

长白山温带阔叶红松林对温湿环境的调节效应

王珮环^{1,2} 陈智^{1,3*} 于贵瑞^{1,3} 王秋凤^{1,3} 贾彦龙² 韩士杰⁴

(¹中国生态系统研究网络综合研究中心/中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ²河北农业大学林学院, 河北保定 071000; ³中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; ⁴河南大学, 河南开封 475001)

摘要 森林具有改善气候、调节微环境的作用, 森林小气候的研究对于揭示森林生态系统功能、评估森林生态环境效益具有重要意义。本研究以长白山阔叶红松林为例, 基于 2003—2014 年林内通量塔气象资料及其附近气象站空旷地的同时段气象资料, 对其最高、最低和平均气温、相对湿度和表层土壤温度的日变化和季节变化进行对比分析。结果表明: 林内气温和相对湿度分别呈现单峰型和 U 型日变化规律, 日较差较林外低 2.31 °C 和 8.3%, 表层土壤温度日变化趋于恒定, 阔叶红松林减缓了温湿度的日变化。夏季主要为降温效应, 冬季表现出显著的增温效应。夏季林内气温和土温比林外低 1.30 和 3.91 °C; 冬季林内气温和土温比林外高 2.06 和 5.44 °C。森林对最高温和最低温的调节效应显著。在季节尺度上, 夏季森林降低最高气温和土温 1.80 和 5.45 °C, 冬季提高最低气温和土温 3.69 和 7.92 °C。在年尺度上, 林内年最高气温和土温分别较林外低 1.60 和 4.99 °C, 年最低气温和土温分别较林外高 1.12 和 8.82 °C。森林对土温的调节效应强于对气温的调节效应。气温和土温均以对低温的保温作用为主。

关键词 气温; 相对湿度; 土壤温度; 长白山; 温带阔叶红松林; 小气候

Regulation effects of temperate broadleaved Korean pine forest on temperature and humidity in Changbai Mountain, China. WANG Pei-huan^{1,2}, CHEN Zhi^{1,3*}, YU Gui-rui^{1,3}, WANG Qiu-feng^{1,3}, JIA Yan-long², HAN Shi-jie⁴ (¹*Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network/Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;* ²*Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei;* ³*College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* ⁴*Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China*).

Abstract: Forests can improve climate and regulate micro-environment. The study of forest microclimate is of great significance to reveal forest ecosystem function and evaluate the benefits of forest ecological environment. With broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain as test material, the diurnal and seasonal variations of the mean, maximum and minimum temperature, relative humidity and surface soil temperature were analyzed based on the meteorological data of flux tower in the forest and nearby meteorological station in the open land from 2003 to 2014. The results showed that air temperature and relative humidity in the forest showed a unimodal U-shaped diurnal pattern, respectively. The diurnal range was 2.31 °C and 8.3% lower than that of the open land. The diurnal surface soil temperature tended to be a constant, indicating an alleviating effects of broadleaved Korean pine forest on the diurnal variation of temperature and moisture. The cooling effect was mainly observed in summer, while the warming effect was significant in winter. The air and soil temperatures in forest in summer were 1.30 and 3.91 °C lower than those in the open land,

本文由国家自然科学基金项目(31600347)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA19020302)和中国科学院大学生创新实践训练计划项目(20184002025)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31600347), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA19020302) and the Undergraduate Innovative Practice Training Program of the Chinese Academy of Sciences (20184002025).

2019-01-31 Received, 2019-03-11 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenz@igsnr.ac.cn

and were 2.06 and 5.44 °C higher than those in the open land in winter. Forest regulated the maximum and minimum temperatures significantly. On the season scale, the maximum air and soil temperature in forest decreased by 1.80 and 5.45 °C in summer, while the minimum air and soil temperature increased by 3.69 and 7.92 °C in winter. On the annual scale, the maximum air and soil temperature in forest were 1.60 and 4.99 °C lower than those in the open land, and the minimum air and soil temperature were 1.12 and 8.82 °C higher than those in the open land, respectively. The regulating effects of forests on soil temperature was stronger than that on air temperature. Forests mainly warmed the air and soil temperature at cold condition.

Key words: temperature; relative humidity; soil temperature; Changbai Mountain; broadleaved Korean pine forest; microclimate.

森林是陆地生态系统的重要组成部分,不仅为人类生产生活提供大量物质资源,更具有重要的气候调节能力^[1].森林通过改变下垫面特征以及林冠的遮挡使太阳辐射、热量和水分等环境要素在林内重新分配,形成独特的森林小气候^[2-3].森林的小气候条件影响植被的光合、呼吸、蒸腾等生理过程,进而影响森林在地-气相互作用及气候变化调节中的作用^[4].深入研究森林小气候调节效应,有助于认识森林生态系统功能对气候变化的响应与反馈,可为森林经营与管理提供理论指导^[5].

自20世纪末,随着气象要素自动观测技术的进步,人们对于森林小气候的认识从定性走向定量.基于在全国不同区域和森林立地建立的气象观测站网,学者们研究了不同森林类型^[6-8]、不同地形^[9]、海拔^[10]、干扰^[11-12]、林隙^[13-14]以及演替阶段^[15]的森林小气候效应.

大量研究证实,森林具有降温 and 增湿效应,并且对温度变幅有缓冲作用^[16-19].然而,不同气候带和不同森林类型的森林小气候调节作用存在差异^[6-8].杜颖等^[20]和孙金伟等^[5]对温带阔叶红松林的研究结果表明,空气温度和土壤温度的日振幅总是林内小于林外,林内气温年较差比空旷地低 6.3 °C.王琛^[16]对暖温带森林小气候的研究表明,森林的降温增湿效应在夏春两季最为明显,林内气温全年低于林外,湿度全年高于林外.徐明洁等^[18]研究指出,中亚热带人工林在夏季表现为极显著的降温作用,而在冬季表现出极显著的保温作用,林内气温和 5 cm 土壤温度多年平均值分别较林外低 0.5 和 3.6 °C.欧阳旭等^[8]指出,南亚热带针阔混交林林内年均气温和地温分别比空旷地低 2.3、4 °C.

现有相关研究多集中于分析比较森林对温湿条件的平均调节作用,较少关注森林对于高温、低温等环境的调节效应.IPCC 第五次气候变化评估报告指出,在气候变化背景下,极端温度事件尤为频发,对

森林物种组成、多样性、生产力和水文循环产生重要影响^[21-23].细化分析森林对高温、低温等的调节效应对于准确评估森林对气候变化的调节与反馈作用具有更重要意义,但目前该方面的定量研究还较少.

长白山阔叶红松林是我国保存最完整的东北林区典型地带性植被,对区域气候、生态平衡有着重要调节作用,也是对全球气候变化响应的敏感区域.前期研究分析了长白山阔叶红松林在不同时间尺度上的平均气候调节状况,但对长白山阔叶红松林的高温、低温等环境调节效应还不清楚.因此,本文以长白山阔叶红松林为研究对象,对比森林内外最高、最低和平均空气温度、相对湿度及土壤温度等气候要素的差异,旨在揭示长白山阔叶红松林对温湿环境的调节效应,为森林生态系统的功能评估和森林保护提供参考依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究林内观测样地位于中国科学院长白山森林生态系统定位站 I 号标准地阔叶红松林内(42°24' N, 128°06' E, 海拔 738 m).该地区属受季风影响的温带大陆性气候,具有显著的中纬度山地气候特征,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽多雾,冬季干燥寒冷.年平均气温 3.6 °C,年平均降水量 695 mm,降水主要集中在 6—8 月,全年日照时数为 2271~2503 h,无霜期 109~141 d.林下土壤为山地暗棕色森林土,地势平坦,林型为成熟原始林,主要建群树种有红松(*Pinus koraiensis*)、椴树(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)和色木槭(*Acer mono*)等,平均树高 26 m.冠下植被高度 0.5~2 m.林外空旷地观测样点位于森林站东南 1 km 处的长白山定位气象观测场,下垫面下木层及枯枝落叶层移除,地表为透骨草(*Phryma leptostachya* var. *asiatica*)和各种苔草

覆盖,高度在 20 cm 以下^[5].

1.2 研究方法

选取 2003—2014 年长白山阔叶红松林林内通量塔及其附近气象站空旷地的同时段气象资料,对两站点的平均、最高和最低的气温、土温、相对湿度等小气候因子的日变化、月变化和逐年变化进行对比分析.林内空气温湿度由安装在 2.5 m 高度的空气温湿度传感器(HMP45C, Vaisala)进行测定.5 cm 处土壤温度利用热电偶传感器(105T, Campbell, USA)进行测定.气象数据通过 CR1000 数据采集器(Campbell Scientific, USA)采集后,计算 30 min 平均值并予以存储.林外空旷地的空气温度、相对湿度和土壤温度由标准气象站的 M520 观测系统进行采集,观测高度为 1.5 m.

1.3 数据处理

采用 Matlab 软件对气象数据进行整理.基于阈值剔除法对通量观测塔观测的气象数据的异常值进行剔除,空气温度的阈值范围为 $-50\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,土壤温度阈值范围为 $-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.对于异常值剔除后的数据,采用线性内插法插补缺失时间小于 2 h 的数据,对于大于 2 h 的缺失数据采用查表法进行插补.计算林内和空旷地空气温度、相对湿度和 5 cm 土壤温度的日、月和年尺度的平均值、最高值和最低值,对比分析森林与空旷地的小气候差异.所有图片均采用 SigmaPlot 14.0 软件进行绘制.

2 结果与分析

2.1 森林对气候因子日变化的调节

2.1.1 空气温度 阔叶红松林林内、外平均气温呈现同步的单峰型日变化曲线(图 1).从 0:00 开始气温逐渐降低,在 5:00 林内、外气温均达到最低,分别为 0.87 和 $-1.00\text{ }^{\circ}\text{C}$.随后气温逐渐上升,在 8:00 林外气温超过林内,在 14:00 和 13:00 林内、外气温达到最高,分别为 9.27 和 $9.70\text{ }^{\circ}\text{C}$,林内比林外低 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$,森林表现出降温作用.之后林内、外气温开始下降,在 15:00 之后曲线出现交点.夜间林内气温高于林外,森林表现出保温作用.林内日较差较林外低 $2.31\text{ }^{\circ}\text{C}$.林内、外温差(林内-林外)呈现 U 型日变化曲线,最大温差出现在 19:00 到次日 5:00($2.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右).夜间(18:00—6:00)温差大于白天(6:00—18:00),分别为 1.88 和 $-0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均温差为 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,整体表现为升温作用.

林内、外最高气温和最低气温呈现与平均气温相似的单峰型日变化曲线(图 1).林内最低气温全

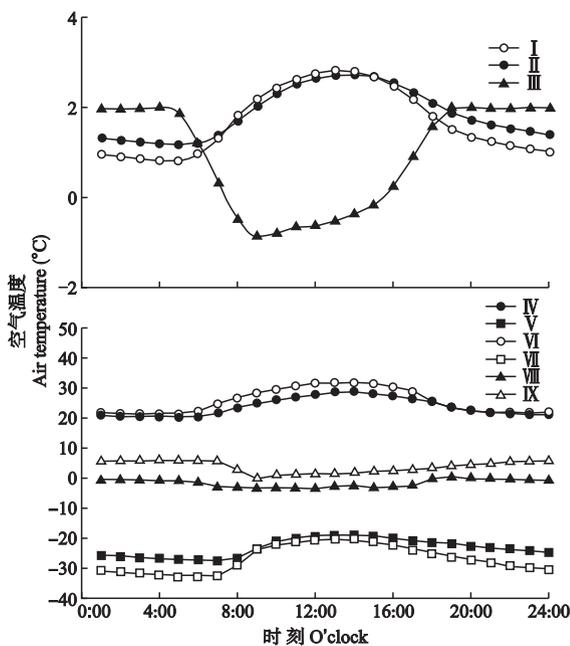


图 1 空气温度的日变化及林内外差异

Fig. 1 Diurnal variations of air temperature and its difference between the forest land and the open land.

I: 空旷地平均值 Average value of the open land; II: 林地平均值 Average value of the forest land; III: 林地内、外平均值的差值 Difference of the average value between the forest land and the open land; IV: 林地最高值 Maximum value of the forest land; V: 林地最低值 Minimum value of the forest land; VI: 空旷地最高值 Maximum value of the open land; VII: 空旷地最低值 Minimum value of the open land; VIII: 林地内、外最高值的差值 Difference of the maximum values between the forest land and the open land; IX: 林地内、外最低值的差值 Difference of the minimum values between the forest land and the open land. 下同 The same below.

天高于林外,林内最高气温几乎全天低于林外,林内最高气温较林外低 $1.90\text{ }^{\circ}\text{C}$,表现出高温降温、低温增温效应.林内最低气温温差在夜间大于白天,分别为 5.08 和 $2.08\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均温差为 $3.66\text{ }^{\circ}\text{C}$,整体表现为保温作用.

2.1.2 5 cm 土壤温度 平均土壤温度(5 cm)的日变化呈现近似轴对称的 S 型曲线,林地土壤温度日变化比较平稳,而林外土壤温度日变化较大(图 2).林内土壤温度稳定在 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,林外土壤温度在 10:00 点最低,为 $3.09\text{ }^{\circ}\text{C}$.在 18:00 点最高,为 $10.42\text{ }^{\circ}\text{C}$,林外的日较差较林内高 $6.61\text{ }^{\circ}\text{C}$.从 14:00 起,林外土壤温度逐渐超过林内,森林表现为降温作用.到 24:00 后,林内土壤温度高于林外,森林表现为保温作用.林内、外土壤温差日变化与林外土壤温度日变化恰好相反,在 14:00 点,温差由正值转变为负值,表明森林由保温作用转变为降温作用.

与平均土温相似,林地最高和最低土壤温度的日变化比较平稳,而林外最高和最低土壤温度变化

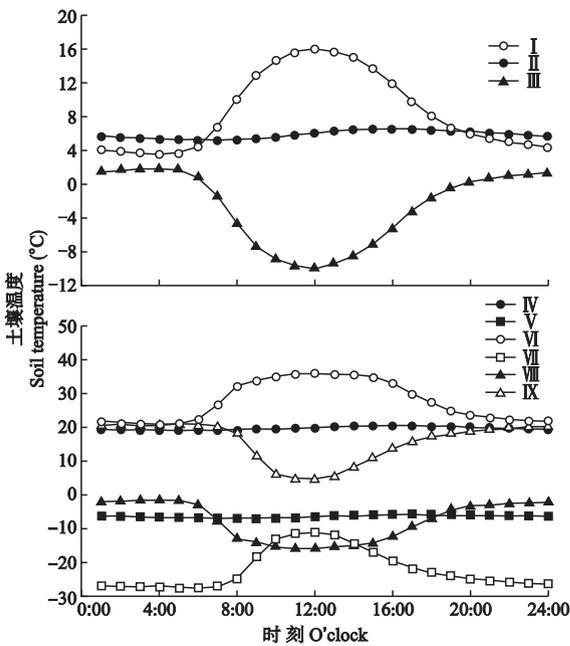


图2 5 cm土壤温度的日变化及林内外差异

Fig.2 Diurnal variations of soil temperature of 5 cm depth and its difference between the forest land and the open land.

较大,林内、外最高和最低土温温差的日变化呈现大致轴对称的S型曲线(图2).林内最高土温全天低于林外,最低土温全天高于林外,表现为对最高温和最低温的缓解效应.在17:00,对最高土温的调节效应最强,林内较林外低12.98℃,在12:00,对最低土温的调节效应最强,林内较林外高11.47℃.林内日均最高土温比林外低5.76℃,日均最低土温比林外高9.28℃.

2.1.3 空气相对湿度 林、内外平均相对湿度呈现U型日变化曲线(图3).相对湿度从0:00开始逐渐升高,林内、外分别在5:00和4:00达到最大值,分别为80.7%和82.3%,林外高于林内.随后林内、外相对湿度逐渐降低,林外的降低幅度大于林内,林内、外相对湿度分别在14:00和13:00降到最低值,分别为53.1%和46.3%,林内比林外高6.7%,表现出白天保湿作用.林内相对湿度日较差比林外低8.3%,日均相对湿度比林外高1.6%.

林内、外最高相对湿度和最低相对湿度日变化平稳,林内、外最高相对湿度均接近100%,最低相对湿度在10%~25%(图3).林内与林外最高相对湿度无显著差异,林内最低相对湿度比林外高1.3%.

2.2 森林对气候因子月变化的调节

2.2.1 空气温度和土壤温度 由图4可以看出,林内、外平均气温的月变化规律一致,1月最低,分别为-13.53和-15.55℃,7月最高,分别为18.05和

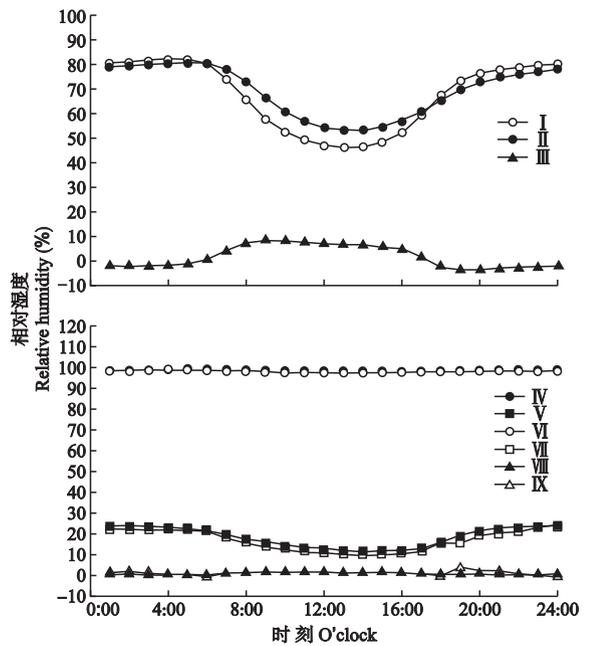


图3 空气相对湿度的日变化及林内外差异

Fig.3 Diurnal variations of air relative humidity and its difference between the forest land and the open land.

19.48℃.2月,林内、外气温差最大,为3.4℃.5—9月的林内气温低于林外,10月—次年4月的林内气温高于林外,表现出夏季降温、冬季保温作用.夏季(6—8月)林内气温比林外低1.30℃,冬季(12月—次年2月)林内气温比林外高2.06℃.林内、外最高气温和最低气温的月变化规律与月均气温大致一致.森林对最高气温的调节在7月最高,林内、外温差达-1.99℃.夏季林内最高气温比林外低1.80℃,比均温温差大1.62℃.森林对最低气温的调节在1月最高,林内、外温差达5.90℃.冬季林内最低气温比林外高3.69℃,与均温温差无显著差异.可见,森林对冬季最低气温的调节作用大于对夏季最高气温的缓解作用.

与气温相似,林内、外的月平均土壤温度表现出1月最低(林内、外分别为-2.56和-8.88℃)、7月最高(林内、外分别为17.54和20.76℃)的月变化规律(图4).1月林内、外温差最大,为6.32℃.4—9月林内土温低于林外,10月—次年3月林内土温高于林外,表现出夏季降温、冬季保温作用.夏季林内土温比林外低3.91℃,冬季林内土温比林外高5.44℃.相对于月平均土温,森林对月最高和最低土温的调节作用更显著.夏季林内最高土温比林外低5.45℃,冬季林内最低土温比林外高7.92℃,森林对冬季土壤最低温的缓解作用更突出.

2.2.2 空气相对湿度 在月尺度上,林内、外相对湿

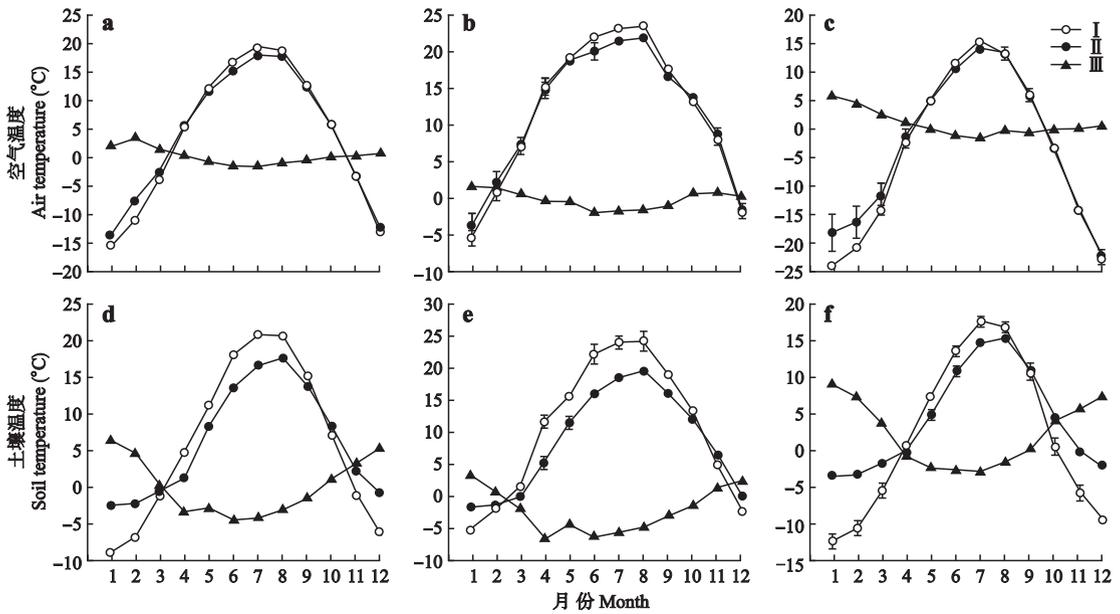


图4 空气温度和土壤温度的月变化规律及林内外差异

Fig.4 Monthly variations of air and soil temperature and its difference between the forest land and the open land.

a) 平均气温 Average value of air temperature; b) 最高气温 Maximum value of air temperature; c) 最低气温 Minimum value of air temperature; d) 平均土温 Average value of soil temperature; e) 最高土温 Maximum value of soil temperature; f) 最低土温 Minimum value of soil temperature.

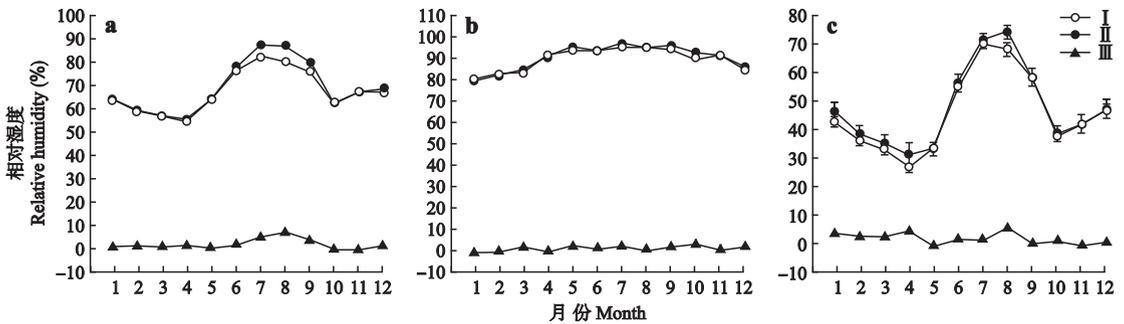


图5 空气相对湿度的月变化及林内外差异

Fig.5 Monthly variations of air relative humidity and its difference between the forest land and the open land.

a) 平均相对湿度 Average value of relative humidity; b) 最高相对湿度 Maximum value of relative humidity; c) 最低相对湿度 Minimum value of relative humidity.

度从1月开始下降,在4月达到最小值,分别为55.6%和54.4%,之后开始上升,7月达到最大(87.2%、82.5%),随后下降,在10月降到另一低值(62.2%、62.4%)(图5).相对湿度几乎全年林内高于林外,表现出保湿作用.夏季林内相对湿度较林外高4.3%.

林内、外最低相对湿度的月变化明显,均在4月最低(31.3%和26.9%),在8月和7月达到最高值,分别为74.3%和70.2%,林内、外月最高值与最低值的差分别达43.0%和43.4%.林内、外的最高相对湿度在80%~100%,林内、外月最高值与最低值的差小于20%.与月均相对湿度相比,月最高和最低相对湿度在林内与林外之间无明显差异,森林对高湿和

低湿的气候调节效应不明显.

2.3 森林对年均气候因子的调节

由表1可以看出,阔叶红松林林内的年均气温比空旷地高0.02℃,土温比空旷地高0.09℃,相对湿度比空旷地高1.7%.在年均尺度上,森林对相对湿度的调节效应明显.

在对最高温度的调节上,林内、外年均最高气温分别为22.52和24.12℃,林内比空旷地低1.60℃.林内、外年均最高土温分别为19.62和24.61℃,林内比空旷地低4.99℃,表现出显著的高温降温作用.

在对最低温度的调节上,林内、外年均最低气温分别为-23.63和-24.75℃,林内比空旷地高1.12℃.

表 1 温带阔叶红松林林外与林内的年均、最高、最低空气温度、相对湿度和土壤温度的比较

Table 1 Comparisons of the mean, maximum and minimum air temperature, relative humidity, and soil temperature outside and inside the temperate broadleaved Korean pine forest

项目 Item	年份 Year	空气温度 Air temperature (°C)			土壤温度 Soil temperature (°C)			相对湿度 Relative humidity (%)		
		林内 Forest land	林外 Open land	差值 Difference	林内 Forest land	林外 Open land	差值 Difference	林内 Forest land	林外 Open land	差值 Difference
平均值 Average	2003—2006	3.65	3.76	-0.11	6.36	6.10	0.27	68.1	69.2	-1.1
	2007—2010	3.66	3.99	-0.33	5.99	6.21	-0.22	68.5	66.8	1.7
	2011—2014	3.94	3.45	0.49				70.1	67.2	2.9
	2003—2014	3.75	3.73	0.02	6.24	6.15	0.09	68.5	66.8	1.7
最高值 Maximum value	2003—2006	23.25	24.12	-0.88	19.84	23.40	-3.56	98.8	98.4	0.4
	2007—2010	23.06	24.25	-1.19	19.18	25.82	-6.64	97.6	95.6	1.9
	2011—2014	21.27	23.98	-2.71				96.9	97.0	-0.1
	2003—2014	22.52	24.12	-1.60	19.62	24.61	-4.99	97.8	97.0	0.8
最低值 Minimum value	2003—2006	-24.76	-24.67	-0.09	-3.84	-11.53	7.70	23.8	25.2	-1.4
	2007—2010	-22.93	-24.36	1.43	-3.75	-12.66	8.91	25.3	24.3	0.9
	2011—2014	-23.22	-25.22	2.00				27.6	27.1	0.5
	2003—2014	-23.63	-24.75	1.12	-3.73	-12.55	8.82	25.6	25.5	0.1

林内、外年均最低土温分别为 -3.73 和 -12.55 °C,林内比空旷地高 8.82 °C,表现出显著的低温保温作用.整体可以看出,森林对土温的调节效应强于对气温的调节效应.土温主要表现为对低温的保温作用,气温主要表现为对高温的降温作用.对林内、外温湿度多年数据的分段分析可见,长白山阔叶红松林对空气和土壤最高温和最低温的调节效应呈逐渐增强趋势(表1).

3 讨 论

长白山温带阔叶红松林林内年均气温和土温比空旷地分别高 0.02 和 0.09 °C,年均相对湿度比空旷地高 1.7% .研究区阔叶红松林在年尺度上表现出增气温、保土温、增湿度的小气候调节效应.与其他气候带森林相比,该调节作用小于热带和亚热带森林.前期的研究指出,中亚热带人工林林内年均气温和土壤温度分别较林外低 0.5 和 3.6 °C^[18].南亚热带针阔混交林林内年均气温和地温分别比林外低 2.3 和 4 °C^[8].温带森林对年尺度气候因子的弱调节效应可能与其夏季降温作用与冬季增温作用相互抵消效应相关^[1,5,25-26].本研究结果表明,长白山温带阔叶红松林夏季林内气温和土温分别比林外低 1.30 和 3.91 °C,而冬季林内气温和土温比林外高 2.06 和 5.44 °C.夏季表现出降温效应,冬季主要为增温效应.因此,在冬季低温环境下森林表现出保温效应,在年尺度上,一定程度抵消了森林在高温季节表现出的降温效应.

本研究表明,阔叶红松林对最高温和最低温的

调节效应显著.在季节尺度上,森林在夏季可降低最高气温和土温 1.80 和 5.45 °C,在冬季可提高最低气温 3.69 和 7.92 °C.在年尺度上,年最高气温和土温林内分别较林外低 1.60 和 4.99 °C,林内的年最低气温和土温分别较林外高 1.12 和 8.82 °C.这一调节效应与亚热带人工林的研究^[18]相比,对最高和最低气温的调节作用与亚热带人工林相当.在对最高土壤温度的调节作用上小于亚热带人工林,这可能与亚热带森林所处的更炎热的气候条件有关^[18].亚热带人工林最高土壤温度可达 50 °C,是温带阔叶红松林最高土壤温度(25 °C左右)的 2 倍.然而,温带阔叶红松林对最低土壤温度的调节作用显著高于亚热带人工林,表现出对低温环境下土壤温度的显著保温作用.这可能是由于长白山地区冬季寒冷有积雪,积雪具有较高的绝热能力,较大程度地阻隔了土壤热量的散失,因此对土壤温度的变化有很好的保温作用和缓冲作用^[27].长白山阔叶红松林对最低土温的显著调节效应,可有效地减小低温冻害对林下动植物和土壤微生物的不良影响.

4 结 语

本研究通过对长白山温带阔叶红松林连续 12 年的气温、土温和相对湿度观测数据的分析发现,长白山温带阔叶红松林对最高、最低和平均温湿环境具有不同程度的调节作用.在日尺度上,森林对气温和土温的调节较为相似,均呈现单峰U型日变化规律.森林对平均气温表现出夜晚升温、白天降温的调节作用,在对最低气温的调节中最为显著.森林对土

温的调节效应与气温相似,但是调节幅度更大.林内、外最高和最低相对湿度无显著差异.在月尺度上,森林对冬季的最低气温和土温的调节作用大于对夏季的最高气温和土温的调节作用.长白山温带阔叶红松林可降低最高土温 4.99 °C、提高最低土温 8.82 °C,高于对气温和相对湿度的调节作用.同时,森林对最高和最低的气温和土温的调节作用显著高于对全年均值的调节,这可能是由于夏季降温与冬季增温对全年均值的抵消效应.总体来说,长白山温带阔叶红松林对最高温和最低温的调节效应显著,对土温的调节效应强于对气温的调节效应,两者均以对低温的保温作用为主,对相对湿度的调节不明显.

参考文献

- [1] Li Y, Zhao M, Motesharrei S, *et al.* Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 2015, **6**: 6603
- [2] He Q-T (贺庆棠). *China Forest Meteorology*. Beijing: China Forestry Press, 2001 (in Chinese)
- [3] Tan Z-H (谭正红), Yu G-R (于贵瑞), Zhou G-Y (周国逸), *et al.* Microclimate of forests across East Asia biomes: 1. Radiation and energy balance. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2015, **39** (6): 541-553 (in Chinese)
- [4] Yang Y-L (杨亚丽), Ren C-Y (任传友), Wang Y-H (王艳华), *et al.* Vertical gradient variations of temperature and vapor pressure in temperate coniferous and broad-leaved mixed forest. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2016, **37**(1): 11-18 (in Chinese)
- [5] Sun J-W (孙金伟), Wu J-B (吴家兵), Guan D-X (关德新), *et al.* A longterm observation on the air temperature, relative humidity, and soil temperature in a mixed forest and its adjacent open site in Changbai Mountains of Northeast China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2011, **30**(12): 2685-2691 (in Chinese)
- [6] Zhang Y-P (张一平), Liu Y-H (刘玉洪), Ma Y-X (马友鑫), *et al.* A preliminary study on microclimate in the process of the different growth phases of tropical forest. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Science) (南京林业大学学报:自然科学版), 2002, **26**(1): 83-87 (in Chinese)
- [7] Wu J-B (吴家兵), Guan D-X (关德新), Dai L-M (代力民), *et al.* Summer temperature characteristics of broadleaved *Pinus koraiensis* forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2002, **21**(5): 14-17 (in Chinese)
- [8] Ouyang X (欧阳旭), Li Y-L (李跃林), Zhang Q-M (张倩媚). Characteristics of microclimate in a mixed coniferous and broadleaf forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2014, **33**(3): 575-582 (in Chinese)
- [9] Chen JQ, Saunders SC, Crow TR, *et al.* Microclimate in forest ecosystem and landscape ecology. *BioScience*, 1999, **49**: 288-289
- [10] Xiao J-X (肖金香), Fang Y-T (方运霆). Studies on variation characteristics of forest microclimate in Matoushan nature reserve in Zixi County. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2003, **25** (5): 661-665 (in Chinese)
- [11] Zhao Y-G (赵勇刚), Gao K-S (高克姝). Microclimate and seeding cultivation after clear-cutting of *Picea* and *Abies*. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1989, **11**(1): 104-108 (in Chinese)
- [12] Mi H-Z (弥宏卓), Zhang Q-L (张秋良), Xu B-Q (徐步强), *et al.* Research of microclimatic characters of *Larix gmelinii* forest that under different disturbances. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (Natural Science) (内蒙古农业大学学报:自然科学版), 2011, **32**(3): 67-70 (in Chinese)
- [13] Duan W-B (段文标), Du S (杜 珊), Chen L-X (陈立新), *et al.* Effects of forest gap size and uprooted microsite on the microclimate in *Pinus koraiensis* dominated broadleaved mixed forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24** (8): 2097-2105 (in Chinese)
- [14] Feng J (冯 静), Duan W-B (段文标), Chen L-X (陈立新), *et al.* Effects of forest gap size and within-gap position on the microclimate in *Pinus koraiensis* dominated broadleaved mixed forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23** (7): 1758-1766 (in Chinese)
- [15] Liu X-D (刘效东), Zhou G-Y (周国逸), Chen X-Z (陈修治), *et al.* Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(10): 2755-2764 (in Chinese)
- [16] Wang C (王 琛). Research of Microclimatic Characteristics of Forest in Beijing: Take Miaofeng Mountain For example. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2010 (in Chinese)
- [17] Hannah DM, Malcolm IA, Soulsby C, *et al.* A comparison of forest and moorland stream microclimate, heat exchanges and thermal dynamics. *Hydrological Processes*, 2008, **22**: 919-940
- [18] Xu M-J (徐明洁), Zhang T (张 涛), Sun Y (孙 怡), *et al.* The regulating effects of a coniferous plantation on the temperatures and humidity in Qianyanzhou station. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2018, **37**(11): 3245-3254 (in Chinese)
- [19] Gaudio N, Gendre X, Saudreau M, *et al.* Impact of tree canopy on thermal and radiative microclimates in a mixed temperate forest: A new statistical method to analyse hourly temporal dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **s237-238**: 71-79
- [20] Du Y (杜 颖), Guan D-X (关德新), Yin H (殷红), *et al.* Temperature effect of broad leaved-Korean

- pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26**(6): 787-792 (in Chinese)
- [21] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, *et al.* Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, **437**: 529-533
- [22] Choat B, Brodribb TJ, Brodersen CR, *et al.* Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 2018, **558**: 531-539
- [23] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, *et al.* Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 2013, **500**: 287-295
- [24] Montwe D, Isaac-Renton M, Hamann A, *et al.* Cold adaptation recorded in tree rings highlights risks associated with climate change and assisted migration. *Nature Communications*, 2018, **9**:1574
- [25] Yang W-R (杨文睿). Study on Micro-climate Characteristics of North Subtropical Secondary Oak Forests. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009 (in Chinese)
- [26] Wang X (王霞), Li Y-T (李永涛), Wei H-X (魏海霞), *et al.* Spatial temporal variation process of microclimate characteristics of *Fraxinus chinensis* plantation in the Yellow River Delta. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2017, **45**(4): 60-64 (in Chinese)
- [27] Yu X-Z (于小舟), Yuan F-H (袁凤辉), Wang A-Z (王安志), *et al.* Effects of snow cover on soil temperature in broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(12): 3015-3020 (in Chinese)

作者简介 王珮环,女,1998年生,学士.主要从事生态学研究.E-mail: 15131211836@163.com

责任编辑 杨弘
