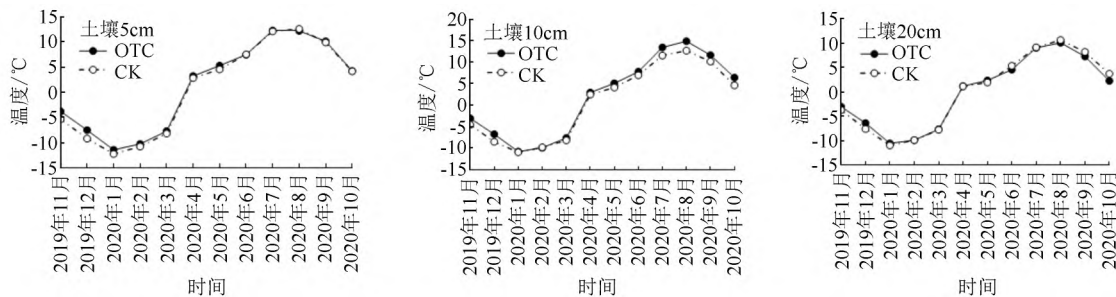


图 2 增温对土壤各层温度的季节变化

表 1 增温对土壤各层湿度的季节变化

土层深度/cm	不同处理	不同月份土壤湿度/%				
		6月	7月	8月	9月	10月
5	CK	8.70±1.05	6.77±1.40	10.18±1.04	10.41±1.10	10.06±0.44
	OTC	4.60±0.55	4.99±0.99	7.75±1.48	7.36±1.35	7.14±0.87
10	CK	10.70±1.04	9.05±1.64	12.18±1.04	13.41±1.10	13.06±0.44
	OTC	5.92±0.73	5.47±0.91	7.76±1.20	7.88±1.08	6.95±1.15
20	CK	22.84±2.69	25.60±4.87	32.26±1.38	31.93±1.01	32.10±0.48
	OTC	19.42±0.58	19.35±1.40	20.77±0.87	20.79±0.85	20.23±0.35

注:表中数据为平均值±标准差。

从表 1 所示,6—10 月对照处理土壤 5 cm 湿度变化趋势比增温处理复杂,对对照样地 6 月湿度与增温样地湿度相差为生长季最大,是增温样地湿度的 1.9 倍。6—7 月湿度值下降,对照及增温样地湿度分别下降了 22.2% 和 8.4%。7—8 月大幅度上升,对照及增温样地湿度分别增长了 50.4% 和 55.4%。增温样地土壤 5 cm 湿度整体低于对照样地,且为单峰值变化,8 月湿度达到最大,6—7 月湿度变化幅度较小,土壤 5 cm 差异不显著,基本呈稳定状态,7—8

月湿度变化较大,增长了 55.4%。由土壤湿度的月变化情况可以看出,土壤湿度在 10、20 cm 的随着土壤深度的增加而逐渐升高,各土层表现出明显的季节变化,土壤 10、20 cm 湿度差异显著 ($P < 0.05$)。

3.2 增温处理对土壤呼吸的影响

如图 3 所示,土壤呼吸的峰值出现在 7、8 月份。2020 年 6 月 21 日—2020 年 10 月 14 日增温样地 CO₂ 通量变化的变化范围在 (45.9±12.8 ~ 476.8±158.2) mg·m⁻²·h⁻¹,对照样地 CO₂ 通量变化的范

围在 $(27.3 \pm 12.2 \sim 356.3 \pm 131.1) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。呼吸强度最旺盛时期模拟增温使呼吸速率提高 $120.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。对照样地于6月底到7月均呈现小幅度上升的平稳状态,7月5日呼吸强度出现突增,7月底到8月初 CO_2 通量呈现顶峰状态,8月之后呼吸强度逐渐下降。增温样地呼吸强度与对照样地大体一致,均在8月出现顶峰,10月呼吸强度最弱,增温样地呼吸强度整体大于对照样地强度值。8月19日土壤呼吸强度出现拐点,可能于土壤温度有关,在8月19日土壤温度降低至8月最低值土壤湿度处于平稳波动范围内,所以土壤温度成为限制土壤呼吸的主要环境因子。

如表2所示,增温和对照状态下土壤呼吸速率同月份差异均不显著。增温样地与对照样地土壤呼吸速率在季节上的变化规律基本相似,增温与对照样地在试验期呼吸速率变化范围差距较大,峰值出现时间却完全相同,在每年的7、8月份,温度达到最

大,植物生长最旺盛时期。而随着温度的下降,在植物的生长季末,土壤呼吸的速率迅速下降,这也间接说明植物生长旺盛期的土壤呼吸速率大于生长后期。增温条件下土壤呼吸速率的月动态规律,土壤呼吸的峰值出现在7、8月份。6和9月呼吸速率大致相同,10月呼吸速率最低,增温样地整体趋势明显大于对照样地。

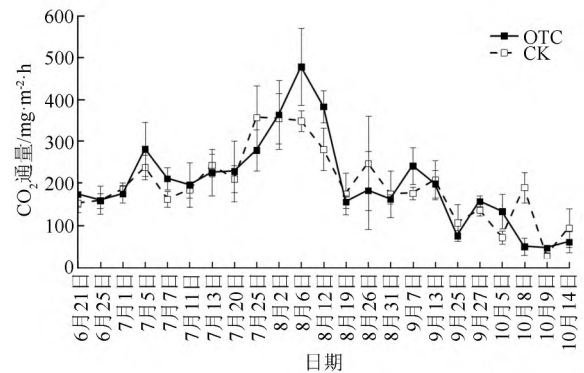


图3 增温条件下土壤呼吸速率的季节动态规律

表2 增温条件下土壤呼吸速率的月动态规律

处理	不同月份土壤呼吸速率/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$				
	6月	7月	8月	9月	10月
OTC	(166.18±6.90) bc	(227.75±15.09) ab	(286.86±56.19) a	(167.79±35.46) bc	(72.03±20.53) c
CK	(155.32±2.81) bc	(225.47±24.47) ab	(263.00±32.52) ab	(156.55±22.32) bc	(95.31±34.33) c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异性显著($P < 0.05$)。

3.3 增温条件下影响土壤呼吸的因素

对照样地 CO_2 通量与不同深度的温度相关性分析如图4所示,土壤5、10、20 cm 温度与土壤 CO_2 通量之间的指数相关关系均为显著,增温处理下土壤5 cm 温度相关性最强,呈现极显著正相关关系($P < 0.01$)。如图4所示,对照样地土壤 CO_2 通量变

化在随着土层深度的增加与土壤温度的相关性在逐渐下降。当温度开始接近零摄氏度时,土壤 CO_2 通量值会不断接近于零,但不会产生负通量。由此可见,短期增温会改变各组分土壤呼吸速率,土壤呼吸与土壤温度之间的关系也受到影

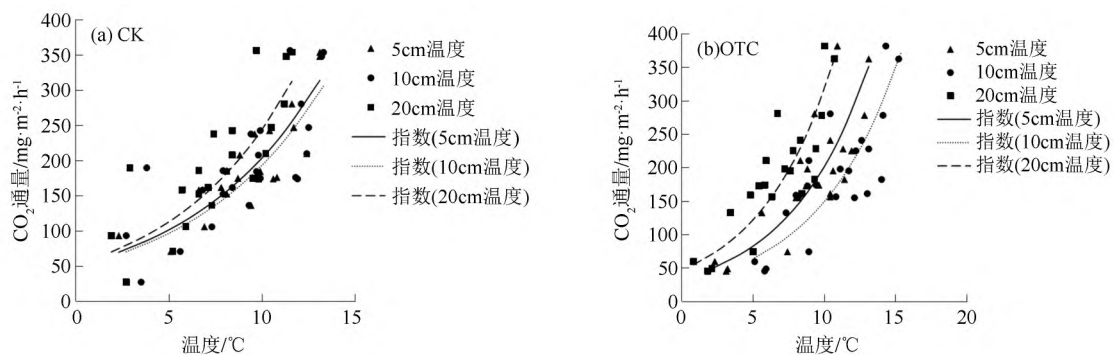


图4 土壤温度与土壤 CO_2 通量相关性

如图5所示,在增温处理下,土壤湿度与土壤呼吸速率的最优函数关系是线性函数,呈现非显著的负相关关系,10 cm 土层的土壤湿度与土壤呼吸速率的相关程度最强,对照及增温处理下相关系数分别达到0.39和0.22。土壤深度达到20 cm 时,相关性最低,相关性分别为0.13和0.05。对照样地土壤5 cm 湿度与土壤 CO_2 通量相关系数为0.29,相关性

较增温处理更强。在本文研究中土壤呼吸与土壤湿度之间的相关性较差,且均不显著,可能因为该试验地区降雨量适宜,适合植物的生长和土壤微生物的生长,造成了土壤湿度对土壤呼吸无限制作用。

3.4 增温对土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})的影响

如表3所示,通过公式计算土壤呼吸在各月对土壤5、10、20 cm 的温度敏感程度,随着土层深度的

增加,其敏感性进一步变大,不同处理对土壤呼吸温度敏感性差异显著 ($P < 0.05$)。对照样地中,土壤呼吸对土壤 20 cm 温度的敏感性最强, Q_{10} 值达到 4.66, 5 cm 土温的 Q_{10} 值为 4.02, 土壤 10 cm 温度 Q_{10} 值略

下降为 4。增温样地 Q_{10} 值明显高于对照样地,但整体趋势基本相同, 5 cm 土温的 Q_{10} 值为 5.91, 土壤 10 cm 温度 Q_{10} 值略下降了 8.4%, 土壤 20 cm 温度的敏感性最强, Q_{10} 值达到 6.67。

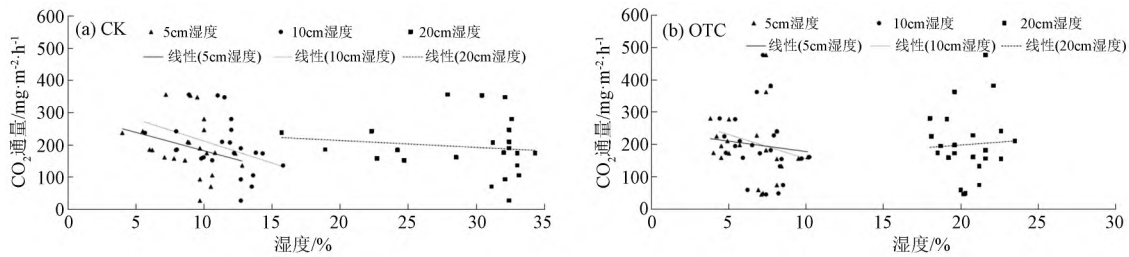


图 5 土壤湿度与土壤 CO₂ 通量的相关性

表 3 增温对土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 及温度与土壤呼吸变化函数关系拟合

土层深度/cm	CK				OTC			
	Q_{10}	指数函数	R	P	Q_{10}	指数函数	R	P
5	4.02	$y = 50.746e^{0.1391x}$	0.781	$P < 0.01$	5.91	$y = 34.302e^{0.1776x}$	0.888	$P < 0.01$
10	4.00	$y = 48.442e^{0.1386x}$	0.760	$P < 0.01$	5.41	$y = 27.77e^{0.1688x}$	0.844	$P < 0.01$
20	4.66	$y = 52.431e^{0.1539x}$	0.753	$P < 0.01$	6.67	$y = 47.603e^{0.1897x}$	0.880	$P < 0.01$

4 讨论与结论

本试验对大兴安岭兴安落叶松林土壤呼吸的研究得出,土壤呼吸速率有较强的季节变化化特征。本研究所得出的结果与众多在北方开展相关试验所得结论相同,段北星等^[23]研究也表明了土壤呼吸的变化规律为明显的单峰曲线。这与本试验研究结果相同,土壤呼吸速率与温度变化动态相同,土壤呼吸最高值出现在 8 月,最低值出现在 6 月和 9 月。在增温处理下,土壤呼吸速率在季节变化以及昼夜变化均呈现增强趋势。这和白炜等^[24]对生长季的研究结果相同,随增温幅度的上升,CO₂ 排放量逐渐增大。以及黄承才等^[25]研究表明,增温能提高土壤呼吸速率,促使土壤释放出更多的 CO₂,进而加剧全球变暖进程。对照样地的土壤湿度显著高于增温样地^[26-27],这与 Jassey et al.^[28]和石福孙等^[29]当前大多数试验增温降低土壤含水量的结果相同。Curiel et al.^[30]通过生长季期间的土壤呼吸变化发现土壤温度是土壤呼吸重要的影响因子,因此这与本文土壤呼吸与土壤温度呈现正相关关系的结论具有一致性。本试验兴安落叶松林得出 Q_{10} 值为 4.00~6.67 之间,属于兴安落叶松林的正常范围,与上述研究不相同,本研究中增温导致 Q_{10} 值明显上升,说明本试验土壤呼吸速率对温度的响应更敏感。其影响 Q_{10} 值存在细微变化的原因有很多,不同取样地点以及不同年份都会造成 Q_{10} 值的差异。

本研究以兴安落叶松林生态系统作为研究对象,分析了增温处理对 CO₂ 通量的昼夜变化、季节

变化特征,并探究了其土壤温度、土壤湿度之间关系。主要得到以下结论:

(1) 增温处理的大气温度年均增温 1.2 °C,大气湿度降低 2.5%,土壤 5 cm 增温 0.5 °C,土壤 10 cm 增温 1.1 °C,土壤 20 cm 温度下降 0.08 °C,土壤各层湿度分别下降 2.9%、4.9%、8.8%。

(2) 生长季增温样地 CO₂ 通量变化的变化范围在 (45.9±12.8~476.8±158.2) mg·m⁻²·h⁻¹,对照样地 CO₂ 通量变化的变化范围在 (27.3±12.2~356.3±131.1) mg·m⁻²·h⁻¹。增温处理使生长季期间土壤呼吸速率平均提高 5.76 mg·m⁻²·h⁻¹。增温处理使土壤呼吸速率明显升高,但整体变化趋势相同,6 月开始逐渐上升,8 月达到最大呼吸强度后逐渐下降,10 月呼吸强度最弱。在 6 月 CO₂ 排放速率较低,随着地表温度的回升,7 月 CO₂ 排放速率开始逐渐增大,生长季 CO₂ 排放速率明显增大。

(3) 生长季期间的土壤总呼吸与土壤温度呈显著指数相关关系。同时与土壤湿度呈线性负相关关系。土壤 CO₂ 通量变化在对照状态下整体随着土层深度的增加与土壤温度的相关性在逐渐降低。增温处理效果明显,增温 1 a 大气及土壤温度较对照平均升高 0.7 °C,大气温度及各土层土壤温度生长季月均值呈单峰值趋势,7、8 月达到温度峰值,增温处理显著提高了土壤 10 cm 温度,分别比对照处理土壤 10 cm 温度提高了 1.13 °C。

(4) CO₂ 排放速率随着土壤深度的增加对温度的敏感性也不断增大,表现为 $Q_{10}(10\text{ cm}) < Q_{10}(5\text{ cm}) < Q_{10}(20\text{ cm})$,研究期间土壤呼吸与温度的敏感

性存在时间尺度以及土层深度的差异性,在整个研究期间对照样地土壤呼吸的 Q_{10} (5 cm) 为 4.02, Q_{10} (10 cm) 为 4.00, Q_{10} (20 cm) 为 4.66, 增温样地整体显著大于对照样地 Q_{10} 值, 分别为 5.91、5.41 和 6.67。

参 考 文 献

- [1] 徐一丹, 李建平, 汪秋云, 等. 全球变暖停滞的研究进展回顾[J]. 地球科学进展, 2019, 34(2): 175-190.
- [2] 黄萍, 黄春长. 全球增温与碳循环[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2000, 28(2): 104-109.
- [3] SCHIMMEL D S, HOUSE J, HIBBARD K, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems[J]. Nature, 2001, 414: 169-172.
- [4] 马蕾, 金会军. 气候变暖对多年冻土区土壤有机碳库的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 91-103.
- [5] 杨智榕, 林伟盛, 蒲晓婷, 等. 土壤增温对杉木幼林不同深度土壤溶液 DOM 的影响[J]. 亚热带资源与环境学报, 2015, 10(1): 91-94.
- [6] 谷蕊, 潮洛濂, 张立欣, 等. 水热因子对克氏针茅草原土壤呼吸及其土壤温度敏感性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 21-29.
- [7] 杨平, 杜宝华. 国外土壤二氧化碳释放问题的研究动态[J]. 中国农业气象, 1996, 17(1): 48-50, 37.
- [8] 董星丰, 陈强, 臧淑英, 等. 温度和水分对大兴安岭多年冻土区森林土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4269-4275.
- [9] 张可扬, 李天权, 曲延浩, 等. 大兴安岭地区降水量和气温变化趋势分析[J]. 森林工程, 2018, 34(5): 8-14.
- [10] 何念鹏, 张佳慧, 刘聪聪, 等. 森林生态系统性状的空间格局与影响因素研究进展: 基于中国东部样带的整合分析[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6359-6382.
- [11] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 689-704.
- [12] 杨晶晶, 陈闻, 袁媛, 等. 模拟增温对羊草生态系统土壤呼吸速率的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6202-6214.
- [13] 王妮, 汪涛, 彭书时, 等. 冬季土壤呼吸: 不可忽视的地气 CO_2 交换过程[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 394-402.
- [14] 陈仕东, 刘小飞, 熊德成, 等. 持续性主动增温对中亚热带森林土壤呼吸影响研究初报[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(4): 1-8.
- [15] 奚晶阳, 白炜, 尹鹏松, 等. 模拟增温对长江源区高寒沼泽草甸土壤有机碳组分与植物生物量的影响研究[J]. 生态科学, 2019, 38(1): 92-101.
- [16] 卫云燕, 尹华军, 刘庆, 等. 气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6): 888-894.
- [17] 康静, 任海燕, 王悦骅, 等. 短花针茅荒漠草原土壤呼吸对长期增温和氮素添加的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 151-157.
- [18] 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO_2 排放量的初步研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(5): 25-32.
- [19] 白皓宇, 任柯颖. 增温对亚热带森林土壤呼吸变化的影响[J]. 园艺与种苗, 2020, 40(2): 26-28, 33.
- [20] 黄锦学, 熊德成, 刘小飞, 等. 增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 12-24.
- [21] 韩雪, 陈宝明. 增温对土壤 N_2O 和 CH_4 排放的影响与微生物机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3906-3914.
- [22] 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 CO_2 通量的短期影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 55-65.
- [23] 段北星, 蔡体久, 宋浩, 等. 寒温带兴安落叶松林凋落物层对土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1357-1366.
- [24] 白炜, 奚晶阳, 王根绪. 短期增温与施氮对青藏高原高寒沼泽草甸生态系统 CO_2 排放的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 927-936.
- [25] 黄承才, 葛滢, 常杰, 等. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 36-40.
- [26] LI N, WANG G X, YAN M, et al. Plant production and carbon and nitrogen source pools are strongly intensified by experimental warming in alpine ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(5): 942-953.
- [27] ZHOU Y, HAGEDORN F, ZHOU C, et al. Experimental warming of a mountain tundra increases soil CO_2 effluxes and enhances CH_4 and N_2O uptake at Changbai Mountain, China[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-13.
- [28] JASSEY V E, CHIAPUSIO G, BINET P, et al. Above-and belowground linkages in Sphagnum peatland: climate warming affects plant-microbial interactions[J]. Global Change Biology, 2013, 19(3): 811-823.
- [29] 石福孙, 吴宁, 罗鹏. 川西北高山草甸植物群落结构及生物量对温度升高的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5286-5293.
- [30] CURIEL Y J, JANSSENS I, CARRARA A, et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest[J]. Tree Physiology, 2003, 23(18): 1263-1270.
- [31] severance and soil moisture conditions in the plantation tree Cunninghamialanceolata[J]. Tree Physiology, 2016(7): 807-817.
- [40] PIKE C C, WARREN J C, MONTGOMERY R A. Allometry of early growth in selected and wild sources of white spruce, Piceaglauca (Moench) Voss[J]. New Forests, 2016, 47(1): 131-141.
- [41] 于钦民, 徐福利, 王渭玲. 氮、磷肥对杉木幼苗生物量及养分分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 118-128.
- [42] 徐福利, 赵亚芳, 张潘, 等. 施肥对华北落叶松人工林根茎叶中氮磷含量的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(3): 142-146.

(上接 54 页)

- [37] SUDMEYER R A, SPEIJERS J, NICHOLAS B D. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines[J]. Tree Physiology, 2004, 24(12): 1333-1346.
- [38] JACOBS D F, SALIFU K F, SEIFERT J R. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings[J]. New Forests, 2005, 30(2/3): 235-251.
- [39] TINGFA D, BAOLI D, SHENG Z, et al. Growth, biomass allocation and photosynthetic responses are related to intensity of root