

南京城市杂交马褂木林小气候特征研究

薛雪^{1,2}, 杨静³, 郑云峰⁴, 张金池^{1,2}, 庄家尧^{1,2}, 成举荣^{1,2}, 杨丹^{1,2}

(1. 南京林业大学 水土保持与生态修复实验室, 南京 210037; 2. 江苏省南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3. 科学出版社, 北京 100717; 4. 国家林业局 华东林业调查规划设计院, 杭州 310019)

摘要: 为了研究城市杂交马褂木林的小气候特征, 探讨杂交马褂木林对城市环境的影响机制, 在南京林业大学选择杂交马褂木林地作为研究对象, 以空旷水泥地作为对照, 使用 Decagon 微气象监测系统对其光照、温度、相对湿度等气候因子进行了长期监测, 从日、月、年等不同尺度对城市马褂木林的温湿度等气象因子进行了统计分析与比较。结果表明: 春、夏、秋季白天马褂木林气温(T_a)低于水泥地, 四季夜间林地 T_a 均略高于水泥地, 夏秋两季白天林地相对湿度(RH)高于水泥地, 夜间林地 RH 低于水泥地且相对湿度差较小; 水泥地 T_a 与 RH 日较差和日均值变异系数均高于林地, 4—11 月份林地 T_a 月较差和月变异系数均小于水泥地, 6—11 月林地 RH 月变异系数低于水泥地, 水泥地 RH 及 T_a 的年较差和年变异系数均略高于林地; 林地可以将日最高温和最低温出现频率最大的时刻分别推迟 2.5 h 和 0.5 h; 马褂木林气温与相对湿度存在显著的线性关系, 且呈现高温低湿、低温高湿的规律。说明, 城市马褂木林夏秋两季的白天具有显著的降温增湿作用, 在秋冬的夜晚具有显著的保温作用, 夏季能延缓高温、冬季能够推迟低温, 使得温湿度变化更为缓和。并且, 温湿度之间能够相互影响, 林地的环境因子也能显著影响水泥地的温湿度。

关键词: 森林气象学; 小气候; 微气象监测系统; 杂交马褂木; 城市森林

中图分类号: S718

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)04-0226-07

Microclimate Characteristics of *Liriodendron chinense* × *tulipifera* Forest in Nanjing

XUE Xue^{1,2}, YANG Jing³, ZHENG Yunfeng⁴, ZHANG Jinchi^{1,2},
ZHUANG Jiayao^{1,2}, CHENG Jurong^{1,2}, YANG Dan^{1,2}

(1. Soil and Water Conservation and Ecological Restoration Laboratory, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Science Press, Beijing 100717, China; 4. East China Forestry Planning and Designing Institute, Hangzhou 310039, China)

Abstract: This study explored the microclimate characteristics of *Liriodendron chinense* × *tulipifera* forest on air temperature (T_a) and relative humidity (RH), further explored the effective influence mechanism on the urban environment in Nanjing, which was significant for guiding urban green space planning. *Liriodendron chinense* × *tulipifera* forest in Nanjing Forestry University was selected carefully as experimental sample and the cement ground was selected as control group. The Decagon micro-meteorological monitoring system was used to conduct long-term monitoring on solar radiation, air temperature, relative humidity and other micro-climate factors as well. They were recorded every half an hour from March of 2013 to February of 2014. The results showed that the adjusting effects of *Liriodendron chinense* × *tulipifera* forest on air temperature and humidity were different in terms of seasons, the T_a of forest land during spring, summer and autumn in the daytime were unexceptionally lower than that of cement ground, as long as they were slightly higher at night than that of cement ground, the RH of forest land during summer and autumn in the daytime were unexceptionally higher than those of the cement ground, while lower at night. However, the daily range and daily variation coefficient of cement ground were higher than those of forest land. The most significant cooling effects showed in summer at 11:00 and cooling effects of forest land were less than the cement ground at

收稿日期: 2015-11-24

修回日期: 2015-12-07

资助项目: 国家自然科学基金(31170663); 江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641); 江苏省研究生科研创新工程项目(KYLX15_0914)

第一作者: 薛雪(1990—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向: 森林水文与水土保持。E-mail: 461720107@qq.com

通信作者: 庄家尧(1969—), 男, 安徽凤阳人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向: 森林水文与城市生态。E-mail: nlzjiayao@njfu.edu.cn

night. Secondly, the adjusting effects of urban forest on air temperature and humidity were different in terms of months. From June to September, T_a of the forest land and cement ground differed obviously, and daily average temperature was significantly lower than the cement ground. In February, forest land had the best nocturnal warming effect. From July to September, the difference between forest land and cement ground of monthly average RH was much more significantly than any other months. From April to November, monthly T_a range and variation coefficient forest land were lower than those of cement ground, as well as the monthly RH range and variation coefficient from June to November. The yearly range and variation coefficient of cement ground were slightly higher than those of forest land. In terms of frequency of maximum and minimum values, the time of occurrence on maximum T_a was postponed for about 2.5 hours, as long as the time of occurrence on minimum was delayed about half an hour. What's more, the T_a and RH showed a significant linear relationship, with the rules of high T_a and lower RH, low T_a and high RH. The study concluded that *Liriodendron chinense* \times *tulipifera* forest played the significant roles in adjusting humidification efficiency and cooling effects. *Liriodendron chinense* \times *tulipifera* forest has the abilities of delaying extreme temperature as well. On cold night during autumn and winter, *Liriodendron chinense* \times *tulipifera* forest could maintain the surrounding environment higher air temperature and warmer than the cement ground, and further keep the changing of the RH and T_a more smoothly and less fluctuation than the cement ground. What's more, the T_a and RH could influence each other dramatically. The microclimate forest land could affect the microclimate of cement ground as also, like T_a , RH and solar radiation.

Keywords: forest meteorology; microclimate; the meteorological monitoring system; *Liriodendron chinense* \times *tulipifera*; urban forest

森林小气候作为评价森林系统综合效益的一个重要特征,在协调生物与环境的关系方面具有重要作用,树木各组织器官的生长发育^[1]、光合蒸腾^[2-3]、凋落物(包括根)^[4]的分解和土壤酶活性^[5]等生理生化活动都受到生境微气象因子的限制。然而,随着温室效应和城市化进程的加快,局部地区明显的气候变化已经成为影响城市经济社会可持续发展的重要因素^[6-9],引起了人们对城市森林在优化城市生态系统结构与功能中作用的重视,尤其是对城市森林小气候的研究^[10-11]。众多研究表明,作为城市生态系统中具有自净功能的重要组成部分,森林可在地表与大气之间形成一个“绿色的调温层”^[12],在改善环境质量^[13]、维护生态平衡^[14]、保护人体健康^[15]、美化城市景观^[16]等方面具有其他城市基础设施不可替代的地位。因此,以水泥地面为参照条件下研究城市马褂木林的小气候特征在生态城市建设、改善居民生活质量等方面具有重要意义。

近年来国内外学者利用常规气象观测、地面遥感监测、数值模拟等研究方法对城市绿地的小气候特征进行了广泛的研究^[17-19],有力地论证了城市森林对城市热岛效应的缓解和控制作用,然而仍处于定性分析阶段^[20],且相关研究主要局限于卫星遥感资料的反演分析^[21-22],缺少全面的定量分析;此外,相关研究主要局限于特定时间段的小气候特征分析^[24-25],缺少长期连续高频次的观测数据作为研究支撑,并不能全面地

反映城市森林小气候对城市环境的影响过程和机理。

杂交马褂木(*Liriodendron chinense* \times *tulipifera*)最初由南京林业大学林木遗传育种学家叶培忠教授于1963年以中国马褂木(*Liriodendron chinense*)和北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*)为亲本进行杂交而获得^[25]。杂交马褂木因其生长快、材质好、观赏价值高和抗旱抗寒性等特征而被广泛应用于人工用材林培育和城市园林绿化中。然而,目前对杂交马褂木的研究局限于遗传多样性^[26]、育苗技术^[27]、抗性^[28]、光合特性^[29]等方面,鲜有专门对杂交马褂木林的小气候特征研究。本文依托南京林业大学杂交马褂木林长期定位气象观测数据,以日、月、年等不同尺度,对南京城市马褂木林的太阳辐射、温湿度等气象因子进行统计分析与比较,量化城市杂交马褂木林的小气候特征,不仅可以丰富关于杂交马褂木生理生态方面的研究内容,也为城市森林建设、建筑周边环境绿化和调节城市环境条件等方面提供重要的科学依据。

1 试验方法

1.1 样地设置与研究方法

南京位于长江下游中部富庶地区,江苏省西南部。地理坐标为北纬 $31^{\circ}14''$ — $32^{\circ}37''$,东经 $118^{\circ}22''$ — $119^{\circ}14''$,面积 $6\,597\text{ km}^2$;南京属于北亚热带季风气候,其特征是:季风显著,雨量充沛,年平均降水量为

1 019.5 mm,雨热同季^[23],年平均气温 15.5℃,年极端气温最高 39.7℃,最低-13.1℃,无霜期为 225 d;全市林木覆盖率 26.4%,建成区绿化覆盖率 45%,人均公共绿地面积 13.7 km²。

在南京林业大学选择马褂木林地作为试验样地,林地面积约 1 hm²,杂交马褂木平均胸径 30.3 cm,平均树高 20.2 m,平均冠幅 3.9 m,林分郁闭度在 0.8 以上,仪器布设于林内中心处,同时选择空旷水泥地面作对照,两处样地相距 30 m,分别设置 Decagon 微气象监测系统 1 套,在每个观测点距离地面 1.5 m 处设置 2 台记录仪,于 2013 年 3 月—2014 年 2 月连续监测空气温度(T_a)、相对湿度(RH)、太阳辐射(PYR)、风速风向和土壤温度等环境因子,每 30 min 记录一次数据。

四季的划分采用气候学统计法以公历 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。通过查询南京市历史天气,本文分别取晴天 2014 年 4 月 10 日、11 日、12 日,2013 年 7 月 11 日、12 日、25 日,2013 年 10 月 4 日、14 日、25 日,2014 年 1 月 1 日、15 日、23 日的各项监测数据,计算各月份 3 d 气象因子瞬间值的平均值,分别代表春、夏、秋、冬四季环境因子的日变化。

变异系数的计算公式为:变异系数(CV)=(标准偏差 SD/平均值 MN)×100%。

1.2 数据分析

使用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据处理和

表格制作,Origin 8.5 绘制图件,采用 SPSS 19.0 软件进行相关的统计与分析。

2 结果与分析

2.1 不同季节日变化特征

2.1.1 气温日变化特征 如图 1 所示,杂交马褂木林地(以下简称林地)和水泥地的温度日变化趋势相似,清晨 4:00—6:00 气温(T_a)最低,之后随时间变化逐渐上升,并呈单峰曲线,11:30—15:30 达到最高值,随后 T_a 下降。春季 7:00—18:00 气温大致呈现林地<水泥地,林地与水泥地平均温差 0.6℃,18:00—次日 7:00 气温呈现林地>水泥地,与水泥地相比,林地平均增温 0.4℃;夏季 7:00—19:00 气温呈现林地<水泥地,林地与水泥地气温平均温差 2℃,在 8:30—14:00 气温差异尤为明显,最高温差出现在 11:00,为 3.5℃,19:00—次日 7:00 气温呈现林地>水泥地,与水泥地相比,林地平均增温 0.5℃;秋季 8:00—16:00 气温呈现林地>水泥地,林地与水泥地气温平均温差 1.9℃,在 8:30—12:30 气温差异尤为明显,最高温差出现在 9:30,为 4.1℃,16:00—次日 8:00 气温呈现林地>水泥地,与水泥地相比,林地平均增温 0.7℃;冬季除 9:00—12:30,全天气温呈现林地>水泥地,与水泥地相比,林地平均增温 0.4℃。春、夏、秋季白天林地气温低于水泥地且温差较大,夏秋两季白天林地降温能力尤为显著;四季夜间气温均为林地略高于水泥地,表明马褂木林在夜间具有一定的保温作用。

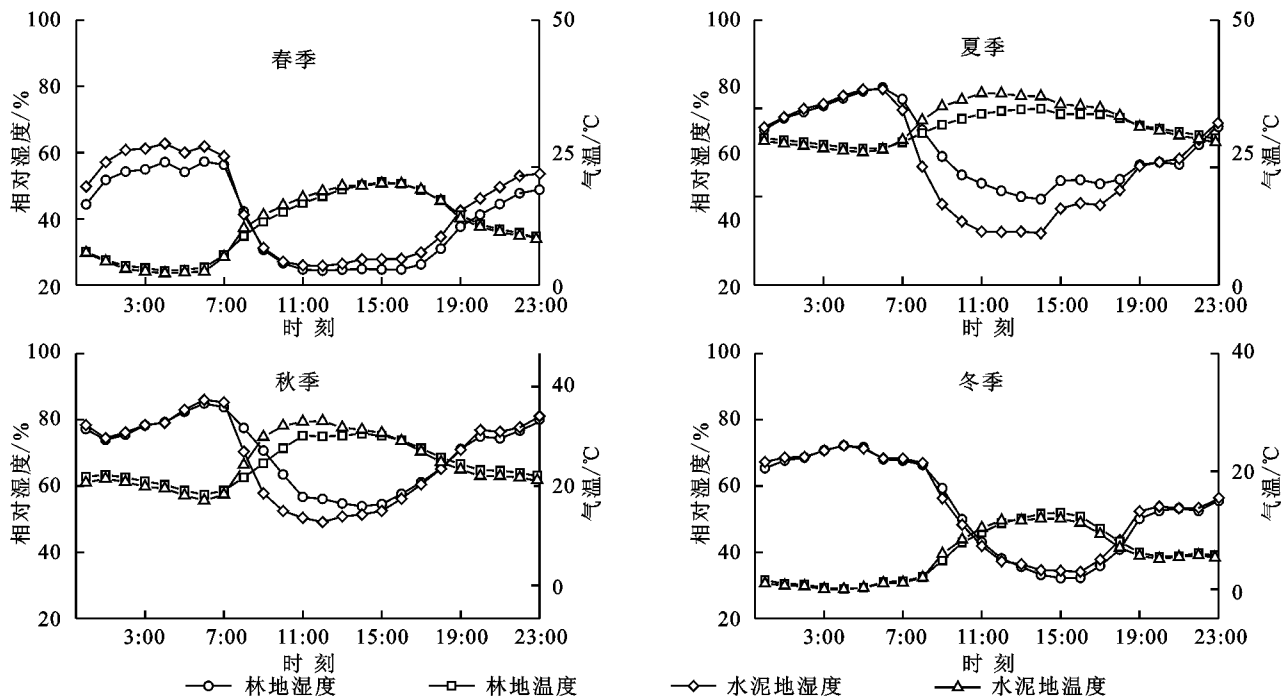


图1 不同季节温度与湿度日变化

2.1.2 相对湿度日变化特征 如图 1 所示,林地和水泥地相对湿度(RH)大致呈早晚高午间低的“U”型

的规律,春夏两季林地与水泥地相对湿度极值出现时间一致,峰值分别出现于 7:00 与 6:00,谷值分别出

现于 12:00 与 14:00;秋冬两季峰值出现时间不尽相同,秋季林地与水泥地峰值均出现于 6:00,谷值分别出现于 14:00 与 12:00,冬季林地和水泥地峰值均出现于 4:00,谷值分别出现于 15:00 与 16:00。春冬两季在 9:00—12:00 时间段内林地相对湿度高于水泥地,其他时段林地相对湿度低于水泥地且相对湿度差较小,夏秋两季白天林地相对湿度高于水泥地且相对湿度差较大,夜间林地相对湿度低于水泥地且相对湿度差较小,说明马褂木林在夏秋两季白天具有明显的增湿作用。

2.1.3 日较差与变异系数 如表 1 所示,4 个季节水泥地气温与相对湿度日均值变异系数(CV)均高于林地,春、夏和秋季变异程度较低,冬季较大;4 个季节水泥地 T_a 与 RH 日较差均大于林地,林地温湿度变化较水泥地更为缓和。

表 1 各季日均温变异系数与日较差

季节	样地	RH 变异 系数/%	T_a 变异 系数/%	RH 日 较差/%	T_a 日 较差/℃
春	林地	23.64	36.79	46.1	8.1
	水泥地	23.72	41.53	47.0	10.1
夏	林地	11.66	7.35	25.5	6.9
	水泥地	17.14	11.06	33.9	10.2
秋	林地	14.64	16.35	31.8	9.4
	水泥地	18.54	21.30	37.3	12.1
冬	林地	25.59	77.75	39.5	13.1
	水泥地	25.73	81.29	40.3	14.1

2.2 月变化特征

2.2.1 气温月变化特征 如图 2 所示,林地与水泥地月均温 2 月份最低,分别为 4.7℃和 4.8℃,之后月均温逐渐上升呈单峰变化,8 月份气温月均值最高,分别为 30.6℃和 31℃,随后月均温下降;2—10 月份林地月均温低于水泥地,其中 6—9 月最为明显,温差达到 0.4~0.5℃,与水泥地相比,11 月、12 月和 1 月林地月均温平均增加约 0.2℃。

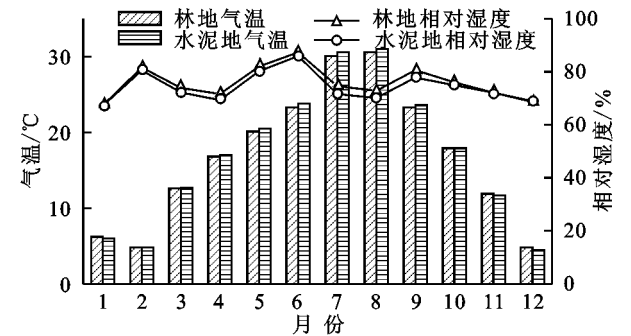


图 2 气温与相对湿度季节变化

由表 2 可知,4—11 月份气温月较差林地均小于水泥地,林地和水泥地气温月较差最大值分别出现于 2 月和 4 月,分别为 27.0℃和 27.4℃,最小值分别出现于 5 月和 6 月,分别为 14.6℃和 16.3℃;4—10 月气温月变异系数均保持在较小的范围内,除了 1—3 月,其他月份林地气温月变异系数均低于水泥地,林地和水泥地气温月变异系数最大值均出现于 2 月,分别为 106.67%和 103.83%,最小值均出现于 7 月,分别为 10.56%和 12.56%。

表 2 月变异系数与月较差

月份	变异系数				月较差			
	林地	水泥	林地	水泥	林地	水泥	林地	水泥
	相对湿度/%		气温/℃		相对湿度/%		气温/℃	
1	28.64	27.45	73.36	72.25	76.2	71.9	23.9	22.8
2	18.20	17.57	106.67	103.83	58.7	56.9	27.0	26.2
3	19.85	18.43	42.66	41.45	58.8	56.2	23.4	23.1
4	36.15	34.43	35.44	35.59	78.6	78.8	25.5	27.4
5	22.03	21.57	15.65	16.72	71.3	74.0	14.6	19.9
6	13.19	15.26	14.33	15.62	51.4	59.5	14.8	16.3
7	16.15	18.73	10.56	12.56	52.1	51.3	14.8	17.2
8	18.90	20.83	12.00	13.63	59.2	61.3	18.4	21.1
9	16.90	19.60	16.84	19.51	61.3	64.8	16.4	20.5
10	19.70	21.84	23.31	27.19	62.1	62.0	20.0	23.5
11	24.40	24.44	40.45	43.38	69.0	68.5	24.9	25.9
12	26.12	25.25	97.37	102.11	71.2	68.1	23.0	22.3

2.2.2 相对湿度月变化特征 如图 2 所示,相对湿度月均值呈波浪变化趋势,2—9 月波动较大,林地与

水泥地相对湿度月均值最大值出现在 6 月份,分别为 87.3%和 85.9%,最小值出现在 1 月份,分别为

67.3%和 67.1%;除 12 月份,林地相对湿度月均值均高于水泥地,其中 7—9 月最为明显,湿度差达到 2.8%,表明马褂木林具有一定的增湿能力,且夏季效果更为显著。

由表 2 可知,除 4—6 月、9 月,其他月份相对湿度月较差林地均高于林外,林地和水泥地相对湿度月较差最大值均出现于 4 月,分别为 78.6%和 78.8%,最小值分别出现于 6 月和 7 月,分别为 51.4%和 51.3%;除了 6—11 月林地相对湿度月变异系数低于水泥地外,其余月份林地均高于水泥地,林地和水泥地相对湿度月变异系数最大值均出现于 4 月,分别为 36.15%和 34.43%,最小值均出现于 6 月,分别为 13.19%和 15.26%。

2.3 统计特征

对全年林地和水泥地日最高温与日最低温出现的时刻进行统计,如图 3 所示,林地与水泥地日最高温出现的时刻主要集中在 11:30—15:30,日最低温出现的时刻主要集中 4:30—7:30;林地日最高温和日最低温出现频率最大的时刻分别是 14:30,6:30,分别出现 83 次和 77 次,占总数的 22.8%和 21.0%;水泥地日最高温和日最低温出现频率最大的时刻分别是 12:00,6:00,分别出现 60 次和 62 次,占总数的 16.3%和 17.0%。

如表 3 所示,水泥地相对湿度及气温的年较差和年变异系数均略高于林地,林地气温及相对湿度的年

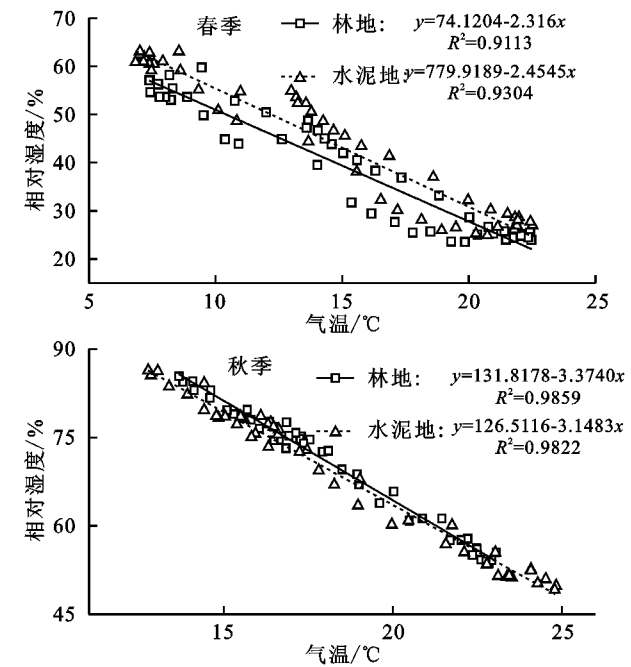


图 4 气温与相对湿度的相互关系

由表 4 可知,林地与水泥地的太阳辐射和相对湿度之间存在显著负相关关系,林地与水泥地的气温和太阳辐射之间均存在正相关关系,表明气温受太阳辐射的显著影响,太阳辐射和气温的增高,也会导致相

变化较水泥地更加缓和。

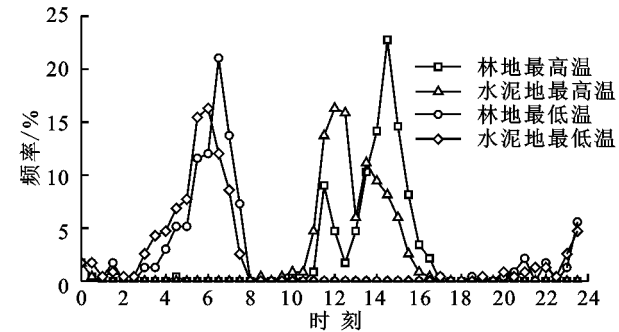


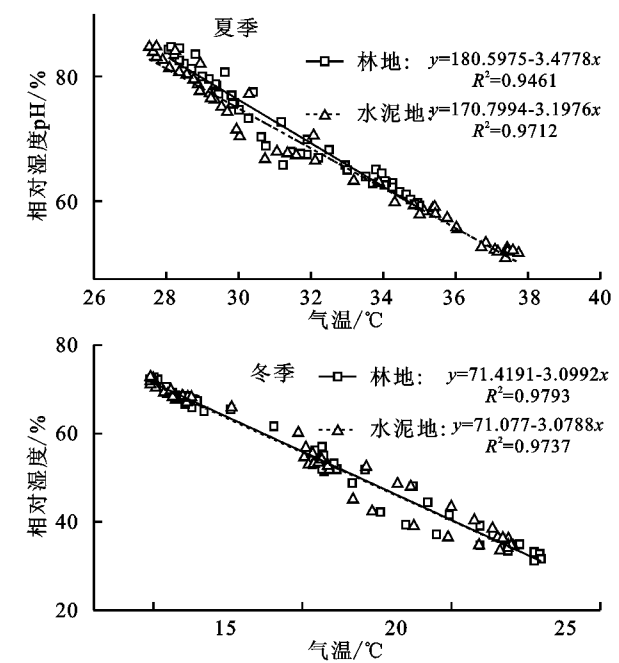
图 3 气温与相对湿度最值出现的频率分布

表 3 年变异系数与年较差

项目	相对湿度/%		气温/℃	
	林地	水泥地	林地	水泥地
变异系数/%	7.71	7.93	53.80	54.83
年较差	18.8	20.0	25.8	26.5

2.4 林地与水泥地各气象因子间相关性分析

图 4 是气温与相对湿度的相互关系图,由 R 值可知,四个季节的气温与相对湿度存在显著的线性关系,且呈现高温低湿、低温高湿的规律。春季与冬季,林地和水泥地分布点位较分散且大致相近,降温增湿效果差异不显著;夏季与秋季,林地观测数据主要集中于低气温、高湿度区段,而水泥地观测数据相对位于高气温、低气压区段。表明马褂木林在夏秋两季具有较好的遮阴、降温和增湿作用。



对湿度的显著降低。此外林地与水泥地的各气象因子之间均能够相互影响,说明马褂木地对环境因子的影响不局限于林内范围,也会影响附近下垫面明显不同的水泥地。

表 4 林地与水泥地气象因子相关性分析

项目	林地相对湿度	林地气温	林地太阳辐射	水泥地相对湿度	水泥地气温
林地太阳辐射	-0.434**	0.014			
水泥地相对湿度	0.980**	-0.142**	-0.463**		
水泥地气温	-0.082**	0.996**	0.007		
水泥地太阳辐射	-0.442**	0.273**	0.704**	-0.545**	0.326**

注: ** 表示 $p<0.01$ 。

3 讨论与结论

3.1 林地与水泥地气温特征

马褂木林地春季和夏季白天气温明显低于水泥地,秋季和冬季林地白天气温略高于水泥地,一年四季林地夜间气温均高于水泥地。说明与水泥地相比,林地在春季和夏季白天降温作用显著,这与孙金伟等^[19]的研究结果一致。夏季马褂木林内与水泥地空气温差明显,林内的日均气温明显低于空旷地。马褂木林生长繁茂,冠层郁闭度较大,能够有效地阻挡太阳辐射,而郁闭的林冠对晚间近地层的热交换起到一定的阻碍作用,使晚间林内热损失减少,而林木的蒸腾作用和光合作用也能散失大部分热量,起到降温作用;水泥地无植被遮蔽,白天受太阳的直接照射,使其获得的热量用于水分蒸发的较少,而多数用于加热空气,使得地表和空气增温显著,因而水泥地气温的日均值要明显高于林外,两地日均温差明显。12 月份和 1 月份,马褂木林内落叶树种树叶凋落,林内外接收的太阳辐射量的差异也减小,林内外空气交换也相对增强,所以此时的日均温差异并不明显。在秋冬两季,密集的枝干仍能削减吹过地面的风速,使空气流量减少,起到明显的保温保湿作用,其中,2 月份保温效果最强,秋季的白天温差高于夜间,保温效果最强时为 9:30。同一季节的不同时刻温湿度情况也有所差异。夏季的 11:00 时马褂木林降温效果最显著,夜间降温程度低于水泥地。可能是由于冠层阻挡了午间的大部分太阳辐射,以及森林的蒸腾作用,通过生理生态方面的调节降低了林地的高温,而夏季的冠层枝叶最为繁茂,降温作用更强。

对全年林地和水泥地日最高温与日最低温出现的时刻进行统计发现,马褂木林具有显著的缓解温度强烈变化的作用,夏季将高温推迟了 2.5 h,冬季将降温推迟了 0.5 h。林地气温的日变化与年变化与水泥地相比更为稳定,7 月份林地温度最为稳定,冬季的 1—3 月,林地由于具有强烈的保温作用,呈现较为剧烈的变化。

3.2 林地与水泥地的相对湿度特征

马褂木林和水泥地相对湿度(RH)大致呈早晚高午间低的“U”型的规律,一年四季出现峰值与谷值的时刻不尽相同,春冬两季在 9:00—12:00 时间段内

林地相对湿度高于水泥地,郭伟等^[30]研究也发现城市植物群落在秋季仍然具有降温增湿效应,并以正午时刻最为明显。其他时段林地相对湿度低于水泥地且相对湿度差较小,夏秋两季白天林地相对湿度高于水泥地且波动较大,夜间林地相对湿度低于水泥地且波动较小,说明马褂木林在夏秋两季白天具有明显的增湿作用,这与周立晨等^[31]的研究结果一致。春季林地相对湿度波动大于夏秋,可能是由于马褂木在春季枝叶迅速增加和生长,林冠下的太阳辐射、风速和蒸腾速率等波动性较大,而夏季林地结构基本处于稳定状态,秋季因树叶衰老凋落,林冠结构又发生动态变化;另外,与降雨的季节性变化也有关,这与张远彬等^[32]关于川西亚高山白桦林小气候的研究结果一致。

6 月份相对湿度最大,1 月份最小,12 月份林地相对湿度月均值低于水泥地,其他月份均高于水泥地,其中 7—9 月差异最大。这是由于马褂木林冠层的阻碍作用,林内风速较低,湍流交换作用弱,使得由林内下木层、草本蒸腾和土壤蒸发所产生的水汽难以散逸到林外,因而林内相对湿度较高,随着落叶树种叶片凋落,林冠的作用减弱,林下蒸腾作用也大大降低,林地土壤中含蓄水分多,可保持较多的林木蒸腾和地面蒸发的水汽,所以森林与水泥地的相对湿度差异降低。表明与水泥地面相比,马褂木林具有显著的增湿作用,夏季效果更为显著。

参考文献:

[1] 孟婷婷,倪健,王国宏.植物功能性状与环境 and 生态系统功能[J].植物生态学报,2007,31(1):150-165.

[2] 张赐成,韩广,关华德,等.樟树和桂花树光合最适温度对环境温度改变的响应[J].生态学杂志,2014,33(11):2980-2987.

[3] 管铭,金则新,王强,等.千岛湖次生林优势种植物光合特性对不同光环境的响应[J].应用生态学报,2014,25(6):1615-1622.

[4] 宋新章,江洪,张慧玲,等.全球环境变化对森林凋落物分解的影响[J].生态学报,2008,28(9):4414-4423.

[5] 万忠梅,宋长春.土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J].土壤学报,2009,40(4):951-956.

[6] Roth M, Oke T R, Emery W J. Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology[J]. Int. J. Remote Sens.,1989,10(11):1699-1720.

- [7] 宋轩,段金龙,杜丽平. 城市热岛效应研究概况[J]. 气象与环境科学,2009,32(3):68-72.
- [8] 杨萍,肖子牛,刘伟东. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析[J]. 大气科学,2013,37(1):101-112.
- [9] 曹爱丽,张浩,张艳,等. 上海近 50 a 气温变化与城市化发展的关系[J]. 地球物理学报,2008,51(6):1663-1669.
- [10] Jusuf S K, Wong N H, Hagen, et al. The influence of land use on the urban hest island in Sigapore[J]. Habitat Intemational,2007,31(2):232-242.
- [11] Fu H. Cause and effect of global climate warming. Journal of Capital Normal University[J]. Natural Science Edition. 2007,28(6):11-15,21.
- [12] Avissar R. Potential effects of vegetation on the urban thermal environment[J]. Atmospheric Environment, 1996,30(3):437-448.
- [13] Jim C Y, Chen W Y. Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou [J]. Journal of Environmental Management,2008,88(4):665-676.
- [14] Hutrya L R, Yoon B, Alberti M. Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization;a study of the Seattle, WA region[J]. Global Change Biology,2011,17(2):783-797.
- [15] 佟华,刘辉志,李延明,等. 北京夏季城市热岛现状及楔形绿地规划对缓解城市热岛的作用[J]. 应用气象学报,2005,16(3):357-366.
- [16] Yin H W, Xu J G, Kong F H. Impact of the amenity value of urban green space on the price of house in Shanghai[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(8):4492-4500.
- [17] 朱春阳,李树华,纪鹏,等. 城市带状绿地宽度与温湿效益的关系[J]. 生态学报,2011,31(2):383-394.
- [18] 张彪,高吉喜,谢高地,等. 北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估[J]. 生态学报,2012,32(24):7698-7705.
- [19] 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.
- [20] Sander H, Polasky S, Haight R G. The value of urban tree cover: A hedonic property price model in Ramsey and Dakota Counties, Minnesota, USA[J]. Ecological Economics,2010,69(8):1646-1656.
- [21] 叶柯,覃志豪. 基于 MODIS 数据的南京市夏季城市热岛分析[J]. 遥感技术与应用,2006,21(5):426-431.
- [22] 彭保发,陈端吕,李文军,等. 土地利用景观格局的稳定性研究:以常德市为例[J]. 地理科学,2013,33(12):1484-1488.
- [23] 唐罗忠,李职奇,严春风,等. 不同类型绿地对南京热岛效应的缓解作用[J]. 生态环境学报,2009,18(1):23-28.
- [24] 闫少锋,张金池,张波,等. 2008 年南京市热岛效应演变特征及其对城市居民生活影响[J]. 气象与环境学报,2011,27(1):14-20.
- [25] 郑万钧. 中国树木志[M]. 2 卷. 北京:中国林业出版社,1985.
- [26] 李建民,周志春,吴开云,等. RAPD 标记研究马褂木地理种群的遗传分化[J]. 林业科学,2002,38(4):61-66.
- [27] 龚细娟,肖兴翠,梁丽容,等. 杂交马褂木幼林施肥试验[J]. 湖南林业科技,2013,40(3):23-26.
- [28] 朱玲,笪红卫,唐罗忠. 干旱胁迫对杂种马褂木形态特征的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(10):9-13.
- [29] 吴晓星,房义福,姜楠南,等. 杂交马褂木回交优株的光合特性[J]. 经济林研究,2011,29(4):36-40.
- [30] 郭伟,申屠雅瑾,赵丽丽,等. 秋季北方城市植物群落对温湿度的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(4):1422-1426.
- [31] 周立晨,施文,薛文杰,等. 上海园林绿地植被结构与温湿度关系浅析[J]. 生态学杂志,2005,24(9):1102-1105.
- [32] 张远彬,王开运,鲜骏仁,等. 川西亚高山白桦林小气候的时空动态特征[J]. 应用与环境生物学报,2006,12(3):297-303.

~~~~~

(上接第 225 页)

- [10] 王穗,张建生,彭尔瑞,等. 云南省耕地需求量预测研究[J]. 云南农业大学学报,2010,25(2):256-263.
- [11] 摆万奇,赵士洞. 土地利用变化驱动力系统分析[J]. 资源科学,2001,23(3):39-41.
- [12] 白淑英,张树文,张养贞. 耕地分布及其扩张过程与土壤类型空间相关分析[J]. 土壤通报,2005,36(5):14-16.
- [13] 张耀武. 中国耕地质量等级调查与评定:云南卷[M]. 北京:中国大地出版社,2010.
- [14] 周乐福. 云南土壤分布的特点及地带性规律[J]. 山地研究,1983,1(4):31-38.
- [15] 虞光复,陈永森. 论云南土壤的地带分布规律[J]. 云南大学学报,1998,20(10):55-58.
- [16] 张红,周生路,吴绍华,等. 江苏省农用地质量空间格局及其影响因素分析[J]. 资源科学,2008,30(2):221-227.
- [17] 陈作雄. 论广西土壤的垂直地带性分布规律[J]. 广西师范学院学报:自然科学版,2003,20(1):66-72.
- [18] 王文富. 云南土壤[M]. 昆明:云南科技出版社,1990.
- [19] 王建国,单红艳,杨林章. 我国农用地分等定级理论与方法讨论[J]. 农业系统科学与综合研究,2002,18(2):84-85.