

散射辐射在半球天空的分布特征研究

董 宏^{1,2}, 王 怡¹, 李俊锋¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要: 为了掌握散射辐射在半球天空的分布特征, 为构建和评价散射辐射模型提供依据, 本研究通过建立辐射观测站获取了实测数据, 分析了半球天空中散射辐射的总量、分布与太阳位置、晴朗程度之间的关系。研究表明: (1) 半球天空中散射辐射的总量 I_d 与太阳高度角 h 成正比关系, 斜率与直射辐射透过率 K_n 成正比。 (2) I_d 与晴空指数 K_t 间呈现出先上升再下降的变化关系, 但散射辐射在总辐射中的占比 K_d 与 K_t 成反比关系。 (3) 散射辐射在半球天空的分布呈现出距离太阳越远辐射越小的变化趋势, 散射辐射的变化主要集中在与太阳夹角小于 90° 的天空中, 在远离环日区域的天空中, 散射辐射的变化幅度很小 (4) 从环日区域向外, 散射辐射减小的幅度在阴、晴天时较为均匀; 多云天时散射辐射在环日区域附近快速减小, K_d 从在环日区域接近晴天状况快速过度到环日区域以外接近阴天状况。

关键词: 散射辐射; 半球天空; 总量特征; 分布特征

中图分类号: P422

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)03-0435-06

Study on distribution characteristics of diffuse solar radiation in hemisphere sky

DONG Hong^{1,2}, WANG Yi¹, LI Junfeng¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to master the distribution characteristics of diffuse solar radiation in hemisphere sky, and to provide the basis for the diffuse solar radiation models. In this study, the measured data are obtained by establishing a solar radiation station. And the relationship between amount and distribution of diffuse radiation and position of the sun, cloud condition are analyzed. The results show: (1) Total amount of diffuse radiation (I_d) is significantly affected by the solar altitude angle. The slope of lines is affected by the ratio of direct normal solar radiation and solar constant (K_n). (2) The relationship between I_d and clearness index (K_t) showed a rise and then decline. But the ratio of diffuse solar radiation and total solar radiation in horizontal (K_d) is inversely proportional to K_t . (3) The distribution of diffuse radiation in the hemisphere sky presents the change that trend to smaller with the distance from the sun. The change of the diffuse radiation mainly concentrated in the sky with the angle less than 90° . Far away from the ring area, the range of diffuse radiation's change is very small. (4) Out of the ring area of the sun, the change of diffuse radiation decrease is relatively uniform in overcast and cloudless. Diffuse radiation decreases quickly out of the ring area of the sun in cloudy. K_d close to the cloudless situation around the ring area of the sun, and to the overcast situation outside the ring area in cloudy.

Key words: diffuse solar radiation; hemisphere sky; total characteristic; distribution characteristic

1 概述

1.1 问题的提出

从天空中投射到建筑表面的太阳辐射是由直射辐射在建筑表面上的投影和来自建筑表面所对天空的散射辐射共同构成。准确计算投射到建筑表面的太阳辐射是进行建筑热工、暖通空调、节能设计的基础。

在直射辐射占比较低的阴天, 或对于建筑的非辐射直射面, 例如: 建筑的北向立面、上(下)午的西(东)向立面, 散射辐射成为影响建筑传热、室内环境的主要辐射量。

由于国内常规气象观测中, 没有对倾斜(垂直)面上的太阳辐射进行观测记录。因此, 建筑表面接收到的散射辐射只能通过散射辐射模型来进行计算。而构建和评价倾斜(垂直)面散射辐射计

算模型的基础是掌握散射辐射在半球天空的总量和分布特征及其影响因素。

1.2 研究现状

国外在倾斜面散射辐射模型的研究中,对天空散射辐射的分布经过了从早期的等灰度分布假设^[1],到之后普遍采用的各向异性假设^[2-6]的过程。由于常规气象观测中并不进行散射辐射分布状况的观测,数据资料很少,相关研究只能利用有限的实测资料或自行建立观测站以获取数据。其中,Perez在美国能源部的支持下在美国和法国的4个地区进行了较为完善的观测,据此对各向异性散射辐射的影响因素进行了分析,依据观测数据和分析结果提出并逐步完善了各向异性散射辐射模型^[4-6]。

与之相比,国内在散射辐射分布方面多借鉴和采纳国外的研究成果,较少开展系统、全面的研究工作。为进行散射辐射模型研究和验证而开展的辐射观测持续时间短、数据量小^[7-12],获取的数据仅用来对提出的模型进行验证。其中,李占清等^[7]自制观测仪在2个地点进行了3个月的辐射观测,绘制了典型日(时)坡向、坡度对散射辐射的影响。毛夏^[8]利用加拿大学者的全景照片,绘制了全晴天时2个太阳高度角的半球天空散射辐射分布状况图。王浩^[9]利用前苏联一日的观测数据绘制了沿太阳地平经圈各方向的散射辐射强度分布,但能够全面反映中国散射辐射半球分布状况的实测资料依然稀缺,无法对国内外散射辐射的分布状况和计算模型进行比较研究和验证,也限制了国内在相关领域研究工作的开展。

1.3 研究目的

针对上述应用需求和研究状况,本研究通过建立辐射观测站,并进行持续观测记录,积累了一定的实测辐射数据。据此,对半球天空中散射辐射的状况进行了分析研究工作,了解其总量和分布特征,找出影响散射辐射在半球空间分布的主要影响因素,为倾斜(垂直)面散射辐射计算模型的相关研究提供理论基础和支持。

2 分析用辐射数据

国内气象观测站中,太阳辐射观测的主要内容包括:总辐射、散射辐射、直接辐射、净全辐射、反射辐射等参数。观测数据中缺少能够反映散射辐射在半球天空中分布状况相关的参数。为了解决本研究所需辐射数据缺失的问题,本研究自行开发了辐射观测装置,并进行辐射观测。

辐射观测装置主要功能是对水平面太阳总辐射、散射辐射及4个主要朝向垂直面总辐射值进行定时观测与记录。装置的基本构成如图1所示。

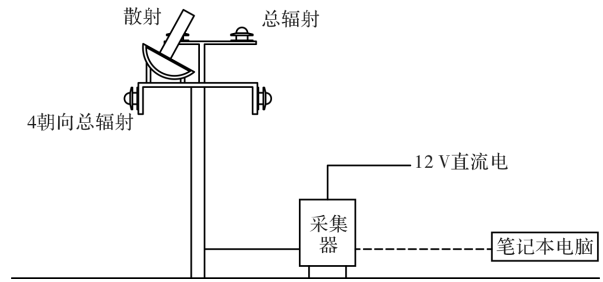


图1 辐射观测装置

Fig.1 Radiation observation device

辐射站安装在中国建筑科学研究院办公大楼的屋顶,周边5°视角范围内无遮挡。装置中的辐射仪、数据采集器的主要技术指标列于表1—2中,为保证辐射观测的准确性,仪器使用前均送交国家法定计量鉴定机构进行了校准,并取得校准证书。辐射日常观测工作由取得中国计量认证(CAL)、中国合格评定国家认可委员会(CNAS)认证的机构及其备案人员承担。

表1 辐射仪主要技术指标

Tab.1 Technical indexes of solar meter

序号	技术指标	指标要求
1	光谱范围	280~3 000 nm
2	测试范围	0~2 000 W/m ²
3	精度	<5%
4	分辨率	1 W/m ² , 0.01 MJ/m ²

表2 数据采集仪主要技术指标

Tab.2 Technical indexes of data logger

序号	技术指标	指标要求
1	工作环境	温度: -40~70 ℃ 相对湿度: 小于90%
2	精度	<0.5%
3	分辨率	1 W/m ²
4	输入范围	±25 mV
5	测试周期	<30 mS

辐射观测站于2009年4月建成后,持续进行观测工作,获得了研究工作所需的实测辐射数据。本研究选用了2010~2011年的逐半时辐射观测数据进行分析研究。从原始记录中剔除少量异常数据后,可用数据共有56 520条。

由于参与分析的数据量比较大,为了减少数据点的重叠,清晰地反映出数据的变化趋势,本

文中每张散点图在绘制前,先将所有数据按照 X 轴参数进行排序,然后将每 50 个连续数据点作为一组,用每组数据的平均值进行图表绘制。即:本文散点图中的每个点代表了连续 50 个数据的平均值。

3 散射辐射的总量特征

3.1 与太阳高度角的关系

地球的公转、自转形成了四季和昼夜,来自地外的太阳辐射量与某一时刻太阳在天空中的位置密切相关。通常用太阳的高度角 h 和方位角 A 来描述太阳在天空中的位置。研究发现水平面散射辐射 Dif 随太阳高度角 h 之间的相关关系显著,两者间相互关系的散点图如图 2(a)所示。

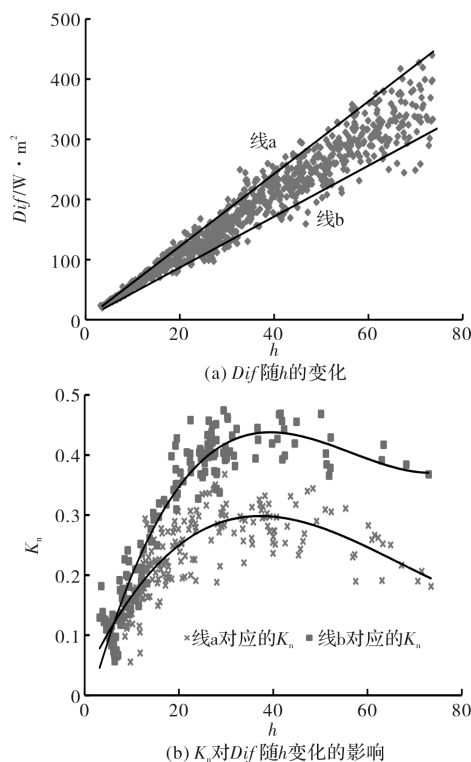


图2 辐射与 h 的关系

Fig. 2 Relationship between solar radiation and h

从图 2(a)中可以看出: Dif 随 h 的升高而逐渐变大,两者间成正比关系。并且,随着高度角 h 的升高, h 相同时 Dif 的数值范围逐渐变大(可超过 $100 W/m^2$)。在图中表现为: Dif 的分布随 h 的增大成发散状,且位于通过原点的两条直线 a、b 之间。

经过比较分析发现造成这一现象的原因是:随着高度角 h 的增大,线 a 附近数据点的直射辐射透过率 K_n (定义见式 1)值逐渐高于线 b 附近的数据点(图 2b)。意即:太阳高度角较小时,散射辐射受其它因素(如:直射辐射透过率)影响较小;

随着高度角的升高,直射辐射透过率 K_n 对散射辐射总量的影响逐渐显现并持续增大。

$$K_n = \frac{I_n}{I_0} \quad (1)$$

式中: K_n 为直射辐射透过率,无量纲, I_0 为太阳常数,可近似取 $1367 W/m^2$, I_n 为辐射法线面的直射辐射量, W/m^2 。

3.2 与天空晴朗程度的关系

散射辐射是由太阳辐射经过大气层时的多次折射、反射而形成。散射辐射的形成与辐射所经过的大气层状况直接相关,该状况通常采用晴空指数 K_t (式 2)来表征。另外,也可以用直射辐射透过率 K_n (式 1)来评价太阳辐射经过大气时被扩散的程度。

$$K_t = \frac{I_H}{I_0 \cdot \sin h} \quad (2)$$

式中: K_t 为晴空指数,无量纲, I_H 为水平面太阳总辐射量, W/m^2 , h 为太阳高度角,°。

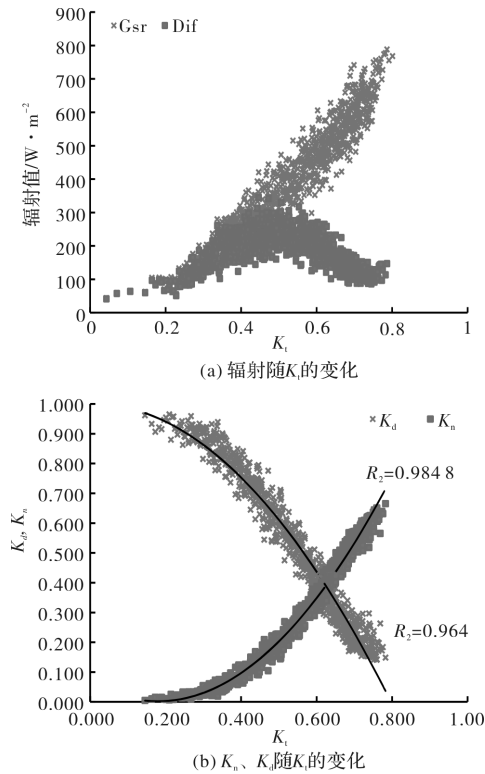
水平面散射辐射 Dif 、总辐射 G_{sr} 随晴空指数 K_t 变化的关系如图 3a 所示。可以看出: G_{sr} 与 K_t 呈正比关系,但 Dif 并未随 K_t 和 G_{sr} 的增长而变大,呈现出先增大后减小的现象。当 K_t 小于某一数值时(图中在 0.5 附近),散射辐射量与 K_t 成正比关系, Dif 随 K_t 增大而增大;当 K_t 大于这一数值后,散射辐射量与 K_t 成反比关系, Dif 随 K_t 增大而减小。其原因可以从图 3(b)中得到。直射辐射透过率 K_n 与晴空指数 K_t 两者间呈显著正比关系,而水平面散射辐射 Dif 在总辐射 G_{sr} 中的占比 K_d (式(3))与 K_t 呈显著反比关系。

$$K_d = \frac{I_d}{I_H} \quad (3)$$

式中: K_d 为水平面散射辐射在总辐射中的占比,无量纲, I_d 为水平面散射辐射量, W/m^2 。

图 3(b)中的两条拟合曲线(式(4)、(5))在不同 K_t 时的拟合结果见表 3。当 $K_t \leq 0.3$ 时, K_n 仅为 0.03, K_d 超过 0.86;随着 K_t 增大, K_n 快速增大,而 K_d 快速下降;当 K_t 为 0.8 时, K_n 超过 0.75, K_d 接近于 0。

说明:阴天时总辐射主要由散射辐射构成,晴天则主要是直射辐射。虽然随着天气逐渐晴朗,大气对辐射的吸收和扩散在逐渐减少,总辐射和直射辐射都在持续增长。但阴天时($K_t \leq 0.3$),散射辐射在总辐射中的占比高,散射辐射也随总辐射同时增大。此后,天气越晴朗,散射辐射占比越小,散射辐射量由增大变为减小。

图3 辐射与 K_t 的关系Fig. 3 Relationship between solar radiation and K_t

$$K_n = 1.965K_t^2 - 0.7084K_t + 0.0658 \quad (4)$$

$$K_d = -1.6034K_t^2 + 0.0238K_t + 1 \quad (5)$$

表3 不同 K_t 时, K_d 和 K_n 的拟合结果Tab. 3 Fitting results of K_d and K_n at different K_t

K_t	在 K_t 处的斜率		在 K_t 处的斜率	
	K_d	K_n	K_d	K_n
0.2	-0.297	0.941	-0.315	0.003
0.3	-0.457	0.863	-0.119	0.030
0.4	-0.618	0.753	0.078	0.097
0.5	-0.778	0.611	0.274	0.203
0.6	-0.938	0.437	0.471	0.348
0.7	-1.099	0.231	0.667	0.533
0.8	-1.259	—	0.864	0.757

3.3 小结

散射辐射的总量与太阳高度角呈正比关系。太阳高度角较低时, 散射辐射量基本不受其它因素的影响; 随太阳高度角的增大, 散射辐射逐渐增大, 增大的比例与直射辐射透过率 K_n 相关。

散射辐射的总量随晴空指数呈现出先增大再减小的关系。但散射辐射在总辐射中的占比 K_d 与晴空指数 K_t 成反比关系, 随着 K_t 增大(天空变晴朗), 散射辐射在总辐射中的占比持续降低。

4 散射辐射分布特征

通常情况下可以认为太阳直射辐射是平行的, 且只集中在太阳周围一个非常狭窄的环形天空区域(环日区域)内。我们将环形天空内的太阳辐射均作为太阳直射辐射, 则此区域内的太阳散射辐射为零。若天空云量分布均匀, 在环形区域以外, 散射辐射在半球天空中会以太阳所在环形天空为圆心, 随距离太阳的远近呈圆周状对称分布。

对于特定的平面(倾斜或垂直面)而言, 其法线方向与太阳辐射方向的夹角 φ 决定了特定平面所对天空与太阳之间的相对位置。该平面上接受到的太阳散射辐射量与来自半球天空的散射辐射量的比值 $K_{d \cdot v}$ (式(6))表征了散射辐射在特定平面所对天空中的分布量。通过不同夹角 φ 时 $K_{d \cdot v}$ 值的变化, 可以间接了解散射辐射在半球天空的分布情况。

$$K_{d \cdot v} = \frac{I_{d \cdot v}}{I_d} \quad (6)$$

式中, $K_{d \cdot v}$ 为平面(倾斜或垂直面)散射辐射与水平面散射辐射的比值, 无量纲; $I_{d \cdot v}$ 为平面(倾斜或垂直面)散射辐射, W/m^2 。

4.1 与夹角 φ 的关系

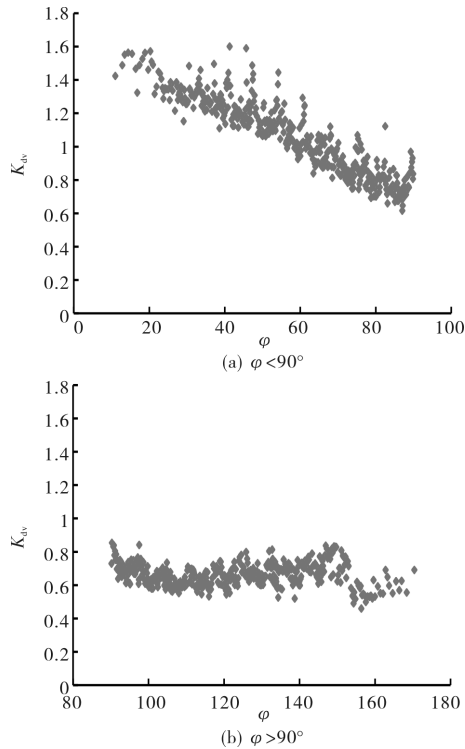
做出平面散射辐射占半球天空散射辐射的比值 $K_{d \cdot v}$ 随着夹角 φ 的关系如图4所示。

由图4(a)可以看出: $\varphi < 90^\circ$ 时(平面迎向太阳), 平面散射辐射占半球天空散射辐射的比值 $K_{d \cdot v}$ 随着夹角 φ 的变化呈现出线性反比关系, φ 从 11° 增大到 90° 的过程中, $K_{d \cdot v}$ 从 1.60 降低到 0.62。说明: 迎向太阳的平面在太阳逐渐偏离平面法线方向的过程中, 平面所接受到的来自天空的散射辐射占半球散射辐射的比例逐渐变小。意即: 半球天空中, 环日区域散射辐射最大, 离太阳越远, 散射辐射越小。

由图4(b)可以看出: $\varphi > 90^\circ$ 时(平面背向太阳), 平面散射辐射占半球天空散射辐射的比值 $K_{d \cdot v}$ 随着夹角 φ 的变大略有上升, φ 从 90° 增大到 170° 的过程中, $K_{d \cdot v}$ 基本在 0.5~0.8 之间波动, 变化幅度较 $\varphi < 90^\circ$ 时为小。说明: 当平面背向太阳时, 平面所对天空的散射辐射量变化较小, 散射辐射的变化幅度远小于环日区域。

4.2 与天空晴朗程度的关系

对于半球天空中散射辐射变化幅度较大的区

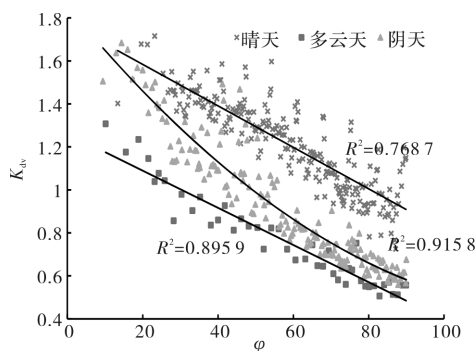
图4 $K_{d \cdot v}$ 与 φ 的关系Fig. 4 Relationship between $K_{d \cdot v}$ and φ

域($\varphi < 90^\circ$ 的区域),按照表4对天空晴朗度的划分,分别作出平面散射辐射占半球天空散射辐射的比值 $K_{d \cdot v}$ 随平面法线与辐射方向间夹角 φ 变化的关系如图5.

表4 天气晴朗度划分

Tab. 4 Division of overcast, cloudy and sunny by K_t

天空晴朗度	阴	多云	晴
K_t	$K_t \leq 0.3$	$0.3 < K_t \leq 0.55$	$K_t > 0.55$

图5 不同晴朗度时 $K_{d \cdot v}$ 与 φ 的关系Fig. 5 Relationship between $K_{d \cdot v}$ and φ in different weather

从图5中可以看出:晴天与阴天相比,夹角 φ 相同时晴天的比值 $K_{d \cdot v}$ 更大;两种天气状况下,拟合直线的斜率接近.说明:晴天时天空中各区域的散射辐射占比较阴天时更高;阴晴天时,散射辐射在半球天空分布的变化幅度都比较均匀.

多云天的比值 $K_{d \cdot v}$ 介于阴晴天之间.夹角 φ 较小时,比值 $K_{d \cdot v}$ 接近晴天状况; φ 越大比值 $K_{d \cdot v}$ 越接近阴天状况.说明:多云天时,散射辐射在天空中分布的变化较阴、晴天时更不均匀,环日区域的散射辐射较大,且随着远离环日区域,散射辐射迅速下降.

4.3 小结

半球天空中,环日区域的散射辐射量显著大于远离太阳的天空.在 $\varphi < 90^\circ$ 的天空中散射辐射随 φ 变化剧烈, $\varphi > 90^\circ$ 的天空中散射辐射的变化幅度较小.其中,在散射辐射变化剧烈的天空中($\varphi < 90^\circ$ 的区域),晴天时散射辐射占天空散射辐射的比例高于阴天.多云天在环日区域散射辐射的分布接近晴天状况,远离太阳的天空则接近阴天状况.随着远离环日区域,阴天和晴天时天空散射辐射量降低的幅度比多云天均匀.

5 结论

本研究通过建设辐射观测站,对不同朝向平面上的辐射持续进行观测,积累了一定的实测数据.据此对散射辐射在半球天空中的分布状况进行了分析.

(1) 半球天空中散射辐射的总量与太阳高度角成正比关系,斜率与直射辐射透过率成正比.

(2) 散射辐射总量与晴空指数间呈现先上升再下降的变化关系,但散射辐射在总辐射中的占比与晴空指数成反比关系.

(3) 散射辐射在半球天空的分布呈现出距离太阳越远散射辐射越小的变化趋势,且辐射的变化主要集中在与太阳夹角小于 90° 的天空中,在远离环日区域的天空中,散射辐射的变化幅度很小.

(4) 散射辐射随远离太阳时的变化幅度在全阴、全晴天时较为均匀,多云天时变化剧烈.多云天在环日区域散射辐射的分布接近晴天状况,远离太阳的天空则接近阴天状况.

综上所述:半球天空中的散射辐射量受太阳高度角、晴空指数和直射辐射透过率的影响显著;其分布则与太阳的相对位置和晴空指数关系密切.该结论可作为平面(倾斜或垂直面)散射辐射计算模型研究的基础.

参考文献 References

- [1] LIU B H Y, JODAN C R. The interrelationship and

- characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. *Solar Energy*, 1960, 4(3):1-19.
- [2] KLUCHER T M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces [J]. *Solar Energy*, 1979, 23(2):111-114.
- [3] HAY J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces [J]. *Solar Energy*, 1977, 23(4): 301-307.
- [4] PEREZ R, R. STEWART, C. ARBOGAST, et al. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces-description, performance evaluation, site dependency evaluation [J]. *Solar Energy*, 1986, 36(6): 481-497.
- [5] PEREZ R, INEICHEN P, SEALS R, et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance [J]. *Solar Energy*, 1990, 44(5): 271-289.
- [6] PEREZ R, SEALS R, MICHALSKY J. All-weather model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation [J]. *Solar Energy*, 1993, 50(3):235-245.
- [7] 李占清, 翁笃鸣. 坡面散射辐射的分布特征及其计算模式[J]. *气象学报*, 1988, 46(3): 349-356.
- LI Zhanqing, WENG Duming, Distribution and computing model of diffuse radiation on slopes [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1988, 46(3): 349-356.
- [8] 毛夏. 碧空散射辐射结构模式[J]. *太阳能学报*, 1988, 9(4):413-421.
- MAO Xia. A distribution model of diffuse solar radiation over the cloudless sky [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1988, 9(4):413-421.
- [9] 王浩. 复杂地形下非各向同性散射辐射问题的研究[J]. *地理学报*, 1989, 44(1): 105-110.
- WANG Hao. A study of anisotropic diffuse radiation on complex terrains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(1): 105-110.
- [10] 唐鸣放. 垂直面上的太阳辐射强度[J]. *四川建筑科学研究*, 1998(2):53-55.
- TANG Mingfang. Solar radiation on vertical surface [J]. *Building Science Research of Sichuan*, 1998(2): 53-55.
- [11] 姚万祥, 李峥嵘, 赵群, 等. 几种散射辐射模型精度的比对[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 937-943.
- YAO Wanxiang, LI Zhengrong, ZHAO Qun, et al. Comparative study on accuracy of several diffuse radiation models [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(6): 937-943.
- [12] 吴贞龙, 徐政, 胡晓燕, 等. 倾斜面太阳辐照度实用计算模型的研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(3): 787-793.
- WU Zhenlong, XU Zheng, HU Xiaoyan, et al. Study on practical calculation models of irradiance intensity on tilted surfaces [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2016, 37(3): 787-793.

(编辑 吴海西)