

日散射辐射推算模型在中国的适用性研究

于 瑛^{1,2}, 杨 柳², 陈 猛², 曹其梦²

(1. 西安建筑科技大学机电学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055)

摘 要: 根据因变量的不同将散射辐射经验模型归纳为2大类,再按照输入变量进一步将其划分为9个子类,结合中国观测数据状况,选择出9个有代表性的模型。利用分布于中国5个建筑气候区的15个典型台站2000~2013年的观测数据进行建模与验证。引入相关系数 R^2 、平均绝对误差 MAE 和均方根误差 $RMSE$ 作为模型适用性评价指标。结果显示:第I类模型的推算误差总体小于第II类模型,且第I类模型的推算误差与当地平均晴朗指数呈负相关;模型4和模型8分别是I类和II类中最佳适用性模型。

关键词: 太阳能; 散射辐射; 晴朗指数; 经验模型; 误差分析

中图分类号: TU119⁺.2

文献标识码: A

0 引 言

太阳能是一种清洁、可再生能源,我国的太阳能资源十分丰富,2/3以上地区每年太阳辐射量超过 5.9 GJ/m^2 ,日照时数超过 2200 h ^[1]。到达地面的太阳总辐射可分为直射辐射和散射辐射。直射辐射是以平行光线的形式直接投射到地面上的辐射能;散射辐射是太阳辐射经过地球表面大气层中的气体、分散的水滴以及微粒物质的散射后到达地面的辐射能,太阳总辐射是两者的代数和。在我国,北方和西北地区主要以太阳直射辐射为主,南方地区散射辐射所占的比重较大^[2]。太阳辐射对建筑热过程影响明显,在对建筑物进行热过程模拟时,太阳辐射直、散数据是至关重要的一部分,尤其是在半透明维护结构的传热模拟中,更是必不可少^[3]。要获得足够量的直射、散射辐射数据,最可靠的方法是使用高精度的测量设备实时采集,但限于资金和维护等问题,实测的太阳辐射数据有限,尤其是散射辐射数据更是不足。

我国辐射台站数量远远小于气象台站,仅有98个,其中17个台站记录水平面散射辐射数据,且数

据起始时间不一,散辐射数据严重匮乏。数据不足制约了太阳能应用技术的研发,选择适当模型预测我国不同地区散射辐射数据已成为当务之急。

1 日散射辐射模型概述

从1960年提出日散射辐射推算模型后,几十年间国内外众多学者在不同地区对散射辐射预测模型做了大量研究,归纳起来分为2大类9个子类,见表1。

第I大类:建立散射比(diffuse fraction) K_d (定义为水平面散射辐射日曝辐量与水平面总辐射日曝辐量之比)与晴朗指数、日照时数比、云量等气象因子之间的相关模型,分为5个子类:1)基于晴朗指数的模型。散射率与晴朗指数之间的线性关系最早由Liu等^[4]提出,用来预测水平面散射辐射日曝辐量,后来很多学者在不同地区应用该模型并得到每个地区的经验系数^[5-7]。在线性模型基础上,后又逐步提出二者之间的二次及三次多项式、指数、对数等关系模型^[8-10],还有学者根据不同天气状况,用分段函数表达二者之间的关系^[11,12]。2)基于日照时数比的模型。散射

收稿日期:2016-07-18

基金项目:国家自然科学基金杰出青年科学基金(51325803);国家自然科学基金青年项目(51608423);国际(地区合作与交流项目(51561135004);陕西省自然科学基金面上项目(2017JM5127)

通信作者:杨 柳(1970—),女,博士、教授,主要从事建筑气候与节能方面的研究。yangliu@xauat.edu.cn

比与日照时数比之间相应的也存在线性、二次及三次多项式、指数等多种函数关系^[10,13,14]。3)基于晴朗指数与日照时数比的模型。与前文提到的单一变量模型不同,该类模型是晴朗指数和日照时数二者同时与散射比产生一次、二次及三次多项式函数关系^[13,15]。4)基于日总云量的模型。云对太阳辐射有明显发散作用,所以散射辐射量与当前的云量息息相关,云量由少到多分为 8 个等级,0 代表晴天云量,8 代表阴天云量,当天空完全被云遮挡则相应的日照时数也为 0,太阳总辐射曝辐量完全由散射辐射曝辐量构成。散射比与日总云量之间也存在线性、二次及三次多项式函数关系^[16]。5)基于多参数的模型。散射辐射模型中还有基于晴朗指数和(或)日照时数比与其他气象参数(例如:云量、温度、相对湿度)、天文参数(日落时角、赤纬角)及地理参数(纬度)共同组成的多参数模型^[8,9,17]。

第 II 大类:建立散射率(diffuse coefficient) K_{de} (定义为水平面散射辐射日曝辐量与水平面天文日曝辐量之比)与晴朗指数、日照时数比、平均温度、相对湿度等参数的相关关系模型,分为 4 个子类:1)基于晴朗指数的模型。该类模型主要包括散射率与晴朗指数之间的线性、二次及三次多项式函数^[13,18]。2)基于日照时数比的模型。日照时数对太阳辐射的构成有直接影响,是一个估计散射辐射曝辐量的重要参数,见诸报道的模型包括散射率与日照时数比的线性、二次及三次多项式、指数、对数等关系函数^[10,18]。3)基于晴朗指数与日照时数的模型。这 2 个因子与散射辐射相关性强,所以可将其共同作为输入量估计散射辐射曝辐量,见诸报道的有一次与二次多项式函数模型^[19]。4)基于多参数的模型。将日平均温度、相对湿度等气象因子与日照时数比相结合,共同作为输入因子估计散射辐射日曝辐量^[20,21]。

表 1 日散射辐射预测模型分类
Table 1 Classification of daily diffuse radiation prediction models

大类	名称	子类	子类名称	函数形式
I	散射比 K_{d} 作为 因变量的模型 $K_{\text{d}}=G_{\text{d}}/G$	I-1	基于晴朗指数模型	$K_{\text{d}}=f(K_{\text{T}})$
		I-2	基于日照时数比模型	$K_{\text{d}}=f(S/S_0)$
		I-3	基于晴朗指数与日照时数比模型	$K_{\text{d}}=f(K_{\text{T}},S/S_0)$
		I-4	基于多参数模型	$K_{\text{d}}=f(K_{\text{T}},S/S_0,T_{\text{avg}},R_{\text{h}},\cdots)$
		I-5	基于日总云量模型	$K_{\text{d}}=f(N_{\text{e}})$
II	散射率 K_{de} 作为 因变量的模型 $K_{\text{de}}=G_{\text{d}}/G_0$	II-1	基于晴朗指数模型	$K_{\text{de}}=f(K_{\text{T}})$
		II-2	基于日照时数比模型	$K_{\text{de}}=f(S/S_0)$
		II-3	基于晴朗指数与日照时数比模型	$K_{\text{de}}=f(K_{\text{T}},S/S_0)$
		II-4	基于多参数的模型	$K_{\text{de}}=f(S/S_0,T_{\text{avg}},R_{\text{h}},\cdots)$

注: G_{d} —水平面散射辐射日曝辐量, MJ/m^2 ; G —水平面总辐射日曝辐量, MJ/m^2 ; G_0 —水平面天文日曝辐量, MJ/m^2 ; $K_{\text{T}}=G_{\text{d}}/G_0$ 晴朗指数(无量纲量); S —日照时数, h ; S_0 —最大可能日照时数, h ; S/S_0 —日照时数比; T_{avg} —日平均温度, $^{\circ}\text{C}$; N_{e} —日云量等级, 成; R_{h} —日平均相对湿度, %。

2 我国研究现状及本文研究内容

关于散射辐射预测模型,我国学者也做了一些研究。文献[22,23]针对云南省台站的观测数据,研究了直射辐射与总辐射之间的关系,并提出一个

相关性模型估计月平均日水平面直射辐射曝辐量,可通过总辐射减去直射辐射间接计算出散射辐射曝辐量。文献[24]分析了 78 个中国辐射台站的数据,提出散射比与晴朗指数之间的分段函数模型及加入了纬度和海拔等地理参数的统一模型,通

通过对 2 个模型的误差分析,发现加入地理参数并不能提高预测精度,建议使用分段函数预测散射辐射日曝辐量。文献[25]使用我国 16 个台站 1994~1998 年的数据,验证了 3 种广泛应用的估计散射辐射的模型,提出 Liu 等^[4]的模型在我国适用性较好,并提出该模型系数 a 、 b 之间有线性相关性。文献[26]使用月平均日日照时数和/或总辐射月平均日曝辐量预测我国 8 个典型气象台站的散射辐射月平均日曝辐量。文献[20]基于广州的实测数据,提出基于晴朗指数、日照时数、环境温度和相对湿度等多参数预测散射辐射曝辐量。

分析文献发现,目前研究大多集中在月尺度散射辐射曝辐量的预测上,模型分析所用的数据以 20 世纪 80~90 年代为主,且很多文献中的模型研究具有地域性,只针对某一地区。大尺度的辐射数据不能满足建筑热环境模拟的需要,所以本文主要研究日尺度上散射辐射曝辐量的预测,梳理已有的散射辐射预测模型,按照上述分类方法并结合我国数据状况提出 2 大类共 9 种有代表性的模型,在我国 5 个建筑气候区中选择 15 个有代表性的辐射台站,使用这些台站 2000~2013 年的数据做模型适用性分析,为在我国各地区不同数据状况下选择适当的日散射辐射预测模型提供依据。

3 数据状况与质量控制

3.1 我国的数据状况

文中所用到的数据均来自中国国家气象信息中心气象与辐射日值数据集,建模所涉及到的数据包括水平面总辐射日曝辐量、水平面散射辐射日曝辐量及日照时数、日平均温度、平均相对湿度等气象参数。我国气象台站的数据从记录年限和数据质量方面普遍优于辐射台站,但仍存在各气象参数记录不完整、时间不统一的问题。前期数据处理发现我国 900 多个气象台站中温度参数(日最高、最低温度,平均温度)、平均气压以及日照时数数据质

量较好,历年数据记录相对完整,缺测、漏测较少。辐射台站中,日总辐射数据记录相对完整,直射、散射辐射观测数据非常有限。除选择适当的输入、输出参数外,建模的数据量对模型的精确度也有影响,文献[27]中比较了用 40、30 和 10 a 数据建模的计算结果,发现并非使用数据量越多模型的精确度越高,使用近 10 年数据建模要优于使用持续时间更长的数据量。基于此本文选择拥有 2000~2013 年日散射辐射数据记录的 15 个台站,见表 2,用 2000~2009 年的数据建模,用 2010~2013 年数据作模型验证。

3.2 数据质量控制

测量技术和设备精度都会带来误差,所以在建模之前有必要对散射辐射数据进行质量控制,本文采用 Claywell 提出的散射包络线法^[28]筛选出异常的散射辐射数据。该方法要求做出散射比与晴朗指数散点图,在图中首先删除 K_{df} 和/或 K_T 落在 $[0,1]$ 区间以外的值,然后将剩下的数据根据晴朗指数分成 10 个相等的数据带,对于第 b 个数据带,求出相应散射比的平均值 $\bar{K}_{df,b}$ 和标准偏差 σ_b ,并规定散射包络线中包含 $\pm 2\sigma_b$ 范围内的所有值。于是,下包络线 f_{low} 是 10 对 $(K_{T,b}, \bar{K}_{df,b} - 2\sigma_b)$ 数据的二次拟合曲线,上包络线 f_{up} 是 10 对 $(K_{T,b}, \bar{K}_{df,b} + 2\sigma_b)$ 数据的二次拟合曲线,其中 $K_{T,b}$ 是第 b 个数据带中晴朗指数的中值,若散点在上下包络线范围之外则属于异常数据。

文中以漠河(台站号 50136)为例,按照上述方法分别计算得到上、下包络线,见式(1)和式(2),将包络线与散点图叠加(如图 1),由此可统计出未落入包络线内的数据量,该数据与数据总量的比值则为该台站异常数据的比例。将 15 个台站依次完成质量控制,结果如表 3 所示。将异常数据删去,其余通过质量控制的数据将用于后续建模与模型验证。

$$f_{low}(K_{df}) = 0.568K_T^2 - 1.6456K_T + 0.984 \quad (1)$$

$$f_{up}(K_{df}) = -1.7581K_T^2 + 0.5176K_T + 1.1095 \quad (2)$$

表2 15个台站的基本信息
Table 2 Basic information of 15 stations

台站号	台站名	东经/(°)	北纬/(°)	海拔/m	建筑气候区
50136	漠河	122.51	52.97	434	严寒
50953	哈尔滨	126.77	45.75	143	严寒
51463	乌鲁木齐	87.65	43.80	947	严寒
51709	喀什	75.98	39.47	1290	寒冷
52267	额济纳旗	101.07	41.95	941	严寒
52818	格尔木	94.90	36.42	2809	严寒
54342	沈阳	123.52	41.73	50	严寒
54511	北京	116.47	39.80	33	寒冷
55591	拉萨	91.13	29.67	3650	寒冷
56778	昆明	102.68	25.02	1897	温和
57083	郑州	113.65	34.72	111	寒冷
57494	武汉	114.13	30.62	27	夏热冬冷
58362	上海	121.46	31.41	8	夏热冬冷
59287	广州	113.33	23.16	43	夏热冬暖
59948	三亚	109.52	18.23	7	夏热冬暖

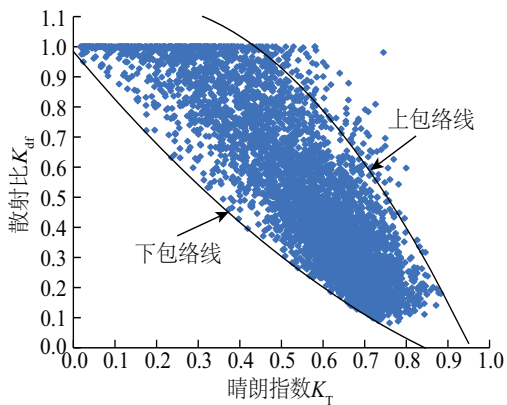


图1 散射辐射数据质量控制图
Fig. 1 The quality control chart of diffuse radiation data

4 散射辐射预测模型适用性研究

4.1 模型选择

实测数据决定了模型的选择类型,本文结合我国的数据状况,从2大类模型中提出9个有代表性的模型进行适用性研究,见表4。通过对模型预测误差结果的分析 and 比较,可为不同数据状况下选择适当的预测模型提供依据。目前我国具有实测总辐射日曝辐量数据的台站约占总台站数的5%,所

以是否具有总辐射日曝辐量观测数据也成为选择模型必需考虑的条件。

表3 15个台站2000~2013年质量控制结果
Table 3 Quality control results of 15 stations on 2000-2013

台站号	台站名	总数 据量	异常 数据量	异常数据 比例/%
50136	漠河	4951	178	3.6
50953	哈尔滨	4987	383	7.7
51463	乌鲁木齐	4831	211	4.4
51709	喀什	4918	325	6.6
52267	额济纳旗	4945	157	3.2
52818	格尔木	4956	288	5.8
54342	沈阳	4957	261	5.3
54511	北京	4936	275	5.6
55591	拉萨	4921	84	1.7
56778	昆明	4761	310	6.6
57083	郑州	4897	280	5.7
57494	武汉	4699	458	9.7
58362	上海	4911	321	6.5
59287	广州	4888	350	7.2
59948	三亚	4950	195	4.0

表4 日散射辐射预测模型汇总表

Table 4 The summary table of daily diffuse radiation prediction models

大类	子类	编号	函数形式	输入参数	备注
I	I-1	模型 1	$K_{df} = a + bK_T$	K_T	总辐射 日曝 辐量 已知
	I-2	模型 2	$K_{df} = a + b(S/S_0)$	S	
	I-3	模型 3	$K_{df} = a + bK_T + c(S/S_0)$	K_T, S	
	I-3	模型 4	$K_{df} = a + bK_T + cK_T^2 + dK_T^3 + e\left(S/S_0\right) + f\left(S/S_0\right)^2 + g\left(S/S_0\right)^3$		
	I-4	模型 5	$K_{df} = a + bK_T + c\left(S/S_0\right) + dT_{avg} + eR_h$		
II	II-1	模型 6	$K_{dc} = a + bK_T$	K_T	总辐射 日曝 辐量 已知
	II-2	模型 7	$K_{dc} = a + b(S/S_0)$	S	
	II-2	模型 8	$K_{dc} = a + b\left(S/S_0\right) + c\left(S/S_0\right)^2 + d\left(S/S_0\right)^3$		
	II-4	模型 9	$K_{dc} = a + b\left(S/S_0\right) + cT_{avg} + dR_h$		

4.2 模型评价方法

为了比较模型适用性的优劣,引入3个评价指标,分别为平均绝对误差 MAE 、均方根误差 $RMSE$ 和相关系数 R^2 , 定义为:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_{p,i} - I_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{p,i} - I_i)^2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2} \quad (5)$$

式中, I_i ——实测值; $I_{p,i}$ ——预测值。 MAE 由于离差被绝对值化,不会出现正负相抵消的情况,因而能更好地反映预测值误差的实际情况; $RMSE$ 代表实测值在回归曲线周围的分散程度; R^2 在 0~1 之间, R^2 越接近 1 表明实测数据与回归模型的拟合程度越高。

4.3 模型适应性研究

如表 3、表 4 所示,以上述 15 个台站质量控制后的数据进行模型适应性研究,选择 2000~2009 年的数据建模,2010~2013 年的数据检验,依次计算出 9 个模型的 R^2 、 MAE 和 $RMSE$, 为了便于比较,进一步计算出误差百分率 ($MAE\%$ 及 $RMSE\%$), 计算结果按照模型大类的划分表示在图 2、图 3 中。分析图 2、图 3 可发现:

1) 基于模型大类比较:以散射比 K_{df} 为因变量的第 I 类模型 R^2 全部大于 0.7, 远高于以散射率 K_{dc} 为因变量的第 II 类模型 (如图 2 所示); 误差百分率 $MAE\%$ 与 $RMSE\%$ 的变化趋势一致, 与 R^2 的变化趋势相反 (如图 3 所示), 虽然第 I 类模型中的模型 2 在部分台站的预测误差大于第 II 类模型中的模型 8, 但从整体来看, 第 I 类模型的推算误差百分率 $MAE\%$ 与 $RMSE\%$ 总体低于第 II 类模型。

2) 基于模型子类比较:分析图 4a 和图 4c 发现, 第 I 类模型中模型 3、模型 4 预测精确度较好, 其中又以模型 4 更为突出, 模型 1 与模型 5 次之, 模型 2 的预测精确度最低; 分析图 4b 和图 4d 发现, 第 II 类模型中模型 8 的预测精确度最高, 模型 6 和模型 7 次之, 模型 9 的预测精确度最低。

3) 基于台站比较:从图 3a 和图 3c 可看出各台站使用第 I 类模型的预测误差趋势一致, 且台站之间差异明显, 计算各台站 I 类 5 个模型误差百分率 $MAE\%$ 和 $RMSE\%$ 的平均值, 并将其与相应台站累年平均晴朗指数比较 (见图 5a), 发现 3 条曲线有明显的相关性, 尤其是在 54511、55591、56778、57083、57494、58362、59287 及 59948 这 8 个台站中曲线趋势完全吻合, 且 57083、57494、58362、59287 这 4 个台站平均预测误差较低, 均小于 17%, 而这 4 个台站的累年日均晴朗指数均在 0.38~0.43 之间, 属于我国晴朗指数较低的地

区,可见晴朗指数对于该类模型预测误差有影响;第Ⅱ类4个模型对于不同台站的预测误差无明显差异,而且由于其因变量为散射率,通过水平面天文日曝辐量计算得到,所以误差曲线和平均晴朗指数曲线趋势也不存在明显的相关性,见图5b。

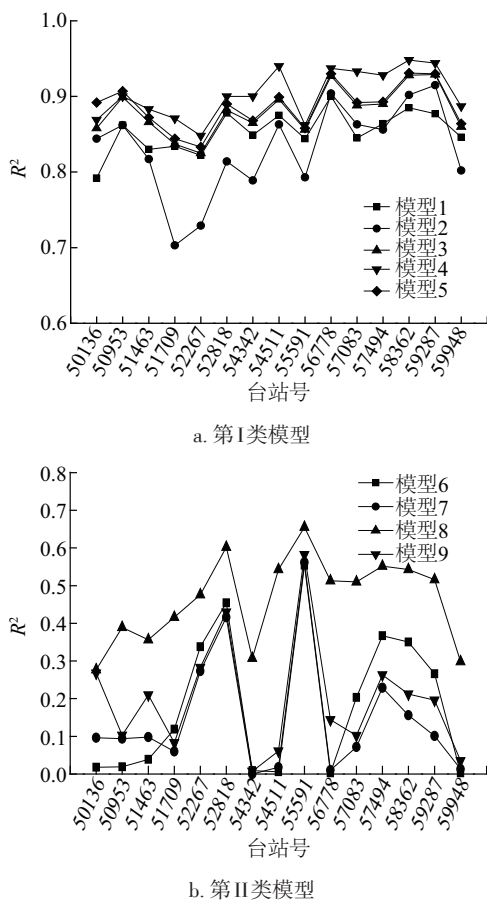


图2 两类模型相关系数 R^2

Fig. 2 Correlation index R^2 of two kinds of model

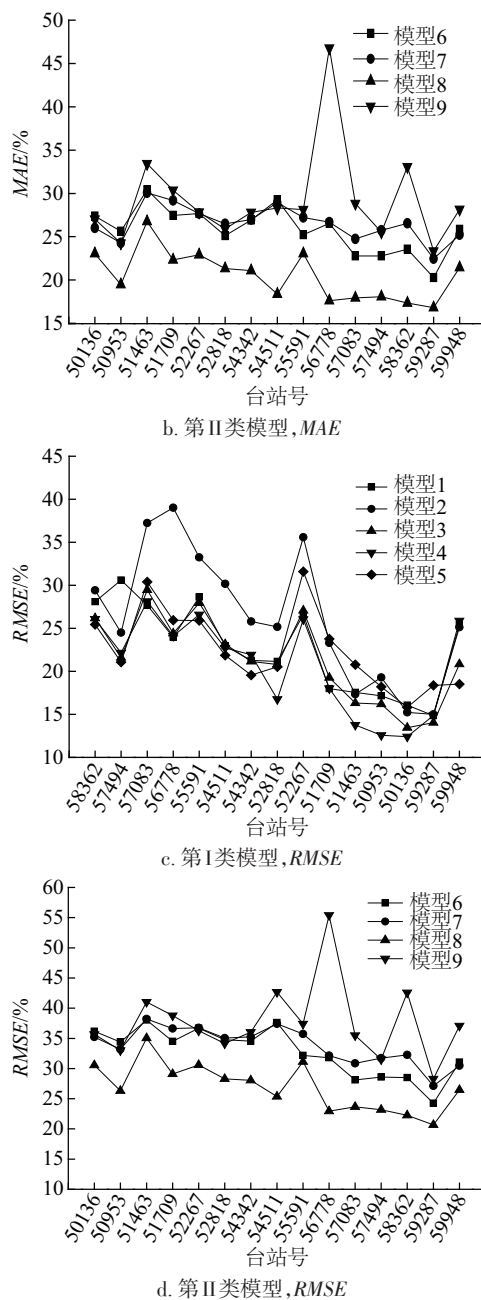
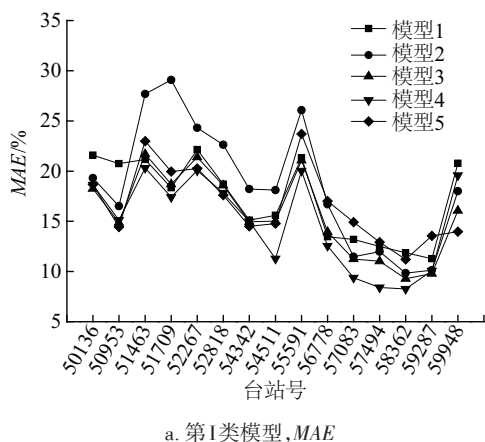
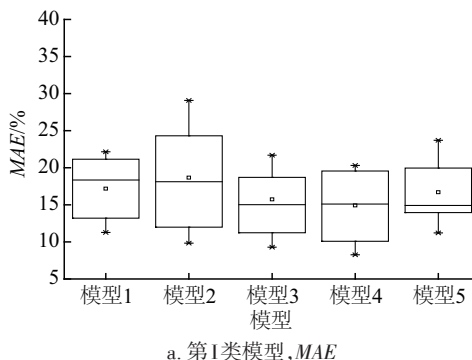
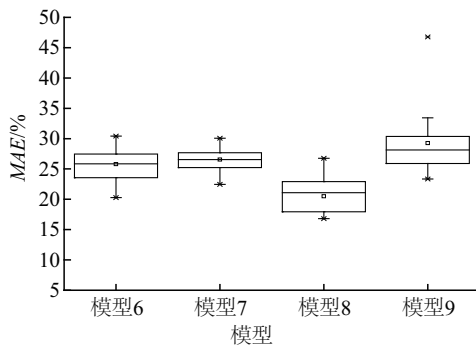


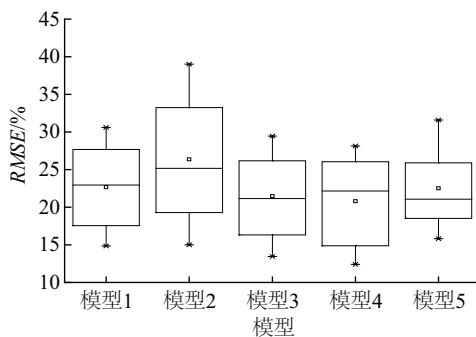
图3 两类模型的误差百分率

Fig. 3 Percentage error of two kinds of model

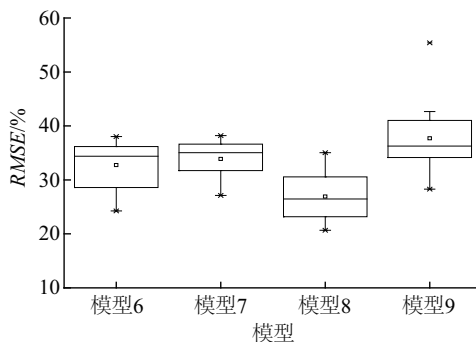




b. 第II类模型, MAE



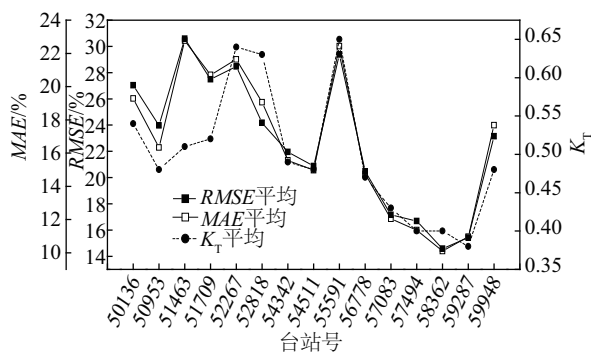
c. 第I类模型, RMSE



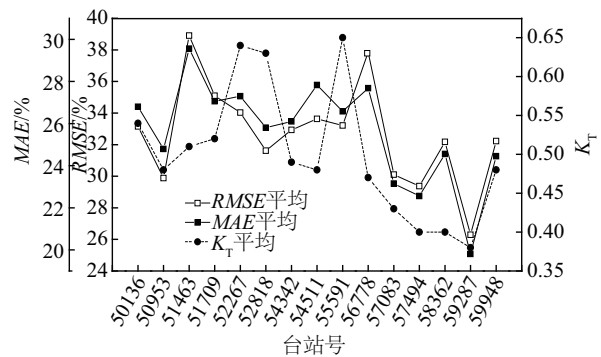
d. 第II类模型, RMSE

图4 两类模型的误差统计图

Fig. 4 Error statistical charts of two kinds of model



a. 第I类模型



b. 第II类模型

图5 平均预测误差与累年平均 K_T 对比图Fig. 5 Comparison between mean prediction error and annual average K_T

5 结 论

1)模型的选择很大程度上受实测数据状况的限制,虽然第I类模型预测误差整体优于第II类模型,但第I类模型需要总辐射日曝辐量的实测数据,而我国具有总辐射日曝辐量实测数据的台站仅有120个,约占台站总数的5%,数据的缺失制约了模型的广泛使用,所以当预测的台站无总辐射日曝辐量实测值时,只能从第II类预测模型中选择。

2)第I类模型中以晴朗指数与日照时数比为自变量的模型预测效果相对较好,其中又以二者的三次函数模型为最;单一以晴空指数为自变量的模型预测效果不如前者;而在晴朗指数与日照时数比基础上再加入日平均温度和相对湿度的多因子模型并不能进一步降低预测误差;单一以日照时数比作为自变量的模型预测误差最大,实际上第I类模型的使用前提是总辐射日曝辐量已知,很容易计算出晴朗指数,所以该子类模型实际使用意义不大。第II类模型中以日照时数比为自变量的三次函数模型预测效果最好,其他3个模型预测精度并无明显差别。

3)第I类模型在不同台站的预测中误差会出现较大差异,这种差异与该台站的平均晴朗指数有关,平均晴朗指数较高的地区预测误差大于晴朗指数较低的地区,当平均晴朗指数低于0.43时,预测误差可控制在17%的范围内,预测精确度高,说明第I类模型对于晴朗指数较低的地区的适应性更好。

[参考文献]

[1] Li J, Wan Y-H, Ohi J M. Renewable energy

- development in China: Resource assessment, technology status, and greenhouse gas mitigation potential[J]. *Applied Energy*, 1997, 56(9): 381—94.
- [2] 朱燕燕. 夏热冬冷地区建筑遮阳系统设计及其节能评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [2] Zhu Yanyan. The research on design method and evaluation of sun-shading system in the summer-hot and winter-cold area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [3] 周 娟. 建筑围护结构动态传热模拟方法的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [3] Zhou Juan. Simulation methods research on transient heat transfer through building envelope[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [4] Liu B Y H, Jordan R C. The relationship and characteristics distribution of direct diffuse and total radiation[J]. *Solar Energy*, 1960, 4(3): 1—19.
- [5] Al- Mohamad A. Global, direct and diffuse solar-radiation in Syria[J]. *Applied Energy*, 2004, 79(2): 191—200.
- [6] Tarhan S, Sari A. Model selection for global and diffuse radiation over the Central Black Sea (CBS) region of Turkey[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(4): 605—613.
- [7] El-Sebaei A A, Al-Hazmi F S, Al-Ghamdi, et al. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(6): 568—576.
- [8] Tiris M, Tiris Ç, Varol H S, et al. Determination of solar energy potential of Gebze (in Turkish)[R]. Project Report (16.2.001), TÜBİTAK-MRC, Kocaeli, 1994.
- [9] Lealea T, Tchinda R. Estimation of diffuse solar radiation in the north and far north of Camerron[J]. *European Scientific Journal*, 2013, 9(18): 537—548.
- [10] Barbaro S, Cannata G, Coppolono S, et al. Diffuse solar radiation statistics for Italy[J]. *Solar Energy*, 1981, 26(3): 429—435.
- [11] Jacovides C P, Hadjoannou L, Pashiardis S, et al. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus[J]. *Solar Energy*, 1996, 56(6): 565—572.
- [12] Lam J C, Li D H W. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components [J]. *Building and Environment*, 1996, 31(7): 527—535.
- [13] Jain P C. A model for diffuse and global irradiation on horizontal surfaces[J]. *Solar Energy*, 1990, 45(9): 301—308.
- [14] Pandey C K, Katiyar A K. A comparative study to estimate daily diffuse solar radiation over India[J]. *Energy*, 2009, 34(6): 1792—1796.
- [15] Al-Hamdani N, Al-Riahi M, Tahir K. Estimation of the diffuse fraction of daily and monthly average global radiation for Fudhaliyah, Baghdad (Iraq)[J]. *Solar Energy*, 1989, 42(7): 81—85.
- [16] Bashahu M. Statistical comparison of models for estimating the month-lyaverage daily diffuse radiation at a subtropical African site[J]. *Solar Energy*, 2003, 75(6): 43—51.
- [17] 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.
- [18] Haydar A, Balli O, Hepbasli A. Estimating the horizontal diffuse solar radiation over the Central Anatolia region of Turkey[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(2): 2240—2249.
- [19] El-Sebaei A A, Al-Hazmi F S, Al-Ghamdi A A, et al. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(3): 568—576.
- [20] Li Huashan, Bu Xianbiao, Long Zhen, et al. Calculating the diffuse solar radiation in regions without solar radiation measurements[J]. *Energy*, 2012, 44(2): 611—615.
- [21] Karakoti I, Das P K, Singh S K. Predicting monthly mean daily diffuse radiation for India[J]. *Applied Energy*, 2012, 91(8): 412—425.
- [22] Lin W, Lu E, Gao W, et al. Distribution patterns of diffuse solar radiation in Yunnan Province, China[J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37(5): 553—560.
- [23] Lin W. General correlation for estimating the monthly average daily direct radiation incident on a horizontal surface in Yunnan Province, China[J]. *Solar Energy*, 1998, 41(1): 1—3.
- [24] Zhou Jin, Wu Yezheng, Yan Gang. Estimation of daily

- diffuse solar radiation in China [J]. Renewable Energy, 2004, 29 (4): 1537—1548.
- [25] Chen R, Kang E, Yang J, et al. Estimation of horizontal diffuse solar radiation with measured daily data in China [J]. Renewable Energy, 2004, 29 (5): 717—726.
- [26] Jiang Y. Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China [J]. Applied Energy, 2009, 86 (9): 1458—1464.
- [27] Liu Jiandong. Changes in the relationship between solar radiation and sunshine duration in large cities of China [J]. Energy, 2015, 82 (7): 589—600.
- [28] Claywell R, Muneer T, Asif M. An efficient method for assessing the quality of large solar irradiance datasets [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127 (5): 150—152.

APPLICABILITY OF ESTIMATION MODELS FOR DIFFUSE SOLAR RADIATION IN CHINA

Yu Ying^{1,2}, Yang Liu², Chen Meng², Cao Qimeng²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to estimate diffuse component, numerous empirical models have been developed. These models are primarily divided into 2 categories on the bases of dependent variable and further subdivided into 9 sub-categories for different inputs. In view of the measured data status in China, 9 typical models are select to evaluate. Measurement made during 2000-2013 from 15 typical stations in five building climate zones are employed on analyzation and verification. The coefficient of determination (R^2), mean absolute bias error (MAE) and root mean square error ($RMSE$) are chosen as a criterion for model applicability. The result shows that estimation error of categories I is less than that of categories II as a whole, and it is negatively correlated with local average clearness index; model 4 and model 8 are best in their own categories respectively.

Keywords: solar energy; diffuse solar radiation; clearness index; empirical models; error analysis