

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.002

## 城市区域综合反射率的求解

罗 庆, 吴运龙, 方小凯, 王汉斌, Al-Hamadan Sulala

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:**城市区域内复杂的建筑布局 and 形式导致了建筑间的多次反射辐射现象,而这种多次反射辐射一直是研究的难点问题,它直接影响到了城市区域内热环境的分析。以建筑间多次反射问题理论为基础,将城市综合反射率问题转换为与城市空间结构相关联的几何参数问题,使问题的分析过程具有一定的操控性。最后引入了实际案例进行分析,得到了考虑城市空间几何结构影响后的综合反射率,结果显示综合反射率比未考虑多次反射情况下的值要低 32.4%,该结论为城市热环境分析中反射率设定值的修正提供了重要的参考价值。

**关键词:**综合反射率;城市结构;天空视角系数

**中图分类号:** TU111.19    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2015)01-0007-05

## Solution of integrated reflection for cities

Luo Qing, Wu Yunlong, Fang Xiaokai, Wang Hanbin, Al-Hamadan Sulala

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The complicated architectural layout and form within urban area lead to the phenomenon of multiple-reflection radiation in the urban area. And this multiple-reflection radiation directly affects the thermal environment in urban areas. This paper is based on the theoretical basis of multiple-reflection between the buildings and converts the problem of urban integrated reflectivity into geometrical parameters which are relevant to the urban spatial structure. At the same time, a case study was taken to obtain an integrated reflectivity which had taken the structure of urban space into account. The results show the integrated reflection is lower 32.4% than the normal situation.

**Key words:** integrated reflection; urban structure; sky view factor

城市下垫面的反射率与城市热环境质量密切相关<sup>[1-5]</sup>,它一方面取决于下垫面材料的反射率,同时受到城市自身空间结构的影响,从而在城市内部形成多次反射辐射现象。城市下垫面的形态构造对这

种多次反射辐射具有决定性的影响<sup>[6-13]</sup>。当前,主要研究成果集中在简化的 2 个或多个单体建筑间,或者是简化后的街谷等。对于以城市区域为研究对象的反射率问题,主要采用卫星遥感的方式进行研

**收稿日期:** 2014-05-19

**基金项目:** 国家自然科学基金(51178481, 50808182, 51408079); 中央高校基本科研业务费(CDJZR10210008, CDJZR106112012, CDJZR210004, 106112014CDJZR210006)

**作者简介:** 罗 庆(1976-),男,博士,副教授,主要从事建筑环境研究,(E-mail)luoqing96@163.com。

**Received:** 2014-05-19

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(51178481, 50808182, 51408079), Fundamental Research Funds for the Central Universities, China(CDJZR10210008, CDJZR106112012, CDJZR210004, 106112014CDJZR210006)

**Author brief:** Luo Qing(1976-), PhD, associate professor, main research interest: built environment, (E-mail)luoqing96@163.com.

究<sup>[14-15]</sup>,但是该方法具有局限性,它虽然能够反演得到某个区域的综合反射率,但对于这种存在多次反射辐射的综合反射率的内部过程并不能进行解释。针对目前研究过程中存在的问题,从实际的城市下垫面入手,分析了城市空间结构是如何影响多次反射辐射的过程,求解出被城市结构影响后的综合反射率,并引入实际案例进行了综合反射率的测试和计算工作。

## 1 下垫面空间结构对多次反射辐射的影响

### 1.1 四合院结构对天空视角系数的计算

考虑一个由四面墙体围成的四合院结构(如图 1),对于该结构中心庭院(地面和墙体)对天空的视角系数是可以求解的。天空则看成是由庭院顶部的面构成(对天空的辐射,全部要穿透该面),根据天空视角系数的性质,可以得到。

$$A_{\text{courtyard}} F_{\text{courtyard} \rightarrow \text{sky}} = A_{\text{sky}} F_{\text{sky} \rightarrow \text{courtyrd}} \quad (1)$$

由于穿透面的面积已知,式(1)穿透面对庭院的辐射角系数  $F_{\text{sky} \rightarrow \text{courtyrd}} = 1$

$$F_{\text{courtyard} \rightarrow \text{sky}} = \frac{A_{\text{sky}} F_{\text{sky} \rightarrow \text{courtyrd}}}{A_{\text{courtyard}}} = \frac{A_{\text{sky}}}{A_{\text{courtyard}}} \cdot 1 \quad (2)$$

$$F_{\text{courtyard} \rightarrow \text{sky}} = \frac{a \cdot b}{a \cdot b + 2 \cdot (a + b) \cdot h} \quad (3)$$

式中:  $F_{\text{courtyard} \rightarrow \text{sky}}$  为庭院对天空角系数,其变化范围根据建筑的形式从 0 到 1 之间变化,并依赖于庭院的空间几何面积;  $A_{\text{courtyard}}$  为四合院内表面面积;  $F_{\text{courtyard} \rightarrow \text{sky}}$  为四合院对天空的视角系数;  $A_{\text{sky}}$  为天空面积;  $F_{\text{sky} \rightarrow \text{courtyrd}}$  为天空对四合院的辐射角系数。

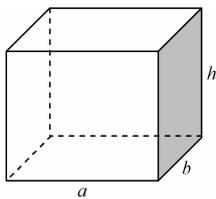


图 1 四合院结构

Fig. 1 The structure of the courtyard

### 1.2 城市空间结构对天空视角系数的计算

考虑城市的一部分置于由 4 个面围成的空腔内(图 2),如果这些面是墙体,那么根据前面的分析结果就可以得到构成该城市空间结构的天空视角系数,即天空的面积(城市平面面积)除以城市区域的外表面积(建筑立面、地面和假想体的 4 个面面积)。

$$F_{\text{city} \rightarrow \text{sky}} = \frac{A_{\text{sky}}}{A_{\text{city}}} = \frac{A_{\text{ground}}}{a \cdot b + \text{建筑立面}}$$

$$\frac{a \cdot b}{a \cdot b + 2 \cdot (a + b) \cdot h + \text{建筑立面}} \quad (4)$$

式中:  $F_{\text{city} \rightarrow \text{sky}}$  为城市对天空的视角系数;  $A_{\text{sky}}$  为天空面积;  $A_{\text{city}}$  为城市外表面积;  $A_{\text{ground}}$  为城市平面面积;

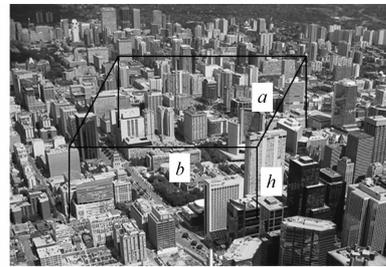


图 2 城市区域天空视角

Fig. 2 The sky view factor of city

由于实际过程中并没有  $2 \cdot (a + b) \cdot h$  项,但是当考虑城市的其他区域时,也采用类似的方法,那么一个城市可以看成是多个这样部分构成,即假想空腔体向周边延伸。对于一个整体城市而言,假定的空腔体周边边界的影响可以忽略,那么城市对天空辐射系数可以考虑为城市平面面积与城市表面面积的比率

$$F_{\text{city} \rightarrow \text{sky}} = \frac{A_{\text{sky}}}{A_{\text{city}}} = \frac{A_{\text{ground}}}{a \cdot b + \text{建筑立面}} \quad (5)$$

### 1.3 多次反射模型

研究考虑的都是非透明体,反射率为  $\rho$ ,吸收率为  $\alpha$ ,而透射率为 0。如果  $\rho = 1$ ,表明城市任何形状表面都没有吸收太阳辐射;如果  $\rho = 0$ ,表明表面是黑体,任何形状的城市表面都全部吸收全部辐射;如果  $0 \leq \rho \leq 1$ ,则表面部分反射和部分吸收,与城市对天空的视角系数有关。

如果城市表面是一个平面,则视角系数  $F_{\text{city} \rightarrow \text{sky}} = 1$ ,那么反射部分将会全部回到天空;如果  $F_{\text{city} \rightarrow \text{sky}} < 1$ ,则表明有部分反射辐射将会投射到城市表面上,而且会部分的再次吸收,对于一个单元的初始能量为 1,认为视角系数为  $F_{\text{city} \rightarrow \text{sky}}$ ,而且假定每次的反射和吸收比例是相同的,那么吸收量  $E_{\text{abs}}$ 、反射量  $E_{\text{re}}$  如下:

$$\text{第 1 次反射 } E_{\text{abs}1} = \alpha \cdot 1; E_{\text{re}1} = \rho \cdot 1 = (1 - \alpha) \cdot 1;$$

反射后的能量分为射向天空的  $\rho \cdot F$  部分和射向城市表面的  $\rho(1 - F)$  部分,

$$\text{第 2 次反射 } E_{\text{abs}2} = \alpha \cdot [(\rho) \cdot (1 - F)]; E_{\text{re}2} = \rho \cdot [(\rho) \cdot (1 - F)];$$

$$\text{第 3 次反射 } E_{\text{abs}3} = \alpha \cdot \{[\rho \cdot \rho(1 - F)] \cdot (1 -$$

$F)$ ;  $E_{re3} = \rho \cdot [\rho \cdot \rho(1-F)] \cdot (1-F)$ ;

第  $n$  次放射  $E_{absn} = \alpha \cdot [\rho^{n-1}(1-F)^{n-1}]$ ;  $E_{ren} = \rho \cdot [\rho^{n-1}(1-F)^{n-1}]$ 。

因此,整个被吸收的能量为

$$E_a = \alpha \cdot (1 + \rho(1-F) + \rho^2(1-F)^2 + \dots + \rho^n(1-F)^n + \dots = \alpha \cdot \frac{1 - \rho^{n+1}(1-F)^{n+1}}{1 - \rho(1-F)}$$

由于  $\alpha(1-F) < 1$ , 当  $n \rightarrow \infty$  时, 上式收敛为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha \cdot \frac{1 - \rho^{n+1}(1-F)^{n+1}}{1 - \rho(1-F)} = \alpha \cdot \frac{1}{1 - \rho(1-F)}$$

城市实际的表面辐射吸收率为

$$\alpha' = \alpha \cdot \frac{1}{1 - \rho(1-F)}$$

那么相应的城市综合反射率为

$$\rho' = 1 - \alpha' = 1 - \alpha \cdot \frac{1}{1 - \rho(1-F)} = \frac{\rho F}{1 - \rho(1-F)} \quad (6)$$

式(6)分析的多次反射率模型描述了该值是城市空间几何形状的函数(垂直面、地面等)。将下垫面分为屋顶和其他面 2 大类<sup>[16]</sup>, 然后按面积加权求解, 式(6)可以变为

$$\rho' = \rho_{average} \left\{ \left[ \frac{A_{g-built}}{A_{ground}} \cdot \frac{F_1}{1 - \rho_{average}(1-F_1)} \right] + \left[ \frac{A_{g-unbuilt}}{A_{ground}} \cdot \frac{F}{1 - \rho_{average}(1-F)} \right] \right\}$$

$$\rho' = \frac{A_{g-built}}{A_{ground}} \cdot \frac{\rho_{average} F_1}{1 - \rho_{average}(1-F_1)} + \frac{A_{g-unbuilt}}{A_{ground}} \cdot \frac{\rho_{average} F}{1 - \rho_{average}(1-F)}$$

屋顶的视角系数  $F_1 = 1$ , 因此:

$$\rho' = \rho_{average} \left\{ \frac{A_{g-built}}{A_{ground}} + \left[ \frac{A_{g-unbuilt}}{A_{ground}} \cdot \frac{F}{1 - \rho_{average}(1-F)} \right] \right\} \quad (7)$$

式中:  $A_1$  为建筑立面面积;  $A_{g-built}$  为建筑区域面积, 即屋顶面积;  $A_{g-unbuilt}$  为非建筑区域面积;  $F =$

$\frac{A_{g-unbuilt}}{A_{g-unbuilt} + A_1}$  为非建筑区域的天空视角系数。

## 2 案例分析

### 2.1 分析区域的基本情况

对某城市区域的综合反射率进行了案例分析, 该城市的典型区域和具体分析区域见图 3、4。

该分析区域的尺寸为  $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ , 对区域内所有建筑编号(如图 4)。该区域总面积为  $62\,500 \text{ m}^2$ , 共有建筑 19 栋, 占地面积共  $14\,186 \text{ m}^2$ , 非建筑区域

面积为  $48\,314 \text{ m}^2$ 。表 1 为该区域内相关建筑信息。



图 3 某城市的典型区域(方框为分析区域)

Fig. 3 Typical urban area (area in the square is the subject)



图 4 图 3 中划定分析区域的放大图

Fig. 4 Enlarged area for Fig. 3

表 1 分析区域建筑信息列表

Table 4 The list of analysis by regional architecture

编号	建筑名称	屋顶材料	立面材料
1	3 宿舍	混凝土	褐色瓷砖
2	4 宿舍	混凝土	褐色瓷砖
3	11 宿舍	混凝土	褐色瓷砖
4	勤工助学基地	混凝土	褐色瓷砖
5	10 宿舍	混凝土	褐色瓷砖
6	燃气实验楼	沥青	水泥砂浆
7	燃气楼	沥青	水泥砂浆
8	城环实验楼	混凝土	深红色瓷砖
9	给排水实验室	沥青	水泥砂浆
10	给排水楼	深红瓦片	褐色瓷砖
11	8 宿舍	混凝土	褐色瓷砖
12	7 宿舍	混凝土	褐色瓷砖
13	教工 4 舍	沥青	白色马赛克
14	浴室	混凝土	褐色瓷砖
15	材料实验楼	深红瓦片	深红色外墙砖
16	生物实验楼	种植屋顶	水泥砂浆
17	12 宿舍	混凝土	褐色瓷砖
18	食堂楼	混凝土	水泥砂浆
19	学生食堂	混凝土	褐色瓷砖

## 2.2 分析区域的平均反射率测试

由于不同材料之间的反射率存在差异,分析区域的平均反射率为面积加权平均值。

$$\rho_{\text{average}} = \frac{\sum_i \rho_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (8)$$

式中:  $\rho_{\text{average}}$  为平均反射率;  $A_i$  为不同下垫面的面积;  $\rho_i$  为不同下垫面的反射率。

2.2.1 非建筑区域计算 该区域主要包括车行道、人行道、羽毛球场等共计 42 773 m<sup>2</sup>。测试过程中,采用了便携式反射率仪(如图 5),仪器的型号是 MN-R 型,主要集中在太阳光的波长范围内,测试精度为 1.5%,结果如表 2 所示。



图 5 反射率测试仪器及测试过程

Fig. 5 Instrument for the reflectivity

表 2 非建筑区域下垫面材料及反射率  
Table 2 Non construction area underling surface material and reflection

名称	路面材料	反射率/%	面积/m <sup>2</sup>
3 宿舍	水泥	38.0	909
4 宿舍	水泥	38.0	253
7、8 宿舍	水泥	38.0	2 200
12 宿舍	水泥	38.0	148
羽毛球场	水泥	38.0	1 197
博士后公寓	水泥	38.0	358
农生学院	沥青	17.0	476
绿地	植被	20.0	42 773

根据以上数据,式(8)求得非建筑区域平均反射率为 21.9%。

$$\rho_{\text{average-streets}} = \frac{\sum_i \rho_i A_i}{\sum_i A_i} = 21.9\%$$

2.2.2 建筑屋顶区域计算 该区域内屋面类型有 4 种,分别是混凝土屋面、沥青屋面、种植屋面和瓦片屋面,各类型屋顶材料及反射率如表 3 所示。

表 3 屋顶材料及反射率  
Table 3 Roof material and reflection

名称	面积/m <sup>2</sup>	反射率/%
混凝土	9 477	24.8
沥青	2 211	17.8
种植屋顶	721	15.0
红色瓦片	1 777	23.0

采用同样方法,得到屋顶平均反射率为 23.0%。

$$\rho_{\text{average-roofs}} = \frac{\sum_i \rho_i A_i}{\sum_i A_i} = 23.0\%$$

2.2.3 建筑立面反射率计算 对区域内 19 栋建筑按立面类型进行分类,共分 5 类(图 6~10);类型 I 为 4 栋较旧学生宿舍;类型 II 为 3 栋新建学生宿舍;类型 III 为各类实验室建筑共计 7 栋;类型 IV 为食堂、浴室等共 3 栋;类型 V 为其余 2 栋建筑,分别为勤工助学基地和教工 4 公寓。



图 6 类型 I 建筑立面

Fig. 6 Façade I



图 7 类型 II 建筑立面

Fig. 7 Façade II



图 8 类型 III 建筑立面

Fig. 8 Façade III



图 9 类型Ⅳ建筑立面

Fig. 9 Façade IV



图 10 类型Ⅴ建筑立面

Fig. 10 Façade V

通过测量和计算,得到每一类建筑墙体占立面面积的比例:类型Ⅰ:39.1%;类型Ⅱ:25.7%;类型Ⅲ:64.7%;类型Ⅳ:37.5%;类型Ⅴ:80.9%。测定各类材料构成的建筑外立面反射率如表 4 所示。

表 4 建筑外立面反射率测试值  
Table 4 Façade reflection

立面材料	反射率/%
水泥砂浆	0.32
深红色外墙砖	0.33
深红色瓷砖	0.33
褐色瓷砖	0.33
普通玻璃	0.08
白色马赛克	0.42

分别求得每一类型建筑的平均反射率,得到:

类型Ⅰ:  $\rho_{ave} = 17.8\%$ ; 类型Ⅱ:  $\rho_{ave} = 14.4\%$ ; 类型Ⅲ:  $\rho_{ave} = 23.7\%$ ; 类型Ⅳ:  $\rho_{ave} = 19.6\%$ ; 类型Ⅴ:  $\rho_{ave} = 34.2\%$

对每一类型的面积加权平均,得到立面平均反射率

$$\rho_{average-facades} = \frac{\sum_i \rho_i A_i}{\sum_i A_i} = 19.4\%$$

综合考虑研究区域内的街道、屋顶、建筑立面面积等:街道  $A_{g-unbuilt} = 48\,314\text{ m}^2$ , 屋顶  $A_{g-built} = 14\,186\text{ m}^2$ , 立面  $A_1 = 44\,548\text{ m}^2$ , 得到整个研究区

域的平均发射率为:  $\rho_{average} = 21.0\%$

### 2.3 区域综合反射率计算

现在考虑建筑间多次反射辐射后的综合反射率,由于  $\rho_{average} = 21.0\%$ ;  $A_{g-unbuilt} = 48\,314\text{ m}^2$ ;  $A_{g-built} = 14\,186\text{ m}^2$ ;  $A_1 = 44\,548\text{ m}^2$ ; 所以:

$$F = \frac{A_{g-unbuilt}}{A_{g-unbuilt} + A_1} = \frac{48\,314}{48\,314 + 44\,548} = 0.52.$$

(与文献[17]的理论值相比,误差  $\sigma < 5\%$ )

将以上结果代入前面的分析式,得到

$$\rho' = \rho_{average} \left\{ \frac{A_{g-built}}{A_{ground}} + \left[ \frac{A_{g-unbuilt}}{A_{ground}} \cdot \frac{F}{1 - \rho_{average}(1 - F)} \right] \right\} \quad (7)$$

$\rho' = 14.2\%$ , 即考虑了建筑间多次反射情况后,整个区域的综合反射率为 14.2%。即在考虑多次反射辐射 (21.0%) 的基础上,反射率降低了 32.4%。由此可见,在考虑城市空间结构后,城市的综合反射率大幅度降低,导致城市热量散发不出去,也是导致城市热岛的重要原因之一。

## 3 结论

在分析建筑间多次反射问题理论基础上,将城市综合反射率问题转换到了与城市空间结构相关联的几何参数问题上,并引入了实际案例进行分析,从而得出了考虑城市空间几何结构后的综合反射率。案例分析结果显示,考虑了多次反射后的综合反射率有大幅度降低的趋势。该研究为从城市空间布局角度提升综合反射率,降低城市热岛影响程度具有参考价值。

### 参考文献:

- [1] Dash P, Gottsche F M, Olesen F S, et al. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (13):2563-2594.
- [2] Levinson R, Akbari H, Berdahl P. Measuring solar reflectance-part I: defining a metric that accurately predicts solar heat gain [J]. Solar Energy, 2010, 84 (9):1717-1744.
- [3] Levinson R, Akbari H, Berdahl P. Measuring solar reflectance-part II: review of practical methods [J]. Solar Energy, 2010, 84(9):1745-1759.
- [4] Synnefa A, Santamouris V, Livada I. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment [J]. Solar Energy Journal, 2006(80):968-981.

(下转第 17 页)