

关于总辐射与地表净辐射的相关性问题

翁笃鸣 高庆先

(南京气象学院)

摘要 根据地表辐射平衡方程论述了总辐射与净辐射相关的物理实质,证实了线性方程 $R=bQ-a$ 的合理性。文中还根据大量实测资料分析了两者的瞬时值、日总量以及月总量相关的特点,指出:瞬时值的相关最高;日总量的相关可因地表反射率及云量逐日变化的影响而有所降低;全年各月月总量相关较高,一般与地表反射率和有效辐射年变化的某种互补作用有关。

关键词 总辐射,净辐射,相关性

自 1956 年 Shaw^[1]最先提出总辐射与地表净辐射的相关性问题以来,已有不少作者对此进行了研究,比较有代表性的如 Kessler A^[2]、Davies^[3]、Wilson^[4] 等工作,国内也有少量研究^[5]。但已有成果多侧重于个别测点和地区观测事实的揭露,而对相关的物理实质及其气候特征的分析则嫌不够。本文试图在已有研究的基础上,就相关的物理实质和特点作较细的讨论。本文所用资料包括世界站网的日射和净辐射资料^[6]、南极^[7]以及我国青藏高原两次热源考察资料^[8,9]和我国 6 个热平衡站资料。

1 总辐射与地表净辐射相关的物理实质

总辐射与地表净辐射的相关及回归方程形式,依自变量不同,有如下两种:

$$R = bQ - a \quad (1)$$

$$R = b'(1 - \alpha) - a' \quad (2)$$

式中 R 为净辐射, Q 为总辐射, α 为地表反射率, a 、 b 、 a' 、 b' 为经验系数。从各地研究结果

来看,两式都有较高的拟合效果。人们在讨论上述方程的物理意义时,都把它们与地表辐射平衡方程

$$R = (1 - \alpha)Q - F \quad (3)$$

联系起来,(3)式中 F 为有效辐射。一般把 α, α' 理解为夜间净辐射。 b, b' 较为复杂,Павлов AB.^[10]认为 b 是地表反射率 α 的函数。

Monteith 等^[11]从对(2)、(3)式分析中,引入加热系数 β ,导出 $b' = 1/(1 + \beta)$,并就 β 的变化特征作了讨论。有的作者还据此作了相应的计算和分析^[5]。实际上,只需联系(2)、(3)式并稍作替代,就可得到 β 的物理表达式,即

$$\beta = dF/dR$$

它表示地表获得净辐射加热后通过长波辐射交换的散热率。由于净辐射本身与有效辐射有关,所以 β 的意义不明确。

我们从另一个途径讨论(1)式中 a, b 系数的物理意义。将(1)、(3)式分别对总辐射求导,得到

$$b = dR/dQ$$

$$dR/dQ = 1 - \alpha - dF/dQ \quad (4)$$

这里系数 b 表示太阳总辐射对地表净辐射的加热率,而 (dF/dQ) 就是总辐射的长波辐射散热率。

另外,考虑到总辐射和有效辐射日变化近似同步,及后者主要由地面辐射加热所决定,应存在

$$F = c + dQ \quad (5)$$

式中 c, d 为经验系数。由此可得 $d = dF/dQ, c$ 为夜间有效辐射。(5)式代入(3)式可得

$$R = (1 - \alpha - d)Q - c \quad (6)$$

本式的形式与(1)式一致。对比两式可得

$$b = 1 - \alpha - d \quad a = c \quad (7)$$

这一结果正好与(4)式完全一致。

对瞬时量、日总量(或日平均通量密度,下同)以及月总量(或月平均通量密度,下同)作相关计算时,由于所取平均时段不同,经验式(1)、(5)、(6)所具有的物理含意有所差别,(7)式成立的正确程度也有所不同。

2 总辐射与地表净辐射相关的特点

2.1 瞬时值相关特点

利用总辐射与地表净辐射的瞬时观测资料来证实(1)、(5)、(6)式的合理性和联系性

最方便。作为例子,图 1 分别给出总辐射与地表净辐射及有效辐射的相关,表明两种相关的线性特点都非常明显,相关系数分别达到 0.993 和 0.977,证实(1)式与(5)式都能较好地成立,从而合理地解释了(1)式的稳定性。按照(5)、(6)式,日间,当地表在太阳辐射加热下,有效辐射和地表净辐射几近同步地随总辐射按比例增长时,(5)式中的系数 d 为一常数。地表反射率 α 虽有日变化,但主要发生在太阳高度较低的早晚时刻,此时(6)式中系数 $(1-\alpha-d)$ 会发生某些改变,但因当时的总辐射较小,造成的绝对误差不大。其余时刻的 α 值则均较稳定,所以系数 $(1-\alpha-d)$,亦即(1)式中的 b 值也相对稳定。(5)式系数 c 表示夜间有效辐射,它的变化较小。

为进一步比较(1)、(6)式的一致性,我们分别按(1)、(5)式统计了北京生长季(4—11月)各月晴天的总辐射与地表净辐射及有效辐射的相关系数及系数 a, b, c, d 值(表 1)。表中 r_{QK}, r_{QK} 分别为总辐射与地表净辐射及有效辐射的相关系数,表中还列出地表反射率 α 及 $(b+\alpha+d)$ 值作为比较。由表可见,各月的 $(b+\alpha+d)$ 都接近 1,说明(1)、(5)、(6)式的回归系数是闭合的,平均闭合误差为 3.7%。 a 与 c 的差值也比较小,平均为 13.1Wm^{-2} 。如将表 1 系数分别代入(1)、(6)式,并进行对比计算,其结果也相当一致(表略)。

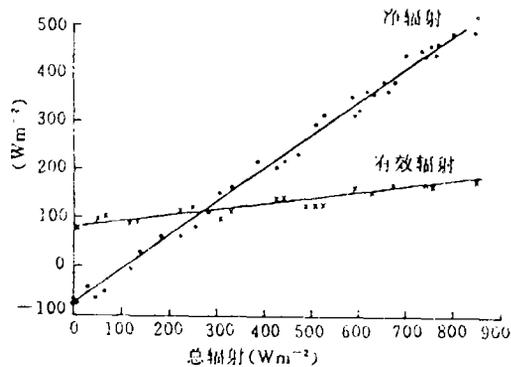


图 1 1985 年北京湿润麦田返青期晴天各时段总辐射
与净辐射(1)、有效辐射(2)的相关

表 1 北京晴天总辐射与地表净辐射、有效
辐射的相关系数及回归方程系数

月份	4	5	6	7	8	9	10	11
r_{QK}	0.995	0.994	0.996	0.993	0.998	0.992	0.994	0.992
a	88.6	83.9	77.5	61.4	59.0	83.8	77.7	93.2
b	0.797	0.844	0.876	0.780	0.716	0.745	0.699	0.710
r_{QK}	0.699	0.631	0.551	0.905	0.752	0.764	0.790	0.757
c	69.5	61.9	59.7	50.4	54.1	72.9	64.6	77.0
d	0.058	0.024	0.022	0.040	0.048	0.080	0.108	0.091
α	0.185	0.181	0.146	0.207	0.210	0.203	0.230	0.241
$b+\alpha+d$	1.040	1.049	1.044	1.034	1.019	1.028	1.037	1.042

总辐射与地表净辐射的回归方程系数具有年变化并随云量变化。表 1 中 a 系数在生长季各月的变化具有夏季(7、8月)较小,春、秋季较大的特点,表明北京因夏季比较湿润,

夜间有效辐射反较春、秋季节为小。 b 系数的最大值落在春夏之交的5、6月,那时比较干燥的地面条件有利于增大总辐射对净辐射的加热率。

a 、 b 系数的年变化特点在不同气候区有所差异。如拉萨 b 系数的年变化与北京正好相反,最大值出现在夏季,最小值在冬季。这反映了拉萨夏季夜雨的重大影响。两地 a 系数的变化趋势则较一致(表略)。

云量条件对总辐射与地表净辐射回归性质的影响是存在的,主要表现在对 a 系数的作用上。为了说明这一点,我们分别对北京干、湿麦田逐日统计出总辐射与净辐射回归方程的系数,并与同日平均总云量进行比较(图略),发现两者的相关较好,干、湿两地段的线性相关系数分别可达 -0.833 和 -0.828 。这实际上揭示了夜间有效辐射与平均云量的联系。随着平均云量的增多,夜间有效辐射趋于减小。两地段 b 系数基本上与平均云量无关,只与地段本身的湿润程度有关,干麦田的数值较大(平均 0.828),湿麦田较小(平均 0.769)。

以上对(1)、(5)两式 a 、 b 、 c 、 d 的分析都是根据全月各日瞬时资料回归结果进行的,这些系数所代表的是在很大程度上被平滑了的数值。为了进一步论证总辐射与地表净辐射相关和回归方程的物理实质,有必要用典型日子的逐时观测资料作验证。为此,我们选择了1985年北京一个全晴天(3月31日)和一个全阴天(5月14日),求出日间逐时的 dR/dQ 及 dF/dQ (用差分代替),并与同日回归方程(1)、(5)的系数 b 、 d 比较,以检验其稳定

表2 逐时 $\Delta R/\Delta Q$ 、 $\Delta F/\Delta Q$ 的统计结果及其与系数 b 、 d 比较

项目	b	\bar{b}'	s_b	s_b/\bar{b}'	d	\bar{d}'	s_d	s_d/\bar{d}'
晴天	0.686	0.691	0.079	0.115	0.124	0.143	0.063	0.443
阴天	0.777	0.806	0.063	0.078	0.107	0.111	0.061	0.551

性,所得结果可见表2。表中 \bar{b}' 、 \bar{d}' ,即为 $\Delta R/\Delta Q$ 、 $\Delta F/\Delta Q$ 的日平均值, S 为各自的均方根差。可以看出, $\Delta R/\Delta Q$ 及 $\Delta F/\Delta Q$ 的平均值比 b 、 d 系数略大,因为它们只是日间平均,未包括夜间情况,它们的均方差根也较小。净辐射加热率 $\Delta R/\Delta Q$ 的相对变率不足12.0%,说明比较稳定。 $\Delta F/\Delta Q$ 的相对变率则因其平均值过小而显得大些。

通过以上分析,证实总辐射与地表净辐射相关的普遍性是和总辐射与有效辐射的相关性相联系的,这在对瞬时值的相关分析中表现最明显。

2.2 日总量相关特点

总辐射与地表净辐射间的相关仍然存在,但相关程度则因地表反射率、云状况以及地表湿润状况的逐日改变而有所降低。这种现象在地表反射率急剧变化的季节(有不稳定积雪或地表干湿交替)表现尤为突出。即便如此,在一般情况下,总辐射与地表净辐射、有效

辐射的回归关系仍然存在,有关文献上提供的世界各地计算结果(主要是暖季的)可以说明(表略)。现再以拉萨的结果作进一步的讨论(表3)。总的看,表中 r_{QK} 比瞬时值相关系数明显偏低,其中暖季各月(3—9月)的相关数值还比较大,冷季月份因积雪影响,使得该值更低(12月最低仅0.480)。 a 、 c 系数的差值各月平均为 18.9Wm^{-2} 。 $(b+a+d)$ 基本上能满足等于1的条件,平均误差为5.1%。 a 、 b 、 c 、 d 系数的年变化趋势反映出云和下垫面的重大影响。暖季因比较湿润,云量较多,特别是高原夜雨的影响,使得净辐射加热率 b 增大,有效辐射放热率 d 减小(a 的绝对值减小)。冷季则反过来。

表3 拉萨各月总辐射与净辐射以及有效辐射日
平均通量密度的相关系数和回归方程系数

年	1982						1983					
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
r_{QK}	0.752	0.653	0.649	0.602	0.480	0.642	0.599	0.838	0.903	0.940	0.836	0.918
a	20.4	43.8	37.0	89.8	70.5	111.8	63.1	117.6	96.3	39.5	14.8	-4.8
b	0.537	0.525	0.382	0.418	0.274	0.423	0.345	0.539	0.516	0.504	0.496	0.515
r_{QF}	0.677	0.526	0.634	0.638	0.702	0.587	0.716	0.664	0.617	0.891	0.813	0.773
c	23.8	71.5	58.0	98.0	75.1	92.8	30.9	106.3	116.2	40.4	44.0	25.2
d	0.265	0.223	0.291	0.316	0.441	0.342	0.470	0.236	0.181	0.268	0.255	0.241
a	0.180	0.193	0.203	0.218	0.240	0.276	0.260	0.247	0.238	0.216	0.210	0.183
$b+a+d$	0.982	0.941	0.876	0.952	0.955	1.041	1.075	1.022	0.935	0.988	0.961	0.939

关于日总量相关的物理解释,虽不反瞬时相关直观,但(7)式的条件仍成立,因为在日总量计算中,当日的太阳辐射加热对地表净辐射的影响仍然是决定性的。太阳辐射对有效辐射的影响一般要差些。另外,对(1)、(5)式中系数 a 、 c 的理解,也只能看作为某种外延(虚拟)的夜间有效辐射。

2.3 月总量相关特点

在已发表的有关文献中,对于总辐射与地表净辐射全年各月总量相关问题讨论不多,实际上它同样存在,而且相关系数一般较高。我们统计了我国及各大洲(包括南极)64个站点总辐射与净辐射的相关及回归系数,发现占76%的站点的全年月总量相关系数都在0.950以上,而且回归方程系数的变化有一定规律。图2、3即为 a 系数在给定区域随纬度、经度变化的情形。实质上它表示了虚拟的夜间净辐射的变化,反映了纬度和大西洋的影响。 b 系数变化较小,一般在0.550—0.750范围。

对各洲可分别建立统一的回归方程,如

$$R=0.588Q-29.2(\text{Wm}^{-2}) \quad r=0.950 \quad (\text{欧亚} 37 \text{站})$$

$R=0.617Q-48.7(\text{Wm}^{-2})$	$r=0.920$	(北美 6 站)
$R=0.613Q-30.2(\text{Wm}^{-2})$	$r=0.960$	(南半球 6 站)
$R=0.324Q-32.2(\text{Wm}^{-2})$	$r=0.740$	(南极 5 站)
$R=0.757Q-34.4(\text{Wm}^{-2})$	$r=0.921$	(中国东部 6 站)
$R=0.751Q-100.7(\text{Wm}^{-2})$	$r=0.862$	(青藏高原 4 站)

可以看出,除南极以外,各大洲区域不仅总辐射与净辐射相关系数大,而且回归方程系数也相当一致。南极因冰盖影响, b 系数很小。我国东部地区和青藏高原的 a 值较大,关于这个问题,我们将另文讨论。

b 系数的物理意义及它在各地数值相对稳定,说明各地反射率 α 和 c 系数间存在某种补偿关系。这在一定程度上是可能的。就地表反射率来说,在中、高纬地区一般具有冬季大、暖季小的年变特点,而有效辐射的年变化则与总辐射基本同步。因此,当按(1)式拟合总辐射与地表净辐射的回归方程时,可以得到较好的结果,而且方程系数能在较大区域范围内保持相对稳定。

3 结 语

通过以上分析,可以认为总辐射与地表净辐射的相关是普遍存在的。它的物理实质就是在地表辐射交换过程中,作为唯一能源的总辐射与地表净辐射及有效辐射都存在很好的相关联系,因此可容易地从地表辐射平衡方程导出 $R=(1-\alpha-d)Q-c$ 。在地表反射率 α 变化较小的时段和季节,上述方程的线性特点就清楚地显示出来。

总辐射与地表净辐射的瞬时值相关最显著,日总量的相关稍差些,这反映出地表反射率与云状况逐日变化的影响,在出现不稳定积雪的地区和季节,这种表现尤为明显。总辐射与净辐射的月总量相关也较高,各大洲的回归方程系数比较接近,就总辐射对净辐射的

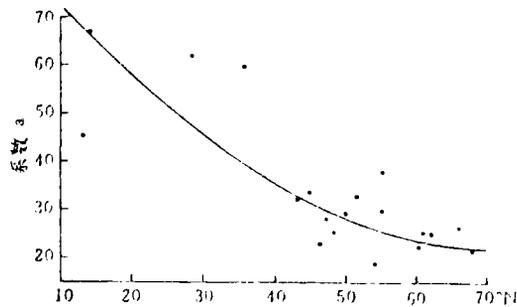


图 2 北半球 50°E 以西地区 a 随纬度变化

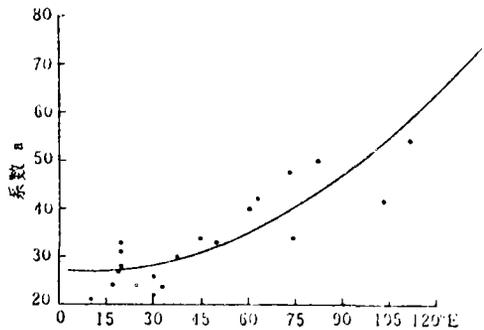


图 3 东半球 40—55°N 区域 a 随经度变化

加热率 b 来说,它的稳定性说明各地反射率与总辐射的长波辐射放热率 c 间存在某种互补关系。

参 考 文 献

- 1 Shaw RH. *Bull Amer Met Soc*, 1958; (37); 205—206
- 2 Langsberg HE. *General Climatology* (1A), 1985; 1A; 71—74
- 3 Davies JA. *QJRMS*, 1967; (93); 109—115
- 4 Wilson RG, Garnier BJ. *Climate Bull*, 1975; (17); 1—4
- 5 牛文元, 周允华, 张 翼等. 农业生态系统能量物质交换. 北京: 气象出版社, 1987; 25—36
- 6 Voeikov AI. *Main Geophysical Observatory, Solar Radiation and Radiation Balance Data (The World Network)*, Annual Data 1964—1968, Leningrad GIDROMETEIOIZDAT. 1970; 10—85
- 7 Справочник по климату Антарктиды, Том I Соплежал Радиация Радиационный баланс Соплежное, Силание, Л. Гидрометеоииздат. 1976; 168—173, 183—186
- 8 1979年5—8月青藏高原气象科学实验资料(第五册). 北京: 气象出版社, 1983; 2—61
- 9 中国科学院兰州高原大气物理研究所. 青藏高原辐射平衡观测资料(1982年8月—1983年7月), 1987; 186—369
- 10 Павлов АВ, Цзв. АН. Серия Географическая, 1962; (6); 94
- 11 Monteith JL, Szeicz G. *QJRMS*, 1961; (87); 159—170

CORRELATIVITY BETWEEN TOTAL RADIATION AND NET SURFACE RADIATION

Weng Duming Gao Qingxian

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract The physical basis is examined concerning the correlation between total radiation and net surface radiation by virtue of the equation of surface radiation balance, demonstrating the rationality of $R=bQ-a$. Based on the bulk of measurements, studies are made of the correlation between their instantaneous values and their daily and monthly totals. Results show that the correlation between their instantaneous values is the highest, that between their daily totals may decrease owing to the daily changes in surface albedo and cloudiness, and that between their monthly totals is high, which generally has something to do with some kind of mutual compensation of the annual cycles of surface albedo and effective radiation.

Key words total radiation, net radiation, correlativity