

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.015



城市模型反射率测量方法与运用

谭康豪^{a,b}, 覃英宏^{a,b}, 苏益声^{a,b}, 梁楨^{a,b}, 庞如月^a

(广西大学 a. 土木建筑工程学院; b. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004)

摘要:介绍了一种测试城市模型反射率的试验方法。制作 10 个条形和十字形的城市模型进行测试, 观测路面不同反射率对城市反射率的影响, 并将实测模型反射率与 ASTM E1918-06 规范计算结果进行对比。研究发现: 瞬时太阳辐射强度变化值在规范允许范围内, 模型计算的反射率与 ASTM E1918-06 测量值的误差在 0~0.1 之间。当峡谷纵横比(建筑物高度与路面宽度之比)为 1.0 时, 路面反射率从 0.15 提高到 0.65, 城市峡谷反射率增幅在 0~0.30 之间; 提高路面反射率并不能有效提高城市峡谷反射率, 尤其是纵横比较大的深峡谷。城市峡谷中的多重反射抑制城市反射率的提高。同时, 反射路面将给行人增加额外的辐射通量, 可能带来热不舒适和眩光刺眼等问题。因此, 应谨慎看待反射路面作为一个缓解城市热岛效应策略。

关键词:城市峡谷; 热岛效应; 多重反射; 反射率; 纵横比; 反射路面

中图分类号: TU761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)02-0111-07

Approach and procedure of measuring the albedo of urban prototype

Tan Kanghao^{a,b}, Qin Yinghong^{a,b}, Su Yisheng^{a,b}, Liang Jia^{a,b}, Pang Ruyue^a

(a. College of Civil Engineering and Architecture, b. Key Laboratory of Disaster

Prevention and Engineering Safety of Guangxi, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

Abstract: A new method of measuring the albedo of urban prototype is proposed. The method is used to measure ten urban prototypes with different pavement reflectivity and with south-north orientation, west-east orientation and cross-street orientation, respectively. The results are compared with those obtained by the ASTM E1918-06 and the modified ASTM E1918-06. It is found that when the variation of the incident solar intensity is less than 20 W/m^2 (a tolerant error stated by ASTM E1918A), the ASTM E1918-06 can either underestimate or overestimate the albedo of the urban canyon prototype up to 0.10. For an urban canyon (UC) with an aspect ratio of 1.0, an change from 0.15 to 0.65 of pavement albedo would cause an increase of the albedo of the UC from about 0.15 to 0.35 if the albedo of the roof and wall is about 0.40. Raising the albedo of the pavement in a UC is not an effective way to increase the albedo of the urban area, especially for UC with great aspect ratio. For low aspect ratio UC, raising the albedo of the pavement or of the parking lot introduces a sizable additional diffuse reflected radiation to the pedestrians. Therefore, it should be cautious to developing reflective pavements as an urban cooling strategy.

收稿日期: 2015-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51478126)

作者简介: 谭康豪(1990-), 男, 主要从事新型能源开发、混凝土材料研究. (E-mail): haokangtan@163.com.

覃英宏(通信作者), 男, 教授, (E-mail): qinyinghong123@163.com.

Received: 2015-12-02

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51478126)

Author brief: Tan Kanghao (1990-), main research interests: new energy resources and concrete materials, (E-mail): haokangtan@163.com.

Qin Yinghong (corresponding author), professor, (E-mail): qinyinghong123@163.com.

Keywords: urban canyon; urban heat island; multiple reflection; albedo; aspect ratio; reflective pavement

城市结构单元一般包括建筑墙体、屋顶及道路,道路与建筑两侧的空气形成类似于峡谷的地貌特征,称为“城市街道峡谷”(Urban canyon)。城镇化的进程使得城市下垫面发生重大改变,以前的透水性地面被不透水性地面所取代,由于干燥致密的混凝土路面无法进行有效地蒸发降温,存储于城市下垫面的热量只能以湿热的形式散失到城市环境中。城市热岛效应的成因与许多因素有关,其中最根本的诱因来自太阳直接辐射。由于太阳辐射为不可控因素,控制城市峡谷的热吸收量很大程度依赖于整个城市峡谷反射率的改变。

目前,许多学者对城市峡谷反射率进行了广泛研究。Aida 等^[1-2]在不同季节测量不同城市峡谷走向的反射率,结果表明,城市峡谷反射率随时间而变化,且不同峡谷走向差异明显。Pawlak^[3]经过试验和数值计算也指出城市峡谷反射率是关于时间的函数。覃英宏等^[4]采用数值模型研究反射路面对城市峡谷反射率的影响发现:在街道纵横比小于 1.0 时,采用反射路面能有效降低路面温度。陈志等^[5]通过实验和数值模拟的方法也证明了高反射率的外墙材料能有效地控制墙面的温度,从而控制建筑物室内温度。上述研究均已表明了反射材料可以有效地减少城市建筑物和地表对太阳辐射的吸收。然而,这些研究只是单方面基于平坦建筑墙面和路面温度观测,没能从城市太阳辐射吸收量角度研究降低城市热岛的工程措施,太阳辐射可能在城市峡谷中形成的多重反射后吸收更多的热量,通过提高城市路面和墙体反射率能否有效提高整个城市反射率尚未证实。

本文将以此为出发点,介绍一种用于测试城市模型反射率的理论模型和相关试验方法,将影响路面温度的最大因素(即反射率)作为重点分析对象,探讨了路面反射率对整个城市峡谷反射率的影响,旨在了解一个城市结构的反射机理,通过提升城市反射率以降低城市太阳辐射吸收,达到减轻城市热岛效应的目的。

1 理论模型

1.1 材料的光谱测量及反射率计算

反射率或太阳能反射率,表示离开物体表面的

辐射量与到达其表面的辐射量的比值,是一个 0~1 的标量。对于表面光滑均匀的物体,其反射率计算的理论依据:将分光光度计测得的反射光谱与正午太阳光入射能量的乘积积分,其积分值与正午太阳入射能量的积分值的比值即为物体表面某点处的反射率。式(1)中 $i(\lambda)$ (W/m^2) 表示单位面积单位波长 λ 的入射功率, $r(\lambda)$ 表示材料的光谱反射率,则材料的反射率为

$$\rho = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda} r(\lambda) \times i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda} i(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中: λ_0 、 λ 为波长,式中 $\lambda_0 = 280 \text{ nm}$, $\lambda = 2500 \text{ nm}$ 。

1.2 城市峡谷模型反射率概念

城市结构单元通常由建筑墙体、屋顶和街道路面组成,多数呈“U”字形,尺寸较大且不规则,无法根据式(1)直接求其反射率。测量此类不规则曲面的反射率,根据 ASTM E1918-06 规范^[6-7]要求,其模型的尺寸至少为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,且 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 场地内的辐射强度必须相同,这使得模型尺寸、试验场地可能均无法满足要求。为解决此问题,城市模型制作参照 Akbari 等^[8]制成占据 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 模型平面,即目标模型,如 1 图所示。城市模型的正上方安放太阳辐射传感器,分别观测入射光强度和反射光强度,其比值为模型反射率和模型周围环境反射率的加权平均值。为计算模型的反射率,可在模型区域内分别覆盖两块大小相同的白色和黑色朗伯体材质铝塑板,从而额外引入两个方程,则

$$I_w = [\rho_w F + \rho_s(1 - F)]I_{hw} \quad (2)$$

$$I_b = [\rho_b F + \rho_s(1 - F)]I_{hb} \quad (3)$$

式中: ρ_w 、 ρ_b 为白板和黑板的反射率; I_{hw} 、 I_w 为试验区域内覆盖白板时太阳辐射传感器接收到的太阳辐射入射量和反射量; I_{hb} 、 I_b 为试验区域内覆盖黑板时太阳辐射传感器接收到太阳辐射入射量和反射量; F 为峡谷模型表面到辐射传感器的视角因子; ρ_s 为试验区域外周围环境的反射率。

若 ρ_w 、 ρ_b 为常数,则 ρ_s 、 F 可求。当将模型区域内覆盖城市模型时,由于边缘凸起引起视角因子改变,改变后的视角因子用 F' 表示。则

$$I_c = [\rho_c F' + \rho_s(1 - F')]I_{hc} \quad (4)$$

式中: ρ_c 为模型的反射率; I_{hc} (W/m^2) 和 I_c (W/m^2) 为试验区域内覆盖模型时辐射传感器接收到太阳辐射入射量和反射量。为了求解 ρ_c , 在模型区域内覆盖一个与城市模型结构相同的黑色模型, 假如模型的反射率为 ρ_{cb} , 则有

$$I_{cb} = [\rho_{cb}F' + \rho_s(1 - F')]I_{hcb} \quad (5)$$

式中: I_{hcb} (W/m^2) 和 I_{cb} (W/m^2) 为试验区域内覆盖黑色模型时辐射传感器接收的太阳辐射入射量和反射量。联立方程(1)~(5), 可解出 ρ_c , 如式(6)所示。

$$\rho_c = \frac{\left[\frac{I_c - \frac{\rho_{cb} - I_{hcb}}{I_{hcb}} \rho_s}{I_{hcb} - \frac{\rho_{cb} - \rho_s}{I_{hcb}} \rho_s} \right] \times (\rho_s - \rho_{cb})}{\left(\frac{I_{cb}}{I_{hcb}} - \rho_s \right)} \quad (6)$$

式中

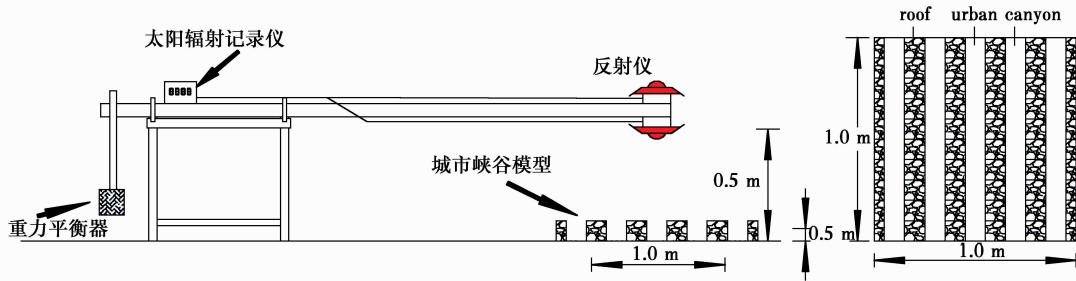


图 1 试验装置

Fig. 1 Test setup

2 实验方法

城市反射率依赖于峡谷纵横比、墙体和路面反射率、太阳位置及城市峡谷走向等因素。现实中城市峡谷两侧建筑物的形状、布局等非常复杂, 为简化城市峡谷模型, 试验设计峡谷纵横比为 1.0, 根据道路分布分别制作条型和十字型城市峡谷各 5 个。所有峡谷模型(除黑色模型外)的墙体和屋顶均涂布同一颜色的涂料。为探讨不同路面反射率对城市峡谷反射率的影响, 在城市峡谷路面分别涂布不同反射率的涂料, 其中 2 个城市模型(条型和十字型)的路面反射率与墙体和屋顶相同。利用 Lambda750 分光光度计测量 5 种涂料的反射光谱(见图 2), 运用 ASTM 标准入射光谱求和。其反射率分别为 0.148、0.271、0.417、0.535、0.654。同样, 白板、黑板和黑色涂料的反射率可利用 Lambda750 分光光度计测量, 如图 3 所示, $\rho_w = 0.692$, $\rho_b = 0.048$ 。

$$\rho_s = \frac{\left[\frac{\rho_w I_b}{I_{hb} - \frac{\rho_b I_w}{I_{hw}}} \right]}{(\rho_w - \rho_b) - \left(\frac{I_w}{I_{hw}} - \frac{I_b}{I_{hb}} \right)} \quad (7)$$

多重反射之故使得直接观测式(5)中的 ρ_{cb} 变得困难。若要尽量使其影响最小, 则需模型的表面吸收率达到最大。由于峡谷中只有一半的太阳反射离开其表面反射回天空(峡谷中的到天空的视角因子为 0.5), 故认为黑色模型的反射率 ρ_{cb} 黑色模型材料反射率 ρ_{bm} 的一半, 则

$$\rho_{cb} = \frac{\rho_{bm}}{2} \quad (8)$$

式中: ρ_{bm} 为黑色涂料的反射率, 其值 $\rho_{bm} = 0.052$, 且对不同波段太阳光的反射率较为稳定(如图 3), 按式(8)计算则实验误差约为 0.026。

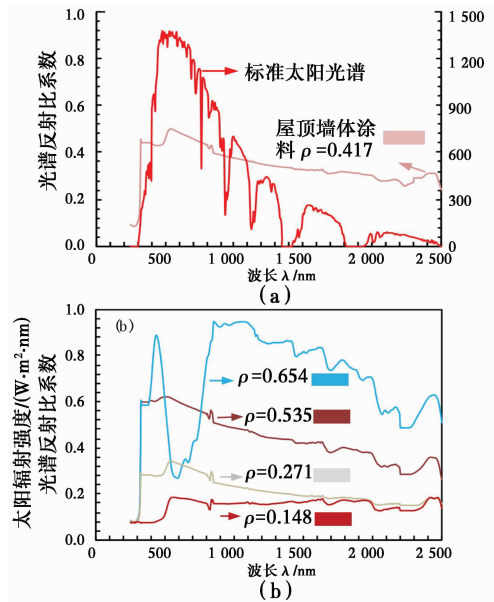


图 2 城市峡谷模型的屋顶、墙体和路面材料反射光谱

Fig. 2 The solar reflectance of the roof and wall and of the pavements in the UC

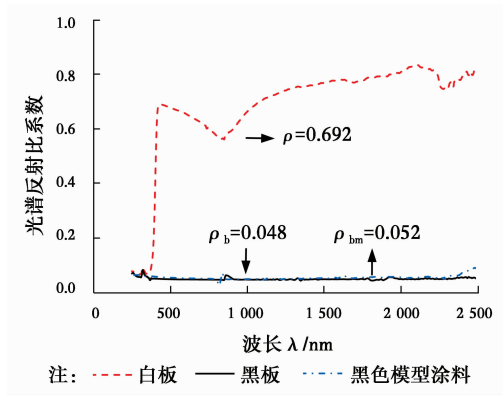


图 3 白板和黑板的反射光谱

Fig. 3 The spectral reflectance of the white mask and black mask

实验在广西大学东校园某混凝土路面 (22.82°N, 108.32°E) 进行, 从当地时间 7:00 开始, 17:00 结束。试验装置如图 4 所示。测量目标区域的反射率具体步骤中如下:

- 1) 调节仪器高度距离地面为 0.5 m, 调平气泡居中, 在地面上画出 1 m × 1 m 作为目标区域;
- 2) 保持反射仪位置不变, 在反射仪正下方目标区域的位置安放白板, 读取反射量 I_w 和入射量 I_{hw} ;
- 3) 保持反射仪位置不变, 在目标区域用黑板替换白板, 读取反射量 I_b 和入射量 I_{hb} ;
- 4) 保持反射仪位置不变, 在目标区域用黑色模型替换黑板, 读取反射量 I_{cb} 和入射量 I_{hcb} ;
- 5) 保持反射仪位置不变, 在目标区域用目标模型替换黑色模型, 读取反射量 I_c 和入射量 I_{hc} ;
- 6) 重复步骤 2)~步骤 5), 依次测量南北方向、东西方向和十字形方向的城市峡谷模型的反射量 I 和入射量 I_h 。

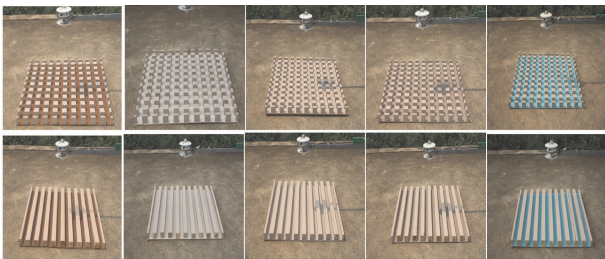


图 4 测量模型的反射率示意图

Fig. 4 Sketch Map of measuring the reflectivity of the model

3 结果与讨论

3.1 模型(式(5))和 ASTM E1918-06 规范的比较

用不同方法测量城市模型反射率时会有所不

同。由于模型边缘凸起效应, 增加的模型高度改变了反射穹对模型表面的视角因子, 可能导致的城市模型的反射率有所差异, 与 ASTM E1918-06 规范相比, 式(5)增加一个黑色的城市模型的方程主要是为了证明视角因子引起的差异。假设没有黑色模型时, 两者的视角因子认为是相等的, 即 $F = F'$, 则

$$\rho_t = \frac{\left(\frac{I_t - I_b}{I_{ht} - I_{hb}}\right)\rho_w - \left(\frac{I_t - I_w}{I_{ht} - I_{hw}}\right)\rho_b}{\left(\frac{I_w - I_b}{I_{hw} - I_{hb}}\right)} \quad (9)$$

式(9)为 ASTM E1918-06 修正后的结果。ASTM E1918-06 方法认为: 在每次实验过程中, 到达测量区域的入辐射为常数, 如果存在波动, 误差值 20 W/m² 以内可以接受, 否则实验重做^[9]。其原因在于 ASTM E1918-06 方法的表达式中把周围环境反射率 ρ_s 是当作一个常量。然而, 太阳辐射入射如强度分布会发生变化, 导致 ρ_s 发生改变, 式中的 ρ_s 将不再是常量, 为确保变量幅度尽可能小, ASTM E1918-06 规定入射强度在单次测量过程中变化不超过 20 W/m²。即采用太阳辐射强度的平均值代表某一时刻的太阳辐射强度。因此, 实验过程中只需一个日射强度计(面朝地面)便可分别测出各材料(均质或是非均质)表面的太阳辐射反射量 I_w 、 I_b 和 I_t 。并且将式(2)、(3)、(4)中的 I_{hw} 、 I_{hb} 和 I_{ht} 均用 I_h 来代替, 可解出 ρ_{1918} 。

$$\rho_{1918} = \rho_b + \frac{I_t - I_b}{I_w - I_b}(\rho_w - \rho_b) \quad (10)$$

利用式(6)、(9)、(10)分别计算城市模型的反射率并进行比较, 分析它们之间的误差(见图 5)。结果发现修正的 ASTM E1918-06 中式(9)略高于本文式(5)结果。这是因为边缘凸起的部分的遮挡作用, 导致视角因子增大吸收更多面发生较多的阴影; 式(10)的计算结果既可高于也可低于式(5), 原因可能来自 ASTM E1918-06 方法假设在实验过程中入射的太阳辐射量为恒定值, 实验过程中某一时刻的太阳辐射强度随云层移动变化势可高于或低于太阳辐射强度的平均值, 故其方差出现明显波动。此外, 通过上述对比发现, 即使在试验过程中采用 ASTM E1918-06 规范的限制条件, 式(9)计算的反射率也同样引起 0~0.1 的误差。因此, 测量城市模型的反射率时应谨慎直接使用公式 ASTM E1918-06 方法。

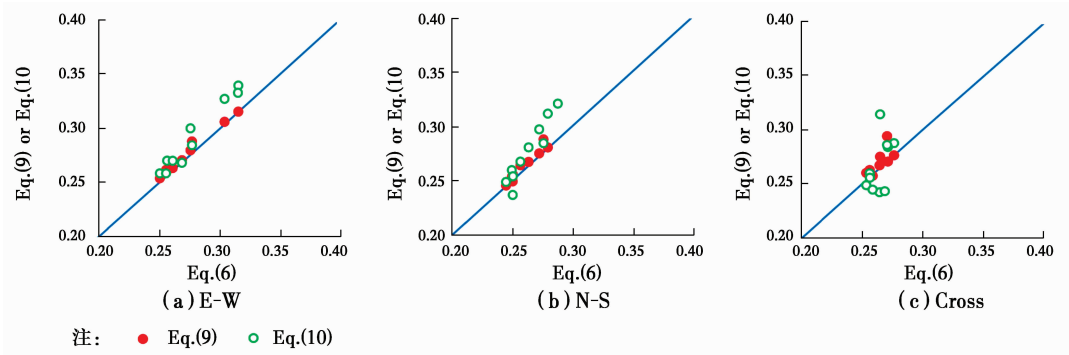


图 5 实测反射率与 ASTM E1918-06 规范的对比

Fig. 5 Comparison of the albedo estimated from modified ASTM E1918-06 with that estimated from the proposed method in this study

3.2 对比分析不同路面城市反射率

图 6 比较了 3 种不同城市峡谷走向的反射率。不难发现:城市峡谷反射率随太阳位置的变化而变化,且不同峡谷形状差异明显。当太阳入射角较小(早晨时分),散射辐射占主导作用,散射辐射能照射到整个城市峡谷的每个角落,加重峡谷内的多重反射,降低其反射率。随着太阳入射角的增大,直接辐射占主导作用,峡谷中仅有少部分面积被直接照射,并发生多重反射。正午时分,太阳辐射大部分照射在路面上,相对于两侧墙体,路面的天空视角因子最小,因此,正午的城市反射率降到最低值。

由图 6 可见,城市峡谷反射率随着路面反射率的增大而增大。与条形峡谷相比,十字形峡谷的反射率提高幅度更加明显。这是因为十字形峡谷比条形峡谷多出约一倍的路面面积,减弱了峡谷的多重反射,更多的太阳辐射“逃逸”到天空。增加了路面反射作用。然而,路面反射率的增大却不能有效提高城市峡谷的反射率,在屋顶和墙体的反射率相同条件下($\rho=0.417$),所有的城市模型反射率均低于 0.4,即使把路面的反射率提高至 0.652。其原因在于太阳辐射在峡谷中发生多重反射减少了返回向天空扩散的辐射,从而抑制城市峡谷反射率的有效提高。

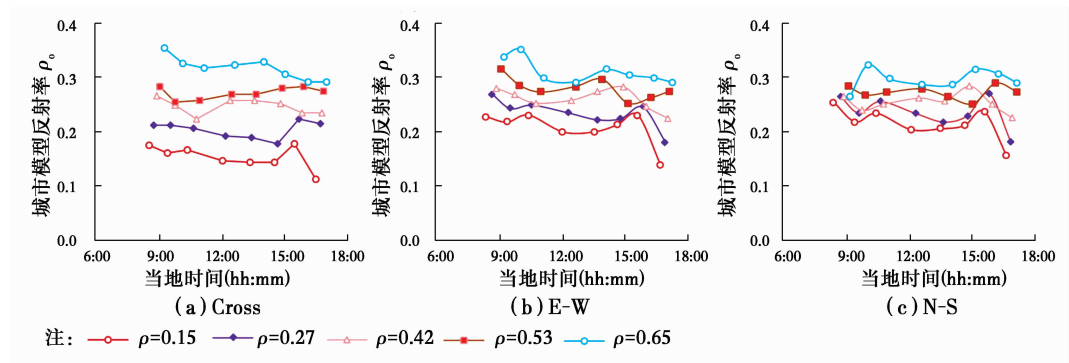


图 6 城市模型反射率随时间变化规律

Fig. 6 The albedo of UC prototype varies over time

图 7 表示城市峡谷日平均反射率与路面反射率间的关系。可以看出,当路面反射率低于屋顶和墙体的反射率时,十字形城市峡谷模型反射率低于条形峡谷模型反射率,且这种差异随路面反射率的增大而减小;当路面反射率大于屋顶和墙体的反射率时,十字形城市峡谷模型反射率略高于条形峡谷模型反射率。究其原因在于十字形模型多出的路面面积对城市峡谷模型反射率的贡献在路面的反射率较

高时才得以体现。对条形模型而言,南北走向和东西走向的日平均城市峡谷反射率变化规律几乎一致。但当路面反射率较高时,东西走向的峡谷反射率高于南北走向;路面反射率较低时则相反。这是因为在测量时太阳位置变化有关,东西走向的模型有可能比南北走向吸收更多的太阳光。在高(低)反射路面作用下,造成东西走向的城市反射率上升(下降)。

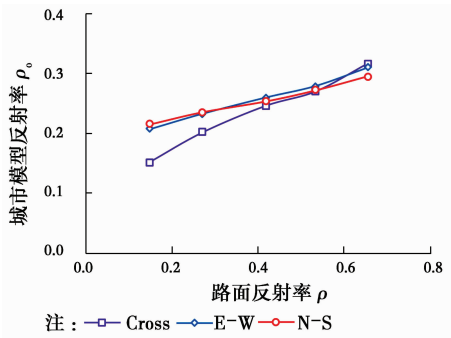


图 7 反射路面与城市模型反射率线性关系
Fig. 7 The correlation between pavement albedo and the UC albedo

3.3 模型反射率的运用和实践

城市热岛效应与城市下垫面性质的改变有关。传统的混凝土路面,不仅颜色深且表面粗糙,对太阳辐射的吸收率较大。城市路面白天吸收的热辐射晚间以长波辐射的形式散失到周围环境中,增加城市近地面的温度,加剧城市热岛。目前,采用高反射路面冷却技术缓解城市热岛效应措施成为科研工作者研究的热点问题。高反射路面冷却技术是指通过涂覆于道路表面的,对太阳辐射能量具有较高反射率和发射率的涂层材料,“主动”减少路面太阳辐射吸收,不需要消耗能量就可以抑制温度上升的热反射隔热技术。但如果由路面反射的辐射量被周围的环境吸收而不是逃逸到天空,则其降温效果就大打折扣。

事实上,评估反射路面的降温效果的指标不仅仅看温度指标,还要综合考虑城市反射率、眩光效果、邻近建筑物的额外热量吸收等因素。浅峡谷可能会带来其他方面的问题。比如增加行人对路面反射的太阳辐射的吸收。根据覃英宏^[4]的研究结果可知:当峡谷纵横比为 1、路面反射率从 0.15 提高到 0.50 时,路面对周围环境所产生额外辐射量约为 50~80 W/m²。如图 8 所示,假设认为某行人站立在一个无限大的停车场中间,以中午时分的辐射通量作为行人所获得的辐射量。通过改变路面反射率观察道路表面温度变化,拟合出路面最高温度和反射率的回归拟合分析方程,则:

$$T_g = 43.2(1 - \rho_g) + 11 \quad (11)$$

式中: T_g 为中午的路面温度;当路面上涂有高反射率,行人接收的漫反射辐射增大、长波辐射减少,如图 9 所示。行人所吸收的净辐射通量是

$$A = (1 - \rho_p)\rho_g IF_{g \rightarrow p} + \epsilon_p \epsilon_g \sigma (T_g + 273.15)^4 F_{g \rightarrow p} \quad (12)$$

式中: σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数,约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-4}$, $F_{g \rightarrow p}$ 是行人到地面的视角因子,取 0.5;非金属材料的发射率 ϵ 一般在 0.85~0.95 之间,假设 $\epsilon_p = \epsilon_g = 0.90$ 和 $I = 1000 \text{ W/m}^2$ (典型的晴天)。可以看出,对于一个反射率为 0.2 的行人,当路面反射率从 0.2 提高至 0.6,行人将额外吸收约 100 W/m^2 辐射能量 ($140 \sim 40 \text{ W/m}^2$);其额外增加辐射量值与 Lynn^[10] 的研究结果相互吻合。尽管这些额外吸收量取决于行人表面反射率 ρ_p ,如衣服和肤色,但路面的漫反射对行人吸收的辐射量有更大的贡献,长时间停留其中,可能导致人体不舒适。因此,即使是纵横比较小的浅峡谷或空旷的停车场,采用反射路面缓解城市热岛效应需谨慎看待。

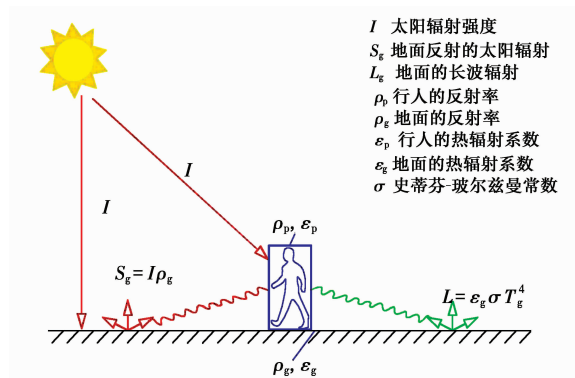


图 8 行人接收的辐射量示意图
Fig. 8 Radioactive flux balance of a pedestrian on an open area with reflective surface

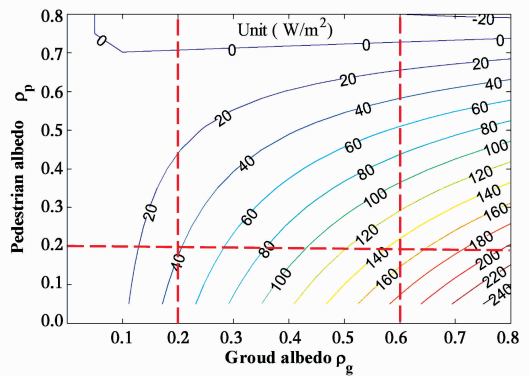


图 9 行人和路面反射率之间的辐射通量变化规律
Fig. 9 Radioactive flux absorbed by a pedestrian on an open area with different pavement (ground) albedo

4 结 论

提出了测量城市反射率的理论和实践,并将之与 ASTM E1918-06 规范比较,得到如下结论:

- 1) 当入射强度变化范围小于 20 W/m^2 时,对

比本文计算方法与 ASTM E1918-06 规范发现,两者的差值在 0~0.1,本质区别在于对太阳辐射强度的选取。天空清晰度不明朗时,建议选用本文计算方法。此外,由于边缘凸起效应,在测量此类曲面反射率不能忽视视角因子的影响。

2) 当街道高宽比为 1.0 时,在屋顶和墙体的反射率相同条件下($\rho=0.417$),路面反射率从 0.15 提高至 0.65,城市峡谷反射率从 0.15 升高至 0.35。提高路面反射率并不能有效提高城市峡谷反射率,尤其是纵横比越大的深峡谷,是因为峡谷中的多重反射严重地抑制了城市反射率的提高。

3) 尽管在高宽比较低的街道采用反射路面,将给行人增加了一个相当大的额外辐射通量并且带来热不适感和眩光刺眼等问题。因此,应谨慎看待反射路面作为缓解城市热岛效应策略。

参考文献:

- [1] AIDA M. Urban albedo as a function of the urban structure—A model experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1982, 23(4): 405-413.
- [2] AIDA M, GOTOH K. Urban albedo as a function of the urban structure—A two-dimensional numerical simulation [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1982, 23(4): 415-424.
- [3] SANTAMOURIS M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 26: 224-240.
- [4] QIN Y H. Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements. *Energy and Building* [J]. 2015, 96: 86-94.
- [5] 陈志,俞炳丰,商萍君. 反照率影响建筑热环境的实验 [J]. *太阳能学报*, 2005, 26(6): 863-867.
- CHEN Z, YU B F, SHANG P J. Experimental study on the influence of albedo to building thermal environment [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2005 (6): 863-867. (in Chinese)
- [6] ASTM. Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres [S]. American Society for Testing and Materials ASTM E 903-96. West Conshohocken, PA, 1996.
- [7] ASTM. Standard test method for measuring solar reflectance of horizontal and low-sloped surfaces in the field [S]. ASTM E 1918-97. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, P A, 1997.
- [8] AKBARI H, KONOPACKI S, POMERANTZ M. Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States [J]. *Energy*, 1999, 24(5): 391-407.
- [9] AKBARI H, LEVINSON R, STERN S. Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies [J]. *Solar Energy*, 2008, 82: 648-655.
- [10] LYNN B H, CARLSON T N, ROSENZWEIG C, et al. A modification to the NOAA LSM to simulate heat mitigation strategies in the New York city metropolitan Area [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(2): 199-216.

(编辑 胡玲)