

利用 Nimbus-7 行星反射率观测资料估算 青藏高原地区的总辐射*

钟 强 睦金娥

(中国科学院兰州高原大气物理研究所)

提 要

本文利用 1982 年 8 月—1983 年 7 月期间 Nimbus-7 行星反射率的月平均资料用“物理模式方法(Raschke and Preuss, 1979)”估算了青藏高原及其邻近地区月平均地面总辐射的分布。得到的结果较好地反映了纬度、海拔与云量三个主要因子对总辐射分布的支配作用。根据高原及其邻近地区 23 个测站的资料,对总辐射的计算值与观测值进行了比较。统计分析表明,相关系数 $f=0.90$,标准误差 $RMS=27 \text{ w/m}^2$,平均绝对误差 $ABS=21 \text{ w/m}^2$ (相当于有效平均总辐射的 11.7%)。文中还对误差来源和敏感性问题进行了讨论。

一、引 言

地面太阳总辐射是地面能量收支中一个十分重要的量,了解它的时空变化特征,对天气预报与气候研究都是十分必要的。关于青藏高原地区的地面总辐射的计算方法已有不少学者对它进行了研究,作者在文献[1]中对此作了一些讨论与评述。对青藏高原地区来说,地面总辐射的计算中存在的一个主要问题是地面测站十分稀少,单靠为数稀少的地面测站的观测资料(日射、日照、云量)来推算总辐射的空间分布有较大的局限性。由于卫星能提供全球范围内空间、时间上连续的观测资料,因而如何利用卫星的辐射观测资料来估算青藏高原地区的地面总辐射及了解它的时空变化特征是十分必要的。本文利用 1982 年 8 月—1983 年 7 月期间 Nimbus-7 的行星反射率的月平均资料根据 Raschke 等(1979)提出的“物理模式方法”^[2]估算青藏高原及其邻近地区的月平均地面总辐射的分布。本文的第一部分(第二、三节)讨论模式中基本参数的确定和输入资料;第二部分(第四、五节)包括模式的敏感性问题、结果分析、计算值与观测值的比较以及误差来源的分析。

二、模式与基本参数的确定

对于一定的时间尺度和空间尺度平均的地面总辐射 Q (向下的太阳辐射通量)可由下式确定:

$$Q = (1 - A_c) Q_0 + A_c Q_c \quad (1)$$

式中 Q_0 , Q_c 分别为晴天与云天的地面总辐射, A_c 为表示云量的权重因子(或称之为有效

* 本文于 1987 年 2 月 9 日收到,1987 年 7 月 29 日收到最后修改稿。

云量)。由于一定的时间、空间尺度平均的行星反射率决定于平均云量,所以行星反射率的观测值可用来确定相应的云量。根据文献[2], A_c 可由下式确定:

$$A_c = \frac{\alpha_p - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \quad (2)$$

式中 α_p 为行星反射率, $\alpha_{\min}$ 为最小行星反射率(晴天行星反射率), $\alpha_{\max}$ 为最大行星反射率(对应于所考虑的空间、时间尺度内平均的全天有云时的行星反射率)。

令 $K = Q_c/Q_0$ 代表全天有云时的总辐射对晴天总辐射的比值,则(1)式与下式等价:

$$Q = Q_0[1 - (1 - K)A_c] \quad (1')$$

作为输入资料的行星反射率 α_p 将在下节讨论。晴天总辐射 Q_0 采用文献[1]的结果。根据文献[1]关于比值 K 的讨论,对于春、夏、秋、冬四个季节分别取 K 值为 0.283, 0.281, 0.251, 0.275; 并对高原主体及西北干旱、半干旱地区取上述 K 值的 1.1 倍。下面分别讨论最小行星反射率 $\alpha_{\min}$ 与最大行星反射率 $\alpha_{\max}$ 的确定:

1. 最小行星反射率 $\alpha_{\min}$

为了得到最小行星反射率,需要高分辨率的卫星测量以排除云的影响,为此我们分析了 1985 年 9 月—11 月间若干次 AVHRR 的晴天行星反射率资料^[3],取平均,得到了代表秋季的最小行星反射率,其分布见图 1。为了得到不同季节的最小行星反射率,我们作了如下的处理。

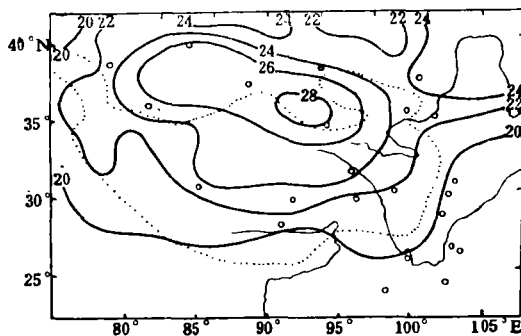


图 1 最小行星反射率(%)
(1985 年 9 月—11 月间 4 次 AVHRR 测量的平均值,
图中点线为海拔 3 km 的廓线)

根据文献[3],晴天行星反射率(即 $\alpha_{\min}$)与地表反射率 α_s 满足如下线性关系:

$$\alpha_{\min} = a\alpha_s + b \quad (3)$$

式中系数 a , b 分别表示晴天大气太阳辐射总的透过率与分子、气溶胶的后向散射所致的晴天大气的反射率。文献[3]给出了系数 a 、 b 依赖于太阳天顶角与地面海拔高度的函数关系。利用(3)式根据上述卫星观测到的最小行星反射率可得到对应于秋季的地表反射率。再考虑地表反射率的季节变化(根据 1982—1983 年青藏高原热源野外考察^[4]中取得的 4 个热源观测站为期一年的观测资料得到的地表反射率的季节变化规律,取春、夏、冬季分别为秋季的 1.1, 0.9, 1.3 倍),得到不同季节的地表反射率,然后再一次利用关系式(3),由地表反射率推出不同季节的最小行星反射率。

2. 最大行星反射率 $\alpha_{\max}$

Ellis 和 Vonder Haar(1978)^[5]在估算美国的总辐射时取 $\alpha_{\max}=0.5$, Raschke 和 Preuss(1979)^[2]在估算全球的总辐射时, 根据模式计算结果对所有纬度取 $\alpha_{\max}=0.68$ 。本文中我们将考虑 $\alpha_{\max}$ 对云的光学厚度和太阳天顶角的依赖关系根据模式计算的结果给出不同纬度、不同月份的最大行星反射率 $\alpha_{\max}$ 。

有云复盖时的行星反射率基本上决定于云的反射率。在文献[6]中, 我们根据二流近似的模式计算结果讨论了中纬度模式大气和高原模式大气中云天的行星反射率与云的光学厚度 δ 、太阳天顶角 θ 的依赖关系和比值 $K=Q_c/Q_0$ 与 δ, θ 的依赖关系; 形式上, 它们可分别以下列函数关系表示:

$$\alpha_{\max}=f_1(\delta, \theta) \quad (4)$$

$$K=f_2(\delta, \theta) \quad (5)$$

由于 δ 是一个十分不确定的量, 为了估计它, 我们将根据函数关系(5)的逆函数

$$\delta=f_2^{-1}(K, \theta) \quad (5')$$

由 K, θ 来估计 δ 值。因为不同纬度、不同月份的平均太阳天顶角是已知的; 而不同季节的 K 值也已根据文献[1]在上节给出。

根据文献[6]的模式计算的研究结果表明, 对应于某一确定的 K 值, δ 与 $\cos \theta$ 近似地满足线性关系。下面给出中纬度模式大气中当 $K=0.25$ 与 $K=0.30$ 时的关系式:

$$\begin{cases} \delta_1=67 \cos \theta-5 & \text{对于 } K_1=0.25 \\ \delta_2=58 \cos \theta-8 & \text{对于 } K_2=0.30 \end{cases} \quad (6)$$

式中的系数由线性拟合得到。对于不同的 K 值, $\delta(K, \theta)$ 由线性插值公式求得(因为当 K 值在某一有限范围内变化时, 可假定 $\delta-K$ 的关系近似线性)。根据(6)式用插值法得到的高原及其邻近地区(取平均纬度 $\bar{\varphi}=33^\circ$)各个月 δ 值的平均值见表 1。

表 1 确定 $\alpha_{\max}$ 时, 各月所取的云平均光学厚度 δ

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
δ	18.0	22.1	25.3	28.9	30.6	31.0	30.9	29.8	31.8	27.1	22.0	16.8

为了根据关系式(4)由 δ, θ 确定 $\alpha_{\max}$, 我们根据模式计算结果以列表形式(表 2)给出了中纬度模式大气中(取 $\alpha_s=0.2$)对应于不同太阳天顶角和不同的云光学厚度的 $\alpha_{\max}$ 值。

表 2 对应于不同的云光学厚度 δ 与太阳天顶角 θ 的 $\alpha_{\max}$ 值

$\theta \backslash \delta$	10	20	30	40	50	60
25°	0.40	0.46	0.52	0.57	0.61	0.64
45°	0.44	0.51	0.56	0.60	0.63	0.66
65°	0.47	0.55	0.60	0.64	0.67	0.69

由于地面特性(地表反射率、海拔)对 $\alpha_{\max}$ 的影响随云光学厚度的增加而缩小, 所以在高原地区我们也采用了表 2 的结果。根据表 2 用插值法得到的 $25^\circ-45^\circ\text{N}$ 范围内各

月的 α_{max} 见表 3。

表 3 各月各纬度上的最大行星反射率 α_{max}

北 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
45	55.4	57.1	57.5	58.3	58.5	58.5	58.5	58.4	60.1	59.1	57.8	54.7
43	55.2	56.9	57.3	58.1	58.3	58.4	58.4	58.3	59.9	58.9	57.5	54.4
41	54.9	56.6	57.1	57.9	58.2	58.2	58.2	58.1	59.8	58.6	57.3	54.2
39	54.7	56.4	56.9	57.8	58.1	58.1	58.1	58.0	59.6	58.4	57.0	53.9
37	54.4	56.2	56.7	57.6	58.0	58.0	58.0	57.8	59.4	58.2	56.8	53.7
35	54.2	55.9	56.5	57.5	57.9	57.9	57.9	57.7	59.3	58.0	56.5	53.4
33	53.9	55.7	56.3	57.3	57.8	57.9	57.8	57.6	59.1	57.8	56.3	53.2
31	53.7	55.5	56.1	57.2	57.7	57.8	57.8	57.5	59.0	57.6	56.0	53.0
29	53.5	55.3	55.9	57.1	57.6	57.7	57.7	57.4	58.8	57.4	55.8	52.7
27	53.2	55.1	55.8	57.0	57.6	57.7	57.6	57.3	58.7	57.2	55.6	52.5
25	53.0	54.9	55.6	56.9	57.5	57.7	57.6	57.2	58.6	57.1	55.4	52.3

三、资 料

输入的行星反射率资料取自 1982 年 8 月—1983 年 7 月 Nimbus-7 的月平均资料 (由科罗拉多州立大学 Vonder Haar 教授提供)。资料范围为 22.5° — 40.5° N, 70° —

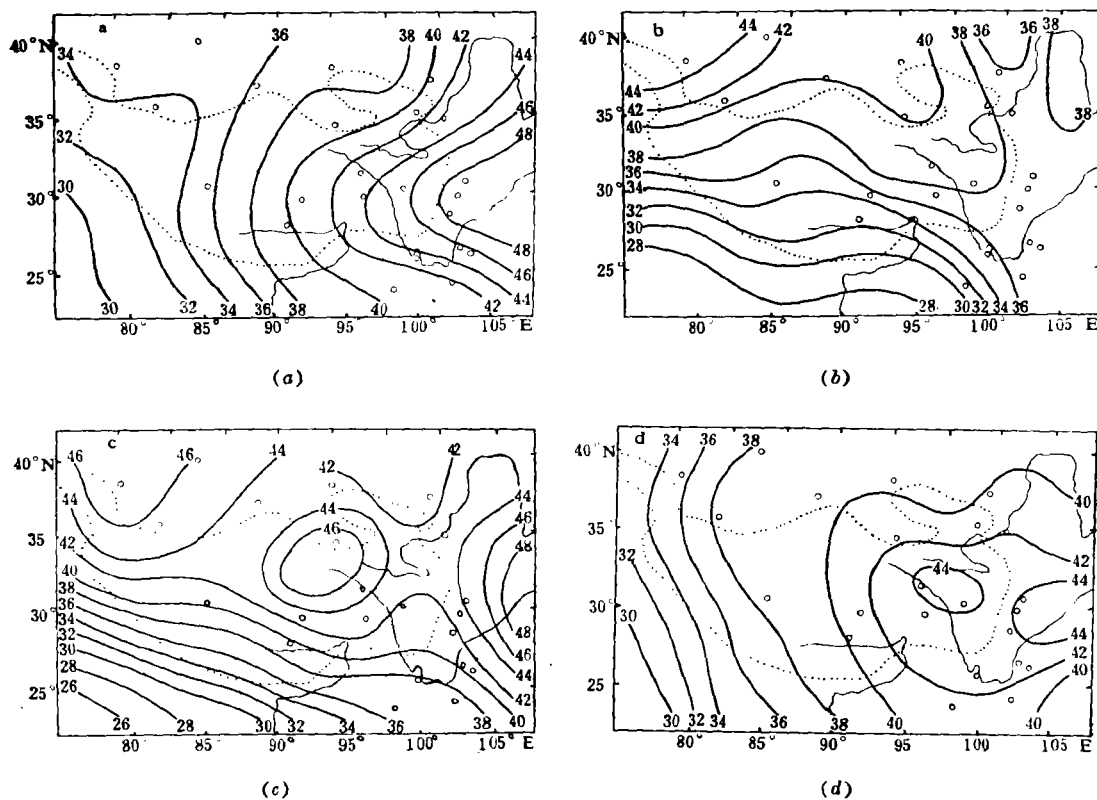


图 2 月平均行星反射率

(a 1982 年 9 月, b 1982 年 12 月, c 1983 年 3 月, d 1983 年 6 月)

110° E, 网格距为 $4.5^\circ \times 5.0^\circ$ 。该资料是根据固定的宽视场辐射仪的观测值经过空间、时间平均得到的。关于资料的处理的详细讨论请参看文献[7,8]。由于本文事先得到的晴天总辐射 Q_0 与最小行星反射率 $\alpha_{\min}$ 资料的空间分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$, 对应于 $2^\circ \times 2^\circ$ 格点上的行星反射率用内插法求得。图 2 a—d 给出了不同季节的四个月份的行星反射率分布图。该图表明高原及其邻近地区行星反射率分布的特征有明显的季节变化: 冬季呈纬向分布, 夏季呈经向分布。

四、敏 感 性 分 析

根据(1)式, 总辐射的计算决定于 3 个基本参数, 即 Q_0 , Q_c (或 K) 与 A_c 。关于 Q_0 的确定及其可能的误差在文献[1]中已有讨论, 对于高原地区晴天总辐射的月平均值而言, 其精度可达 5%。根据(2)式, Q 值的计算通过 A_c 依赖于 α_p , $\alpha_{\max}$ 和 $\alpha_{\min}$ 。现讨论 Q 值对 α_p , $\alpha_{\max}$, $\alpha_{\min}$ 的误差的敏感性。

求(1')式对 α_p 的偏导数, 可得

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha_p} = -Q_0 \frac{1-K}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \quad (7)$$

$$\text{定义} \quad \delta_1 = \frac{1}{Q} \frac{\partial Q}{\partial \alpha_p} \quad (8)$$

根据(7)式与(1')式, 可得

$$\delta_1 = -\frac{1-K}{[1-(1-K)A_c](\alpha_{\max} - \alpha_{\min})} \quad (9)$$

δ_1 即为表示 α_p 的误差对计算值 Q 的影响的一个敏感性参数。设 $K=0.3$, $\alpha_{\max}=0.56$, $\alpha_{\min}=0.20$, $A_c=0.5$, 代入(9)式, 得 $\delta_1=-3.0$ 。这表明 α_p 的 0.1 的误差会导致 Q 的相对误差 30%, 即要使 Q 的相对误差不超过 10%, 要求 α_p 的精度是 0.03。

同理可得表示 $\alpha_{\min}$ 的误差对计算值 Q 的影响的敏感性参数

$$\delta_2 = \frac{1}{Q} \frac{\partial Q}{\partial \alpha_{\min}} = \frac{(1-K)(\alpha_{\max} - \alpha_p)}{[1-(1-K)A_c](\alpha_{\max} - \alpha_{\min})^2} \quad (10)$$

设 $\alpha_p=0.38$, 其它参数取值与上同, 则 $\delta_2=1.5$ 。这表明为了使 Q 的相对误差不超过 1%, 对 $\alpha_{\min}$ 的精度要求是 0.07。类似的分析可知对 $\alpha_{\max}$ 的精度也有同样的要求。

求(1')对 K 的偏导数, 可得

$$\delta_3 = \frac{1}{Q} \frac{\partial Q}{\partial K} = \frac{A_c}{1-(1-K)A_c} \quad (11)$$

δ_3 为表示 K 的误差对 Q 的影响的敏感性参数。对应于 $A_c=0.5$, $K=0.3$; $\delta_3=0.77$ 。即要使 Q 的相对误差不超过 10%, 对 K 的精度要求是 0.13。

比较上述对各参数的精度的要求, 对 α_p 的精度要求较高(较严格), 其次是 $\alpha_{\max}$ 与 $\alpha_{\min}$ 。对 K 的精度要求相对较低。

五、结 果 与 讨 论

根据(2)式得到的权重因子 A_c 是表示云的复盖的一个量, 相当于有效云量。在文献[1]中, 我们曾指出作为天空遮蔽度的量, 日照百分率 S 有较好的代表性, S 与 Q 有较好的

线性关系。因此在计算总辐射之前我们对 23 个测站(测站分布见图 5)的有效云量 A_c 与 $(1-s)$ 进行了比较,发现由于行星反射率资料的空间分辨率较低,较大尺度的空间平滑有缩小 A_c 极端值的效应,即低估了高值的 A_c ,高估了低值的 A_c 。根据 A_c 与 $(1-s)$ 的相关分析,其临界值 $A_c=0.6$,为了“增强”被缩小了的 A_c 极端值,需对 A_c 作下列的变换:

$$A_c^* = \begin{cases} \left(\frac{A_c}{0.8}\right)^{1.775} & 0.0 \leq A_c \leq 0.6 \\ 1 - \left(\frac{1-A_c}{0.6702}\right)^{1.775} & 0.6 < A_c \leq 1.0 \end{cases} \quad (12)$$

式中的系数是根据下面要讨论的 Q 的估算值与观测值的比较分析中的标准误差达最小、相关系数达最大的最佳拟合法得到的。

图 3 为 6 个站总辐射年变化的估算值与地面观测值的比较(卫星估算值为中心尽可能接近于地面测站的 $2^\circ \times 2^\circ$ 区域上的平均值)。图 4 为高原及其邻近地区 23 个站总辐射的估算值与观测值的比较的点聚图。统计分析表明相关系数为 0.90,标准误差 $RMS = 27 \text{ w/m}^2$,平均绝对误差 $AMS = 21 \text{ w/m}^2$ (相当于有效平均总辐射的 11.7%)。两者之间

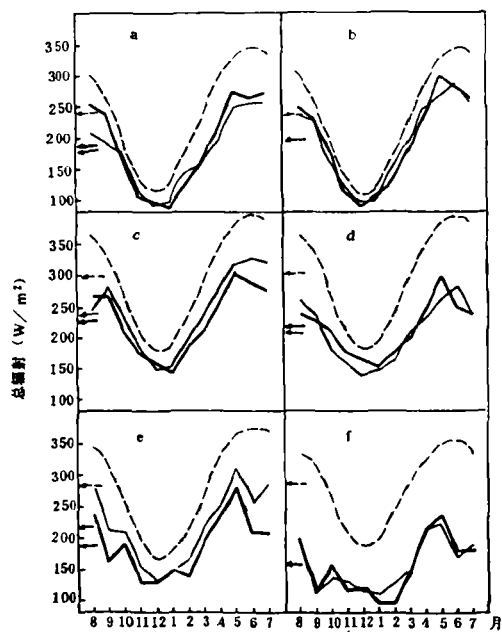


图 3 总辐射月平均值的年变化
(1982 年 8 月—1983 年 7 月)

(箭头: 年平均值; 粗实线: 卫星观测, 细实线: 地面观测, 虚线: 晴天总辐射; a 和田, b 敦煌, c 改则, d 那曲, e 甘孜, f 威宁)

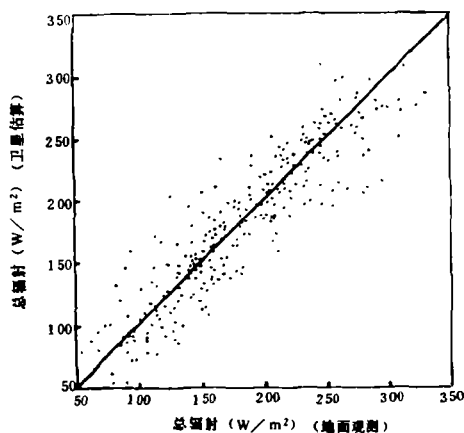


图 4 根据卫星观测得到的总辐射估算值与地面观测值的比较

存在的差别,一方面是由于用于计算 Q 的(1)、(2)式中的参数可能存在的不确定性,输入数据的空间分辨率较低并且每天只有中午的一次取样(相当于不考虑云量的日变化),它们的误差对 Q 的计算的影响已在上节进行了讨论,另一方面也与地面测站的代表性有关,因为受许多局地因子的影响, $2^\circ \times 2^\circ$ 区域上的平均值一般不可能与区域内的具体测站的

实测值一致。

图 5 a-d 为根据卫星观测得到的不同月份的总辐射分布图。(在个别计算值与地面观测值差别较大的地方,适当参考了地面观测值。)得到的分布图较好地反映了纬度、海拔、云量 3 个基本因子对总辐射分布的综合支配作用。比较不同月份的分布,高原始终是一高值中心,但中心位置略有变化,冬、春季(12 月,3 月)偏南,秋季(9 月)偏西。另一特点是,高原以东地区(105°E 以东),主要由于受云的影响,有一稳定的低值区,特别是沿 30°N 存在一很强的总辐射梯度。如 3 月份的总辐射,高原的高值区约为其东部的低值区的 3 倍。这些总辐射的分布特征必然对青藏高原的热力作用产生影响。

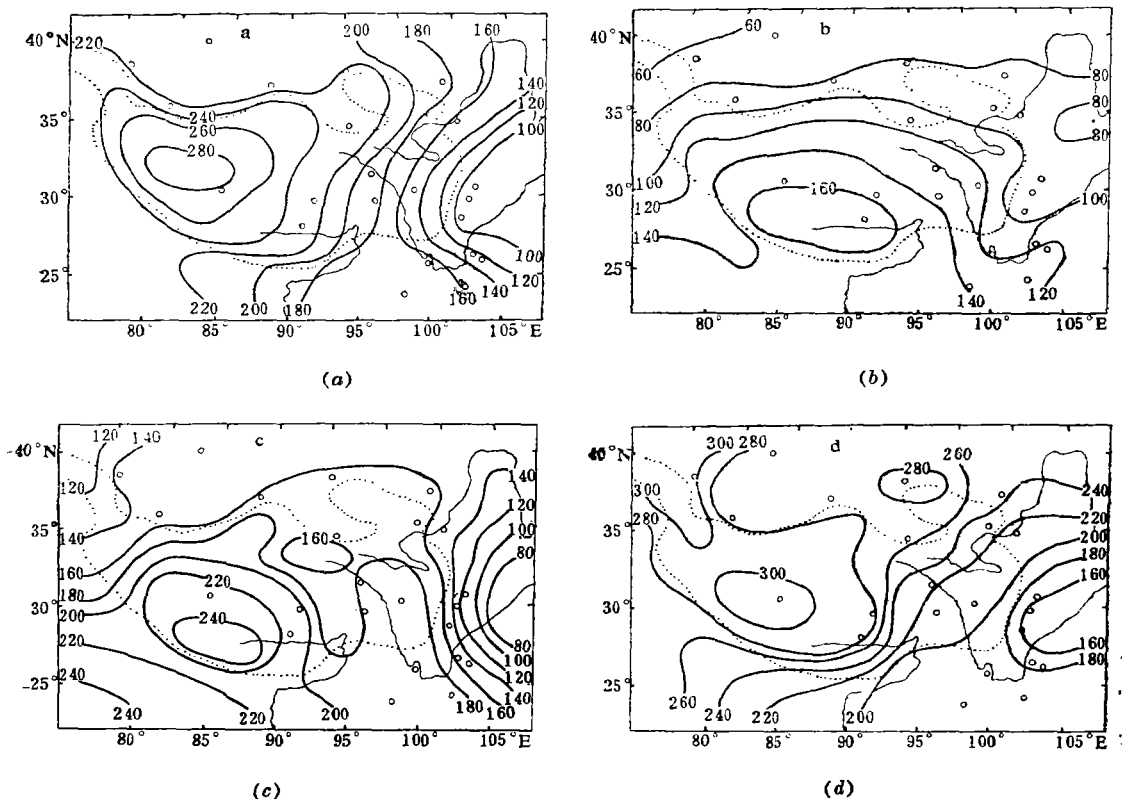


图 5 总辐射月平均值(w/m^2)

(小圆圈表示地面日射站的位置;

a 1982 年 9 月, b 1982 年 12 月, c 1983 年 3 月, d 1983 年 6 月)

六、结 束 语

本文根据模式计算与地面观测的经验结果相结合得到的晴天总辐射 Q_0 与云天对晴天总辐射的比值 K , 利用 Nimbus-7 行星反射率的观测资料估算了青藏高原地区的地面总辐射。它的误差来源包括参数 Q_0 , K , $\alpha_{\min}$ 和 $\alpha_{\max}$ 的确定过程中存在的误差, 但误差的主要来源还是输入数据(行星反射率资料)的空间分辨率与时间取样的代表性问题。空间分辨率和(或)时间分辨率较高的 NOAA 极轨卫星的 AVHRR 资料或对地静止卫星 GMS 的资料的应用将改进输入资料的空间、时间的代表性。

值得指出的是:

1. 本文提出的方法中,参数 Q_0 与 K 的确定是独立于输入数据(行星反射率资料)的,因而不随采用何种输入资料而异,但对表示云量的权重因子 A_c 进行的变换 $A_c^* = f(A_c)$ 则需视采用何种输入资料而定。

2. 由于卫星能提供并将继续不断提供空间、时间上连续的观测资料。本文为利用卫星资料分析青藏高原的总辐射的时、空分布特征的季节变化、年际变化提供了可能途径,因而对研究青藏高原的热力作用有一定的积极意义。

致谢:美国科罗拉多大学 Vonder Haar 教授为本文提供了 1982 年 8 月—1983 年 7 月 Nimbus-7 月平均行星反射率资料,席蕴玉同志整理了有关资料,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 钟强, 青藏高原太阳总辐射的计算方法的讨论, 高原气象, 5, 3, 197—210, 1986。
- [2] Raschke, E., and H. J. Preuss, The determination of the solar radiation budget at the earth's surface from satellite measurements, *Meteorol. Rdsch.*, 32, 18—28, 1979.
- [3] Zhong Qiang, and Li Yin Hai, Satellite observation of surface albedo over the Qinghai-Xizang Plateau region, *Advances in Atmospheric Sciences*, 5, 1988.
- [4] 季国良, 姚兰昌, 王文华, 1982—1983 青藏高原热源野外考察概况, 高原气象, 4, 4 (增刊), 1—6, 1985。
- [5] Ellis, J. S., and T. H. Vonder Haar, Solar radiation reaching the ground determined from meteorological satellite data, *Proc. of the Third Conference on Atmospheric Radiation*, Davis (Cal.), 1978.
- [6] 李银海、钟强, 有云大气中太阳辐射传输的数值试验研究, 高原气象, 5, 3, 211—225, 1986。
- [7] Jacobowitz, H., H. V. Soule, H. L. Kyle, F. House and the NIMBUS 7 ERB Experiment Team, The earth radiation budget experiment: an overview, *J. Geophys. Res.*, 89, (D 4), 5021—5038, 1984.
- [8] Jacobowitz, H., R. J. Tighe and the NIMBUS 7 ERB Experiment Team, The earth radiation budget derived from the NIMBUS 7 ERB experiment, *J. Geophys. Res.*, 89, (D 4), 4997—5010, 1984.

ESTIMATION OF GLOBAL RADIATION OVER THE QINGHAI-XIZANG PLATEAU FROM NIMBUS-7 PLANETARY ALBEDO DATA

Zhong Qiang Sui Jine

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the solar global radiation at the surface over the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas is estimated from Nimbus-7 monthly average planetary albedo data (August 1982 to July 1983) based on "physical model method (Raschke and Preuss, 1979)"

Maps of the satellite estimated monthly average global radiation show the expected patterns, which are mainly dominated by latitude, elevation and cloud cover. The estimated global radiations were compared with surface measurements for 23 stations of radiation network in the related region. The statistical correlation analysis indicates that the standard error $RMS=27 \text{ W/m}^2$ mean absolute error $ABS=21 \text{ W/m}^2$ and the correlation coefficient $R=0.90$. The error sources are discussed along with the sensitivity study.