第 28卷第 4期　　南 京 气 象 学 院 学 报　　Vol 28 No 4
2005年 8月　　Journal of Nanjing Institute of Meteorology　　Aug 2005

文章编号: 1000-2022(2005) 04-0516-06

我国太阳总辐射气候学计算方法的再讨论

鞠晓慧[1,2]，　屠其璞[1]，　李庆祥[2]
(1. 南京信息工程大学 资源环境与城乡规划系, 江苏 南京　210044; 2 国家气象信息中心, 北京　100081)

摘　要: 根据我国建站时间在 30 a以上的辐射资料以及对应的地面站日照资料, 在分析太阳总辐射统计特征的基础上, 讨论了总辐射气候学计算公式中 a、b系数的地理分布和季节变化特征, 分析了辐射气候学计算的可能误差, 得到了用日照资料估算总辐射的误差范围。结果表明, 太阳总辐射月总量接近正态分布特征; 总辐射气候学计算公式中的 a、b系数具有较明显的时空变化特征, 需按不同月份确立; 通过逐年观测资料计算各基本站 a、b系数, 再由内插求得无辐射资料测站的 a、b系数, 进而计算无辐射资料站的辐射总量, 其误差在可接受的范围内。

关键词: 太阳总辐射; 日照; a、b系数; 误差
中图分类号: P467　　文献标识码: A

太阳总辐射是大气中一切物理过程或现象形成的基本动力, 是影响气候变化的一个重要因子, 对各地天气和气候的形成具有决定性意义。研究太阳总辐射的基本气候特征及其分布规律有着十分重要的理论和现实意义。由于观测太阳辐射的站点相对较少, 因此研究间接的辐射气候学计算方法十分必要。

对太阳总辐射气候学计算问题的研究有一个公认的计算公式[1]

$$Q = Q_0(a + bs_1)。 \qquad (1)$$

式中, Q为总辐射, Q_0为起始数据, s_1为同期日照百分率, a、b为经验系数。在我国, 左大康等[2]以可能太阳总辐射为起始数据, 得到了全国统一的 a、b系数, 并绘制了中国年、月总辐射分布图。翁笃鸣[3]以天文辐射 S_0为起始数据, 对全国(除青藏高原外)分 4区得到经验公式。随后, 祝昌汉[4-5]进一步论证了(1)式的合理性, 并对 a、b系数的物理意义及时空变化进行了初步讨论。但由于受当时资料所限, 对 a、b系数在面上的展开及时空变化特征论述不可能十分细致。再后来的研究者主要研究了经验系数的参数化问题[6]; 史兵等[7]研究了总辐射资料的稳定性和短序列订正问题。本文采用全国建站时间在 30 a以上的辐射站月总量资料, 分析了总辐射和日照的相关性, 按月计算了各站 a、b系数, 并分析了它们的时空变化特征, 最后从回归误差和内插误差两个方面较系统地讨论了总辐射气候计算方法的误差问题。

收稿日期: 2003-09-16; 改回日期: 2004-02-18
基金项目: 科技部基础性工作专项基金项目 (2001DEA30029-01-03); 江苏省高校省级重点实验室开放课题 (KJS02104)
作者简介: 鞠晓慧 (1973-), 女, 山东临沂人, 硕士. E-mail: juxh@cma.gov.cn.

1　太阳总辐射的统计特征

1 1　月总量的概率分布特征

综观太阳总辐射月总量的频数分布, 它们大都具有正态分布的基本特征。选取观测年数在 30 a以上的辐射站, 以 1、4、7、10为代表月, 用 Lilliefors方法[8]做正态分布检验。检验的结果是: 以 α= 0.01为显著性水平, 91.6%的站通过检验; 以 α= 0.05为显著性水平, 全部通过正态检验。由此可以得出结论: 太阳总辐射月总量服从或接近服从正态分布。

1 2　太阳总辐射与日照百分率的相关性

公式 (1)的建立是基于太阳总辐射与日照百分率有很好的线性相关性。一些研究[9-10]表明, 这二者确实相关性很好。用全国观测年数在 30 a以上的辐射站, 统计了 1、4、7、10月的相关系数, 并进行了线性相关系数的显著性检验。结果表明: 88.4%的相关达到了 0.01显著性水平; 94.2%的相关达到了 0.05显著性水平。因此, 用日照资料进行太阳辐射的气候学计算是可行的。

2　*a*、*b* 系数的空间分布及季节变化

将 (1)式变形为

$$Q/S_0 = a + bs \tag{2}$$

按 (2)式建立一元回归方程, 由于此式依赖于辐射和日照的相关性, 以 α= 0.05为显著性水平对相关系数进行相关性检验。然后取 1、4、7、10月为代表月份, 对观测年数在 30 a以上的, 且通过相关显著性检验的站借助回归分析计算各站的 *a*、*b* 系数。

2 1　*a*、*b* 系数的空间分布

将全国辐射站代表月份的 *a*、*b* 系数, 绘制成图 1。图中实线表示系数 *a*, 虚线表示系数 *b*。

从总体看, 4个代表月份的 *a*、*b* 系数都有相近的分布特征, 说明 *a* 与 *b* 之间本身存在明显的负相关[11]。这些测站 1、4、7、10月 *a*、*b* 的相关系数分别为 - 0.89、- 0.82、- 0.75、- 0.87。此外, 1月和 7月 *a*、*b* 等值线较 4月和 10月密集。分区来看, 东部平原区等值线较稀疏, 而东北地区和西北地区则较密集; 青藏高原地区由于站点少, 且相关性不好, 等值线没有画出。从数值上看, 东部平原区系数 *a* 的值一般在 0.1~ 0.15之间; 系数 *b* 在 0.45~ 0.65之间。西南地区系数 *a* 的值一般在 0.15~ 0.25之间; 系数 *b* 在 0.5~ 0.6之间。东北地区系数 *a* 的值一般在 0.1~ 0.25之间; 系数 *b* 在 0.5~ 0.7之间, 变化范围较大。西北地区系数 *a* 的值一般在 0.15~ 0.3之间; 系数 *b* 在 0.4~ 0.7之间, 变化范围更大些。

上述结果表明, 在观测资料允许时, 尽可能考虑 *a*、*b* 系数空间分布的细节, 对提高总辐射气候学计算精度是很有益处的, 特别是 *a*、*b* 系数季节变化比较大的东北、西北地区, 改进可能会更明显一些。与文献[5]所得的 *a*、*b* 系数分布图相比, 图 1所示的高值区与低值区基本一致, 只是出现了更多的闭合中心, 这可能是本文采用的站点资料更密, 能够给出 *a*、*b* 系数地理差异更多的细节。

2 2　*a*、*b* 系数的季节变化

a、*b* 系数的季节差异从图 1中就可以看出。为了更加详细地了解各个地区 *a*、*b* 系数季节变化特征, 在 4个分区各取一个代表城市, 计算它们 12个月份的 *a*、*b* 系数, 绘制成图 2。

图 2显示, *a*、*b* 系数有明显季节变化的是拉萨、沈阳、乌鲁木齐, 而上海不怎么明显。结合日照与辐射的相关分析, 大致可以看出, 日照与辐射相关密切的测站, *a*、*b* 系数季节变化相对小一些, 而相关较差的地区, *a*、*b* 系数季节变化要大一些。

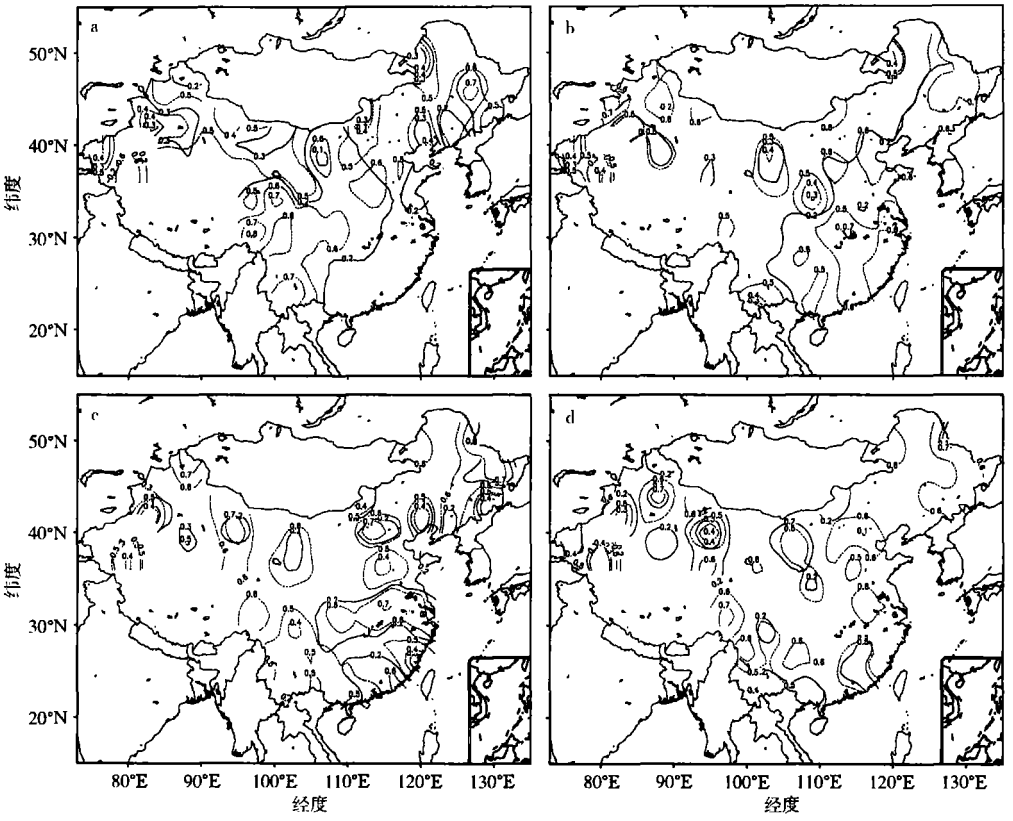

图 1 a、b系数全国分布 a 1月; b 4月; c 7月; d 10月

Fig 1 Distributions of a, b coefficients in China

a January, b April, c July, d October

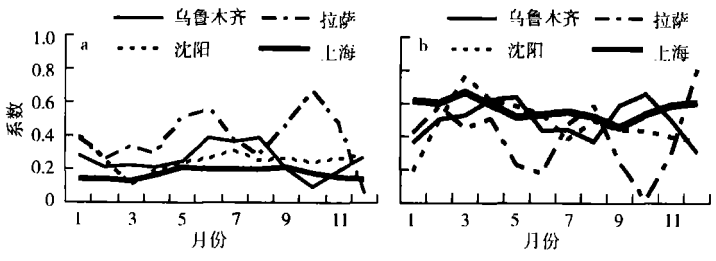

图 2 各地区代表站系数 a(a)、b(b)的季节变化

Fig 2 Seasonal variations of a(a), b(b) coefficients in each area

表 1给出 4个代表测站 a、b系数季节变化的均方差, 从表中可见, 除了东部平原区, 忽略 a、b系数的季节变化对用 (2)式的计算精度影响是十分明显的。

本文进一步计算了上海周围 3个站 12个月的 a、b系数 (图 3)。它们的变化相当一致。可见, a、b系数的季节变化特征并非是一种随机振动, 而是气候特征季节变化的一种表现。

通过上述分析可以看出, a、b系数不仅空间分布不均, 而且在很多地区有明显的季节变化特征。a、b系数的时空变化主要与相关系数的变化有关, 同时还受到晴空指数和日照时数年际变化均方差的影响。在根据日照资料进行太阳辐射气候学计算时, 不但要考虑 a、b系数的空间变化, a、b系数的季节变化也是十分值得重视的, 以期能尽可能提高计算精度。

表 1　各区代表站 *a*、*b* 系数季节变化的均方差

Table 1　The mean square deviation of the seasonal variations of *a*, *b* coefficients in each area

测站	s_a	(s_a/a) /%	s_b	(s_b/b) /%
乌鲁木齐	0.09	34.8	0.12	23.2
沈阳	0.07	27.1	0.14	30.1
拉萨	0.16	41.3	0.21	53.6
上海	0.04	18.1	0.05	10.1

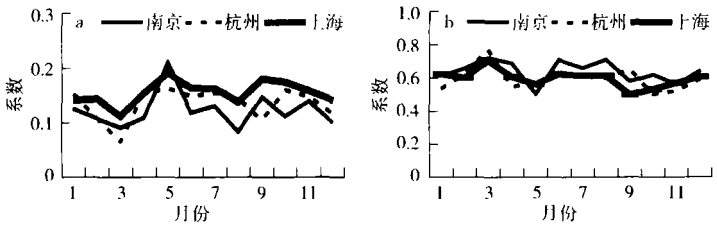

图 3　上海及周边地区的系数 a(a)、b(b)的季节变化

Fig. 3　Seasonal variations of a(a), b(b) coefficients in Shanghai and peripheral areas

3　用日照资料估算总辐射量的误差范围

上述的(1)式或(2)式通常可以用于: 1)辐射站辐射观测序列的插补、延长以及气候平均值的计算; 2)通过空间内插求得 *a*、*b* 系数重建辐射序列以及计算气候平均值。

可能引起这两种辐射气候学计算的误差因素有很多, 这里对由于观测值对(2)式的回归误差和 *a*、*b* 系数空间内插误差造成的总辐射计算误差做初步分析。

3.1　回归误差分析

设 $y = Q/S_0$, $x = s/h$, 则(2)可表达为

$$\hat{y} = a + bx。 \tag{3}$$

其气候学计算值相对于实测值的均方误差为

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=2}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}, \tag{4}$$

$$s = s_r/\bar{y}。 \tag{5}$$

式中, s_r 为剩余均方差, s 为相对均方误差。表 2给出了全国 9个测站按照(4)和(5)式计算的剩余均方差和相对均方误差。其中 $n = 30$, $\bar{y}$ 取 30 a平均。

从表中可见, 用(2)式计算各地月太阳总辐射量的相对误差除了黑河 1月、吐鲁番 1月和广州 4月稍微超过了 10% 以外, 其余的均小于 10%。根据统计学原理[11], 样本平均值的均方差与计算平均值的样本数的平方根成反比。如果取 30 a作为计算气候平均值的基本时期, 由此而得到的气候平均值的误差应为其 $1/\sqrt{30}$, 即大约 2%。

3.2　*a*、*b* 系数的内插误差

计算 *a*、*b* 系数内插误差的步骤:

(1)各分区取 4个测站, 中间 1个为中心站, 记为 s_0; 周围 3个为参照站, 分别记为 s_1, s_2, s_3; 对应的 *a*、*b* 系数分别记为 a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3; 参照站与中心站的距离分别为 d_1, d_2, d_3。

表 **2** 代表测站的剩余均方差和相对均方误差

Table 2 The residual mean square deviation and relative mean square error of representative stations

测站	1月		4月		7月		10月	
	剩余均方差	相对均方误差 /%	剩余均方差	相对均方误差 /%	剩余均方差	相对均方误差 /%	剩余均方差	相对均方误差 /%
黑河	1 824.2	11.3	3 887.6	7.8	4 450.1	7.7	2 737.2	9.8
朝阳	1 223.9	5.1	4 284.8	7.9	5 371.4	9.3	2 263.1	6.1
吐鲁番	2 112.7	10.2	3 135.0	5.6	3 976.2	5.6	1 673.6	4.3
和田	2 396.4	8.6	3 718.3	6.6	3 272.1	4.9	2 439.0	5.1
北京	2 037.8	7.9	3 403.9	6.2	3 692.1	6.9	2 673.6	7.2
郑州	2 337.6	9.1	3 460.7	6.9	3 371.3	6.3	1 814.6	5.1
成都	1 463.9	9.6	3 579.2	9.8	3 864.4	9.0	1 911.4	8.9
昆明	3 492.8	8.4	5 620.9	9.6	3 926.1	9.3	3 658.5	9.9
广州	2 423.4	8.8	3 266.5	12.5	3 569.9	7.7	3 103.4	7.6

(2)以距离的倒数为权重,内插中心站 s_0 的 a、b 系数,记为 $\hat{a}_0$、$\hat{b}_0$。则

$$\hat{a}_0 = \left(\frac{1}{\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}+\frac{1}{d_3}}\right)\left(\frac{a_1}{d_1}+\frac{a_2}{d_2}+\frac{a_3}{d_3}\right); \tag{6}$$

$$\hat{b}_0 = \left(\frac{1}{\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}+\frac{1}{d_3}}\right)\left(\frac{b_1}{d_1}+\frac{b_2}{d_2}+\frac{b_3}{d_3}\right)。 \tag{7}$$

(3)将(6)和(7)式计算得到的 $\hat{a}_0$、$\hat{b}_0$ 系数与 s_0 实测的 a_0、b_0 系数比较,$\Delta a = a_0 - \hat{a}_0$,$\Delta b = b_0 - \hat{b}_0$,就可以分析计算误差和相对误差。作为例子,这里给出各区 1个代表测站 a、b 系数的内插误差(表 3)。

分析表 3,做 a、b 系数相对误差的简单统计:小于 10% 的占 50%,小于 20% 占 72%。内插误差的地理分布与测站的疏密和 a、b 系数的水平梯度有关,因此表中的误差并不完全具有代表性,而是给出一个误差可能变动范围的概念。

从表 3的结果也可看出 a、b 系数的负相关,a、b 系数内插误差的相关系数为 -0.78,与前述 a、b 系数的相关大致相当。在按(2)式进行辐射气候学计算时,a、b 系数产生的误差互相抵消,使得由内插 a、b 值计算辐射总量的误差大为减小。表 3最后一列给出日照取多年平均值时各站由于内插 a、b 系数而产生的 Q/S_0 的误差。从表中看,这个误差绝大多数为 3% 左右。比前面得到的回归误差略小一些。

表 **3** 各个代表测站的内插误差

Table 3 Interpolation errors of representative stations

测站	1月			4月			7月			10月		
	$\frac{\Delta a}{a}$ /%	$\frac{\Delta b}{b}$ /%	$\frac{\Delta y}{y}$ /%	$\frac{\Delta a}{a}$ /%	$\frac{\Delta b}{b}$ /%	$\frac{\Delta y}{y}$ /%	$\frac{\Delta a}{a}$ /%	$\frac{\Delta b}{b}$ /%	$\frac{\Delta y}{y}$ /%	$\frac{\Delta a}{a}$ /%	$\frac{\Delta b}{b}$ /%	$\frac{\Delta y}{y}$ /%
哈尔滨	17.3	-22.8	-3.4	-50.8	9.3	-2.6	-5.3	-2.8	-3.7	29.7	-18.7	-2.8
吐鲁番	-10.1	7.3	-0.9	25.9	-23.9	0.9	-5.3	5.5	0.7	-6.1	0.002	-1.5
杭州	18.9	-20.9	-3.4	12.1	-15.8	-3.6	-1.9	-0.8	-1.2	21.7	-20.6	-2.6
重庆	3.3	-23.1	-2.3	5	-7.2	-0.3	8.6	-2.4	-2.8	-2.3	-16.6	-7.9

注:1)哈尔滨、吐鲁番、杭州、重庆站到参照站的平均距离分别为 347、307、155、260 km;2)$\Delta y = \Delta a + \Delta b$。

4 结　论

(1)太阳总辐射月总量接近正态分布,它与日照的相关大多数是统计显著的。

(2)太阳总辐射气候学计算公式中的 a、b系数不仅具有空间变化,在许多地区还具有明显的季节变化,分别不同月份确立 a、b系数对保证计算精度是十分重要的。

(3)如果用各站观测资料直接计算 a、b系数,用公式(2)计算各测站历年总辐射误差大致不超过 10%,计算气候平均值的误差不超过 2%。

(4)用空间内插计算 a、b系数的相对误差多数超过 10%,但由于 a、b系数内插误差的负相关特征,由此引起的辐射总量计算误差要小得多,其范围略小于与各日射站气候学计算值对实测值的随机误差。

(5)综合考虑两种误差的作用,在我国大部分地区,通过逐年观测资料计算各基本站 a、b系数,再由内插求得无日射资料测站的 a、b系数,进而由(2)式计算无日射资料站的辐射总量,其误差一般在可接受的范围内。

参考文献:

[1] 翁笃鸣.中国辐射气候[M].北京: 气象出版社, 1997. 111-113, 121-123.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 史　兵,孙治安,胡星南,等.我国太阳总辐射资料稳定性和短序列订正问题[J].太阳能学报, 1988, 9(3): 291-301.

[8] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京: 气象出版社, 1999.

[9] Rietveld M R. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine[J]. Agric For Meteorol, 1978, 19(2): 243-252.

[10] 陆渝蓉,高国栋.气候学[M].北京: 气象出版社, 1988. 10-11.

[11] 屠其璞,王俊德,丁裕国,等.气象应用概率统计学[M].北京: 气象出版社, 1984: 127.

Discussion on the Climatological Calculation of Solar Radiation

JU Xiao-hui[1,2], TU Qi-pu[1], LI Qing-xiang[2]

(1. Department of Geography, NUIST, Nanjing 210044, China;
2. National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China)

Abstract Based on the analysis of more than 30-year radiation data from radiation observation stations, the distribution of correlation between solar radiation and sunshine are analyzed. Then this paper mainly discusses the geographical distribution and seasonal variations of a, b coefficients in the climatic formula of solar total radiation. It is necessary to consider the seasonal variation of the a, b coefficients when calculating the solar radiation. The possible error of the climatic calculation of solar radiation is analyzed and discussed. The error range of calculating solar radiation using sunshine data is acceptable.

Key words: solar radiation; sunshine; a and b coefficients; error