

太阳总辐射计算方法对比分析

康雯瑛¹, 焦建丽², 王 君³

(1. 河南省气象学会, 郑州 450003; 2. 河南省气候中心, 郑州 450003; 3. 河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

摘 要: 利用全国 27 个气象站 1971—2000 年太阳辐射观测资料, 按照经验公式法、多因子综合法和 Prescoff 公式法等三种计算方法对太阳总辐射进行了计算, 并与实际太阳总辐射观测资料进行了对比分析。结果表明: 经验公式法计算误差较小, 但系数不易计算; 多因子综合法易于计算, 但误差相对较大; Prescoff 公式法计算结果误差很大, 不适用于太阳总辐射的计算。

关键词: 太阳总辐射; 计算方法; 对比分析

中图分类号: P422.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-7148(2008)03-0033-05

引 言

太阳能资源是一种清洁的可再生能源, 太阳能发电是目前新能源开发领域中技术最成熟、且最具规模开发条件和商业化发展前景的发电方式之一。发展太阳能资源对于调整能源结构、减轻环境污染有着非常重要的意义。近年来世界各国纷纷加大对太阳能技术的研究, 太阳能应用展现了较好的发展前景。

我国直接测量太阳辐射的站点较少, 对于无太阳辐射实测资料的地区, 需要间接计算获取。有关太阳总辐射的计算方法研究多集中在 20 世纪 70—80 年代, 比较常见的计算方法有经验公式法^[1-2]、多因子综合法^[3]和 Prescoff 公式法^[4]等。近年来不少研究人员也做了很多太阳辐射变化与成因方面的分析^[5-10], 这些研究大都使用某一种方法进行研究, 对于多种计算方法具体在某一地方的实际应用效果则没有分析过。

为了得到适合各地进行太阳辐射计算的方法, 本文利用观测时间较长、资料较完整的全国 27 个气象台站月太阳总辐射量资料, 对用不同的太阳辐射计算方法计算结果进行了统计分析比较。根据统计分析结果, 选出一个误差相对较小、易于计算的方法, 作为其他无太阳辐射观测台站进行太阳总辐射计算的方法。

1 资料来源

所用气象站太阳总辐射资料取自国家气象信息中心气象资料室。资料起止年代为 1971—2000 年, 所用资料为逐月的太阳总辐射量、日照时数、日照百分率、水汽压等资料。其中有些台站缺少个别月份太阳总辐射资料, 实际计算时需剔除该月份资料。

1.1 太阳总辐射

太阳总辐射量是指水平面上单位时间、单位面积上接收到的太阳辐射。一般以 J/m^2 或 MJ/m^2 表示。计算太阳总辐射多采用以下几种方法。

1.1.1 经验公式法

经验公式为

$$Q = Q_A(a + bS) \quad (1)$$

式中, Q 为月太阳总辐射量; Q_A 为晴天状况下月总辐射量, 或理想大气月总辐射量, 或天文辐射月总量; S 为月日照百分率; a 、 b 为因地区或季节而异的经验系数, 可利用各站实测的辐射资料和气象资料, 用最小二乘法取得。

1.1.2 朱志辉的多因子综合法

总辐射的月值公式为

$$Q = Q_A(0.160 + 0.612X_1 + 0.0384X_1X_2 - 0.00313X_1X_3 - 0.000469X_2X_3) \quad (2)$$

总辐射的年值公式为

$$Q = Q_A(0.191 + 0.579X_1 + 0.0477X_1X_2 -$$

$$0.00518X_1X_3 - 0.00198X_2X_3) \quad (3)$$

(2)式和(3)式中, X_1 为月(年)的日照百分率(以两位小数表示); X_2 为海拔高度(km); X_3 为月(年)平均水汽压(hPa); Q_A 为月(年)的天文辐射量。

1.1.3 Prescoff 公式法

计算公式为

$$Q = Q_A [a + bn/N] \quad (4)$$

式中, Q 为总辐射, Q_A 为天文太阳辐射, n 为日照计测得的日照时数, N 为天文昼长(可照时数), a 、 b 为待定系数。天文太阳辐射 Q_A 和天文昼长 N 可从某地的地理坐标加以估算获得, 同时可计算该地的日照百分率 n/N (各气象站有该资料)。待定系数 a 、 b 采用荷兰学者 M. R. Rietveld 的方法加以确定:

$$a = 0.10 + 0.24n/N \quad (5)$$

$$b = 0.38 + 0.08(n/N)^{-1} \quad (6)$$

利用(4)~(6)式, 可以计算各月的太阳总辐射。

1.2 天文辐射

月、年天文辐射量是由日天文辐射总量公式计算每日的天文辐射总量, 然后采用逐日求和的精确累计法得到。日天文辐射总量的计算公式为

$$Q_A = \frac{TI_0}{\pi\rho^2} (\omega_0 \sin\Phi \sin\delta + \cos\Phi \cos\delta \cos\omega_0) \quad (7)$$

式中, Q_A 为天文辐射日总量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T 为周期 ($24 \times 60 \times 60 \text{ s}$), I_0 为太阳常数 ($13.67 \times 10^{-4} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ρ 为日地相对距离, ω_0 为日落时角(rad), Φ 为地理纬度, δ 为太阳赤纬(rad)。

日地相对距离 ρ 计算公式为

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.033 \cos(2\pi J/365)}} \quad (8)$$

式中, J 为年内的天数, 1月1日时 J 取 0, 12月31日时 J 取 364。

太阳赤纬 δ 计算公式为

$$\delta = 0.409 \sin(0.0172J - 1.39) \quad (9)$$

日落时角 ω_0 计算公式为

$$\omega_0 = \arccos(-\tan\Phi \tan\delta) \quad (10)$$

1.3 经验系数 a 、 b

在用经验公式计算太阳总辐射时, 需要计算两个参数 a 、 b 。其计算公式为

$$\begin{cases} a = \bar{y} - b \bar{S}'_1 \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n (S'_{1i} - \bar{S}'_1)(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (S'_{1i} - \bar{S}'_1)^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中, S'_{1i} 为参考站点的逐年月日照百分率, $\bar{S}'_1$ 为参考站点月日照百分率的平均值, $y_i (= Q'_i/Q'_0)$ 为参考站点逐年月辐射总量与月天文辐射总量的比值, $\bar{y}$ 为参考站点逐年月辐射总量与月天文辐射总量的比值的平均值, n 为选取观测资料的年数。

2 结果分析

2.1 经验公式法结果

根据历年各月的总辐射和日照百分率进行拟合, 首先计算出各月的经验系数 a 、 b 。为检验方程的意义, 分别计算出各月回归方程的相关系数和平均相对误差。

经验系数 a 变化范围在 0.1~0.3 左右, 系数 b 在 0.3~0.7 左右(表略); 大部分月份相关系数通过 0.01 的显著性检验, 而且大部分值在 0.60 以上(表略); 平均相对误差均在 4% 以下, 大部分在 1% 左右(见表 1)。

经验公式法计算太阳辐射比较精确, 但各站之间的 a 、 b 系数在各月还存在一定的差距。因此, 使用经验公式法计算时, 应考虑 a 、 b 系数的地域差异。使用经验公式法计算没有辐射观测台站的太阳辐射时, 通常先使用有辐射观测台站的 a 、 b 系数来拟合没有辐射观测台站的 a 、 b 系数, 然后再根据气象和天文资料计算太阳辐射。为提高没有辐射观测台站的 a 、 b 系数拟合精度, 应尽可能选择较多有辐射观测台站的 a 、 b 系数来拟合^[11-17]。

为了进一步体现 a 、 b 系数的地域差异, 选郑州、固始两个站把 a 、 b 系数互换(即计算固始站太阳辐射使用郑州的 a 、 b 系数, 计算郑州站太阳辐射使用固始的 a 、 b 系数)进行计算, 两站平均相对误差见表 2。从表 2 可以看出, 两站的平均相对误差除个别月份稍有减少外, 大部分月份都有不同程度的增加, 冬半年特别明显。这表明 a 、 b 系数存在地域差异, 不易使用统一的 a 、 b 系数来计算太阳总辐射, 各站的 a 、 b 系数需通过一定的方法来拟合。

2.2 多因子综合法结果

根据公式(2)、(3)计算太阳总辐射值, 并计算逐月平均相对误差(表 3)。从表 3 可见, 除武汉、济南平均相对误差 > 10% 的月份稍多外, 其他大部分站月平均相对误差在 10% 以内。

比较多因子综合法和经验公式法可以发现, 多因子综合法平均相对误差较经验公式法相对较大, 但该方法计算时不使用太阳辐射资料, 不需要计算 a 、 b 系数, 工作量较小, 并且使用多因子综合法可以大致了解某地太阳辐射量分布。

表 1 经验公式法逐月平均相对误差

%

月份/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
哈尔滨	0.93	0.95	1.17	1.46	1.28	1.27	1.02	0.84	0.68	1.09	1.48	1.48
乌鲁木齐	1.30	1.21	0.63	0.21	0.26	0.19	0.33	0.27	0.37	0.43	0.67	1.11
西宁	0.72	0.69	0.65	0.51	0.73	0.60	1.23	0.81	0.75	3.64	1.21	0.99
兰州	0.75	0.70	0.54	0.61	0.91	0.77	0.58	0.49	0.51	0.68	0.69	0.53
二连浩特	0.23	0.31	0.29	0.20	0.17	0.21	0.39	0.30	0.15	0.15	0.19	0.43
银川	0.16	0.12	0.25	0.26	0.31	0.16	0.15	0.23	0.33	0.16	0.15	0.14
太原	0.37	0.38	0.37	0.20	0.18	0.30	0.26	0.33	0.28	0.31	0.51	0.48
长春	0.72	0.53	0.47	0.51	0.46	0.51	0.49	0.58	0.43	0.51	0.67	0.98
沈阳	0.84	0.49	0.34	0.46	0.41	0.66	0.81	0.68	0.57	0.41	0.73	0.93
北京	0.50	0.44	0.41	0.30	0.23	0.30	0.39	0.23	0.31	0.38	0.59	0.58
天津	0.75	0.67	0.96	0.65	0.96	1.13	0.86	1.16	1.19	0.73	1.05	0.93
济南	0.88	0.86	0.53	0.55	0.58	0.68	0.90	0.85	1.08	0.59	0.53	1.36
拉萨	1.09	1.22	1.16	1.31	1.24	1.38	1.06	1.07	0.91	0.90	1.14	1.22
成都	1.04	1.76	0.82	0.89	0.86	0.76	0.74	0.69	0.80	0.72	1.16	1.78
昆明	0.82	0.86	0.62	0.77	1.47	1.05	0.86	1.33	1.47	1.00	1.44	0.89
西安	1.09	1.33	1.17	1.03	0.95	1.02	0.83	1.51	1.47	1.11	1.34	1.52
郑州	0.71	0.57	0.62	0.34	0.23	0.34	0.34	0.30	0.22	0.16	0.60	0.54
武汉	1.64	2.14	1.91	1.85	2.63	1.44	1.64	1.12	1.53	1.39	1.64	1.41
贵阳	1.17	1.70	1.01	0.91	1.16	0.96	1.65	1.91	1.24	2.11	2.07	1.01
南京	0.67	0.80	0.93	0.59	0.50	0.48	0.78	0.51	0.76	0.83	0.87	0.71
合肥	1.34	2.98	1.33	1.00	1.59	1.30	1.19	0.85	1.01	1.96	1.06	1.32
杭州	1.12	1.51	1.46	0.74	0.78	0.95	1.06	1.10	0.94	0.74	1.04	0.92
南昌	1.11	1.36	0.90	1.12	0.72	0.75	0.32	0.37	0.46	0.51	0.58	0.32
福州	4.31	0.65	1.43	0.98	1.47	1.10	1.02	2.26	2.31	0.93	0.87	3.62
广州	0.88	2.04	1.20	1.88	1.27	0.70	0.59	0.80	0.55	0.55	0.73	1.40
南宁	1.03	2.69	1.85	1.13	0.66	0.95	0.59	1.23	0.82	0.70	0.80	0.70
海口	2.40	2.08	1.75	1.08	0.84	0.91	0.71	0.79	0.92	1.44	0.99	1.71

表 2 经验公式法互换系数后平均相对误差

%

月份/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
郑州	-9.77	-10.44	-5.81	-5.59	-3.52	-0.55	-0.26	-2.46	0.57	-1.12	-5.59	-9.70
固始	13.16	15.11	11.30	3.42	3.62	0.38	0.58	2.49	1.99	3.23	7.81	12.86

2.3 Prescoff 公式法

根据(4)~(6)计算各站太阳辐射,并计算逐月平均相对误差(表4)。

从表4可见,大部分台站月平均相对误差都较大,其中部分站平均相对误差>20%,可见该方法适用性较差。

3 结 语

①计算太阳辐射的统计公式很多,常用的有经验公式法、多因子综合法和 Prescoff 公式法,3 种方

法各有利弊。经验公式法计算误差较小,但系数不易计算;多因子综合法易于计算,可以用于了解太阳总辐射大致分布,但误差相对较大;Prescoff 公式法在某些地区计算结果误差很大,适用性较差。

②使用经验公式法计算时应注意 a 、 b 系数的地域差异,应尽可能多地选择有辐射观测台站 a 、 b 系数来拟合无辐射观测台站 a 、 b 系数。

③多因子综合法对了解当地太阳辐射整体分布状况是可以使用的,但对于精细化程度较高的太阳辐射评估,经验公式法相对较好。

表 3 多因子综合法计算的平均相对误差

%

月份/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
哈尔滨	-4.51	-1.62	-4.49	-0.51	3.54	1.63	1.13	3.87	1.71	2.16	1.33	0.20
乌鲁木齐	-1.63	4.35	3.91	4.29	1.79	-0.70	1.17	2.68	4.56	8.01	4.92	-1.53
西宁	11.01	8.01	5.34	6.21	6.35	3.31	2.63	2.36	4.67	11.55	10.10	11.09
兰州	13.94	11.93	6.05	4.91	2.88	-0.28	0.17	2.30	3.85	8.73	13.70	16.34
二连浩特	-7.36	-8.68	-7.22	-6.24	-4.28	-2.19	-2.02	-1.13	-2.64	-4.68	-6.18	-5.54
银川	-1.37	-2.03	-2.12	-1.18	-1.66	-3.05	-4.27	-2.20	0.16	-0.68	0.47	1.90
太原	1.59	1.55	0.97	1.50	2.45	2.01	-0.93	0.37	3.10	5.06	5.36	4.47
长春	-1.24	-3.03	-1.83	-0.16	0.55	-1.46	-2.71	1.28	-0.38	-0.75	-0.64	-0.51
沈阳	2.80	-1.37	-1.08	2.13	2.06	2.63	-1.16	0.72	1.48	3.51	3.49	3.36
北京	2.44	-0.59	-0.22	1.22	1.21	0.19	-3.28	-1.44	0.87	2.40	5.07	4.99
天津	7.32	3.13	-2.15	-2.72	-1.83	0.02	0.32	3.94	2.90	4.61	8.10	10.13
济南	16.31	13.33	10.70	9.95	7.66	5.94	6.82	7.85	9.78	10.26	12.77	20.56
拉萨	6.01	4.79	5.87	7.68	3.87	-2.50	-7.47	-5.97	-0.29	7.80	7.78	7.84
成都	11.44	7.82	4.01	-0.49	-3.86	-6.47	-5.54	0.04	-1.61	0.13	7.96	15.45
昆明	9.50	8.12	9.77	10.38	8.98	-2.34	-3.42	-3.37	-3.11	4.08	7.87	7.13
西安	-3.15	-3.64	-1.19	-4.57	-6.54	-3.22	-6.43	-5.01	-1.61	-4.19	-3.16	-4.35
郑州	-2.05	-3.80	-1.67	-0.33	-1.72	-2.19	-5.77	-4.48	0.08	2.73	2.21	1.62
武汉	16.90	17.77	18.98	15.75	14.39	5.30	5.04	5.22	6.76	12.51	13.55	17.41
贵阳	16.37	11.29	5.26	5.72	4.46	1.77	1.92	3.59	4.41	9.97	7.96	12.74
南京	9.63	9.03	9.11	6.11	2.28	4.05	0.81	1.50	3.50	6.34	7.60	10.36
合肥	15.46	17.41	12.84	8.40	5.98	3.14	0.95	0.88	4.39	9.66	13.21	14.24
杭州	16.24	17.16	19.88	8.18	4.35	3.52	-0.71	-0.31	5.35	5.74	9.29	13.25
南昌	15.92	16.50	18.95	11.41	4.86	1.11	-1.98	-0.82	0.47	1.53	5.67	9.85
福州	13.14	9.42	10.58	1.44	-1.49	-6.20	-5.54	-4.95	-2.59	-2.00	-0.80	7.50
广州	4.54	13.13	20.19	12.21	4.39	6.29	9.45	6.44	2.66	1.35	1.33	3.17
南宁	5.20	11.22	7.26	-1.92	-7.78	-7.79	-5.39	-7.59	-8.57	-7.55	-4.05	-2.52
海口	11.39	16.03	9.79	4.52	0.98	1.30	0.22	2.30	3.87	6.14	5.51	8.91

表 4 Prescoff 公式法计算的平均相对误差

%

月份/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
哈尔滨	0.03	2.94	0.30	5.50	11.11	12.01	14.14	16.38	10.51	8.62	6.59	5.23
乌鲁木齐	1.78	5.46	6.30	7.12	5.18	4.47	7.24	8.02	8.56	10.79	9.01	4.74
西宁	5.77	3.23	1.85	3.41	5.18	4.23	4.71	3.88	5.45	9.57	5.75	6.21
兰州	13.90	11.47	6.77	6.11	5.48	4.21	6.11	8.14	8.66	11.41	14.26	16.57
二连浩特	-7.26	-8.48	-6.77	-5.33	-2.46	1.42	3.68	4.26	0.20	-3.35	-5.52	-5.20
银川	-1.12	-1.51	-0.81	0.72	1.81	2.72	3.43	5.48	5.32	2.02	1.69	2.39
太原	3.92	4.08	4.30	5.65	8.15	10.31	10.05	10.97	10.76	10.12	8.97	7.26
长春	2.65	0.92	2.64	5.47	7.69	8.48	9.96	13.61	8.12	5.28	4.23	3.83
沈阳	8.28	3.87	4.72	9.25	10.85	14.46	12.85	14.48	11.70	11.32	10.04	9.29
北京	7.73	4.77	5.84	8.58	10.54	11.99	10.84	12.63	11.75	10.64	11.79	10.78
天津	13.47	9.26	4.39	4.92	7.64	12.34	15.60	19.36	14.59	13.68	15.68	16.85
济南	21.33	18.30	16.11	17.02	16.63	17.09	21.04	22.28	20.27	18.66	19.32	25.98
拉萨	-5.02	-5.62	-3.85	-1.21	-3.62	-7.42	-10.03	-8.55	-5.13	-1.45	-3.19	-3.46
成都	21.92	18.20	13.94	9.74	7.55	6.53	8.96	15.01	11.62	12.29	19.24	26.68
昆明	9.03	7.69	9.91	12.08	14.31	7.09	7.12	5.71	5.22	10.34	10.80	7.62
西安	3.06	2.60	6.12	3.57	2.85	7.68	6.31	7.78	9.69	4.85	4.32	2.20
郑州	4.05	2.53	5.56	8.24	8.39	9.82	8.87	9.96	11.87	12.04	9.69	8.06
武汉	26.44	27.79	30.17	28.34	28.92	21.09	23.21	23.20	21.29	24.89	23.80	26.73
贵阳	27.30	21.20	13.95	15.82	15.77	14.93	14.28	14.88	15.54	20.45	18.18	22.15
南京	17.95	17.61	18.61	16.67	14.32	18.73	17.84	18.44	17.42	17.77	17.07	18.68
合肥	24.37	26.84	22.84	19.34	18.64	17.86	17.88	17.47	18.27	21.34	23.01	22.83
杭州	25.75	27.16	31.09	19.43	16.96	18.30	15.88	16.14	19.92	17.63	19.43	22.29
南昌	26.06	27.19	31.01	24.14	18.74	16.71	15.17	16.30	14.71	12.99	15.49	18.62
福州	23.86	20.38	22.28	13.24	11.56	8.20	10.46	10.72	11.68	9.96	9.67	17.52
广州	14.74	25.46	34.73	27.13	20.04	23.94	28.64	24.71	18.90	14.77	12.16	12.82
南宁	16.28	23.77	20.18	11.18	6.15	7.53	10.89	8.14	5.64	4.61	6.50	7.13
海口	24.63	30.50	24.61	20.63	18.31	19.49	18.31	20.61	21.68	22.56	19.54	21.98

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王炳忠,张富国,李立贤. 我国的太阳能资源及其计算[J]. 太阳能学报,1980,1(1):1-9.
- [3] 朱志辉. 我国太阳能分布的非线性回归模式[J]. 地理研究,1984,3(3):76-83.
- [4] 李凤翼,杨永岐. 辽宁光能资源及其生产潜力(I)-辽宁各地太阳总辐射量[J]. 辽宁农业科学,1980,3(3):44-46.
- [5] 刘绍民,李银芳. 新疆月太阳总辐射气候学计算方法的研究[J]. 干旱区地理,1997,20(3):75-81.
- [6] 张雪芬,陈东,付建祥,等. 河南省近40年太阳辐射变化规律及其成因探讨[J]. 气象,1999,25(3):21-25.
- [7] 刘新安,范辽生,王艳华,等. 辽宁省太阳辐射的计算方法及其分布特征[J]. 资源科学,2002,24(1):82-87.
- [8] 杜尧东,毛慧琴,刘爱君,等. 广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征[J]. 资源科学,2003,25(6):66-67.
- [9] 杨美敏,曾燕,邱新法,等. 1960—2000年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究[J]. 应用气象学报,2005,16(2):243-248.
- [10] 王建源,冯建设,袁爱民. 山东省太阳辐射的计算及其分布[J]. 气象科技,2006,34(1):98-101.
- [11] 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.
- [12] 陆渝,高国栋. 我国辐射平衡各分量的计算方法及时空分布的研究[J]. 南京大学学报:自然科学版,1976,2(2):89-110.
- [13] 李克煌. 河南太阳总辐射的计算方法和分布特征[J]. 河南大学学报:自然科学版,1980(1):52-66.
- [14] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(一)[J]. 南京气象学院学报,1982,5(1):15-24.
- [15] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二)[J]. 南京气象学院学报,1982,5(2):196-206.
- [16] 孙治安,施俊荣,翁笃鸣. 中国太阳总辐射气候计算方法的进一步研究[J]. 南京气象学院学报,1992,15(2):21-29.
- [17] 鞠晓慧,屠其璞,李庆祥. 我国太阳总辐射气候学计算方法的再讨论[J]. 南京气象学院学报,2005,28(4):517-521.

Comparative Analysis of Global Solar Radiation Calculation Method

Kang Wenying¹, Jiao Jianli², Wang Jun³

(1. Henan Provincial Meteorological Society, Zhengzhou 450003, China;

2. Henan Provincial Climate Center, Zhengzhou 450003, China;

3. Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Using the solar radiation observation data of the national 27 weather station from 1971 to 2000, according to empirical formula, multi-factor synthesis and Prescott formula, the quantity of general global solar radiation is computed and then the contrastive analysis with the actual global solar radiation observation material is carried on. Result shows that the empirical formula counting error is small, but the coefficient is not easy to calculate; the multi-factor synthesis is easy to calculate, but the error is relatively big; Prescott formula computed result error is very big, so it is not suitable for global solar radiation computation.

Key words: general global solar radiation; calculational methods; contrastive analysis