

应用 ISCCP 云资料反演青藏高原地面总辐射场[※]

翁笃鸣 高庆先 刘 艳
(南京气象学院应用气象学系, 南京 210044)

摘 要 利用 ISCCP 云资料和青藏高原日射资料, 讨论并提出了该地区地表总辐射的气候反演方法。据此计算出 71.25 ~103.75°E, 28.75 ~41.25°N 间 2.5°×2.5°经纬度网格点及高原 70 个站的各月平均总辐射通量密度, 绘制出其在高原的分布图。进一步揭示和证实了高原总辐射场的基本特征。
关键词 青藏高原, 总辐射, 气候反演
分类号 P422.4

关于青藏高原总辐射的气候计算问题, 文献中已有不少讨论^[1~7]。但因受资料条件限制, 已有研究多侧重于站点较多的东部地区, 而对高原主体的中、西部广大地区仍了解不多。因此, 研制利用卫星资料反演地表总辐射场的方法, 便成了当前青藏高原辐射气候研究的重要科学问题。在这方面钟强曾作过有意义的尝试^[8,9]。

本文拟根据国际卫星云气候计划(ISCCP)的总云量资料^[10], 结合新提出的晴天总辐射参数化方法^[11], 研制青藏高原总辐射场的气候反演方法。卫星总云量取自 ISCCP 1984 ~ 1988 年平均的逐月网格点资料, 网格距为 2.5°×2.5°经纬度, 各站点所需卫星云量可由格点资料内插得到。另外, 还使用了高原及周围地区 15 个日射站资料和 70 个站的气候平均资料。

1 总辐射的气候反演方法

利用卫星云资料反演地表总辐射时, 针对反演地区无气象资料特点, 可采用如下反演式

$$Q = Q_0 f(n) \tag{1}$$

式中, Q 为地表总辐射; Q_0 为晴天总辐射; $f(n)$ 为以卫星云量 n 表示的天空遮散度函数。因此, 正确确定晴总辐射和函数 $f(n)$ 是解决总辐射气候反演的关键。

1.1 晴天总辐射的气候计算方法

最近, 我们以 μ 理论式

$$Q_0 = \frac{I_0 \sin h}{1 + f_m} \tag{2}$$

为基础, 提出晴天总辐射的参数化方法^[11], 式中 Q_0 为晴天总辐射通量密度; I_0 为太阳常数; h 为太阳高度; m 为大气光学质量, 近似地可取 $m = \frac{1}{\sin h}$; f 为表征大气对太阳辐射的削弱系数。 f 与水汽压 e 的经验表达式^[10]为

※ 国家攀登 B 计划项目“青藏高原试验”预研究成果
收稿日期: 1995- 09- 29; 改回日期: 1996- 10- 01

$$f = A + B \ln(1 + e)$$

(3)

其中

$$A = 0.183 \frac{p}{p_0}; \quad B = 0.0054 + 0.0598 \frac{p}{p_0}$$

这里, p 、 p_0 分别为测点和海平面气压。经检验, 利用 (3) 式反演 (2) 晴天总辐射的平均相对误差为 4.1%。

由于在多数情况下 ($e \geq 5\text{hPa}$), (3) 式中 e 与 f 呈近似线性。所以该式也适合于气候计算。因此, 月平均晴天总辐射通量密度可通过积分 (2) 式得到^[7], 有

$$\left. \begin{aligned} Q_0 &= \frac{I_0}{\pi R^2} \left[(A - f) \omega + B \sin \omega + \frac{2f^2}{(A + f)^2 - B^2} \lg^{-1} \left(\frac{A + f - B \lg \frac{\omega}{2}}{A + f + B \lg \frac{\omega}{2}} \right) \right] \\ &\quad \text{对 } (A + f)^2 > B \\ Q_0 &= \frac{I_0}{\pi R^2} \left[(A - f) \omega + B \sin \omega + \frac{2f^2}{B^2 - (A + f)^2} \times \right. \\ &\quad \left. \ln \frac{\frac{B + A + f + B - (A + f) \lg \frac{\omega}{2}}{B + A + f - B - (A + f) \lg \frac{\omega}{2}}}{\frac{B + A + f + B - (A + f) \lg \frac{\omega}{2}}{B + A + f - B - (A + f) \lg \frac{\omega}{2}}} \right] \\ &\quad \text{对 } (A + f)^2 < B \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这里 $A = \sin \varphi \sin \delta$; $B = \cos \varphi \cos \delta$; $\omega = \arccos(-\lg \varphi \delta)$ 为日落时角, φ 、 δ 分别为纬度和赤纬, $\frac{1}{R^2}$ 为日地平均距离订正。

据此计算了高原各日射站的逐月平均晴天太阳总辐射值。为了比较, 表 1 列出本文(简称本方法)与文献 [6] (简称 [6] 方法) 对拉萨等 6 站的统计结果。可以看出两者数值基本一致。由于本文计算的是多年平均值, 而文献 [6] 则只针对个别年份, 所以存在一定差异是自然的。

表 1 青藏高原各站晴天总辐射两种方法计算结果的比较

Table 1 Comparison of results from two schemes concerning clear-sky total radiation on a station basis over the target area $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

	1 月		4 月		7 月		10 月	
	本方法	[6]方法	本方法	[6]方法	本方法	[6]方法	本方法	[6]方法
那曲	181.9	193.4	347.4	348.2	370.3	388.3	247.2	254.8
改则	174.8	190.0	344.5	345.6	373.3	386.3	248.2	251.3
拉萨	185.3	198.6	337.1	346.1	357.5	381.8	252.8	246.1
甘孜	169.1	181.8	327.1	330.0	354.6	368.3	232.3	240.6
民勤	119.2	133.9	291.4	291.1	329.5	340.0	184.2	194.4
敦煌	107.5	121.2	284.1	284.7	326.5	337.3	177.1	184.0

1.2 经验函数 $f(n)$ 的形式

根据经验和简单的理论考虑, 拟合遮蔽函数 $f(n)$ 可分两步进行。第一步先作经验拟合, 以证实利用卫星云资料建立经验函数的可能性及其误差估计; 第二步根据边界条件对经验函数作相应调整, 使之更具通用性。

第一步, 可按下列三种函数形式进行拟合, 即

$$Q = Q_0(a_1 + b_1 n)$$

(5)

$$Q = Q_0(a_2 + b_2 n^2)$$

(6)

$$Q = Q_0(a_3 + b_3 n + c n^2)$$

(7)

式中, a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 、 a_3 、 b_3 、 c 均为经验系数。根据高原及其周围 15 个日射站资料, 分站依次进行拟合, 发现利用卫星云资料拟合是可行的, 其中以 (6) 式的效果最好。该式对各站拟合的平均误差为 $9.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均相对误差 4.6%, 相关比为 0.970。各站的系数 a_2 大致都在 0.95 ~ 1.05 间, 平均 0.995, 基本满足云量为零时, $a_2 = 1$ 的边界条件。

但需指出, 虽然本文在拟合 (6) 式时, 使用了各站卫星云量的 5 年平均值和总辐射的长年平均资料, 但拟合效果仍较满意。究其原因, 可能与总云量的 5 年平均值已在较大程度上趋近常年值的缘故有关。

在此基础上, 第二步可根据边界条件把总辐射反演式调整为

$$Q = Q_0(1 - c n^2)$$

(8)

并据此针对各站逐月实测总辐射 Q 、晴天总辐射 Q_0 和卫星云量 n , 倒求各月 c , 然后求出年平均 c 值。继而寻求 c 的参数化形式。根据 (8) 式, c 可理解为云对太阳辐射的平均削弱系数, 其大小应与云的物理特性有关。得出 c 的参数化式

$$c = 0.0782e + 0.0699H - 0.0423$$

(9)

这里 c 、 e 均为各站的年平均值, H 为海拔高度(千米), 经检验, c 的平均拟合误差为 0.044, 平均相对误差为 7.8%, 相关比为 0.684。根据对 (8) 式的灵敏度试验, 有

$$\frac{\Delta Q}{Q} = - \frac{c n^2}{1 - c n^2} \frac{\Delta c}{c}$$

在平均情况下($e = 0.6$, $n = 0.6$), 确定 c 产生 10% 的误差, 可引起 2.2% 的总辐射误差。由此可见, 引入 c 参数化对 (8) 式精度的影响是比较小的。

将 (9) 式回代 (8) 式, 并对高原各站总辐射进行反演检验, 最后得出平均误差为 $14.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均相对误差为 7.1%, 相关比为 0.938。表 2 列出反演误差的分级统计。图 1 还给出反演值与实测值的关系。

表 2 应用 (8) 式反演高原总辐射的相对误差 (%) 分级统计

Table 2 Categorized statistics of relative errors (%) of (8)-retrived total radiation of the plateau

	≤ 5.0%	5.1% ~ 10.0%	10.1% ~ 15.0%	15.1% ~ 20.0%	> 20.1%	总和
频数(次)	80	49	32	15	4	180
频率(%)	0.44	0.27	0.18	0.08	0.02	0.99

由表 2、图 1 可见, 总辐射的反演效果是比较好的。虽然 (8) 式的拟合误差较之 (6) 式有一定增大, 但这是反演公式在实用化过程中难以避免的。

(3)、(4)、(8)、(9) 式构成了利用卫星云资料反演青藏高原地表总辐射的统一模式。本文据

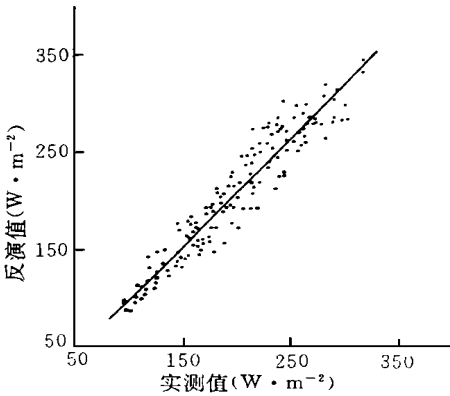


图 1 青藏高原各站总辐射反演值与实测值的关系
Fig. 1 Total radiation retrieval and measurements for the study stations over the plateau

此反演出高原及周围地区 70 个气象站和 71.25 ~ 103.75 E, 28.75 ~ 41.25 N 范围内 2.5° × 2.5° 60 个网格点逐月和年平均的地表总辐射通量密度。

2 总辐射反演式在无资料地区的应用

利用卫星云资料反演无资料地区总辐射, 需先确定 f 和 c 值。根据(3)、(9)式, 它们主要与各格点的水汽压和拔海高度有关。格点的拔海高度可按地形图确定, 各点水汽压可通过绘制青藏高原水汽压廓线图或建立水汽压廓线式解决。得出如下形式的水汽压廓线方程

$$e_{Hi} = e_0 \exp(-b_i H) \tag{10}$$

表3以1、7月和年平均为例给出适用于高原东、西部及平均的经验系数 e_{0i} 和 b_i 。表中以 95 E 为界, 此线以西为高原西部区, 以东为高原东部区。

表3 青藏高原水汽压廓线方程的 e_0 和 b_i 值

	e_{0i}			b_i		
	东部	西部	平均	东部	西部	平均
1月	24.5	3.5	6.2	0.722	0.439	0.552
7月	32.1	17.6	21.7	0.293	0.226	0.238
年平均	25.7	7.4	12.9	0.412	0.239	0.276

可见, 解决高原无资料地区地表总辐射气候反演的关键在于准确确定各网格点的拔海高度。可分别就(3)、(9)式对 H (或 p) 的灵敏度作出估计。从对高原西部所作的试验看, 拔海高度取 4.5km 和 4km 的格点, 其反演的月平均总辐射通量密度差一般不超过 $6W \cdot m^{-2}$, 举例可见表4。由此看来, 如确定的网格点拔海高度的误差控制在 0.5km 或 1km 以内, 由此引起的反演总辐射的误差可能是不大的。

表4 反演 86.25 E, 31.25 N 格点 4.5km 和 4.0km 高度晴天和平均总辐射对比

Table 4 Comparison of clear-sky retrieval to mean total radiation at 4.5 and 4.0 km height for the gridpoint at 31.25 N, 86.25 E

	Q_0		Q	
	4.5km	4.0km	4.5km	4.0km
3月	293.2	287.7	258.1	252.7
6月	381.7	374.9	337.1	330.4
9月	303.2	297.5	264.0	258.5
12月	169.5	165.6	161.4	157.5

3 青藏高原地表总辐射的地理分布

青藏高原地表总辐射的地理分布突出地反映了拔海高原的决定性影响。此外, 纬度和天气气候的作用也较明显。从整体上说, 无论在 1、7 月或年平均分布图上(图2~4)。整个高原为一闭合的高值区, 高中心位于高原主体的西或西南部。高值脊随地形高度由此向横断山脉和黄土高原伸延。总辐射等值线走向与地形高度变化配合较好。在高原东部边缘由于地形高度急剧

降低, 等值线密集, 且呈经向分布。以上是高原总辐射分布的总背景, 在不同季节可因纬度和天气气候影响而有所变动。

冬季(1月、图2), 在天文因素影响下, 高原北部总辐射等值线的纬向特点较明显, 高中心向南压缩。

夏季(7月、图3), 在西南季风作用下, 高原东和东南部地区先后进入雨季, 云量明显增多, 总辐射高中心西移至改则周围, 中心强度超过 $320 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在藏东南雅鲁藏布江流域和横断山脉的迎风侧总辐射显著降低, 并成为全国总辐射的主要低值区。与此相对应, 高原东缘的等值线更密集。高原北缘因所处高空西风槽的迎风部位, 云量增多, 可分析出一总辐射的小低值区。

总辐射的年分布形势基本上与夏季一致。

高原地区总辐射的年变化基本上都呈单峰型, 最大、最小值分别在夏季和冬季月份出现(图略), 其中以在西部和北部较典型。在东部和东南部地区则因夏季风强烈影响而使年变曲线在夏季产生某些不对称, 最大值偏于雨季前的5、6月。各地总辐射年较差大致保持随纬度递增的趋势(图略)。

4 讨 论

本文应用卫星云资料对青藏高原地表总辐射场进行了气候反演, 初步估计效果是比较好的。将本文反演的青藏高原地表总辐射场与有关文献的结

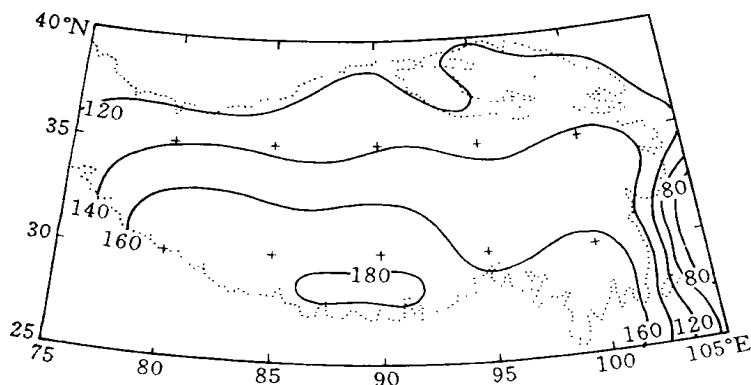


图2 1月青藏高原地表总辐射分布(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 2 Surface total radiation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) distribution in the plateau for January

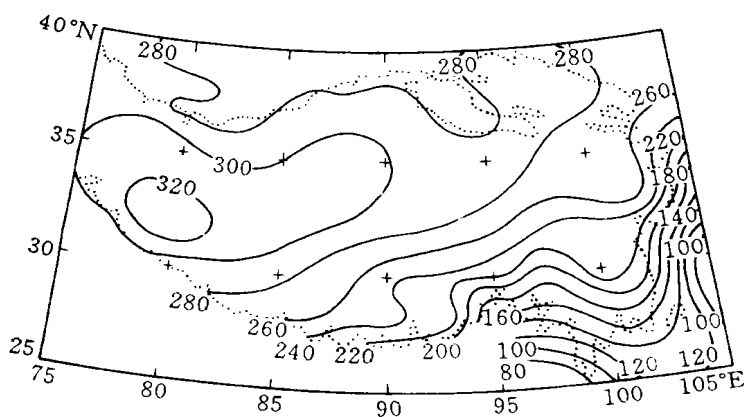


图3 7月青藏高原地表总辐射分布(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 3 Surface total radiation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) distribution in the plateau for July

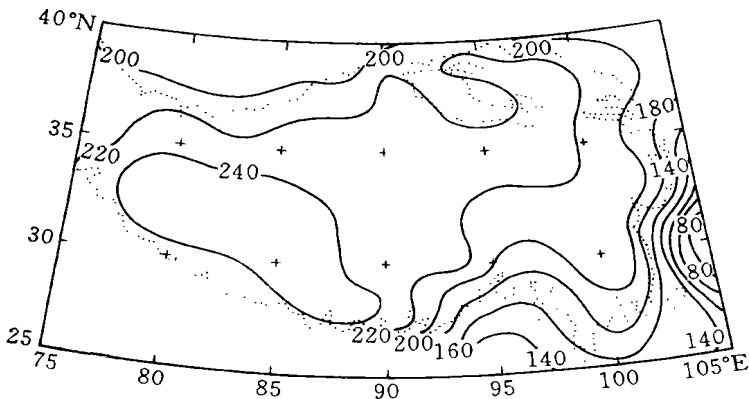


图4 青藏高原年平均总辐射分布(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 4 An annual-mean basis total radiation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) distribution in the plateau

果相比较,发现总的特征是一致的。本文的主要改进在于:(1)初步提出青藏高原地表总辐射的气候反演方法;(2)使高原中、西部的总辐射反演值可能更符合实际;(3)总辐射的高中心位置西移至更干燥的高原腹地;(4)使等值线分布可能更合理,如高原北缘的小低槽。

本文的不完善之处在于:(1)建立总辐射反演式所依据的日射站资料还不很多,反演式本身还需进一步改进、完善;(2)所提反演方法要求提供各推算点准确的拔海高度和水汽压值,这对高原地区尚有一定困难。

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. 气象学报, 1963, 33(1): 78 ~ 95
2 陆渝蓉, 高国栋. 我国辐射平衡各分量计算方法及时空分布特征研究(): 总辐射和有效辐射. 南京大学学报(自然科学版), 1976, (2): 89 ~ 108
3 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法. 南京气象学院学报, 1982, 5(2): 196 ~ 206
4 潘守文. 青藏高原太阳总辐射的计算方法. 见: 青藏高原气象科学实验文集》编辑组编. 青藏高原气象科学实验文集(二). 北京: 科学出版社, 1984, 1 ~ 11
5 沈志宝. 青藏高原地面总辐射的地理分布及其季节变化特点. 高原气象, 1987, 6(4): 326 ~ 334
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. 南京气象学院学报, 1992, 15(2): 151 ~ 159
7 翁笃鸣, 高建芸. 青藏高原地表净辐射的气候学研究. 南京气象学院学报, 1993, 16(4): 464 ~ 470
8 钟 强. 青藏高原太阳总辐射的计算方法讨论. 高原气象, 1986, 5(3): 197 ~ 210
9 钟 强, 畦金娥. 利用 Nimbus-7 行星反射率资料估算青藏高原地区的总辐射. 气象学报, 1989, 47(2): 165 ~ 172
10 William B, Schiffer R A. ISCCP cloud products. Bull Amer Meteor Soc, 1991, 72(1): 2 ~ 20
11 Weng Duming, Sun Zhian, Li Ju, et al. A parameterization scheme for clear-sky total radiation, The first session of International workshop on TIPEX (IWTE-1) 1- 3, August, 1995, China Meteorological Administration, Beijing China. 29 ~ 31

ISCCP DATA RETRIEVAL OF QINGHAI-TIBETAN
SURFACE TOTAL RADIATION

Weng Duming Gao Qingxian Liu Yan
(Department of Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Abstract A climatic retrieval method is developed for the surface total radiation patterns over the Qinghai-Tibetan plateau in terms of ISCCP cloud and actinometric data and adopted to investigate the monthly mean flux density for a gridded band with $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ resolution in $28.75^{\circ} \sim 41.25^{\circ} \text{N}$, $31.25^{\circ} \sim 103.75^{\circ} \text{E}$ and 70 stations, alongside patterns on a monthly basis, thereby further revealing and confirming basic features of the element under study.

Keywords Qinghai-Tibetan plateau, total radiation, climatic retrieval