

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.025.

高原, 史海静, 丁成琴, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林温湿度缓冲效应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 175-183.

GAO Yuan, SHI Haijing, DING Chengqin, et al. Buffering Effect of Artificial *Robinia pseudoacacia* Forest on Temperature and Humidity in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 175-183.

黄土丘陵区人工刺槐林温湿度缓冲效应

高原^{1,2,3}, 史海静^{1,2}, 丁成琴⁴, 郑诚⁵, 姜艳敏^{1,2}, 张艳^{1,2,3}

(1.中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049;

4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:[目的]研究黄土丘陵区人工刺槐林对环境温湿度的缓冲效应,探究不同时间尺度林带对环境气候的缓冲特点以及森林小气候效应与环境因素之间的关系,为黄土丘陵区的群落构建和植被恢复提供参考依据。[方法]选取该区域同年建立的人工刺槐林和林外空旷地为研究对象,对气温、地表温度、土壤温度和空气相对湿度进行为期一年的连续监测,量化不同时间尺度人工刺槐林的温湿度缓冲效应。[结果]林内气温、地表温度、土壤温度和相对湿度年均值分别低于林外0.13℃, 0.99℃, 0.92℃和0.16%。在一天中的14:00—16:00时段,林内气温、地表温度和土壤温度分别低于林外1.08℃, 4.17℃和1.88℃,相对湿度高于林外2.72%;在5:00—7:00时段,林内气温和地表温度分别高于林外0.45℃和0.58℃,相对湿度低于林外1.80%。最热月(7月)林内气温、地表温度和土壤温度分别低于林外0.76℃, 2.17℃和3.29℃,相对湿度高于林外1.67%;最冷月(1月)林内气温和土壤温度分别高于林外0.28℃和0.87℃,地表温度低于林外0.20℃,相对湿度低于林外1.16%。人工刺槐林的缓冲效应随环境气候变化表现不同,当林外气温、地表温度、土壤温度分别高于16.70℃, 9.89℃和1.43℃时,人工刺槐林表现为降温作用,低于该温度则表现为升温作用;温度和缓冲值之间为一元三次方程关系,随着温度升高或降低,缓冲值的绝对值增大速率加快。[结论]在人工刺槐林温湿度缓冲效应影响下,林内温湿度比林外更加稳定,形成了优于林外环境气候的独特小气候。

关键词:温度;湿度;人工刺槐林;温湿度缓冲效应

中图分类号:S716

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)05-0175-09

Buffering Effect of Artificial *Robinia pseudoacacia* Forest on Temperature and Humidity in Loess Hilly Region

GAO Yuan^{1,2,3}, SHI Haijing^{1,2}, DING Chengqin⁴,

ZHENG Cheng⁵, JIANG Yanmin^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2,3}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:[Objective] The buffering effect of artificial *R. pseudoacacia* forest on environmental temperature and humidity in the loess hilly area was studied, and the buffering characteristics of forest belts on environmental climate at different time scales and the relationship between forest microclimate effect and environmental factors were explored, so as to provide reference for community construction and vegetation restoration in the loess hilly area. [Methods] The artificial *R. pseudoacacia* forest planted in the same year in this area was taken as an example, and air temperature (T_a), near surface temperature (T_{ns}), soil temperature

收稿日期:2022-04-18

修回日期:2022-06-08

资助项目:西部青年学者项目(XAB2020YN04);中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040202);国家自然科学基金项目(41501055);国家科技基础条件平台建设项目(2005DKA32300)

第一作者:高原(1997—),男,山东济南人,硕士生,主要从事水土保持监测和植被恢复的研究。E-mail:gaoyuan201@mailsucas.ac.cn

通信作者:史海静(1983—),女,陕西扶风人,博士,副研究员,主要从事水土保持与科研信息化的研究。E-mail:shihaijingen@nwfau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

(T_s) and air relative humidity (RH) inside and outside of the forest continuously for a whole year were measured. The climate buffering effects of artificial *R. pseudoacacia* forests at different time scales were quantified. [Results] The annual average T_a , T_{ns} , T_s and RH in the forest were lower by 0.13°C, 0.99°C, 0.92°C and 0.16%, respectively, than those outside of the forest. During 14:00 to 16:00 of a day, the T_a , T_{ns} and T_s inside of the forest were 1.08°C, 4.17°C and 1.88°C lower, respectively, than those outside of the forest, while the RH of air was 2.72% higher. During 5:00 to 7:00, the T_a and T_{ns} inside of forest were 0.45°C and 0.58°C higher than those outside of forest, respectively, and the RH was 1.80% lower than that outside of forest. The T_a , T_{ns} and T_s inside of forest were lower by 0.76°C, 2.17°C and 3.29°C than those outside of the forest in July, respectively, and the RH was higher by 1.67%, than that outside of the forest in July. In January, when extreme low temperature occurred, the T_a and T_s in the forest were 0.28°C and 0.87°C higher, T_{ns} was 0.20°C lower than those outside the forest, respectively, and RH was 1.16% lower than that outside the forest. The buffering effect of artificial *R. pseudoacacia* forest varied with change of environmental climate. When the T_a , T_{ns} and T_s outside the forest were higher than 16.70°C, 9.89°C and 1.43°C respectively, the buffering value was positive (inside the forest was warmer than outside), while they were lower than those, the buffering value was negative. The relationship between temperature and buffering value was cubic. With the increase or decrease of temperature, the absolute value of buffering value increased at a faster rate. [Conclusion] The temperature and humidity in the forest were more stable than that those outside the forest with the buffering effect of artificial *R. pseudoacacia* forest, forming a unique microclimate superior to the environmental climate outside the forest.

Keywords: temperature; humidity; artificial *R. pseudoacacia* forest; buffering effect on temperature and humidity

气候在微观尺度的变化受地形和植被覆盖影响^[1]。由植被对环境气候缓冲形成的特殊局部林下气候称为森林小气候^[2]。由于森林的存在,下垫面的特征发生改变,太阳辐射、水热等重新分配,因此林地内的温度和湿度与林外空旷地具有明显的差异^[3-4]。主要表现为林内冬暖夏凉、夜暖昼凉、温度日较差较小、日间湿度增大、风速减小、辐射降低等特点^[5-7]。小气候作为影响植被群落的主要环境特征之一,是植物群落与环境相互作用的结果^[8],其本身也会影响生态系统的结构与功能。研究森林小气候的形成机制以及特征,对于进一步实现群落构建和生态恢复具有重要意义。

森林小气候系统性研究的快速发展时期始于20世纪中叶,各国建立了长期定位观测站,并借助更加先进的仪器,扩大了小气候观测的空间和时间范围^[5]。自20世纪90年代末以来,我国学者借助气象要素自动观测技术、3S技术和生态系统定位研究网络,更好地实现了大范围尺度的森林小气候定量研究^[9-10]。众多研究结果表明,由于森林自身特点和所处时段不同,林下小气候特点不尽相同^[8,11-12]。孙金伟等^[6]研究表明长白山阔叶红松林在生长季对温度和湿度的调节作用明显,在非生长季则不明显。张一平等^[8]研究表明,热带森林在不同生长期(林窗期、建群期、成熟期)降温增湿作用各不相同,小气候要素也

存在差异。Li等^[13]在全球尺度上研究了森林的温度调节作用,结果表明,在热带、温带和寒温带表现有所不同。杨铭伦等^[14]研究了不同海拔高度层次的小气候梯度特征,结果表明,近地面1.5 m气温显著低于40~70 m气温,土壤温度日较差和年较差随深度增加逐渐变小。

陕北黄土丘陵地区由南向北横跨森林区、森林草原区和草原区,植被分布具有很好的代表性^[15-16]。自20世纪末以来,黄土高原开展了大规模的退耕还林还草工程。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)因生长快、易繁殖等优势成为黄土高原地区退耕还林、水土保持的先锋树种^[16-17],在黄土高原地区广泛种植。人工林发挥多种生态效益,形成具有独特物质、营养条件的不同于区域气候的小气候环境,这种小气候环境影响人工林群落结构的组成及物种类型的多样性,同时可为物种提供天然的“避难所”^[18-19]。

目前对该区人工刺槐林的研究多集中于水土保持、涵养水源、改良土壤等^[20]方面,尚缺乏对植被与小气候关系的全面认识。在现有研究当中,定点监测研究多为小范围短期观测^[21-22],由于监测时间短,无法反映区域温湿度的长期变化特点以及人工林在不同时间尺度和温湿度条件下对气候缓冲的规律。大范围长期的研究多基于遥感数据^[23-24],限于遥感数据自身的特点,难以反映森林内部不同高度层次的气候条件。为此,本文以

陕北黄土丘陵区退耕还林种植的人工刺槐林为研究对象,针对森林小气候和环境气候之间的差异,在不同的时间尺度上研究林带缓冲环境气候的特点,并探究森林小气候效应与环境因素之间的关系,旨在揭示黄土丘陵区人工刺槐林温湿度缓冲效应的规律,为该区的群落构建和植被恢复提供参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区选在陕北黄土高原延河流域。延河是黄河的一级支流,发源于陕西省靖边县天赐湾乡,流经志丹县、安塞县和延安市等地区,于延长县南河沟乡注入黄河。延河流域地处陕北黄土高原中部,地理位置位于36°21′00″—37°19′00″N,108°38′00″—110°29′00″E,包括安塞、延长、宝塔三县(区)主体以及志丹、靖边两县部分地区,流域总面积 7 725 km²。延河流域内地表破碎,梁、峁状地带占该流域总面积的约 80%,流域内年平均气温 8.80~10.20℃,四季分明,高温集中于 6 月—8 月份,低温集中于 12—2 月份,年平均降水量为 520 mm,雨热同期,集中于夏季,秋季次之,春季较少,冬季有少量降雪。

延河流域是东南季风气候区与西北内陆气候区的交界地带,自东南向西北降水量逐渐减少,温度降低,植被分布呈现明显的地带性规律,横跨森林区、森林草原区和草原区,但因过去强烈的人类活动影响,该区自然植被破坏严重,水土流失剧烈,因而该区也是黄土高原水土保持与生态恢复重建的关键区域^[25]。

1.2 研究方法

在延河流域内,根据“代表性、典型性和一致性”原则,选取多个退耕还林种植的刺槐林采样点。为研究刺槐对环境温湿度的缓冲作用,在各采样点内,选取退耕年限相近且生长状况良好的刺槐林地,并在林外不受刺槐林荫蔽影响的开阔地带,选取具有相同坡向(阳坡)和坡位(坡上位)的对照样点,共测定刺槐样地 12 个,参照样地 12 个(图 1)。

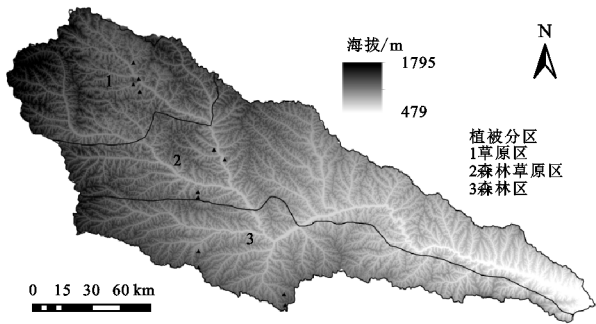


图 1 植被分区和采样点位置

数据采集装置选用微型温湿度记录仪(iButtons DS1923)。选取直径 10 cm、高 10 cm、厚度 1 mm 且侧面有多个圆形通风口的白色圆柱体 PVC 容器,将记录仪悬挂在容器中心位置,不与容器接触。容器能够防止记录仪被太阳直射,并保证空气流通。选用长度约 1.5 m 的 PVC 管,将 3 个容器分别固定于 PVC 管的顶部和底部(顶部一个、底部两个),使其保持在一条轴线上。分别在林内和林外将 PVC 管底部下端的容器埋于土壤中,使 3 个记录仪保持垂直,分别处在地上 1.5 m、地表 5 cm 和地下 5 cm 的高度,用来记录空气、地表、土壤的温度和 1.5 m 处的空气相对湿度。记录仪以 8 位或 16 位格式在 8 KB 数据记录存储器中保存数据,数字温度计以 8 位(0.5℃)或 11 位(0.062 5℃)分辨率测量温度,−10~65℃范围内的温度精度优于±0.5℃。内置湿度传感器实现温度与湿度的同步记录,每个传感器被设定为同时启动,测定时间间隔为 1 h,测定时间段为 2016 年 7 月 26 日—2017 年 7 月 26 日。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2019 和 R 对气象数据进行整理,排除因仪器故障造成的异常数据,选择数据保留完好的片段,采用线性内插法和查表法插补因异常排除的数据,用相同方法插补仪器更换间隔的缺失数据。

计算不同时间尺度林内外温湿度均值、最值;为了更好地研究林带对极端温度的缓冲作用,我们选取温度最值的第 95 和第 5 百分位作为极端温度,并用温湿度日较差和标准差表示其变幅,来衡量温湿度变化的稳定性^[26](表 1)。

表 1 参数和说明

| 参数 | 说明 |
|-------------|--|
| 温度/相对湿度日均值 | 温度/相对湿度在同一观测日(24 h)的算术平均值 |
| 极端高温/低温 | 同一观测日温度最值的 95/5 分位数 |
| 某时刻的温度/相对湿度 | 某时刻所有观测日(366day)温度/相对湿度的算术平均值 |
| 温度/相对湿度变幅 | 温度/相对湿度日较差;温度/相对湿度标准差 |
| 温度/相对湿度缓冲值 | $\Delta T = T_{\text{林外}} - T_{\text{林内}}$, $\Delta RH = RH_{\text{林外}} - RH_{\text{林内}}$ |

将数据在 Excel 2019 中进行进一步整理,导入 SPSS 25.0 进行描述统计、成对样本 t 检验、方差分析(ANOVA)、多重比较(Duncan)和曲线估算,运用 Origin 2022 绘制图像。统计结果表示形式为均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 年尺度温湿变化和缓冲效应量化

由图2可以看出,林内外的气温、地表温度和土壤温度均具有相似的变化趋势,表现为两端高中间低的“谷”状。高温季节为6—8月,林外和林内气温、地表温度和土壤温度极端高温分别为:43.05℃(2017年7月10日)和39.10℃(2017年7月12日);49.25℃(2017年7月10日)和40.0℃(2017年7月12日);37.13℃(2016年8月12日)和31.92℃(2016年9月4日)。低温季节为12—2月,林外和林内气温、地表温度和土壤温度极端低温分别为-19.72℃(2017年1月20日)和-18.81℃(2017年1月20日);-19.75℃(2017年1月20日)和-18.20℃(2017年1月20日);-6.72℃(2017年1月20日)和-4.55℃(2017年1月20日)。相对湿度的均值全年集中于30.00%~80.00%,夏秋两季湿度较高,冬春较低,林内外最高相对湿度均接近100.00%,最低相对湿度集中在10.00%~25.00%。

人工刺槐林具有明显的温湿度缓冲效应,当林外极端高温出现时,同时期林内气温、地表温度和土壤温度分别低于林外5.95℃,16.21℃,9.54℃;当林外极端低温出现时,同时期林内气温、地表温度和土壤温度分别高于林外2.33℃,4.00℃,2.12℃。

由表2可知,高温季节,人工刺槐林对气温和土壤温度的缓冲效应表现为正缓冲:2016年7—10月以及2017年5—7月,林内气温月均值分别低于林外0.77℃,0.72℃,0.35℃,0.07℃,0.18℃,0.58℃,0.75℃;2016年7—10月以及2017年4—7月,林内土壤温度月均值分别低于林外3.72℃,3.39℃,2.11℃,0.48℃,0.41℃,2.02℃,2.99℃,2.86℃。低温季节则表现为升温作用:2016年11—2017年4月,林内气温月均值分别高于林外0.18℃,0.10℃,0.28℃,0.14℃,0.19℃,0.29℃;2016年11—次年3月,林内土壤温度月均值分别高于林外0.91℃,0.91℃,0.87℃,0.80℃,0.10℃。人工刺槐林对地表温度的缓冲作用全年主要表现为降温作用,高温季节明显,低温季节该效应降低,2016年7月—2017年7月分别低于林外2.19℃,2.82℃,1.32℃,0.54℃,0.03℃,0.15℃,0.20℃,0.21℃,0.48℃,0.31℃,1.27℃,2.22℃,2.15℃。

在高温夏季,林内相对湿度的月均值高于林外;2016年7—8月,林内相对湿度的月均值分别高于林外2.75%和2.29%,2017年7—8月,林内相对湿度的月均值分别高于林外0.59%和1.01%;在2016年9月—次年5月(除2016年10月),林内相对湿度月

均值均低于林外,其中1月差值最大,林内相对湿度低于林外1.16%。

表2 逐月温湿度缓冲值

| 月份 | $\Delta T_a/^\circ\text{C}$ | $\Delta T_{ns}/^\circ\text{C}$ | $\Delta T_s/^\circ\text{C}$ | $\Delta \text{RH}/\%$ |
|-----|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 7月 | 0.77 | 2.19 | 3.72 | -2.75 |
| 8月 | 0.72 | 2.82 | 3.39 | -2.29 |
| 9月 | 0.35 | 1.32 | 2.11 | 0.19 |
| 10月 | 0.07 | 0.54 | 0.48 | -0.21 |
| 11月 | -0.18 | 0.03 | -0.91 | 1.18 |
| 12月 | -0.10 | 0.15 | -0.91 | 0.73 |
| 1月 | -0.28 | 0.20 | -0.87 | 1.16 |
| 2月 | -0.14 | 0.21 | -0.80 | 0.77 |
| 3月 | -0.19 | 0.48 | -0.10 | 0.99 |
| 4月 | -0.29 | 0.31 | 0.41 | 1.02 |
| 5月 | 0.18 | 1.27 | 2.02 | 0.45 |
| 6月 | 0.58 | 2.22 | 2.99 | -0.59 |
| 7月 | 0.75 | 2.15 | 2.86 | -1.01 |

2.2 日尺度温湿变化和缓冲效应量化

人工刺槐林内外温度在所有观测日不同时刻呈趋势相似的单峰型日变化曲线,土壤温度变化相较于气温和地表温度表现出明显的时滞效应,迟滞2h左右(图3)。人工刺槐林在日间表现为降温和增湿:一年当中,日间(6:00—18:00)林内气温低于林外0.61℃,地表温度低于林外2.11℃,土壤温度低于林外1.01℃,相对湿度高于林外1.27%;在夜间则与日间相反,表现为升温 and 降湿,夜间(18:00—6:00)林内气温高于林外0.35℃,地表温度高于林外0.37℃,土壤温度则低于林外0.71℃,相对湿度低于林外1.90%(表3)。

一天中,极端高温出现在14:00—16:00,这一时段林外空旷地和林内气温分别为18.98℃和17.90℃,林内低于林外1.08℃;地表温度分别为23.15℃和18.98℃,林内低于林外4.17℃;土壤温度分别为16.87℃和14.99℃,林内低于林外1.88℃。在此之后温度开始下降,至5:00—7:00达到极端低温,林外空旷地和林内气温分别为4.34℃和4.79℃,林内高于林外0.45℃;地表温度为4.32℃和4.90℃,林内高于林外0.58℃;土壤温度为10.46℃和10.05℃,林内低于林外0.45℃;在温度较低的时段,人工刺槐林对土壤的缓冲效应仍表现为正缓冲,但降温的幅度有所减小,夜间3:00温度正缓冲效应达到最低,林内土壤温度低于林外0.17℃。

一天中的高温时段空气相对湿度最低,在15:00前后林外空旷地和林内的空气相对湿度达到最低

值,分别为 38.69%和 41.41%,林内高于林外 2.72%; 内的空气相对湿度达到最高值,分别为 85.62%和 83.82%,林内低于林外 1.80%。

低温时段空气相对湿度最高,在 7:00 前后林外和林

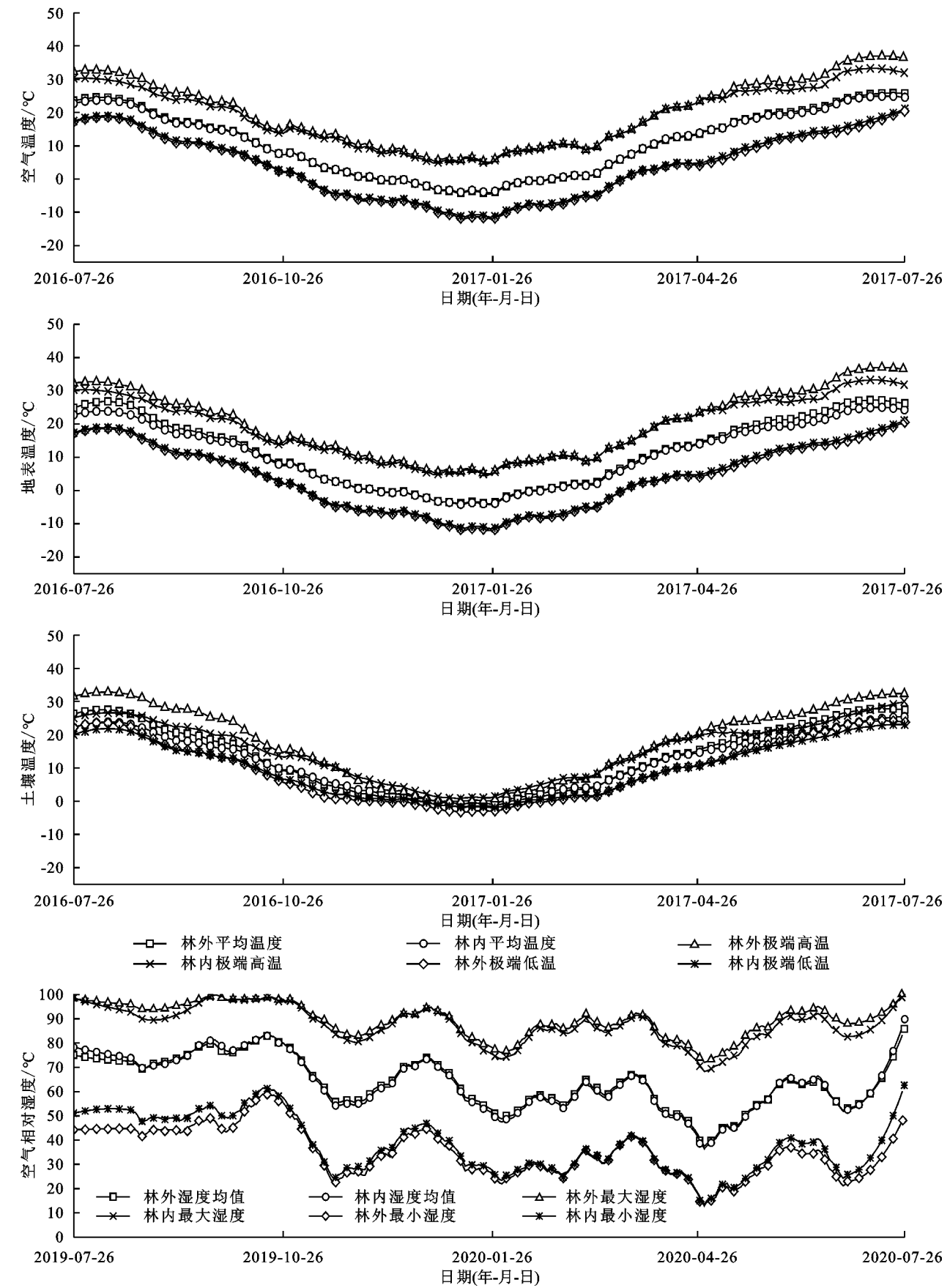


图 2 温湿度年内变化

表 3 日间和夜间温湿度缓冲值

| 时段 | $\Delta T_a/^\circ\text{C}$ | $\Delta T_{ns}/^\circ\text{C}$ | $\Delta T_s/^\circ\text{C}$ | $\Delta RH/\%$ |
|----|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 日间 | 0.61 ± 2.15 | 2.11 ± 3.82 | 1.01 ± 3.06 | -1.27 ± 4.20 |
| 夜间 | -0.35 ± 1.34 | -0.13 ± 1.61 | 0.82 ± 2.06 | 1.59 ± 3.23 |

2.3 人工刺槐林内外温湿度变幅比较

由表 4 可知,在人工刺槐林的温湿度缓冲作用下,林内外温湿度均具有显著差异($p<0.01$),相较于

林外,林内温湿度标准差均有不同程度的下降。林外和林内气温、地表温度、土壤温度标准差分别为 12.01,11.39,13.41,11.60,10.89,9.03;其中,林内土壤温度标准差下降幅度最大,为 1.86;气温标准差下降幅度最小,为 0.62;地表温度标准差下降 1.81,与土壤温度标准差下降幅度接近;林外和林内湿度标准差分别为 28.21,27.29,林内较林外下降 0.92。

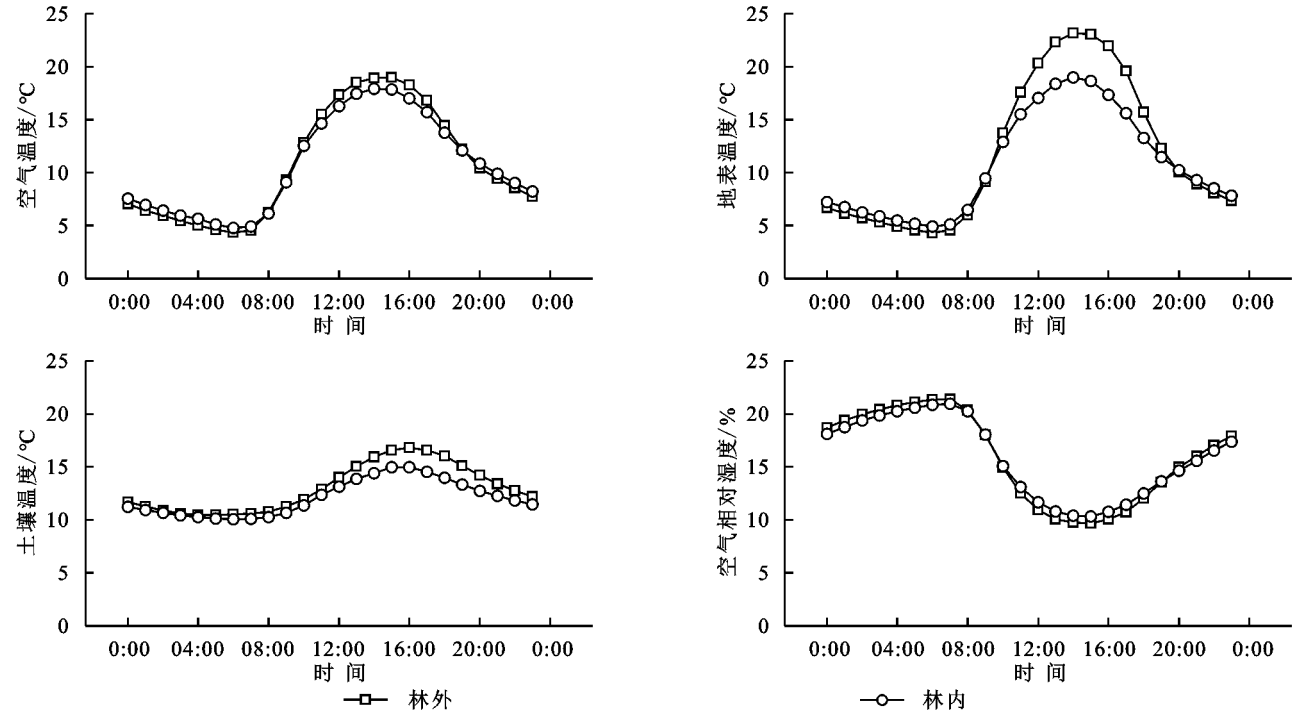


图 3 温湿度日内变化

在人工刺槐林的缓冲作用下,林内的温湿度标准差和日较差和均低于林外,温湿度变幅均有不同程度的下降。在 3 种不同高度层次的温度中,标准差和日较差的大小均为地表温度>气温>土壤温度,可以看出,在 3 种温度中,地表温度的变幅最大,土壤温度的变幅最小。

表 4 林内外年均温湿度和成对样本 t 检验

| 温度类型 | 林外 | 林内 | t | p 值 |
|--------|------------------|------------------|--------|-------|
| 气温 | 10.79 ± 12.01 | 10.66 ± 11.39 | 10.198 | 0.01 |
| 地表温度 | 11.73 ± 13.41 | 10.74 ± 11.60 | 43.389 | 0.01 |
| 土壤温度 | 13.00 ± 10.89 | 12.08 ± 9.03 | 54.739 | 0.01 |
| 空气相对湿度 | 63.64 ± 28.21 | 63.48 ± 27.29 | 3.752 | 0.01 |

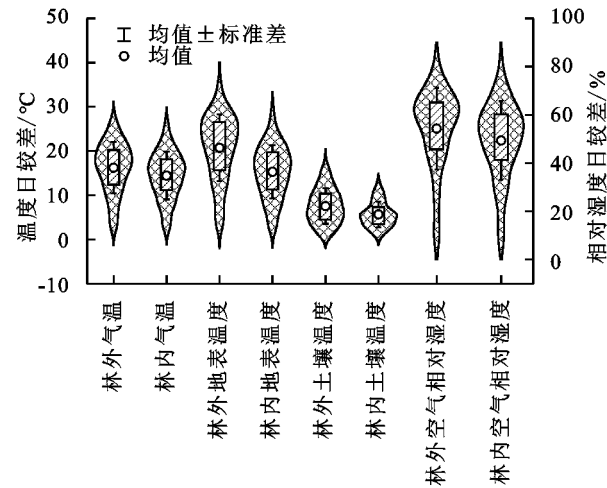


图 4 温湿度日较差

由图 4 和表 5 可知,一年中,林外和林内的年均气温、地表温度和土壤温度日较差分别为 16.25℃和 14.46℃,20.72℃和 15.31℃,7.56℃和 5.65℃;其中,林内地表温度日较差下降幅度最大,为 5.41℃;气温日较差下降幅度最小,为 1.79℃;土壤温度日较差下降 1.91℃,与气温日较差下降幅度接近。相对湿度日较差分别为 54.33%和 49.38%,林内较林外下降 4.95%。

表 5 林内外年均温湿度日较差

| 参数 | 林外 | 林内 | t | p 值 |
|-----------|------------------|------------------|------|-------|
| 气温日较差 | 16.25 ± 5.82 | 14.46 ± 5.39 | 1.96 | 0.01 |
| 地表温度日较差 | 20.72 ± 7.57 | 15.31 ± 6.04 | 5.78 | 0.01 |
| 土壤温度日较差 | 7.56 ± 4.02 | 5.65 ± 2.87 | 2.13 | 0.01 |
| 空气相对湿度日较差 | 54.33 ± 16.96 | 49.38 ± 16.22 | 5.46 | 0.01 |

2.4 人工刺槐林在不同环境气候下的缓冲效应

林外的气温、地表温度和土壤温度与人工刺槐林对相应温度的缓冲值之间均具有显著的正相关关系 ($p<0.01$),拟合的回归曲线为一元三次方程(图 5)。其中:

气温 $y = -0.2918 + 0.0069098x - 0.00093258x^2 + 0.00010031x^3$ ($R^2 = 0.44$)

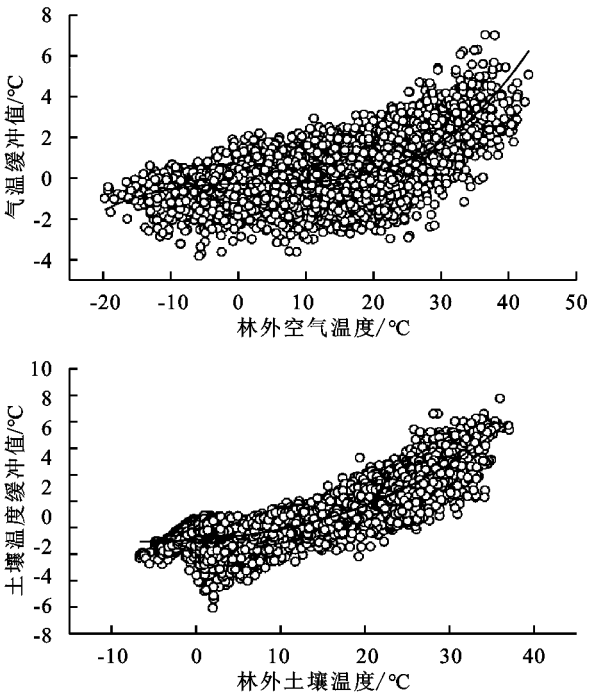


图 5 林外气候与人工刺槐林气候缓冲值的散点图和回归曲线

当林外的气温、地表温度、土壤温度分别达到 16.70℃,9.89℃和 1.43℃时,人工刺槐林对温度不具有缓冲作用;当环境温度高于上述值时,人工刺槐林对环境温度具有降温作用,且随环境温度升高缓冲值增加速率变快;当环境温度低于上述值时,人工刺槐林具有升温作用,随环境温度降低,缓冲值绝对值增加速率变快。

由表 5 可以看出,人工刺槐林对气温、地表温度和土壤温度的缓冲值之间具有显著差异 ($p<0.01$),整体均表现为降温作用,其中对地表温度的降温最强 (0.99℃),对土壤温度的降温作用与地表温度接近 (0.92℃),对气温的降温作用最弱 (0.13℃),林内外相对湿度整体接近持平。差值为 0.16%。

表 5 不同类温度差值的单因素方差分析

| 参数 | 气温 | 地表温度 | 土壤温度 | F | p |
|-------|-----------|-----------|-----------|---------|------|
| 林内外温差 | 0.13±1.21 | 0.99±2.76 | 0.92±2.11 | 437.445 | 0.01 |

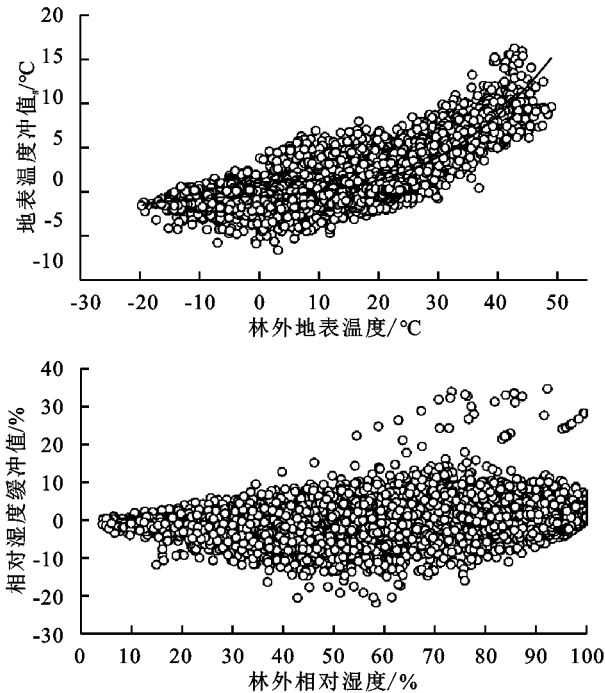
3 讨论

植物冠层在日间吸收、散射和反射入射的太阳辐

地表温度 $y = -0.4669 + 0.0291x + 0.00081382x^2 + 0.00010420x^3$ ($R^2 = 0.67$)

土壤温度 $y = -0.9157 + 0.0411x + 0.0032539x^2 + 0.000056735x^3$ ($R^2 = 0.81$)

林外的相对湿度与人工刺槐林对相对湿度的缓冲值之间具有显著的正相关关系 ($p<0.01$),但拟合模型的可靠性较低 ($R^2<0.1$)。



射,从而减少穿透冠层以下空气和土壤的能量,辐射衰减特征与群落结构密切相关^[27-28]。夜间由于太阳辐射消失,辐射差额变为负值,森林的温度缓冲效应与白天方向相反^[29]。森林具有温度缓冲效应主要是通过形成环境气候与林下小气候的屏障,一方面减弱林下小气候受到环境气候变化的影响,另一方面保持林内小气候的稳定性,从而达到减缓温度变化和保持温度恒定的效果^[30-31]。

陕北黄土丘陵区延河流域的人工刺槐林在日间 16:00 对气温和地表温度的降温作用最强,分别可以降低 1.25℃和 4.59℃,在夜间 4:00,5:00 对气温和地表温度的升温作用最强,分别可以升高 0.65℃和 0.61℃。该区人工刺槐林对气温和地表温度的缓冲作用主要表现为日间降温和夜间升温,这与 Peng 等^[32]的研究结论相符。在环境中的空气相对湿度较低时,林带具有增湿的作用,该区的人工刺槐林在 13:00 增湿效果达到峰值,增加空气相对湿度 2.95%,而在空气湿度较高时,则具有降湿的作用,夜间 1:00 降湿效果最强,降低空气相对湿度达 2.49%。

由于森林植被的遮盖作用,林内地表和地表以下各深度处土壤温度与林外相比温差有所降低,温度变化不如林外剧烈^[3],且随着土层深度增加,各地被类型温度最大值出现的时间相应推迟。该区5 cm深度处土壤温度相较于气温和地表温度变化迟滞约2 h,就全天来看,该区的人工刺槐林对土壤温度的缓冲整体表现为降温作用,但夜间的降温效果远低于日间;在18:00降低土壤温度的作用最强,可以降低2.06℃,夜间3:00降温效果最弱,降低0.17℃。

人工刺槐林的气候因子缓冲效应在一年之中具有不同的特点,在高温季节表现为明显的降温和增湿作用,7月林内气温、地表温度和土壤温度在分别低于林外0.77℃,2.19℃,3.72℃,空气相对湿度高于林外1.67%;在低温季节,刺槐林对气温和土壤温度整体为升温作用,对地表温度为较不明显的降温效应,对空气相对湿度的整体影响为降湿,1月林内气温和土壤温度分别高于林外0.28℃和0.87℃,地表温度低于林外0.20℃,空气相对湿度低于林外1.16%,这与孙金伟等^[6]生长季森林内外温度差异更显著的研究结果一致。陕北黄土丘陵区位于中温带大陆性季风气候区,该研究的观测期经历了人工刺槐林的生长季和非生长季,Stephen等^[1]研究表明,油棕人工林的小气候效应与叶面积指数之间具有很强的关联,因此人工刺槐林在不同季节所展现出对气候缓冲的差异性可能与不同季节林冠层的盖度差异有关。

通过对林外温度和相应温度缓冲值之间的回归曲线方程可以看出,二者之间具有显著的正相关关系($p < 0.01$),这说明在极端高温天气人工刺槐林的降温作用更强烈,而在极端低温天气升温作用更强烈。通过方程推算,环境中的气温、地表温度和土壤温度分别在高于16.70℃,9.89℃和1.43℃时,人工刺槐林表现为降温作用,环境温度低于上述临界值则表现为升温作用,这与罗茜^[33]晴天和夏季时城市森林的降温效应最强的结论相一致,也符合Li等^[13]森林夏季整体降温、冬季整体增温的结论。环境中的空气相对湿度和人工刺槐林对空气相对湿度的缓冲值之间具有显著的相关关系($p < 0.01$),但拟合模型可靠性较低($R^2 < 0.1$),这可能与空气相对湿度会受到气温和降水的影响有关。

4 结论

本研究通过对黄土丘陵区人工刺槐林的气温、地表温度、土壤温度和相对湿度进行为期一年的连续监

测并进行分析发现,人工刺槐林对林外温湿度环境具有显著的缓冲作用。在环境气候干热时,人工刺槐林表现出降温和增湿作用;在环境气候湿冷时,人工刺槐林表现出升温和降湿作用;环境温度与林带对温度的缓冲值之间具有显著的正相关关系($p < 0.01$),两者之间为一元三次方程关系,其中,对气温、地表温度和土壤升温和降温缓冲的临界温度分别为16.70℃,9.89℃和1.43℃。

人工刺槐林内小气候与林外环境气候的变化表现出非同步的特点,林带对环境气候表现出一定的缓冲作用,这最终形成了林内与林外的温湿度环境差异。林内温度和湿度的变幅更小,具有更加适宜物种生存的条件。林下种子萌发、植物光合作用、小型动物生存等过程深受小气候影响,群落在优于环境气候的林下小气候条件下得以构建和演替,这对于实现该地区生态恢复重建具有重要意义。

参考文献:

- [1] Hardwick S R, Toumi R, Pfeifer M, et al. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation; Forest disturbance drives changes in microclimate [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 201: 187-195.
- [2] 董金伟,白世红,马风云,等.山东泰山3种人工林小气候对比分析[J].*山东林业科技*, 2017, 47(5): 56-59.
- [3] 陈宏志,胡庭兴,龚伟,等.我国森林小气候的研究现状[J].*四川林业科技*, 2007, 28(2): 29-32.
- [4] Kovács B, Tinya F, Ódor P. Stand structural drivers of microclimate in mature temperate mixed forests [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 234-235: 11-21.
- [5] 彭巍,李明文,王慧,等.森林小气候国内外研究进展[J].*防护林科技*, 2020(7): 45-03.
- [6] 孙金伟,吴家兵,关德新,等.森林与空旷地空气温湿度及土壤温度的长期对比研究[J].*生态学杂志*, 2011, 30(12): 2685-2691.
- [7] 徐明洁,张涛,孙怡,等.千烟洲人工针叶林对温湿环境的调节作用[J].*生态学杂志*, 2018, 37(11): 3245-3254.
- [8] 张一平,刘玉洪,马友鑫,等.热带森林不同生长时期的小气候特征[J].*南京林业大学学报:自然科学版*, 2002, 45(1): 83.
- [9] 王珮环,陈智,于贵瑞,等.长白山温带阔叶红松林对温湿环境的调节效应[J].*应用生态学报*, 2019, 30(5): 1521-1528.
- [10] 王兵,崔向慧,杨锋伟.中国森林生态系统定位研究网络的建设与发展[J].*生态学杂志*, 2004, 23(4): 84-91.
- [11] Ashton P. Some measurements of the microclimate

- within a Sri Lankan tropical rainforest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 59: 217-235.
- [12] 林永标, 申卫军, 彭少麟, 等. 南亚热带鹤山3种人工林小气候效应对比[J]. *生态学报*, 2003, 23(8): 1657-1666.
- [13] Li Y, Zhao M S, Motesharrei S, et al. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6603.
- [14] 杨铭伦, 张文革, 张旭, 等. 西天山森林小气候梯度特征[J]. *林业科技通讯*, 2021, 579(3): 14-18.
- [15] 霍艾迪, 王国梁, 李倩, 等. 基于MODIS影像数据的陕北黄土高原植被区划研究[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(4): 32-36.
- [16] 邹厚远. 陕北黄土高原植被区划及与林草建设的关系[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(2): 96-101.
- [17] 张社奇, 王国栋, 田鹏, 等. 黄土高原刺槐林地土壤微生物的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 128-131.
- [18] Ashcroft M B, Ramp D, Warton D I, et al. A novel approach to quantify and locate potential microrefugia using topoclimate, climate stability, and isolation from the matrix[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1866-1879.
- [19] Shi H J, David P, Wen Z M, et al. Thermal buffering effect of alpine boulder field microhabitats in Australia: Implications for habitat management and conservation[J]. *Biological Conservation*, 2014, 180: 278-287.
- [20] Zhang Y, Wei L Y, Wei X R, et al. Long-term afforestation significantly improves the fertility of abandoned farmland along a soil clay gradient on the Chinese Loess Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3521-3534.
- [21] 徐丽萍, 杨改河, 姜艳, 等. 黄土高原人工植被小气候生态效应研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 163-173.
- [22] 徐丽萍, 杨改河, 冯永忠, 等. 黄土高原人工植被对局地小气候影响的效应研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(4): 170-175.
- [23] 肖玉, 谢高地, 甄霖, 等. 三北工程黄土高原丘陵沟壑区森林降温增湿效果研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5836-5846.
- [24] 王欢欢, 赵杰, 岳超, 等. 黄土高原植被恢复对地表的冷却作用及变化规律[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 214-220.
- [25] 张静, 李鹏展. 延河流域退耕还林还草工程后土地质量评估[J]. *绿色科技*, 2018(20): 32-35.
- [26] Shi H J, Wen Z M, David P, et al. A framework for quantifying the thermal buffering effect of microhabitats[J]. *Biological Conservation*, 2016, 204: 175-180.
- [27] 刘文杰, 张克映, 李红梅, 等. 西双版纳热带雨林干季林冠层雾露形成的小气候特征研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(3): 486-491.
- [28] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(4): 421-429.
- [29] 刘学全, 史玉虎, 蔡晟, 等. 三峡库区防护林不同林分结构森林小气候研究[J]. *湖北林业科技*, 1998(1): 1-5.
- [30] 胡顺军, 郭谨, 王举林, 等. 应用常规气象观测资料估算塔里木盆地水面蒸发量[J]. *干旱区地理*, 2004, 27(2): 212-215.
- [31] 王今殊, 王进欣. 热带次生林、季雨林林窗温度特征对比分析[J]. *徐州师范大学学报: 自然科学版*, 2004, 22(3): 59-64.
- [32] Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, et al. Afforestation in China cools local land surface temperature[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111: 2915-2919.
- [33] 罗茜. 长沙市城市森林的温湿效应[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.