

# 海面温度卫星红外遥感的外定标解译法

莫 秦 生

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所)

**摘要**——本文提出一个利用海上实测参数作为外定标值, 定量解译气象卫星红外云图中海面温度场的方法。本方法只需要一幅红外云图和两个(或数个)海上实测定标点的同步测值就可以了。用本方法于1982年冬季进行过一次海上试验, 取得良好结果, 实测数据 $T_s-D$ 的相关系数优于0.95, 解译温度 $T_{sk}$ 的均方根误差小于 $1.0^{\circ}\text{C}$ 。

## 一、引 言

利用卫星红外云图解译海面温度场, 一般是根据卫星的内定标值取得海面亮温 $T_r$ , 再通过某种数学模式或经验公式对海面辐射量的变化和大气干扰进行补偿, 以求得海面温度 $T_s$ , 但是, 由于大气和海面各种因素的影响, 实际解译温度的精度并不高<sup>[3]</sup>。例如, 利用大气分层, 并逐层求其补偿的常规解译方法, 运算繁琐, 解译精度(均方根差)仅为 $\pm 1\text{K}$ ; 另外, J. C. Price 及 M. Sidran 等人曾利用两个或三个通道分别测出的单通道海面温度(亮温), 通过经验公式加权相加, 最后求得海面温度 $T_s$ 值, 这种方法给出的精度也在 $\pm 1\text{K}$ 左右<sup>[4,5]</sup>。许多文献都曾提到利用实测值进行现场校正的重要性, 它可大大降低系统解译误差。由于海洋“表皮”辐射温度与海面真实温度(水下一米内)之间的差异, 有人认为船测温度在卫星温度遥感中是不可缺少的<sup>[6]</sup>。

利用气象卫星红外云图实时解译大面积的海面温度场, 对渔场分析和预报均有重要意义。这在国外已研究多年, 并进入实用阶段。鉴于国内提供的红外云图仅是一幅相对密度场的图象, 又缺乏温度内定标值, 无法进行定量解译, 根据这一实际情况, 作者提出一个利用海上实测参数作为外定标值, 以定量解译红外云图中海面温度场的方法。

## 二、测温方程

### 1. 海面辐射测温方程

卫星辐射计接收的总辐射量由经过大气衰减的海洋表面发射的辐射、大气层本身向上

发射的辐射和太阳与大气层向下反射后被海面反射回来的辐射三部分组成。辐射量的测量受到通道的光谱位置、通道宽度、大气成分、气候、海面状况及辐射角等因素的影响。在  $8\sim 13\mu\text{m}$  红外窗口, 大气辐射、太阳辐射及它们在海面的反射量虽然均很小, 但有时却不可忽略<sup>[1, 4]</sup>。如果我们将整层大气对辐射测量的全部影响仅作为大气的透明度来处理, 等效大气透过率为  $\tau_a(\lambda)$ ; 将海面各种因素(包括辐射角  $\theta$  的大小)的影响归结为海面是具有某等效辐射率  $\varepsilon_s(\lambda)$  的灰体, 此时辐射计所接收到的总辐射量  $I_r$  可表示为

$$I_r = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_s(\lambda) \tau_a(\lambda) B_{(\lambda, T)} \varphi(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中  $\varphi(\lambda)$  为辐射计的光谱分布函数,  $B_{(\lambda, T)}$  为黑体分谱辐射函数, 它用普朗克公式表示为

$$B_{(\lambda, T)} = \frac{C_1}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

式中  $C_1$ 、 $C_2$  分别是第一和第二辐射常数,  $T$  为绝对温度(K)。

对一个窄的红外通道(如  $\Delta\lambda = 1\mu\text{m}$ ),  $\varepsilon_s(\lambda)$ 、 $\tau_a(\lambda)$  和  $B_{(\lambda, T)}$  对  $\lambda$  的分布变化均很小, 而对一个确定的辐射计,  $\varphi(\lambda)$  也可以用一个平均值  $\varphi_0$  来代表。利用积分中值定律, 式(1)可表示为

$$I_r = \varepsilon_s(\lambda_0) \tau_a(\lambda_0) B_{(\lambda_0, T)} \varphi_0 \Delta\lambda, \quad (3)$$

式中  $\lambda_0$  为通道的中值波长。在海洋水温  $T_s = -2\sim 35^\circ\text{C}$  ( $271\sim 308\text{K}$ ) 范围内, 在常用的红外测温通道(如  $\lambda_0 = 11\mu\text{m}$ ),  $\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_0 T_s}\right) \gg 1$ , 式(2)可以近似表示为

$$B_{(\lambda_0, T_s)} = \frac{C_1}{\lambda_0^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_0 T_s}\right). \quad (4)$$

按照普朗克定律, 黑体在波长  $\lambda_0$  处的辐射仅与其绝对温度有关, 故对应海面辐射为  $B_{(\lambda_0, T_s)}$  的海面温度  $T_s$  通过反演式(4)可得

$$T_s = \frac{C_2}{\lambda_0} \left[ \ln\left(\frac{C_1}{B_{(\lambda_0, T_s)} \lambda_0^5}\right) \right]^{-1}. \quad (5)$$

而辐射计所测得的亮温  $T_r$  同理可表示为

$$T_r = \frac{C_2}{\lambda_0} \left[ \ln\left(\frac{C_1}{I_r(\lambda_0, T_s) \lambda_0^5}\right) \right]^{-1}. \quad (6)$$

将式(3)和式(6)代入式(5)并略去  $\lambda_0$ , 可得到海面辐射测温方程为

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_r} + \beta \ln(\tau_a) + \beta \ln(\varepsilon_s) + \beta \ln(\varphi_0 \Delta\lambda), \quad (7)$$

式中  $\beta = \frac{\lambda_0}{C_2}$ , 由于推导是以式(4)为基础, 这里仅将  $\beta$  看作为一个与  $\lambda_0$  有关的系数。

## 2. 通常天气条件下的测温方程

在气象卫星红外云图上, 根据式(7), 海面上任意两点间的实测温度  $T_s$  的关系为

$$\frac{1}{T_{sk}} - \frac{1}{T_{s1}} = \frac{1}{T_{rk}} - \frac{1}{T_{r1}} + \beta \ln\left(\frac{\tau_{ak}}{\tau_{a1}}\right) + \beta \ln\left(\frac{\varepsilon_{sk}}{\varepsilon_{s1}}\right), \quad (8)$$

上式不含有  $\varphi_0$ , 即与仪器参数无关。将式(6)代入式(8)可得到用外定标温度  $T_{s1}$  和辐射亮度  $I_r$  表示的测温方程

$$\frac{1}{T_{sk}} = \frac{1}{T_{s1}} - \beta \ln\left(\frac{I_{rk}}{I_{r1}}\right) + \beta \ln\left(\frac{\tau_{ak}}{\tau_{a1}}\right) + \beta \ln\left(\frac{\varepsilon_{sk}}{\varepsilon_{s1}}\right). \quad (9)$$

在红外图象照片中, 辐射亮度  $I_r$  是由照片的密度值  $D$  表征的。由于照片的辐照度  $H$

与辐射计接收的辐射亮度  $I_r$  成正比, 照片的乳胶曝光量  $E = Ht$ , 云图上各点的扫描曝光时间  $t$  是相同的,

$$\frac{E_k}{E_1} = \frac{H_k}{H_1} = \frac{I_{rk}}{I_{r1}} \quad (10)$$

在正常条件下, 同一幅图象中任意两点的密度  $D$  的差值与曝光量的关系, 在乳胶特性曲线的线性部分为

$$D_k - D_1 = \gamma \log\left(\frac{E_k}{E_1}\right) = \gamma \log(e) \ln\left(\frac{I_{rk}}{I_{r1}}\right), \quad (11)$$

式中  $\gamma$  为图象的反差系数。将式 (11) 代入式 (9) 则可得到用外定标温度  $T_{s1}$  和图象密度  $D$  表示的测温方程:

$$\frac{1}{T_{sk}} = \frac{1}{T_{s1}} - \alpha(D_k - D_1) + \beta \ln\left(\frac{\tau_{ak}}{\tau_{a1}}\right) + \beta \ln\left(\frac{\varepsilon_{sk}}{\varepsilon_{s1}}\right), \quad (12)$$

式中  $\alpha = \frac{\beta}{\gamma \log(e)}$ , 它是一个与  $\lambda_0$  及  $\gamma$  有关的系数。式 (9) 和式 (12) 中的  $T_{s1}$  为海上定标点的实测表层温度; 后三项分别代表图象上任意一点与定标点之间的亮温差异 (由  $I_r$  的比值或  $D$  的差值表示), 大气透明度差异及海面比辐射率差异有关的修正项。式中的  $\alpha$ 、 $\beta$  系数可以根据两个或三个海上实测定标点所提供的有关参数 ( $T_s$ 、 $\tau_a$  和  $\varepsilon_s$ ) 及对应图象上各点的辐射亮度  $I_r$  或密度  $D$  所建立的方程组求得。

### 3. 理想天气条件下的测温方程

设在理想天气条件下, 在离开星下点不远的所测海区范围内无云层干扰, 各处的大气透明度是一致的, 且海面辐射性能也相同, 即  $\tau_{ak} = \tau_{a1}$ ,  $\varepsilon_{sk} = \varepsilon_{s1}$  (上述条件在卫星天顶角  $\theta < 30^\circ$  的干燥晴空海域大体上可以满足)。此时, 式 (12) 可简化为

$$\frac{1}{T_{sk}} = \frac{1}{T_{s1}} - \alpha_0(D_k - D_1), \quad (13)$$

式中系数  $\alpha_0 = \alpha$ , 它也可利用两个定标点的实测系数, 代入式 (13) 求得其具体表达式  $\alpha_0 = \frac{T_{s2} - T_{s1}}{T_{s2}T_{s1}} \cdot \frac{1}{D_2 - D_1}$ 。利用级数将式 (13) 对  $T_{s1}$  展开后, 取一次幂可得实用简化测温方程:

$$T_{s1} \doteq T_{s1} + A_0(D_k - D_1), \quad (14)$$

式中  $A_0 = \alpha_0 T_{s1}^2 \doteq \frac{T_{s2} - T_{s1}}{D_2 - D_1}$ 。式 (14) 也可改写成一个一元一次线性方程 (自变量为  $D_k$ )

$$T_{sk} = A_0 D_k + C_0 \quad (15)$$

式中  $C_0 = T_{s1} - A_0 D_1$ 。式 (15) 与常用的线性经验公式相似。由于  $A_0$  仅取决于两定标点的温度差, 式 (14) 和式 (15) 均可直接采用摄氏温度进行计算。

我们对实用简化测温方程式 (14) 进行了误差分析。设海上实测温度的测量误差为  $\Delta T_0$ , 云图密度值测量误差为  $\Delta D_0$ , 由测温方程所求得的最大温度解译误差为  $\Delta T_k$ , 将它们代入式 (14), 有

$$T_{sk} + \Delta T_k = T_{s1} + \Delta T_0 + \frac{(T_{s2} - T_{s1}) + 2\Delta T_0}{(D_2 - D_1) - 2\Delta D_0} [(D_k - D_1) + 2\Delta D_0]. \quad (16)$$

化简上式并舍去  $\Delta$  的高次项, 得到

$$\Delta T_k = \Delta T_0 + 2\Delta T_0 \frac{D_k - D_1}{D_2 - D_1} + 2\Delta D_0 A_0 \left(1 + \frac{D_k - D_1}{D_2 - D_1}\right). \quad (17)$$

式 (17) 表明,  $\Delta T_k$  不仅与  $\Delta T_0$ 、 $\Delta D_0$  有关, 而且与  $\gamma$  和  $D_k$  值的大小有关,  $\gamma$  值愈大 (图象反

差强),  $A_0$  则愈小, 即  $\Delta T_k$  值愈小; 反之亦然。因此在收录和复制云图图象时, 采用必要手段增强所需信息区域的反差值, 对减少解译误差是有利的。 $\Delta T_k$  与  $D_k$  的关系是当  $(D_k - D_1) \ll (D_2 - D_1)$  时,

$$\Delta T_k \doteq \Delta T_0 + 2A_0 \Delta D_0; \quad (18)$$

而当  $(D_k - D_1) \geq (D_2 - D_1)$  时,

$$\Delta T_k \geq 3\Delta T_0 + 4A_0 \Delta D_0. \quad (19)$$

这里表明, 选择具有较大温差(即具有较大密度差)的定标点, 所求得的测温表达式具有较小的解译误差。

### 三、海上实测验证

1982年12月下旬, 我们在海上进行了一次渔业遥感试验。用常规停站及走航两种测量方式测取海面温度, 测试精度分别为  $0.01^\circ\text{C}$  和  $0.1^\circ\text{C}$ 。图1是 NOAA-7 卫星第4通道 ( $10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$ ) 红外云图(由上海气象台提供)。用负片在透射式点密度计上进行密度测量, 测量间距相当  $0.3 \sim 0.5$  个经纬度, 测量光斑直径为  $1\text{mm}$ , 密度测量精度  $\Delta D_0 = \pm 0.01$ 。各定标点实测海面温度  $T_{sk}$  与云图上各对应点密度  $D_k$  的关系见图2。图2中左上角和右下角的密集测点分布正好反映了外海高温水系与沿岸低温水系的不同特征。本文选用的实测定标点站位和探捕船的两次同期测站数据见图3。

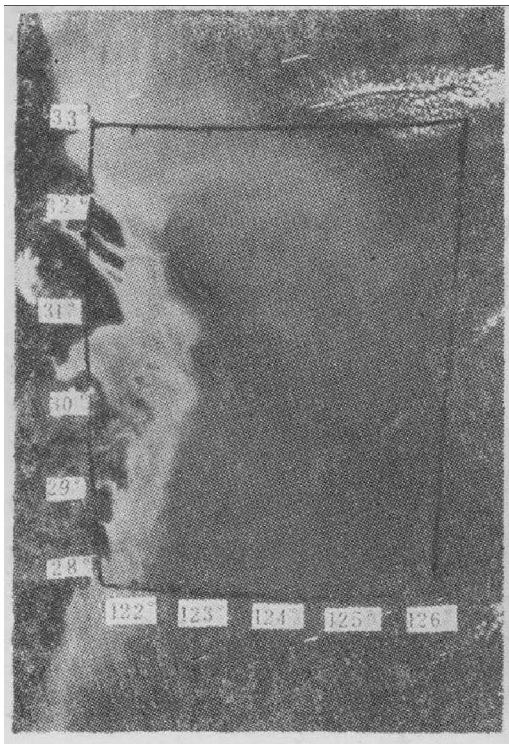


图1 NOAA-7 气象卫星红外云图  
(AVHRR 第4通道, 1982年12月29日)

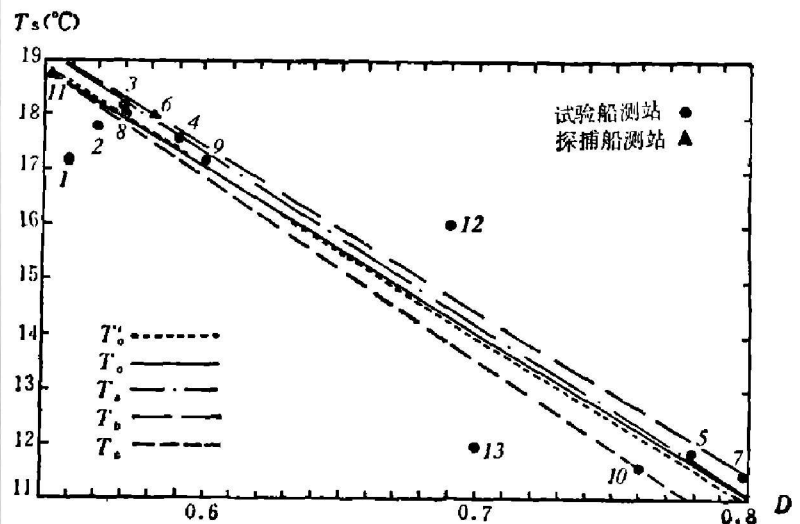


图2  $T_s$ - $D$  分布图(1982年12月26~31日)

根据所测数据, 以一对温差数大的测站4( $T_4 = 17.6^\circ\text{C}$ ,  $D_4 = 0.59$ )和5( $T_5 = 11.8^\circ\text{C}$ ,  $D_5 = 0.78$ )作为定标点, 根据式(15)求出其测温计算式为

$$T_s = 35.61 - 30.53 \times D_k (^\circ\text{C}).$$

图3就是根据  $T_s$  所解译的红外云图海洋表面温度场等值线图。在图2中测站12和13与

其它测站比较,表现出明显的离散性,它们在图3中正处于温度梯度甚大的水系边界处,在云图图象上难以确定准确位置,密度测值误差较大,应避免选作定标点,否则必将带来严重误差。

根据式(15),分别选取两对温差较大的测站作为定标点,求出其测温计算式。

$$T_6 = 18.0^{\circ}\text{C}, D_6 = 0.58;$$

定标点:  $T_7 = 11.44^{\circ}\text{C}, D_7 = 0.80;$

计算式  $T_b = 35.30 - 29.82 \times D_k (^{\circ}\text{C}).$

$$T_{10} = 11.51^{\circ}\text{C}, D_{10} = 0.76;$$

定标点:  $T_{11} = 18.8^{\circ}\text{C}, D_{11} = 0.54;$

计算式  $T_c = 36.70 - 33.14 \times D_k (^{\circ}\text{C}).$

同时利用最小二乘法,取1~11测站数据求得最佳测温计算式为

$$T_0 = 34.49 - 29.24 \times D_k (^{\circ}\text{C}).$$

其  $T_s-D$  值的相关系数  $R=0.98$ 。若取1~13测站数据,则求得的最佳测温计算式为

$$T'_0 = 34.71 - 29.62 \times D_k (^{\circ}\text{C}),$$

其  $T_s-D$  值的相关系数  $R=0.95$ 。上述测温计算式的  $T_s-D$  相关曲线均在图2中给出,这些曲线是很接近的。各测温计算式的温度解译精度见表1,它们解译温度最大误差(均方根差)小于  $1.0^{\circ}\text{C}$ 。表1还表明,从时间序列看,  $T_0$  的精度优于  $T_b$  和  $T_c$ ; 从定标点筛选角度看,  $N=11$  的精度大大优于  $N=13$  时的精度。

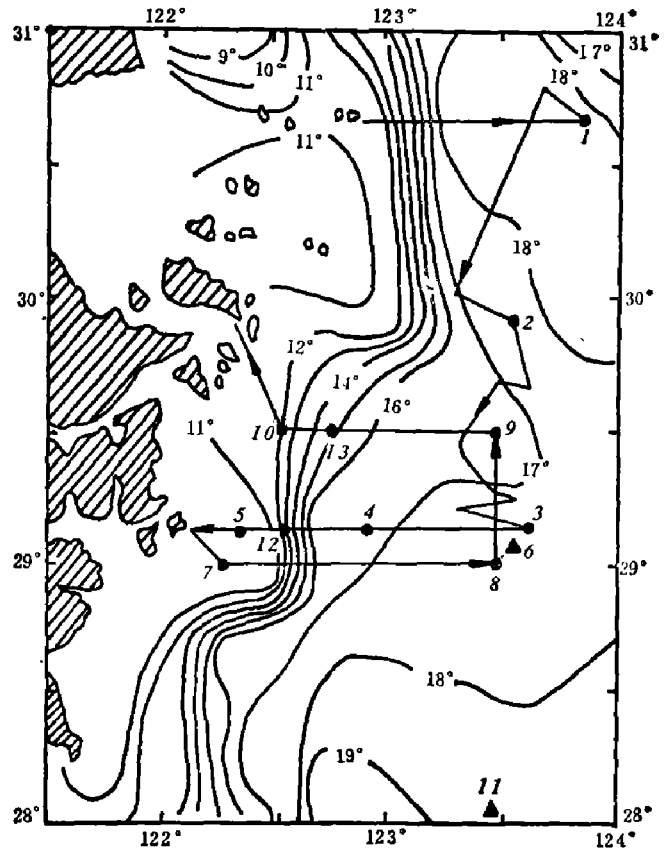


图3 红外云图海面温度场解译图( $^{\circ}\text{C}$ )  
(1982年12月29日)

表1 各测温计算式温度解译计算误差表

测站数 计算式	N=11		N=13	
	$\Delta\bar{T}^*$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta\bar{T}^{2**}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta\bar{T}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta\bar{T}^2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_a = 35.61 - 30.53 \times D_k$	0.37	0.61	0.60	0.93
$T_b = 35.30 - 29.82 \times D_k$	0.44	0.68	0.66	0.99
$T_c = 36.70 - 33.14 \times D_k$	0.55	0.67	0.73	0.96
$T_0 = 34.49 - 29.24 \times D_k$	0.42	0.51	—	—
$T'_0 = 34.71 - 29.62 \times D_k$	—	—	0.65	0.87

\* 平均绝对差值  $\Delta\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\Delta T_k|$  \*\* 均方根差  $\Delta\bar{T}^2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\Delta T_k)^2}$

## 四、结 语

1. 海面温度卫星遥感的外定标解译方法具有简便、实用的特点。本方法仅需一幅红外云图和两个(或数个)海上实测定标点的同步测值便可求得海表真实温度场。在冬季干燥晴

空条件下,对实用简化方程式(14)的验证结果表明,真实海面温度与红外云图密度场有良好的相关性( $R>0.95$ ),解译温度的均方根差小于 $1.0^{\circ}\text{C}$ 。由于海水温度的缓变性,在缺乏同步测值时,利用订正的非同步测值或推算数据作为定标值,也可以近似求得解译结果。

2. 本方法以辐射理论为基础,在特定条件下推导出相应的测温方程,并反映了各参数间的数理关系,有利于应用与分析。本方法的实质是求相对定标点真实海面温度的修正值。

3. 本方法仅要求云图图象的密度值在乳胶特性曲线的线性区内(即 $\gamma = \text{常数}$ ),不要求确定 $\gamma$ 值。本文所引用的 $\tau_0$ 和 $\epsilon_0$ 是包含大气和海面对测温影响的所有因素的一种广义参量。关于在通常情况下,由它们引起的温度修正问题,尚待今后研究和讨论。

4. 本方法对各组定标点的选取要求: a) 获取定标值的日期和时间与卫星图象要尽量相近; b) 定标点组间的温差要尽量大些; c) 定标点组间应具有较大的空间距离; d) 各定标点要处在有较大范围的稳定水团(系)之中,切忌选在温度梯度较大的水系界面处。 e) 选用较多的定标点,对提高大面积海洋温度场的解译精度是有利的。

致谢——对韩士鑫、沈建华同志参加本文部分内容讨论和在验证工作中给以的支持,表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 周凤仙、赵高祥、许黎,红外物理与技术, (1979), 1: 1~7.
- [2] 曾庆存,大气红外遥感原理,科学出版社, 1974.
- [3] Braum C., *NOAA technical memorandum*, NESS 30.
- [4] Price J. C., NASA TN-X-66235.
- [5] Sidran M., *Remote Sensing of environment*. (1980), 10: 101~114.
- [6] Takayama Y. and Takashima T., *Papers in Meteorology and Geophysics*, 33(1982), 2: 79~83.

## THE EXPLANATION METHOD FOR SATELLITE IR REMOTE SENSING OF SEA SURFACE TEMPERATURE USING EXTERNAL CRITERION

MO QINSHENG

(*Institute of Fisheries Machinery and Instrument, Chinese Academy of Fisheries Science*)

### ABSTRACT

A method is presented to quantitatively explain the sea surface temperature profile displayed on an infrared image of the meteorology satellite using actually measured parameter as external criterion. With this method only one infrared image and two (or some) sea criterion points actually measured at one time are needed. A sea test was made and an excellent result was obtained in winter 1982. The correlation coefficient between actually measured  $T_s-D$  values is better than 0.95, and the rms error of the explanation temperature  $T_{s\&}$  is smaller than  $1.0^{\circ}\text{C}$ .