

# 针阔混交林转为桉树林对森林小气候的影响

杨钙仁<sup>1</sup>, 苏晓琳<sup>1</sup>, 蔡德所<sup>2</sup>, 黄承标<sup>1</sup>, 蒋代华<sup>3</sup>

(1. 广西大学 林学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 3. 广西大学 农学院, 南宁 530004)

**摘 要:**为了探讨针阔混交林改种桉树人工林对林内小气候的影响,以便为桉树造林的生态效应分析提供依据,对桉树人工林(2008 年种植,08EU)和针阔混交林(MF)林内空气温湿度和表土温度进行了连续 1 a 的观测。结果表明:(1)两种林分林内空气日均温湿度以及日最大相对湿度差异不显著;(2)08EU 表土温度和日最高气温的年均值比 MF 分别高 1.5℃和 1.4℃,日最低气温比 MF 低 0.8℃,日气温极差比后者高 2.2℃,日气温变异系数比混交林高 40%;桉树林日最低相对湿度比混交林低 6.7%,日湿度极差和变异系数的年均值比后者分别高 16.4%和 22.0%;(3)空气温湿度日极差与温湿度平均值呈显著正相关,与极小值呈显著负相关,与极大值相关不显著,秋冬季两种林分林内小气候差异最大;(4)桉树纯林对林内气象环境的缓冲保护作用弱于针阔混交林,其林内空气日最低温度和最小湿度的平均出现时间比混交林分别提前 51 min 和 45 min。桉树人工林小气候的变化将会加快土壤水分散失和有机质分解速率。

**关键词:**森林小气候;空气温湿度;植被变化;人工林

**中图分类号:**S716.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2013)05-00129-06

## Impact of Vegetation Shift from Coniferous and Broadleaf Mixed Forest to Eucalyptus Plantation on the Microclimate

YANG Gai-ren<sup>1</sup>, SU Xiao-lin<sup>1</sup>, CAI De-suo<sup>2</sup>, HUANG Cheng-biao<sup>1</sup>, JIANG Dai-hua<sup>3</sup>

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:**For better understanding the impact of forest vegetation shift on the beneath microclimate and its ecological effects, 3~4-year old eucalyptus plantation (planted in 2008, 08EU) and coniferous & broadleaf mixed forest (MF) were selected. Microclimatic conditions including air temperature, soil temperature and air relative humidity inside the two stands were monitored for 1 year. The results showed that: (1) no difference in mean daily air temperature, mean daily relative humidity or daily max relative humidity was observed between the two stands; (2) annual average of surface soil temperature, daily max air temperature, daily air temperature range and coefficient of air temperature variation in eucalyptus were 1.5℃, 1.4℃, 2.2℃ and 40% higher than that inside mixed forest, respectively, but daily minimum air temperature was 0.8℃ lower than that in MF. There was 6.7% decrease of annual minimum air relative humidity in 08EU comparing with that in MF, but 16.4% of daily air relative humidity range and 22.0% coefficient of air humidity variation in 08EU higher than that in MF, respectively; (3) the range of daily air temperature and relative humidity were significantly positively or negatively related to the mean or minimum daily value, respectively, but no significant relation with max value, the largest different of microclimate condition between 08EU with MF was observed in autumn and winter seasons; (4) minimum air temperature and minimum humidity appearance times in eucalyptus plantation were 51 and 45 minutes earlier than that in mixed forest, respectively. The changes of microclimate conditions beneath eucalyptus plantation would increase the rates of soil water evaporation and organic matter decomposition.

**Key words:**forest microclimate; air temperature and relative humidity; vegetation shift; plantation

收稿日期:2013-01-31

修回日期:2013-03-15

资助项目:国家自然科学基金项目(40861025,31360134);广西科技攻关项目(桂科攻 1140002-3-4);广西大学国家林业局中南速生材繁育重点实验室开放基金项目(KF2009-02)

作者简介:杨钙仁(1976—),男,广西桂平人,博士,副教授,主要从事森林生态学、土壤生物学的研究。E-mail:gaiyreny@163.com

因地形、森林植被结构、营林措施等因素对森林与外部的热量传输以及林内水分分布格局产生重要影响,形成了与外部截然不同的森林小气候,这不仅影响植被生长和种子繁殖<sup>[1]</sup>及土壤微生物生境<sup>[2]</sup>,还通过影响林内光合作用、营养循环和水分传输与分配等,控制生态系统的过程,因此,森林小气候研究是探讨森林生态过程的重要内容。植被是引起森林小气候变化最为常见和最重要的因素,而造林则为当前森林植被变化的主要驱动因素。

近十几年来,我国桉树人工林发展较快,种植面积已超过 360 万  $\text{hm}^2$ <sup>[3]</sup>,广西是我国桉树工业用材林的主要基地,种植面积已达 180 万  $\text{hm}^2$ ,约占广西区森林面积的 12.6%和全国桉树人工林总面积的 45%以上<sup>[4]</sup>,其造林地主要来自经营周期较长的人工林如马尾松林、杉木林、针阔混交林等以及天然次生林。与其他人工林相比,桉树人工林的经营周期短,对森林土壤干扰频繁而强烈,林下植被严重破坏,加之桉树树干通直,冠层窄,枝叶稀疏,枝下高度高(成熟林一般大于 10 m),因此,其对林内小气候的影响与其他森林尤其是经营周期较长的人工林和天然林存在较大差异。以往有关桉树人工林生态环境负面影响的争论和研究,主要是关注桉树生物学和经营管理方面的成因,而林内小气候变化可能是导致桉树林生态环境变化的一个重要原因。以往的研究对桉树人工林林内小气候缺乏全面而深入的了解,已有少量的研究因没有设置对照林(或对照林为非桉树造林前林分)或观测时间短而不连续<sup>[5-6]</sup>,未能全面客观反映桉树造林对林内气象环境的影响,其应用受到限制。本文以桉树造林前的混交林作为对照林,对林内空气温度、相对湿度以及地表温度进行为期 1 a 的连续观测,旨在阐明桉树造林对林内小气候的影响特征及其变化规律,为全面客观评价桉树造林的生态环境效应提供科学依据。

# 1 研究地概况

研究样地位于广西国有高峰林场,地处南宁市北部,地理坐标为  $108^{\circ}20'57''\text{—}108^{\circ}24'37''\text{E}$ ,  $22^{\circ}56'48''\text{—}22^{\circ}89'18''\text{N}$ ,属亚热带季风气候,多年(1961—1990 年)平均气温  $21.6^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年总积温  $7\,830^{\circ}\text{C}$  左右,年均降雨量 1 320 mm,且多集中于 4—9 月(占年降雨量的 79.8%),多年平均相对湿度

79%,降雨日数 104.7 d;春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)和冬季(12—2 月)的平均最高气温分别为  $26.2,32.6,28.0,18.2^{\circ}\text{C}$ ,平均气温分别为  $21.9,28.0,22.9,13.7^{\circ}\text{C}$ ,平均最低气温分别为  $19.0,24.9,19.5,10.9^{\circ}\text{C}$ ,降雨量分别为 114.9,210.4,80.5,34.5 mm,降雨日数分别为 10.0,12.4,6.5,6.1 d,日平均日照时数分别为 3.6,6.5,5.7,3.0 h。研究区为丘陵地形,海拔高度为 130~280 m,坡度一般为  $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,成土母岩以砂岩为主,土壤类型主要为赤红壤,土层厚度 40 cm 以上,pH 值为 4.50~5.00。

巨尾桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)林(08EU)为一闭合集雨区,于 2008 年 4 月全垦植苗,造林密度为 1 650 株/ $\text{hm}^2$ ,面积 28.1  $\text{hm}^2$ ,海拔 172~265 m,平均坡度  $24^{\circ}$ 。造林前为马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、刨花润楠(*Machilus pauhoi*)等树种组成的针阔混交林,采伐迹地经过炼山清理后,穴垦整地。

针阔混交林(MF),集雨区面积约 76.7  $\text{hm}^2$ ,闭合流域,与 08EU 相距 2.74 km,为高峰林场东升分场职工生活用水水源林。海拔 163~386 m,平均坡度为  $25^{\circ}$ 。乔木层主要由刨花润楠、杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、灰木莲(*Magnoliaceae glanca Blume*)等阔叶树和马尾松、杉木组成,林分结构与 08EU 造林前的混交林相近。马尾松和杉木造林(飞播)时间为 1962 年,现主要分布在山体的中上部,1995 年对马尾松、杉木林间伐后补种刨花润楠、灰木莲等树苗,后停止干扰至今。

# 2 研究方法

## 2.1 观测方法

分别在两种人工林(08EU 和 MF)内选择海拔、坡向、坡度和坡位相近的林地各两块作为气象观测样地(面积为宽 20 m×长 50 m)。于 2012 年 1 月对样地植被结构进行调查,调查结果见表 1。

在各观测样地上分别布设 1 个百叶箱(距离地面 1.25 m),将双金属空气温度记录仪和毛发空气湿度记录仪置于百叶箱内,记录仪启动前分别用高精度( $0.1^{\circ}\text{C}$ )水银温度计和高精度干湿球湿度计进行校正,于每天的 11:00—12:00 更换记录纸。在百叶箱附近林地上用土温计测量表土(2 cm)温度,于更换记录仪记录纸时(12:00)读取土温计温度;重复两次。

表 1 试验林基本概况

林分 代号	面积/ $\text{hm}^2$	造林 日期	造林密度/ (株· $\text{hm}^{-2}$ )	乔木层			灌木层		草本层	
				树高/m	胸径/cm	郁闭度	高度/m	盖度/%	高度/m	盖度/%
08EU	28	2008-04	1665	12.4	15.1	0.60	1.1	50	0.6	55
MF	77	1962-06	—	22.3	22.4	0.91	3.3	67	1.3	67

2.2 统计方法

将记录纸上的整点数据录入电脑后,用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行数据的处理和统计分析。日平均为 24 个整点时间观测值的平均值,月平均为月内各日观测值(日平均值)的平均值,日极差为日极大值与日极小值之差,极值出现时间为该日内极值最先出现的时间。以各日的变异系数衡量当日的波动幅度。

3 结果与分析

3.1 人工林林内气温变化特征

在观测期内(2011 年 7 月至 2012 年 6 月),桉树人工林(08EU)和针阔混交林(MF)林内日平均气温随季节的变化趋势一致,年内变化呈‘U’型(图 1),其中,7 月平均气温最高,08EU 和 MF 分别为 26.4℃和 27.1℃(表 2),1 月份平均气温(分别为 8.3℃和 8.2℃)最低。不同季节日均气温变化幅度有较大差异,总体上看,桉树人工林日最高气温高于混交林,而日最低气温低于后者,尤其是在昼夜温差较大的月份(10—12 月)(表 2),08EU 年均日最高气温比 MF 高 1.4℃,年均日最低气温比 MF 低 0.8℃。在夏末至初冬(8—12 月),两种林分日气温极差较大,如在 11 月,08EU 和 MF 的日温差分别为 15.4℃和 10.8℃,为全年最大,显著高于全年平均值(分别为 8.9℃和

6.7℃),在这一阶段的其他月份,08EU 和 MF 的日温差分别大于 10.5℃和 8.2℃;其余月份日温差相对较小,其中,在 1 月份 08EU 和 MF 的日温差平均值分别为 3.8℃和 2.9℃,分别为最大月份的 24.7%和 26.9%;相关性分析结果显示,两种林分日气温极差与日最高温呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与日最低气温呈极显著负相关,而与日平均温相关不显著。尽管两种林分年平均气温差异不显著,但在维系林内气温稳定方面存在显著差异,08EU 林内日气温的波动幅度显著大于 MF,前者在各月的日气温变异系数均大于后者,桉树人工林林内气温变异系数年均值比针阔混交林大 40%。将两种林分按非雨季(11 月—次年 4 月)和雨季(5—10 月)统计,MF 的日均气温、日最低温略大于 08EU,日最高温则小于 08EU。

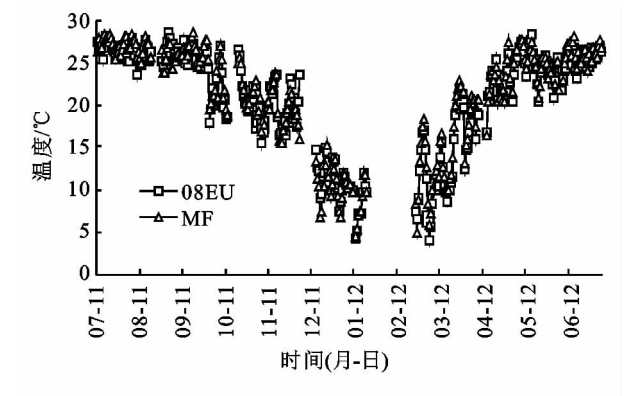


图 1 两种林分日均温度变化趋势

表 2 2011—2012 年两种林分各月气温比较

时间(年-月)	平均值/℃		最高值/℃		最低值/℃		极差/℃		变异系数/%	
	08EU	MF	08EU	MF	08EU	MF	08EU	MF	08EU	MF
2011-07	26.4	27.1	31.7	30.6	23.0	24.9	8.7	5.7	11.6	7.0
2011-08	26.0	25.9	32.8	31.1	22.3	22.9	10.5	8.2	14.2	10.3
2011-09	24.2	25.1	31.2	29.9	20.2	21.6	10.9	8.4	16.1	11.0
2011-10	20.3	20.9	28.2	26.4	16.2	17.4	12.1	9.0	20.4	13.9
2011-11	19.4	19.4	30.1	26.3	14.8	15.4	15.4	10.8	28.6	19.0
2011-12	11.2	10.5	19.6	17.2	7.1	6.8	12.4	10.4	40.2	32.0
2012-01	8.2	8.2	10.7	9.9	7.0	7.1	3.8	2.9	14.0	11.9
2012-02	10.3	11.3	13.4	13.4	8.0	8.9	5.3	4.5	17.6	11.2
2012-03	14.9	16.2	17.9	18.6	12.5	13.9	5.4	4.7	12.0	9.3
2012-04	22.3	22.6	27.7	26.3	18.6	19.6	9.1	6.7	14.2	9.6
2012-05	24.5	24.3	29.4	26.8	21.6	21.4	7.8	5.4	11.0	9.6
2012-06	25.5	25.8	29.0	28.0	23.2	23.9	5.8	4.1	10.2	5.2
年均	19.4	19.8	25.1	23.7	16.2	17.0	8.9	6.7	17.5	12.5
08EU 与 MF 年均差值	-0.4		1.4		-0.8		2.2		5	

图 2 结果显示,两种林分林内日最高气温出现的时间呈正态分布,桉树人工林有 89.9%的日最高温出现在 11:00—15:00,13:00 出现频率最高,为 29.7%,其次为 14:00 (21.2%),针阔混交林有 75.2%出现在 13:00—16:00,其中,14:00 出现的频率最高,为 28.5%,其次为 15:00(18.5%),桉树人工

林的日最高温出现时间比针阔混交林早 1~2 h。人工林林内日最低气温出现的时间比较分散,在零时至 10:00 均有分布,其中,08EU 在零时以及 2:00—5:00出现的概率为 70.9%,其全年日最低温平均出现时间在 3:16,而 MF 日最低温主要分布在 0:00,4:00—6:00,10:00,这一时段出现概率为 68.9%,全

年日最低温平均出现时间为 4:07, 桉树人工林比针阔混交林早 51 min。图 3 反映了各月两种林分林内气温极值出现的平均时间变化, 除了在冬春季节(11 月至次年 3 月)外, 桉树人工林林内日最高温出现的时间显著早于针阔混交林, 在夏秋季(6 月和 8—10 月)日最低温亦显著早于混交林。从夏季到秋末(7—10 月)两种林分林内日最高气温出现的时间随季节变换逐渐提前(从 14:00—15:00 提前至 12:00—13:00), 一年当中, 在 1 月份出现的时间最早, 为 12:00 左右, 而后开始逐渐后移。

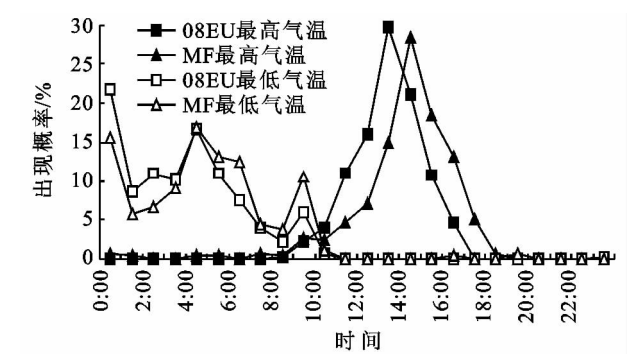


图 2 2011—2012 年两种林分林内气温极值的时间分布概率

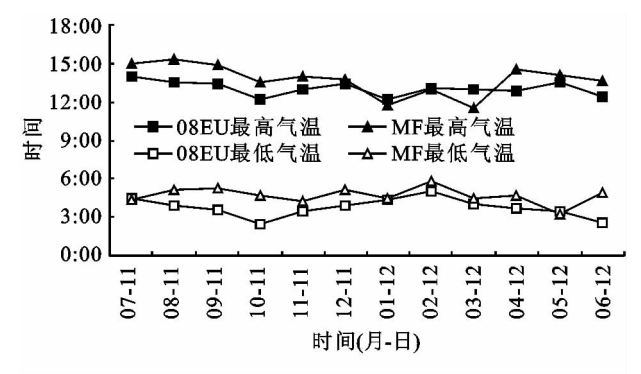


图 3 两种林分林内气温极值在各月的时间分布

### 3.2 林内空气相对湿度变化特征

人工林林内空气湿度存在明显的季节变化, 在雨季(6—8 月)湿度较高(表 3), 空气相对湿度日平均值高于 90%, 日最大值高于 98.0%, 日最小值高于 60%, 空气湿度的日变化较小(变异系数为 6.6%~16.6%); 进入夏末后人工林林内空气相对湿度逐渐降低, 到 12 月份 08EU 和 MF 的相对湿度平均值分别为 77.1% 和 75.4%, 为全年最低月份, 主要是因为白天湿度较低, 日空气相对湿度极小值为 40.2%~63.3%, 昼夜湿度变化大, 变异系数为 15.4%~30.6%。华南地区 1 月开始进入冬春阴雨季节(1—3 月), 林内空气湿度较高, 这一季节为一年中空气湿度昼夜变化最小的阶段, 日极差一般小于 24%, 变异系数最小(5.2%~9.5%)。08EU 和 MF 林内空气湿度年平均值分别为 88.2% 和 88.0%, 差异不显著, 日最大湿度亦基本相当, 但其最小湿度以及日内湿度变化方面存在显著差异, 这种差异主要发生在少雨干燥的秋冬季, 桉树人工林日最小湿度全年平均值比混交林低 6.7%, 日湿度极差和变异系数的年均值比后者分别高 16.4% 和 22.0%, 而在秋冬季(9—12 月), MF 的日最小湿度为 56.4%, 比桉树人工林(48.3%)的高 16.8%, 此阶段 08EU 和 MF 的日空气湿度变异系数分别为 24.6% 和 18.5%, 桉树人工林比针阔混交林的高 33.0%, 表明前者的林内空气湿度在日内的变化幅度比后者大; 相关性分析结果表明, 人工林林内空气相对湿度日极差与日平均湿度和日极小湿度呈极显著负相关( $P<0.01$ ), 而与日极大值相关性不显著( $P>0.05$ )。

表 3 2011—2012 年两种林分各月空气湿度比较

时间(年-月)	平均值/%		最大值/%		最小值/%		极差/%		变异系数/%	
	08EU	MF	08EU	MF	08EU	MF	08EU	MF	08EU	MF
2011-07	92.7	90.9	98.9	98.3	69.9	73.4	29.0	25.0	8.2	9.6
2011-08	89.7	89.2	100.0	99.6	59.9	62.4	40.0	37.1	16.6	14.8
2011-09	85.6	86.0	99.8	99.3	53.6	60.9	46.2	38.4	21.3	16.4
2011-10	86.8	88.5	99.5	99.7	56.3	63.3	41.4	36.4	19.8	15.4
2011-11	81.8	84.3	99.9	98.9	43.1	53.8	56.7	45.2	26.7	19.3
2011-12	77.1	75.4	96.4	93.5	40.2	47.7	56.3	45.8	30.6	22.9
2012-01	93.2	94.9	98.8	99.4	77.7	85.8	21.1	13.6	8.1	5.2
2012-02	90.9	91.1	97.7	97.4	73.6	77.4	24.1	20.0	9.5	8.0
2012-03	91.6	89.2	98.1	97.6	76.5	76.2	21.6	21.4	9.4	9.5
2012-04	86.1	84.7	97.8	97.1	63.0	67.0	34.8	30.1	15.8	13.2
2012-05	88.0	88.4	96.0	96.2	67.7	70.5	28.3	25.7	13.3	10.7
2012-06	95.2	93.5	99.2	99.2	81.2	79.7	18.0	19.5	6.6	7.2
年均	88.2	88.0	98.5	98.0	63.6	68.2	34.8	29.9	15.5	12.7
08EU 与 MF 年均差值	0.2		0.5		-4.6		4.9		2.8	

图4显示,人工林林内空气相对湿度的日内极大值主要出现在0:00—9:00(占总量的比例大于96.7%),其中0:00,1:00和4:00较高,桉树人工林和针阔混交林在上述3h内出现湿度日内极大值的次数占总量的比例分别为65.7%和47.4%,表明前者日内极大值出现的时间比后者更为集中。人工林林内空气相对湿度日内极小值出现的时间呈正态分布,主要发生在12:00—16:00,其中,桉树人工林在13:00和14:00出现的概率最大(57.1%),而针阔混交林在14:00和15:00最大(55.3%);桉树人工林林内空气相对湿度极小值的平均出现时间为13:17,针阔混交林为14:02,前者比后者早45 min。

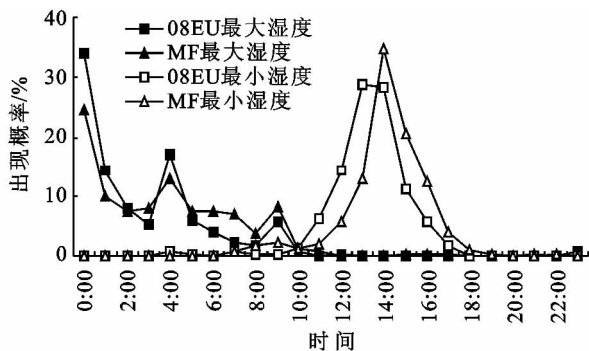


图4 2011—2012年两种林分林内空气相对湿度日内极值的时间分布概率

### 3.3 林内地表温度变化特征

桉树人工林(08EU)和针阔混交林(MF)林内地表温度随季节的变化趋势相似,与空气温度变化趋势一致。其中,7月平均温度最高,08EU和MF分别为27.9℃和26.4℃,1月份平均气温(分别为11.0℃和10.3℃)最低。除5月和6月外,在其余月份桉树人工林地表温度均比针阔混交林高,其中7—9月以及12月两者差异较大,08EU比MF的高2.53~3.38℃,全年平均值比后者高1.5℃。两种林分在调节林内地表温度方面存在显著差异,2011—2012年08EU地表温度极大值(33.0℃)显著高于MF(28.5℃),而极小值则比后者低1.0℃,桉树人工林地表温度的波动幅度大于针阔混交林(图5)。

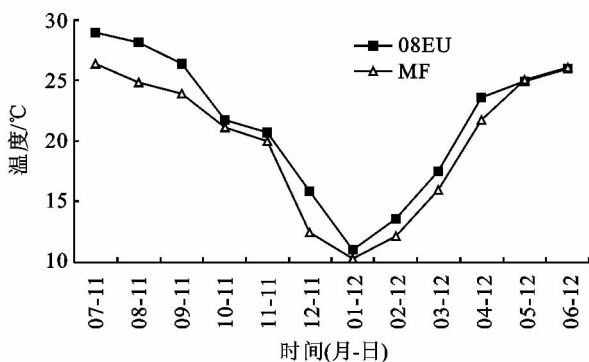


图5 2011—2012年两种林分地表温度月均值

## 4 讨论

### 4.1 桉树造林对林内小气候的影响

森林通过其生物结构影响林内外物质和能量的交换,从而导致林内外气候差异。在地理和气候条件一致的情况下,不同的林分结构,其林内外物质和能量交换阻力是不同的,这主要受植被覆盖度<sup>[7-8]</sup>、植物生物量及其空间分布格局<sup>[8-9]</sup>、树种类型<sup>[10]</sup>、土壤水分<sup>[10]</sup>及凋落物<sup>[8]</sup>等的影响,因此,结构越复杂的森林,其林内小气候就越稳定。桉树造林前需经炼山、挖穴等作业,并在造林后2 a内频繁的除草和施肥,导致林下灌草稀少,凋落物稀少(表1);同时,由于桉树树干通直,冠幅窄、薄(一般3~5 m)和稀疏,桉树成熟林在0~10 m高度一般只有桉树树干和少量的灌草,植物群落简单,林内透光通风性强,因此其林内小气候的稳定性比针阔混交成熟林差,受外部气候变化影响大,林内气候变化响应较快。桉树人工林林内空气温度和相对湿度以及地表温度波动幅度显著大于针阔混交林,日最高气温和最小空气湿度出现时间早于后者,皆因桉树造林后林分结构变简单、林内外水热交换增强所致。

### 4.2 小气候变化的生态效应

林内空气温湿度以及土壤温度等的波动幅度增大将会引起一系列的生态效应。主要有,一是增加土壤水分蒸发,桉树造林后林内空气最低温湿度、日极差以及波动幅度增加,这种变化将加快土壤水分蒸发速度<sup>[11]</sup>,增加林地土壤水分消耗<sup>[12]</sup>;二是加快林地土壤呼吸和凋落物分解速度<sup>[13]</sup>,打破原有土壤有机碳平衡关系,导致有机质下降。在桉树林区,大部分居民反映种植桉树后,林区河流水量减少,他们认为桉树是“抽水机”,而与公众直觉相反的是,以往的研究结果显示桉树林蒸腾耗水量与其他树种(如加勒比海松、马尾松等)相比并不算高<sup>[14-15]</sup>,造成上述矛盾的一个重要原因,可能是一些研究中忽略了种植桉树后林内小气候变化引起的生态水文效应。

值得重视的是,以往的桉树营林地主要来自于经营周期较长的其他人工林(如马尾松林、针阔混交林、天然次生林等),由于桉树人工林的轮伐期短(4~6 a),萌芽林同样需要经过采伐剩余物的清理、施肥、除草等一系列抚育措施,因此,桉树林内小气候是无法恢复至营林前相对稳定的森林小气候。本研究所选的桉树林为近熟林(林龄3~4 a),其郁闭度和林下生物多样性与桉树轮伐周期内的其余林龄段相比,为较鼎盛时期,因此,其余林龄段(尤其是0~3 a)桉树林林内小气候与其营林前经营周期较长的人工林或天

然林的差异可能比本研究结果还要大,其生态效应还要强烈。

## 5 结 论

(1) 桉树人工林林内空气日平均温湿度以及日最大湿度与针阔混交林差异不显著;

(2) 与混交林相比,桉树人工林显著提高气温日最大值,降低空气温湿度日最小值,扩大日温湿度极差,提高表土温度,其林内气候稳定性低于混交林,空气温度和湿度日波动幅度年均值分别比混交林高 40% 和 22%,将会加快土壤水分散失和有机质分解速率;

(3) 桉树人工林对林内气候环境的缓冲保护作用弱于针阔混交林,林内空气日最高温度和最小湿度出现的时间比混交林分别提前 51 min 和 45 min。

### 参考文献:

[1] Bailey T G, Davidson N J, Close D C. Understanding the regeneration niche: Microsite attributes and recruitment of eucalypts in dry forests[J]. *Forest Ecology and Management*,2012,269:229-238.

[2] Zhao J, Wan S, Li Z A, et al. Dicranopteris-dominated understory as major driver of intensive forest ecosystem in humid subtropical and tropical region[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2012,49:78-87.

[3] Yang G R, Shi X H, Cai D S, et al. Water quality of throughfall and stemflow in planted forest in Guangxi, China[J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*,2011,9(3/4):947-953.

[4] 杨钙仁,张秀清,蔡德所,等. 广西主要人工林凋落物分解过程及其对淋溶水质的影响[J]. *应用生态学报*, 2012,23(1):9-16.

[5] 赵知渊,杜阿朋,舒清态. 桉树人工林不同林冠高度小气候特征研究[J]. *桉树科技*,2012,29(3):15-18.

[6] 黄承标,黄丹,刘运华,等. 种短周期工业用材林种植恢复过程对林内小气候的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2009,25(2):25-29,48.

[7] Rambo T R, North M P. Canopy microclimate response to pattern and density of thinning in a Sierra Nevada forest[J]. *Forest Ecology and Management*,2009,257(2): 435-442.

[8] Heithecker T D, Halpern C B. Variation in microclimate associated with dispersed-retention harvests in coniferous forests of western Washington[J]. *Forest Ecology and Management*,2006,226(1):60-71.

[9] Bigelow S W, North M P. Microclimate effects of fuels-reduction and group-selection silviculture: Implications for fire behavior in Sierran mixed-conifer forests [J]. *Forest Ecology and Management*,2012,264:51-59.

[10] Arx G V, Dobbertin M, Rebetez M. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2012,166:144-155.

[11] Morecroft M D, Taylor M E, Oliver H R. Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998,90(1/2):141-156.

[12] Villegas J C, Breshears D D, Zou C B, et al. Eco-hydrological controls of soil evaporation in deciduous drylands: How the hierarchical effects of litter, patch and vegetation mosaic cover interact with phenology and season[J]. *Journal of Arid Environments*,2010,74 (5):595-602.

[13] Forrester J A, Mladenoff D J, Gower S T, et al. Interactions of temperature and moisture with respiration from coarse woody debris in experimental forest canopy gaps[J]. *Forest Ecology and Management*,2012,265: 124-132.

[14] 张宁南,徐大平,Morris J,等. 雷州半岛尾叶桉人工林耗水量研究[J]. *林业科学研究*,2007,20(1):1-5.

[15] Pfautsch S, Bleby T M, Rennenberg H, et al. Sap flow measurements reveal influence of temperature and stand structure on water use of *Eucalyptus regnans* forests[J]. *Forest Ecology and Management*,2010,259 (6):1190-1199.