

鄂尔多斯高原及周边地区地面温度的计算研究

陆文杰

(国家卫星气象中心,北京 100081)

提 要

采用一种分裂窗方法,利用 NOAA-AVHRR 资料计算了鄂尔多斯高原及周边地区的地面温度。用 3、4、5 通道的数据计算地面发射率,其后以发射率和 4、5 通道亮温结合计算地面温度。通过与当地气象站接近时次的实测资料相比,夜间计算差值在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内的占 80%,白天占 67%,最大差值 -3.8°C 。作为一种宏观地表监测手段,该方法可行的。

关键词: 地面温度 亮温 分裂窗方法 发射率

引 言

应用 AVHRR 红外通道资料计算地面温度的方法,国内外学者已有不少论述。其中不少方法都建立在对大气辐射传递方程的统计模拟上,采用单一通道进行反演,而用多通道方法诸如成功地用于海面温度反演的分裂窗方法进行陆面温度计算的不多。C. Oettle 等^[1]对陆面温度的估算方法作过比较分析,认为在应用 NOAA 资料的计算方法中,结合辐射传输模式和探空资料的 AVHRR 单一通道方法;结合 HIRS(高分辨率红外辐射探测仪)资料和 AVHRR 4,5 通道资料的方法以及 AVHRR 4,5 通道的分裂窗方法,在不考虑地面光谱发射率变化的情况下,分裂窗方法(AVHRR 4,5)具有优越性。对于应用分裂窗的方法求算地面温度需要首先获得地面发射率的数据,在计算较大范围的地面温度时还应考虑发射率的光谱变化。

由分裂窗方法计算陆面温度需要有地面发射率的数据。在 Becker 等^[2]提出的“与温度无关热红外光谱指数(TISI)”概念中,提出了由 TISI 和几个红外通道辐射值确定地

面通道放射率的思路,由此可以计算出象元尺度上的地面通道放射率;在计算地面放射率时需要考虑大气状况的影响。这样,用来自同一卫星的资料就几乎可以完成一较大区域的地面温度计算,这在地球环境的监测中无疑是相当便利的。

鉴于 Becker 和 Li 的方法的可行性,本文试用其计算了鄂尔多斯高原及周边地区的地面温度,这一区域跨内蒙古高原和黄土高原之间,地处大陆内部。根据温度和水分的情况,这一区域被划为温带干旱和半干旱气候区。从土地覆盖类型上看,有黄绵土、粟钙土、灌淤土和风沙土等多种土壤。受气候和土地条件的制约,这一区域除黄河灌区等地外,植被相对稀少,一遇降水和大风侵袭,很容易造成土壤流失和沙漠外缘的延伸。因此这一地区的地面温度反演有其特殊性和复杂性,通过计算也可以对该方法在这一地区的适用性作出评价,并对其宏观地表特征及环境研究提供参考。

1 计算方法

围绕参考温度 T_0 的适当温度变化,

Planck 函数可以很好地近似表达为^[2,3];

$$B_\lambda(T) \approx \alpha_\lambda(T_0) T^{n_\lambda(T_0)} \quad (1)$$

其中:

$$n_\lambda(T_0) = \frac{C_2}{\lambda T_0} \left[1 + \frac{1}{\exp(C_2/\lambda T_0)^{-1}} \right] \quad (2)$$

$$\alpha_\lambda(T_0) = \frac{B_\lambda(T_0)}{T_0^{n_\lambda(T_0)}} \quad (3)$$

$$C_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

对于通道 i 和地面亮温 T_g , Planck 函数可以近似为:

$$B_i(T_{g_i}) \approx \alpha_i T_{g_i}^{n_i} \quad (4)$$

这里 α_i 和 n_i 是取决于 T_{g_i} (参考地面亮温) 的通道常数。

1.1 地面发射率的计算

由“与温度无关的红外光谱指数 (TISI)”概念^[2], 3 个通道的 TISI 可以写成

$$\varepsilon_3(\theta) = 1 - \frac{\pi(TISI_d - TISI_n)B_4(T_{g4d})^{a_4}B_5(T_{g5d})}{MR_{g3}^2(\theta_s)\cos\theta_s \cdot f_3(\theta_s, \theta)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_i = \left\{ \frac{\varepsilon_3}{TISI_{54n} \cdot TISI_{4n}} \right\}^{(n_{54}+n_4)^{-1}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_i^{n_{54}} TISI_{54n} \quad (10)$$

式(8)、(9)、(10)中的 $R_{g3}^2(\theta_s)$ 是 CH3 地面太阳辐照度; $f_3(\theta_s, \theta)$ 是角度形式的地面反射因子, 如果地面是朗伯面, 这个因子等于 1; θ_s 和 θ 为太阳天顶角和观测角; $n_{54} = n_5/n_4$ 。

1.2 计算地面温度的分裂窗方法

由辐射传输方程以及对辐射传输过程中不易确定的某些因子作如下假定^[4]:

- (1) 假定地面是朗伯面;
- (2) Planck 函数在亮温 T_g 附近是线性的;
- (3) 大气吸收足够小;
- (4) 水汽的光谱吸收系数可用气压与温度的函数来表示。

对于 AVHRR 的 4、5 通道, 可写出计算地面温度的分裂窗公式为:

$$T_s = A_0 + P(T_4 + T_5)/2 + M(T_4 - T_5)/2 \quad (11)$$

式中, T_s , T_4 和 T_5 分别为地面温度, 4、5 通

(对于 AVHRR 的 CH3, CH4 和 CH5):

$$TISI_n = M \cdot \frac{B_3(T_{g3n})}{B_4(T_{g4n})^{a_4}B_5(T_{g5n})} \quad (5)$$

$$TISI_d = M \cdot \frac{B_3(T_{g3d})}{B_4(T_{g4d})^{a_4}B_5(T_{g5d})} \quad (6)$$

式中, 3 个通道的指数系数满足关系:

$$a_1 n_1 - a_2 n_2 - a_3 n_3 = 0$$

选择 $a_1 = a_2 = 1$, 则有:

$$n_3 - a_4 n_4 - n_5 = 0 \quad (7)$$

在式(5)、(6)中, 下标 n, d 分别表示夜间和白天, 系数 M 和式(7)中的 a_i, n_i (这里 $i = 3, 4, 5$) 可以由式(2)、(3)直接或间接求出。

这样, 由 AVHRR 的 CH3, 4 和 5 辐射亮度值以及 TISI 求算相应地面发射率的公式^[5]:

道亮温。 A_0, P, M 为系数。

$$P = 1 + a(1 - \varepsilon)/\varepsilon + \beta \Delta\varepsilon/\varepsilon^2$$

$$M = \gamma' + d(1 - \varepsilon)/\varepsilon + \beta' \Delta\varepsilon/\varepsilon^2$$

F. Becker 等^[4]用统计方法对 2180 种状况进行模拟, 对于 NOAA-11 卫星有:

$$A_0 = 1.274; a = 0.15616;$$

$$\beta = -0.482; \varepsilon = \frac{\varepsilon_4 + \varepsilon_5}{2}$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5; \gamma' = 6.26;$$

$$d = 3.98; \beta' = 38.33$$

1.3 误差分析

由式(11)计算地面温度 T_s , 主要受地面发射率的影响, 式(11)本身在推导过程中由于 T_4 与 T_5 的相同权重, 已消去了主要的大气影响项, 因此大气状况对方法的影响主要体现在发射率的计算上。在地面发射率的计算中, 获得 T_{g_i} 和 TISI 要进行大气修正, 但由于计算过程中大气影响在一定程度上被削弱, 使得地面发射率对大气的影响不十分敏感。

由大气条件在 ε_3 上产生的相对误差为:

$$\frac{\Delta \epsilon_3}{\epsilon_3} = -\frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3} \times \left(\frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta(TIST_d - TISI_n)}{TISI_d - TISI_n} \right) \quad (12)$$

对 ϵ_4 和 ϵ_5 有:

$$\frac{\Delta \epsilon_4}{\epsilon_4} = \frac{1}{n_{s4} + a_4} \left[\frac{\Delta \epsilon_3}{\epsilon_3} - \frac{\Delta TISI_{s4}}{TISI_{s4}} - \frac{\Delta TISI_n}{TISI_n} \right] \quad (13)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_5}{\epsilon_5} = n_{s4} \frac{\Delta \epsilon_4}{\epsilon_4} + \frac{\Delta TISI_{s4}}{TISI_{s4}} \quad (14)$$

式(12)中 $k = \frac{\pi B_4(T_{gsd})^{e_4} B_5(T_{gsd})}{MR_{gs}^2(\theta_s) \cos \theta_s}$

如果给出一组代表值如:白天地面温度 310K,夜间 285K,CH3 反射率为 0.15,采用一种大气模式,如中纬度夏季模式作大气订正^[5],则可得到: $\frac{\Delta \epsilon_3}{\epsilon_3} \approx 1.7\%$, $\frac{\Delta \epsilon_4}{\epsilon_4} \approx -0.1\%$, $\frac{\Delta \epsilon_5}{\epsilon_5} \approx -0.8\%$; $\delta T_s \approx -0.5K$ 。

发射率对地面温度计算的影响,除了它的绝对值大小外,还有其光谱相关性。由式(11),使 $(T_e + T_s)/2 = 300$, $(T_e - T_s)/2 = 1$ 可得到:

$$\delta T_s \approx -51\delta\epsilon - 107\delta(\Delta\epsilon) \quad (15)$$

由此可见 $\delta(\Delta\epsilon)$ 引起的 T_s 误差是 $\delta\epsilon$ 的两倍以上,如果 $\delta\epsilon = \delta(\Delta\epsilon) = 0.01$,那么 T_s 的误差可达 1.6K。

从以上分析可以认为:在计算发射率过程中,用某种相应的大气模式进行订正是可行的。在计算地面温度的过程中,由于一般 $\epsilon_4 > \epsilon_5$ 所以 $\Delta\epsilon$ 往往为负值,故 T_s 的误差影响会减小。

2 资料处理

本文采用的资料为经过预处理的 1991 年 3 月 31 日 18 时 51 分(GMT)和 4 月 1 日 06 时 13 分(GMT)两条轨道的 NOAA-AVHRR 资料。

经过定标和订正处理的通道资料再作投影,作成投影文件,其计算范围为:36.5—41.5°N,106.5—111.5°E。

3 计算结果和分析

首先,对计算范围内各辐射值作大气修正,采用 Lowtran 软件计算了 1976 年 U.S. 标准大气模式,得到了以该大气模式为近似大气状况下的 CH3、4、5 的辐射修正值。

对经过上述处理的资料还需作进一步的图象配准,由于本方法需要两个时相辐射资料,因此需将两个时次的图象资料精确迭置。在图象配准步骤中,本文采用整幅图象的分割配准方法,选取多个地物目标作纠正点,分别做位置校正,然后再合并迭置,使两幅图象的地物目标经纬度与地理经纬度一致。

根据式(8)、(9)和(10)可以求出计算区内逐象元的通道发射率。图 1 和图 2 分别表示了通道 5 和通道 3 的发射率分布等值线;通道 4 的发射率与通道 5 接近。

由图 1 可见,河套平原、土默川和宁夏平原都呈现了较高的发射率,除这些传统农耕区外,黄土高原也表现出相对高的发射率;沙漠及零散分布的沙化土地发射率最低,如乌兰布和及库布齐沙漠、毛乌素沙地,发射率在 0.94 以下。最高发射率出现在阴山、吕梁山等积雪区,达 0.97(如图 1)。

这一结果反映了不同地面类型的发射率差异,疏松、保水性好的优良耕作土和干燥沙土在发射率上有明显的差别。

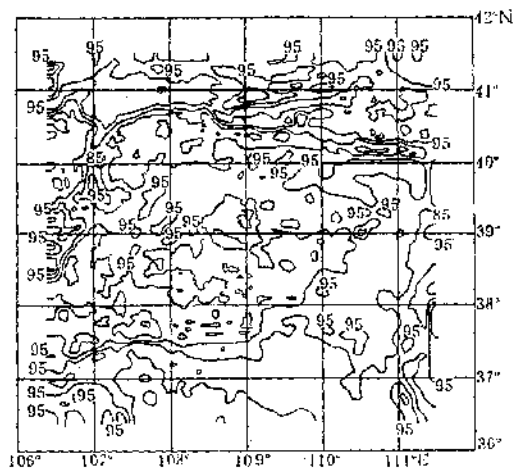


图 1 计算的 CH5 发射率/%

图2给出的是通道3的地面发射率等值线,CH3发射率数值较低,分布相对分散,对地面类型的表现也更充分。图2中0.59所围的面积分别有乌兰布和、库布齐沙漠和毛乌素沙地以及零散沙丘,一些被流沙覆盖的平原也表现出这样的发射率。0.61线所围区域反映了干旱的荒漠草原,其土质已严重沙化。鄂尔多斯高原大部处在0.63线界内,其间杂有耕地,也有多处零散的0.57线所围的小块面积,多为受风与流水剥蚀的沙性丘陵。0.63—0.67线所围面积表示了剥蚀程度不同的黄土塬地。0.67—0.69等值线范围附近为农耕区;0.70以上的界值代表了积雪、融雪区域以及水体。

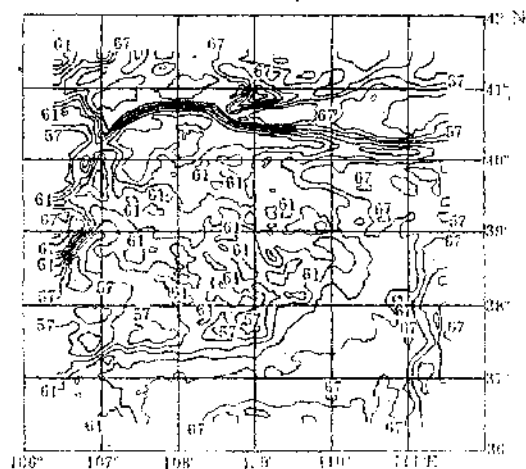


图2 CH3发射率/%等值线

由计算出的4、5通道发射率,代入式(11)可得到这一区域的地面温度。图3、4分别是计算得出的夜间和白天的地面温度。

夜间温度变化较小,在-13—6℃之间,最低为山区的积雪表面,最高为水体,农耕地区和沙漠地区有次高和次低的温度。

白天地面温度场分布变化较大,从7℃直到40℃以上。沙漠地面温度最高,达40℃以上,而雪盖山区的温度最低,农耕地区多在25℃左右,反映了耕作土壤孔隙多,结构疏松

和热容量大的特点,黄土丘陵底部温度要高于顶部。

计算的地面温度准确性需要以实测资料验证。取计算区域内全部基准气象站的实测地面温度与计算结果比较。计算的地面温度为区间值,值域宽度为0.5℃。实测值的观测时间夜间为18:00(世界时),白天为14:00(世界时)。比较结果如附表(共20个站资料)。

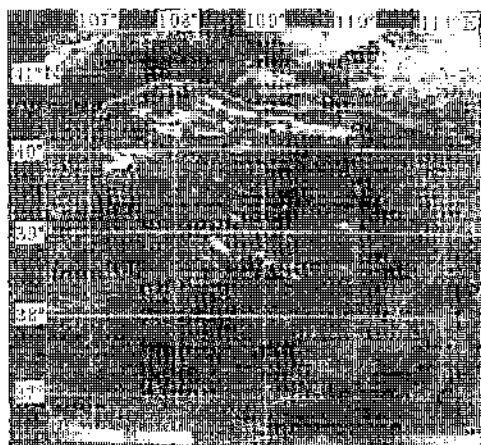


图3 计算的夜间地面温度(1991.3.31)

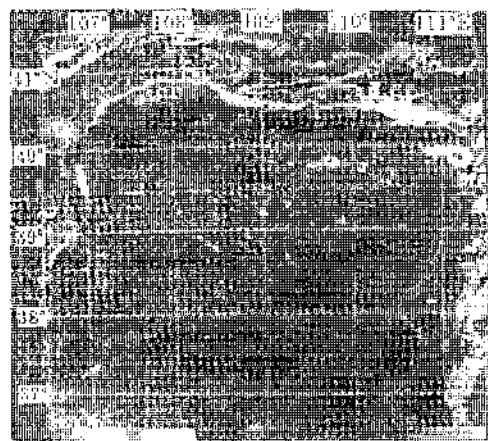


图4 计算的白天地面温度(1991.4.1)

附表 实测与计算地面温度/°C的比较

站	1991年3月31日			1991年4月1日		
	实测	计算	差值	实测	计算	差值
	18:00	18:51		06:00	06:13	
临河	-3.9	-3.7--3.2	0.2	31.6	28.7--28.2	-2.8
惠农	-7.0	-3.2--2.7	3.8	35.0	32.2--31.7	-2.7
陶乐	-6.8	-7.2--6.7	0.0	35.5	35.2--34.7	-0.2
环县	-5.1	-3.7--3.2	1.4	25.6	24.7--24.2	-0.8
鄂托克	-6.1	-6.2--5.7	0.0	27.9	30.2--29.7	1.9
定边	-4.2	-5.7--5.2	-1.0	29.5	33.2--32.7	3.3
吴旗	-3.7	-3.7--3.2	0.0	26.9	26.7--26.2	-0.1
杭锦旗	-7.1	-7.2--6.7	0.0	30.8	30.2--29.7	-0.6
横山	-4.8	-4.7--4.2	0.1	28.3	28.7--28.2	0.0
延安	-2.7	-2.2--1.7	0.5	30.3	28.7--28.2	-1.5
包头	-4.7	-5.2--4.7	0.0	29.0	28.7--28.2	-0.2
东胜	-5.0	-5.2--4.7	0.0	17.3	23.7--23.2	6.0*
伊金霍洛	-6.3	-6.7--6.2	0.0	23.1	28.2--27.7	4.7*
榆林	-4.3	-4.7--4.2	0.0	30.8	31.2--30.7	0.0
绥德	-4.4	-3.7--3.2	0.6	28.0	28.7--28.2	0.3
河曲	-3.4	-3.2--2.7	0.1	26.5	26.7--26.2	0.0
兴县	-3.9	-4.2--3.7	0.0	33.5	35.2--34.7	1.3
离石	-5.4	-4.2--3.7	1.2	29.8	30.2--29.7	0.0
隰县	-5.1	-5.2--4.7	0.0	32.7	31.7--31.2	-0.9
盐池	-2.8	-6.2--5.7	-2.9	30.9	31.2--30.7	0.0

* 由于雪盖造成下垫面状况不均一,使两地的计算温度误差较大

表中所列实测值如果包括在计算值区间内,则二者之间差值都按0.0°C计。由此计算的夜间差值在±0.5°C以内的占总站数(20站)的70%,即14站;在±1.0°C以内的有16站,占80%;夜间最大差值为-3.8°C。白天不同地表类型导致能量收支的较大变化,计算与实测地面温度差值较大,除东胜等两站外,计算与实测地温差值在±1.0°C以内的为12站,占67%;在±1.5°C以内的为14站,占78%。

在计算中发现凡发射率梯度大的区域,计算结果一般有相对大的误差,如表中惠农站。另外,发射率的大小也有较大影响,由其造成的误差是不容忽视的。按计算的发射率:

CH3: 沙为0.60左右,黄土为0.63—0.67,耕作土为0.67—0.69以上;

CH4: 沙0.90,黄土0.91,耕作土壤0.93—0.94;

CH5: 沙0.94,黄土0.95,耕作农田0.96。

图5表示了由实验室和实测的几种地面物质的发射率^[5,6],图中沙的粒径约为100μm,耕作土是一种适合作物的黄土。

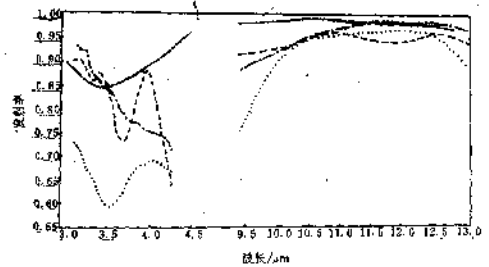


图5 在相应通道上,由实验室和实测的几种地面物质的发射率

实线:雪 断线:黄土
虚线:沙 点划线:耕作土

比较计算的发射率和图5结果可看出,

在CH3上计算值低约0.04—0.10;在CH4上低约0.02—0.06;在CH5上低约0.01—0.02。由误差定理得出 ϵ 和 $\Delta\epsilon$ 项的平均误差为 $\delta(\epsilon)=\delta(\Delta\epsilon)=0.03$,由式(15)类似的分析,得出 T_s 的最大平均误差白天为4.7℃,夜间4.6℃。

4 小结

本文中计算地面温度的方法,首先用卫星资料计算象元尺度的地面光谱发射率,其后以NOAA-AVHRR的4、5通道亮温与发射率计算地面温度,在该方法里若不能得到精确的大气修正,也可用一种适当的大气模式作出修正。

本文计算了鄂尔多斯高原及周边地区的地面温度,其结果和实测资料比较,夜间的计算值误差在1℃以内的占80%,白天同时次的计算值误差在1℃以内的占67%,通过对比可以认为用这种分裂窗方法计算地面温度是可行的。

计算的地面发射率很好地区分了地面土地类型,特别是CH3的发射率比较准确地描绘出了当地地貌土壤覆盖类型,这一结果可

以为土地类型调查提供有用的依据。

致谢:本文得到了范天锡、郑新江、郭炜的指导和帮助。

参考文献

- 1 C. Ottle and D. Vidal-Madjar. Estimation of land surface temperature with NOAA 9 data. *Remote Sens. Environ.* 1992,40:27—41.
- 2 Becker, F., and Li, Z. L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sens. Environ.* 1990 a,32:17—33.
- 3 Cesar Coll, Vicente Caselles, and Thomas J. Schmugge. Estimation of land Surface Emissivity Differences in the Split Window Channels of AVHRR. *Remote Sens. Environ.* 1994,48:127—134.
- 4 Becker, F. and Li, Z. L. (1990b). Towards a local split window method over land surface. *Int. J. Remote Sens.* 3:369—393.
- 5 ZhaoLiang Li and Becker, F. Feasibility of Land Surface Temperature and emissivity determination from AVHRR data. *Remote Sens. Environ.* 1993,43:67—85.
- 6 Wan Z. M. and Dozier J. Land Temperature measurement from space; physical principles and inverse modeling. *IEEE Trans on Geosci and Remote Sens.* 1989,27:268—278.

The Research on Calculation of Land Surface Temperature on the Ordos Plateau and the Surroundings

Lu Wenjie

(National Meteorological Satellite Center, Beijing 100081)

Abstract

The land surface temperature of the Ordos Plateau and the surrounding areas is calculated with NOAA-AVHRR data by means of a split-window method. In this method, the surface emissivity is computed first from the brightness temperature of Channels 3, 4 and 5, then in conjunction with the emissivity and the brightness temperature of Channels 4 and 5 the land surface temperature is derived. The comparison between the computed results and the observations of local stations at about the same time indicates that the difference is about 80% within 1℃ in the nighttime, but only 67% in the daytime. The maximum difference is -3.8℃. As a macro-monitoring measure, this method is acceptable in estimating land surface temperature.

Key Words: land surface temperature brightness temperature split-window method emissivity