

用太阳辐射转化法计算室外照度值

王爱英¹, 金海², 王洪珍¹, 李雯雯¹

(1. 天津大学建筑学院, 天津 300072; 2. 天津市城乡建设研究所, 天津 300051)

摘要:针对中国光气候数据资料不足、太阳辐射数据丰富以及资金有限的现状,在分析多种光气候数据采集方法的基础上,选用太阳辐射转化法获得光气候数据。引入发光功效的概念作为室外照度值和太阳辐射量转化的基本关系,并分析对比了已有的发光功效模型,运用天空晴朗指数,以重庆1991—1992年的实测数据为基础进行拟合,建立了总发光功效模型和散射发光功效模型。选用重庆1993年的实测数据对该模型进行了验证,得到了高于其他模型的计算精度。为了验证该模型在中国其他城市的适用性,对中国32个城市的年平均总照度值的计算值和实测值进行了对比,结果证明该转化模型能够满足采光设计的需要。运用这种方法只要输入某地某时刻的太阳辐射数据就可以计算出当地该时刻的室外总照度值和散射照度值,可以大大丰富中国各个城市的光气候数据。最后论文给出了该模型用于室外照度值计算的应用方法。

关键词:采光;光气候;辐射转化模型;室外照度

中图分类号: TU113.3 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2011)03-0088-06

Obtaining Outdoor Illuminance Values with Solar Irradiation Transformation Models

WANG Ai-ying¹, JIN Hai², WANG Hong-zhen¹, LI Wen-wen¹

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;

2. Tianjin City and Town Construction Research Center, Tianjin 300051, P. R. China)

Abstract: Daylighting is one of the important aspects of sustainable building, but architectural daylighting in China is obstructed because of shortage of daylight meteorological measurement record. However, there are many data of solar irradiation. Therefore solar irradiance values are used to calculate outdoor illumination values. Luminous efficacy is introduced to show the relation between solar irradiance and outdoor illumination. Sunny index is used to represent the meteorological states of the sky. On the basis of measurement data in Chongqing from 1991 to 1992, new luminous efficacy calculation model is built to obtain the outdoor global illuminance values and the diffuse illuminance values. Measurement data in Chongqing in 1993 is used to evaluate the proposed mode, which shows the proposed models are reliable. In order to prove possibility of calculating illuminance in other places in China, the measurement data records of annually average global illuminance values in 32 cities are used to examine the calculation results. If the real-time solar irradiation data was input, the real-time illuminance values could be obtained with this model in China, thus millions of illuminance values could be used in future daylighting design.

Key words: daylighting, daylight climate, solar irradiation transformation model, outdoor illumination

收稿日期: 2010-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50608053)

作者简介: 王爱英(1971-), 女, 博士, 副教授, 主要从事建筑光学研究, (E-mail) wayway@tju.edu.cn.

利用天然光是发展可持续建筑的重要方面,完备的光气候数据资料是利用天然光的基础。对中国绝大多数城市来说,光气候数据只有 20 世纪 80 年代获得的室外总照度值的年平均值得^[1],作为国际天然光观测项目(IDMP)观测城市的北京和重庆的光气候数据除了上述数据之外也仅限于 1991—1993 年观测的某些月份的每日室外总照度值、室外散射照度值、直射照度值、4 个方向的垂直照度值、天顶

亮度值等。根据目前采光设计的发展趋势,特别是采光模拟软件的发展,以上数据已经无法满足需要,每日的实时室外照度数据以及天空亮度分布是获得最精确的采光计算的基础,因此光气候数据资料缺乏的现状已经大大限制了中国建筑对天然光的利用。

目前的光气候数据获取方法包括:地面观测法、天空模型法、数码照片法、卫星图像法、太阳辐射转化法等,其优缺点的对比见表 1。

表 1 光气候数据获取方法对比

名称	方法描述	优点	缺点
地面观测法	建立一系列的地面观测站用来收集光气候数据。	所获得的数据全面可靠。	观测设备购买和维护费用十分高昂。
天空模型法	2004 年 CIE 把各种不同天空的亮度分布数学模型归纳为 15 种不同的标准天空模型 ^[2] 。	为进行实际的采光计算提供了理论依据。	判别当前天空属于哪一种标准天空比较困难。
数码照片法	利用数码相机拍摄天空,提取相片的灰度值,计算出相应点的天空亮度值。	可随时的拍摄获取照片。	天空某些区域的亮度太高时有可能烧坏相机的 CCD 板 ^[3] 。
卫星图像法	从气象卫星获得的图片提取灰度值,得到地面水平照度和天空亮度分布 ^[4] 。	具有实时性和完整性。	气象卫星图片不易得到,成本较高,要想获得较为精确的结果必须考虑云量的影响。
太阳辐射转化法	根据地面太阳辐射数据与室外照度、天空亮度之间的关系,建立转化模型 ^[5] 。	有效地避开了云量的测量和确定,兼顾实时性和精确性。	相对比较简单,花费较少。

对比以上几种方法并结合中国缺少资金的具体情况,确定了太阳辐射转化法作为获取光气候数据的方法。太阳辐射量的测量相对室外照度值和天空亮度要简单得多,且中国太阳辐射量的数据比较丰富,甚至已经初步确立了典型气候年的模型^[6],如果太阳辐射数据可以精确到小时,那么运用这种方法就可以得到每小时的室外照度数据和天空亮度的数据,因此可以大大丰富中国光气候数据资料。

1 发光功效(luminous efficacy)

太阳光的室外水平照度和太阳光的辐射量都是地面接收到太阳发射出的能量,故二者存在着一定的正比关系,即太阳辐射量越大则太阳光的室外照度值越高,太阳辐射量越小则太阳光的室外照度值越低。室外水平照度和太阳辐射量的比值用发光功效来表示,单位为 lm/W,它是太阳辐射量和室外水平照度转化关系计算的基础^[4]。

国际上发光功效系数 K 被定义为太阳光产生的照度和太阳辐射量的比值:

$$K = \frac{E_v}{E_e} = \frac{K_m \int_{380}^{780} E_{e\lambda} V_\lambda d\lambda}{\int E_{e\lambda} d\lambda} \quad (1)$$

式中: E_v 为太阳光照度, lx; E_e 为太阳辐射量, W/m²; $E_{e\lambda}$ 为某一波长的太阳辐射量, W/m²; V_λ 为某一波长的光谱光视效率; λ 为波长, m; K_m 是明视觉时光谱光视效能, 683 lm/W。

对于波长为 555 nm 的单色光,光谱光视效能取为 683 lm/W,为最大值。然而,太阳光并不是单色光,因此发光功效也不是最大值。太阳总辐射的发光功效极大地取决于大气对太阳辐射的吸收。大气的吸收量随太阳光在大气中传播的距离增加而增加。因为大气通常吸收红外线辐射多于可见光,所以地球上的发光功效就高于地球外的大气。同时,发光功效会因为日晒和天气情况产生大幅度变化。

发光功效分为太阳总发光功效 K_g 、散射发光功效 K_d 和直射发光功效 K_b 。总发光功效为室外水平总照度与太阳总辐射量的比值,散射发光功效为室外水平散射照度与太阳散射辐射量的比值,直射发光功效为室外水平直射照度与太阳直射辐射量的比值。

根据发光功效系数 K 的定义不难看出,只要能确定发光功效系数 K 和太阳辐射量,就可以得到室外照度值。太阳辐射量可以从气象资料得到,因此确定发光功效系数 K 成为最关键的问题。

2 发光功效模型的建立

2.1 已有模型分析比较

曾经出现的发光功效计算模型很多,包括平均值模型、Littlefair 模型、Perez 模型、Olseth 和 Skartveit 模型、Chung 模型、Muneer & Kinghorn 模型等,这些模型的计算出发点各有不同,模型的结构也相差甚远^[7-8],但总的来说 Perez 模型和 Muneer & Kinghorn 模型使用最为广泛。根据国外的研究成果,在不同

的国家地区这 2 个模型的准确度都不尽相同。在美国和一些欧洲国家,如芬兰等,Perez 模型较其他模型与实测值的误差更小,即拥有更高的准确度。而在英国、日本、香港以及一部分欧洲地区,Muneer & Kinghorn 模型的模拟效果则更好一些。但值得注意的是,虽然这些模型的准确度有所不同,但总体上都拥有较好的准确度,其与实测值的均方根偏差均保持在 10% 以内^[9]。

为了验证各个模型在中国的适用性,分别选用平均值模型、Muneer & Kinghorn 模型、Chung 模型和 Perez 模型(其他模型中有些输入数据无法得到)计算年平均总照度值,并与中国 32 个城市 1984 年的年平均总照度值进行对比,得到的相关均偏差(MBD)和相关均方根偏差(RMSD)如表 2 所示。

表 2 用已有模型计算年平均总照度值计算值与实测数据对比

模型名称	MBD/%	RMSD/%
Constant(110)	-13.26	15.18
Muneer&Kinghorn	2.83	7.21
Chung	-5.38	9.13
Perez	2.51	7.79

从表 2 中可以看到,Perez 模型、Chung 模型、Muneer & Kinghorn 模型均拥有较好的准确度。而其中 Muneer & Kinghorn 模型的效果最好,相比较其他 2 个模型偏差最小。

在这些模型中 Perez 模型是最为复杂的,是关于晴朗指数的阶跃函数,输入数据必须有表面露点温度,这是在很多光气候观测站都没有记录的数据。Muneer & Kinghorn 模型采用二次多项式,准确率较高但复杂度较低。因此对 Muneer & Kinghorn 模型在中国的适用性进行分析。

2.2 Muneer & Kinghorn 模型的适用性分析

研究表明,发光功效随太阳高度角的增加而增加。当太阳高度角不变时,如果处于全晴天,太阳发光功效随大气中水蒸气的含量增加而增加。然而,对于中间天空来说,大气微粒对太阳光的散射作用要比水蒸气对太阳光的吸收作用更大,发光功效也随之减小。因此要想得到较为准确的发光功效,所涉及到的天气因素很多。Muneer & Kinghorn 模型的做法是引入晴朗指数 k 的概念作为考虑天气状况的因素^[10-11]。天空晴朗指数 k 定义为:

$$k = \frac{E_{eg}}{E_{ns0}} \quad (2)$$

式中 E_{eg} 为水平面太阳总辐射量, W/m^2 , 即太阳经过大气云层的总辐射量与地外太阳总辐射量的比值,将太阳高度角、云量、水蒸气以及大气粒子等天

气因素的影响涵盖在内; E_{ns0} 为地外辐射量,根据 Muneer & Kinghorn 模型的理论,式(2)中的 E_{ns0} 为常量^[12], $E_{ns0} = 1367 \text{ lm/W}$ 。

Muneer & Kinghorn 模型是根据 20 世纪 90 年代英国的测量数据而建立的。使用晴朗指数 k , 可以计算出太阳总发光功效和太阳散射发光功效:

$$K_g = 136.6 - 74.541k + 57.3421k^2 \quad (3)$$

$$K_d = 130.2 - 39.828k + 49.979k^2 \quad (4)$$

式中: K_g 为总发光功效, lm/W ; K_d 为散射发光功效, lm/W 。

式(3)和(4)表示的模型已应用于精确计算英国各地以及日本的太阳光总照度和散射照度值。由式(1)可知,有了 K_g 和 K_d 就可以分别代入式(5)和(6)求得室外水平总照度值 E_{vg} 和水平散射照度值 E_{vd} 。

$$E_{vg} = K_g \times E_{eg} \quad (5)$$

$$E_{vd} = K_d \times E_{ed} \quad (6)$$

用 Muneer & Kinghorn 模型计算重庆每日的室外总照度值和散射照度值,输入数据为 1993 年的每隔 1 min 的实测太阳总辐射量、太阳散射辐射量,水平总照度值的计算值和实测值的比较见图 1, 散射照度值的计算值和实测值的比较见图 2。

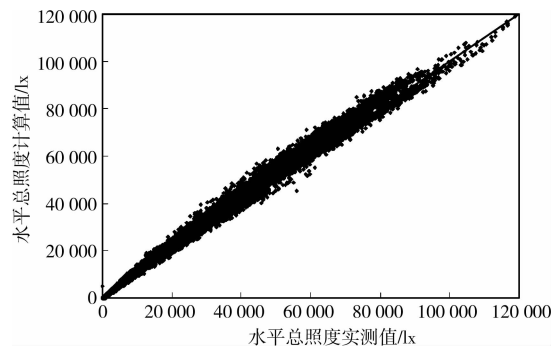


图 1 用 Muneer & Kinghorn 模型计算水平总照度值和实测值的比较

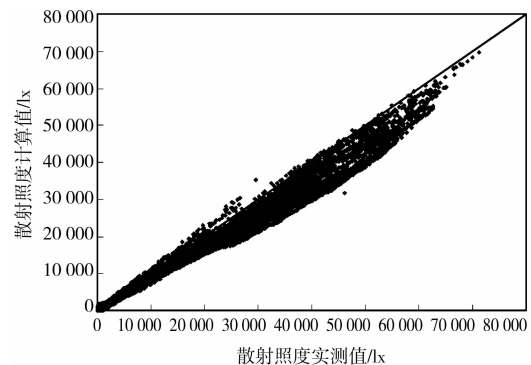


图 2 用 Muneer & Kinghorn 模型计算散射照度值和散射照度实测值的比较

从中可以看到计算值和实测值比较接近,但水平总照度计算值大部分高于实测值,而散射照度值

计算值则普遍低于实测值。经过计算室外总照度值 MBD 为 0.067, RMSD 为 0.094 1, 散射照度值 MBD 为 -0.141 9, RMSD 为 0.200 5。鉴于 Muneer & Kinghorn 模型有较好的准确度和较为简单的算法, 该文以 Muneer & Kinghorn 模型为基础, 建立适合中国的更高精度的计算模型。

2.3 模型的拟合

中国幅员辽阔, 光气候具有自身的特点, 建立适合中国的发光功效计算模型是十分必要的。参考 Muneer & Kinghorn 模型的做法, 使用晴朗指数表达天气状况, 通过对已有的实测数据的统计分析, 可以得到适合中国的发光功效模型。

选用重庆 1991—1992 年的每隔 1 min 的实测数据作为计算基础, 包括太阳总辐射量、太阳散射辐射量、室外总照度值和散射照度值, 代入式(2)计算出天空晴朗指数 k 作为横坐标值, 总发光功效 K_g 由太阳总辐射量和室外总照度值代入式(1)得到, 散射发光功效 K_d 由太阳散射辐射量和散射照度值代入式(1)得到。图 3 显示了总发光功效 K_g 和天空晴朗指数 k 的关系, 图 4 显示了散射发光功效 K_d 和天空晴朗指数 k 的关系, 经过拟合最终得到的总发光功效 K_g 和散射发光功效 K_d 的计算模型分别为:

$$K_g = 142.05 - 192.7k + 259.67k^2 \quad (7)$$

$$K_d = 132.81 - 72.436k + 328.63k^2 \quad (8)$$

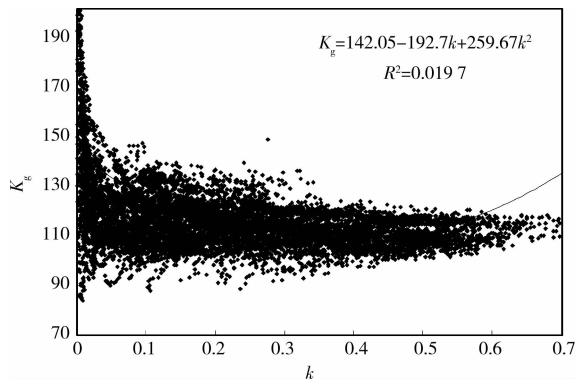


图3 总发光功效的拟合

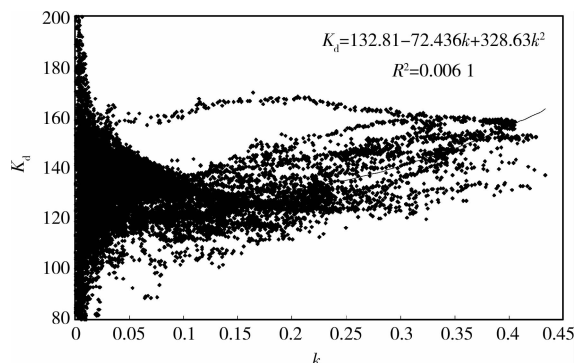


图4 散射发光功效的拟合

总发光功效和散射发光功效拟合的方差分别为 0.019 7和 0.006 1, 所以拟合结果令人满意。和 Muneer & Kinghorn 模型比较, 常数项比较接近, 其他 2 项的系数相差较大。但是因为晴朗指数 k 总是小于 1, 所以一次项和二次项的系数对计算结果影响并不大。

室外总照度值 E_{vg} 和散射照度值 E_{vd} 可以分别代入式(5)和(6)求得。

3 模型可靠性验证和误差分析

3.1 与重庆 1993 年实测数据的对比

在模型拟合过程中, 使用了重庆 1991—1992 年的每日每隔 1 min 连续观测的实测值作为数据基础, 为了验证该模型的可靠性, 使用该模型的计算值与重庆 1993 年的每日连续观测的实测值进行对比, 计算过程中使用的太阳辐射数据为当时同步测量的数据。图 5 为用自建模型计算 1993 年室外总照度计算值和实测值的对比, 得到的 MBD 为 0.010 2, RMSD 为 0.081 5。图 6 为用自建模型计算 1993 年散射照度计算值和实测值的对比结果, 其 MBD 为 0.029 7, RMSD 为 0.176 0。对比图 1 和图 2 用 Muneer & Kinghorn 模型计算 1993 年的室外总照度值和散射照度值的结果, 可以发现无论是计算室外总照度值还是散射照度值, 该模型都具有更高的精确度。

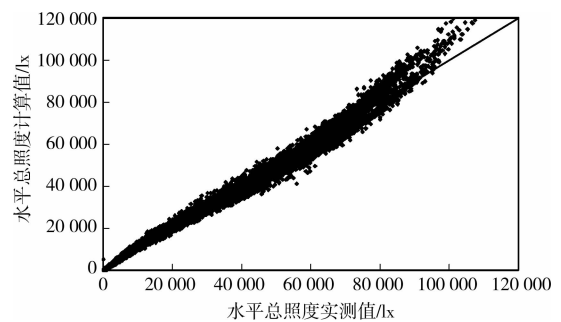


图5 用自建模型计算 1993 年重庆室外总照度计算值和实测值的比较

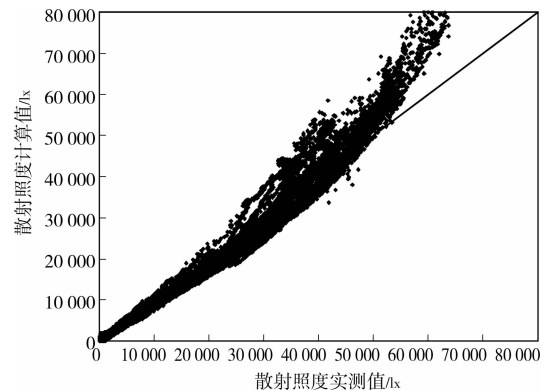


图6 用自建模型计算 1993 年重庆散射照度计算值和实测值的比较

3.2 年平均总照度值计算

该模型的建立是以重庆每日每隔 1 min 记录的实测值为基础,在其他城市的适用性需要经过验证。由于缺少其他城市的实测值作为对比,所以选用《中国建筑用标准气象数据库》^[12]标准气候年总太阳辐射数据,运用该模型计算中国 32 个城市的发光功效,然后代入式(7)计算这 32 个城市的室外年平均总照度值。图 7 中将计算结果与《建筑物理》^[1]给出的这些城市的室外总照度值进行比较,可以发现计算值和实测值非常接近,经过计算相关均偏差 MBD

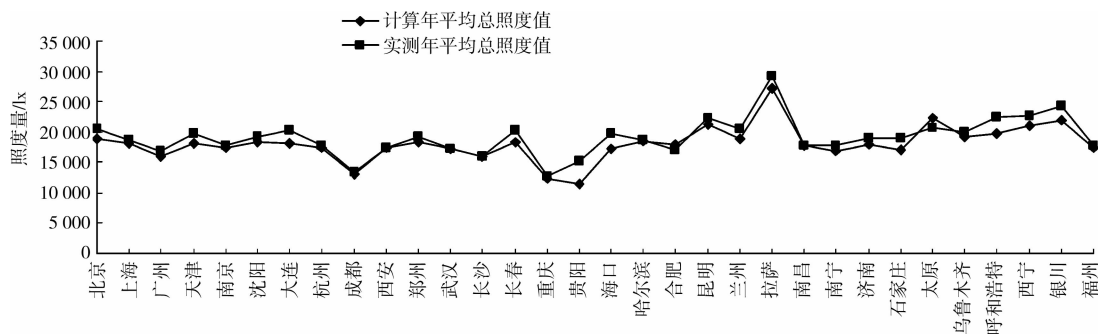


图 7 中国 32 个城市年平均室外总照度计算值和实测值的比较

3.3 误差分析

对整个研究过程中有可能产生误差的环节进行分析之后发现,误差的主要来源包括以下几个方面:

1) 数据误差

初始观测数据可能存在着一定的误差。光气候的观测是一项艰苦又长期的工作,在观测过程中存在误差在所难免。重庆 1991—1993 年的观测数据是目前为止国内最为全面的光气候观测数据,但是仍可从中看到明显的局部缺陷,比如有些月份测定的室外散射照度高于总照度值等等,对这些数据只能摒弃不用。

2) 气候变化

使用的数据基本上是二、三十年前的,这期间世界气候发生了很大的变化,尤其是近几年,随着城市化进程的加快,中国城市普遍空气污染严重,空气质量质量严重下降。据统计 1994—2004 年间,全国主要大气污染物的排放量逐年增加,其中工业源污染物排放增加显著。2004 年大气污染物主要来自工业源污染物以及汽车尾气排放^[13]。当空气中杂质增加,对地面接收的太阳辐射产生阻挡,室外水平照度有可能随之下降,因此使用较早前的数据值拟合

为 2.27%, $RMSD$ 为 6.99%,这个结果好于表 2 中用国外模型计算年平均总照度值的偏差分析,能够满足采光设计的需要。对于散射照度值由于其他城市都没有实测数据,因此无从对比和验证。

以上结果说明,虽然研究中发光功效模型的建立过程中使用的是重庆的观测数据为依据,但是在中国其他地区仍有较好的应用价值。在目前其他城市地面光气候连续观测数据空白的情况下,使用该模型计算室外照度值具有一定的可靠性和实用性。

出来的模型的计算结果有可能会比现在略高一点。

3) 数据缺乏

研究中主要使用重庆 IDMP 观测站的分时观测数据,从光气候分区上来说重庆属于第五区,对其他分区最好是在各个城市分别建立观测站,以当地地面同步观测的太阳辐射数据和室外照度值为基础建立各个城市的发光功效模型,以获得更为准确的计算结果。但是目前的现状是,地面光气候的观测工作在中国已经完全停滞^[14-15]。

4 转化模型的应用

只要有中国各地每月每时水平太阳总辐射量和散射辐射量的实测数据,使用该转化模型就可以计算出全国各地的每月每时的室外总照度值和散射照度值。结合 GIS 技术编写的《光气候信息处理系统》软件对中国各地的光气候数据进行计算,只要输入某地某时的太阳总辐射量和散射辐射量,就可以计算出当地的室外总照度值和散射照度值,同时该软件还具有日平均、月平均、年平均等功能^[16-17]。表 3 给出北京 1 月每隔 1 h 的平均室外总照度值和散射照度值的计算结果^[18]。

表3 北京1月份的室外总照度值和散射照度值

/lx

时间段	总照度	散射照度	时间段	总照度	散射照度
0:01—1:00	0	0	12:01—13:00	52 719.31	17 114.98
1:01—2:00	0	0	13:01—14:00	43 098.04	17 114.98
2:01—3:00	0	0	14:01—15:00	30 709	13 666.44
3:01—4:00	0	0	15:01—16:00	15 156.8	8 046.596
4:01—5:00	0	0	16:01—17:00	527.193 1	510.895
5:01—6:00	0	0	17:01—18:00	0	0
6:01—7:00	0	0	18:01—19:00	0	0
7:01—8:00	1 054.386	894.066 2	19:01—20:00	0	0
8:01—9:00	16 474.79	9 451.557	20:01—21:00	0	0
9:01—10:00	33 476.76	13 921.89	21:01—22:00	0	0
10:01—11:00	46 524.79	16 220.92	22:01—23:00	0	0
11:01—12:00	54 169.09	16 731.81	23:01—00:00	0	0

5 结 论

目前中国光气候实测数据资料十分匮乏,但同时太阳辐射数据资料十分丰富,为了节约光气候观测投入的人力物力,在目前的情况下,选用太阳辐射转化的方法最为经济和可行。但目前在这个领域的研究中国尚属空白。以重庆1991—1992年的实测数据为基础建立的模型可以很方便地将太阳辐射数据转化为室外总照度值和散射照度值,经过与1993年重庆的实测数据的对比,证明该模型具有较高的精确度。通过使用该模型计算室外年平均总照度值与1984年中国32个城市观测的结果对比,证明在目前其他地区缺乏实测数据的情况下,使用该模型将太阳辐射数据转化为室外总照度值,具有较好的可靠性。因而使用这种方法可以获得中国广大地区大量的室外照度数据,为建筑采光设计建立良好的数据基础。今后只要某一地点的太阳辐射数据的观测工作能做到实时化,那么使用太阳辐射转化法获得当地室外照度数据就可以做到实时化。未来条件允许时如果能增加地面观测的数据量可以对该转化模型进行进一步优化,甚至为每一个城市建立独立的转化模型,进而提高计算的精确度。

参考文献:

- [1] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] CIE Standard 011/E: 2003 Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky[S]. CIE Central Bureau,2003.
- [3] MATEJ B, DOMINIQUE DUMORTIER. Use of a digital camera as a sky luminance scanner[C]//26th Session of the CIE, Beijing, 2007: D3-6-D3-9.
- [4] HE ZHENG-JUN, EDWARD N G. Using satellite images to predict daylight availability for Hongkong [C]//Hongkong: Solaris,2008:52-59.
- [5] MUNEEER T. Solar Radiation and Daylight Models [M]. Oxford: Elsevier, 2004.
- [6] YANG L, LAM J C, LIU J P. Analysis of typical meteorological years in different climates of china[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(2): 654-668.
- [7] MUNEEER T, GUL I. A simple meteorological radiation model [C]//Proc. Joint CIBSE/ASHRAE Conference, Harrogate,1996: 271-279.
- [8] MUNEEER T, GUL I. Long-term evaluation of a meteorological solar radiation model against UK data [J]. Energy Conversion and Management, 1998, 38(3/4):303-317
- [9] PEREZ R, CHEN INEI, SEALS R. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance[J]. Solar Energy, 1990,44:271-289.
- [10] YOUNE S, MUNEEER T. Improvements in solar radiation models based on cloud data [J]. Building Services Engineering Research & Technology,2006,27(1): 41-54.
- [11] MUNEEER T, MUNAWWAR S. Improved accuracy models for hourly diffuse solar radiation[J]. ASME-JSEE, 2006(129):104-117.
- [12] 王瑞斌,李健军,郑皓皓,等. 中国空气质量监测体系及空气污染现状[EB/OL]. 2008-11-07[2010-11-18]. <http://wenku.baidu.com/view/699951f90242a8956bece4b0.html>.
- [13] 张晴原. 中国建筑用标准气象数据库[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [14] 金海,王爱英. 基于GIS的地域性光气候数据分析和处理系统[C]//城市化进程中的建筑与城市物理环境:全国第10届建筑物理学术会议论文集. 广州:华南理工大学出版社,2008:581-583.
- [15] WANG AI-YING, LI ZHUO. Local daylighting climate research with GIS: A proposal[C]//26th Session of the CIE, Beijing, 2007: D3-139-D3-142.
- [16] 王爱英. 中国光气候信息处理系统:中国,2010SR000372 [P]. 2010.
- [17] 王爱英,金海,李雯雯. 基于GIS的地域性光气候信息系统[J]. 照明工程学报,2010,21(4):37-40. WANG AI-YING, JIN HAI, LI WEN-WEN. Local daylight climate data process systems with GIS[J]. China Illuminating Engineering Journal,2010,21(4):37-40.
- [18] 金海. 基于GIS的地域性光气候数据分析和处理方法研究[D]. 天津:天津大学,2009.

(编辑 胡英奎)