

曹雯, 申双和. 我国太阳日总辐射计算方法的研究 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 587-591

## 我国太阳日总辐射计算方法的研究

曹雯, 申双和

(南京信息工程大学 应用气象学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 对全国 23 个站点的日照时数、日最高气温、日最低气温、太阳日总辐射量等气象要素实测资料进行统计分析, 利用回归分析法建立了以日照百分率和气温日较差为主要相关因子的各地日总辐射估算模型。结果表明: 除了高原站拉萨以外, 推算模型的复相关系数均介于 0.80~0.93 之间, 拟合效果较好。在春、夏季使用独立的季节模型有一定的必要性, 该方法适用于我国各地太阳日总辐射的推算。

**关键词:** 太阳日总辐射; 日照百分率; 温度日较差

**中图分类号:** P422.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-2022(2008)04-0587-05

## Estimation of Daily Solar Radiation in China

CAO Wen, SHEN Shuang-he

(School of Applied Meteorology, NUIS, Nanjing 210044 China)

**Abstract** By analyzing daily observed routine meteorological variables such as sunshine-hours, maximum temperature, minimum temperature and solar radiation from 23 stations in China models were established for assessment of daily solar radiation. The models include two independent variables i.e. percentage of sunshine and diurnal temperature range. Except for Lhasa weather station with a high elevation located in plateau, multiple correlation coefficients of all models range from 0.80 to 0.93. Through analysis on the modeled results we found that it is necessary to use seasonal models to estimate daily solar radiation, especially for spring and summer. It could come to a conclusion that the models developed in this paper are effective and feasible in the assessment of daily solar radiation in whole China.

**Key words** daily solar radiation; percentage of sunshine; diurnal temperature range

### 0 引言

太阳辐射是地球上生物有机体的基本能量来源, 在研究自然界许多现象和变化过程时, 都必须了解太阳辐射状况。但在全球范围内, 对太阳辐射进行常规观测的台站密度不大, 不能满足分布规律研究和实际应用的需要。因此, 国内外众多学者都在寻求地面太阳辐射量的估算方法。

20 世纪 40 年代, Pernan<sup>[1]</sup> 提出计算式  $Q = S_0(a + bs_1)$ , 式中  $Q$ 、 $S_0$  分别为实际和天文总辐射,  $s_1$  为同期日照百分率,  $a$ 、 $b$  为经验系数。Black 等<sup>[2]</sup> 在分析了以上线性公式的同时, 认为采用抛物线式比较合适:  $Q = S_0(a + bs_1 + cs_1^2)$ 。Suckling<sup>[3]</sup> 在超

过 100 km 的距离对无辐射资料地区进行内插, 夏季和冬季的相对误差分别达到 33% 和 48%, 精确度不高。Bristow 等<sup>[4]</sup> 提出一个基于日温度振幅的预测地面辐射的模型, 效果较好。

我国总辐射气候计算方法研究起步较晚, 从 1957 年开始建立全国日射站后才真正发展起来。左大康等<sup>[5]</sup> 在 20 世纪 60 年代初根据我国日射站实测资料最先将  $Q = S_0(0.248 + 0.752s_1)$  作为计算我国太阳总辐射的统一模型。此后, 翁笃鸣<sup>[6]</sup>、王炳忠<sup>[7]</sup> 在此基础上又先后提出了其他类似的计算太阳总辐射的方法。朱志辉<sup>[8]</sup> 提出了多因子(日照百分率, 海拔高度, 平均水汽压)综合法月值和年值的全国通用模型。

收稿日期: 2007-03-30 改回日期: 2007-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40675067)

作者简介: 曹雯(1983-), 女, 安徽芜湖人, 硕士, 研究方向为应用气象学, sgkxy\_0@163.com.

上述学者提出的计算太阳总辐射的方法, 由于所选用的区域及资料的年限等原因, 目前在我国使用会受到时间和空间的限制, 而且他们考虑的主要都是月总辐射量和年总辐射量。随着科学技术的不断发展, 对以日为时间尺度的太阳辐射量的需求愈加迫切, 这就要求探讨运用常规气象资料推算太阳日总辐射的方法。本文在分析影响太阳辐射变化的物理机制基础上, 运用统计学方法研制适合我国的方便实用的太阳日总辐射计算模型。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

综合考虑我国地域分布特点及太阳日总辐射资料的数据完整情况, 选择北京等 23 个站点作为本文研究的对象。所用气象要素资料为 1961—2000 年 40 a 来 23 个站点逐日观测值, 包括太阳日总辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 日照时数 (h), 日最高气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 日最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 降水量 (mm) 和水汽压 (hPa)。对错漏数据进行了必要的内插订正, 保证所有数据的有效性。

### 1.2 相关要素的计算

#### 1.2.1 辐射透过率 $Q/S_0$

$S_0$  是大气层顶水平面上太阳日总辐射量,  $Q$  为到达地面的太阳日总辐射量。 $S_0$  的计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$S_0 = I_{sc} E_0 (\omega_s \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin\omega_s) / \pi_0 \quad (1)$$

式中:  $I_{sc}$  为太阳常数, 取  $1\,367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (即  $118.109 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $E_0$  是以日地平均距离  $R_0$  ( $149\,600 \times 10^6 \text{ m}$ ) 为标准值统一订正后的的  $(R_0/R)^2$  值, 称为“日—地距离”订正因子;  $\delta$  为太阳赤纬;  $\phi$  是各站点的地理纬度;  $\omega_s$  是日落时的时角 (单位: 角度);  $\pi$  取  $3.141\,592\,6$

$$E_0 = 1.000\,11 + 0.034\,221 \cos\Gamma + 0.001\,28 \sin\Gamma + 0.000\,719 \cos 2\Gamma + 0.000\,077 \sin 2\Gamma。$$

$$\delta = (180/\pi) (0.006\,918 - 0.399\,912 \cos\Gamma + 0.070\,257 \sin\Gamma - 0.006\,758 \cos 2\Gamma + 0.000\,907 \sin 2\Gamma - 0.002\,697 \cos 3\Gamma + 0.001\,48 \sin 3\Gamma)。$$

式中: 年角  $\Gamma = 2\pi \cdot (n-1)/365$ , 单位为弧度,  $n$  为一年中的日序数。

$$\text{时角 } \omega_s = \arccos(-\tan\phi \tan\delta)。$$

#### 1.2.2 日照百分率 $s_1$

$$s_1 = \text{实际日照时数} / \text{可能日照时数}。 \quad (2)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 全年模型

在对日照时数, 日最高气温, 日最低气温等实测资料 (1961—1995 年) 分析研究的基础上, 结合国内外有关成果<sup>[10-17]</sup>, 通过回归分析的方法拟合出以日照百分率为主导因子, 气温日较差为订正项的太阳日总辐射量的计算模型

$$Q/S_0 = a s_1 + b \text{HD} + c_0 \quad (3)$$

即

$$Q = S_0 \cdot [a s_1 + b \text{HD} + c]。 \quad (4)$$

其中:  $D$  是温度日较差, 当天最高气温与最低气温之差。

各站的回归系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  (表 1) 分别为  $0.384 \sim 0.517$ ,  $0.051 \sim 0.136$ ,  $-0.061 \sim 0.133$ , 其变化并未表现出明显的地域趋势, 这可能与各测站的地理纬度和海拔高度的共同作用有关。除了拉萨站之外, 各地的复相关系数均介于  $0.80 \sim 0.93$  之间, 表明模型的拟合效果较好。23 个观测站平均绝对误差和平均相对误差的均值分别为  $2.08 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $24.3\%$ , 两者的最大值分别出现在拉萨 ( $2.56 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 和贵阳 ( $35.5\%$ )。某些站点的平均相对误差值偏大可能主要是由于个别天的实测值很小, 相对误差值较大造成的。

### 2.2 季节模型

一般来说, 夏、秋两季的太阳辐射较高, 春、冬两季的太阳辐射偏低。因此在计算太阳日总辐射时, 全年使用同一个模型可能会造成较大误差。

按区域分布从 23 个观测站中选取哈尔滨、西宁、南京、广州作为代表站点, 分季节拟合太阳日总辐射的计算模型, 模型形式同式 (3) 和式 (4)。

各站点四季太阳日总辐射计算模型的回归系数各不相同 (表 2), 与全年计算模型的系数差异也较大。从四季模拟值与实测值的误差分析结果 (图 1) 可以看出: 冬季的误差最小, 而夏季的误差最大, 这与夏季本身辐射值较大有关。比较分别利用季节模型和全年模型计算的模拟值与实测值之间的平均绝对误差, 春、夏两季二者的差距较明显, 季节模型的误差小于全年模型的误差; 而秋、冬两季的差距较小, 说明在春、夏季使用独立的季节模型计算太阳日总辐射有一定的必要性。

表 1 模型的回归系数及相关参数

Table 1 Regression coefficients and related parameters of the models

站名	a	b	c	R	平均绝对误差 / ( $M J \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )	
					平均绝对误差 / ( $M J \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )	平均相对误差 %
哈尔滨	0.452	0.080	0.052	0.80	2.06	22.7
乌鲁木齐	0.507	0.061	0.078	0.86	1.78	19.7
沈阳	0.517	0.051	0.083	0.86	1.85	20.2
北京	0.488	0.056	0.100	0.87	1.84	17.9
天津	0.447	0.080	0.064	0.85	2.01	20.1
银川	0.447	0.089	0.069	0.88	1.74	14.1
太原	0.471	0.085	0.030	0.87	1.94	18.9
西宁	0.449	0.092	0.046	0.83	2.20	19.1
兰州	0.438	0.077	0.055	0.82	2.21	21.5
郑州	0.412	0.090	0.035	0.88	1.94	22.8
西安	0.384	0.126	-0.031	0.88	2.06	26.1
南京	0.468	0.077	0.033	0.89	2.05	27.2
合肥	0.480	0.074	0.021	0.92	2.04	27.4
成都	0.388	0.114	-0.004	0.90	1.72	27.0
武汉	0.457	0.078	0.033	0.89	2.26	31.1
杭州	0.490	0.074	0.025	0.90	1.98	28.9
拉萨	0.400	0.096	0.133	0.73	2.56	13.9
南昌	0.453	0.099	0.021	0.90	2.18	30.5
贵阳	0.442	0.103	-0.017	0.88	2.16	35.5
福州	0.483	0.102	-0.010	0.93	1.97	30.1
昆明	0.405	0.136	-0.061	0.88	2.52	24.5
广州	0.399	0.122	-0.029	0.87	2.28	28.8
海口	0.448	0.072	0.060	0.87	2.52	30.3
均值				0.87	2.08	24.3

表 2 观测站各季节回归系数

Table 2 Regression coefficients of the seasonal models

站名	春季				夏季				秋季				冬季			
	a	b	c	R	a	b	c	R	a	b	c	R	a	b	c	R
哈尔滨	0.473	0.067	0.075	0.78	0.408	0.127	-0.049	0.84	0.487	0.043	0.113	0.83	0.423	0.071	0.107	0.74
西宁	0.458	0.093	0.041	0.83	0.494	0.087	0.032	0.85	0.454	0.081	0.066	0.83	0.348	0.112	0.066	0.78
南京	0.487	0.082	0.011	0.90	0.435	0.11	-0.011	0.88	0.431	0.086	0.031	0.89	0.499	0.058	0.059	0.91
广州	0.431	0.12	-0.044	0.86	0.348	0.157	-0.086	0.81	0.376	0.123	-0.004	0.85	0.427	0.095	0.02	0.90

### 3 应用检验

为了进一步验证模型的估测效果, 这里对各站全年模型进行应用效果检验。

将各站点 1996—2000 年的日照时数, 日最高气

温, 日最低气温的实测资料值换算成日照百分率、温度日较差后, 与水平面上天文辐射日总量一起进入式 (4), 进行计算, 得出各地到达地面的太阳日总辐射量的估测值。

分别比较各测站上述 5 a 太阳日总辐射的实测

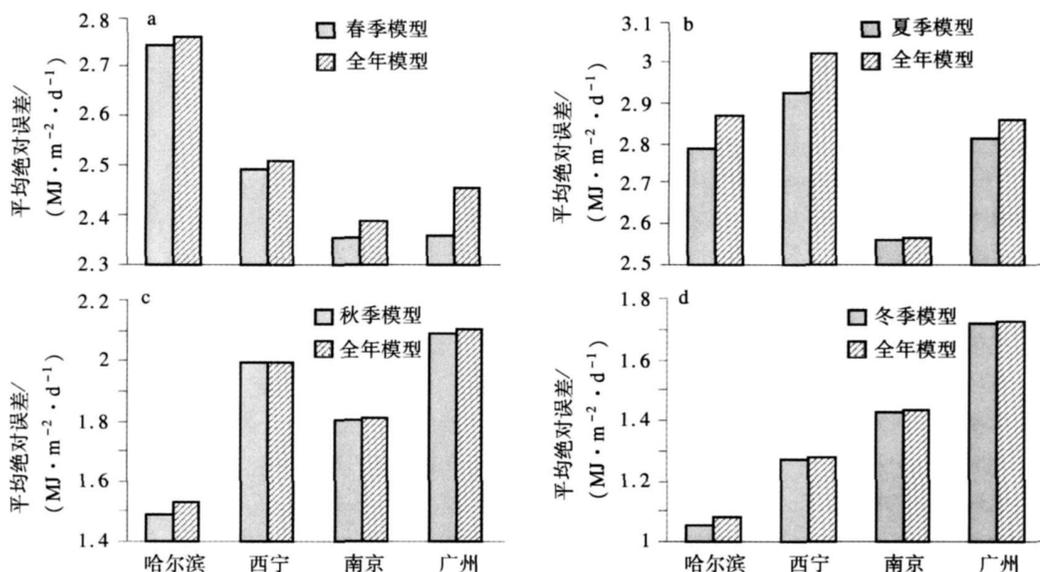


图 1 四季模拟值与实测值的平均绝对误差 a 春季; b 夏季; c 秋季; d 冬季

Fig 1 Mean absolute errors between the simulated value and actual value of daily solar radiation in four seasons a spring b summer c autumn d winter

值与估测值, 计算并观察它们之间的平均偏差  $E_{\text{MBE}}$  和均方根偏差  $E_{\text{RMSE}}$  (表 3),

$$E_{\text{MBE}} = \frac{\sum (Q_{\text{估测}} - Q_{\text{实测}})}{\text{样本数}},$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum (Q_{\text{估测}} - Q_{\text{实测}})^2}{\text{样本数}}}。$$

由 23 个站点太阳日总辐射实测值与估测值的误差分析结果看出: 哈尔滨、沈阳、西安、合肥、拉萨、贵阳、福州、昆明、海口 9 个站点的  $E_{\text{MBE}}$  值小于 0, 总体表明其估测值小于实测值; 其余 14 个站点的估测值大于实测值。就全国地域分布来看, 北方站点的估测值普遍大于实测值, 而南方站点则正好相反。

哈尔滨、北京、银川、西宁、郑州、南京、拉萨的  $E_{\text{RMSE}}$  值均在  $2.000 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  之内, 说明这 7 个站点的预测效果相对其他站较好。其中, 拉萨站的值最小, 为  $1.741 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 效果最好; 福州站的值最大, 为  $3.030 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 效果不够理想。

造成以上误差的原因除了拟合模型本身外, 测定误差和仪器的差异也可能对这些偏差产生一定的影响。

#### 4 小结

在对日照时数, 日最高气温, 日最低气温等实测资料的分析研究的基础上, 发现降水量与饱和差对

表 3 应用检验结果统计

Table 3 Statistics of the results of the application examination

站名	$E_{\text{MBE}} /$	$E_{\text{RMSE}} /$
	$(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	$(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$
哈尔滨	-0.211	1.931
乌鲁木齐	0.050	2.532
沈阳	-0.078	2.130
北京	0.756	1.976
天津	1.192	2.921
银川	0.595	1.927
太原	0.882	2.234
西宁	0.652	1.878
兰州	1.085	2.207
郑州	0.127	1.985
西安	-0.366	2.775
南京	0.337	1.861
合肥	-0.316	2.134
成都	0.958	2.263
武汉	0.229	2.248
杭州	0.124	2.099
拉萨	-0.274	1.741
南昌	0.136	2.243
贵阳	-1.195	2.915
福州	-0.912	3.030
昆明	-1.056	2.459
广州	0.049	2.002
海口	-1.194	2.709
均值		2.269

辐射量变化影响很小, 进而确定了以日照百分率为主导因子, 气温日较差为订正项的太阳日总辐射量

的估算方法, 并得出以下结论:

(1) 我国地理纬度跨度大, 有平原、台地、丘陵、山地等多种复杂地形, 不同地区之间太阳辐射差异明显, 所以各地模型的经验系数及回归效果各不相同。除了高原站拉萨之外, 各模型的复相关系数值均介于 0.80~0.93 之间, 23 个观测站平均绝对误差和平均相对误差的均值分别为  $2.08 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  和 24.3%, 拟合效果较好。

(2) 对哈尔滨、西宁、南京、广州 4 个代表站进行了季节模型的讨论, 误差分析结果表明在春、夏两季使用独立的季节模型计算太阳日总辐射有一定的必要性。

(3) 除了本文讨论的相关因子之外, 诸如大气混浊度等因素对太阳辐射在一定程度上也有影响。但由于这类资料的缺乏, 给研究带来了困难。在今后的工作中, 有待进一步探索, 改进计算太阳日总辐射量的方法, 以便更好地为研究全球气候变化, 评估农业生产潜力等提供依据。

## 参考文献:

- [1] Penman H L. Natural evaporation from open water bare soil and grass [J]. Proc Roy Soc London, 1948, 193: 120-145.
- [2] Black J N, Bonihon C W, Prescott J A. Solar radiation and the duration of sunshine [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1954, 80: 231-235.
- [3] Suckling P W. Estimating daily solar radiation values in selected mid-latitude regions by extrapolating measurements from nearby stations [J]. Solar Energy, 1985, 35: 491.
- [4] Bristow K L, Campbell G S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature [J]. Agric For Meteorol, 1984, 31: 159-166.
- [5] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征 [J]. 气象学报, 1963, 33(1): 78-96.
- [6] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法 [J]. 气象学报, 1964, 34(3): 304-315.
- [7] 王炳忠. 我国的太阳能资源及其计算 [J]. 太阳能学报, 1980, 1(1): 1-9.
- [8] 朱志辉. 太阳辐射时空分布的多因子计算 [J]. 地理学报, 1982, 37(1): 27-34.
- [9] 童成立, 张文菊, 汤阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算 [J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165-169.
- [10] Thomson P E, Hasenauer H, White M. Simultaneous estimation of daily radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Australia [J]. Agric For Meteorol, 2000, 104: 255-271.
- [11] Lin D L, Scott J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations [J]. Agric For Meteorol, 2001, 106: 41-59.
- [12] 缪启龙, 周锁栓, 吴息, 等. 西部山区总辐射气候学计算及分布 [J]. 南京气象学院学报, 1994, 17(2): 177-182.
- [13] 翁笃鸣, 高歌. 晴天太阳总辐射的一种参数化形式 [J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(3): 317-323.
- [14] 欧阳玫君, 陈寅生, 杜京朝, 等. 太阳辐射与我国降水的相关分析 [J]. 气象科学, 1998, 18(1): 35-41.
- [15] 鞠晓慧, 屠其璞, 李庆祥. 我国太阳总辐射月总量资料的均一性检验及订正 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 336-341.
- [16] 翁笃鸣, 李炬, 高歌, 等. 晴天太阳总辐射的参数化及气候计算 [J]. 气象科学, 1997, 17(1): 1-9.
- [17] 喻迎春, 王元. 江西地区低云—辐射—气温变化特征的初步分析 [J]. 气象科学, 2006, 26(6): 612-619.