

短期增温对内蒙古大青山油松人工林土壤呼吸的影响¹⁾

郝晨阳 马秀枝 李长生 赵毅勇 武玉龙 梁燕 魏宽

(内蒙古农业大学, 呼和浩特, 010019)

(呼和浩特市气象局)

摘要 在全球变暖的气候大背景下,为进一步明确增温对干旱半干旱区土壤呼吸的影响,于 2020 年 6—11 月采用开顶增温室(OTC)模拟增温,观测内蒙古呼和浩特市大青山乌素图林场内油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林土壤呼吸速率的变化,揭示大青山油松人工林土壤呼吸的变化趋势与土壤温湿度之间的关系。结果表明:土壤呼吸的昼夜变化及季节变化均呈单峰型变化趋势,且增温抑制内蒙古大青山油松人工林土壤呼吸速率;昼夜变化中,生长季土壤呼吸速率呈现白天高夜间低的趋势,峰值出现在 11:00—15:00;季节变化中,8 月土壤呼吸速率达到最高,6—11 月增温与对照相比,增温使土壤呼吸速率平均降低了 15.2%;土壤呼吸速率受土壤温湿度共同影响且与土壤湿度的相关性更高;增温使得不同土壤深度的 Q_{10} 值均降低。

关键词 内蒙古大青山;油松人工林;土壤呼吸速率; Q_{10} 值

分类号 S719

Effects of Short-term Warming on Soil Respiration of *Pinus tabulaeformis* Plantation in Daqingshan Mountains// Hao Chenyang, Ma Xiuzhi (Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, P. R. China); Li Changsheng, Zhao Yiyong, Wu Yulong, Liang Yan, Wei Kuan (Hohhot Meteorological Bureau) // Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(11): 72-77.

In the context of global warming, in order to further clarify the influence of warming on soil respiration in arid and semi-arid areas, Open Top Chamber (OTC) was used to simulate warming and observe the changes of soil respiration rate of *Pinus tabulaeformis* plantation in Daqingshan Mountains Wusutu Forest Farm in Hohhot, Inner Mongolia from June to November 2020. The relationship between soil respiration and soil temperature and humidity in *P. tabulaeformis* plantation in Daqingshan Mountains was revealed. The diurnal and seasonal variations of soil respiration showed a unimodal trend, and increasing temperature inhibits soil respiration rate of *P. tabulaeformis* plantation in Daqingshan Mountains, Inner Mongolia. In the diurnal change, the soil respiration rate in the growing season was higher in the daytime and lower at night, and the peak rate appeared between 11:00 and 15:00. In the seasonal change, the soil respiration rate reached the highest in August. Compared with the control group, the soil respiration rate from June to November decreased by 15.2% on average due to the increasing temperature. Soil respiration rate was influenced by soil temperature and humidity with a higher correlation with soil humidity. The Q_{10} values of different soil depths were reduced by temperature increase.

Keywords Daqingshan; *Pinus tabulaeformis* plantation; Soil respiration rate; Q_{10} value

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2022.11.011

全球气候变暖是目前研究的重要问题,第五次 IPCC 报告显示,至 21 世纪末全球平均温度可能升高 1.5~2.0 °C^[1]。中国是全球气候变化的敏感区域,1951—2017 年地表年平均气温以 0.024 °C/a 的速率升高^[2],内蒙古呼和浩特地区 1954—2013 年地表平均升温速率为 0.05 °C/a^[3]。气候变暖影响降水格局的改变,研究表明呼和浩特市气候呈现暖干化趋势^[4-5]。土壤呼吸是全球碳循环的主要通量过程,占生态系统呼吸作用的一半以上,全球每年释放的 CO₂ 达到 50~75 Pg^[6],其中森林生态系统的土壤呼吸约占陆地生态系统呼吸的 47.5%~96.4%^[7],成为陆地生态系统碳循环的重要组成部分,也是引起全球气候变化的最主要因素之一。土壤呼吸是土壤碳库向大气碳库输入的主要途径,土壤呼吸发生微

弱的变化能够引起大气中温室气体浓度的显著变化,而气温升高会影响土壤呼吸的速率进而改变全球碳平衡^[8]。

干旱半干旱区是陆地生态系统的重要组成部分,占到陆地面积的 40% 以上,由于气候干燥,土壤与大气的水分含量较低,土壤缺乏养分和有机质,植被分布单一,生态类型极其脆弱^[9]。目前对土壤呼吸开展了一定的研究^[10-11],但对于干旱半干旱区森林生态系统增温对土壤呼吸的研究展开较少^[9,12]。大青山位于阴山山脉的中段,是干旱半干旱区域,属山地森林、灌丛-草原复合生态系统,是阴山山地生物多样性最集中的区域^[13]。近年来随着各项生态工程的建设,人工林的面积不断增加,人工林在森林生态系统中的地位越来越重要。油松(*Pinus tabulaeformis*)作为内蒙古大青山前山的主要造林树种,其生境适应性强,具有耐低温、耐干旱、耐瘠薄的生态学特性。为进一步明确干旱半干旱区增温对土壤呼吸的影响,本研究于 2020 年采用开顶增温室(OTC)模拟增温,观测内蒙古大青山乌素图林场油松人工

1) 内蒙古自治区自然科学基金项目(2022MS03054)。

第一作者简介:郝晨阳,女,1992 年 6 月生,内蒙古农业大学林学院,硕士研究生。E-mail: 1204190866@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 8 月 18 日。

责任编辑:王广建。

林土壤呼吸的变化趋势和规律,为我国北方干旱半干旱区实现“双碳”目标提供理论支持。

1 研究区概况

内蒙古大青山国家级自然保护区横跨包头、呼和浩特和乌兰察布三个市,位于阴山山脉中段,是阴山山脉的重要组成部分,试验样地位于呼和浩特市大青山乌素图实验林场,研究对象为树龄 35 a 左右的油松人工纯林。样地海拔 1 160 m,坡度 13°,坡向为阴坡,平均树高 9.29 m。样地土层浅薄,土壤为栗钙土。属温带大陆性半干旱季风气候,四季分明。春季风多雨少;夏季温和,雨量集中;秋季凉爽,气温剧降,雨量骤减;冬季寒冷,少雨雪。全年光照充足,平均气温 6.7 °C,年降水量 350~400 mm,主要集中在 7、8 月份,蒸发量可以达到降水量的 4 倍。人工林主要是油松,林下常有中生性灌丛伴生,主要建群植物有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。

2 研究方法

2.1 试验设计

试验样地选取于内蒙古大青山中段前坡乌素图森林气象站东侧油松人工林区,增温装置是以聚碳酸酯(透光率为 90%)为制作材料的八面体开顶增温室(OTC),底部直径 2.75 m,顶部直径 1.5 m,高 2.42 m。试验选取相对平坦的 20 m×20 m 规格的 4 个样方,每个样方设置增温(W)和对照(CK)2 个处理,共 8 个小区。选择的 8 个小区植被分布相对均匀,互为重复的样方之间的距离至少要 10 m,对照与增温小区的距离至少要 5 m。随机选取一个增温和一个对照小区安装 WN-30LDT 多通道温湿度检测器(万诺物联,中国),全年监测土壤的温湿度变化,土壤温湿度分 5、10、20 cm 三个土层检测。试验于 2019 年 11 月开始布置,于 2020 年 6—11 月进行数据采集。

2.2 数据的采集与测定

于 2020 年生长季 6—9 月采集土壤温湿度数

据,每隔 5 d 左右进行一组单次温湿度数据采集(09:00—10:10),每月进行一次昼夜的土壤温湿度数据采集(白天每隔 2 h 采集一组,夜间每隔 3 h 采集一组);非生长季 10 月和 11 月每隔 10 d 左右进行一组单次土壤温湿度数据采集。每个小区内设置一个 400 mm×400 mm 永久性土壤呼吸底座,并嵌入土壤,每次收集气体前给底座倒入一定量的水,将 400 mm×400 mm×400 mm 的静态箱扣于呼吸底座上,然后接通静态箱内的风扇使气体循环,开始采集气体。每次选择晴朗天气的工作日进行采集,每组增温和对照分别在 0、10、20、30 min 时间点采集箱内气体。用 Agilent7890A 型气象色谱仪(安捷伦,美国)测量采集气体中 CO₂ 的峰面积,进而获得土壤呼吸速率。用 WN-30LDT 多通道温湿度检测器对大青山油松人工林土壤温湿度(5、10、20 cm 土层处)进行动态观测,测定频率为 0.5 h。

2.3 数据分析方法

数据整理及图形绘制由 Excel2010 完成,差异显著性、单因素方差分析等由 SPSS19.0 完成。土壤呼吸速率(R_s)与土壤湿度(C_s)的关系利用一元线性回归方程 $R_s = aC_s + b$ 表示,式中 a 、 b 是方程拟合参数;利用指数模型分别模拟对照与增温状态下土壤呼吸速率与土壤温度的关系 $R_s = ae^{bt}$,式中 R_s 为土壤呼吸, a 为土壤温度为 0 °C 时的土壤呼吸速率, b 为温度反应系数, t 为土壤温度;用 Q_{10} 表示温度敏感性, $Q_{10} = e^{10b}$, b 为温度反应系数。

3 结果与分析

3.1 增温对土壤温度和湿度的影响

由表 1 可知,生长季(6—9 月)增温条件下,土壤 5 cm 深处温度提高 0.37 °C,土壤 10 cm 深处温度提高 0.40 °C,土壤 20 cm 深处温度提高 0.50 °C;非生长季(10 月和 11 月)土壤 5、10、20 cm 深处温度分别提高 1.77、2.38、1.62 °C。增温使土壤湿度降低明显,生长季土壤 5、10、20 cm 深处,土壤湿度分别降低 6.84%、5.50%、11.87%;非生长季土壤 5、10、20 cm 深处,土壤湿度分别降低 1.91%、1.84%、6.73%。

表 1 增温对油松人工林土壤温湿度的影响

季节	处理	不同深度土壤温度/°C			不同深度土壤湿度/%		
		5 cm	10 cm	20 cm	5 cm	10 cm	20 cm
生长季	增温处理	19.61±0.23	19.13±0.19	18.43±0.16	13.26±0.60	16.50±0.69	12.22±0.27
	对照	19.24±0.23	18.73±0.21	17.93±0.17	20.10±0.93	22.00±0.98	24.09±0.62
非生长季	增温处理	7.02±0.48	7.97±0.43	8.45±0.39	10.01±0.24	12.17±0.13	10.36±0.09
	对照	5.25±0.52	5.59±0.48	6.83±0.41	11.92±0.19	14.01±0.15	17.10±0.10

注:表中数据为“平均值±标准误差”。

3.2 土壤呼吸的昼夜变化与土壤温湿度的关系

3.2.1 温度升高对土壤呼吸昼夜变化的影响

由表2可知,增温和对照处理下土壤呼吸速率变化均呈现先升高后降低的单峰型趋势,白天变化整体较大,夜间变化相对较小,整体上增温状态下的土壤呼吸速率低于对照状态。土壤呼吸速率的峰值出现在11:00—15:00,最小值基本都出现在04:00—05:00。增温和对照不同测量时间,土壤呼吸所表现出的差异也不相同。

6月20日—6月21日,对照的土壤呼吸速率明显大于增温,土壤呼吸速率在13:00时达到最高值,对照比增温的土壤呼吸速率峰值高 $60.09 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;

7月20日—7月21日,对照的土壤呼吸速率明显大于增温,对照的土壤呼吸速率最大值出现在11:00,最小值出现在04:00,增温土壤呼吸速率最大值出现在13:00,最小值出现在07:00;8月19日—8月20日,增温与对照的土壤呼吸速率在07:00差值最大,相差 $252.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;其中对照的土壤呼吸速率最大值出现在11:00,增温的土壤呼吸速率最大值出现在15:00;9月25日—9月26日,土壤呼吸速率05:00—15:00表现为对照大于增温,土壤呼吸速率17:00—04:00表现为增温大于对照,增温与对照的土壤呼吸速率峰值均出现在13:00。

表2 增温对土壤呼吸昼夜变化的影响

时刻	土壤呼吸速率/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$							
	6月20日—6月21日		7月20日—7月21日		8月19日—8月20日		9月25日—9月26日	
	增温处理	对照	增温处理	对照	增温处理	对照	增温处理	对照
05:00	(50.53±8.53) d	(97.49±13.79) c	(238.97±8.92) bc	(329.47±27.54) a	(461.57±86.42) a	(528.45±36.98) c	(349.67±37.23) a	(354.84±29.70) c
07:00	(72.51±10.88) cd	(116.39±6.69) bc	(227.84±24.34) c	(410.30±41.86) a	(494.37±69.06) a	(746.65±89.07) abc	(428.96±69.18) a	(481.71±57.53) bc
09:00	(96.97±2.96) bc	(163.31±33.79) abc	(271.72±26.52) abc	(411.06±38.61) a	(607.39±81.24) a	(785.67±74.61) abc	(499.30±90.47) a	(547.39±28.27) ab
11:00	(148.77±17.52) a	(174.39±25.58) ab	(334.26±13.27) ab	(452.09±32.86) a	(720.60±129.05) a	(897.43±107.85) a	(488.58±29.70) a	(513.93±29.33) b
13:00	(166.89±21.51) a	(226.98±23.06) a	(358.07±13.28) a	(430.05±46.88) a	(773.00±129.19) a	(883.14±58.60) bc	(525.42±16.52) a	(670.87±70.08) a
15:00	(133.17±17.60) ab	(167.76±8.23) abc	(336.18±36.18) ab	(396.20±62.25) a	(798.38±127.69) a	(807.57±75.12) bc	(468.13±39.45) a	(543.85±44.11) ab
17:00	(132.13±12.36) ab	(182.87±13.84) ab	(360.13±33.32) a	(401.81±31.70) a	(740.32±104.18) a	(755.62±39.52) abc	(465.78±57.97) a	(452.95±48.72) bc
19:00	(88.10±5.87) bcd	(134.72±13.59) bc	(349.76±33.13) a	(395.22±62.14) a	(636.22±111.39) a	(756.58±74.45) abc	(445.33±45.75) a	(422.15±59.58) bc
22:00	(83.70±13.97) cd	(125.63±33.56) bc	(281.88±48.55) abc	(381.41±39.32) a	(568.26±92.78) a	(700.68±81.01) abc	(422.38±43.31) a	(413.15±25.77) bc
01:00	(78.22±10.46) cd	(130.64±15.51) bc	(278.80±37.05) abc	(343.36±59.00) a	(524.72±88.03) a	(676.03±90.13) abc	(416.33±62.24) a	(353.54±47.12) c
04:00	(60.01±8.88) cd	(119.05±21.49) bc	(239.68±8.92) bc	(333.17±27.54) a	(508.43±81.26) a	(622.89±9.17) bc	(386.98±46.83) a	(338.26±62.23) bc

注:表中数据为“平均值±标准误差”,同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

3.2.2 土壤呼吸昼夜变化与土壤温湿度的相关性

由表3可知,土壤呼吸速率与5 cm和10 cm土壤温度呈正相关,与6月份5 cm深度土壤增温和对照呈显著相关($P<0.05$),与8月份的土壤增温呈显著相关($P<0.05$);与7月的增温处理呈极显著相关($P<0.01$),相关系数为0.819;土壤呼吸速率与5 cm深度土壤湿度呈正相关,与6月增温状态的5 cm深

度土壤湿度呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为0.680;与7月的增温状态的5 cm深度土壤湿度呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数为0.769。土壤呼吸速率与各月10 cm和20 cm深度土壤温度相关性和湿度相关性均不显著($P>0.05$)。同时,土壤呼吸昼夜变化速率与土壤温湿度的相关系数增温处理大于对照处理。

表3 土壤呼吸昼夜变化与土壤温湿度的相关性

日期	处理	土壤呼吸速率与不同深度土壤温度的相关系数			土壤呼吸速率与不同深度土壤湿度的相关系数		
		5 cm 土壤	10 cm 土壤	20 cm 土壤	5 cm 土壤	10 cm 土壤	20 cm 土壤
6月20日—6月21日	增温处理	0.710*	0.211	-0.263	0.680*	0.374	-0.284
	对照	0.676*	0.452	-0.254	0.556	0.321	-0.145
7月20日—7月21日	增温处理	0.819**	0.478	0.074	0.769**	0.341	-0.221
	对照	0.113	-0.065	-0.561	0.540	0.339	0.304
8月19日—8月20日	增温处理	0.680*	0.310	0.006	0.572	-0.561	-0.304
	对照	0.510	0.242	-0.275	0.178	0.022	-0.127
9月25日—9月26日	增温处理	0.358	0.087	-0.233	0.429	-0.134	-0.326
	对照	0.284	0.046	-0.533	0.321	0.392	0.334

注:**为极显著相关($P<0.01$),*为显著相关($P<0.05$)。

3.3 土壤呼吸的季节变化与温湿度的关系

3.3.1 增温对土壤呼吸季节变化的影响

由表4可知,大青山油松人工林2020年6—11

月增温对土壤呼吸的季节变化影响,增温和对照处理土壤呼吸速率变化规律一致,有明显的季节变化规律,在6—11月间总体呈现单峰型变化趋势,8月

达到最大值。2020 年 6—11 月各月呼吸速率由大到小的顺序为: 8 月、9 月、7 月、6 月、10 月、11 月, 7—9 月的呼吸速率较 6、10、11 月差异显著 ($P < 0.05$), 生长季(6—9 月)的呼吸速率明显大于非生长季(10 月、11 月)。增温和对照的呼吸速率同一月份差异均不显著 ($P > 0.05$), 总体的趋势为对照大于增温, 土壤呼吸速率季节变化上体现为增温对土壤呼吸起到了抑制的作用。6 月随着温度的升高, 呼吸强度逐渐增强, 到了 7 月进入雨季呼吸强度有了明显上升, 8 月中旬达到了呼吸速率最大值, 进入 9 月温度降低, 植物生长放缓, 土壤呼吸速率开始下降, 到 11 月下旬土壤呼吸速率降到 $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。

3.3.2 土壤呼吸季节变化与土壤温度的关系

由表 5 可知, 土壤呼吸速率季节变化与各层土

表 5 土壤呼吸与土壤温度的季节变化规律

季节	月份	各处理土壤呼吸速率/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$		各处理 5 cm 深度土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$		各处理 10 cm 深度土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$		各处理 20 cm 深度土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$	
		增温处理	对照	增温处理	对照	增温处理	对照	增温处理	对照
生长季	6	111.73±7.88	116.59±21.10	21.43±0.26	20.59±0.27	20.04±0.23	19.68±0.26	18.62±0.23	17.94±0.24
	7	293.35±35.48	383.65±45.19	21.32±0.17	20.97±0.24	20.92±0.15	20.43±0.22	20.07±0.13	19.37±0.18
	8	473.96±49.80	557.46±86.02	20.08±0.17	20.20±0.20	19.86±0.14	19.84±0.17	19.42±0.12	19.30±0.12
	9	421.58±29.84	460.72±30.56	15.62±0.23	15.20±0.27	15.72±0.21	14.98±0.24	15.63±0.19	15.10±0.21
非生长季	10	49.31±5.58	73.67±10.73	9.35±0.25	7.69±0.27	10.04±0.22	7.85±0.24	10.39±0.20	8.88±0.21
	11	34.46±3.21	39.75±6.44	4.70±0.60	2.82±0.67	5.90±0.53	3.34±0.62	6.50±0.46	4.78±0.50

注: 表中数据为“平均值±标准误差”。

土壤呼吸与温度变化之间存在指数关系^[14], 建立增温和对照状态下 6—11 月的土壤呼吸速率与各土壤温度的指数函数关系。由表 6 可知, 生长季与非生长季土壤温度与土壤呼吸速率呈现相反的趋势, 生长季随着温度的升高土壤呼吸速率降低, 非生长季随着温度的升高, 土壤呼吸速率增加。非生长季温度与土壤呼吸速率的相关指数大于生长季。在生长季, 土壤呼吸速率受温度的影响不明显, 与各层土壤相关性增温均大于对照。增温处理中, 呼吸速率与各土层温度之间的相关性随土壤深度的增加而减

表 6 土壤呼吸与土壤温度季节变化的函数关系

土壤深度/cm	处理	不同季节不同土壤温度与土壤呼吸季节变化的函数关系							
		生长季		非生长季					
5	增温处理	$R_s = 2030.00e^{-0.107t}$	$R^2 = 0.2013$	$P > 0.05$	$Q_{10} = 0.34$	$R_s = 34.720e^{0.0317t}$	$R^2 = 0.4347$	$P < 0.01$	$Q_{10} = 1.37$
	对照	$R_s = 1427.50e^{-0.082t}$	$R^2 = 0.1195$	$P > 0.05$	$Q_{10} = 0.44$	$R_s = 45.234e^{0.0462t}$	$R^2 = 0.3547$	$P < 0.01$	$Q_{10} = 1.59$
10	增温处理	$R_s = 2001.00e^{-0.105t}$	$R^2 = 0.1474$	$P > 0.05$	$Q_{10} = 0.35$	$R_s = 32.393e^{0.0356t}$	$R^2 = 0.4318$	$P < 0.01$	$Q_{10} = 1.43$
	对照	$R_s = 1323.20e^{-0.078t}$	$R^2 = 0.0812$	$P > 0.05$	$Q_{10} = 0.46$	$R_s = 42.821e^{0.0491t}$	$R^2 = 0.3559$	$P < 0.01$	$Q_{10} = 1.63$
20	增温处理	$R_s = 1403.40e^{-0.087t}$	$R^2 = 0.0696$	$P > 0.05$	$Q_{10} = 0.42$	$R_s = 30.251e^{0.0403t}$	$R^2 = 0.4436$	$P < 0.01$	$Q_{10} = 1.50$
	对照	$R_s = 676.72e^{-0.041t}$	$R^2 = 0.0117$	$P > 0.05$	$Q_{10} = 0.66$	$R_s = 36.883e^{0.0584t}$	$R^2 = 0.3650$	$P < 0.01$	$Q_{10} = 1.79$

注: $P < 0.01$ 为极显著相关, $P > 0.05$ 为不显著相关。

土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 表示温度每升高 10°C 土壤呼吸速率增加的倍数, 很大程度上决定了陆地土壤碳循环对全球气候变化的反馈。生长季和非生长季土壤呼吸温度敏感性明显不同, 非生长季

壤温度的趋势不同; 6—8 月土壤及大气温度呈缓慢下降趋势, 而呼吸速率却迅速上升, 到 8 月呼吸速率达到最高值, 10—11 月进入非生长季温度降低土壤呼吸速率也随之降低, 6—9 月对照状态与增温状态的温度差异不大, 8 月各土层土壤温度相差 $0.03 \sim 0.12^{\circ}\text{C}$, 但呼吸速率相差 $83.50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 4 增温对土壤呼吸季节变化的影响

月份	不同月份各处理土壤呼吸速率/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	
	增温处理	对照
6	(111.73±7.88) c	(116.59±21.10) c
7	(293.35±35.48) b	(383.65±45.19) b
8	(473.96±49.80) a	(557.46±86.02) a
9	(421.58±29.84) a	(460.72±30.56) ab
10	(49.31±5.58) c	(73.67±10.73) c
11	(34.46±3.21) c	(39.75±6.44) c

注: 表中数据为“平均值±标准误差”, 同列不同小写字母表示不同月份差异显著 ($P < 0.05$)。

小; 对照处理中, 土壤呼吸速率与 5 cm 深度土壤的相关指数最大为 0.120 ($P > 0.05$), 与 20 cm 深度土壤温度的相关指数最小为 0.081 ($P > 0.05$)。在非生长季, 土壤呼吸速率受温度影响显著, 与各层土壤相关性均为增温大于对照, 土壤呼吸速率与各土层之间的相关性随土壤深度的增加而增大; 增温处理中, 土壤呼吸速率与 20 cm 深度土壤温度的相关性指数最大为 0.444 ($P < 0.01$)。对照处理中, 土壤呼吸速率与 20 cm 深度土壤温度的相关指数最大为 0.365 ($P < 0.01$)。

各层土壤的温度敏感性比生长季高。土壤呼吸对各层土壤的敏感度也不同, 在生长季, 20 cm 土壤的温度敏感性高于其他土层土壤, 不同土层的 Q_{10} 值为 $0.34 \sim 0.66$; 在非生长季, 不同土层的 Q_{10} 值为 $1.37 \sim$

1.79,各土层间的温度敏感性相差不大。不论是生长季还是非生长季,不同土壤深度增温状态下的 Q_{10} 值均比对照低,且随着土壤深度的增加土壤温度敏感性也进一步增加。

3.3.3 土壤呼吸季节变化与土壤湿度的关系

由表7可知,土壤呼吸季节变化与各层土壤湿度的变化趋势相近,均为先增加后减少趋势,季节性

的降水与湿度及土壤呼吸速率趋势也相一致。6—8月随着土壤湿度的增加土壤呼吸速率也在不断增加,进入8月各层土壤湿度达到最高值,土壤呼吸速率也达到了各月的最高值,10—11月土壤湿度下降,土壤呼吸速率也迅速下降,各月土壤湿度及土壤呼吸速率均为对照高于增温处理。

表7 土壤呼吸与土壤湿度及降水量的季节变化规律

时间	各处理土壤呼吸速率/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$		5 cm 深度土壤湿度/%		10 cm 深度土壤湿度/%		20 cm 深度土壤湿度/%		降水量/ mm
	增温处理	对照	增温处理	对照	增温处理	对照	增温处理	对照	
6	111.73±7.88	116.59±21.10	5.69±0.05	6.45±0.27	8.63±0.02	7.21±0.81	9.15±0.03	15.81±0.61	28.9
7	293.35±35.48	383.65±45.19	8.82±0.07	19.58±0.69	10.91±0.20	23.72±0.83	10.03±0.14	25.59±0.81	89.1
8	473.96±49.80	557.46±86.02	19.36±0.62	27.05±1.01	24.50±0.92	28.09±0.85	15.40±0.33	28.21±1.07	148.9
9	421.58±29.84	460.72±30.56	19.16±0.26	27.31±1.03	21.96±0.36	28.98±0.81	14.31±0.14	26.77±1.02	59.9
10	49.31±5.58	73.67±10.73	11.65±0.22	13.05±0.14	13.11±0.12	14.84±0.13	11.09±0.09	17.63±0.10	5.3
11	34.46±3.21	39.75±6.44	8.37±0.13	10.80±0.13	11.23±0.09	13.17±0.11	9.64±0.06	16.57±0.08	1.5

注:表中数据为“平均值±标准误差”,降水量为单月总和。

由表8可知,土壤呼吸速率在生长季和非生长季变化趋势大体一致,均随着湿度的增加土壤呼吸速率呈上升趋势,土壤呼吸速率与各土层湿度指数相关性均为极显著($P<0.01$)。在生长季,土壤呼吸速率与5、10 cm 深度土壤湿度的相关性对照大于增温,与20 cm 深度土壤湿度的相关性增温大于对照。增温处理中,土壤呼吸速率与10 cm 深度土壤湿度

相关指数最大为0.601($P<0.01$),与5 cm 深度土壤湿度的相关指数最小为0.571($P<0.01$)。对照处理中,土壤呼吸速率与各土层之间的相关性随土壤深度的增加而减小。在非生长季增温处理中,土壤呼吸速率与10 cm 深度土壤湿度的相关性指数最大为0.733($P<0.01$)。对照处理中,土壤呼吸速率与各土层湿度的相关性随土壤深度的增加而增加。

表8 土壤湿度与土壤呼吸季节变化的函数关系

土壤深度/cm	处理	土壤湿度与土壤呼吸季节变化的函数关系	
		生长季	非生长季
5	增温处理	$R_s = 18.248C_s + 87.889$ $R^2 = 0.571$ $P < 0.01$	$R_s = 3.748$ $8C_s + 4.194$ 2 $R^2 = 0.695$ 9 $P < 0.01$
	对照	$R_s = 14.958C_s + 70.568$ $R^2 = 0.629$ 5 $P < 0.01$	$R_s = 10.152C_s - 62.602$ $R^2 = 0.611$ 0 $P < 0.01$
10	增温处理	$R_s = 16.689C_s + 54.528$ $R^2 = 0.601$ 4 $P < 0.01$	$R_s = 5.296$ $5C_s - 23.943$ $R^2 = 0.732$ 7 $P < 0.01$
	对照	$R_s = 14.424C_s + 61.781$ $R^2 = 0.616$ 7 $P < 0.01$	$R_s = 12.131C_s - 111.73$ $R^2 = 0.620$ 9 $P < 0.01$
20	增温处理	$R_s = 41.601C_s - 178.120$ $R^2 = 0.595$ 7 $P < 0.01$	$R_s = 8.127$ $2C_s - 43.697$ $R^2 = 0.705$ 6 $P < 0.01$
	对照	$R_s = 21.026C_s - 128.750$ $R^2 = 0.473$ 0 $P < 0.01$	$R_s = 18.327C_s - 255.17$ $R^2 = 0.652$ 5 $P < 0.01$

4 讨论

研究发现在生长季大青山油松人工林土壤呼吸的昼夜变化伴随当日温度的升高而增大,由于其他环境因子如土壤湿度、生物量、土壤理化性质等在短时间内的变化不会太明显,因此温度是控制土壤呼吸昼夜变化的主要因素,这与大部分温度增加促进土壤呼吸的研究结果相一致^[15-18]。但是,相同条件下,土壤呼吸速率增温低于对照,又与增温促进土壤呼吸的结论相矛盾,导致这种结果的原因是由于研究区位于半干旱区,而干旱半干旱区温度对土壤呼吸的影响高度依赖于土壤湿度,生态系统受水分条件限制明显,特别是夏季,偏低的土壤含水量造成微生物活性下降,从而对土壤呼吸产生抑制作用^[9]。温度增加只能微弱地促进土壤呼吸,而其间接导致土壤水分大量蒸发,土壤湿度明显降低,致使土壤处

于水分胁迫状态,使土壤呼吸速率与湿度的相关性更大,土壤湿度成为了限制土壤呼吸速率的主要因子。本研究增温状态致使各土壤湿度明显减少,而增温带来湿度的增加不是很明显,因此使增温状态下土壤呼吸速率降低。Peng et al.^[12]研究表明,增温对土壤呼吸作用的影响取决于土壤湿度,在湿润条件下增温促进呼吸作用,在干旱条件下则抑制呼吸作用,与本研究半干旱区土壤湿度低,增温抑制土壤呼吸的结果相一致。

在影响土壤呼吸的因子方面,大多数研究表明温度对土壤呼吸起决定性作用。Bond-Lamberty et al.^[19]研究发现土壤呼吸随着温度的升高而升高;王光军等^[20]对杉木群落的研究表明,土壤温度可以解释土壤呼吸速率变化的91.7%。然而,在大多数生态系统中,温度并不能很好的解释土壤呼吸速率的变化,除温度外的其他限制因子也会影响土壤生物

的活性影响土壤呼吸,且土壤温度和湿度存在相互影响的关系,很难独立解释对土壤呼吸的影响作用^[21-22]。栾军伟等^[23]研究结果表明影响土壤呼吸速率主要的环境因子是温度因子;海龙等^[24]对内蒙古大青山华北落叶松林土壤呼吸研究表明,温度和湿度对土壤呼吸速率的影响均比较明显;乌拉山生长季天然油松林的土壤湿度是影响土壤呼吸的主导因子^[25];严峻霞^[26]对黄土高原柠条人工林土壤呼吸研究也表明干旱半干旱地区湿度是土壤呼吸的主要限制因子。当然还有土壤有机质、凋落物分解、植被种类等其他生物因子和降水等非生物因子也影响土壤呼吸速率^[9]。

土壤呼吸速率的季节变化在生长季受浅层土壤温湿度的影响大,在非生长季受深层土壤温湿度的影响更大。土壤湿度是土壤呼吸速率的季节变化的主要限制因子,在生长季和非生长季土壤呼吸速率均随土壤湿度的增加而增加,而在生长季土壤呼吸速率随土壤温度的增加而减少,在非生长季土壤呼吸速率均随土壤温度的增加而增加,在增温和对照状态下,土壤呼吸均是进入 7 月迅速上升,在 8 月和 9 月达到高值后迅速下降,因为季节性干旱后,土壤湿度骤变迅速提高微生物有机体对于土壤碳的利用,并产生一个微生物呼吸峰^[27],造成土壤呼吸速率迅速上升。整体上对照的呼吸速率大于增温处理,土壤呼吸的季节变化表现为增温抑制土壤呼吸,产生这种现象是因为研究区为半干旱区,对湿度的敏感性大于温度,而增温间接导致土壤湿度的降低,土壤湿度的降低会减少植物同化作用运输到根系和根际的碳源,也会限制利用土壤碳的微生物有机体活力,导致土壤呼吸速率下降。

5 结论

本研究通过建立 OTC 增温平台,研究增温对大青山油松人工林土壤呼吸速率的短期影响,通过分析 2020 年 6—11 月的实验数据,发现生长季土壤呼吸速率昼夜变化呈单峰型变化规律,峰值一般出现在 11:00 和 13:00,谷值出现在 04:00 和 05:00,增温使得土壤呼吸速率降低;季节变化也呈单峰型规律,8 月达到峰值,6—11 月增温显著抑制了土壤呼吸速率,与对照相比平均降低了 15.2%。在生长季,土壤呼吸速率的季节变化主要受浅层土壤温湿度的影响,在非生长季,土壤呼吸速率主要受深层土壤温湿度的影响,且土壤呼吸速率受土壤湿度的影响更大。

参 考 文 献

[1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis [M].

- Cambridge: Cambridge University Press 2014.
- [2] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书 [R]. 北京: 中国气象局气候变化中心, 2018.
- [3] 张华, 张志杰, 塞丫. 呼和浩特市近 61 年气温年际变化特征分析 [J]. 内蒙古林业科技, 2016, 42(2): 35-36, 41.
- [4] 吕景华, 杜文娟, 张雨田, 等. 内蒙古呼和浩特地区气温和降水量变化趋势分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 100-104.
- [5] 赵凌玉, 潘志华, 安萍莉, 等. 北方农牧交错带作物耗水特征及其与气温和降水的关系: 以内蒙古呼和浩特市武川县为例 [J]. 资源科学, 2012, 34(3): 401-408.
- [6] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide efflux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 1992, 44(2): 81-99.
- [7] WANG J, SHA L Q, LI J Z, et al. CO₂ efflux under different grazing managements on subalpine meadows of Shangri-La, Northwest Yunnan Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3574-3583.
- [8] 孙宝玉, 韩广轩. 模拟增温对土壤呼吸影响机制的研究进展与展望 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3394-3402.
- [9] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展 [J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [10] 孙宝玉, 韩广轩, 陈亮, 等. 模拟增温对黄河三角洲滨海湿地非生长季土壤呼吸的影响 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(11): 1111-1123.
- [11] 马忠涛, 张秋良, 杨琳. 大兴安岭兴安落叶松林土壤 CO₂、CH₄ 的昼夜变化特征 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(6): 58-62.
- [12] PENG F, XU M H, YOU Q G, et al. Different Responses of soil respiration and its components to experimental warming with contrasting soil water content [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2015, 47(2): 359-368.
- [13] 莎仁图雅, 段玉玺, 武佳琪. 内蒙古大青山不同林分密度油松人工林碳密度研究 [J]. 内蒙古林业科技, 2013, 39(3): 13-16.
- [14] XU M, QI Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. Global Change Biology, 2001, 7(6): 667-677.
- [15] 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.
- [16] 王一. 模拟土壤增温和林内减雨对暖温带锐齿栎林土壤呼吸的影响及其微生物响应 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [17] RUSTAD L, CAMPBELL J, MARION G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming [J]. Oecologia, 2001, 126(4): 543-562.
- [18] 熊沛, 徐振锋, 林波, 等. 岷江上游华山松冬季土壤呼吸对模拟增温的短期响应 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(12): 1369-1376.
- [19] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. Nature, 2010, 464: 579-582.
- [20] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 亚热带杉木和马尾松群落土壤系统呼吸及其影响因素 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 53-62.
- [21] DAVIDSON E, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217-227.
- [22] 宋丽, 李娇娇, 周鑫胜, 等. 太原市 2 个典型林分冬季土壤呼吸及其对温度和湿度的响应 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(3): 84-88, 94.
- [23] 栾军伟, 刘世荣. 土壤呼吸的温度敏感性: 全球变暖正反馈的不确定因素 [J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4902-4913.
- [24] 海龙, 呼木吉勒图, 王晓江, 等. 内蒙古大青山华北落叶松成熟林生长季土壤呼吸研究 [J]. 内蒙古林业科技, 2019, 45(1): 11-16.
- [25] 海龙, 王占杰, 宝朝鲁门, 等. 内蒙古乌拉山天然油松林土壤呼吸特征研究 [J]. 内蒙古林业科技, 2013, 39(2): 7-10.
- [26] 严峻霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6366-6376.
- [27] BORKEN W, MATZNER E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils [J]. Global Change Biology, 2009, 15(4): 808-824.