

总辐射与地表净辐射相关性的气候学研究

翁笃鸣 高庆先

(南京气象学院)

摘要 在讨论实测总辐射与地表净辐射月平均通量密度相关性的基础上,分析了两者气候计算值间的相关性问题,并初步证实两者的一致性。绘制出利用回归方程推算的地表净辐射年平均通量密度全国分布图,与利用地表辐射平衡方程余项所得结果比较一致。还讨论了坡地总辐射与净辐射气候计算值间的相关特点,指出当坡度小于 20° 时,坡地总辐射与净辐射的回归方程系数与水平地面的一致。随着坡度增加,回归方程系数发生相应变化。

关键词 总辐射,地表净辐射,相关性,气候学研究

文献[1]已讨论了总辐射与地表净辐射相关的物理实质,本文拟就两者相关的气候学特征及其实际应用的可能性作进一步地探讨。文中运用了我国及世界各大洲(包括南极)共64个站的实测总辐射和地表净辐射资料^[2,3],我国6站(见表3)资料年代为1961—1965年,国外的为1964—1968年。分析上述相关的地理分布时,还利用了全国223站的辐射气候计算资料。

1 实测总辐射与地表净辐射相关的气候特征

关于实测总辐射与地表净辐射月总量(或月平均通量密度)的相关问题,受资料条件限制,在国内外文献中涉及不多。实际上它与瞬时值相关一样存在着,且相关系数普遍较高,总辐射与地表有效辐射的相关联系也同样存在。这些建立在月总量基础上的关系是一种气候关系,具有重要的气候意义和应用价值。

总辐射与地表净辐射及有效辐射的气候相关(参照文献[1]),同样可表示为

$$\bar{R} = b\bar{Q} - a, \quad \bar{F} = d\bar{Q} + c$$

式中 $\bar{Q}$ 、 $\bar{R}$ 、 $\bar{F}$ 分别为总辐射、地表净辐射、有效辐射的月总量(或月平均通量密度), a 、 b 、 c 、 d 为系数,结合地表辐射平衡方程,仍然存在 $b=1-a-d$; $a=c$,这里 a 为月平均地表反射率,上述各系数所代表的物理含义与文献[1]相似,但更具气候意义。 a 、 c 为虚拟的极夜条件下的有效辐射, b 为总辐射对地表净辐射的气候加热率; d 为总辐射的长波辐射气候散热率。

分别统计我国及世界各大洲(包括南极)64个测站的总辐射与地表净辐射的相关系数,回归方程系数以及回归误差的情况(表1、2),表明总辐射与地表净辐射月平均通量密度间的相关确实很高,占总数86%站点的相关系数值大于0.900,我国各站,全部在0.950以上。

表1 各地区总辐射与地表净辐射月平均通量密度间的相关系数统计

地 区	相关系数等级	≥0.950	0.900—0.949	0.850—0.899	0.800—0.849	≤0.799	合计
各大洲	频 数	41	4	5	2	2	54
(包括南极)	频率(%)	75.9	7.4	9.3	3.7	3.7	100.0
中 国	频 数	10	0	0	0	0	10
(包括青藏高原)	频率(%)	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
全球各地区	频 数	51	4	5	2	2	64
合 计	频率(%)	79.7	6.3	7.8	3.1	3.1	100.0

表2为各地回归方程的反演误差分布。全球各地区的平均误差为 8.5Wm^{-2} ,其中误差在 10Wm^{-2} 以下的站月数可占总数的66.9%,我国10站的拟合效果更好(平均误差 7.5Wm^{-2})。图1更具体地反映出我国各站地表净辐射实测值与计算值的对比情况。图中各散布点的相关系数可高达0.975。

表2 各地区总辐射与净辐射月平均通量密度间回归方程反演误差(Wm^{-2})统计

地区	平均误差	误差等级	≤5.0	5.1—10.0	10.1—15.0	15.1—20.0	20.1—30.0	≥30.1	合计
各大洲	8.7	频数	264	159	117	63	38	7	648
(包括南极)		频率(%)	40.7	24.5	18.1	9.7	5.9	1.1	100.0
中国	7.6	频数	52	39	14	8	7	0	120
(包括青藏高原)		频率(%)	43.3	32.5	11.7	6.7	5.8	0.0	100.0
全球各	8.5	频数	316	198	131	71	45	7	768
地区合计		频率(%)	41.1	25.8	17.1	9.2	5.9	0.9	100.0

由于总辐射与地表净辐射实测值间普遍存在的高相关特点,就提出了利用回归法直接计算地表净辐射的可能性问题,这比通常使用的气候计算方法——按地表辐射平衡方程余项计算地表净辐射,不仅计算简便而且精度较高。因此,当 Davies^[4]归纳世界各地14个站的总辐射和净辐射资料,建立起统一的回归方程时,其目的就是为了推广应用。Hing Cheng-Hu 等^[5]在讨论马来半岛净辐射气候计算方法时,明确认为采用上述回归法比之余项法结果要好。我们利用北京等6个热平衡站资料对回归法和余项法计算结果进行比较(表3)也可看出,回归法的计算误差总的说要比余项法小些。从误差的分级统计结果可看得更清楚(表4)。

由上分析可认为,在地表净辐射的气候计算中,使用简单回归法比余项法有更精确的结果,但在实际工作中由于地表净辐射的实测资料非常少,致使回归法的推广应用受到限制。

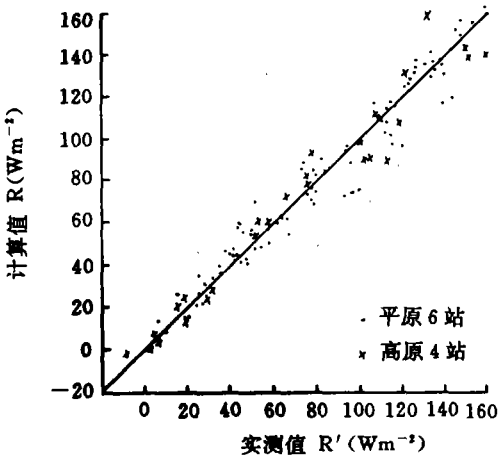


图1 地表净辐射实测月平均通量密度与回归计算结果比较

表3 两种计算地表净辐射方法的误差比较(Wm⁻²)

		月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年平均
		方法													
北京	回归法	12.5	8.0	15.4	3.1	12.5	9.4	22.6	23.4	1.3	7.9	3.1	5.0	10.4	
	余项法	2.2	13.2	13.6	4.9	28.3	19.3	0.0	6.4	17.9	10.5	14.2	1.4	10.9	
上海	回归法	10.3	5.6	7.3	0.1	1.5	12.2	5.8	0.3	7.4	2.4	1.4	3.9	4.9	
	余项法	9.0	9.1	3.3	13.6	8.8	1.0	2.1	2.5	2.0	2.8	7.9	3.6	6.1	
武汉	回归法	4.2	5.2	6.1	19.3	4.8	3.1	1.9	3.5	1.4	4.7	3.7	8.7	5.6	
	余项法	4.5	10.4	4.8	13.0	6.3	4.6	8.4	10.4	6.5	1.6	6.5	0.1	6.4	
赣州	回归法	15.4	1.8	11.9	10.3	0.4	17.4	7.3	3.7	5.1	3.0	5.5	7.2	7.4	
	余项法	3.7	4.8	9.5	11.3	15.6	18.0	16.8	5.1	16.1	10.3	6.3	9.5	10.6	
南宁	回归法	16.1	3.3	7.1	23.1	4.8	0.8	2.2	3.2	11.9	2.8	6.0	11.5	7.7	
	余项法	12.5	9.5	3.5	11.2	1.2	4.3	3.0	5.0	9.8	6.6	13.0	5.6	7.1	
海口	回归法	5.6	3.5	2.1	0.8	0.5	0.1	8.4	2.5	8.9	0.6	1.6	0.9	3.0	
	余项法	10.8	4.0	2.5	14.0	12.2	7.9	3.7	7.3	5.7	1.0	0.2	1.3	5.9	

注:余项法计算值取自文献[6](下同)

表4 两种计算地表净辐射方法误差(Wm⁻²)的分级统计

方法	6站总 平均误差	误差等级	≤5.0	5.1—10.0	10.1—15.0	15.1—20.0	≥20.1	合计
回归法	6.5	频数	36	20	8	5	3	72
		频率(%)	50.0	27.8	11.1	6.9	4.2	100.0
余项法	7.8	频数	29	20	16	6	1	72
		频率(%)	40.3	27.9	22.2	8.2	1.4	100.0

2 总辐射与地表净辐射气候计算值间的相关

为克服实测辐射资料不足的限制,利用总辐射和净辐射的气候计算资料进行相关计算。根据文献[6]计算的全国223站总辐射和净辐射资料,逐站计算它们的相关系数、回归方程系数和回归误差,发现总辐射与地表净辐射气候计算值间的相关效果仍很满意。就相关系数的全国分布看(图略),除云贵山地和青藏高原东侧部分地区较小(0.800左右)外,全国绝大部分地区的相关系数都在0.950以上(其中许多站点的数值高达0.990及以上)。各站回归误差一般都在10Wm⁻²以下,回归方程系数分布也较有规律。为了证实总辐射与地表净辐射气候计算值相关的可靠性,还列出我国全部有实测净辐射资料的10个站的实测值相关计算结果与相应气候计算值的相关计算结果进行比较(表5)。两种资料所得回归方程系数a、b十分接近,其相应系数分别为0.988和0.938,平均差依次为6.5和0.038。

表5 各站总辐射与净辐射实测值间回归方程系数 a 、 b 与
各自气候计算值间回归方程系数的比较

	北京		上海		武汉		赣州		南宁		海口		拉萨	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	52.8	0.727	55.2	0.926	45.1	0.867	34.2	0.787	33.2	0.805	40.5	0.800	151.3	0.995
2	49.8	0.774	56.7	0.913	43.6	0.812	39.6	0.793	43.5	0.844	48.5	0.851	158.1	1.035
	那曲		甘孜		改则		海参威		伯力		赤塔		塔什干	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	129.1	0.930	103.0	0.857	106.6	0.633	86.3	0.960	63.5	0.809	54.8	0.686	23.4	0.551
2	121.6	1.005	98.2	0.866	91.0	0.591	75.2	0.948	70.4	0.895	57.8	0.765	29.6	0.569

注:1—实测值回归;2—计算值回归

表5还列出海参威、伯力、赤塔、塔什干的实测值回归系数(表中“1”),分别与我国邻近站宝清、富锦、漠河、喀什(表中“2”)的计算值回归系数的比较。由于各对站地理位置相近, a 、 b 系数之间互相接近和所具连续性特点,说明即使在我国东北和新疆等边缘地区,由总辐射和地表净辐射气候计算值算得的回归方程系数仍有较好的代表性。可以认为由气候计算所得总辐射与地表净辐射的回归方程是基本可信的,可用于一般理论分析和应用目的,图2、3给出 a 、 b 系数的全国分布。从图2可见,青藏高原是全国的高值区,这与该地区的高海拔影响有关。此外,在河套、内蒙及至东北中部以及新疆北部的 a 值也相对较大。低值区

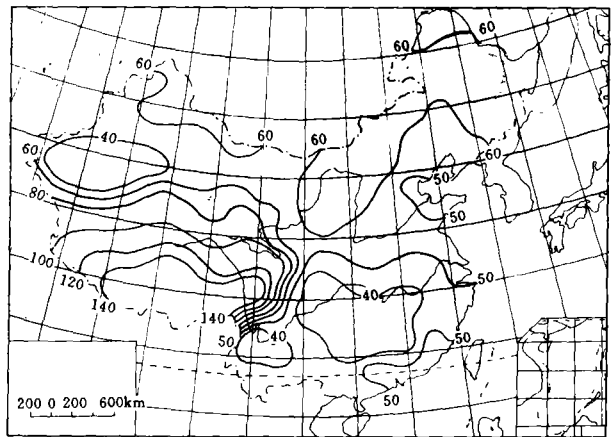


图2 a 系数分布(Wm^{-2})

主要集中在长江流域及其以南地区,显然是空气湿润和云量较多的结果。在塔里木盆地区还有一低于 40Wm^{-2} 的闭合中心。在青藏高原东部边缘,等值线密集,反映出海拔高度急剧变化的影响。 b 系数的分布反映出太阳总辐射对地表净辐射气候加热率的地区差异。由图3可见,整个青藏高原为一高值区,1.10的高中心在高原中南部,另外,我国整个东半部的 b 系数也较大,沿海各地一般可高达0.90左右。低值区主要集中在以塔里木盆地为中心的西北干旱地区和云贵山地。解释这些分布特点,必须要和总辐射与有效辐射的相关性联系起来。据统计,我国总辐射与有效辐射气候计算值间的相关系数分布(图略)大致具有如下特点,在 35°N (东部为 40°N)以北地区,相关系数为正且数值较大,尤以西北干旱地区,特别是塔里木盆地区的数值最大(超过0.900)。整个东部沿海地区在强烈季风气候影响下为一负相关区,上海、南京的相关系数达到 $|-0.700|$ 以上。青藏高原大部地区也为负相关区。其余地区(主要是华北、华中和西南)为低相关区。可见, b 系数的高值区正好和总辐射与有效辐射的负相关区相配合,而其低值区则主要与上述正相关区比较一致。

图4给出按回归法得到的地表净辐射年平均通量密度的全国分布。其所反映的年平均地表

净辐射分布形势,特别是高、低中心配置与文献[6]的气候计算结果相当一致,两者的相关系数可达0.915。其他月份的地表净辐射分布也与气候计算结果接近。因此,如能精确算出总辐射,利用本法作地表净辐射近似估计是可行的。

3 坡地总辐射与净辐射的相关性

关于坡地总辐射与净辐射的相关性问题研究更少,但已有的工作都认为两者之间同样存在着高相关。Wilson 等^[7]和 Гарнье В.^[8]分别得出坡地总辐射与净辐射的回归方程系数与水平地面完全一致的结论。最近,霍总会和 W. G. Baily* 根据加拿大山区实测资料得出各坡地总辐射和净辐射瞬时通量密度间的回归方程,认为各坡地的回归方程斜率系数变化不大,而截距差别较大。

坡地总辐射与净辐射的相关联系,在理论上是可以大致证明的,如以

$$R_{\alpha\beta} = (1 - A_{\alpha})Q_{\alpha\beta} - F_{\alpha} \quad (1)$$

表示坡地辐射平衡方程,式中 $R_{\alpha\beta}$ 、 A_{α} 、 $Q_{\alpha\beta}$ 、 F_{α} 分别为坡地净辐射、坡地反射率、坡地总辐射和坡地有效辐射, α 、 β 为坡度、坡向。对于给定地点和日期,坡地总辐射和有效辐射还可表示为

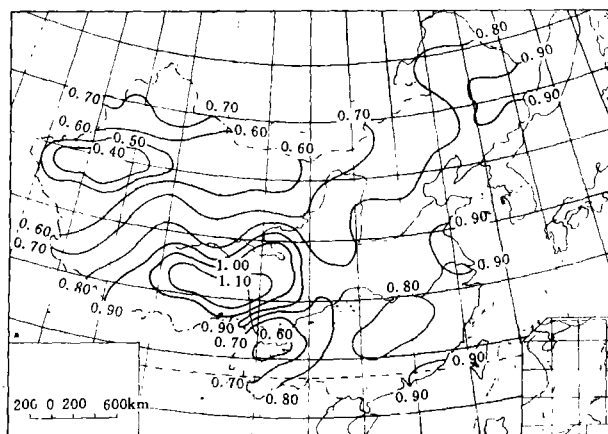


图3 b系数分布(Wm⁻²)

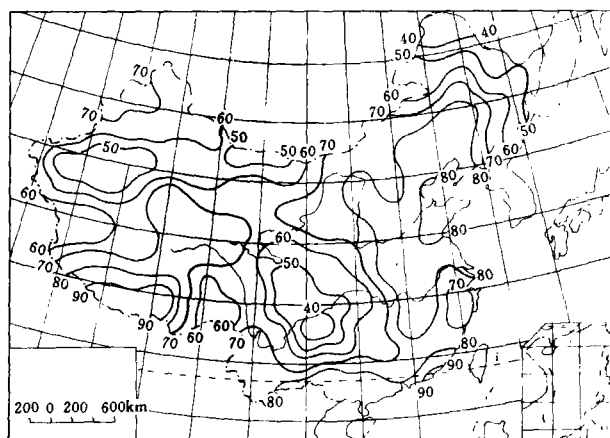


图4 地表净辐射年平均通量密度分布(Wm⁻²)

$$Q_{\alpha\beta} = f(\alpha, \beta)Q_0 \quad (2)$$

$$F_{\alpha} = \frac{1}{2}(1 + \cos\alpha)F_0 \quad (3)$$

这里 Q_0 、 F_0 分别为水平地面总辐射和有效辐射, $f(\alpha, \beta)$ 为坡地总辐射换算函数。如不考虑坡地与平地间的反射率差异,并以 $F_0 = c + dQ_0$ ^[1] 代入(1)则有

$$R_{\alpha\beta} = [(1 - A)f(\alpha, \beta) - \frac{d}{2}(1 + \cos\alpha)]Q_0 - \frac{1}{2}(1 + \cos\alpha)c = b_{\alpha\beta}Q_0 - a_{\alpha} \quad (4)$$

$$\text{这里 } b_{\alpha\beta} = [(1 - A)f(\alpha, \beta) - \frac{d}{2}(1 + \cos\alpha)] \quad (5)$$

$$a_{\alpha} = \frac{c}{2}(1 + \cos\alpha) \quad (6)$$

对于给定坡地, $b_{\alpha\beta}$ 、 a_{α} 均为常数,所以坡地总辐射与净辐射间的线性关系成立。

* Huo Z., Baily W.G. Evaluation of models for estimation of net radiation for alpine sloping surfaces (AMS 即将发表)

在气候计算中(4)式同样存在。据对齐齐哈尔、北京、上海、海口4站各月坡地辐射计算值回归计算结果,发现各坡地总辐射与净辐射的线性相关系数很高(一般都在0.950以上)。表6即为各地回归方程系数随坡向、坡度变化情况。可以看出,当坡度小于 20° 时,各坡地的回归方程系数变化较小,大致与水平地面上的数值相当,这与(5)、(6)式所反映的概念一致。当坡度增大至 30° 及以上时,坡地的影响就较明显,其中又以南坡的变化较大,显示出坡地日射条件差异的重大作用。在东、西坡和北坡,坡度对斜率系数 $b_{\alpha\beta}$ 的影响不大,而对 a_{α} 的影响较大,并有随坡度增加而减小的特点,这与(6)式结果一致。

表6 各地各坡地总辐射与净辐射气候计算值间的回归方程系数

坡度 (α°)	齐 齐 哈 尔	北 京	上 海	海 口	齐 齐 哈 尔	北 京	上 海	海 口
	$b_{\alpha\beta}$				a_{α}			
南坡 ($\beta=0^{\circ}$)								
0	0.836	0.774	0.913	0.857	61.5	49.8	56.7	48.7
10	0.880	0.765	0.921	0.863	71.7	47.3	58.4	49.6
20	0.940	0.751	0.926	0.867	85.4	42.8	58.6	49.4
30	1.027	0.727	0.925	0.862	104.4	35.6	57.2	47.0
50	1.155	0.653	0.763	0.782	129.2	14.7	26.7	29.8
东、西坡 ($\beta=\mp 90^{\circ}$)								
10	0.838	0.775	0.913	0.857	61.5	49.5	56.4	48.3
20	0.842	0.774	0.913	0.857	61.2	48.2	55.2	47.3
30	0.847	0.774	0.913	0.857	60.6	46.2	53.3	45.6
50	0.868	0.774	0.912	0.856	57.7	40.3	47.4	40.3
北坡 ($\beta=\mp 180^{\circ}$)								
10	0.805	0.780	0.904	0.851	54.1	50.9	54.3	47.1
20	0.788	0.784	0.897	0.846	49.4	50.7	51.3	45.0
30	0.787	0.786	0.892	0.842	47.3	49.4	50.0	42.4
50	0.788	0.785	0.892	0.837	42.3	43.9	41.3	36.3

参 考 文 献

- 1 翁笃鸣,高庆先.南京气象学院学报,1992;15(4):500—507
- 2 Berliand TG. *Solar Radiation and Radiation Balance Data (The World Net-work)*, Leningrad, Hydrometeorological Publishing House, 1970;10—86
- 3 Под редакцией Н. М. Долгина и Д. П. С. Справочник по климату Антарктиды, Том 1, Солнечная Радиация Радиационный Баланс Солнечное сияние, Л., Гидрометеоиздат, 1976; 168—173, 183—186
- 4 Dares JA. QJRM 1967;93:109—115
- 5 Hung Cheng-Hu, Joo Tick-lim. J of Climatology, 1983;3:271—283
- 6 翁笃鸣等.南京气象学院学报.1988;11(2):132—143
- 7 Wilson RG, Garnier BJ. Climatol Bull. 1975;17:1—14
- 8 Гарнье Б., Вычисление и картирование радиационный Баланс различных поверхностей, XXIII Международный географический конгресс, Москва, 1976, Секц. 2, климатология, гидрология, гляциология, М., 1976

CLIMATOLOGICAL RESEARCH ON CORRELATION BETWEEN GLOBAL RADIATION AND SURFACE NET RADIATION*

Weng Duming Gao Qingxian

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract on the basis of the correlation between global radiation measurements and monthly means of surface net radiation flux densities (SNRFD), analysis is done of the correlation of their climatological calculations, confirming roughly their consistency, with a prepared nation-wide chart of annual mean SNRFD with the aid of the regression formula. The pattern agrees fairly well with the results by the residual term of the surface radiation balance expression. Besides, the correlation characteristics are examined between the climatological values of global and the net radiations for slope land, indicating that for the slope $< 20^\circ$ their coefficients of the regression equation are in concord with those for a horizontal ground and with the increasing slope the coefficient changes correspondingly.

Key words global radiation, surface net radiation, correlation, climatological research

* The project is funded by the Meteorological Science Foundation of the State Meteorological Administration of China