

城市不同绿地垂直热力效应比较

郝兴宇 ,蔺银鼎* ,武小钢 ,王 娟 ,梁 峰 ,梁 娟

(山西农业大学 山西太谷 030801)

摘要 城市绿地改变了城市地表面的辐射状况以及近地面大气的辐射状况 ,使绿地附近大气热力特性发生变化 ,产生绿地与非绿地之间的温度差异 ,形成局地小气候环流。不同类型城市绿地热力效应不同 ,产生的局地环流强度也存在差异 ,对城市生态环境的改善效果也各不相同。研究不同类型城市绿地热力特征 ,揭示不同类型城市绿地的小气候效应差异 ,将有助于城市园林绿地规划与管理 ,有助于改善城市生态环境。试验者在太原市区选择了 3 种不同的城市绿地——城市森林、灌丛、草坪。在氢气球上悬挂测绳 ,利用测绳上系有的温湿度记录仪对不同绿地周边温度时、空变化进行测试。通过对所得试验数据分析 ,得出昼间不同绿地热力变化规律以及 14 00 ~ 15 30 不同绿地空间温度场分布特点。结果表明 :不同绿地周边都存在明显的热力效应 ,森林周边热力效应较其它绿地更明显 ,14 00 ~ 15 30 冷源效应在 1.5、3m 高度可影响到距林缘 14m 处 ,17 00 ~ 18 30 森林有明显的热源效应 ,灌丛和草坪的冷热源效应较森林明显减弱 ,影响的高度和距离也明显减小 ,14 00 ~ 15 30 ,不同绿地周边气温垂直结构中都有一个高温中心和低温中心 ,说明绿地与非绿地之间应该存在着局地小气候环流。这些研究结果为进一步研究不同城市绿地小气候环流提供了依据。

关键词 城市绿地 温度 热力效应

文章编号 :1000-0933 (2007)02-0685-08 中图分类号 :Q948 ,S718 文献标识码 :A

Vertical thermal characteristics analysis between different urban green land

HAO Xing-Yu ,LIN Yin-Ding* ,WU Xiao-Gang ,WANG Juan ,LIANG Feng ,LIANG Juan

Shanxi Agricultural University ,Taigu 030801 ,china

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (2) 0685 ~ 0692.

Abstract : Because of significant difference of the radiant intensity and atmosphere between green land and non-green land , and variation in the different temperature , microclimate circumfluence can form. The thermal characteristics and the intensity of microclimate circumfluence are different between the various kinds of landscapes. The different environment effects are experienced by different city landscapes which have different green distributions. Study on the thermal characteristics of different green distribute landscapes in the city will help to improve the management and maintenance of city environment ,and keep it at a high level. Three kinds of different green-covered land (city forest , shrubbery and lawn) were selected in Taiyuan city to carry out this experiment. The temperature was recorded by thermometer attached to a hydrogen balloon. A conclusion was reached by analyzing the survey data , using thermal characteristics during the day and the spatial characteristics of the temperature fields in the afternoon. All these kinds of green land have obvious thermal characteristics. Especially the thermal characteristics in forest are much more in evidence than the other two green-covered

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (30271102) ;山西省自然科学基金资助项目 (20031074)

收稿日期 2006-08-03 ;修订日期 2007-01-09

作者简介 郝兴宇 (1976 ~) 男 ,山西文水人 ,讲师 ,主要从事农业气象学与生态学研究. E-mail :lipinghxy@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :sxnd_lyd@sohu.com

Foundation item :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30271102) and Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 20031074)

Received date 2006-08-03 ; **Accepted date** 2007-01-09

Biography :HAO Xing-Yu , Prelector , mainly engaged in agriculture meteorology and ecology. E-mail :lipinghxy@126.com

lands. The cool-edge influence was up to 14 meters from the edge of the forest in height and from 1.5 meters to 3 meters in diameter. The influence could increase the temperature at dusk. The effect of shrubbery and the lawn on decreasing or increasing the temperature was weaker than the forest and the effective height and distance are also much shorter than the forest. All the spatial temperature fields of different green lands have both high temperature and low temperature centers. All this provides strong evidence of the existence of microclimate circumfluence between different green lands and this will help in further study on microclimate circumfluence formed between different urban green lands.

Key Words : urban green land ; temperature ; thermal characteristics

气象因子是影响植物分布及其生长的重要因素,而植物对局地小气候又会产生一定的调节作用。随着城市建设发展,人们日益注意到城市绿地对城市小气候的调节作用,即随着城市绿地的建设和发展,绿地内外的小气候因子将随之变化。低层大气主要靠吸收地面辐射的长波辐射而升温,随着城市绿地的建设以及绿地植被的不断生长,下垫面的结构发生了变化,特别是木本植物,其树冠的截留作用改变地面的辐射状况,从而改变大气对地面辐射的吸收,使绿地附近热力特性发生变化,降低当地和下风方向的空气温度^[1]。在风力静稳的情况下,由于白天绿地内气温低于邻近空旷地,低空冷空气由绿地流向非绿地形成绿地与非绿地之间的局地环流,有时可产生 1m/s 的风^[2]。这种热力环流势必使绿地内及其周边的温、光、水、热进行重新组配,从而使绿地内外小气候发生变化^[3-5]。有学者对不同类型林地的环境边缘效应进行过研究^[6-8],研究结果表明林地与周围非林地(或林窗)之间存在明显的冷热源效应,说明林地与周围非林地之间存在着产生局地环流的热力条件。张强等通过对沙漠绿洲局地小气候的研究发现^[9,10],沙漠绿洲白天不仅存在“绿洲冷岛”效应,而且绿洲和沙漠之间的地表差异可以产生绿洲风环流,在绿洲低层存在风的流出,高层存在风的流入,并且在绿洲上还存在下沉运动。虽然城市绿地面积较小,但城市绿地与非绿地之间仍然会形成一定的局部小环流^[11],这种局地环流对改善城市生态环境,提高居民生活质量起到重要作用。

不同类型城市绿地热力效应不同,产生的局地环流强度也存在差异,对城市生态环境的改善效果也将各不相同。研究不同类型城市绿地热力特征,揭示不同类型城市绿地的小气候效应差异,将有助于城市园林绿地规划与管理,有助于利用城市绿化改善城市生态环境。国内外对城市绿地小气候效应的研究已很多^[12-15],但这些研究仅限于对单一观测点分析或单一方向、单一高度的分析研究,未见对不同绿地垂直热力效应变化规律的研究。本文利用 2005 年 7 月在太原市城区不同类型绿地周边不同高度温湿度观测资料,试对绿地边缘空间热力特征进行分析,为进一步探讨城市绿地局地小环流和城市绿地小气候形成机制提供科学依据。

1 样地概况与研究方法

本试验主要选择山西省太原市城区的代表性植物群落杨树片林(以下称森林)、禾本科草坪和以丁香(*Syzygium aromaticum*)为主的灌木林(以下称灌丛)作为实验对象。森林中杨树生长年限为 15a,平均冠高 7.5m 左右,平均树高 9.0m 左右,胸径在 11~16cm 之间,绿地边长为 65×35m,草坪为早熟禾(*Poa pratensis*)、黑麦草(*Lolium perenne* Linn)与紫羊毛(*Festuca rubra* L)的混播 5 年生草坪,草坪边长为 110×100m;灌丛为丁香(*Syzygium aromaticum*)、黄栌(*Cotinus coggygria* Scop)和榆叶梅(*Amygdalus triloba*)的混栽片林,平均冠高 3.0m 左右,平均树高为 3.5m 左右,绿地边长为 70m×50m。3 个样本地周围的下垫面为水泥铺装,绿地周围 20m 以内基本无遮挡。

利用 HOBO Pro 系列数据计录仪(Onset 计算机公司生产温度测量精度 ±0.2℃,分辨率 ±0.01℃;湿度测量精度 ±3%)对不同植物群落斑块周边温度和湿度时、空变化进行测试。在每个样本的四周每隔 10m 确定 1 条垂直于样本的直线。在水平方向上从绿地的边缘开始,每隔 2m 设 1 个测点。在每个测点的垂直方向上用氢气球拉起 1 条测绳(灌丛和草坪用木杆)。从地面 1.5m 处开始,测绳上每隔一定距离系 1 只测试仪。其中森林的仪器垂直间隔 1.5m,其他两类绿地的仪器垂直间隔 0.5m)。每天测 3 次(10:00~11:30;14:00~15:30;17:00~18:30)每次持续 90min。挑选气候相近的白昼重复测试 3d。测试仪的读数设为每分钟 1 个。

数据统计分析取 90min 内所有数据的平均数。对照温度是指测试点连接线的延长线上不受周边环境影响的空旷地带所测得的相应数据,用距离地面最远的测点所测得的数据作为对照温度,距离绿地边缘 20 m (在预试验中发现距离绿地 20m 以后基本就不再受绿地的影响)。为避免外界大气候对绿地小气候环流的影响,本试验在晴朗无风或风力小于 3 级的天气条件下进行观测。测试时间 2005 年 7 月。

2 结果与分析

2.1 不同绿地周边热力效应的水平变化

2.1.1 森林周边热力效应的水平变化

昼间不同时间 (10:00~11:30, 14:00~15:30, 17:00~18:30)森林周边各观测点不同高度气温与对照点差值 (ΔT_s) 的水平分布如图 1 所示。由于树冠的蒸腾耗热以及树冠对日光的遮蔽作用使森林成为一个“冷源”。森林中冷空气气压高,林外气温高形成低压,空气由高压区向低压区流动,冷空气由林中向林外流动。由图 1 (a) 可见, 10:00~11:30 各高度气温在森林周围水平距离 6m 以内较对照都低 ($\Delta T_s < 0$), 其中 3、9、10.5 m 高度处较其它高度温差更明显, 10.5 m 高度处在距离林缘 10m 处温差仍为负值 ($\Delta T_s = -0.2^{\circ}\text{C}$)。

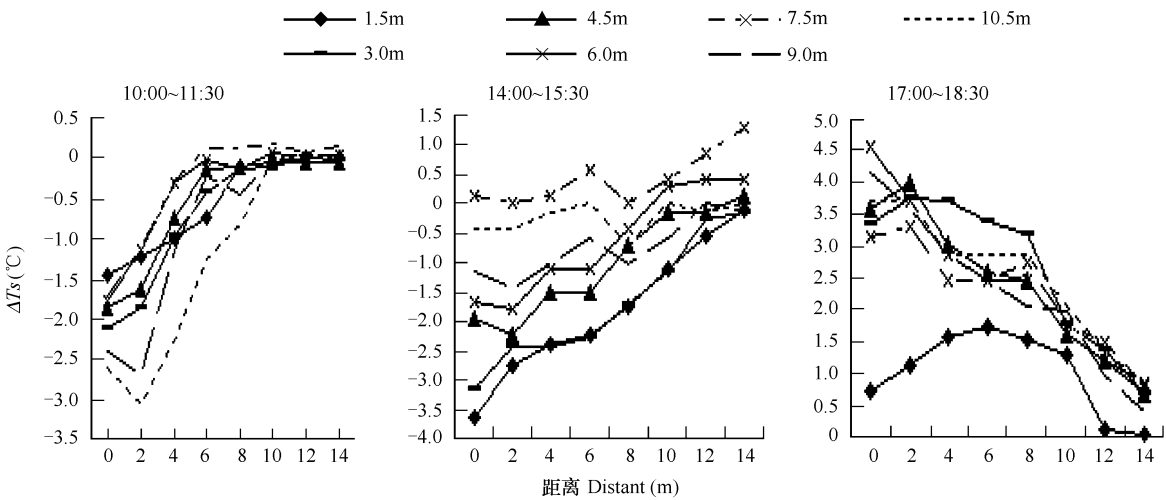


图1 森林周边不同高度上气温的水平分布

Fig.1 Level variation of air temperature around the forest at the different height

14:00~15:30,森林内 7.5 m 左右为树木枝叶最密集的地方,所以这一高度接受到的太阳辐射最多,是林内气温最高的地方,在这一高度上林内气温也较周围气温要高,出现“热源”效应。由图 1b 可见除 7.5m 高度与对照温差为正 ($\Delta T_s > 0$) 外,其它各高度都有一定负温差,随高度的增加 (1.5~10.5 m) 各测点与对照的温差逐渐减小,其中 1.5、3m 高度温差最大, ΔT_s 最高可达 -3.65°C 。人们日常户外活动多在 3m 以内,在气温最高时段内森林周边气温较对照较低,改善人们户外活动环境。水平方向上随着与林地距离的增加,冷空气输送能力减弱,与对照点温差逐渐减小。1.5、3m 高度处,在距离林缘 14m 处温差仍为负值,可见 10:00~11:30 森林的降温效果可达 14m 以上。

17:00~18:30,对照点没有树木的遮蔽,地面有效辐射较高,地面失热速度较林地快,气温变化也较林地附近快。林地周围气温与对照点的温差都为正温差 ($\Delta T_s > 0$) (图 1c)。随着水平距离的增加,因热量扩散距离的增加温差逐渐减小。1.5m 高度处由于离树冠较远,增温效应较其它各高度较小。

2.1.2 灌丛周边热力效应的水平变化

图 2 显示了昼间不同时段灌丛周边各观测点不同高度气温与对照点差值 (ΔT_g) 的水平分布。在 10:00~11:30 (图 2a), 1.5、2m 高度处在距林缘 8m 内温差均为负值,其中 2m 高度距林缘 0m 处负温差最大 $\Delta T_g = -2.1^{\circ}\text{C}$ 。其它高度除林缘附近有较大负温差外温差都很小且多为正温差。14:00~15:30 (图 2b),灌丛“冷源”

效应加强,负温差较 10 00~11 30 大。特别是 1.5m 高度处负温差最大,在距林缘 0m 处 $\Delta T_g = -2.5^{\circ}\text{C}$ 。随距林缘的距离加大温差逐渐减小,距林缘 8m 处降为 $\Delta T_g = -0.5^{\circ}\text{C}$,10m 以后温差不明显 (ΔT_g 绝对值小于等于 0.1°C)。2m 高度由于灌丛枝叶接受的太阳辐射较多,“冷源”效应较 10 00~11 30 减弱,但在距林缘 6m 以内仍有一定负温差(林缘处最大为 $\Delta T_g = -1^{\circ}\text{C}$)。2.5、3m 高度距林缘 4m 以内为负温差,距林缘 4m 以后温差不明显。3.5m 高度各观测点与对照无明显温差,可见在 14 00~15 30 灌丛在 2m 以上冷源效应开始减弱,高于树冠高度降温效应消失。17 00~18 30 (图 2c),由于树冠的保温效应,1.5、2m 高度处在距林缘 8m 内温差虽然仍为负值,但强度较 10 00~11 30 和 14 00~15 30 要弱的多(最大负温差仅为 -0.44°C),而 2.5m 高度以上林缘水平距离 6m 以内温差均为正值 ($\Delta T_g > 0$)。

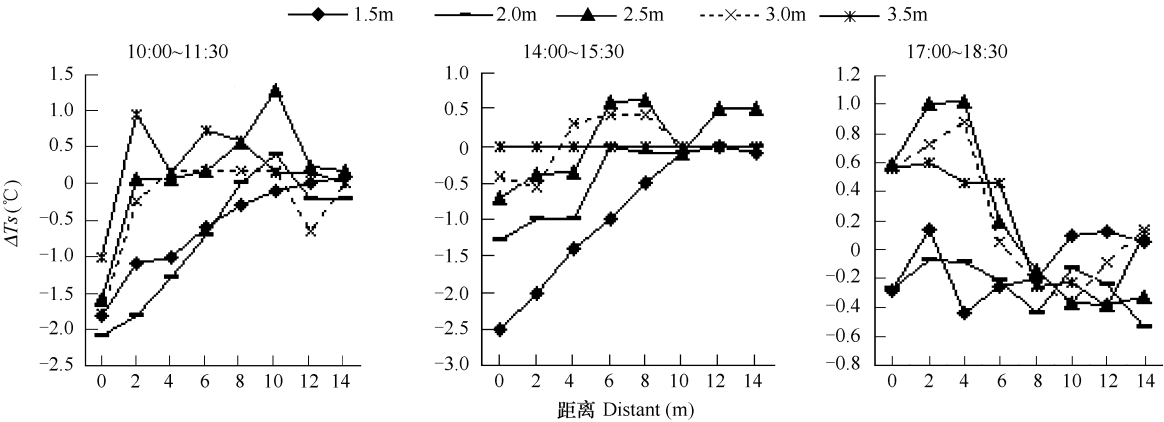


图 2 灌丛周边不同高度气温的水平分布

Fig. 2 Level variation of air temperature around the shrubbery at the different height

2.1.3 草坪周边热力效应的水平变化

昼间不同时段草坪周边各观测点不同高度气温与对照点差值 (ΔT_c) 的水平分布如图 3。10 00~11 30 (图 3a),草坪边缘附近 (4m 以内) 各高度温差均为负值 ($\Delta T_c < 0$),但随高度和水平距离的增加负温差很快减小。1.5m 高度处温差最大(距草坪边缘 0m 处温差 $\Delta T_c = -1.7^{\circ}\text{C}$),在距草坪边缘 14m 处温差仍为负值 ($\Delta T_c < 0$)。2、2.5m 高度较 1.5m 高度处负温差明显减小,在距草坪边缘 8m 以后不再有负温差,而 3、3.5m 高度负温差很小且距草坪边缘 4m 以后负温差基本消失。

14 00~15 30 (图 3b),经过整个 10 00~11 30 水汽蒸发以及草坪内植物的蒸腾作用使草坪内地表附近的水分减少(湿度观测结果验证了这一现象^①),而草坪内植物较乔木和灌丛的根系要小的多不能把深层土壤的水分吸收上来用于蒸发,所以 14 00~15 30 草坪内的水分蒸发和蒸腾较 10 00~11 30 要小,水分蒸发和蒸腾要消耗大量的热,使 14 00~15 30 草坪的冷源效应较 10 00~11 30 要小很多,仅 1.5m 高度距边缘 6m 之前有明显负温差,其它温差为不明显或为正温差。17 00~18 30 (图 3c),1.5m 高度各观测点负温差较 14 00~15 30 又有所减弱,最大负温差为距草坪边缘 0m 处 $\Delta T_c = -0.92^{\circ}\text{C}$,其它高度各观测点温差与 14 00~15 30 变化相似。

2.2 不同绿地周边热力效应的水平变化比较

人们日常户外活动多在 3m 以内。为了更明显比较出 3 种绿地昼间热力特征的差异,并了解不同绿地对改善城市环境的差异,对不同绿地周边不同时段 1.5、3m 高度水平方向热力特点作了进一步比较分析。

2.2.1 3 种绿地 1.5m 高度热力效应的水平变化比较

10 00~11 30 (图 4a),草坪、灌丛地表水分及露水含量大,地表蒸发和植物蒸腾耗热量大,降温效果与森

① 简银鼎,等. 城市典型植物群落生态效应的时空格局研究(待投稿).

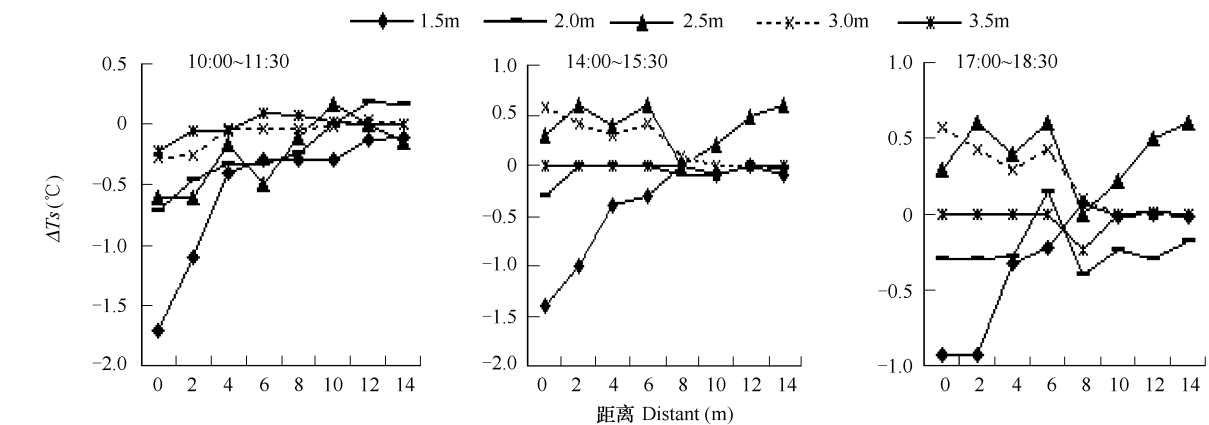


图3 草坪周边不同高度气温的水平分布
Fig.3 Level variation of air temperature around the lawn at the different height

林接近,在 1.5m 高度 3 种绿地与对照的温差水平分布差异不大。14 00~15 30 (图 4b),随着气温升高地表水分蒸发完后,草坪、灌丛根系浅不能将深层土壤水分吸收上来用于蒸腾,且森林树冠具有较强的遮蔽效应,森林的冷源效应最强 ($\Delta T_s = -3.65 \sim -0.1^{\circ}\text{C}$)。灌丛遮蔽作用和根系吸收水分能力又较草坪强,因此灌丛冷源效应又较草坪强 ($\Delta T_g = -2.5 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_c = -1.4 \sim 0^{\circ}\text{C}$)。17 00~18 30 (图 4c),森林具有保温效应各观测点均为正温差 ($\Delta T_s = 1.74 \sim 0.05^{\circ}\text{C}$)。灌丛和草坪周边各测点基本为负温差,灌丛由于树冠仍有一定的保温效果,所以其负温差较草坪要小 ($\Delta T_g = -0.44 \sim 0.13^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_c = -0.99 \sim 0.08^{\circ}\text{C}$)。

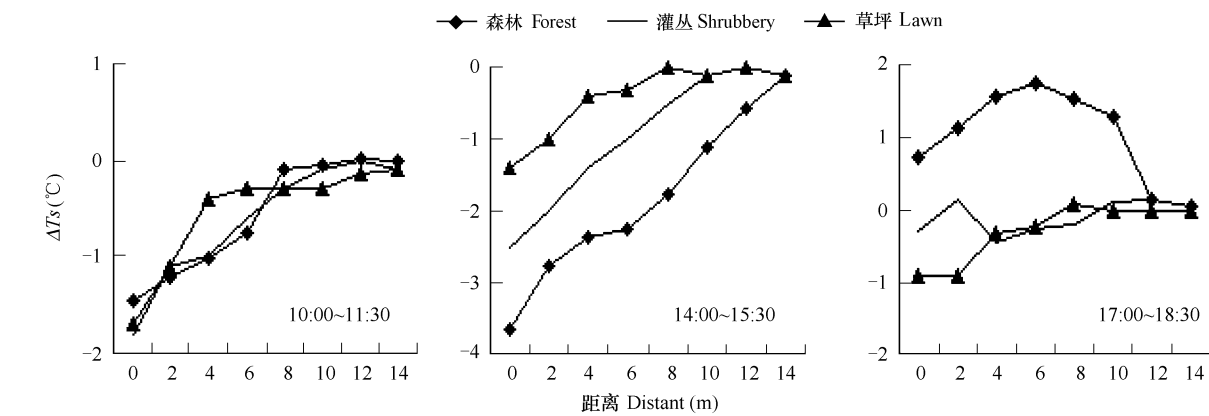


图4 不同绿地 1.5m 高度气温差的水平变化
Fig.4 Variation in air temperature difference between the wood、the shrubbery and the lawn at the high of 1.5m

2.2.2 不同绿地 3m 高度热力效应的水平变化比较

10 00~11 30 (图 5a),森林各测点与对照有较明显负温差,而灌丛和草坪仅在绿地边缘有明显负温差且强度和延伸距离较森林要弱的多。14 00~15 30 (图 5b),森林周边负温差较 10 00~11 30 加强,而灌丛负温差较 10 00~11 30 减弱,草坪周边则出现正温差。17 00~18 30 (图 5c),3 种绿地周边与对照温差均表现为正温差,森林温差较大。

2.3 14 00~15 30 不同绿地周边气温垂直空间分布

14 00~15 30 是绿地冷源效应最突出的时段,对这一时段绿地周边气温垂直空间分布进行了分析比较。森林周边气温垂直空间分布图 (图 6)表明:在森林周边的空间温度场中存在一个明显的低温中心和高温

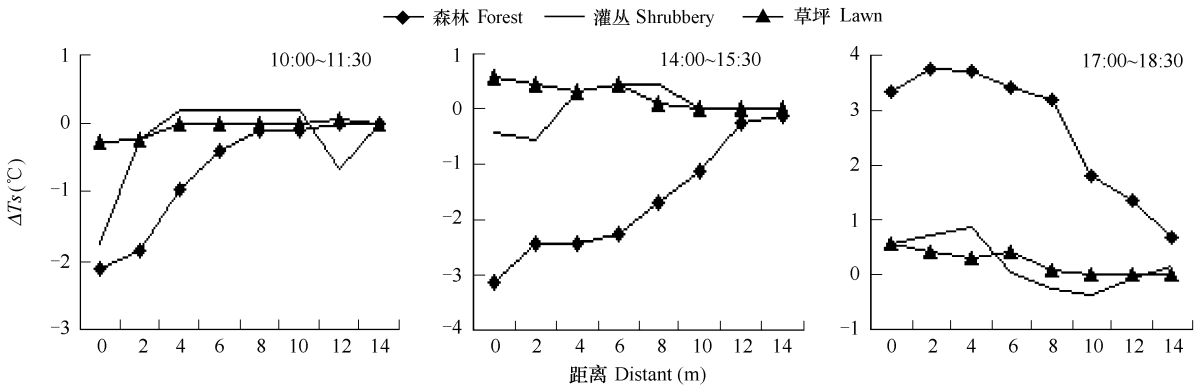


图5 不同绿地 3m 高度气温差的水平变化

Fig. 5 Variation in air temperature difference between the wood, the shrubbery and the lawn at the high of 3m

中心,说明森林与周围非绿地之间的确存在着一个局地的小气候环流。这个局地环流的结构应该是:在 3m 以下,森林为冷中心,冷空气由森林向周围空地流动,在这一冷空气的影响下 3m 以下气温较 3m 以上气温低(在没有绿地影响的情况下,白天由于地面接受太阳辐射的缘故,地面为热源,离地面越近气温越高)。在距林缘 10m 以后的较高气层(6m 到 10m 高度处)存在一个高温中心 H,这是由于在 6m 到 10m 高度处空气是由空地向绿地流入的。高温中心和低温中心的存在位置与森林周边的闭合环流相吻合。高温中心的位置延伸到距林缘 14m 以后,说明在夏季 14:00~15:30 森林产生的小气候环流水平范围要大于 14m。

通过灌丛和草坪的气温垂直空间分布图(图 7,图 8)也可以发现高温中心和低温中心的存在,但与森林不同的是高温中心 H 位于地面(因森林 14m 以后未设观测点,故森林近地面的高温中心未观测到)这一高温中心是由于空地地表加热造成的,被加热的热空气会向上运动,到达一定高度后向绿地运动,在图中虚线所在

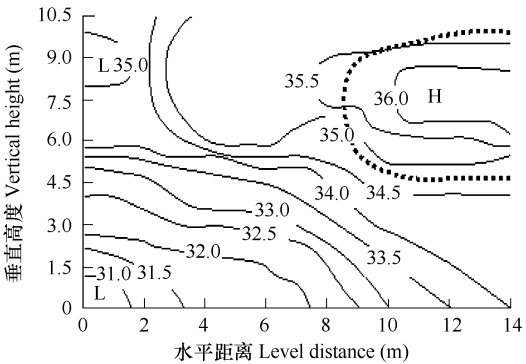


图6 森林周边气温垂直空间分布

Fig. 6 vertical spatial distribution of air temperature around the forest
H: 高温中心 high temperature center, L: 低温中心 low temperature center;下同 the same below

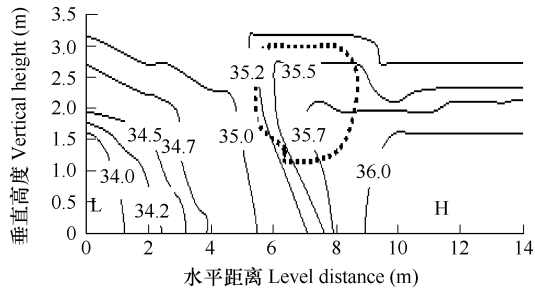


图7 灌丛周边气温垂直空间分布

Fig. 7 Vertical spatial distribution of air temperature around the shrubbery

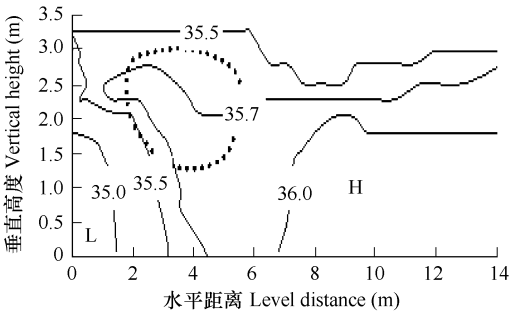


图8 草坪周边气温垂直空间分布

Fig. 8 Vertical spatial distribution of air temperature around the lawn

的位置形成一个次高温中心。灌丛小气候环流形成的次高温中心应在距林缘 6m 到 9m 离地面 1.5m 到 3m 高度的范围内,草坪次高温中心应在距林缘 3m 到 6m 离地面 1.5m 到 3m 高度的范围内,次高温中心的位置较高温中心有向绿地倾斜的趋势。灌丛和草坪周边小气候环流区域较森林要小的多,森林周边环流范围要大于 14m 以上,而灌丛和草坪环流应该在 10m 左右和 8m 左右的范围内,这一结果和水平分析结果基本吻合。

3 结论与讨论

绿地与非绿地之间的温差、气压、空气密度是产生局地环流的主要因素,而温度变化决定其它两个因素的变化^[6]。绿地与非绿地之间温差越大,产生局地环流的强度就越大,由不同城市绿地边缘热力分布情况可见,在不同时段绿地边缘气温以绿地为中心有不同程度的垂直和水平梯度变化,10:00~11:30 和 14:00~15:30 距离绿地越近气温越低,并随高度的增加绿地的冷源效应减弱。因此,在城市绿地附近 1.5m 或 3m 以下高度可以产生可观的局地风,这种局地风对降低周围环境温度,增加非绿地空气湿度,改善城市生态环境起到了关键的作用^[11,13,14]。

颜宏和 Anthes^[7]的研究表明不均匀的下垫面可以改变垂直和水平方向的湍流输送,在适合的天气背景下,可激发有意义的中尺度次级环流,对局地气候产生影响。城市绿地改变了城市下垫面的热力性质,使下垫面不均匀性增加。14:00~15:30 绿地周边气温垂直结构中在高温中心、低温中心以及次高温中心,与绿地小气候环流相吻合。这一现象部分证实了城市绿地与周围非绿地之间存在一定强度的热力环流。这种空气运动对水、热输送会有明显的贡献。

在城市建设发展过程中,城市建筑密度加大,绿地面积在相对减少,利用有限的绿地面积改善城市生态环境是目前一项艰巨的任务。研究不同城市绿地周边热力特征,确定不同绿地小气候环流强度,将有助于城市绿化中因地制宜合理安排各种绿地种类及面积。森林由于其树冠的遮阴效果强,具有庞大根系吸收土壤水分可以保证叶面蒸腾耗热,对周边的热力效应较灌丛和草坪强度强,垂直方向上影响的高度高,水平方向上延伸距离远,因此森林周边局地环流的热力条件最好,较其它绿地更有利于改善城市小气候环境。

城市绿地热力特征除了受植被种类影响外,还受到绿地面积、植被带宽等因素的影响。但现代城市中适合小气候热力结构观测的绿地很少,特别是成片而且周围有一定开阔地的城市森林和灌丛很难找到。因此,本试验仅对 3 种有代表性的城市绿地进行了研究,未考虑其它因素对绿地小气候热力结构的影响。

References :

[1] Taha H, Akbari H, Rosenfeld A. Heat island and oasis effects of vegetative canopies : micrometeorological field measurements. *Theorappl Climatol* , 1991 ,44 :123 — 138.

[2] Pu Y Y. Worker of virescence. Chengdu :Electron Science and Technology University Press ,2004. 2 — 3.

[3] Leng P S. The foliage ecology of city. Beijing :China Architecture Industry Press ,1995 :94 — 150.

[4] Leng P S. The ecology of city. Beijing :Science Press ,2000. 65 — 96.

[5] Tuner JT. Greenways , blueways skyways and other ways to a better London. *Landscape and Urban Planning* ,1995 ,33 :269 — 282

[6] Zhang Y P, Ma Y X, Liu Y H, *et al.* Horizontal thermal characteristics at forest edge in calm tropical region of china. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2000 ,11 (2) :205 — 209.

[7] Zhang Y P, Dou J X, Ma Y X, *et al.* Characteristics of Tridimensional Distribution of Microclimate in Tropical Seasonal Rain Forest Canopy Gap. *Journal of Fujian College of Forestry* ,2002 ,22 (1) :1 — 3.

[8] Zhang Y P, Ma Y X, Liu Y H, *et al.* Characteristics of spatial distribution of microclimate in the gap of evergreen broad-leaved forest in the north of Ailao mountain in Yunnan. *Journal of Beijing Forestry University* ,2001 ,23 (4) :81 — 83.

[9] Zhang Q, Zhou Y. The characteristics of budget of radiation and energy as well microclimate of Dunhuang oasis on a typical clear day in summer. *Chinese Journal of Foliage Ecology* ,2002 ,26 (6) :717 — 723.

[10] Hu Y J. Research advance about the energy budget and transportation of water vapour in the Heife area. *Advance in Earth Sciences* ,1994 ,9 (4) :30 — 34.

[11] Tong H, Liu H Z, Li Y M, *et al.* Actuality of summer urban heat island and the impact of urban planning “wedge shaped Greenland ” to reducing the intensity of urban heat island in Beijing. *Journal of Applied Meteorological Science* ,2005 ,16 (3) :357 — 367.

[12] Lin Y D , Han X M , WU X G , Hao X Y , *et al.* Ecological field characteristic of green land based on urban green space structure. *Acta Ecologica Sinica* ,2006 26 (10) 3339 — 3346.

[13] Bao H S , Lou J H , Zheng X Y. Effect of landscaping and greening on microclimate in Hangzhou City. *Journal of Zhejiang University* ,2001 27 (4) #15 — 418.

[14] Makoto Y , Robert D . The cooling effect of paddy fields on summertime air temperature in residential Tokyo , Japan. *Landscape and Urban Planning* 2001 53 (1-4) :17 — 27.

[15] Akbari H. Kurn D M , Bretz S E , *et al.* Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings* ,1997 25 (2) :139 — 148.

[16] Wang Z F , Zhu Y Y , Zhu J W , *et al.* *Forest meteorology*. Beijing : China Forest Press ,1985. 148 — 160.

[17] Hong Yan. Anthes RA. The effect of variations in surface moisture on mesoscale circulation. NCAR Ms. ,1987 0901 86 — 89.

参考文献：

[2] 蒲亚云. 绿化工 . 成都：电子科技大学出版社 2004. 2 ~ 3.

[3] 冷平生. 城市植物生态学 . 北京：中国建筑工业出版社 ,1995. 94 ~ 150.

[4] 冷平生, 吴庆书. 城市生态学. 北京：科学出版社 2000. 65 ~ 96.

[6] 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 等. 中国热带静风区林缘水平热力特征的初步分析. *应用生态学报* 2000 , 11 (2) 205 ~ 209.

[7] 张一平, 龚军霞, 马友鑫, 等. 热带季节雨林林窗小气候要素时空分布特征. *福建林学院学报* 2002 22 (1) 1 ~ 3.

[8] 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 等. 哀牢山北部常绿阔叶林林窗小气候空间分布特征. *北京林业大学学报* 2001 23 (4) 81 ~ 83.

[9] 张强, 周毅. 敦煌绿洲夏季典型晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征. *植物生态学报* 2002 26 (6) 717 ~ 723

[10] 胡隐樵. 黑河实验能量平衡和水汽输送研究进展. *地球科学进展* ,1994 9 (4) 30 ~ 34.

[11] 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. *应用气象学报* 2005 , 16 (3) 357 ~ 367.

[12] 蔺银鼎, 韩学孟, 武小钢, 郝兴宇等. 城市绿地空间结构对绿地生态场的影响. *生态学报* 2006 26 (10) 3339 ~ 3346.

[13] 鲍淳松, 楼建华, 曾新宇, 项志松. 杭州城市园林绿化对小气候的影响. *浙江大学学报* 2001 27 (4) #15 ~ 418.

[16] 王正非, 朱延曜, 朱劲伟, 等. *森林气象学*. 北京：中国林业出版社 ,1985. 148 ~ 160.