

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.019



反射路面对城市峡谷反射率的影响

梁楦, 覃英宏, 谭康豪

(广西大学 土木建筑工程学院; 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁, 530004)

摘要: 太阳辐射在城市峡谷内形成多重反射, 加剧城市热岛效应。峡谷太阳辐射吸收量与城市结构、墙体和路面反射率及时间显著相关。建立城市峡谷反射率数值模型, 评估提高路面反射率能否有效提高城市峡谷反射率, 并探讨反射路面对邻近建筑墙体的反射与散射辐射的影响。通过现场观测数据验证数值模型的可靠性。研究表明: 建筑物高度与路面宽度之比(纵横比)是城市峡谷反射率最关键的影响因素, 当峡谷纵横比 <1.0 时, 路面反射作用较为明显; 而且, 相对于冬季, 夏季时峡谷内反射路面能向邻近建筑物反射更多的额外散射辐射, 而峡谷走向对额外散射辐射的影响较小。当峡谷纵横比 <1.0 时, 建议采用反射路面缓解城市热岛。

关键词: 纵横比; 反射路面; 邻近建筑物; 城市峡谷; 反射率

中图分类号: TU111 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)03-0129-09

Influence of reflective cool pavements on the albedo of urban canyon

Liang Jia, Qin Yinghong, Tan Kanghao

(College of Civil Engineering and Architecture; Key Laboratory of Disaster

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

Abstract: An urban canyon absorbs more sunlight than a flat, open surface due to multiple reflections in the canyon, increasing the urban heat island effect (UHI). One geo-engineering idea to mitigate the UHI to make the conventional pavements more reflective and to return more radiation to the sky. The urban canyon albedo (UCA) are modeled and the model with experimental observations are validated. We investigated whether increasing the pavement albedo can raise the UCA effectively based on evaluating the reflective diffuse radiation from the pavement to adjacent building walls. It is found that the ratio of building's height to the road's width determines the UCA whereas other factors acts secondary roles. During summertime reflective pavements in an urban canyon reflect a sizable additional diffuse radiation to the adjacent walls. Reflective pavements are recommended for only an urban canyon with an aspect ratio no greater than 1.0.

Keywords: aspect ratio; reflective pavement; adjacent building; street canyon; albedo

收稿日期: 2015-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(51478126)

作者简介: 梁楦(1990-), 男, 主要从事路面材料研究, (E-mail) liangjiahs@163.com。

覃英宏(通信作者), 男, 博士, 教授, (E-mail) yqin1@mtu.edu。

Received: 2015-07-08

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 61374187)

Author brief: Liang Jia(1990-), main research interest: pavement, (E-mail) liangjiahs@163.com。

Qin Yinghong(corresponding author), PhD, professor, (E-mail) yqin1@mtu.edu。

城市结构包括建筑墙体、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峡谷。城市峡谷内部吸收或反射太阳辐射不同于平坦地面,城市峡谷内部某一面的反射辐射被其他面阻拦不能直接“逃出”峡谷,形成多重反射。而多重反射极大地增加城市峡谷太阳辐射吸收量,进而加剧城市热岛效应。

AIDA 等^[1-2]通过实验测试不同季节不同峡谷走向的城市峡谷反射率,结果表明,城市峡谷反射率随时间变化并与峡谷走向有关。基于此实验,研究人员采用数值模型研究城市峡谷高反射率墙体材料的隔热性能^[3]、城市峡谷反射率^[4]、日平均加权反射率^[5]以及城市峡谷反射率日变化^[6]。研究发现,城市峡谷反射率明显低于路面和建筑墙体的反射率。提高路面反射率是提高城市峡谷反射率的一种有效方法^[7-8]。而路面反射率是可控的,其大小取决于路面材料及其龄期,通常在 0.20~0.80 之间。研究还表明,采用浅色骨料^[9-10]、高反射率的路面铺筑材料^[11-13]或者在路面涂反射涂料^[14]的反射沥青路面比传统沥青路面反射更多的太阳辐射;采用白色填充料^[15]、浅色水泥基体^[16]或者白色面层技术^[17]的反射水泥混凝土路面也比传统水泥路面反射更多的太阳辐射。这些研究结果证实反射路面能够有效地降低路面温度,但这些研究均测量平坦路面的温度,而提高城市峡谷路面反射率能否有效提高城市峡谷反射率尚未证实。

笔者基于城市峡谷不同结构面之间的多重反射建立城市峡谷反射率数值模型,并用实验观测值验证模型的可靠性。通过改变模型参数,查证路面反射率对城市峡谷反射率的影响,同时探讨反射路面能否向邻近建筑物反射可观的额外散射辐射。

1 建立模型

1.1 太阳位置

城市路面和建筑墙体是否受太阳直接辐射与太阳位置有关。而太阳位置随太阳赤纬角、太阳天顶角、太阳方位角及太阳时角而变化。其中太阳赤纬角 δ 由式(1)计算^[18]

$$\delta = 0.406 \sin \left(2\pi \frac{N+284}{365} \right) \quad (1)$$

式中: N 为日序,即1月1日为 $N=1$;12月31日为 $N=365$ 。

太阳天顶角 θ 由式(2)计算^[19-20]

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2)$$

式中: φ 为地球表面观测者所处的纬度; ω 为太阳时角。

太阳时角 ω 可由式(3)计算^[19]

$$\cos \omega = -\tan \delta \tan \varphi \quad (3)$$

其中,一天内太阳时角在负值与正值之间变化,日出前为 $\pi/2$,正午时分为 0,日落后为 $-\pi/2$ 。

太阳方位角 γ 可由式(4)计算^[5,21]

$$\sin \gamma = \cos \delta \sin \omega / \sin \theta \quad (4)$$

当式(4)中 $|\sin \gamma| > 1$ 或 $|\sin \gamma|$ 为无穷小时,太阳方位角可由式(5)给出^[5]

$$\cos \gamma = \frac{\cos \theta \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta \cos \varphi} \quad (5)$$

为便于计算,取时间序列为日出至日落的偶数,则时间序列日出至日落为 $\theta=0$ 。正午时分($\theta=0$)的反射率由正午时分模拟的反射率采用内插法求出。

根据式(1)~(5)可估算城市峡谷内某个面为阴面或阳面的时间。图 1 是典型的城市峡谷图,如果不存在阳面墙体,那么太阳直接辐射在 x 轴上的阴影长度 x_0 可由式(6)计算

$$x_0 = h \tan \theta \cos(\gamma - \gamma_c) \quad (6)$$

式中: h 为建筑物高度; γ_c 为峡谷走向,东西方向时为 0,南北方向时为 $\pi/2$ 。

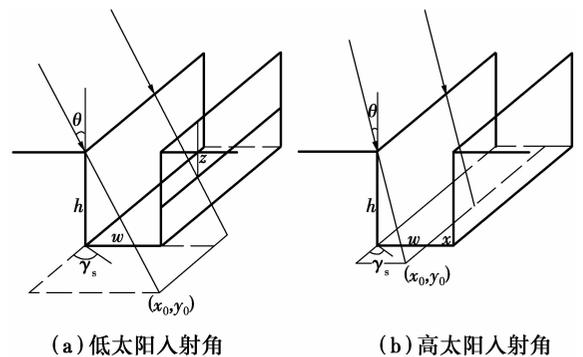


图 1 城市峡谷的直接辐射受太阳时角的影响

Fig. 1 A schematic show of beam radiation to an infinite-long canyon street

当太阳入射角较小时($x_0 \geq w$),图 1(a)向阳墙体仅有一部分受到太阳直接辐射,而路面和背阴墙体没有受到太阳直接辐射,此时向阳墙体上受太阳直接辐射的长度 z 为

$$z = h - \frac{x_0 - w}{\cos(\gamma - \gamma_c) \tan \theta}, x_0 > w \quad (7)$$

当太阳入射角较大时($x_0 < w$),图1(b)向阳墙(13a)体完全受太阳直接辐射,部分路面受太阳直接辐射。路面受直接辐射的宽度 x 为

$$x = w - h \tan \theta \cos(\gamma - \gamma_c), x_0 < w \quad (8)$$

白天,一面墙体一直为阴面,另一面墙体完全或部分为阳面。为方便起见,建议计算 z 和 x 的绝对值,估算 $\tan \theta$ 和 $\cos(\gamma - \gamma_c)$ 的值确定墙体和路面受直接辐射的部分。对于一个对称的城市峡谷,用绝对值足可估算城市峡谷的吸收量和反射量。

1.2 太阳直接辐射与太阳散射辐射

峡谷内的路面与建筑墙体受太阳直接辐射和散射辐射作用。根据 Orgill 和 Hollands 的模型^[22],直接辐射强度 I_b 和散射辐射强度 I_d 可按式(9)计算

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.249k_T, k_T < 0.35 \\ 1.557 - 1.84k_T, 0.35 \leq k_T \leq 0.75 \\ 0.177, k_T > 0.75 \end{cases} \quad (9)$$

式中: I 为瞬时太阳辐射强度,单位 W/m^2 , $I = I_d + I_b$; k_T 为天空清晰度,晴朗无云时取 $k_T = 1.0$,阴天时取 $k_T = 0$ 。

一天内瞬时太阳辐射强度 I 呈余弦分布,其中,日出前与日落后为 0,正午时分最大^[23]

$$I = I_0 \cos \theta \quad (10)$$

式中: I_0 为单日最大太阳辐射强度^[24]

$$I_0 = S_0 \tau^{\frac{1}{\cos \gamma}} \quad (11)$$

式中: S_0 为太阳辐射常数,其值为 $1\,367 \text{ W}/\text{m}^2$; τ 为常数, $0.61 \leq \tau \leq 0.81$,晴天时 τ 取 0.81。

1.3 视角因子(辐射角系数)

视角因子或辐射角系数,表示离开某一表面的辐射直接投射到另一表面的百分数,与另一表面的吸收能力无关。视角因子是散射强度的决定因素,峡谷内各个面到天空的视角因子共同决定城市峡谷太阳辐射吸收量。路面到墙体和天空的视角因子可由式(12)计算^[21](下标 w 表示路面, h 表示墙体, s 表示天空,下同。为便于计算,假设两侧墙体等高):

$$F_{w \rightarrow s} = \frac{(\sqrt{w^2 + h^2} - h)}{w} \quad (12a)$$

$$F_{w \rightarrow h} = \frac{0.5(w - \sqrt{w^2 + h^2} + h)}{w} \quad (12b)$$

墙体到天空、路面以及对面墙体的视角因子分别为^[21]

$$F_{h \rightarrow s} = \frac{0.5 - 0.5(\sqrt{w^2 + h^2} - w)}{h}$$

$$F_{h \rightarrow h} = \frac{(\sqrt{w^2 + h^2} - w)}{h} \quad (13b)$$

$$F_{h \rightarrow w} = \frac{0.5 - 0.5(\sqrt{w^2 + h^2} - w)}{h} \quad (13c)$$

根据式(12)和式(13)可计算城市峡谷内部某一表面到另一表面的视角因子。某一表面到天空的视角因子决定到达其表面的太阳散射辐射,路面和墙体接收到的太阳散射辐射量 I_{dw} 和 I_{dh} (两面墙体的太阳散射辐射量相等)由式(14)计算^[23]

$$I_{dw} = F_{w \rightarrow s} I_d \quad (14a)$$

$$I_{dh} = F_{h \rightarrow s} I_d \quad (14b)$$

当太阳入射角较小时,图1(a),墙体上仅有高度为 z 的表面受到太阳直接辐射,其他面为阴面。 z 到天空、对面墙体以及路面的视角因子分别为^[21](z 到自身墙体的视角因子为 0)

$$F_{z \rightarrow s} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2z}(\sqrt{z^2 + w^2} - w) \quad (15a)$$

$$F_{z \rightarrow h} = \frac{1}{2z}(\sqrt{z^2 + w^2} - w) + \frac{1}{2z}[\sqrt{h^2 + w^2} - \sqrt{(h-z)^2 + w^2}] \quad (15b)$$

$$F_{z \rightarrow w} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2z}[\sqrt{h^2 + w^2} - \sqrt{(h-z)^2 + w^2}] \quad (15c)$$

当太阳入射角较大时(图1(b)),路面部分甚至全部受太阳直接辐射。假设宽度为 x 的路面受到太阳直接辐射, x 到天空、邻近 x 的墙体以及远离 x 的墙体的视角因子分别为^[21](受辐射部分到未受辐射部分的视角因子为 0)

$$F_{x \rightarrow s} = \frac{1}{2x} \left[\frac{\sqrt{x^2 + h^2} - h + \sqrt{h^2 + w^2} - \sqrt{(w-x)^2 + h^2}}{\sqrt{h^2 + w^2} - \sqrt{(w-x)^2 + h^2}} \right] \quad (16a)$$

$$F_{x \rightarrow lh} = \frac{1}{2x} [x - \sqrt{x^2 + h^2} + h] \quad (16b)$$

$$F_{x \rightarrow rh} = \frac{1}{2x} [x - \sqrt{w^2 + h^2} + \sqrt{(w-x)^2 + h^2}] \quad (16c)$$

1.4 多重反射

多种数值模型模拟太阳辐射在城市峡谷内的多重反射^[4,22,25]。笔者提出一种较为简单的方法计算城市峡谷内部的多重反射。假设第 i 次多重反射左边墙体、右边墙体以及路面的反射量分别为 $R_{lh,i}$ 、

$R_{rh,i}$ 和 $R_{w,i}$, 这些反射除被自身以外的表面吸收, 还被天空吸收, 未被吸收的反射量变成对应的第 $i+1$ 次反射量 $R_{lh,i+1}$ 、 $R_{rh,i+1}$ 和 $R_{w,i+1}$, 如式(17)

$$R_{rh,i+1} = F_{h \rightarrow h} R_{lh,i} \rho_h + \frac{\omega F_{w \rightarrow h} R_{w,i} \rho_h}{h} \quad (17a)$$

$$R_{lh,i+1} = F_{h \rightarrow h} R_{rh,i} \rho_h + \frac{\omega F_{w \rightarrow h} R_{w,i} \rho_h}{h} \quad (17b)$$

$$R_{w,i+1} = \frac{h F_{h \rightarrow w} R_{rh,i} \rho_w}{\omega} + \frac{h F_{h \rightarrow w} R_{lh,i} \rho_w}{\omega} \quad (17c)$$

式中: ρ_h 和 ρ_w 分别为墙体与路面的反射率。

第 $i+1$ 次左边墙体、右边墙体、路面及天空的辐射吸收量分别为 $A_{lh,i+1}$ 、 $A_{rh,i+1}$ 、 $A_{w,i+1}$ 及 $A_{s,i+1}$, 如式(18)

$$A_{rh,i+1} = h F_{h \rightarrow h} R_{lh,i} (1 - \rho_h) + \omega F_{w \rightarrow h} R_{w,i} (1 - \rho_h) \quad (18a)$$

$$A_{lh,i+1} = h F_{h \rightarrow h} R_{rh,i} (1 - \rho_h) + \omega F_{w \rightarrow h} R_{w,i} (1 - \rho_h) \quad (18b)$$

$$A_{w,i+1} = h F_{h \rightarrow w} R_{rh,i} (1 - \rho_w) + h F_{h \rightarrow w} R_{lh,i} (1 - \rho_w) \quad (18c)$$

$$A_{s,i+1} = h F_{h \rightarrow s} R_{rh,i} + h F_{h \rightarrow s} R_{lh,i} + \omega F_{w \rightarrow s} R_{w,i} \quad (18d)$$

迭代过程中, 若式(18)中的 $A_{lh,i+1}$ 、 $A_{rh,i+1}$ 、 $A_{w,i+1}$ 及 $A_{s,i+1}$ 的最大值分别是 $\sum_{i=1}^{i=n} (A_{lh,i+1} + A_{rh,i+1} + A_{w,i+1} + A_{s,i+1})$ 的无穷小量, 那么后续多重反射量可以忽略不计, 迭代停止。

第一次反射循环时, 墙体或部分路面为阳面, 受太阳直接辐射的表面比未受太阳直接辐射的表面反射更多的太阳辐射。阳面到其它表面或天空的辐射包括 2 个部分: 整个表面的散射辐射和受照射部分的直接辐射。这些反射量和相应的吸收量的初始值为 $R_{lh,1}$ 、 $R_{rh,1}$ 、 $R_{w,1}$ 、 $A_{lh,1}$ 、 $A_{rh,1}$ 、 $A_{w,1}$ 及 $A_{s,1}$ 。由于直接辐射随太阳位置而变化, 因此, 计算时需明确太阳位置。

当太阳入射角较小时, 部分墙体为阳面, 因此, 初始值计算如下:

$$A_{rh,1} = z I_z (1 - \rho_h) + h I_{dh} (1 - \rho_h) \quad (19a)$$

$$R_{rh,1} = 0 + I_{dh} \rho_h \quad (19b)$$

$$A_{lh,1} = z F_{z \rightarrow h} I_z \rho_h (1 - \rho_h) + h I_{dh} (1 - \rho_h) \quad (19c)$$

$$R_{lh,1} = F_{z \rightarrow h} I_z \rho_h \rho_h + I_{dh} \rho_h \quad (19d)$$

$$A_{w,1} = z F_{z \rightarrow w} I_z \rho_h (1 - \rho_w) + h I_{dh} (1 - \rho_w) \quad (19e)$$

$$R_{w,1} = F_{z \rightarrow w} I_z \rho_h \rho_w + I_{dh} \rho_w \quad (19f)$$

$$A_{s,1} = z F_{z \rightarrow s} I_z \quad (19g)$$

式中: $I_z = \frac{\omega I_b}{\sqrt{\omega^2 + z^2}}$ 为墙体 z 部分的直接辐射强度。右边第 1 项为不同表面对应的太阳直接辐射吸收或反射量, 第 2 项为太阳散射辐射相应的吸收或反射量。式 19(b) 右边第 1 项为零, 因为这部分反射量叠加到其他表面的吸收量与反射量以及天空的吸收量式(19c)~(19g)。

当太阳入射角较大时, 部分路面为阳面, 因此, 初始值计算

$$A_{rh,1} = h I_z (1 - \rho_h) + h I_{dh} (1 - \rho_h) + x F_{x \rightarrow rh} I_x \rho_w (1 - \rho_h) \quad (20a)$$

$$R_{rh,1} = I_z \rho_h + I_{dh} \rho_h + F_{x \rightarrow rh} I_x \rho_w \rho_h \quad (20b)$$

$$A_{lh,1} = h I_{dh} (1 - \rho_h) + x F_{x \rightarrow lh} I_x \rho_w (1 - \rho_h) \quad (20c)$$

$$R_{lh,1} = F_{x \rightarrow lh} I_x \rho_w \rho_h + I_{dh} \rho_h \quad (20d)$$

$$A_{w,1} = x I_x (1 - \rho_w) + \omega I_{dh} (1 - \rho_w) \quad (20e)$$

$$R_{w,1} = 0 + I_{dh} \rho_w \quad (20f)$$

$$A_{s,1} = x F_{x \rightarrow s} I_x \quad (20g)$$

式中: $I_z = \frac{(\omega - x) I_b}{\sqrt{h^2 + (\omega - x)^2}}$, $I_x =$

$\frac{h I_b}{\sqrt{h^2 + (\omega - x)^2}}$ 。式 20(f) 中直接辐射的反射量为零, 因为这部分反射量叠加到其它表面的吸收量与反射量以及天空的吸收量式(20a)~(20d)、(20g)。

由于式(17)~(20)计算反射量与吸收量较为繁琐, 本文采用求和法。计算每次迭代过程中反射量与吸收量, 验证其与城市峡谷内部的太阳辐射量是否相等。

1.5 反射率

根据城市峡谷内的太阳总辐射量及峡谷向天空反射的辐射量, 城市峡谷的反射率可由式(21)计算。

$$\rho_c = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} A_{s,i}}{\sum_{i=1}^{i=n} (A_{lh,i} + A_{rh,i} + A_{w,i} + A_{s,i})} \quad (21)$$

式中: n 为迭代次数。式(21)表明城市峡谷反射率 ρ_c 与建筑物高度 h 、路面宽度 ω 、墙体反射率 ρ_h 、路面反射率 ρ_w 、路基走向 γ_c 、太阳位置、时间、直接辐射以及散射辐射等参数有关。通过式(17)~(20)的关系式可估算参数的关系, 进而计算出城市峡谷反射率。

城市峡谷反射率计算的流程图如图 2 所示。

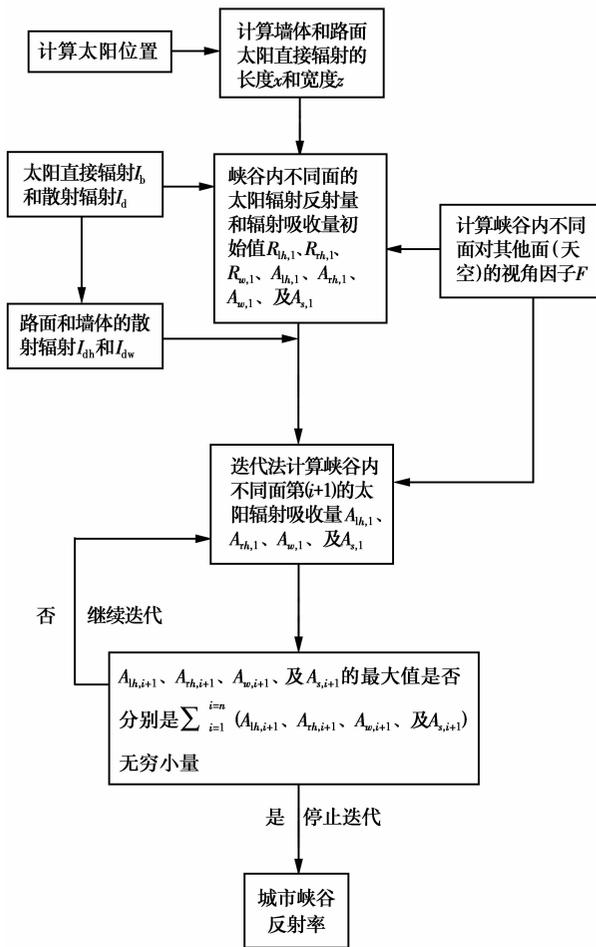


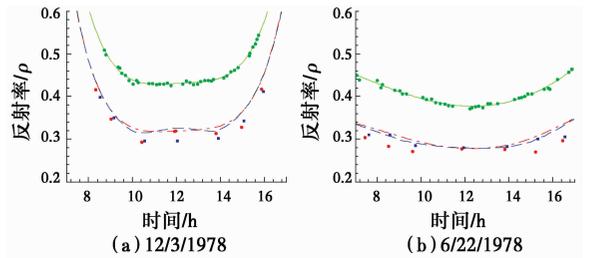
图 2 城市峡谷反射率计算的流程图

Fig. 2 Flowchat of lalculation arban canyon reflective

2 验证模型

采用文献[1]中的试验观测值验证数值模型的可靠性,该试验测量人造城市峡谷反射率。人造城市峡谷模型用水泥砖做建筑物墙体与屋顶,水泥砖墙体之间的部分做城市路面。试验所用人造城市峡谷的纵横比为 1.0,但峡谷走向不同。试验观测地纬度为 35.28°,晴朗天气。

为验证模型,将墙体和屋顶反射率和城市峡谷路面反射率叠加即为观测反射率。鉴于墙体和路面同为水泥混凝土材料,假定墙体与屋顶反射率 ρ_h 及路面反射率 ρ_w 为测量平坦混凝土地面的反射率(如图 3)。用线性内插法计算特定时间的平坦混凝土地面的反射率。图 3 对比不同季节的试验观测值与模拟值,试验观测值与模拟值的偏差较小,表明数值模型具有可靠性,而该偏差可能是因为试验观测地不确定的气象条件与人为因素造成的。



注: · 文献[1]观测值 — 模拟值

图 3 不同时间的城市峡谷反射率

Fig. 3 The UCA varies with solar time

3 模型的应用

城市峡谷反射率依赖于纵横比、墙体和路面的反射率、太阳位置及城市峡谷走向。为简化问题,本次模拟假设平坦混凝土地面的反射率为常数。以广西南宁($\varphi=22.8^\circ$)为例,除有特别说明外,本次模拟均采用以下参数值: $h/w=1.0$ 、 $\rho_h=0.4$ 、 $\rho_w=0.4$ 、 $k_T=1.0$ 及 $N=173$ (夏至)。

3.1 灰色路面和浅色墙体的城市峡谷反射率

浅色墙体的实际反射率为 0.40,灰黑色路面的反射率为 0.10。不同走向和纵横比的城市峡谷反射率变化情况如图 4 所示。根据图 4,城市峡谷反射率呈 M 型,日出后反射率迅速增大,之后达到最大值,正午时分反射率最小。

城市峡谷反射率随太阳位置而变化。当太阳入射角较小时,散射辐射占主导作用,且整个峡谷均受散射辐射作用,导致城市峡谷反射率较低。其根本原因是散射辐射到达峡谷后发生多重反射,与平坦地面相比峡谷反射到天空的辐射较少;随着太阳入射角增大,直接辐射占主导作用,太阳直接辐射照射到墙体上,一部分太阳辐射被反射到路面及对面墙体,另一部分被反射到天空。由于受直接辐射的墙体对天空的视角因子小于 1/2,城市峡谷反射率的最大值小于 0.2(0.4/2)(如图 4)。峡谷真实的最大反射率为 0.04~0.06,小于 0.2,这是因为散射辐射的低反射率抑制了城市峡谷反射率。最大反射率出现在太阳直接辐射照射到路面时,路面受辐射的部分也随着时间的推移而减少,路面的反射减少导致城市峡谷反射率降低。

除太阳位置外,时间与路基走向是影响城市峡谷反射率另两个重要因素。对于东西走向的城市峡谷,其反射率冬季较夏季大,原因在于冬季太阳直接辐射照射到墙体的时间较夏季长;而对于南北走向的城市峡谷,其反射率夏季较冬季大,原因在于太阳直接辐射首先照射到东面墙体,然后是路面,最后是西面墙

体。对东西走向的城市峡谷,最大辐射量出现在日出后不久,因为日出后路面受直接辐射(如图 4(a)和 4(b));而对南北走向的峡谷,太阳直接辐射需要一定的时间才能照射到路面,因此,城市峡谷反射率最大值出现在日出后和日落前的 1~2 h(如图 4(c)和 4(d))。

纵横比是影响城市峡谷反射率的关键因素,纵横比大的城市峡谷反射率小。深峡谷内部某一表面反射的辐射被其他面吸收的可能性比浅峡谷大,从而导致深峡谷太阳辐射吸收量比浅峡谷大。根据图 4,正午时分纵横比为 4.0 时的城市峡谷反射率较纵横比为 0.25 或 1.0 时低,说明墙体吸收较多的路面反射辐射。

3.2 不同路面反射率的城市峡谷反射率

路面反射率的大小取决于路面材料。养护期的灰色水泥混凝土路面反射率为 0.35~0.40,老化的水泥混凝土路面反射率为 0.20~0.30,反射率减小的原因在于轮胎和路面的摩擦及路面掺杂的泥土使路面颜色加深。新铺筑的沥青混凝土路面反射率约为 0.05,而老化的沥青混凝土路面反射率为 0.10~0.15,其原因在于路面磨损骨料外露路面颜色变浅致使反射率变大。为研究不同路面反射率对城市峡谷反射率的影响,本文模拟峡谷墙体反射率为 0.40

时,不同路面反射率($\rho_w=0.10、0.20、0.30、0.40$)的城市峡谷反射率。根据图 5(b),冬季东西走向的城市峡谷反射率较稳定,路面反射率的变化对其影响较小,这是因为太阳直接辐射主要照射南面墙体,较少到达路面。图 5 表明,提高路面反射率使城市峡谷反射率曲线由 M 型转变为 W 型。对于低反射率的路面,正午时分,城市峡谷反射率降低到最小,原因在于正午时分整个路面受太阳直接辐射,较低的路面反射率使其吸收较多的太阳辐射,从而降低城市峡谷反射率,导致城市峡谷反射率日变化曲线呈 M 型;对于高反射率的路面,由于路面相对于墙体有较大的天空的视角因子,路面受太阳直接辐射时,更多的太阳辐射被反射到天空。因此,正午时分城市峡谷反射率有所增加,城市峡谷反射率日变化曲线呈 W 型。

城市峡谷反射率随着路面反射率的增大而增大。正午时分,路面的反射率每增加 0.10,城市峡谷反射率增加大约 0.05,其原因可能是纵横比为 1.0 时,路面对天空的视角因子约为 0.5。这表明,天空视角因子或者纵横比是控制城市峡谷内部太阳辐射吸收量的主要因素。路面反射率对城市峡谷反射率的影响依赖于峡谷走向,东西走向的城市峡谷反射率日变化不同于南北走向。

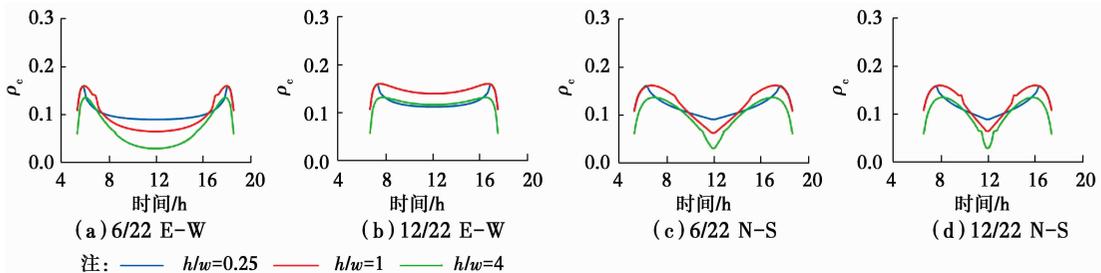


图 4 不同路面反射率对城市峡谷反射率的影响墙体的反射率 $\rho_h=0.4$,纵横比 $h/w=1.0$

Fig. 4 Influence of pavement albedo on the UCA the albedo of the wall $\rho_h=0.4$, $h/w=1.0$

3.3 太阳辐射被邻近的建筑墙体吸收

使用冷却路面缓解城市热岛效应获得广泛关注。夏季反射路面向邻近建筑物反射太阳辐射,增加邻近建筑物的热存储。为估算存储热量,本文模拟不同路面反射率的城市峡谷内部建筑物表面与天空的太阳辐射吸收量。

3.3.1 夏季 图 6 为夏季东西走向峡谷的路面与墙体的太阳辐射吸收量。图 6(c)表明,正午时分,路面的反射率每提高 0.10,其相应的吸收量减少 100 W/m^2 。其中,该减少量的一半被反射到天空,另一半分别被 2 个墙体吸收,吸收量均为 25 W/m^2 (如

图 5(a)和 5(b)),这种分配比例是由于路面对天空的视角因子接近 0.5(式(12)中 $h/w=1.0$ 时, $F_{w \rightarrow s} = \sqrt{2} - 1$)。由于纵横比决定视角因子,这种太阳吸收量分配比例进一步说明纵横比对城市峡谷反射率起决定作用。

南北走向的峡谷具有同样的太阳吸收量分配模式(如图 7),但具体的能量分配过程不同。对南北走向的峡谷,随着时间变化太阳辐射先后照射东面墙体、路面以及西面墙体。尽管存在这种差别,但天空仍吸收路面辐射量的 1/2,每面墙体各吸收 1/4。

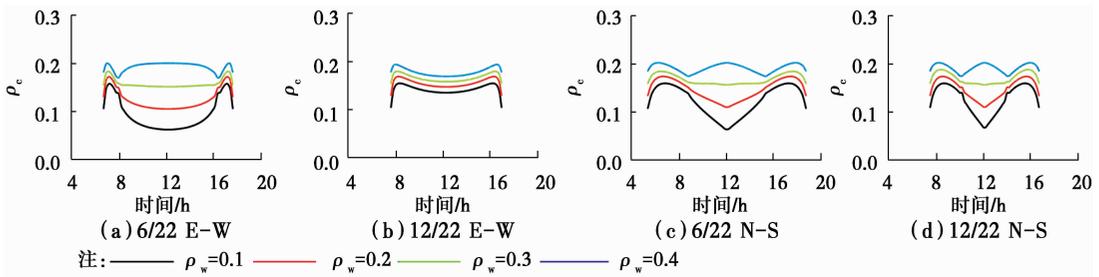


图 5 不同路面反射率对城市峡谷反射率的影响, 墙体的反射率 $\rho_h=0.4$, 纵横比 $h/w=1.0$

Fig. 5 Influence of pavement albedo on the UCA the albedo of the wall $\rho_h=0.4, h/w=1.0$

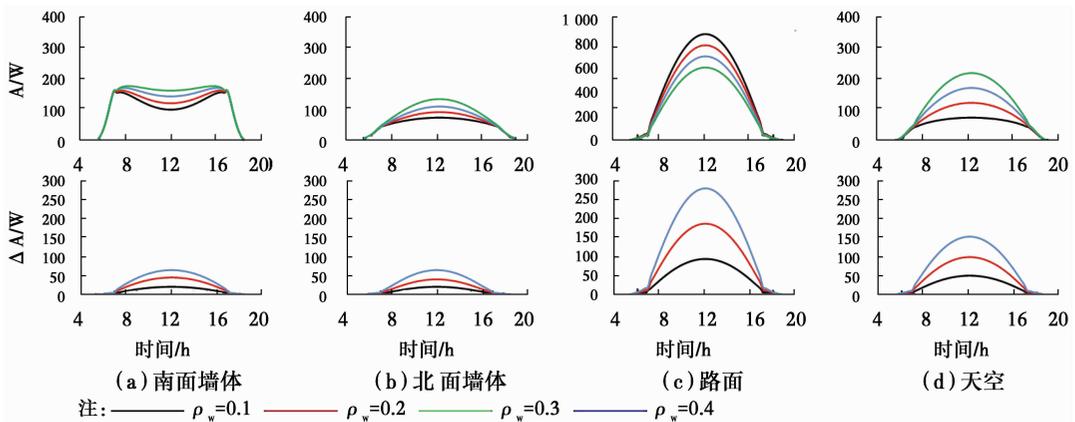


图 6 夏季 (东西走向, 6/22) 路面反射率对建筑墙体的能量吸收量的影响

ΔA 表示 $\rho_w=0.20, 0.30, 0.40$ 时的吸收量与 $\rho_w=0.10$ 时的吸收量的差值

Fig. 6 Influence of the pavement reflectivity on the energy absorption of the building walls during the summertime (Street orientation: E-W; Date: June 22)

Note: The subplots at the second row are the absorption at $\rho_w=0.20, 0.30, 0.40$ minus the absorption at $\rho_w=0.10$

3.3.2 冬季 反射路面向邻近建筑物反射太阳辐射, 促使建筑物存储热量。本文分别模拟峡谷东西

走向与南北走向时峡谷内部不同面与天空的吸收量 (图 8、9)。图 8 表明, 南面墙体比北面墙体和路面

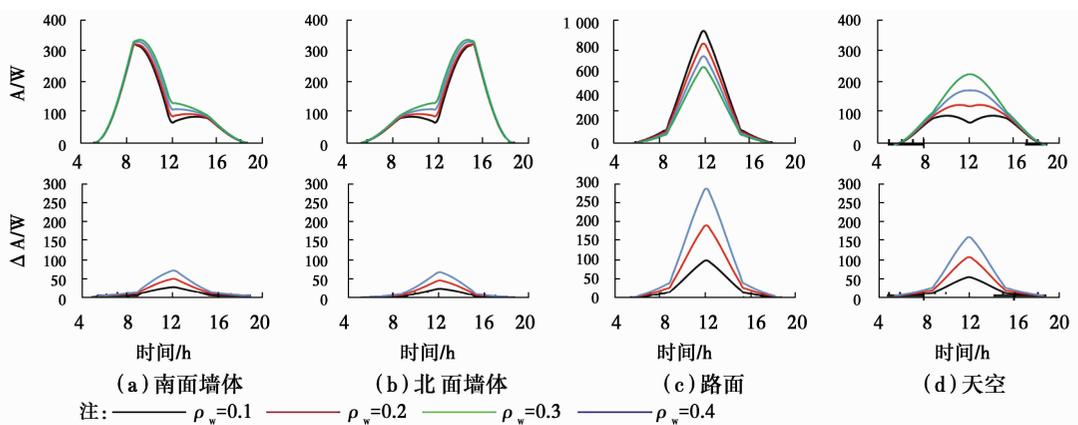


图 7 冬季 (南北走向, 12/22) 路面反射率对建筑墙体的能量吸收量的影响

ΔA 表示 $\rho_w=0.20, 0.30, 0.40$ 时的吸收量与 $\rho_w=0.10$ 时的吸收量的差值

Fig. 7 Influence of the pavement reflectivity on the solar absorption of the building walls during wintertime (Street orientation: N-S; Date: December 22)

The subplots at the second row are the absorption at $\rho_w=0.20, 0.30, 0.40$ minus the absorption at $\rho_w=0.10$

吸收较多的太阳辐射, 因为太阳方位角远离路面方位角, 导致南面墙体受太阳直接辐射的时间长, 而路

面受太阳直接辐射的时间短。路面的反射率每增加 0.10, 路面向天空和墙体反射的太阳辐射约增大

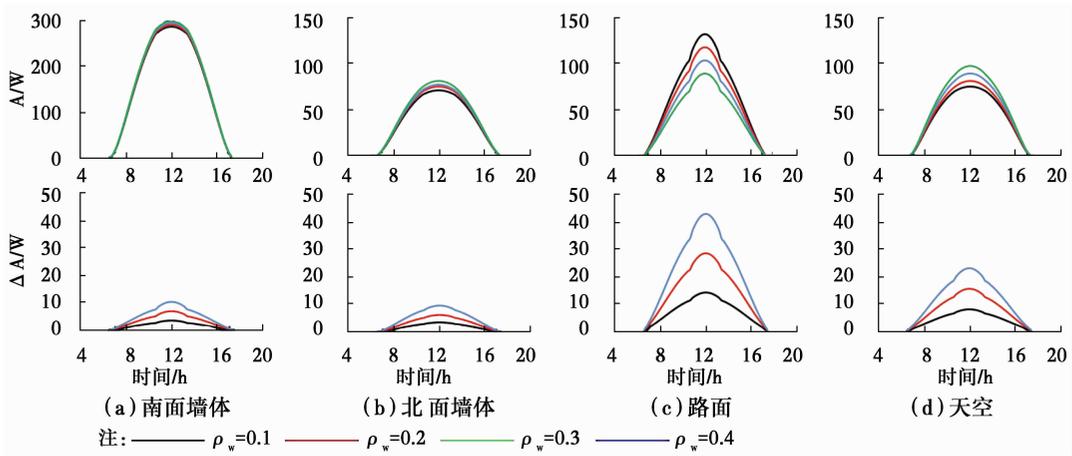


图 8 冬季(东西走向,12/22)路面反射率对建筑墙体的能量吸收量的影响

ΔA 表示 $\rho_w = 0.20, 0.30, 0.40$ 时的吸收量与 $\rho_w = 0.10$ 时的吸收量的差值

Fig. 8 Influence of the pavement reflectivity on the energy absorption of the building walls
(Street orientation: E-W; Date: December 22)

The subplots at the second row are the absorption at $\rho_w = 0.20, 0.30, 0.40$ minus the absorption at $\rho_w = 0.10$

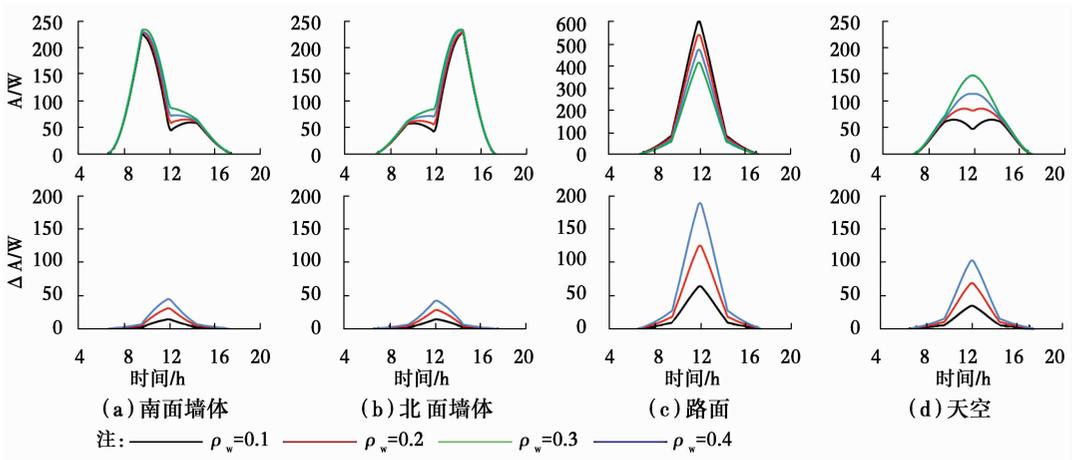


图 9 冬季(南北走向,12/22)路面反射率对建筑墙体的能量吸收量的影响

ΔA 表示 $\rho_w = 0.20, 0.30, 0.40$ 时的吸收量与 $\rho_w = 0.10$ 时的吸收量的差值

Fig. 9 Influence of the pavement reflectivity on the energy absorption of the building walls
(Street orientation: E-N; Date: December 22)

The subplots at the second row are the absorption at $\rho_w = 0.20, 0.30, 0.40$ minus the absorption at $\rho_w = 0.10$

15 W/m²,每面墙体总的额外吸收辐射大约为 4 W/m²(15/2/2)。图 9 反映峡谷南北走向时峡谷内部表面与天空吸收的额外辐射。南北走向的路面比东西走向的路面的照射时间更长,路面散射更多的热量。正午时分,路面的反射率每增加 0.10,路面对天空与墙体的额外辐射量大约为 8~10 W/m²。

4 结 论

提出城市峡谷反射率的理论计算模型,通过对比分析人造城市峡谷反射率试验观测值和理论计算值,验证了该数值模型的可靠性。分析模型得到如

下结论:

1) 峡谷纵横比是影响城市峡谷反射率的决定性因素,而其它因素影响相对较小。当峡谷纵横比 < 1.0 时,提高路面的反射率才能有效提高城市峡谷反射率。

2) 城市峡谷内部的反射路面能够向邻近建筑物反射可观的额外散射辐射。冬季时额外的太阳辐射反射到路面的反射量仅为夏季的 1/5。东西走向峡谷的反射率与南北走向峡谷反射率没有明显区别。当峡谷纵横比 < 1.0 时,建议峡谷路面采用反射路面缓解城市热岛。

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] 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(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)
- [4] ERBS D, KLEIN S, DUFFIE J. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation [J]. *Solar Energy*, 1982, 28(4): 293-302.
- [5] SAILOR D J, FAN H. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(4): 713-725.
- [6] SIEVERS U, ZDUNKOWSKI W. A numerical simulation scheme for the albedo of city street canyons [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 33(3): 245-257.
- [7] SANTAMOURIS M, GAITANI N, SPANOU A, et al. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project [J]. *Building and Environment*, 2012, 53: 128-136.
- [8] QIN Y, HILLER J E. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 85: 389-399.
- [9] POMERANTZ M, AKBARI H. Cooler paving materials for heat-island mitigation [J]. 1998 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Proceedings, 1998, 9: 135-146.
- [10] 吕振北, 段延红, 韩之栋, 等. 降低沥青混凝土路面储热量措施对比研究 [J]. *公路*, 2012(6): 128-131.
LV Z B, DUAN Y H, HAN Z D, et al. The comparative study on reducing heat storage measures of asphalt concrete pavement [J]. *Highway*, 2012(6): 128-131. (in Chinese)
- [11] SYNNEFA A, DANDOU A, SANTAMOURIS M, et al. On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(11): 2846-2856.
- [12] 郑木莲, 程承, 王彦峰, 等. 基于提高路面反照率的沥青路面降温技术试验研究 [J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2012(9): 63-66.
ZHENG M L, CHENG C, WANG Y F, et al. Experimental study on cooling technology of asphalt pavement based on improved albedo of pavement [J]. *Journal of Highway and Transportation (Research and Development)*, 2012(9): 63-66. (in Chinese)
- [13] KARLESSI T, SANTAMOURIS M. Improving the performance of thermochromic coatings with the use of UV and optical filters tested under accelerated aging conditions [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2013, 10(1): 45-61.
- [14] 王伟, 曹雪娟, 唐伯明. 太阳热反射涂层在沥青路面中的应用 [J]. *公路与汽运*, 2010(1): 97-99.
WANG W, CAO X J, TANG B M. The application of solar heat reflective coating in Asphalt Pavement [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2010(1): 97-99. (in Chinese)
- [15] LEVINSON R, AKBARI H. Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(11): 1679-1698.
- [16] MEDGAR L M, MARTHA G V. Solar reflectance values for concrete; intrinsic material properties can minimize the heat island effect [J]. *Concrete International*, 2008, 30(8): 52-58.
- [17] Sultana S. Extending asphalt pavement life with thin whitetopping [D]. Kansas: Kansas State University, 2010.
- [18] COOPER P I. The absorption of radiation in solar stills [J]. *Solar Energy*, 1969, 12(3): 333-346.
- [19] HARTMANN D L. *Global physical climatology* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1994.
- [20] JACOBSON M Z. *Fundamentals of atmospheric modeling* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [21] DUFFIE J A, BECKMAN W A. *Solar engineering of thermal processes* [M]. New York: Wiley, 1980.
- [22] ORGILL J, HOLLANDS K. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface [J]. *Solar Energy*, 1977, 19(4): 357-359.
- [23] QIN Y. Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 96: 86-94.
- [24] SOLAIMANIAN M, KENNEDY T W. Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation [J]. *Transportation Research Record*, 1993, 1417: 1-11.
- [25] MARTA J N O P, HEIDER J P G, PAUIO M C F. A matrix approach coupled with Monte Carlo techniques for solving the net radiative balance of the urban block [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 122(1): 217-241.