

DOI: 10.5846/stxb201403260562

张一平,武传胜,梁乃申,沙丽清,罗鑫,刘玉洪.哀牢山亚热带常绿阔叶林森林土壤温湿特征及其对温度升高的响应.生态学报,2015,35(22):

Zhang Y P, Wu C S, Liang N S, Sha L Q, Luo X, Liu Y H. Responses of soil temperature, moisture and respiration to experimental warming in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22):

哀牢山亚热带常绿阔叶林森林土壤温湿特征及其对温度升高的响应

张一平^{1,2,*}, 武传胜^{2,4}, 梁乃申³, 沙丽清^{1,2}, 罗鑫², 刘玉洪^{1,2}

1 中国科学院热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223

2 中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 景东 676209

3 日本国立环境研究所, 日本, 筑波 305-8506

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:为把握土壤温度对未来全球气候变暖的响应程度,评估气候变暖对亚热带森林土壤呼吸的影响,利用在哀牢山亚热带常绿阔叶林中设置的土壤增温和土壤呼吸人工控制实验 2011—2013 年的实测数据,通过分析,得到如下结果:环境温度的升高不会改变林内的近地层气温、土壤温度和土壤含水量的年变化和日变化规律;冬季和夜间增温效应大于夏季和昼间;增温会导致土壤含水量降低,雨季的效应大于干季;增温导致的升温效应和降低土壤水分效应具有一定的年变化,但是基本没有日变化;所设置的人工增温控制实验的年平均增温在 2.0 °C 左右,可以认为,所设置人工控制实验可以达到 5 cm 土壤增温 2.0 °C 的设计要求,可为其后探讨土壤呼吸对温度升高的响应提供良好的基础保证。

关键词:气候温暖化,土壤温度,红外增温,亚热带常绿阔叶林,哀牢山

Responses of soil temperature, moisture and respiration to experimental warming in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan

ZHANG Yiping^{1,2,*}, WU Chuanheng^{2,4}, LIANG Naishen³, SHA Liqing^{1,2}, LUO Xing², LIU Yuhong^{1,2}

1 Key laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China

2 Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Jingdong 676209, China

3 Global Carbon Cycle Research Section, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The soil-surface carbon flux is comparable to that of photosynthesis in terrestrial ecosystems. Much soil carbon flux to the atmosphere is due to rhizosphere metabolism (root respiration) and the decomposition of soil microbes (microbial respiration), which are both very sensitive to temperature. With soil temperatures increasing, soil respiration will increase, thereby accelerating global change. To improve our understanding of the response of soil temperature to future warming and to assess the potential effects of global warming on soil respiration in subtropical forests, we experimentally warmed subtropical evergreen broad-leaved forest soils in Ailao Mountain Southwest, China and measured their respiration. This experiment was conducted at the Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies (24°32'N, 101°01'E; 2480 m above sea level) of the Chinese Ecological Research Network, Jingdong County, Yunnan Province. The annual mean air

基金项目:云南省自然科学基金重点项目(2011FA025);国家基金-云南省联合项目(U1202234);国家基金重大项目(31290220);中科院战略性专项项目(XDA05050601, XDA05050206)

收稿日期:2014-03-26; **网络出版日期:**2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

temperature was 11.0°C, with a maximum monthly mean temperature of 15.3°C in July and a minimum monthly mean temperature of 5.1°C in January. The site has strong rainy seasons (May to October) and dry seasons (November to April the following year). The average annual rainfall was 1882 mm, with 1607 mm (85.4% of the annual total) in the rainy season and 274.2 mm in the dry season (14.6% of the annual total). The soil is yellow brown in this area. Litterfall accumulates to 3—7 cm. Soil humus is dark brown and 10—15 cm thick. The mineral soil layer is loose and dominated by soil aggregates. Surface soils have high water permeability and water conservation ability, high organic carbon, and a pH of 4.5—5. Our artificial warming experiment was conducted in a subtropical forest where wind speed and radiation are both low at the surface. A multi-channel automated chamber system was used to continuously monitor soil CO₂ effluxes. The system was comprised of 20 automatic chambers (length 90 cm × width 90 cm × height 50 cm) and a control box, and the 20 chambers were divided into 4 treatments (5 chambers per treatment): control, litter removal, trenching, and infrared light warming. The soil efflux of each chamber was measured automatically each hour and environmental factors were measured each half hour. When measuring soil efflux, the chamber was closed for 3 min, then opened for 57 min by opening its lid. Thus, environmental conditions (e.g., wind, rainfall, and litterfall) in chambers were similar to those outside. In the artificial warming experiment, variations in soil temperature and soil water content were observed along with soil respiration. Based on measurements from 2011 to 2013, we concluded that warming did not change the seasonal and diurnal patterns of air temperature near the soil surface, soil temperature, or soil water content of the forest. The warming effects in winter and nighttime were greater than in summer and daytime. Warming decreased soil water content to a larger extent in the rainy season than in the dry season. The temperature increase and soil water decrease resulting from warming had seasonal variations, but not diurnal variations. The experimental warming increased the annual soil temperature by about 2°C; therefore, the warming treatment reached the goal of increasing soil temperature at 5 cm by 2°C. Our infrared warming method achieved a relatively stable warming effect without time lags in soil-temperature variations in the primary subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain. In this subtropical evergreen broad-leaved forest, soil temperature has previously shown a significant warming trend, so this study can supply information about soil respiration responses. This study also showed that variation in local air temperature, soil temperature, and soil-water content will not change under global warming, but soil-water content will decline with increased temperature, especially in the rainy season. In the forest, soil respiration is affected not only by soil temperature, but also by soil water content. As warming decreases soil water content, the effects of soil water content variation on soil respiration should be examined in future research.

Key Words: global warming, soil temperature, infrared heating, subtropical broad-leaved forest, Ailao Mountains

全球气候变化已成为世界关注的问题。IPCC 第四次评估报告^[1]指出:在过去的 100 年里全球平均温度升高了 0.74 ± 0.18 °C。森林是陆地生态系统的主体,森林大量地吸收固定大气中的 CO₂,成为巨大的碳汇。全球森林的碳贮量约占全球植被的 77%,森林土壤的碳贮量约占全球土壤的约 71%,其中热带和亚热带森林的碳贮量约占全球土壤的约 25%^[2,3]。但是,森林破坏将增大温室气体等的排放,毁林已成为仅次于化石燃烧的大气的重要排放源^[2]。由此可见,森林生态系统在全球碳循环与平衡中具有极为重要的和不可替代的地位和作用。而在森林生态系统中土壤-植被-大气间物质交换,特别是森林生态系统的碳收支对全球气候变化的影响与反馈作用,已经成为全球变化和可持续发展研究中的关键问题之一。

全球温度上升越高,对人类社会和自然生态的影响就越大,IPCC 评估报告^[1]认为,未来全球温度升高不超过 2 °C 时,导致的影响有正有负,而负面影响更多一些;权衡气温上升带来的损失,人类社会应对气候变化、减缓温室气体排放的成本和代价,以及国际社会行动实现目标的可能性,经过多次协商与交流,最终在哥本哈根大会上达成的共识,未来气候升温将控制在 2 °C。因此在很多预测未来气候变化的模型的情境设定中,全球温度升高 2 °C 是公认的一个标准。

在大多数陆地生态系统中,土壤呼吸的碳通量仅次于光合作用的碳通量^[4]。以森林土壤为主的土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库,达 15,500 亿吨,是大气中碳储量的 2 倍,是全球植被中的 3 倍^[5]。另一方面,由于植物根系的新陈代谢作用(根呼吸)和土壤微生物的分解作用(微生物呼吸)同时会有大量的有机碳被释放到大气中。根呼吸和微生物呼吸的总和通常被称之为土壤呼吸。导致土壤呼吸的主要环境因子是温度和土壤水分。除土地利用变化外,全球温度上升将促进土壤呼吸,加速土壤中储存的碳向大气中排放,进而加剧全球变化。

近 10 年来国内外关于全球变化对陆地生态系统功能特性和土壤理化性状影响的模拟实验已开展,但多是设置在农田和草地^[6-12],其研究取得了可喜的成绩,其中一些结果对于传统的陆地生态系统生物地球化学循环理论和模型系数等进行了科学的纠正,对揭示了全球变化对陆地生态系统的影响和相互之间的响应耦合关系提供了相应的支持;但是对于作为全球陆地碳循环主体的森林生态系统的野外生态学控制实验尚不多见。

位于云南哀牢山国家级自然保护区试验区的哀牢山生态站,作为国家野外台站和中国生态系统研究网络的森林站,在坚持长期生态监测的同时,也开展了相应的研究。由于在亚热带常绿阔叶林分布区域的山地具“冬暖夏凉”气候特征,山地垂直地带性与纬向水平地带性存在分异;导致该地区具较高地温(年均值地温比气温高 2.5—3.0 °C,全年地积温比气积温高 900—1100 °C)^[13-15];通过对哀牢山地区长期观测资料的分析,发现气温在林内与林外都具有显著的上升趋势;林内各深度土壤温度均呈现出显著上升的趋势;林外仅在 15 cm、20 cm 深度土壤温度有明显升温趋势;林外气温上升的趋势要高于林内;而地温上升趋势则是林外低于林内;并且在 0—20 cm 深度,林内土壤温度上升趋势是林外的 2 倍^[16];且林内各层地温均低于同层的林外地温;其年变幅和日变幅也小于林外^[17];对土壤含水量的研究表明:哀牢山亚热带常绿阔叶林不同深度基本上随着土壤深度的增加而降低,波动范围也逐渐减小,土壤含水量雨季高于旱季^[18];常绿阔叶林的具有较强的土壤涵养水功能^[19];森林地上地下的碳分配对土壤有机碳具有影响^[20-23];对森林碳平衡的研究表明^[24],亚热带常绿阔叶林虽然已是 300 多年的老龄林,但仍是一个较大的碳汇;利用处于相近纬度的 3 个亚热带常绿林的数据,分析表明:温暖化将极大的促进亚热带常绿林的土壤呼吸作用(敏感性高),而促进光合作用效果不显著(敏感性低);因此伴随着温度的上升,亚热带常绿林的碳汇作用将不断变弱^[25]。如此看来,伴随全球变暖,森林的土壤温度也将上升,将影响森林土壤碳排放,导致森林碳平衡发生改变。因此,在全球气候变暖情境下,森林土壤温湿度的特征、变化规律是否发生改变?对土壤呼吸会有什么影响?乃是我们关注的问题。

本研究将选择我国主要林区哀牢山亚热带山地常绿阔叶林为研究对象,通过设置人工控制增温实验,采用原地人工控制增温的方式,模拟温度升高后,对森林土壤温湿特征、变化规律的改变状况开展研究,以期为区域气候变暖后森林土壤呼吸的变化,乃至森林碳循环评估提供支持。

1 研究概况与方法

1.1 研究地概况

研究区域位于哀牢山亚热带山地常绿阔叶林,哀牢山源于云南境内西北部的云岭山系,纵贯云南中南部 500 km。哀牢山国家级自然保护区内常绿阔叶林面积为 34,483 hm²,是目前我国亚热带常绿阔叶林保存面积最大的保护区,其植物种类丰富、区系成分复杂,群落类型多样、垂直带谱完整,过渡性特征明显,是我国现有保存最完好的亚热带常绿阔叶林之一。研究地位于云南省景东县境内的哀牢山国家级自然保护区的试验区内。森林植被类型为原生的亚热带山地常绿阔叶林,主要由壳斗科、茶科、樟科和木兰科的种类组成,而壳斗科的木果柯(*Lithocarpus xylocarpus*)、硬壳柯(*Lithocarpus hancei*)、变色锥(*Castanopsis rufescens*),茶科的南洋木荷(*Schima noronhae*)、折柄茶(*Hartia sinensis*)、蒙自连蕊茶(*Camellia forrestii*),樟科的黄心树(*Machilus bombycina*)、黄丹木姜子(*Litsea elongata*),木兰科的红花木莲(*Manglietia insignis*)、多花含笑(*Michelia floribunda*)是乔木层的主要组成成分,是群落的主要优势树种。该群落结构可分为乔木层(I、II)、灌木层和

草本层。

研究样地位于哀牢山自然保护区试验区的徐家坝地区(北纬 24°32′、东经 101°01′;海拔高度 2400—2600 m)。年平均气温 11.0 °C,最热月(7月)平均气温 15.3 °C,最冷月(1月)平均气温 5.1 °C。一年中干湿季分明,多年平均年降雨量 1881.5 mm,其中雨季(5—10月)为 1607.3 mm(占全年的 85.4%),干季(11—4月)为 274.2 mm(仅占全年的 14.6%)。该地区的土壤为山地黄棕壤,其特征为:地表几乎为植被凋落物所覆盖,厚度一般 3—7 cm;土壤腐殖质呈棕黑色,厚达 10—15 cm;矿质土层质地疏松,以团粒结构为主。表土层透水性良好,涵养水的能力很强;有机质含量较高,含氮量丰富;碳氮比适中,土壤呈酸性(pH < 5);阳离子交换量较高,高于水平地带的黄棕壤。成土母质大体是由古生代板岩、微晶片岩、绿泥片岩、石英片岩、石英岩等组成,风化物粗松,多发育成山地棕壤或黄棕壤。0—30cm 土层土壤偏酸性(pH 为 4.2),有机质含量为 5—9%,土壤有机碳(C, 5.030%, 0.3 m 深的土壤有机碳含量为 36 kg/m²)、氮(N, 0.346%)、磷(P, 0.073%)、钾(K, 0.370%)。

1.2 研究内容

利用设置的土壤增温对森林土壤碳排放影响人工控制实验,采用原地人工控制增温的方式,通过对土壤增温和土壤呼吸自动监测系统实测数据的分析,揭示区域土壤温度和含水量特征和变化规律,及在区域气候变暖情境下土壤温度和含水量特征的响应状况,为分析森林土壤呼吸对区域气候变暖的响应提供基础。

1.3 研究方法—人工控制实验

本研究的人工控制增温实验设置在风速较弱,直接辐射较小的亚热带常绿阔叶林内,采用大型多点自动开闭箱式土壤呼吸自动连续测定方法。共使用了 20 个呼吸箱(长 90 cm × 宽 90 cm × 高 50 cm),设置了对照、增温、切根和去凋 4 种处理(每种处理 5 个重复)。20 个呼吸箱的测定循环为 1 小时,每个呼吸箱的测定时间为 3 分钟(即每个呼吸箱每小时关闭 3 分钟,其余的 57 分钟内其两扇盖子成 90°完全张开,风、雨、枯枝落叶会自由进入呼吸箱,从而保证呼吸箱内的温度,土壤湿度以及凋落物与外界一致)。各个呼吸箱的开闭,空气采样的控制由一个可编程数采(CR1000, Campbell)通过一个多频道采样装置来实现。土壤呼吸的测定方式为闭路式。当呼吸箱关闭后,箱内 CO₂浓度的变化由一台红外 CO₂测定仪(LI-820, Li-Cor)来测定,CR1000 数采每 10 秒钟记录一次数据。另外,各个呼吸箱内的近地层(30 cm)气温和 5 cm 深度的土壤温度由热电偶温传感器,土壤含水量(10 cm)采用 SM300 土壤水分传感器(ΔT 公司,澳大利亚)测定,设置在呼吸箱中部。数据通过一个 62/124 频道数据转换器(NS62/124S, NorthStar, 上海)记录到 CR1000 数采中。本研究模拟未来温度升高 2 °C,增温采用碳素红外辐射器作为人工土壤增温处理的热辐射源。由 45cm 长的碳棒红外辐射器(800 W)和一个宽度为 15 cm 的拱形热反射(防雨)板组成,增温辐射源是固定在呼吸箱上方 2.3 m 处,其辐射面积大于 3 m²,呼吸箱位于辐射中部区域,且使用了透明的有机玻璃箱体,尽可能减小了箱体侧边造成增温死角。在呼吸箱箱体内(中下部)安装 2 个小气扇,左右各 1 个,在采样期间工作,尽量保证箱内气体环境的同质性。因为在野外,尤其是森林内进行增温实验面临发生火灾的风险,所以红外辐射加热器还配备了自动保护系统,在支撑加热器的支架发生大约 60°倾斜时,或受到树木落枝等外力而发生微弱振动时,加热系统会自动断电。

人工控制实验于 2010 年 10 月设置,在 2010 年 12 月底开始实施增温。本研究使用了对照处理(5 个呼吸箱)和增温处理(5 个呼吸箱)的近地层气温、土壤温度(2011—2013 年)和土壤含水量(2012—2013 年)的数据进行分析。

2 研究结果

2.1 亚热带常绿阔叶林土壤温湿度特征及其变化规律

图 1 给出了气温(图 1a)、土壤温度(图 1b)和土壤含水量(图 1c)的时间变化和年变化,可见,不论是对照处理,还是增温处理,控制实验的近地层气温和土壤温度均呈现出相同的变化规律(图 1a, b),干季温度均较

低,雨季均较高,平均温度1月最低,7月最高;土壤含水量(图1c)对照处理和增温处理同样呈现的变化趋势,但是,2—5月均较低,最低值出现在干季末期的4月,8—10月均较高,最高值出现在雨季的8月。

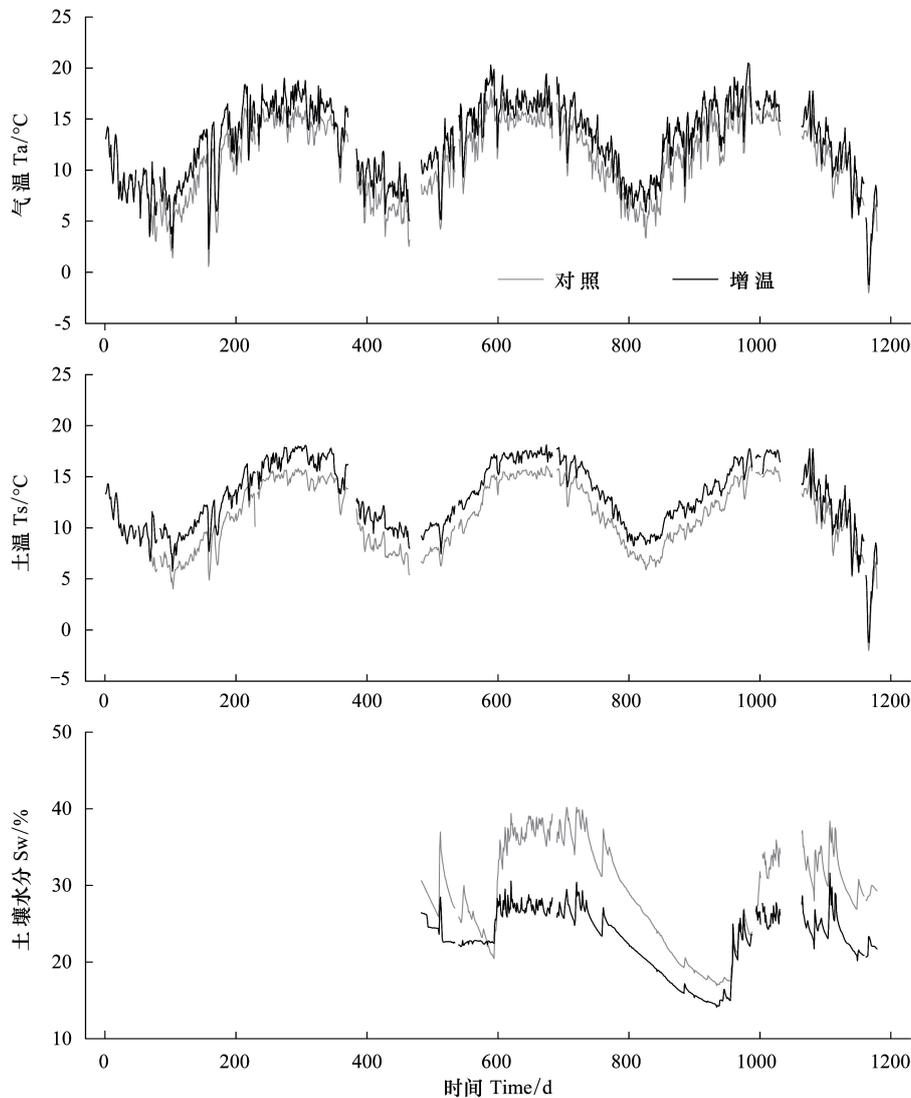


图1 气温、土温和土壤含水量时间变化

Fig. 1 Variations of air temperature, soil temperature and soil water content along time

从对照处理和增温处理的近地层气温、土壤温度和土壤含水量的年、日变化(图2)可见,近地层气温(图Ta-C和Ta-W)不仅年变化明显,日变化也较显著,且最高温度在16时左右,整体上,4—8月的13—19h,近地层气温均较高;不同处理的土壤温度(Ts-C, Ts-W)和土壤含水量(Sw-C, Sw-W),虽然具有明显的年变化(1月最低,7月最高),但日变化不显著。

2.2 亚热带常绿阔叶林土壤温湿度对气候变暖的响应

将增温处理数值减去对照处理可作为增温后近地层气温、土壤温度和湿度对气候变暖的响应。

从图3可见,增温处理呈现明显的效应,近地层气温(ΔTa),在12—4月的增温效应较强,平均气温多高于 2°C ,夜间可达 2.4°C 以上;6—8月增温效应稍弱,昼间在 1.5°C — 1.7°C ,夜间在 1.7°C — 1.9°C ,各月的温差日变化均不大(约为 0.5°C);从土壤温度对温度升高的响应(ΔTs)来看,增温效应冬季高于夏季(1月最高,约为 2.4°C ,7月最低,约为 1.8°C),基本没有日变化;土壤含水量(ΔSw),均显示增温会减小土壤含水量,雨季减少效应较大(9月可减少9%),干季效应较小(干季末期的4月仅减少3%),同样其效应基本没有年变化。

增温效应的平均值的年变化如图4所示,可见,近地层气温和土壤温度的增温效应具有一定的年变化,在

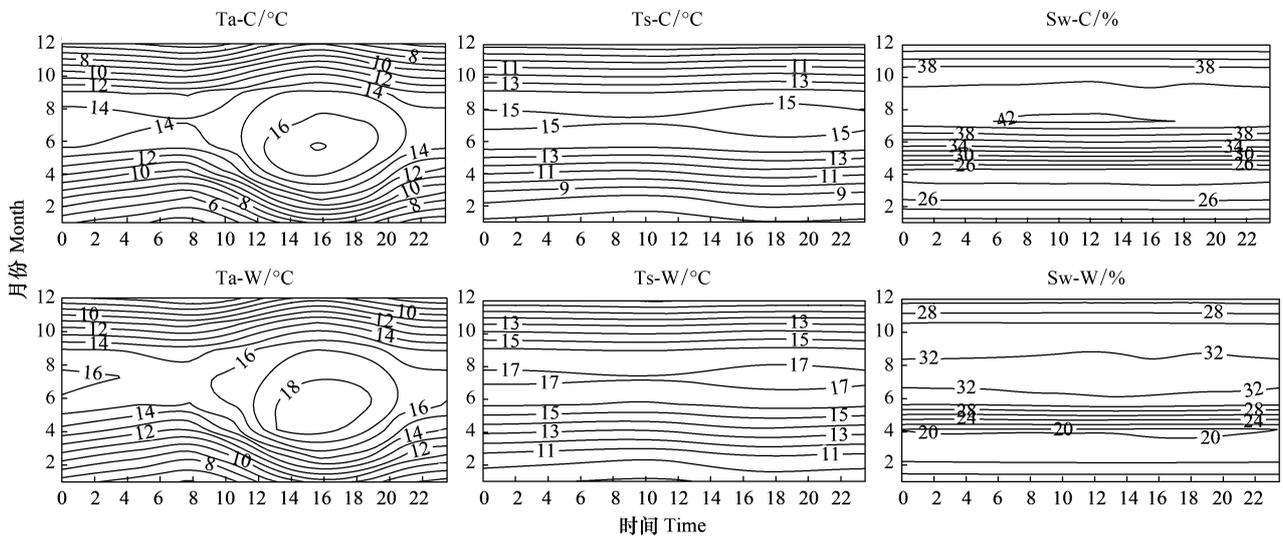


图2 气温,土壤温度和土壤含水量年/日变化

Fig. 2 Yearly/diurnal variations of air temperature, soil temperature and soil water

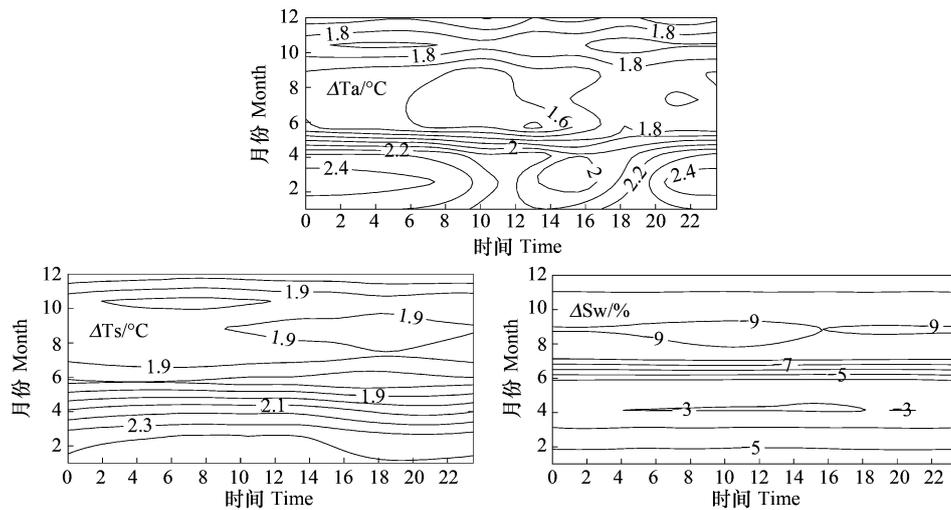


图3 增温效应的年/日变化

Fig. 3 Yearly/diurnal variations of warming effects

1—4月较大(2月最大,分别为2.4 °C和2.5 °C),6—7月较小(6月最小,分别为1.5 °C和1.7 °C),并且多数月份土壤温度的效应大于近地层气温,在8月差异最明显。土壤含水量效应均为负值,显示了温度升高会导致土壤含水量的降低,7—12月减少效应明显(7月降低9%),1—6月减少效应较小,特别是5月仅仅减少了0.7%。

干季、雨季和年平均情况见表1,从增温效应来看(增温-对照),近地层气温和土壤温度增温效应干季的稍大(2.2 °C,2.3 °C),雨季稍低(1.5 °C,1.9 °C),年平均来看,近地层气温升高1.9 °C,土壤温度升高2.1 °C,达到预先设计模拟未来气候变化2.0 °C的要求,能够为

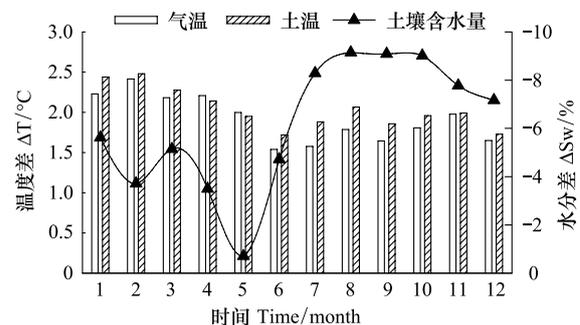


图4 近地层气温、土壤温度和土壤含水量对增温的响应

Fig. 4 Responses of air temperature near soil surface, soil temperature, and soil water content to warming

未来模拟气候升温后的状况提供依据。增温会降低土壤含水量,干季降低 5.5%,雨季降低 6.9%,年平均降低 6.1%。

表 1 不同季节气温、土壤温度和土壤含水量及其增温效应

Table 1 Air temperature (Ta), soil temperature (Ts), soil water content (Sw), and their warming effects in different seasons

	干季 Dry season			雨季 Rainy season			年 Annual		
	气温 Ta/°C	土壤温度 Ts/°C	土壤含水量 Sw/%	气温 Ta/°C	土壤温度 Ts/°C	土壤含水量 Sw/%	气温 Ta/°C	土壤温度 Ts/°C	土壤含水量 Sw/%
对照 CK	8.4±0.08	8.5±0.25	28.9±4.71	14.3±0.09	14.2±0.12	38.0±3.31	11.8±0.09	11.7±0.14	33.5±3.76
增温 Warming	10.6±0.39	10.8±0.33	23.4±3.75	15.8±0.36	16.1±0.27	31.1±3.14	13.7±0.39	13.8±0.31	27.4±3.31
增温效应 Warming effects	2.2	2.3	-5.5	1.5	1.9	-6.9	1.9	2.1	-6.1

3 讨论

目前全球变化研究中未来增温控制在 2.0 °C 是普遍认可的一个标准,本研究的结果显示,所设置的人工增温控制实验的温度年平均增温在 2.0 °C 左右,可以认为,所设置人工控制实验可以达到增温约 2.0 °C 的设计要求,其增温效果好于在川西亚高山人工云杉林使用原位 OTCs 模拟增温方法进行的模拟实验(林下平均气温和平均土壤温度分别比对照提高了 0.42 °C 和 0.25 °C)^[26];并且认为,在风速较弱,直接辐射较小的原始森林内,使用固定式增温方法,所达到的增温效果较稳定,可以避免因为土壤对温度响应的滞后带来的温差变化,同时简化了增温实验。另外,本研究团队利用哀牢山生态站长期观测数据的研究表明,哀牢山亚热带常绿阔叶林的土壤温度呈现较明显的变暖趋势^[16],哀牢山亚热带常绿阔叶林的气温和土壤温度均呈现显著上升的趋势,因此本研究的结果可为其后探讨土壤呼吸对温度升高的响应研究提供良好的基础保证(其分析正在进行中)。并且本研究的结果表明,在未来温度升高的情境下,区域的气温和土壤温度以及土壤含水量的变化特征不会改变。值得注意的是,伴随温度的升高,土壤含水量呈现下降的趋势,且雨季的降低幅度大于干季。本地区的研究表明,土壤呼吸不仅受到土壤温度的影响,还受到土壤含水量的影响^[23]。因此伴随增温导致的土壤含水量降低对土壤呼吸的影响也是下一步研究中需要关注的问题。

4 结论

- (1) 温度升高不会改变林内的近地层气温、土壤温度和土壤含水量的年变化和日变化规律;
- (2) 在设定增温效应为 2.0 °C 的实验条件下,在冬季和夜间增温效应大于夏季和昼间;增温会导致土壤含水量降低,雨季的效应大于干季;
- (3) 增温导致的升温效应和降低土壤水分效应具有一定的年变化,但是基本没有日变化,显示了在风速较弱,直接辐射较小的原始常绿阔叶林内,使用固定式增温方法,所达到的增温效果是较稳定的。
- (4) 所设置的人工增温控制实验的温度年平均增温在 2.0 °C 左右,可以认为,所设置人工控制实验可以达到增温 2.0 °C 的设计要求,可为其后探讨土壤呼吸对温度升高的响应提供良好的基础保证。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. The Scientific Basis Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 1994, 14: 185-190.
- [3] Kauppi P E. New, low estimate for carbon stock in global forest vegetation based on inventory data. *Silva Fennica*, 2003, 37(4): 451-457.
- [4] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8: 315-323.
- [5] Lal R. Soil C sequestration impacts on Global Climatic Change and Food Security. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.

- [6] Kimball B A. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming. *Global Change Biology*, 2005, 11: 2041-2056.
- [7] Kimball B A, Conley M M, Wang S, Lin X, Luo C, Morgan J, Smith D. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology*, 2008, 14: 309-320.
- [8] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. *Ecology Letters*, 2004, 7: 1170-1179.
- [9] Wan S, Hui D, Wallace L, Luo Y. Direct and indirect warming effects on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19: GB2014.
- [10] Xia J, Niu S, Wan S. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing seasons in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2009, 15: 1544-1559.
- [11] Niu S L, Han X G, Ma K P, Wan S Q. Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2007, 31(2): 262-271.
- [12] Han X. Study of Simulated Greenhouse Effects on System Gas Exchange in the *Stipa Breviflora* Griseb. Desert Steppe. 2008, Master Dissertation.
- [13] Liu Y. Distribution characteristics of soil temperature in mid mountain humid evergreen broad-leaved forest in the Ailao Mountain, Yunnan Province. *Scientia silvae sinicae (Chinese Version)*, 1991, 27(6): 639-643.
- [14] Liu Y. Vertical distribution characteristics of soil temperature in the Ailao Mountain. *Meteorological Monthly (Chinese Version)*, 1992, 18(12): 23-26.
- [15] Liu Y. An analysis of the climatic resource of ground temperature in the north part of the Ailao Mountains Yunnan Province. *Journal of natural resources (Chinese Version)*, 1993, 8(2): 158-165.
- [16] You G, Zhang Y, Schaefer D, Sha L, Liu Y, Gong H, Tan Z, Lu Z, Wu C, Xie Y. Observed air/soil temperature trends in open land and understory of a subtropical mountain forest, SW China. *International Journal of Climatology*, 2012, 33: 1308-1316.
- [17] Yu L, Zhang Y, Sha L, Tan Z, Song Q, Zhou W, Wu C. Distribution characteristics of soil temperature within and outside a subtropical evergreen broadleaved forest in Ailao Mountains, Yunnan Province of Southwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(7): 1633-1638.
- [18] Yu L, Zhang Y, Sha L, Song Q, Tan Z, Zhou W, Wu C. Temporal variation pattern and its affecting factors of soil water content in a subtropical evergreen broadleaved forest in Ailao Mountains, Southwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 332-336.
- [19] Gong H, Zhang Y, Lei Y, Liu Y, Yang G, Lu Z. Evergreen broad-leaved forest improves soil water status compared with tea tree plantation in Ailao Mountains, Southwest China. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2011, 61: 384-388.
- [20] Schaefer D, Feng W, Zou X. Plant carbon inputs and environmental factors strongly affect soil respiration in a subtropical forest of southwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1000-1007.
- [21] Feng W, Zou X, Schaefer D. Above-and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of southwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009a, 41: 978-983
- [22] Feng W, Schaefer D A, Li J, Chen J, Zou X. Soil mono- and disaccharides and amino acids as influenced by plant litter and root processes in a subtropical moist forest of Southwest China. *Biogeochemistry*, 2009b, 92: 119-128.
- [23] Feng W T, Zou X M, Sha L Q, Chen J H, Feng Z L, Li J Z. Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(1): 32-39.
- [24] Tan Z H, Zhang Y P, Schaefer D A, Yu G R, Liang N S, Song Q H. An old-growth Asian subtropical evergreen forest as a large carbon sink. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 1548-1554.
- [25] Tan Z H, Zhang Y P, Liang N S, Hsia Y J, Zhang Y J, Zhou G Y, Li Y L, Juang J Y, Chu H S, Yan J H, Yu G R, Sun X M, Song Q H, Cao K F, Schaefer D A, Liu Y H. An observational study of the carbon-sink strength of East Asian subtropical evergreen forests. *Environmental Research Letters*, 2012, 7: 044017.
- [26] PAN Xin-li, LIN Bo, LIU Qing. Effects of elevated temperature on soil organic carbon and soil respiration under subalpine coniferous forest in western Sichuan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (Chinese Version)*, 2008, 19(8): 1637-1643.