

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.003

太阳辐射直散分离模型比较研究—以北京地区为例

冯 巍^{1,2}, 董 宏³, 杨 柳¹, 刘加平¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055; 2. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590;
3. 中国建筑科学研究院 建筑物理所, 北京 100013)

摘要:在建筑能耗模拟与太阳能建筑系统设计中,逐时的太阳直射和散射气象数据是最重要的基本参数。由于中国辐射观测数据的缺失,逐时直射和散射数据很难获得。很多学者对此进行了研究,提出了数十种直散分离模型。采用北京地区 2009 年—2011 年 3 年太阳总辐射和散射实测数据,选取 Erbs 模型、Orglill 模型、清华大学随机气象模型、宇田川光弘模型、张晴原模型 5 个代表性的直散分离模型进行计算验证,分析比较了实测数据和计算数据之间的相关系数 R 、均方根误差 RMSE 和相对误差 RE ,得出晴空指数 K_t 可以作为最主要的影响因子,Erbs 模型预测散射的准确率最高,其次为张晴原模型和 Orglill and Hollands 模型。

关键词:太阳总辐射;散射量;散射分离模型

中图分类号: TU119 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2015)01-0012-06

Comparison of the fraction model of direct and diffuse solar radiation —Taking Beijing area as an example

Feng Wei^{1,2}, Dong Hong³, Yang Liu¹, Liu Jiaping¹

(1. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, P. R. China;
3. Architectural Physics Institute of CABR, Beijing 100013, P. R. China)

Abstract: In the simulation of building energy consumption and solar energy system design, hourly direct and diffuse radiation is one of the most important basic parameters. While, due to Chinese solar radiation data missing, it is difficult to obtain hourly direct and diffuse radiation data. Many domestic and foreign scholars has studied and put forward several diffuse radiation models. 2009-2011 year's measured data of total solar radiation and diffuse radiation were selected and five typical separation models, that is Erbs model, Orglill and Hollands model, stochastic climatic model, Zhang Qingyuan model, were put to analyze and compare the measured data and the simulation data between the correlation coefficient, root mean square error and relative error. Found that Erbs model predicts diffuse radiation with the highest accuracy, followed by the Zhang Qingyuan model and Orglill and Hollands model, Clearness index K_t can be used as the main influence factor.

Key words: Global solar radiation; Diffuse solar radiation; Diffuse fraction models

收稿日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51325803); 国家“十二五”科技支撑计划课题(2014BAJ01B01)

作者简介: 冯 巍(1978-), 男, 博士生, 主要从事绿色建筑技术研究, (E-mail) fengwei9791@163.com。

Received: 2014-07-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51325803); “Twelfth Five-year” Science and Technology Support Plan (No. 2014BAJ01B01)

Author brief: Feng Wei (1978-), doctoral candidate, main research interest: green building technologies, (E-mail) fengwei9791@163.com.

建筑物在进行空调系统设计或建筑物能耗模拟分析时,常常需要用到逐日逐时的直射和散射气象数据。目前中国大多数城市的气象台站只有水平面的总辐射观测数据,缺少相应的直射或散射观测数据,除少数一级台站能提供散射辐射以外,多数台站只能提供水平面总辐射。

在气象学领域,学者更多关注的是年辐射、月辐射和日辐射数据的累计量,对于散射和直射的逐时值的研究相对较少,但是在建筑节能领域中,尤其是对典型气象年数据库的开发以及建筑做动态能耗模拟时,准确的散射和直射辐射是保证气象数据应用的最重要的前提条件,也是决定建筑能耗模拟结果准确与否的关键所在。因此,有针对性的开发建筑节能设计用的太阳辐射数据是面临的主要问题。虽然现在很多台站和高校科研机构纷纷建立了太阳辐射站,但太阳辐射的观测是一个长周期过程。因此,在实测资料非常有限的情况下,有必要通过模型计算方法得到没有实测辐射资料台站的太阳辐射值,以完善该台站的建筑用太阳辐射数据,使该台站在城市准确地能耗计算成为可能。

国外已有很多关于直散分离模型的研究,最早源于 1960 年 Liu 等^[1]提出的模型。此后,各国学者在此基础上,开发了以本国地区气候特征为依据的多种类型模型。其中比较典型的有:1977 年 Orgill 等^[2]模型、1978 年宇田川光弘^[3]模型、1979 年 Colares-Pereira 等^[4]模型、1982 年 Erbs^[5]模型、1990 年 Reindl^[6]模型和 1996 年 Lam 等^[7]模型、2004 年张晴原模型^[8]等。目前中国直散分离模型研究相对较少,最早始于 1964 年翁笃鸣提出的模型。2002 年重庆大学田胜元等^[9]提出多项式模型,2004 年清华大学提出的随机气象模型^[10-11]、2013 年同济大学李峥嵘等^[12-13]提出了针对上海地区的直散分离模型。查阅资料发现^[21-22],目前我们大多数都是直接采用某一种模型进行计算应用,至于不同模型适应性如何论证不多,因此,有必要对不同模型在不同地区的适应性做进一步分析比较。

1 直散分离模型

通过查阅文献,对比分析选取文献[14-20]对比分析得出的 Erbs 模型、Orgill 模型;文献[8]和文献[10-11]是由 Joe Huang、张晴原和清华大学在中国出版公开的两个气象数据库其中所提出的两个模型;因日本与中国比邻,故选取文献[2]、文献[8]中

所提到的宇田川光弘模型。上述不同国家的 5 个直散分离模型具有一定代表性,通过分析比较太阳散射的实测值和模拟计算值之间的线性关系及误差,目的在于找出适合中国气候条件的模型,乃至为下一步提出适合中国不同气候区的太阳辐射模型提供理论依据。

文中使用的符号: h 为太阳高度角,°; I 为大气层外水平面总辐射量, W/m^2 ; I_d 为水平面散射量, W/m^2 ; I_h 为水平面太阳总辐射量, W/m^2 ; I_0 为太阳常数, $1\ 367\ W/m^2$; I_n 为法线面直射辐射量, W/m^2 ; τ_d 为水平面散射量与大气层外总辐射量之比; K_t 为晴空指数,即水平面总辐射量与大气层外总辐射量之比; K_d 为水平面散射量与水平面总辐射量之比; K_n 为直射辐射量与大气层外总辐射量之比。

1) Erbs 模型^[5]

$$K_d = 1.0 - 0.09K_t \quad (K_t \leq 0.22) \quad (1)$$

$$K_d = 0.951 - 0.160 - 1K_t + 4.388K_t^2 - 16.638K_t^3 + 12.336K_t^4 \quad (0.22 < K_t \leq 0.80) \quad (2)$$

$$K_d = 0.165 \quad (K_t > 0.80) \quad (3)$$

2) Orgill 模型^[2]

$$K_d = 1.0 - 0.249K_t \quad (K_t < 0.35) \quad (4)$$

$$K_d = 1.577 - 1.84K_t \quad (0.35 \leq K_t \leq 0.75) \quad (5)$$

$$K_d = 0.177 \quad (K_t > 0.75) \quad (6)$$

3) 随机气象模型^[10-11]

$$\tau_d = 0.271 - 0.293 - 9(1.416 \times K_t - 0.384) \quad (K_t \geq 0.74) \quad (7)$$

$$\tau_d = K_t - (1.492 \times K_t - 0.492) \quad (K_t > 0.6) \quad (8)$$

$$\tau_d = K_t - [e^{(0.935K_t^2)-1}] \quad (K_t \leq 0.6) \quad (9)$$

$$\tau_d = K_t \quad (K_t \leq 0.28) \quad (10)$$

4) 宇田川光弘模型^[2,8]

$$K_n = -0.43 + 1.43K_t \quad (K_t \geq K_{tc}) \quad (11)$$

$$K_n = (2.277 - 1.258\sin h + 0.239\ 6\sin^2 h)K_t^3 \quad (K_t < K_{tc}) \quad (12)$$

$$K_{tc} = 0.516\ 3 + 0.333\sin h + 0.008\ 03\sin^2 h \quad (13)$$

5) 张晴原等模型^[8]

$$I_d = I_h - I_n \sin h \quad (14)$$

$$I_n = K_n I_0 K_n = A_1 A_2^{-A_3 A_2^{-A_4 K_t}} \quad (15)$$

$$A_1 = -0.155\ 6\sin^2 h + 0.102\ 8\sin h + 1.374\ 8 \quad (16)$$

$$A_2 = 0.7973 \sin^2 h + 0.1509 \sin h + 3.035 \quad (17)$$

$$A_3 = 5.4307 \sin h + 7.2182 \quad (18)$$

$$A_4 = 2.990 \quad (19)$$

2 数据来源与处理

数据采用中国建筑科学研究院自行建设的辐射观测站进行监测。采用所提供的 2009—2011 年连续 3 年的逐时太阳总辐射和散射实测数据为基础(每隔半小时记录 1 次辐射值),在数据应用的各个阶段分别作数据质量检测,剔除不合理数据,保证数据的可靠性。

通过对 5 个模型模拟计算的数据与实测的逐时太阳散射数据进行比较,评价不同模型的适用性。评价指标选取为:相关系数 R 、均方根误差 RMSE、相对误差 RE ,计算如式(20)、(21)、(22)所示。目的在于找出最适合北京地区的直散分离模型,为下一步进行模型的直接应用或者进一步修订提供理论基础和依据。

$$RE = \left(\frac{I_{dm} - I_{dc}}{I_{dm}} \right) \times 100\% \quad (20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{dci} - I_{dmi})^2}{n}} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (21)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{dci} - I_{dca})(I_{dmi} - I_{dma})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{dci} - I_{dca})^2 \sum_{i=1}^n (I_{dmi} - I_{dma})^2}} \quad (22)$$

式中: I_{dm} 为实测的散射辐射; I_{dc} 为模拟计算的散射辐射; I_{dca} 和 I_{dma} 分别为实测和模拟的均值, n 为采样个数。

3 模型检验与讨论

1)图 1 为北京市水平面散射的实测值与通过 5 个模型模拟计算出的散射辐射的线性相关系数 R 和均方根误差 RMSE。前 5 幅图为模型全年数据的散点图,第 6 幅图为 Erbs 模型在 $K_t \geq 0.7$ 时的散点图。从前 5 幅图中可以看出:5 个模型的相关系数 R 由大到小排序为 Erbs 模型 0.883,张晴原模型 0.881,Orglill 模型 0.879,宇田川模型 0.860,随机气象模型 0.850。Erbs 模型和张晴原模型拟合度最高,实测数值和模拟计算值相关性最强;5 个模型的均方根误差 RMSE 由小到大张晴原模型 58.1 W/m^2 ,Erbs 模型 58.2 W/m^2 ,Orglill 模型 58.3 W/m^2 ,宇田川光弘模型 63.9 W/m^2 ,随机气象模型 80.3 W/m^2 。

张晴原模型、Erbs 模型与 Orglill 模型均方根误差最小,彼此数值相差不大。此外,第 6 幅图为 Erbs 模型在 $K_t \geq 0.7$ 时的对比图,从图中可以看出,模型呈现了模拟计算的散射辐射和实测值离散较大的情况,相关系数 $R=0.38$,对其他模型做类似分析,也都有类似的规律,其主要原因以及模型是否适用问题将在影响因素晴天指数 K_t 时进行讨论。

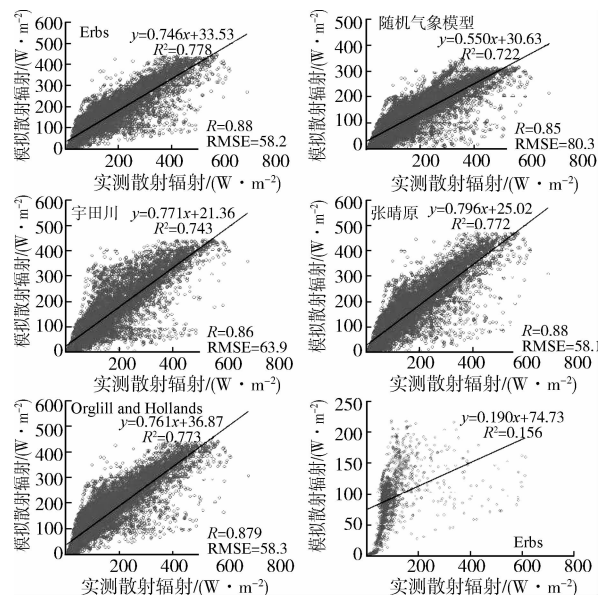


图 1 散射量的观测值和模拟值相关图

Fig. 1 The correlation diagram of the measured value and the estimated value

2)图 2 为 5 个模型 1 d 逐时的实测散射辐射和模拟计算散射辐射对比图。选取的数据为 2011 年 6 月 18 日逐时值,其他日期逐时值对比也有类似的规律,不在详述。从图中可以看出:在具体 1 d 逐时值中,从总体情况来看,宇田川模型计算值与实测值相比普遍偏大,随机气象模型计算值偏小。Erbs 模型与实测值吻合最好,张晴原模型和 Orglill 模型计算结果数值非常接近,吻合度仅次于 Erbs 模型。

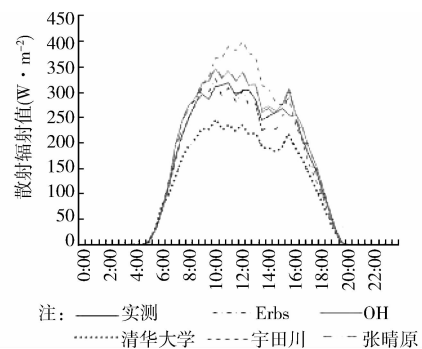


图 2 实测值与推定值对比

Fig. 2 The comparison of measured value and the estimated value

表 1 2011 年 1 月 13 日逐时散射辐射实测值、计算值与晴空指数 K_t 之间的关系
Table 1 The relationship among theHourly scattering measured values, the calculated value, the clearness index K_t

时间	散射辐射/($W \cdot m^{-2}$)						K_t
	实测值	计算值					
	张晴原模型	Erbs模型	Orglill and Hollands	宇田川模型	随机气象模型		
8:00	20.13	22.35	23.00	22.48	22.30	23.30	0.14
8:30	51.24	65.10	71.67	69.30	62.91	74.40	0.28
9:00	73.08	105.82	123.28	123.28	100.67	87.51	0.40
9:30	86.25	128.08	149.67	148.79	120.25	107.16	0.49
10:00	99.31	140.99	160.15	163.42	130.02	117.48	0.54
10:30	109.56	141.10	153.97	165.09	125.20	116.49	0.60
11:00	116.27	140.76	148.32	164.60	120.57	113.80	0.63
11:30	118.22	132.91	135.57	155.94	106.16	108.77	0.66
12:00	129.20	129.18	130.25	151.58	99.20	106.52	0.67
12:30	137.62	145.85	151.41	168.99	125.23	116.88	0.63
13:00	145.06	128.49	133.19	152.38	102.48	106.02	0.65
13:30	142.98	120.54	128.31	145.59	95.80	101.02	0.64
14:00	136.15	113.11	125.78	139.30	93.02	96.30	0.62
14:30	125.05	106.68	125.56	132.57	94.31	94.24	0.58
15:00	106.99	88.97	110.53	113.51	81.64	81.47	0.55
15:30	86.86	61.39	81.68	83.85	56.77	60.19	0.55
16:00	62.95	35.39	51.17	51.98	34.08	37.40	0.54
16:30	33.18	2.39	6.73	6.69	5.23	3.45	0.76

表 2 不同晴空指数 K_t 天数所占的比例

Table 2 The proportion of the different clearness index number

$K_t < 0.7$	$0.7 \leq K_t \leq 0.9$	$K_t \geq 0.9$
86.05%	13.7%	0.25%

表 1 为 2011 年 1 月 13 日 5 个模型的逐时散射实测值、计算值与晴空指数 K_t 之间的关系。从表中可以看出,1 d 中 K_t 基本都小于 0.7,5 个模型的计算结果都围绕实测值波动。Erbs 模型、Orglill 模型、张晴原模型表现最好,一天中的计算结果相差不大,宇田川模型和随机气象模型计算结果总体偏小。上午期间,模型计算结果都比实测值大,其中张晴原模型计算结果最为接近实测值;中午期间,张晴原模型和 Erbs 模型计算结果与实测值结果最为接近,彼此差距不大,Orglill 模型其次;下午期间,Erbs 模型和 Orglill 模型表现最好,张晴原模型其次。

3)表 2 为不同晴空指数 K_t 对应的天数所占总数的比例,从中可以看出, $K_t < 0.7$ 的天数占了 86.05%,而 $K_t \geq 0.7$ 的天数仅为 13.95%,这也验证了图 1 中所提到的,虽然当 $K_t \geq 0.7$ 时,各个模型都存在着模拟值与实测值误差较大的现象,但北京实际天气情况中, $K_t \geq 0.7$ 时所占的比例较小,因此,各个模型在北京地区应用仍有现实意义,同时晴空指数 K_t 偏小,这也符合北京空气质量较差的

特点。

图 3 为在晴天指数 K_t 每隔 0.1 递增的区间时 5 个模型的相关系数 R 对比图。由图可知,在 $K_t < 0.7$ 时,5 个模型的相关系数 R 数值相差不大,Erbs 模型和 Orglill and Hollands 模型的相关系数 R 最高。但是所有模型在 $0.9 \geq K_t \geq 0.7$ 区间时,相关系数 R 都出现了下降的趋势。造成这种情况主要有两种原因:一个是模型在此区间准确度较差,需要进行修正;另一个原因是在北京地区,该区间内的数据一般较少,因此实测数据的随机性较大。

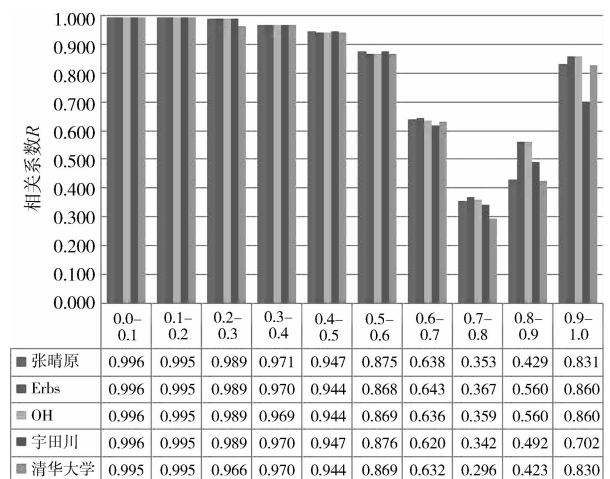


图 3 不同 K_t 区间内的相关系数

Fig. 3 The correlation coefficient of different K_t interval

4)表 3 为 5 个模型相对误差绝对值的累计百分比。由表得知,在相对误差小于 10%的数据所占的百分比中,Erbs 模型最高为 40.97%,其次为张晴原模型为 38.16%、Orglill 模型为 35.29%;在误差小

于 20%的数据所占的百分比中,Erbs 模型 63.00%为最高,其次张晴原模型为 61.30%、Orglill 模型为 61.29%。

表 3 相对误差累计百分比
Table 3 The cumulative distribution percentage of relative errors

模型	5	10	15	20	25	30	35	40
张晴原模型	17.53	38.16	52.45	61.30	67.52	72.31	76.15	79.18
Erbs 模型	18.48	40.97	54.40	63.00	68.32	72.99	76.76	79.98
Orglill and Hollands	14.85	35.29	51.80	61.29	66.79	70.90	74.35	77.47
随机气象模型	15.04	30.04	39.40	45.71	52.43	60.53	69.56	76.86
宇田川模型	13.05	30.69	47.58	59.77	67.67	72.94	77.20	80.17

4 结论

1)通过比较分析,Erbs 模型在北京地区直散分离模拟计算中具有很高的准确度,可作为北京周边等北方地区典型气象年太阳辐射计算模型,张晴原模型和 Orglill and Hollands 模型准确度次之。

2)Erbs 模型和 Orglill and Hollands 模型采用 K_t 分区函数算法,张晴原模型采用相对简单的单一函数算法,虽然算法不同,但结果相差不大。但张晴原模型单一函数的算法更为简化,已得到推广应用。

3)晴天指数 K_t 与 K_d 线性相关系数 R 等于 0.96 左右。证明散射和晴空指数 K_t 线性关系很强, K_t 是模型中最主要的参数指标。 K_t 越大,意味着散射量越小,直射量越大,这对确定最佳的太阳能集热系统及光伏电板安装角度有关键作用。

以北京数据为基础,对直散分离模型的适应性进行了分析,得出了适合北京等类似城市的直散分离模型。因中国气候类型多样,气候数据量庞大,下一步的工作主要是对其它城市的辐射数据做进一步比较,对不同模型的逐时太阳辐射作类似分析,总结出适合我国气候特点的直散分离模型,为直散分离模型在我国的适应性研究提供更多的理论依据。

参考文献:

- [1] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. Solar Energy, 1960, 4(3): 1-19.
- [2] Orgill J F, Hollands K G T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface [J]. Solar Energy, 1977, 19(4): 357.
- [3] 宋爱国. 日本太阳辐射模型的研究概况与评析[J]. 首都师范大学学报, 1997, 18(9): 69-72.
- Song A G. General situation and analysis of model of

solar radiation in Japan [J]. Journal of Capital Normal University, 1997, 18(9): 69-72. (in Chinese)

- [4] Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values [J]. Solar Energy, 1979, 22(2): 155-164.
- [5] Erbs D G, Klein S A, Duffie J A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation [J]. Solar Energy, 1982, 28(4): 293-302.
- [6] Reindl D T, Beckman W A, Duffie J A. Diffuse fraction correlations [J]. Solar Energy, 1990, 45(1): 1-7.
- [7] Lam J C, Li D H W. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components [J]. Building and Environment, 1996, 31(6): 527-535.
- [8] 张晴原, Joe Huang. 中国建筑用标准气象数据库[M]. 机械工业出版社, 2004. 9.
- [9] 苏华, 田胜元, 苏芬仙. 空调系统能耗分析用散射分离模型[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 08: 73-76.
- Su H, Tian S Y, Su F X. Models to separate daily diffuse radiation from daily total radiation for energy consumption analysis of air-conditioning system [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 08: 73-76. (in Chinese)
- [10] 江亿. 空调负荷计算用随机气象模型[J]. 制冷学报, 1981, 7(3): 45-55.
- Jiang Y. The stochastic weather data model for the heat gain calculation of air-conditioning system [J]. Refrigeration Journal, 1981, 7(3): 45-55. (in Chinese)
- [11] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [12] 李峥嵘, 姚万祥, 赵群, 等. 水平面日太阳散射辐射模型对比研究[J]. 太阳能学报, 2013, (5): 794-799.
- Li Z R, Yao W X, Zhao Q, et al. Study on the comparison of models for daily diffuse solar radiation on a horizontal surface [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,

- 2013, (5):794-799. (in Chinese)
- [13] 姚万祥,李峥嵘,赵群,等. 几种散射辐射模型精度的对比[J]. 同济大学学报:自然科学版,2014,(6):937-943. YAO W X, Li Z R, Zhao Q. Comparative study on accuracy of several diffuse radiation models [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, (6): 937-943. (in Chinese)
- [14] Soares J, Oliveira A P, Bznar M Z, et al. Modeling hourly diffuse solar radiation in the city of Sao paulo using a neural-network technique [J]. Applied Energy, 2004, 79 (2):201-214.
- [15] Boland J, Scott L, Luther M. Modeelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface [J]. Environmetrics, 2001, 12(2):103-116.
- [16] Boland J, Ridley B, Brown B. Models of diffuse solar radiation [J]. Renewable Energy, 2008, 33 (4): 575-584.
- [17] Sokol D, Ardeshir M. Computing diffuse fraction of global horizontal solar radiation: a model comparison [J]. Solar Energy, 2012, 86:1796-1802.
- [18] Srivastava S K. Comparison of methods for estimating daily and hourly diffuse solar radiation [J]. Applied Energy, 1995, 51:119-123.
- [19] Koray U, Arif H. Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50:149-156.
- [20] Indira K, Bimal P, Kavita P. Evaluation of different diffuse radiation models for Indian stations and predicting the best fit model [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15:2378-2384.
- [21] 林伟,沈辉. 数值拟合估算水平面散射辐射量的基本方法与分析[J]. 可再生能源, 2013, (1):1-4. Lin W, Shen H. The numerical simulation of diffuse solar radiant exposure by using total solar radiant exposure on a horizontal surface [J]. Renewable Energy Resources, 2013, (1):1-4. (in Chinese)
- [22] 谢燕华,余涛,顾行发,等. 日太阳散射辐射月均值估算模型的对比分析[J]. 可再生能源, 2013, (3):1-6. Xie Y H, Yu T, Gu X F. A comparative study on estimating models to compute monthly mean daily diffuse solar radiation [J]. Renewable Energy Resources, 2013, (3):1-6. (in Chinese)

(编辑 胡 玲)

(上接第 11 页)

- [5] Synnefa A, Santamouris V, Apostolakis K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment [J]. Solar Energy Journal, 2007, 81(4):488-497.
- [6] Sugawara H, Takamura T. Longwave radiation flux from an urban canopy: Evaluation via measurements of directional radiometric temperature [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2):226-237.
- [7] Meier F, Scherer D, Richters J. Determination of persistence effects in spatio-temporal patterns of upward long-wave radiation flux density from an urban courtyard by means of time-sequential thermography [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1):21-34.
- [8] Meyn S K, Oke T R. Heat fluxes through roofs and their relevance to estimates of urban heat storage [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(7):745-752.
- [9] Zhang J, Heng C K, Malone-Lee L C. Evaluating environmental implications of density: a comparative case study on the relationship between density, urban block typology and sky exposure [J]. Automation in Construction, 2012, 22:90-101.
- [10] Svensson M K. Sky view factor analysis: implications for urban air temperature differences [J]. Meteorological Applications, 2004, 11(3):201-211.
- [11] Holmer B, Postgard U, Eriksson M. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2001, 68(1/2): 33-40.
- [12] Sailor D J, Fan H L. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(4):713-725.
- [13] Chimklai P, Hagishima A, Tanimoto J. A computer system to support Albedo Calculation in urban areas [J]. Building and Environment, 2004, 39(10):1213-1221.
- [14] Small C. Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2):168-189.
- [15] Gluch R, Quattrochi D A, Luvall J C. A multi-scale approach to urban thermal analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2):123-132.
- [16] Ratti C. Urban analysis for environmental prediction: city geometry and the trapping of solar radiation [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2000.
- [17] 李百战,罗庆,姚润明. 城市地面对天空热辐射角系数问题的求解[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(2):86-89. Li B Z, Luo Q, Yao R M. Solution on configuration factor from ground to sky [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(2):86-89. (in Chinese)

(编辑 郭 飞)