DOI: 10.5846/stxb201507121471
吴志丰,王业宁,孔繁花,孙然好,陈利顶,占文凤.基于热红外影像数据的典型居住区常见地表类型热特征分析.生态学报,2016,36(17): - .
Wu Z F, Wang Y N, Kong F H, Sun R H, Chen L D, Zhan W F.Analysis of the thermal characteristics of selected urban surfaces in a typical residential area based on infrared thermography.Acta Ecologica Sinica,2016,36(17): - .

基于热红外影像数据的典型居住区常见地表类型热特征分析

吴志丰[1,2],王业宁[1,2],孔繁花[3],孙然好[1],陈利顶[1,*],占文凤[3]
1 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域国家重点实验室,北京 100085
2 中国科学院大学,北京 100049
3 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

摘要:城市热岛伴随城市建设产生,并随城市扩展而增强,已成为影响城市居民生活质量的重要因素。估算城市表面显热释放量对城市热环境研究具有现实意义。本研究选取北京市典型居住小区,通过热红外成像仪记录了六种常见下垫面夏季一天中温度变化情况,并反演其显热释放量。结果显示白天人工地表表面温度显著高于气温,人造草坪、沥青和混凝土路面与气温最大温差分别为 18℃、15℃、11℃。自然地表由于蒸散发作用,其表面温度与气温接近,仅草地与气温温差稍大,为 4℃。不同地表类型表面温度在夜间均低于气温,只有沥青路面全天高于气温。高表面温度形成强烈的显热释放,人造草坪和沥青路面一天内显热释放量最高,达 2256 W/m^{2}和 1913 W/m^2。太阳辐射是人工地表迅速升温的主要原因,限制其受太阳直射时间将对于降低显热排放及提高热舒适程度将具有显著效果。乔木和水体显热通量最低,只有 16 W/m^{2}和 7 W/m^2,对于缓解热岛强度具有巨大优势。

关键词:城市热岛;热红外影像;居住区;城市表面;热特征

Analysis of the thermal characteristics of selected urban surfaces in a typical residential area based on infrared thermography

WU Zhifeng[1,2], WANG Yening[1,2], KONG Fanhua[3], SUN Ranhao[1], CHEN Liding[1,*], ZHAN Wenfeng[3]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Science, Beijing* 100085, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3 *International Institute for Earth System Science (ESSI), Nanjing University, Nanjing* 210023, *China*

Abstract: Urban construction usually accompanies with the generation of urban heat island (UHI), which could be further intensified with urban development. The UHI effect is one of the most crucial factors that have negative impacts on the wellbeing of urban dwellers; thus, estimating the sensible heat flux is obviously important for studying the urban thermal environment. In the present study, we utilized thermal imaging camcorder to record the surface temperature of six common urban surfaces in a typical residential quarter during one summer day and estimated the sensible heat released from these surfaces. The results showed that artificial surfaces have significantly higher surface temperature than the ambient air temperature. The maximum temperature differences between three artificial surfaces (artificial turf, asphalt pavement, and concrete pavement) and ambient air temperature reached 18 °C, 15 °C, and 11 °C, respectively. In contrast, natural surfaces showed similar temperature compared with the ambient air due to evaporation and transpiration. Among natural

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41230633)
收稿日期:2015-07-12; **修订日期**:2016-03-21
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liding@ rcees.ac.cn

surfaces, grass had a relatively higher surface temperature, and the maximum temperature difference between grass and ambient air was 4 °C. Higher surface temperature resulted in strong release of sensible heat flux. Artificial turf and asphalt pavement released as much as 2,256 W/m^2 and 1,913 W/m^2 into the atmosphere during one day. Solar radiation is the main governing factor of variation of artificial surface temperatures. Relevant measures need to be taken to reduce exposure time to lower sensible heat flux and thus improve outdoor thermal comfort level. Trees and water body released only 16 W/m^2 and 7 W/m^2 and thus are beneficial for the mitigation of urban heat island over other strategies.

Key Words: urban heat island (UHI); thermal image; residential quarter; urban surface; thermal characteristic

“城市热岛”是城市市区气温高于周边未建成区的现象[1]。自 1818 年 Luke Howard 在伦敦发现城市热岛现象以来[1-3],城市热岛研究一直延续到现在。多年的研究和探索,让学者对降低热岛强度、改善城市热环境有了统一的认识[4-9],其基础思想是减少显热释放量,即减弱对城市大气的加温进程。因此估算城市空间不同表面显热释放量在城市热岛研究中具有较为重要且现实的意义。

城市热岛研究涉及多个学科,不同学科依据其学科特点对热环境研究手段有很大差别。气象因子的精确监测及不同尺度气象模型模拟是大气科学研究热岛现象的主要手段。如苗世光[10-11]利用涡度相关数据及中尺度气象模型 WRF 和城市冠层模型的耦合对北京市热平衡情况进行了分析。涡度相关方法记录不同方向长短波辐射,可以较精确地计算热平衡各分量值,为中尺度气象模型运行提供基础数据。但城市地表类型复杂,混合地表类型上的涡度相关数据不能反映单一地表的热辐射特性,在区分不同地表热辐射通量方面存在困难。

在地学领域,早期的城市热岛研究和大气科学相关研究相似,通过城市市区和郊区的温湿度及相关气象因子对比得到市区的热岛强度。然而气象监测很难实现大范围覆盖,也不易对城市热岛产生机理和能量变化进行深入分析[12]。遥感技术的应用使得大范围同一时刻地表温度的获取成为可能,地表热岛成为城市热岛研究的新方向。在从红外波段反演得到的地表温度基础上,研究人员开发了不同的模型(如 LUMPS, ARM 等)[13]来计算地表显热释放量,并得到较高的精度。但由于遥感数据时间分辨率较低,无法描述连续时间内地表温度和显热的变化特征。红外波段数据空间分辨率相对较低,混合像元的产生也对具体地表类型的能量反演造成很大困难。另外,卫星遥感数据无法表现城市复杂的三维空间,往往将其几何特征概化为由屋顶、树冠表面和其他地被物等构成的二维表面,对城市居民热环境影响最为显著的城市冠层刻画不够[14]。

城市人口扩张导致居住区面积快速增加,高层住宅也逐渐成为缓解用地紧张的手段之一。居住区作为城市居民生活起居主要场所,其热环境已成为城市热环境研究的重点关注区域。鉴于上述计算城市地表热通量,尤其是显热通量的方法存在的问题,本研究寻求可以对不同地表类型精确区分、可同时记录城市三维空间不同朝向表面热特征并可较好估算显热通量的方法,以期为小尺度城市热环境研究提供一种新的思路。

热红外热像仪是可以对地表进行近距离观测的热红外传感器,其优势在于便于携带、操作方便,可获取高时空分辨率热红外影像,对小尺度地物热行为分析过程中具有很好的应用前景。Chudnovsky[15]利用热像仪对特拉维夫城市中不同地物的表面温度变化进行了分析,Hoyano[16]基于时间序列热像仪对大阪两栋建筑不同建筑材料的表面温度在一天中的变化情况进行了细致探讨。本研究联合使用热红外热像仪和便携式气象站,采用显热计算方法,对北京市典型居住区内 6 种典型地表进行了 24 小时连续观测,得到一天中不同地表温度的变化特征,并计算了相应地表的显热释放量。揭示了城市建设过程中人为地表对城市热岛产生的贡献程度,并依据研究结果给出了城市建设时可用于减少显热释放的建议,希望可以对降低城市热岛强度及改善城市热环境提供科学依据[15, 17]。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区选取

本研究选取位于北京市东北五环附近的居住小区望春园作为研究区(图 1,图 2)。望春园有 13 栋中高层

居民楼,5 栋为 14 层,8 栋为 26 层,另外有售楼处、商铺和幼儿园等三栋低层建筑。小区绿化较好,中央位置有一小型人工湖泊。小区道路主要由沥青和砂石混凝土构成,部分人行道铺设透水砖。幼儿园操场铺设人造草坪(Artificial turf),由仿草叶状合成纤维构成。

1.2　地表类型分类

为了比较不同类型地表的温度差异及显热通量,将研究区内地表分为 2 大类,即人工地表和自然地表。小区供机动车行驶道路由沥青铺就;内步行道和圆形广场主要由混凝土构成,建筑墙面材料也是混凝土。墙面垂直地表,其与太阳辐射夹角较小,为了分析太阳辐射角度的影响,将墙面单独作为一类地表进行分析;人造草坪在研究区内分布较少,是小区幼儿园操场地表铺装材料;自然地表主要有草地、乔木和水面,其中乔木为其冠层上表面温度。城市内大部分乔灌草及水体等均由人工种植和建造形成,不同于原有生态系统构成的自然地表,但不管是否为人工构建,它们在城市中担当着与原有自然地表类似的作用,故仍将这三类地表作为自然地表(表 1)。

图 1　望春园小区遥感影像及平面图

Fig.1　Baidu image of Wangchunyuan residential quarter(WCY)

1.3　地表温度及相关气象数据获取

红外数据获取使用 Testo 890 热红外热像仪。Testo890 热红外摄影仪瞬时视场角为 1.13mrad,测量范围为-20℃-+100℃,测量精度为±2℃。为了对 6 种典型地表进行同期观测,选择 16 号楼顶(图 2 红色五角星处)作为观测点位。观测期内,实验人员手持红外热成像仪对地表固定监测点每隔 30 分钟拍摄一次,拍摄周期为 24 小时。拍摄时尽量保持镜头对地面俯角一致,以减小由于拍摄角度不同导致大气路径变化形成的误差。本次拍摄共获取红外影像 1600 余幅。应用 IRSoft 软件对表 1 中各类型地表对应像元取样得到地表温度。取样尽量选取纯像元,避免混合像元造成的误差。需要指明的是,热红外热像仪获取的是地表亮温,而非实际地表温度。不同地物比辐射率不同,亮温和实际温度之间可能存在较大差距。由于比辐射率受多方面因素影响,对其进行准确测量较为困难,另外,经查相关技术资料,本研究涉及地物比辐射率都较高,故将亮温作为实际温度使用,不做校正。

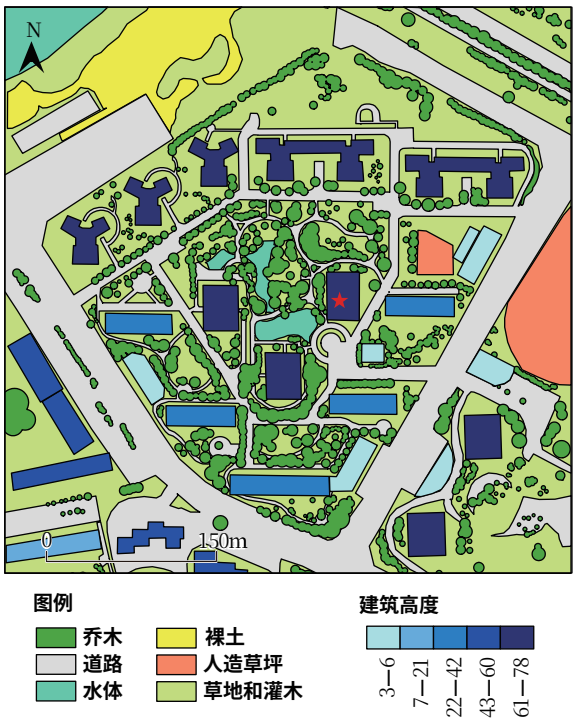

图 2　望春园平面图及热红外热像仪监测位置

Fig.2　Map of WCY with location of Thermal Imaging Camera

红外影像获取同时,还对空气温度、相对湿度、风速、风向、太阳直射辐射等地表气象参数进行了监测。气象观测选用美国产 HOBO U30 型自动气象站,包括总辐射传感器(测量范围为 0-1280W/m^2,精度±10W/m^2)、空气温湿度传感器(测量范围:温度-40-+75℃,精度±0.21℃;湿度 0-100%,精度±2.5%)、风速风向传感器(风速测量范围 0-45m/s,精度±1.1m/s,风向测量范围 0-355°,精度 5°)。其中气温、相对湿度监测高度

为 1.5m,为成年人胸部平均高度,风速风向及太阳辐射监测高度为 2m。气象数据采集频率为 1 分钟。

夏季太阳高度角大,地表温度高,大气垂直对流强烈,云量多。云层对太阳辐射的遮挡使到达地表的太阳辐射量降低。本研究旨在分析晴朗天气条件下不同类型地表的温度和显热放热量,需要选择云量及其他大气颗粒物较少的日期开展监测。根据气象站对太阳短波辐射量的记录,2014 年 8 月 8 日-8 月 12 日 5 天内太阳短波辐射量占最大太阳辐射量分别为 39.86%,43.02%,65.29%,52.66%和 39.53%。不同日期太阳短波直射辐射量差别较大,其中 8 月 10 日和 8 月 11 日到达地表太阳短波辐射量最高,其余日期均在 50%以下。达到地表太阳短波辐射量可以反映天气晴朗状况及空气清洁程度,本研究选择 8 月 10 日-8 月 11 日拍摄的红外影像作为基础数据来分析不同类型地表温度并进行显热热量反演(图 3)。

表 1 城市表面类型分类

Table 1 Classification of urban surfaces

人工地表 Artificial surfaces		自然地表 Natural surfaces
沥青		乔木冠层
砂石混凝土	混凝土路面	水体
	混凝土墙面	
人造草坪		草地

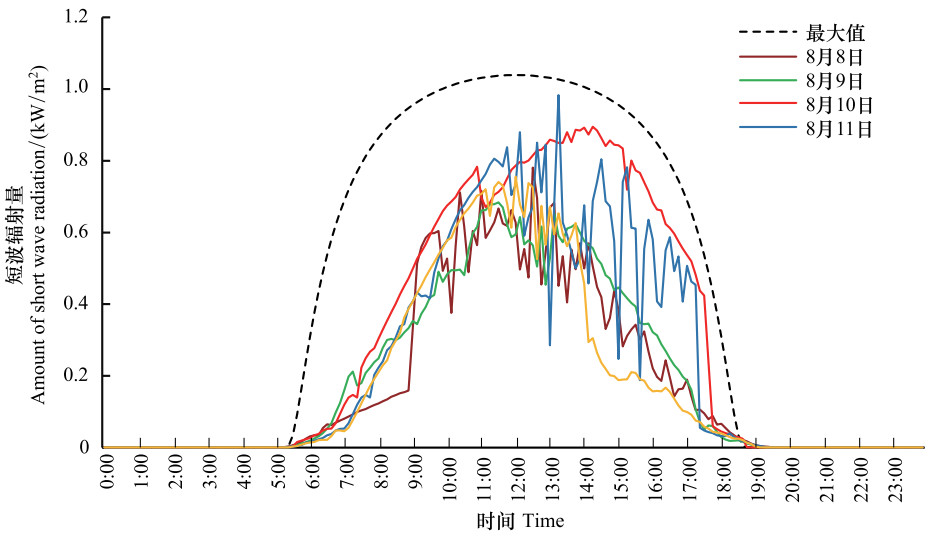

图 3 2014 年 8 月 8 日-8 月 12 日达到地表太阳短波直射辐射量与最大太阳短波辐射量比较

Fig.3 Difference between the amounts of solar insolation reached land surfaces during August 8-12, 2014 with maximum amount of solar insolation

1.4 显热释放量计算

显热释放量与地表温度和空气温度之间差异有关,温差越大,向大气中输送显热的潜力越大。显热是以对流方式向大气中释放,空气的流动速度对其也具有很大影响,风速越高,表层空气湍流越强,显热传输量则越高。本研究应用公式(1)计算显热释放量[16, 18],其中 T_s 为地表温度,T_a 为空气温度,h_c 为空气湍流系数,其计算公式见(2)。

$$H = hc(Ts - Ta) \tag{1}$$

$$hc = {}^{5.6\times4.0\cdots v<5}_{7.2\times v^{0.78}\cdots v\geqslant5} \tag{2}$$

公式(2)中风速为地表以上 9m 处风速,本研究风速观测高度为 2m,为了得到要求高度处风速,利用风廓线指数率进行风速转换[3]。

$$uz = u1\left(\frac{z}{z1}\right)^{\alpha} \tag{3}$$

公式(3)中 u_z 为高度 z 处风速,u_1 为已知高度处风速,Z 和 Z_1 分别为二者对应高度。系数 α 与地表粗糙度

z_0相关,两者关系可表示为 $\alpha = 0.12z0 + 0.18$。城市内地表 2m 处地表粗糙度为 0.42,因此 $\alpha = 0.23$ [3]。

2　结果分析

2.1　观测期天气概况

红外影像拍摄期间,为了反映一天内地表温度的变化过程,选择 4:00AM 作为开始拍摄时间,并持续 24 小时至次日 4:00AM。图 4 是红外影像拍摄期间小区内地面空气温度、相对湿度和平均风速状况。这期间气温最低值为 25℃,出现在 8 月 10 日 6:00AM,最高值为 33.65℃,出现时间为 8 月 10 日 13:30PM。由于 8 月 9 日夜间有小雨,8 月 10 日出之前相对湿度很大,达到 92.05%,日出后随着气温逐渐升高,相对湿度迅速下降,至 14:00PM 降至当日最低(40.1%)。日间风速相对较大,并在正午达到最高值,最大瞬时风速可达 2.0m/s,夜间风速较小,大部分时间都呈现静风状态。

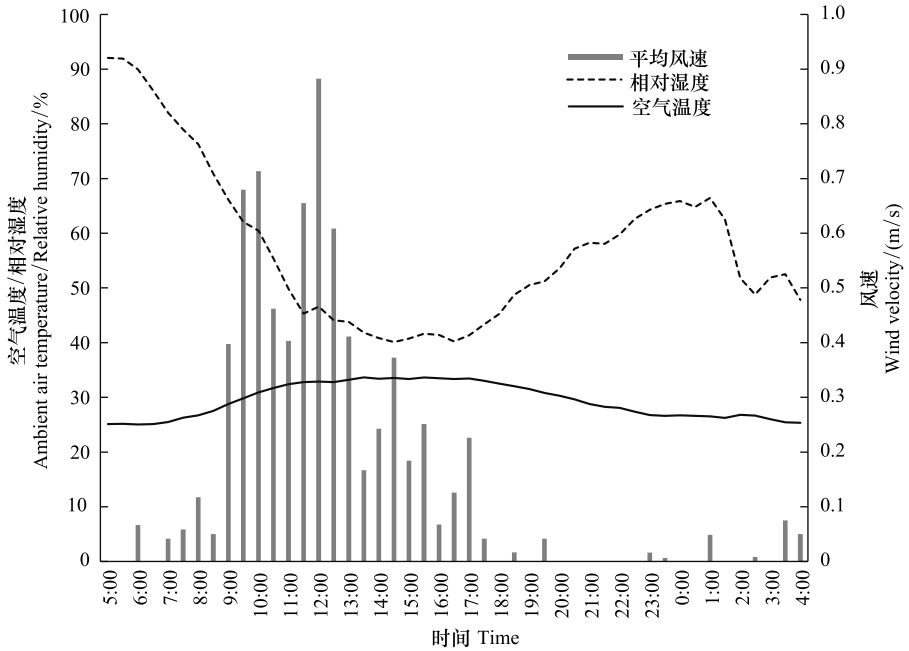

图 4　红外影像获取期间地面空气温度、相对湿度及风速

Fig.4　The ambient air temperature, relative humidity and wind velocity during studied day

2.2　观测角度对结果的影响

为了分析不同拍摄角度和拍摄距离对红外影像获取产生的影响,选取望春园内两栋塔楼南向墙面进行表面温度比较(图 5)。墙面 A 和墙面 B 面积、朝向、建筑和涂装材料相同,理应应该具有相同的表面温度分布,但由于热像仪架设地点固定,对不同位置城市表面会形成拍摄角度和距离的偏差,而这种偏差可能会增加获取数据的误差。选取 14:00PM 影像,确定墙面 A 和墙面 B 的范围,提取相应范围内温度数据。由于拍摄角度不同,虽然两个墙面实际面积相同,但影像面积却有很大差距,分别具有 48040 和 135668 个像元。对这些像元对应温度数据作频率分布图,可以看出两个墙面的温度出现频率具有一定的相似性,都呈偏向高温一侧的分

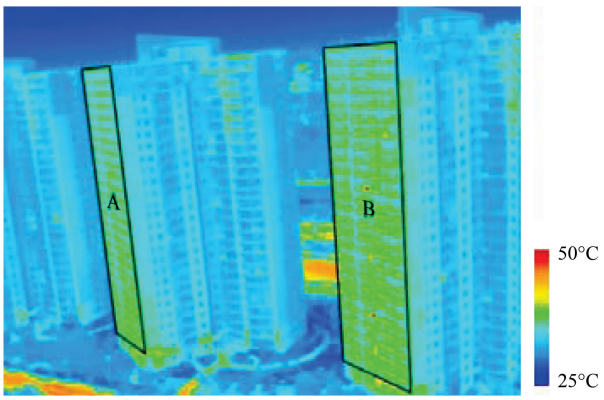

图 5　望春园两栋塔楼 14:00PM 热红外影像

Fig.5　Thermal image of two tower buildings of WCY at 14:00PM of studied day

布,其中墙面 A 更加明显。以 1℃为间隔,分析两个墙面的温度分布频率(图 6),发现两者在不同温度区间具有较大差异,其中墙面 A 在 34-36℃区间像元比例更高,而在其他温度区间均是墙面 B 更高,差距明显。由上可知,拍摄角度会对影像结果产生明显影响,这种影响的原因主要在于两点:(1)地物并非朗伯体,其红外发射具有方向性,不同的偏角接收到的红外发射量不同,因此反演得到的温度数据出现差距[16];(2)拍摄距离增加导致红外穿越大气的距离增大,被大气中颗粒,尤其是水汽吸收的概率增大,导致获取的数据不同。

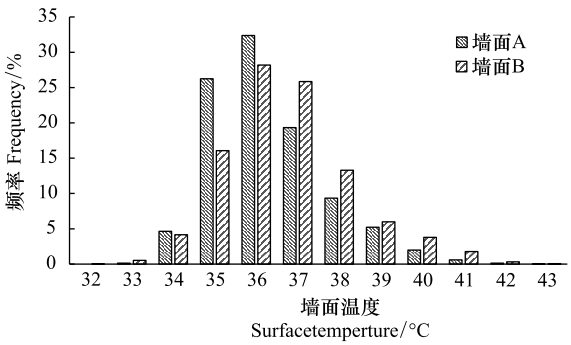

图 6 墙面 A 和墙面 B 不同温度频率分布图

Fig. 6 Frequency distribution map of surface temperatures of Wall A and Wall B

2.3 不同地表类型表面温度

鉴于以上分析,本研究在对不同地表温度进行对比分析时,选取热红外热像仪所在位置周围、观测角度和距离相似的点位数据,尽量减小观测带来的误差。得到拍摄点周围 4 个较为典型的监测点位不同时刻影像。图 7 展示了监测期间不同点位的可见光和红外影像。可以看出不同地表类型在红外影像中的分异更为明显。人工表面均呈现出较高温度,而植被和水体则温度较低。

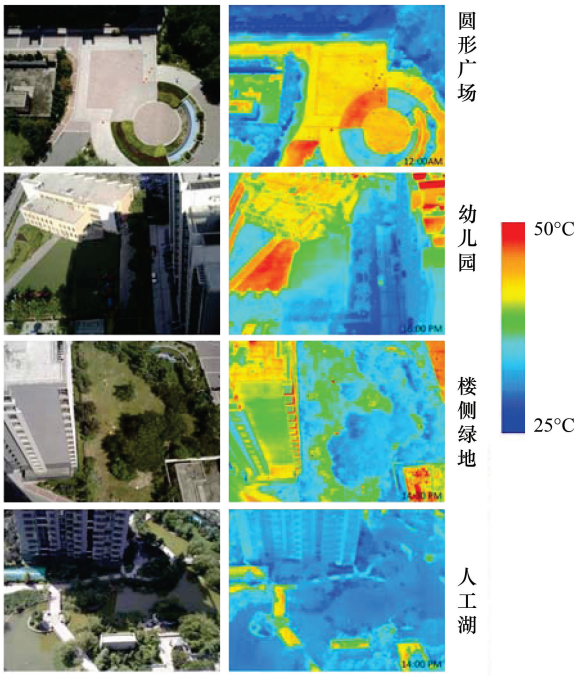

图 7 研究区不同监测点位可见光和红外影像

Fig.7 Visible and thermal images of different monitoring sites of WCY

图 8 和图 9 中黑色点线代表不同时刻地表温度,红色点线代表空气温度,阴影区域表示建筑物和乔木等形成阴影对地表的遮盖。由图 8 可以看出人工地表在太阳照射下表面温度均明显高于气温,其中人造草坪与气温的差距最大可达 18℃,其次是沥青和混凝土。夏季太阳高度较大,而垂直地表与太阳光线的夹角则较小,这使得墙面虽然也由混凝土构成,其表面温度却明显低于其他三种类型表面,与气温温差最高仅为 6.4℃。各种地表在太阳直射下温度快速升高,进入阴影后降温也十分明显,其中人造草坪在 17:30PM 进入阴影后温度迅速下降,在半小时内下降至于气温相近温度,说明其较强的显热释放能力。沥青热容相对较大,虽然进入阴影后温度也在下降,但一直高于气温,表明沥青表面在一天中都可以向空气中释放热能。

与人工地表相比,自然地表的表面温度明显较低(图 9)。水体热容大,太阳辐射不会造成其温度的剧烈变化,一天中其表面温度变化范围为 24—32℃,是温度变化最小的地表类型。水体表面蒸发还会带走大量热量,因此大面积的水体对周围气候具有很好的调节作用,但在居住区内,水体一般都是人工建设的小型湖泊,如望春园内的水体深度仅为 1m 左右,这种小面积浅水体则对气候调节作用不明显。乔木冠层温度变化也较为稳定,仅次于水体。太阳辐射照射到乔木冠层表面,部分被反射进入大气,部分穿透冠层照射到冠层下地表,剩余能量用于光合作用。由于冠层的遮盖,其下地表可保持相对低温状态,红外辐射较低,另外,乔木蒸散发量大,也在一定程度上保持了较低的表面温度。草地的表面温度在太阳直射辐射下高于气温,在 12:00AM—13:00PM 之间,其表面温度高于气温 5℃进入阴影后逐渐则低于气温。草地温度较高是因为其植株

较矮,不足以对地表进行有效遮盖。对望春园草地进行观察,尚可见到部分裸露土壤,这使得草地温度升高较为快速。

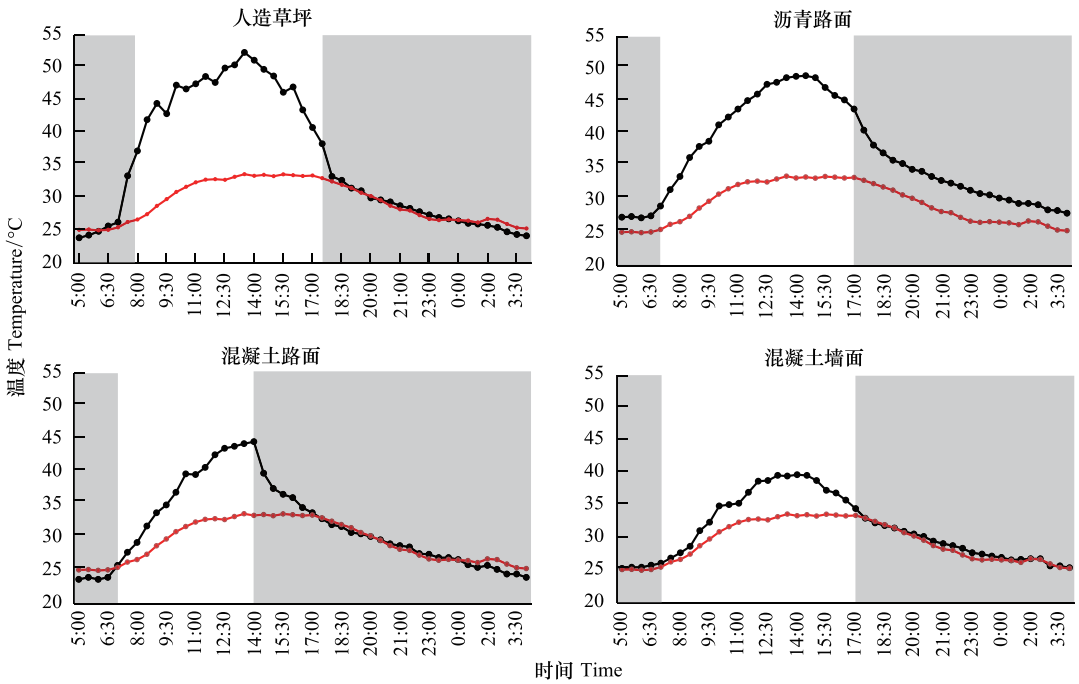

图 8　研究区内人工表面温度和平均气温比较

Fig.8　Difference between different artificial surface temperatures and mean ambient air temperature

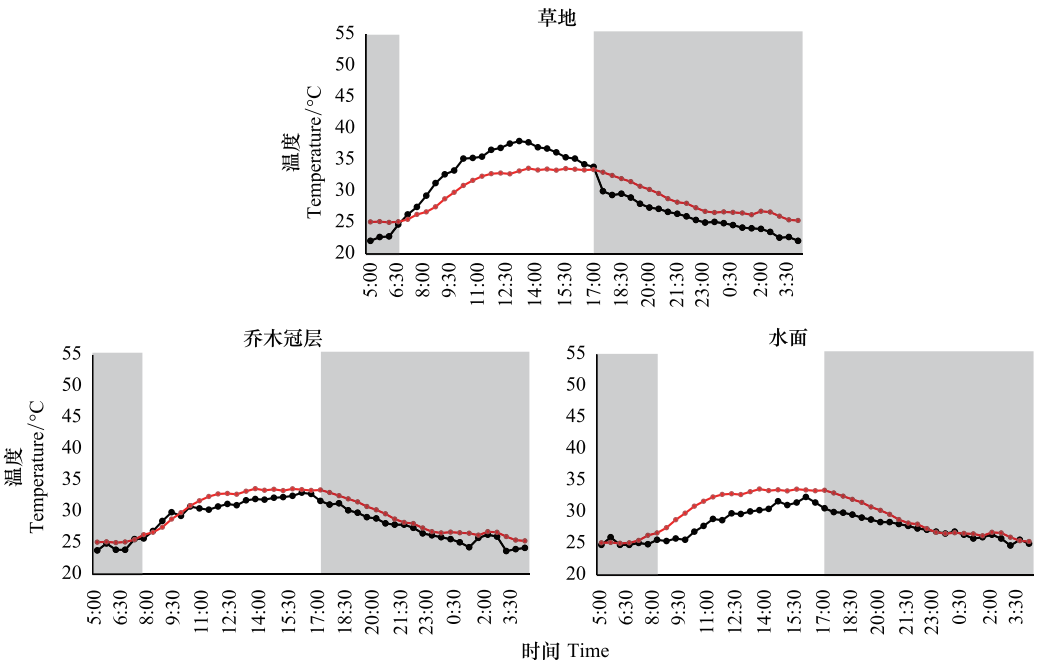

图 9　研究区内自然地表和平均气温比较

Fig.9　Difference between different natural surface temperatures and mean ambient air temperature

上面分析看出遮阴对表面温度影响较大,没有太阳辐射的继续摄入,高温地表开始迅速释热。图 10 比较了在太阳辐射和遮阴条件下混凝土和草地两种地表的温度变化特征。其中混凝土(阴影)和草地(阴影)只在 7:00AM—9:00AM 期间接受短时间太阳辐射,其余时间均被旁边建筑阴影遮盖。可以看出,与太阳辐射条件

相比,遮阴条件下,同样的地表类型最高温也未超过 30℃,低于气温。这种情况下,不会产生由地表指向空气的显热输送。

2.4 不同地表类型显热释放量

通过上述计算,可得到不同地表类型在一天内显热释放量。由图 11 可以看出,湍流系数对显热释放影响很大,风速的变化造成显热通量变化曲线形成显著波动。由于人造草坪白天地表温度最高,其显热释放量在白天大部分时间也是最高的,沥青路面和混凝土路面依次降低,但在 18:00PM 以后,人造草坪和混凝土路面因为温度下降较快,显热释放量均也下降至 0 左右,即在夜间两种地表向空气中释放热量很小,而沥青即使在夜间也在不断释放热量。在人工地表中,混凝土墙面释放显热量最小。

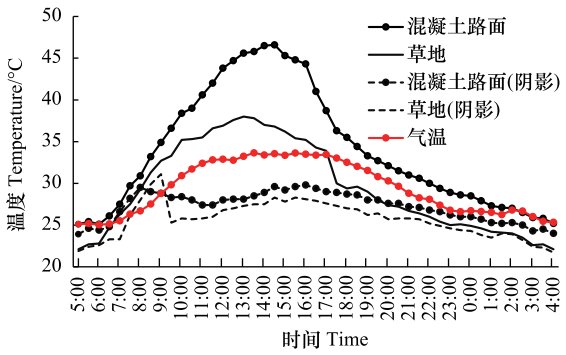

图 10 混凝土路面和草地在太阳辐射及遮阴条件下温度比较

Fig.10 Difference between surface temperatures of concrete road and grass field under full-sun and in shade conditions

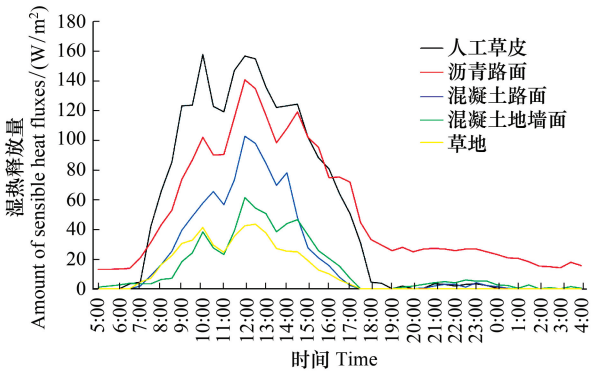

图 11 不同类型地表不同时刻显热释放量

Fig.11 Sensible heat fluxes of different urban surfaces of studied day

由于拍摄位置固定,在对墙面取样过程中,只选择了南向墙面,这必然导致墙面温度及显热释放量出现偏差。不同朝向墙面接受太阳光照射时间和持续时长均不相同,东向墙面主要在上午接受太阳照射,与之相反,西向墙面主要在下午接受太阳照射,由于午后太阳高度角较大,西向墙面增温速度和程度要高于东向墙面,南向墙面在一天持续接受太阳短波照射,其显热释放量相对其他墙面应更高,由于北京位于北回归线以北,北向墙面全年不能接受太阳照射,其增温过程主要由于对其他地表长波辐射的吸收以及室内人为热透过墙面向外的散发。虽然研究区内建筑墙面均由混凝土构成,但其表面刷涂的不同颜色涂料对表面温度的增减过程也产生了一定影响,浅色涂料对太阳光反射率高,其表面温度相对较小,深色涂料可以吸收更多太阳辐射,导致其温度相对浅色区域高出 2-3℃。另外,墙面结构复杂,对太阳辐射的吸收及表面温度增加也具有很大影响。图 12 为望春园内北侧板塔结合居民楼,由于不是规则的长方体,建筑的凸出部分对其临近区域会有遮光效果,遮光的持续时间与楼面位置及高度相关,B 位置被遮挡时间最长,只在正午短暂时段可以接受太阳照射,其余时间均处于左右两侧凸出墙体的遮挡之下,A 位置虽然距离左侧凸出墙体与 B 相同,但由于处于较高位置,更多时间内没有构造物可以对其产生遮挡,使其吸收太阳辐射时间更长,C 位置只受到左右两侧凸出墙体有限遮光作用,受太阳照射时间最长,显热释放也最多。

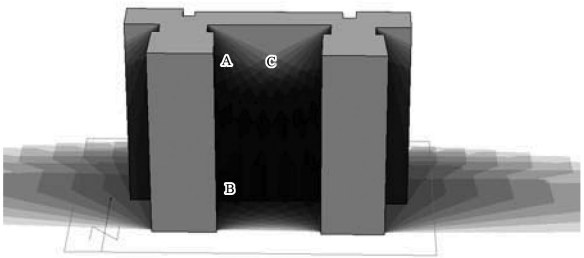

图 12 望春园北侧住宅楼 8 月 10 日一天中形成阴影分布

Fig.12 Shadow distribution of the residential building at north side of WCY

自然地表中,只有草地有少量显热释放,乔木树冠和水体则基本无释放量,图 11 未显示后两种地表的显热量。本研究仅依据红外影像估算了不同地表的显热排放量,没有计算潜热排放。虽然乔木和水体由于表面温度较低,显热排放较少,但有相当部分能量以潜热的形式向大气中释放。对于任何地表而言,显热和潜热比

值越低,则空气增温可越缓,这也是增加城市水体和乔木种植面积以减缓热岛强度的原因所在。

由图 13 可以看出,按每平方米计,人工地表的累计显热释放量均很可观,人造草坪和沥青路面最高,分别达到 2256W 和 1913W,混凝土路面和墙面相对较低,各为 967W 和 646W。自然地表中乔木和水体因为其表面温度一直与气温相近或者低于气温,全天内向大气中释放的显热量非常小,仅为 16W 和 7W,而草坪则释放出多达 496W 的显热量,与墙面接近。

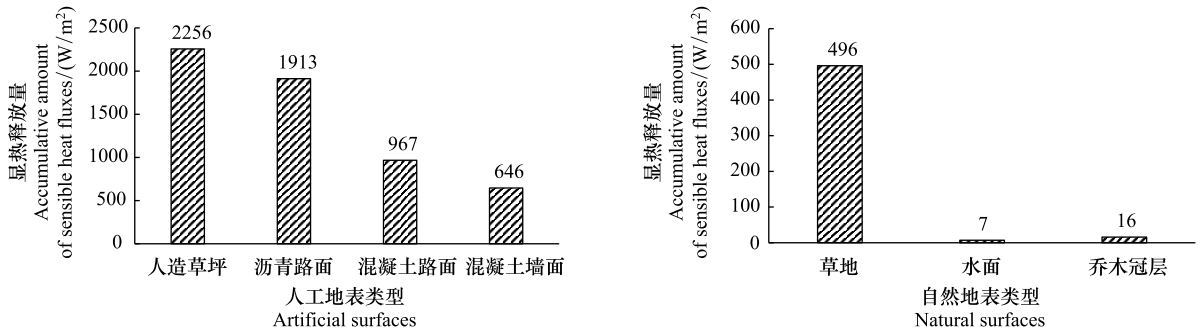

图 13　不同地表观测期间累计显热释放量

Fig.13　Accumulative sensible heat fluxes of different urban surfaces

3　讨论与结论

北京市特定地表类型显热通量研究很少,选择在其他城市进行的研究与本研究结果进行比较。王成刚(2007)利用涡度相关方法对南京市夏季混凝土下垫面热平衡进行了分析,结果显示该地表显热通量夏季峰值平均值为 110W/m^2,与本研究中混凝土路面显热释放峰值相近。Qin(2014)[18]通过数值模拟对美国城市 Davis 不同反照率的同一不透水面的显热释放进行了研究,结果显示显热释放与反照率呈负相关,即反照率越高,由于太阳辐射吸收量降低,导致显热释放显著降低。当反照率为 0.1 时,不透水面显热释放峰值接近 300W/m^2。本研究中显热释放量最大的是人造草坪,显热释放在正午 12:00 达到峰值(156W/m^2)。两个研究结果之间差别较大的主要原因在于风速的不同。当风速在 0-5m/s 区间变动时,空气湍流系数 h_c 对应值为 5.6-25.6,风速的增加可以显著增加显热计算值。本研究中风速由放置于望春园小区的气象站记录,受周边高层建筑和植被影响,监测期间风速一直较小,9m 高度处风速最大值为 1.2m/s,仅约为 Qin(2014)[18]中风速的 1/2,受低风速影响,各种地表类型显热释放量也相对较小。

地表吸收太阳短波辐射后,部分能量以长波辐射的形式返回大气中。根据本研究所得地表温度,其长波辐射波长在 9.3-9.8μm,这个波段位于 8-13μm 的大气窗口中[1],因此对大气的加热并不明显。但由于城市建筑密度大,地表长波辐射会受到建筑立面的阻挡和反射,并引起建筑立面的二次升温[19],之后再以显热的形式向外释放,是城市热岛形成的原因之一。除去长波辐射带走的能量,其余能量以储热、显热和潜热的形式分配[18,20],不同地表依据其热物理属性分配比例不同,其中储热量较小,而显热和潜热的比例较大[21]。城市建设过程中,大量人工地表以混凝土和沥青构成,这类表面显著特点为水的渗透性差,也称不透水面。水分降落至地表后不能向下渗透,地表以下水分同样无法通过表面进入大气,导致在热量分配过程中,显热占据了绝大部分份额,而潜热则很小[18],造成城市空气温度升高。

本研究通过热红外热像仪对城市中典型地表进行 24 小时连续观测,得到不同时间内地表温度,结果显示人工地表温度远高于气温(图 8),导致高强度的显热释放,因此在城市建设过程中需要注意这些人工材料的选用和布置。人造草坪由人造高分子化合物织造而成,其特有的热物理性质使其可以快速吸收太阳辐射并增温,正午表面温度可达 52℃,虽然太阳辐射被遮挡后温度快速下降,但由于吸收了大量太阳辐射,使其成为一天中向空气中释放显热最多的地表类型,达到 2256W/m^2。人造草坪用途广泛,其高表面温度特征已经引起相关学者注意。宋丹丹[22]利用 ZnO/Fe_2O_3 等对可见光具有高反射率材料对常见人造草坪草叶纤维进行包

裹,制造出具有明显降低表面温度的人造草丝,降温幅度可达 15℃。沥青和混凝土是城市建设中最常用的两种建筑材料,虽然现在已经有新型材料供选用[23-24],但由于其造价较高,使用率还很低,可以预测在未来的一段时间内城市建设还是以两种材料为主。由上面结果可以看出,在无太阳辐射情况下,这两类地表的温度均可保持在 30℃左右。如果在路面铺装过程尽量将这种地表置于阴影之下,则可以大大降低其温度并减少显热的释放量。北京位于北回归线以北,即使在夏至日,建筑物北侧一定距离内仍全天受到建筑物阴影覆盖,这段距离约为建筑物高度的 1/3。在居住区规划过程中,合理布置建筑,形成对道路的有效遮阴,可以显著降低地表热辐射释放量,降低空气温度并提高热舒适度。

对于自然地表,与之前的研究结果相似,草地虽然具有一定的降温作用,但效果不明显[25,26]。本研究显示,草地向大气中的显热释放量显著高于乔木和水面,与墙面接近。这是因为草类植物较为低矮,无法对地面形成有效遮阴,部分地表还可以接受太阳直射而升温,使得草地的表面温度相对较高。乔木冠层和水面表面温度在观测期内温度均低于空气温度,因此显热释放不明显,热量应主要以潜热形式向外释放[27],在缓解热岛方面具有巨大优势。因此,在利用增加绿地减缓热岛过程中,应在考虑实际情况下多应用乔木和水体。

墙面是本研究中考虑的唯一垂直表面,由于其与太阳辐射夹角相对较小,其表面升温过程相对于其他人工地表更加缓和。在减缓热岛强度的措施中,利用乔木和建筑对路面等下垫面遮阴可以限制地表对太阳短波辐射的吸收,这种措施对于低层建筑而言仍然有效,但对于中高层建筑作用则十分有限。这时可以通过调整建筑结构和朝向,减少太阳直射照射面或利用建筑本身形成阴影,降低建筑表面温度,从而降低显热排放量。

本研究不足之处在于只对北京市夏季晴朗天气条件下一天内不同地表温度进行了观测,由于观测时间较短,且热红外成像仪观测范围较小,使研究结果的代表性有限,需要在以后的研究中改进。另外,本研究只计算了显热释放量,对热平衡公式中其他分量都没有计算,计算结果准确度只能通过与相关研究结果对比得出,无法分析热量输入与输出是否闭合。热量输入和输出闭合与否关系到能量平衡各分量结果准确性,涡度相关方法也无法做到完全闭合,是未来需要重点关注的方向。此外,由于风环境对显热释放影响较大,不同风速风向条件下计算得到的同一地表显热释放量会表现出明显差异,因此在以后相关研究中应明确近地表处风环境状况。

参考文献(References):

[1] Oke T R. Boundary Layer Climates. 2nd ed. London and New York: Methuen, 1987.

[2] Zhao C J, Fu G B, Liu X M, Fu F. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. Building and Environment, 2011, 46(5): 1174-1183.

[3] Landsberg H E. The Urban Climate. New York: Academic Press, 1981.

[4] Santamouris M. Cooling the cities-A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. Solar Energy, 2014, 103: 682-703.

[5] Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Solar Energy, 2001, 70(3): 295-310.

[6] Slingerland J. Mitigation of the Urban Heat Island effect by using water and vegetation[D]. Delft: Delft University of Technology, 2012.

[7] Solecki W D, Rosenzweig C, Parshall L, Pope G, Clark M, Cox J, Wiencke M. Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. Environmental Hazards, 2005, 6(1): 39-49.

[8] Rosenfeld A H, Akbari H, Bretz S, Fishman B L, Kurn D M, Sailor D, Taha H. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. Energy and Buildings, 1995, 22(3): 255-265.

[9] US EPA. Reducing Urban Heat Islands: compendium of strategies: urban heat island basics. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2008.

[10] 苗世光, 窦军霞, Chen F, 李炬, 李爱国. 北京城市地表能量平衡特征观测分析. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(9): 1394-1402.

[11] 苗世光, Chen F. 城市地表潜热通量数值模拟方法研究. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(5): 1017-1025.

[12] 乔治, 田光进. 基于 MODIS 的 2001 年-2012 年北京热岛足迹及容量动态监测. 遥感学报, 2015, 19(3): 476-484.

[13] Xu W, Wooster M J, Grimmond C S B. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne

hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature-emissivity separation approach. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3493-3510.

[14] Voogt J A, Oke T R. Complete urban surface temperatures. Journal of applied Meteorology, 1997, 36: 1117-1132.

[15] Chudnovsky A, Ben-Dor E, Saaroni H. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. Energy and Buildings, 2004, 36(11): 1063-1074.

[16] Hoyano A, Asano K, Kanamaru T. Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography. Atmospheric Environment, 1999, 33(24-25): 3941-3951.

[17] 王成刚, 孙鉴泞, 胡非, 蒋维楣. 城市水泥下垫面能量平衡特征的观测与分析. 南京大学学报: 自然科学, 2007, 43(3): 270-279.

[18] Qin Y H, Hiller J E. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. Energy and Buildings, 2014, 85: 389-399.

[19] Taha H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. Energy and Buildings, 1997, 25(2): 99-103.

[20] Spronken-Smith R A, Kossmann M, Zawar-Reza P. Where does all the energy go? Surface energy partitioning in suburban Christchurch under stable wintertime conditions. Theoretical and Applied Climatology, 2006, 84(1/3): 137-149.

[21] Ayata T, Tabares-Velasco P C, Srebric J. An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup. Building and Environment, 2011, 46(9): 1851-1861.

[22] 宋丹丹. 凉爽型人造草坪的制备技术与应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.

[23] Santamouris M, Gaitani N, Spanou A, Saliari M, Giannopoulou K, Vasilakopoulou K, Kardomateas T. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas-Design realization and results of the flisvos project. Building and Environment, 2012, 53: 128-136.

[24] Carnielo E, Zinzi M. Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. Building and Environment, 2013, 60: 56-65.

[25] Shashua-Bar L, Pearlmutter D, Erell E. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. Landscape and Urban Planning, 2009, 92(3/4): 179-186.

[26] Armson D, Stringer P, Ennos A R. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(3): 245-255.

[27] Shahidan M F, Shariff M K M, Jones P, Salleh E, Abdullah A M. A comparison of *Mesua ferrea* L. and *Hura crepitans* L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort. Landscape and Urban Planning, 2010, 97(3): 168-181.