DOI:10.11918/201811175

日散射辐射模型经验系数确定方法

曹其梦[1,2],杨 柳[1,2],于 瑛[3]

(1. 西部绿色建筑国家重点实验室(西安建筑科技大学),西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑学院,西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 机电工程学院,西安 710055)

摘 要: 为得到适应于无辐射观测地区散射辐射模型经验系数的确定方法,根据中国国家气象信息中心发布的中国地面气象、辐射数据,采用回归分析的方法建立单站点模型、修正模型,选择决定系数(R^2)、平均绝对误差百分比(MAE)、均方根误差百分比(RMSE)作为评价模型准确度的指标进行对比研究. 基于17个台站2000—2017年的日照时数、日总辐射、日散射辐射数据,以每个台站前10年的数据建立12个基于日照时数比、晴空指数的单站点模型、3个包含地理参数(经度、纬度、海拔高度)的修正模型,后4年的数据用来评价模型的准确度. 分析比较不同模型、不同台站的MAE、RMSE、R^2的高低,发现模型的形式对准确度有较大影响,多项式模型的准确度高于对数、指数形式,一次函数的准确度低于二次、三次函数形式;单站点模型中,以晴空指数、日照时数比为输入参数的模型最准确,修正模型属基于晴空指数的模型最准确;对于未观测台站可以用包含经度、纬度、海拔高度、晴空指数的模型推算散射辐射.

关键词: 散射辐射;晴空指数;日照时数;经验系数;误差分析

中图分类号: TU111.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)04-0187-08

The estimation method for empirical coefficient of daily diffuse solar radiation model in China

CAO Qimeng[1,2], YANG Liu[1,2], YU Ying[3]

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China (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; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The study is aimed to develop an ideal method to estimate empirical coefficient of diffuse solar radiation model in the Chinese cities where there is no record of solar radiation data. The ground meteorological and solar radiation data from China Meteorological Data Service Center and the method of regression analysis were used to develop and verify the model. The sunshine duration, global solar radiation and diffuse solar radiation from 2000 to 2017 of 17 stations were selected. 12 individual models based on sunshine duration ratio and clearness index and 3 modified models based on geographical parameters (longitude, latitude, and altitude) were built using the data of the first ten years of each station. The data of the last four years of each station were used to evaluate the accuracy of the models. The models were evaluated using coefficient of determination (R^2), mean absolute percentage bias error (MAE), and root mean percentage squared error (RMSE). Results show that the form of the model had a great influence on accuracy. The accuracy of the polynomial model was higher than that of the logarithmic and exponential forms, and the accuracy of the primary function was lower than that of the quadratic and cubic functions. Besides, the model using clearness index and sunshine duration ratio as its input parameters was the most accurate among individual models, and the model based on clearness index was the most accurate among modified models. For unobserved stations, the diffuse solar radiation can be estimated by the proposed model based on latitude, longitude, altitude, and clearness index.

Keywords: diffuse solar radiation; clearness index; sunshine duration; empirical coefficient; error analysis

到达地面的太阳辐射分为直射辐射和散射辐射,散射辐射主要受大气成分、云量的影响;准确可靠的散射辐射数据是建筑能耗模拟、负荷计算、遮阳设计、太阳能利用的基础,计算斜面的太阳辐射数据也需要水平面的直射、散射辐射数据做支撑. 使用高精度的测量设备实时采集是获得准确、足量数据的最有效的方法,但限于资金和维护等问题,中国辐射观测台站较少. 1993年,辐射观测站调整为

收稿日期: 2018-11-26
基金项目: 十三五国家重点研发计划(2018YFC0704500);国家自然科学基金重点项目(51838011);国家自然科学基金青年基金(51608423)
作者简介: 曹其梦(1990—),女,博士研究生;
杨 柳(1970—),女,教授,博士生导师
通信作者: 杨 柳,yangliu@xauat.edu.cn

98 个,其中仅有 17 个台站记录了水平面散射辐射数据,并且呈现了东多稀少、平原多山地少的分布特征[1];在已有的观测台站中,连续记录超过 10 年的数据大多集中在 20 世纪 80 ~ 90 年代初,近 20 年的直、散辐射数据严重匮乏. 因此,亟需选择适当的模型计算中国不同地区散射辐射数据.

散射辐射模型的研究起源于 20 世纪 60 年代,发展至今,出现了上百篇相关计算方法的研究,总结起来,主要为建立散射比(水平面日散射辐射与水平面日总辐射之比)或散射率(定义为水平面散射辐射与水平面天文辐射之比)与晴空指数、日照时数比、云量等气象因子之间的相关关系,包括单个因子的线性、多项式、指数、对数、幂函数形式以及考虑多因子综合作用的多项式形式. 根据计算尺度的不同,可分为月均值与日值,其中计算月均值的模型较多,日值模型包含在月均值模型中,详见表 1.

表 1 日散射辐射模型类别及表达式

Tab. 1 Classification and expression of daily diffuse radiation estimation models

因变量	自变量	表达式	备注
散射比(k_{df}) $k_{df}=H_d/H$	晴空指数[2-7]	$k_{df}=f(H/H_0)$	f 为多项式函数 *(一次、二次、三次)、对数函数、指数函数
	日照时数比[7-9]	$k_{df}=f(S/S_0)$	f 为多项式函数 *(一次、二次、三次)、反比例函数、幂函数
	晴空指数、日照时数比[8,10]	$k_{df}=f(H/H_0,S/S_0)$	f 为二元多项式函数 *(一次、二次、三次)
	晴空指数、日照时数比、平均温度、相对湿度、纬度、太阳赤纬角等[5-6,11-12]	$k_{df}=f(H/H_0,S/S_0,T_{avg},RH,\delta,\varphi)$	f 为多元一次函数
散射率(k_{dc}) $k_{dc}=H_d/H_0$	日总云量[13]	$k_{df}=f(N_e/8)$	f 为多项式函数(一次、二次、三次)
	晴空指数[8,14]	$k_{dc}=f(H/H_0)$	f 为多项式函数(一次、二次、三次)
	日照时数比[8,14]	$k_{dc}=f(S/S_0)$	f 为多项式函数(一次、二次、三次)、对数函数、指数函数
	晴空指数、日照时数比[4]	$k_{dc}=f(H/H_0,S/S_0)$	f 为二元多项式函数(一次、二次)
	日照时数比、平均温度、相对湿度[15-16]	$k_{dc}=f(S/S_0,T_{avg},RH)$	f 为多元函数

注:H 为总辐射,MJ·m^{-2};H_0 为天文辐射,MJ·m^{-2};H_d 为散射辐射,MJ·m^{-2};S 为日照时数,h;S_0 为可照时数,h;T_{avg} 为平均温度,℃;RH 为相对湿度,%;δ 为太阳赤纬角,°;φ 为纬度,°;晴空指数(k_t)为总辐射与天文辐射的比值;日照时数比(S/S_0)为日照时数与可照时数的比值;* 为用来计算日值.

这些研究多以实测数据进行模型的建立或对模型进行修正,采用误差分析方法评价模型的优劣,进而得到适合这一地区的最优模型,包括模型形式及经验系数. 由于地区气候差异性,没有得到统一的模型;例如,Boukelia 等[17]基于阿尔及利亚地区,发现以晴空指数为输入参数的二次或三次多项式形式最准确;Jamil 等[18]认为以晴空指数、日照时数比为输入参数的一次函数适合印度地区;Sabzpooshani 等[19]发现基于日照时数比的三次多项式最适合伊朗伊斯法罕地区月均散射辐射的计算. 李峥嵘等[20]研究得到了适合上海地区的日散射辐射模型;马年骏等[21]研究表明,考虑晴空指数、日照百分率的模型估算精度优于单一晴空指数的分段函数模型;冯巍等[22]以北京地区数据为基础,验证了 Erbs、张晴原等 10 种模型的计算精度,得出晴空指数是影响散射辐射估算精度的最主要因素,考虑晴空指数为输入参数的分段函数最准确. 相关研究[17,23]证实,这类模型的经验系数与地理位置有很大的关系,具有显著的地区差异性,对于缺少观测台站的西部及偏远的农村地区,在应用此类模型计算日散射辐射时,其经验系数取多少合适,尚有待研究. 文献[23 -25]在计算总辐射时,在温度、日照时数、相对湿度等气象参数的基础上,加入了纬度、海拔高度等地理参数的修正,结果表明,修正后的模型准确度有所降低,但可以满足计算精度的要求,实现了总辐射数据的"从无到有";文献[17]根据阿尔及利亚 6 个城镇的散射辐射、气象数据,拟合了散射比与日照时数比、晴空指数的关系,但这是一种平均化状态,弱化了纬度、海拔高度对太阳辐射的影响. 因此,本文根据观测台站的辐射数据建立模型经验系数与地理参数关系,以计算未观测站点的散射辐射数据. 本文以实测数据进行不同模型在不同地区的适应性分析,以准确度相对较高、形式简单的模型为基础,建立考虑纬度、海拔高度等地理参数修正的模型,对比修正前后模型的准确度,验证此类方法的可行性.

1　数据与方法

1.1　数据来源

文中所用到的数据均来自中国国家气象信息中心日值气象、辐射数据集，建模所涉及到的数据包括水平面日总辐射、水平面日散射辐射及日照时数等气象要素. 选择北京等 17 个台站 2000—2017 年观测数据，其中，每个台站前 10 年数据用来建模，后 4 年数据用来验证，各个台站经纬度等基本信息及建模、验证数据时间段见表 2.

表 2　17 个台站的基本信息

Tab. 2　Basic information of the 17 stations

台站号	台站名	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	累年平均晴空指数	数据时间段/a	建模数据时间段/a	验证数据时间段/a
56187	温江	30.75	103.87	555	0.31	2004—2017	2004—2013	2014—2017
59287	广州	113.33	23.16	43	0.38	2004—2017	2004—2013	2014—2017
57494	武汉	114.13	30.62	27	0.38	2004—2017	2004—2013	2014—2017
58362	上海	121.46	31.41	8	0.41	2004—2017	2004—2013	2014—2017
57083	郑州	113.65	34.72	111	0.43	2000—2013	2000—2009	2010—2013
59948	三亚	109.52	18.23	7	0.48	2000—2013	2000—2009	2010—2013
56778	昆明	102.68	25.02	1 897	0.49	2004—2017	2004—2013	2014—2017
50953	哈尔滨	126.77	45.75	143	0.50	2004—2017	2004—2013	2014—2017
54342	沈阳	123.52	41.73	50	0.51	2004—2017	2004—2013	2014—2017
54511	北京	116.47	39.80	33	0.51	2004—2017	2004—2013	2014—2017
51709	喀什	75.98	39.47	1 290	0.52	2000—2013	2000—2009	2010—2013
52983	榆中	35.87	104.15	1 875	0.53	2004—2017	2004—2013	2014—2017
51463	乌鲁木齐	87.65	43.80	947	0.55	2000—2013	2000—2009	2010—2013
50136	漠河	122.51	52.97	434	0.55	2000—2013	2000—2009	2010—2013
52818	格尔木	94.90	36.42	2 809	0.63	2000—2013	2000—2009	2010—2013
52267	额济纳旗	101.07	41.95	941	0.64	2000—2013	2000—2009	2010—2013
55591	拉萨	91.13	29.67	3 650	0.64	2000—2013	2000—2009	2010—2013

1.2　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 Younes 等[26]提出的散射包络线法筛选出异常的散射辐射数据. 该方法包括如下步骤：1）删除 k_t、k_{df}落在[0,1]区间以外的值；2）将剩下的数据根据 k_t 分成 10 个相等的数据带，对于每一个数据带 b，求出相应散射比的平均值$\bar{k}_{df,b}$和标准偏差 σ_b，做出两条上、下包络线，下包络线 f_{low}是 10 对(k_{tb}，$\bar{k}_{df,b}-2\sigma_b$)数据的二次拟合曲线，上包络线 f_{up}是 10 对(k_{tb}，$\bar{k}_{df,b}+2\sigma_b$)数据的二次拟合曲线，其中 k_{tb}是每个数据带 b 中晴空指数的中值，若散点在上、下包络线范围之外则属于异常数据.

文中以北京(54511)为例，按照上述方法分别计算得到上、下包络线，将包络线与散点图叠加，如图 1 所示，上、下包络线之外的数据则为异常数据. 将 17 个台站依次完成质量控制，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.

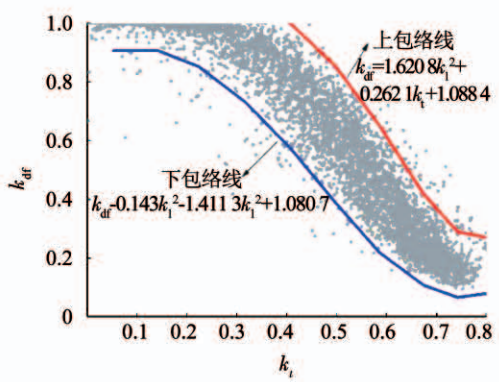


图 1　散射辐射数据质量控制图

Fig. 1　Quality control chart of diffuse radiation data

1.3　模型选择

文献[27－28]证实散射率模型的准确度低于散射比模型，加入日平均温度和相对湿度的多因子的散射比模型并不能显著提高模型准确度. 因此本文不再考虑散射率模型，而是选择散射比模型，模型的输入参数为单一的晴空指数、日照时数比以及晴空指数、日照时数比共同作用的模型，模型形式为多项式函数、对数形式、指数形式，共 12 个模型，具体见表 3.

表 3 日散射辐射推测模型汇总表

Tab. 3 Summary of daily diffuse radiation models

编号	函数形式
M1	$k_{df}=a+bk_t$
M2	$k_{df}=a+bk_t+ck_t^2$
M3	$k_{df}=a+bk_t+ck_t^2+dk_t^3$
M4	$k_{df}=a+b\log_{10}(k_t)$
M5	$k_{df}=a+b\exp(k_t)$
M6	$k_{df}=a+b\frac{S}{S_0}$
M7	$k_{df}=a+b\frac{S}{S_0}+c\left(\frac{S}{S_0}\right)^2$
M8	$k_{df}=a+b\frac{S}{S_0}+c\left(\frac{S}{S_0}\right)^2+d\left(\frac{S}{S_0}\right)^3$
M9	$k_{df}=a+b\exp\left(\frac{S}{S_0}\right)$
M10	$k_{df}=a+bk_t+c\frac{S}{S_0}$
M11	$k_{df}=a+bk_t+ck_t^2+d\left(\frac{S}{S_0}\right)+f\left(\frac{S}{S_0}\right)^2$
M12	$k_{df}=a+bk_t+ck_t^2+dk_t^3+f\left(\frac{S}{S_0}\right)+g\left(\frac{S}{S_0}\right)^2+h\left(\frac{S}{S_0}\right)^3$

1.4 模型评价方法

为了比较模型的优劣,引入了 3 个评价指标,分别为平均绝对误差百分比(MAE)、均方根误差百分比(RMSE)和决定系数(R^2),计算如下:

$$\mathrm{MAE}=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|(I_{e,i}-I_{m,i})|\right)/\bar{I}\times 100\%,$$

$$\mathrm{RMSE}=\left(\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(I_{e,i}-I_{m,i})^2}\right)/\bar{I}\times 100\%,$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(I_{m,i}-I_{e,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(I_{m,i}-\bar{I})^2}.$$

式中:$I_{e,i}$ 为模型计算值,MJ·m^{-2};$I_{m,i}$ 为实测值,MJ·m^{-2};$\bar{I}$为实测值的平均值,MJ·m^{-2};n 为数据总量.

MAE、RMSE 越小越好. R^2数值范围介于 $-\infty$ ~ 1 之间,R^2越接近于 1 越好;R^2接近于 0 表示计算值接近实测平均值,总体结果可信,但估算误差较大;$R^2<0$,表示计算值小于实测值,结果不可信.

2 结果与讨论

2.1 单站点模型

以上述 17 个台站质量控制后的数据进行模型适应性研究,选择相应的数据建模,拟合 17 个模型的经验系数,如图 2 所示;依据相应时间段的数据进行模型验证,依次计算模型的 R^2、MAE 和 RMSE 值,按晴空指数由低到高排序,绘制不同模型的 MAE、RMSE 及 R^2,结果如图 3 ~ 5 所示.

以系数 a、b、c 为例分析模型经验系数的差异,如图 2 所示,模型的经验系数具有台站差异性,尤其以包含晴空指数为变量模型 M1、M2、M3、M4、M12 最为明显,这与文献[23]的研究结果是一致的.

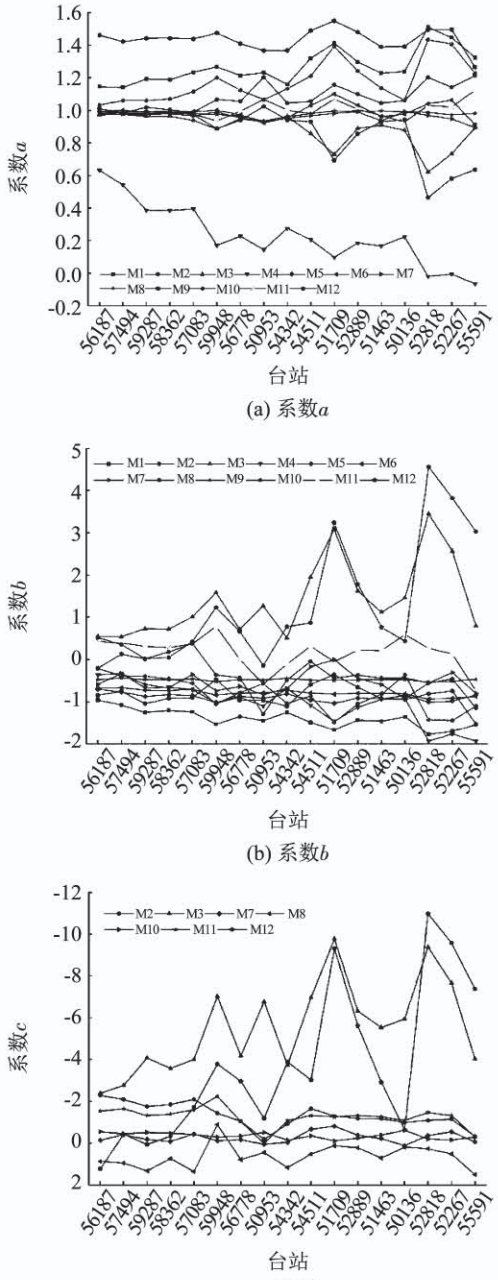


图 2 M1 ~ M12 的经验系数

Fig. 2 Empirical coefficient of M1 ~ M12

分析图 3(a) ~ 图 3(c)可知:3 类模型的 R^2,以晴空指数、日照时数比为输入参数的模型最大、波动小,其次是以晴空指数为输入参数的模型,最后是以日照时数比为输入参数的模型,MAE、RMSE 的数值与 R^2有相反的变化趋势,表明以晴空指数、日照时数比为输入参数的模型准确度最高,其次是以晴空指数为输入参数的模型,以日照时数比为输入参数的模型准确度最低. 文献[18]以印度地区 2013—2016 年间的数据分析以晴空指数、日照时数比为输

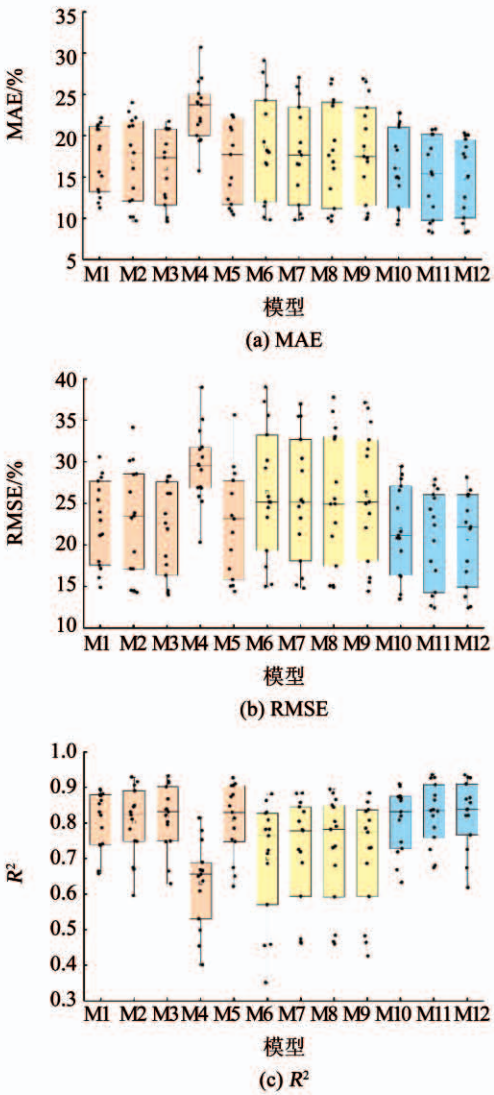


图 3　12 个模型的误差评价指标

Fig. 3　Evaluation index of the 12 models

入参数的模型的准确度，得到了相同的结果.

比较同类模型之间不同形式对准确度的影响. 对比以晴空指数为输入参数的模型（M1，M2，M3，M4，M5）可知：各个台站的 R^2 由小到大的顺序依次是对数模型、指数模型、多项式模型，MAE、RMSE 变化趋势相反；在多项式形式中，二次、三次的 MAE、RMSE 低于一次函数形式；二次、三次的 MAE、RMSE、R^2 基本重合. 对比以日照时数比为输入参数以及以晴空指数、日照时数比为输入参数的双变量模型发现，多项式模型 MAE、RMSE 要低于其他形式，而在多项式模型中，二次、三次之间 MAE、RMSE 的差异较小. 上述分析表明：多项式形式要优于对数、指数等形式；在多项式模型中，增加自变量的次数可以提高模型的准确度，但二次到三次不明显.

2.2　修正模型

由上述分析可知，模型的准确度随地区而变化，此外，模型的经验系数具有地区差异性，对于无辐射观测台站地区，其经验系数多少合适，是未知的，能否寻找经验系数与地理参数的关系，以解决无观测台站的辐射数据. 相关研究证实散射辐射的变化与纬度、经度、海拔高度密切相关，挑选单站点模型中准确度相对较高、形式相对简单的模型，即 M1、M6、M10，利用多元回归分析建立模型经验系数与纬度（φ）、经度（β）、海拔高度（H）关系式，本文称为修正模型，以 M13 ~ M15 表示，模型经验系数见表 4. 为便于和单站点模型对比，计算修正后的模型与单站点模型（即 M13 与 M1、M14 与 M6、M15 与 M10）误差指标的差值以及在 17 个台站的平均值，结果如图 4、5 所示，以 17 个台站后 4 年的数据进行验证，计算 3 个模型的误差指标，如图 6 所示.

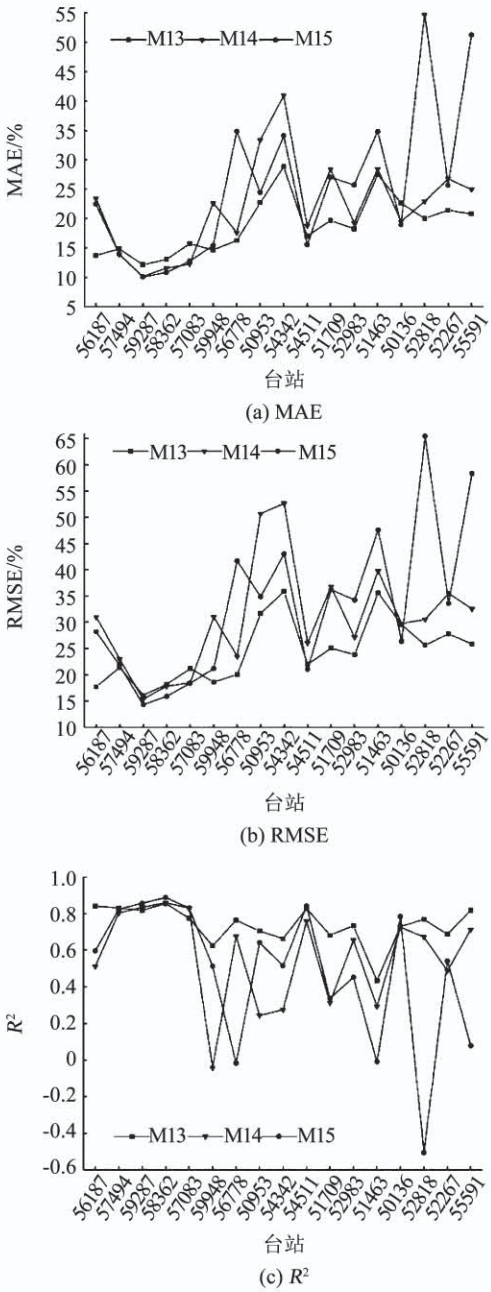
M13、M14、M15 之间对比可知，除 57494、59287、58362、57083 台站外，M15 的 MAE、RMSE 明显高于 M13、M14，R^2 低于 M13、M14，如图 4 所示；结合误差指标平均值进行分析（图 6），M15 的 MAE、RMSE 最大，R^2 最小；结果表明，基于晴空指数、日照时数比模型的准确度低于基于晴空指数、日照时数比的单一输入参数模型.

计算修正前后模型之间误差指标（即 M13 与 M1、M14 与 M6、M15 与 M10）的差值，并做 17 个台站的统计图，如图 5 所示，对于 3 类模型，大多数台站的单站点模型的 MAE、RMSE 要低于修正模型；基于晴空指数模型（M1、M13）的 MAE、RMSE 的差

表 4　修正模型经验系数

Tab. 4　Empirical coefficient of the modified model

模型	a	b	c
M13	$-0.434\cos\varphi+0.628\sin\beta+3.512\times10^{-5}H+1.004$	$0.887\cos\varphi-0.799\sin\beta-8.145\times10^{-5}H-1.303$	
M14	$-0.146\cos\varphi+0.631\sin\beta-2.494\times10^{-5}H+0.548$	$0.277\cos\varphi-0.224\sin\beta-3.920\times10^{-5}H-0.773$	
M15	$-0.432\cos\varphi+1.019\sin\beta+2.910\times10^{-5}H+0.552$	$1.042\cos\varphi-2.218\sin\beta+0.498$	$-0.135\cos\varphi+0.761\sin\beta+3.194\times10^{-6}H-0.982$



(a) MAE

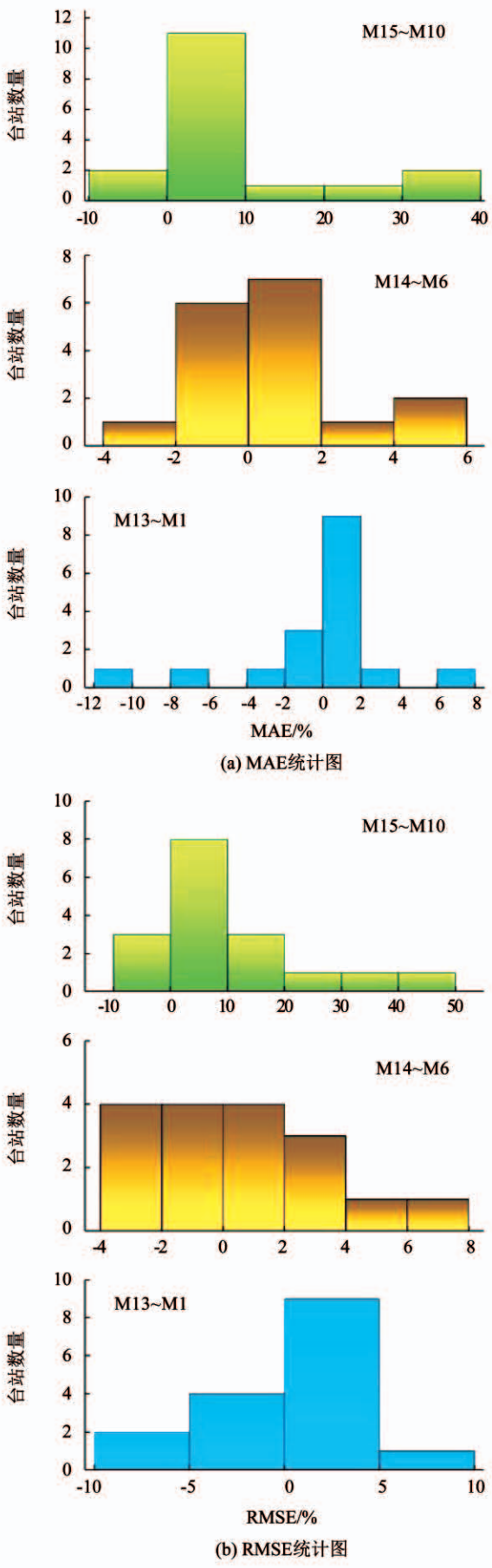
(b) RMSE

(c) R^2

图 4　修正模型误差指标

Fig. 4　Evaluation index of the modified model

异最小，分别分布在 -0.12% ~0.08%、-0.1% ~0.1%之间；基于晴空指数、日照时数比双变量模型(M10、M15)的 MAE、RMSE 的差异最大，分别分布在 -10% ~40%、-10% ~50%之间；将空间扩展模型与单站点模型在 17 个台站的误差指标值进行平均，如图 6 所示，发现基于晴空指数修正模型(M13)的 MAE、RMSE 均低于单站点模型，R^2 高于单站点模型(M1)；而另两类修正模型的 MABE、RMSE 均高于单站点模型，分布高出0.48%、7.98%、4.80%、9.37%；上述对比说明，基于晴空指数修正模型的准确度稍高于单站点模型，其他修正模型准确度低于单站点模型.



(a) MAE统计图

(b) RMSE统计图

图 5　修正模型与单站点模型误差指标差值的统计图

Fig. 5　Statistical chart of the difference of error index between modified and individual model

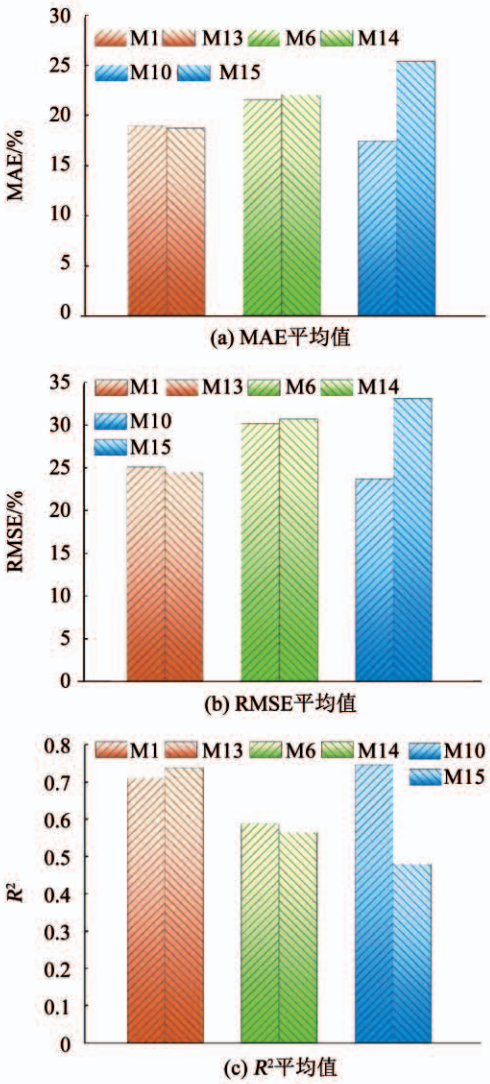


图 6　修正模型与单站点模型误差指标的平均值

Fig. 6　Mean error index of the modified and individual model

3　结　论

1)以中国 17 个辐射观测台站 2000 年—2017 年的实测数据为基础，建立 12 个单站点模型，采用误差分析的方法对比不同模型的准确度；分析表明：多项式模型的准确度高于对数、指数形式；一次函数的准确度低于二次、三次函数形式，二次与三次函数无明显差异；以晴空指数、日照时数比为输入参数的模型最准确，基于晴空指数的模型次之，基于日照时数比的模型最差.

2)以单站点模型中表现较好形式简单的模型(M1、M6、M10)为基础，建立 3 个包含地理信息(纬度、经度、海拔高度)的修正模型，数据分析表明，基于晴空指数的模型最准确，基于日照时数比模型次之，基于晴空指数、日照时数比模型最差.

3)建议用本文提出的方法确定散射辐射模型的经验系数，采用基于晴空指数的一次函数模型计算散射辐射.

参考文献

[1] CHEN Jilong, LIU Hongbin, WU Wei, et al. Estimation of monthly solar radiation from measured temperatures using support vector machines-A case study[J]. Renewable Energy, 2011, 36(1): 413. DOI:10.1016/j.renene.2010.06.024

[2] Al-MOHAMAD A. Global, direct and diffuse solar-radiation in Syria [J]. Applied Energy, 2004, 79(2): 191. DOI: 10.1016/j.apenergy.2003.12.011

[3] 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. DOI:10.1016/j.enconman.2004.04.004

[4] El-SEBAII AA, 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(2): 568. DOI:10.1016/j.apenergy.2009.06.032

[5] BAKIRCI K. Models for the estimation of diffuse solar radiation for typical cities in Turkey[J]. Energy, 2015, 82: 827. DOI:10.1016/j.energy.2015.01.093

[6] NADJEM B, KADA B, ZAKI A M, et al. A new empirical model for forecasting the diffuse solar radiation over Sahara in the Algerian Big South[J]. Renewable Energy, 2018, 117: 530. DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.081

[7] BARBARO S, CANNATA G, COPPOLONO S, et al. Diffuse solar radiation statistics for Italy[J]. Solar Energy, 1981, 26(5): 429. DOI:10.1016/0038-092x(81)90222-x

[8] JAIN P C. A model for diffuse and global irradiation on horizontal surfaces[J]. Solar Energy, 1990, 45(5): 301. DOI:10.1016/0038-092x(90)90015-5

[9] PANDEY C K, KATIYAR A K. A comparative study to estimate daily diffuse solar radiation over India[J]. Energy, 2009, 34(11): 1792. DOI:10.1016/j.energy.2009.07.026

[10] 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(1): 81. DOI:10.1016/0038-092x(89)90132-1

[11] 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. DOI:10.1016/0038-092x(79)90100-2

[12] LI Maofen, LIU Hongbin, GUO Pengtao, et al. Estimation of daily solar radiation from routinely observed meteorological data in Chongqing, China[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2575. DOI:10.1016/j.enconman.2010.05.021

[13] BASHAHU M. Statistical comparison of models for estimating the monthly average daily diffuse radiation at a subtropical African site [J]. Solar Energy, 2003, 75(1): 43. DOI:10.1016/s0038-092x(03)00213-5

[14] 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(15/16): 2240. DOI:10.1016/j.enconman.2005.11.024

[15] LI Huashan, BU Xianbiao, LONG Zhen, et al. Calculating the diffuse solar radiation in regions without solar radiation measurements [J]. Energy, 2012, 44(1): 611. DOI:10.1016/j.energy.2012.05.033

[16] KARAKOTI I, DAS P K, SINGH S K. Predicting monthly mean daily diffuse radiation forIndia[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 412. DOI:10.1016/j.apenergy.2011.10.012

[17] BOUKELIA T E, MECIBAH M S, MERICHE I E. General models for estimation of the monthly mean daily diffuse solar radiation (Case study: Algeria)[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 81: 211. DOI:10.1016/j.enconman.2014.02.035

[18] JAMIL B, AKHTAR N. Comparative analysis of diffuse solar radiation models based on sky-clearness index and sunshine period for humid-subtropical climatic region of India: A case study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 336. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.073

[19] SABZPOOSHANI M, MOHAMMADI K. Establishing new empirical models for predicting monthly mean horizontal diffuse solar radiation in city of Isfahan, Iran[J]. Energy, 2014, 69: 571. DOI:10.1016/j.energy.2014.03.051

[20] 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, 34(5): 794
LI Zhengrong, YAO Wanxiang, ZHAO Qun, et al. Study on the comparison of models for daily diffuse solar radiation on a horizontal surface[J]. Acta Energiae Solar is Sinica, 2013, 34(5): 794. DOI:10.3969/j.issn.0254-0096.2013.05.011

[21] 马年骏, 李芬, 边泽强, 等. 太阳辐射直散分离模型的改进及应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 211
MA Nianjun, LI Fen, BIAN Zeqiang, et al. Comparative study of solar beam-diffuse radiation separated model[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(4): 211

[22] 冯巍, 董宏, 杨柳, 等. 太阳辐射直散分离模型比较研究——以北京地区为例[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(1): 12
FENG Wei, DONG Hong, YANG Liu, et al. Comparison of the fraction model of direct and diffuse solar radiation-Taking Beijing area as anexample [J]. Journal of Civil, Architectural& Environment Engineering, 2015, 37(1): 12. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.003

[23] LI Maofen, TANG Xiaoping, WU Wei, et al. General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 70(70): 139. DOI:10.1016/j.enconman.2013.03.004

[24] LIU Yanfeng, ZHOU Yong, WANG Dengjia, et al. Classification of solar radiation zones and general models for estimating the daily global solar radiation on horizontal surfaces in China[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 154: 168. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.10.043

[25] ZHOU Jin, WU Yezheng, YAN Gang. General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(2): 257. DOI:10.1016/j.enconman.2004.02.020

[26] YOUNES S, CLAYWELL R, MUNNEER T. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches [J]. Energy, 2005, 30(9):1533. DOI:10.1016/j.energy.2004.04.031

[27] 于瑛, 杨柳, 陈猛, 等. 日散射辐射推算模型在中国的适用性研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3005
YU Ying, YANG Liu, CHEN Meng, et al. Applicability of estimation models for diffuse solar radiation in China[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3005

[28] EL-SEBAII A A, AL-AGEL F. Estimation of horizontal diffuse solar radiation from common meteorological parameters: A case study for Jeddah, Saudi Arabia[J]. International Journal of Ambient Energy, 2013, 34(2): 92. DOI:10.1080/01430750.2012.740423

(编辑 张 红)

(上接第 186 页)

[10] MENBERG K, HEO Y, CHOUDHARY R. Sensitivity analysis methods for building energy models: Comparing computational costs and extractable information[J]. Energy and Buildings, 2016, 133: 433. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.10.005

[11] NGUYEN A T, REITER S. A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models [J]. Building Simulation, 2015, 8(6): 651. DOI:10.1007/s12273-015-0245-4

[12] SALTELLI A, RATTO M, ANDRES F, et al. Global sensitivity analysis: The primer[M]. England: John Wiley & Sons Ltd., 2008. DOI:10.1002/9780470725184.ch6

[13] 中国建筑科学研究院. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015
China Academy of Building Research. Designstandard for energy efficiency of public buildings: GB 50189 — 2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法: GBT 7106 — 2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Graduations and test methods of air permeability, water tightness, wind load resistance performance for building external windows and doors: GBT 7106 — 2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范: GB 50176 — 2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil building: GB 50176 — 2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016

[16] KHARE Y P, MUÑOZ-CARPENA R, ROONEY R W, et al. A multi-criteria trajectory-based parameter sampling strategy for the screening method of elementary effects [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 64: 230. DOI:10.1016/j.envsoft.2014.11.013

[17] EnergyPlus. EnergyPlus 软件官方网站[DB/OL]. [2019-05-13]. https://www.energyplus.net/weather

(编辑 张 红)