

利用 FY-1D 极轨气象卫星分裂窗区通道计算陆表温度*

吴 晓 陈维英

(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘 要

根据理论和经验上已证明的地表温度与 AVHRR 窗区通道 4.5 的亮度温度存在线性或非线形关系,通过对 2818 条全球晴空大气廓线做不同比辐射率地表的 FY-1D 窗区通道 4.5 辐射率的模拟计算,推导出 FY-1D 极轨气象卫星的红外通道 4.5 亮温与地表温度的二次回归关系式。同时详细介绍了由这一回归关系式和 FY-1D 高分辨率图像传输(HRPT)遥测数据计算陆表温度的方法,最后给出陆表温度计算结果的精度:用中国地面气象台站的 0 cm 地温观测数据与相同时刻的分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 经纬度的卫星陆表温度相对比,两者非常吻合,绝大部分台站 $|\Delta T| < 3.0$ K。

关键词:陆表温度 极轨气象卫星 亮温 AVHRR 窗区

引 言

陆表温度是地球陆地表面 0 cm 的温度(英文名是:Land Surface Temperature,缩写:LST),是研究地球环境、地球气候不可缺少的重要参量,它在农业、气象、地质等领域有着广泛的应用价值。国际上遥感界用气象卫星对它的研究起始于 20 世纪 80 年代初,90 年代中期算法趋于成熟,有着各种各样的 LST 反演(算法)模式,在我们的研究中参考了 Coll 等人^[1]的算法模式,并用我们已有的地球大气红外辐射传输计算软件^[2]来建立 FY-1D 的陆表温度反演模式,生成了初步的 FY-1D 陆表温度产品。

1 陆表温度反演的基本原理

陆表温度通常定义为地表面温度,对于裸土陆表温度为土壤表面温度,对于植被陆表温度为植被冠层的温度,对于植被稀少区陆表温度为土壤表面温度与植被冠层温度、植被体温度的混和。用卫星遥感信息获取地表温度的理论基础是地球表面的红外光谱热辐射,根据普朗克辐射原则,任何绝对温度大于 0 K 的物体都会辐射一种热能-辐射能,其波谱辐射能写为:

$$L_\nu = \varepsilon_\nu B_\nu(T) \quad (1)$$

式中: L_ν 是波谱辐射率, ε_ν 是物体的光谱比辐射率, $B_\nu(T)$ 是黑体的波谱辐射率, T 是物体的温度。

* 2003-10-08 收到,2004-04-02 收到再改稿。

$$B_{\nu}(T) = \frac{c_1 \nu^3}{e^{c_2 \nu/T} - 1.0} \quad (2)$$

在卫星高度探测到的热辐射率是地面热辐射率经过大气吸收衰减后的部分和大气路径上吸收气体向外发射的辐射能以及地面反射大气向下热辐射能之和,如方程(3)和图1,

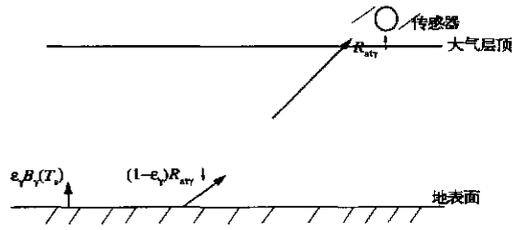


图1 热红外辐射传输示意图

$$I_{\nu} = \varepsilon_{\nu} B_{\nu}(T_S) \tau_{\nu} + R_{at\nu}\uparrow + (1 - \varepsilon_{\nu}) R_{at\nu}\downarrow \tau_{\nu} \quad (3)$$

式中: I_{ν} 是到达卫星探测瞳孔前的辐射率, ε_{ν} 是地表面波数为 ν 的比辐射率, $B_{\nu}(T_S)$ 是地表温度为 T_S 的黑体辐射率, τ_{ν} 是整层大气的透过率, $R_{at\nu}\uparrow$ 是大气路径上向上波谱辐射率, $R_{at\nu}\downarrow$ 是大气向下波谱辐射能。因此要获取地表辐射源的温度必须剔除大气对卫星测量数据的影响和地表比辐射率对卫星测量数据的影响,极轨气象卫星在地球大气的吸收窗区波段开设有探测通道,即:HRPT 红外通道4($10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$)和红外通道5($11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$),这样地表的辐射率可以尽量少地受到大气的衰减而到达大气顶,欧美科学家们^[3,4]从理论上用数学方法推导出大气吸收气体对地表温度的衰减和地表比辐射率对地表温度的修正为如下式:

$$\Delta T_{am} = T_{gi} - T_i = \frac{1 - \tau_i}{\tau_i} (T_i - T_a) \quad (4)$$

$$\Delta T_{\varepsilon} = T_S - T_{gi} = \frac{1 - \varepsilon_i (R_i - R_{ati}\downarrow)}{\varepsilon_i \partial B_i / \partial T} \quad (5)$$

式中: ΔT_{am} 是大气的吸收和辐射所引起地表温度的变化, ΔT_{ε} 是地表比辐射率所引起地表温度的变化, T_{gi} 是地表亮温, T_i 是通道 i 亮温, T_a 是大气有效温度, τ_i 是通道 i 波段整层大气的透过率, ε_i 是通道 i 波段地表的比辐射率, R_i 是大气顶通道 i 波段的射出辐射率, $R_{ati}\downarrow$ 是大气向下半球热辐射通量除以 π , B_i 是通道 i 波段的温度为 T 的黑体辐射率;Coll 等人^[1]推导出地表温度与 AVHRR 通道4 5 的亮温存在如下关系:

$$T_S = T_4 + A(T_4 - T_5) + B(\varepsilon) \quad (6)$$

式中: $A = \frac{1 - \tau_4}{\tau_4 - \tau_5}$, $B(\varepsilon) = \frac{1 - \varepsilon_4}{\varepsilon_4} b_4 + A \tau_5 \left[\frac{1 - \varepsilon_4}{\varepsilon_4} b_4 - \frac{1 - \varepsilon_5}{\varepsilon_5} b_5 \right]$, T_4 、 T_5 为通道4 5 亮温。因此根据通道4 5 的亮温就可以计算出当时地表、大气状况下的地表温度,下面就介绍方程(6)的统计回归模式的生成。

2 FY-1D 分裂窗区非线性陆表温度反演模式的建立

2.1 晴空大气的红外辐射传输计算方程

晴空大气状况下的大气顶射出辐射率由如下方程^[5]计算出:

$$B(\nu, \theta, T) = \varepsilon_{\nu} B(\nu, T_S) \tau_{\nu}(\nu, \theta) + \int_0^1 B(\nu, T) d\tau +$$

$$(1 - \varepsilon_\nu) \tau_s^2(\nu, \theta) \int_{\tau_s}^1 B(\nu, T) \frac{dT}{T^2} \quad (7)$$

写成级数形式为:

$$B(\nu, \theta, T) = \varepsilon_\nu B(\nu, T_s) \tau_s(\nu, \theta) + \sum_{i=1}^{40} B(\nu, T) \Delta \tau_i + (1 - \varepsilon_\nu) \sum_{i=1}^{40} B(\nu, T) \frac{\tau_s^2(\nu, \theta)}{\tau_i \tau_{i+1}} \Delta \tau_i \quad (8)$$

式中: ν 是波数, θ 是天顶角, T_s 是地表温度, ε_ν 是地表在波数 ν 的比辐射率, $\tau_s(\nu, \theta)$ 是从地表到大气顶沿 θ 方向的整层大气透过率, τ_i 是大气 i 层到大气顶沿 θ 方向的大气透过率, $\Delta \tau_i = \tau_{i+1} - \tau_i$, $B(\nu, T_s)$ 是地表的黑体辐射率, $B(\nu, T)$ 是大气温度为 T 的黑体辐射率, $B(\nu, \theta, T)$ 是大气顶的射出辐射率, 大气从地面到 0.1 hPa 分为 40 层^[6], 黑体辐射率由普朗克公式计算:

$$B(\nu, T_s) = \frac{c_1 \nu^3}{e^{c_2 \nu / T_s} - 1.0}, \quad B(\nu, T) = \frac{c_1 \nu^3}{e^{c_2 \nu / T} - 1.0} \quad (9)$$

$c_1 = 1.191066 \times 10^{-5}$, $c_2 = 1.43839$, $B(\nu, T_s)$ 、 $B(\nu, T)$ 的单位是: $\text{m W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$, 有关 $\tau_s(\nu, \theta)$ 、 $\tau_i(\nu, \theta)$ 的计算详见文献[2]。

2.2 模拟计算出 FY-1D HRPT 红外通道 4.5 的等效亮度温度

用根据方程(8)编制的地球大气红外辐射传输计算软件^[21], 对 2818 条全球晴空大气廓线作 FY-1D 红外通道 4.5 等效亮温的模拟计算, 2818 条大气廓线是用 1986 年全球晴空大气无线电探空资料整理而来, 地表温度分别是百叶箱温度 T 、 $T + 5.0$ 、 $T + 10.0$ 、 $T - 5.0$ ^[11], 大气廓线从地面到大气顶(0.1 hPa)分为 40 个等压面层^[6]。

FY-1D HRPT 仪器的红外窗区通道 4 测量地球大气在波长 9.09 ~ 13.89 μm 的射出辐射率, 中心波长在 10.72 μm (波数: 932.83 cm^{-1}); 红外窗区通道 5 测量地球大气在波长 10.0 ~ 14.29 μm 的射出辐射率, 中心波长在 11.65 μm (波数: 858.37 cm^{-1})。对于归一化光谱响应函数为 $f_4(\nu)$ 、 $f_5(\nu)$ 的红外通道 4.5 仪器, 透过仪器滤光片测得的通道辐射率为 $B(\nu_{04}, \theta, T)$ 、 $B(\nu_{05}, \theta, T)$

$$B(\nu_{04}, \theta, T) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu, \theta, T) f_4(\nu) d\nu$$

$$B(\nu_{05}, \theta, T) = \int_{\nu_3}^{\nu_4} B(\nu, \theta, T) f_5(\nu) d\nu \quad (10)$$

式中: ν_1 、 ν_2 是通道 4 的起止波数, $\nu_1 = 720.0 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_2 = 1100.0 \text{ cm}^{-1}$, ν_3 、 ν_4 是通道 5 的起止波数, $\nu_3 = 700.0 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_4 = 1000.0 \text{ cm}^{-1}$, $B(\nu, \theta, T)$ 是大气顶的射出辐射率, ν_{04} 、 ν_{05} 称为通道 4.5 的中心波数, $\nu_{04} = 932.83 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_{05} = 858.37 \text{ cm}^{-1}$, $B(\nu_{04}, \theta, T)$ 、 $B(\nu_{05}, \theta, T)$ 称为通道 4.5 的通道辐射率, 它们存在如下临边变暗统计关系:

$$B(\nu_{04}, 0, T) = [1 + \alpha_{21}(\sec \theta - 1) + \beta_{21}(\sec \theta - 1)^2] B(\nu_{04}, \theta, T) + \alpha_{11}(\sec \theta - 1) + \beta_{11}(\sec \theta - 1)^2 \quad (11)$$

$$B(\nu_{05}, 0, T) = [1 + \alpha_{22}(\sec \theta - 1) + \beta_{22}(\sec \theta - 1)^2] B(\nu_{05}, \theta, T) + \alpha_{12}(\sec \theta - 1) + \beta_{12}(\sec \theta - 1)^2 \quad (12)$$

式中： a_{11} 、 a_{21} 、 β_{11} 、 β_{21} 、 a_{12} 、 a_{22} 、 β_{12} 、 β_{22} 是统计回归系数。

根据普朗克公式的反函数形式可以求出对应于辐射率 $B(\nu_{04}, 0, T)$ 、 $B(\nu_{05}, 0, T)$ 的通道 4 5 中心波数亮温 T_{B4} 、 T_{B5}

$$T_{B4} = \frac{c_2 \nu_{04}}{\ln(c_1 \nu_{04}^3 / B(\nu_{04}, 0, T) + 1)} \quad T_{B5} = \frac{c_2 \nu_{05}}{\ln(c_1 \nu_{05}^3 / B(\nu_{05}, 0, T) + 1)} \quad (13)$$

由波数 ν_{04} 、 ν_{05} 计算出的中心波数亮温 T_{B4} 、 T_{B5} 与通道等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} 存在如下关系：

$$T_{BB4} = aT_{B4} + b \quad T_{BB5} = cT_{B5} + d \quad (14)$$

式中： a 、 b 、 c 、 d 是统计回归系数。

2.3 不同类型下垫面的等效亮度温度与地表温度的理论回归关系式

陆地表面类型按比辐射率 ϵ_v 的不同分为：植被、沙漠(裸土)、冰雪、内陆水体，以上 4 种地表在 $4.0 \sim 15.0 \mu\text{m}$ 的比辐射率(ϵ_v)值是从网上下载的美国加利福尼亚大学 MODIS 工作组提供的，其波数分辨率为 3.85882 cm^{-1} ，将不同类型地表的比辐射率代入方程 (8)，得到不同的通道 4 5 等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} 。对于每一种类型而言，2818 条廓线有 2818 个等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} 和 2818 个地面温度 T_s ，通过 2818 个 $T_{BB4} - T_{BB5}(X$

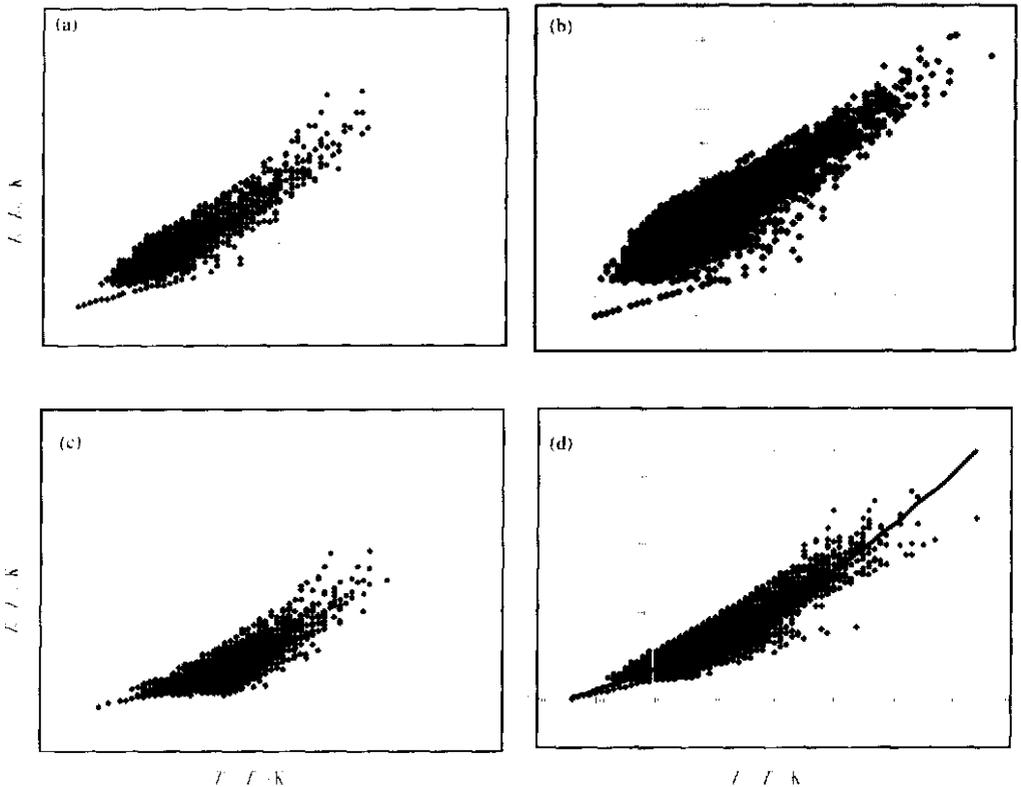


图2 不同下垫面全球 2818 条晴空廓线地表温度与 FY-1D 窗口通道 4 5 亮度温度的理论回归关系图(图中 X、Y 轴数据均乘 10.0)

(a) 植被类型, (b) 沙漠(裸土)类型, (c) 冰/雪类型, (d) 海水类型

轴)与 $T_S - T_{BB4}$ (Y轴)的点迹分布就得出地表温度 T_S 与通道 4、5 等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} 的理论回归关系式,即陆表温度反演模式。

图 2a 是植被类型的 2818 条廓线的 X-Y 坐标点迹图, X 轴是 $T_{BB4} - T_{BB5}$, Y 轴是 $T_S - T_{BB4}$, 地表温度 T_S 与通道 4、5 等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} 的理论回归关系式为:

$$T_S - T_{BB4} = A(T_{BB4} - T_{BB5}) + B(T_{BB4} - T_{BB5})^2 + D \quad (15)$$

即:

$$T_S = T_{BB4} + A(T_{BB4} - T_{BB5}) + B(T_{BB4} - T_{BB5})^2 + D$$

式中: $A=1.8225$, $B=0.1740$, $D=1.9260$, 这些系数的 2818 条大气廓线的系统均方根误差为: $RMS=0.5777$ K ($\theta \leq 60.0^\circ$); 图 2b 是沙漠(裸土)类型的 2818 条廓线的 X-Y 坐标点迹图, 地表温度 T_S 与通道 4、5 等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} 的理论回归关系式(15)中: $A=2.0803$, $B=0.09733$, $D=3.4500$, 这些系数的 2818 条大气廓线的系统均方根误差为: $RMS=1.0624$ K ($\theta \leq 60.0^\circ$); 图 2c 是冰/雪类型的 2818 条廓线的 X-Y 坐标点迹图, 地表温度 T_S 与通道 4、5 等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} 的理论回归关系式(15)中: $A=1.2200$, $B=0.3467$, $D=-0.12667$, 这些系数的 2818 条大气廓线的系统均方根误差为: $RMS=0.8075$ K ($\theta \leq 60.0^\circ$); 图 2d 是海水类型的 2818 条廓线的 X-Y 坐标点迹图, 地表温度 T_S 与通道 4、5 等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} 的理论回归关系式(15)中: $A=1.7187$, $B=0.2344$, $D=0.8040$, 这些系数的 2818 条大气廓线的系统均方根误差为: $RMS=0.5908$ K ($\theta \leq 60.0^\circ$)。

3 利用 FY-1 D HRPT 遥测数据计算陆表温度的方法

由经过预处理后的 FY-1 D HRPT 1 A.5 数据文件计算陆表温度的过程如下:

(1) 海/陆判别: 读取 $0^\circ \sim 60^\circ$ N, $70^\circ \sim 150^\circ$ E 范围内分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的海/陆标识文件, 属于海洋的测点就不做计算。

(2) 云检测: 读取 FY-1 D 云检测产品输出文件, 是云的测点就不作陆表温度计算。

(3) 计算晴空测点的通道 1 ($0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$)、通道 2 ($0.84 \sim 0.89 \mu\text{m}$)、通道 6 ($1.58 \sim 1.64 \mu\text{m}$) 的行星反射率:

$$R_1 = (a_1 I_1 + b_1) / \cos \phi; R_2 = (a_2 I_2 + b_2) / \cos \phi; R_6 = (a_6 I_6 + b_6) / \cos \phi \quad (16)$$

式中: R_1 , R_2 , R_6 分别为通道 1、2、6 的行星反射率, a_1 、 b_1 , a_2 、 b_2 , a_6 、 b_6 分别为通道 1、2、6 定标系数的斜率与截距, I_1 、 I_2 、 I_6 分别是通道 1、2、6 的计数值, ϕ 是太阳天顶角。对于 $R_6 \leq 10.0\%$ 的测点判定为冰/雪^[7]。

(4) 计算晴空测点的植被指数 (I_{NDV})

$$I_{NDV} = (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1) \quad (17)$$

对于 $I_{NDV} \leq 0.2$ 的测点判定为裸土^[8], 对于 $0.2 < I_{NDV} < 0.5$ 的测点判定为裸土与植被的混和, 对于 $I_{NDV} \geq 0.5$ 的测点判定为植被, 对于混和测点其植被覆盖率 P_{PV} 为:

$$P_{PV} = (I_{NDV} - 0.2) / (0.5 - 0.2) \quad (18)$$

(5) 计算通道 4、5 的等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5}

首先对通道 4 5 的计数值做定标处理,得到通道 4 5 的辐射率:

$$B_4(\nu_{04}, \theta, T) = a_4 I_4 + b_4 \quad B_5(\nu_{05}, \theta, T) = a_5 I_5 + b_5 \quad (19)$$

式中: a_4 、 b_4 、 a_5 、 b_5 分别是通道 4 5 定标系数的斜率和截距, $B(\nu_{04}, \theta, T)$ 、 $B(\nu_{05}, \theta, T)$ 分别是通道 4 5 的通道辐射率,其单位是: $\text{m W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

对辐射率做临边变暗订正,将卫星在天顶角 θ 的辐射率测值订正到天顶的辐射率测值:

$$B_4(\nu_{04}, 0, T) = [1 + \alpha_{21}(\sec \theta - 1) + \beta_{21}(\sec \theta - 1)^2] B_4(\nu_{04}, \theta, T) + \alpha_{11}(\sec \theta - 1) + \beta_{11}(\sec \theta - 1)^2 \quad (20)$$

$$B_5(\nu_{05}, 0, T) = [1 + \alpha_{22}(\sec \theta - 1) + \beta_{22}(\sec \theta - 1)^2] B_5(\nu_{05}, \theta, T) + \alpha_{12}(\sec \theta - 1) + \beta_{12}(\sec \theta - 1)^2 \quad (21)$$

式中: α 、 β 是统计回归系数, $\alpha_{11} = -2.0321$, $\beta_{11} = 0.10104$, $\alpha_{21} = 0.04686$, $\beta_{21} = -0.00174$, $\alpha_{12} = -2.18688$, $\beta_{12} = 0.08482$, $\alpha_{22} = 0.04841$, $\beta_{22} = -0.00160$, ν_{04} 、 ν_{05} 是 FY-1D 红外通道 4 5 的中心波数, $\nu_{04} = 932.83 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_{05} = 858.37 \text{ cm}^{-1}$ 。

根据普朗克公式的反函数形式计算测点的通道 4 5 等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} :

$$T_{B4} = \frac{c_2 \nu_{04}}{\ln(c_1 \nu_{04}^3 / B_4(\nu_{04}, 0, T) + 1.0)} \quad T_{B5} = \frac{c_2 \nu_{05}}{\ln(c_1 \nu_{05}^3 / B_5(\nu_{05}, 0, T) + 1.0)} \quad (22)$$

式中: $c_1 = 1.191066 \times 10^{-5}$, $c_2 = 1.43839$, T_{B4} 、 T_{B5} 的单位是 K,对由单一波数反算出的中心波数亮温 T_{B4} 、 T_{B5} 做修正,得到通道 4 5 等效亮度温度 T_{BB4} 、 T_{BB5} :

$$T_{BB4} = e T_{B4} + f \quad T_{BB5} = g T_{B5} + h \quad (23)$$

式中: e 、 f 、 g 、 h 是统计回归系数, $e = 1.01858$, $f = -5.2147$, $g = 1.0210$, $h = -6.09$ 。

(6) 计算陆表温度

不同类型下垫面的地表温度由下式计算:

$$T_{LS} = T_{BB4} + A(T_{BB4} - T_{BB5}) + B(T_{BB4} - T_{BB5})^2 + D \quad (24)$$

对于植被类型下垫面, $A = 1.8225$, $B = 0.1740$, $D = 1.9260$;对于沙漠(裸土)类型下垫面, $A = 2.08033$, $B = 0.09733$, $D = 3.4500$;对于冰/雪类型下垫面, $A = 1.220$, $B = 0.3467$, $D = -0.12667$;对于水体类型下垫面, $A = 1.71875$, $B = 0.23438$, $D = 0.8040$ 。对于植被与裸土的混和测点,其地表温度为植被地温与裸土地温的加权平均,即:

$$T_{LS} = P_{PV} T_{LSV} + (1 - P_{PV}) T_{LSS} \quad (25)$$

式中: P_{PV} 是植被覆盖率, T_{LSV} 、 T_{LSS} 分别是植被、裸土地表温度。

4 FY-1D 陆表温度产品及精度

标准的 FY-1D 陆表温度是一个 1201×1601 的 2 字节整型数据组,覆盖的地理范围是 $0^\circ \sim 10^\circ \text{N}$, $70^\circ \sim 150^\circ \text{E}$,数据分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$,但由于 FY-1D 云检测产品暂时还未提供给用户使用的原因,在这篇文章中我们不能给读者提供卫星过境时刻的整条轨道

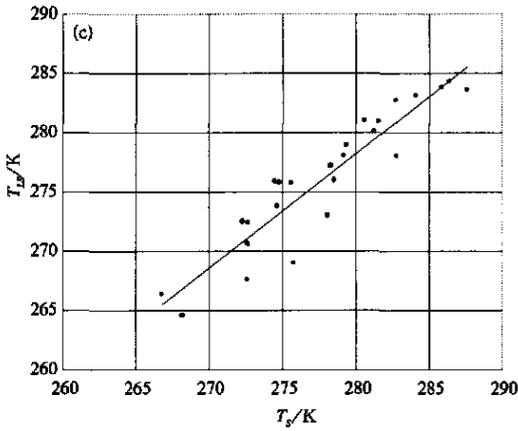
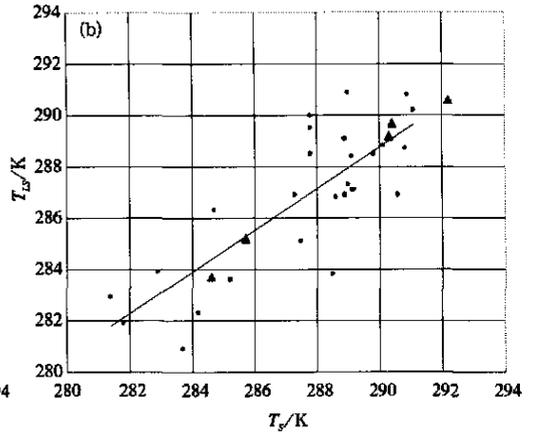
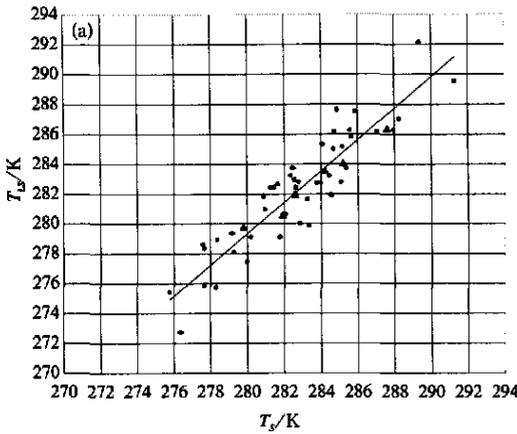


图 3 不同时间不同地理范围的卫星地表温度计算结果与同一地理位置、同一时刻地面气象台站 0 cm 地温观测数据对比 (a) 2002 年 11 月 1 日 01:35 UTC (地理范围:33°~43°N,115°~125°E), (b) 2003 年 1 月 14 日 01:05 UTC(地理范围:18°~28°N,108°~118°E), (c) 2002 年 12 月 10 日 02:40 UTC(地理范围:26°~36°N,88°~98°E)(图中 T_S 是地面 0 cm 温度观测数据, T_{LS} 是卫星地表温度, 实心圆点代表地温观测数据是用白天地面 0 cm 地温最高值出现在当地时 13:00 推算出的, 三角形代表地温观测数据是用白天地面 0 cm 地温最高值出现在当地时 12:00 推算出的)

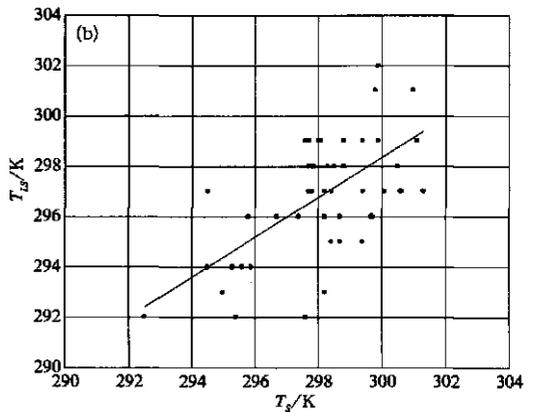
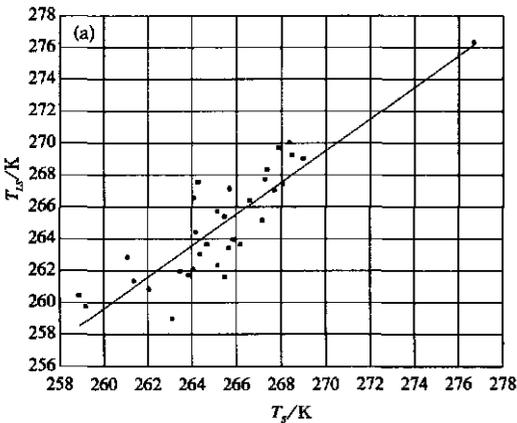


图 4 不同时间不同地理范围的卫星地表温度计算结果与同一地理位置、同一时刻地面气象台站 0 cm 观测温度对比 (a) 2003 年 1 月 21 日 13:09 UTC(地理范围:32°~42°N,97°~107°E) (b) 2002 年 7 月 8 日 12:20 UTC(地理范围:40°~50°N,120°~130°E) (图中 T_S 是地面 0 cm 温度观测数据, T_{LS} 是卫星地表温度, 实心圆点代表地温观测数据是用夜间地面 0 cm 地温最低值出现在当地时 03:00 推算出的)

的陆表温度计算结果,仅给出 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 地理范围内分辨率为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 经纬度的陆表温度计算结果的示例,并用相同时刻的常规气象地面观测站的 0 cm 地温观测资料与之做对比,检验卫星地表温度的真实性,由于台站只在每日的 $02:00$ 、 $08:00$ 、 $14:00$ 、 $20:00$ 做地面 0 cm 温度观测,因此卫星过境时刻的地面观测温度需用如下公式^[9,10]计算得出:

$$T_s = T_0 + H \sin\left(\frac{\pi}{12}t + \phi_0\right) \quad (26)$$

式中: T_s 为地面温度, T_0 为地面初始温度, H 为地面温度波的振幅, t 是时间(小时), ϕ_0 是地面温度波的位相。图3、图4给出了陆表温度计算实例与相同时刻、相同地理位置的地表 0 cm 温度观测数的对比结果。

5 结 语

本文给出了用红外辐射传输模拟计算建立陆表温度反演模式的物理过程,详细描述了用FY-1D HRPT遥测数据计算陆表温度的方法,给出了陆表温度计算实例和相应的地面气象台站 0 cm 地温观测数据的对比图,对比的结果表明:卫星地表温度与地面 0 cm 观测温度绝大部分吻合,对86%的观测台站而言:最大偏差 $\Delta T < 3.0\text{ K}$ 。在不久的将来,当FY-1D云检测产品成熟后,陆表温度产品软件将投入业务运行,届时,我们将再发表“FY-1D陆表温度产品技术报告”的文章。

致 谢:本文研究中的海陆标识文件,得到杨忠东博士的大力帮助,在此特致感谢!

参 考 文 献

- 1 Coll C, Caselles V, Sobrino J A, et al. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**: 105 ~ 122.
- 2 吴晓. 地球大气透过率及辐射率计算. *应用气象学报*, 1998, **9**(1): 124 ~ 128.
- 3 国家高技术信息获取与处理技术专家组. 先进对地观测技术与应用学术研讨会材料汇编. 南京, 1999. 1 ~ 35.
- 4 Qin Zhihao, Karnieli A. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**: 2367 ~ 2393.
- 5 Marco Matricardi, Roger Saunders. Fast radiative transfer model for simulation of infrared atmospheric sounding interferometer radiances. *Applied Optics*, 1999, **38**: 5679 ~ 5691.
- 6 吴晓, 邱康睦, 黄意玢, 等. 从气象卫星估算大气顶射出长波辐射通量的方法. 卫星气象技术报告(9417). 北京: 国家卫星气象中心, 1994.
- 7 Crane R G, Anderson M R. Satellite discrimination of snow/cloud surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 1984, **5**: 213 ~ 223.
- 8 Sobrino J A, Raissouni N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**: 353 ~ 366.
- 9 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成, 等. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 1981. 36 ~ 37.
- 10 阿里索夫 B II, 特洛兹多夫 O A, 鲁宾施晋 E C. 气候学教程, 第一册. 北京: 高等教育出版社, 1957. 169 ~ 170.

LAND SURFACE TEMPERATURE ESTIMATED BY REMOTE SENSING DATA FROM FY-1 D POLAR METEOROLOGICAL SATELLITE

Wu Xiao Chen Weiyang

(*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract

The split window method was widely used to retrieve the land surface temperature (LST) from satellite remote sensing data in the 1980s and the 1990s. The scientists demonstrated theoretically or statistically that there exists a linear or non-linear relationship between the LST and AVHRR channel 4, 5 brightness temperatures. 2818 clear sky radiosonde profiles were used to simulate the FY-1 D HRPT channel 4, 5 brightness temperatures for different ground emissivities. The derived non-linear regression equation for each ground type is: $T_{LS} = T_4 + A(T_4 - T_5) + B(T_4 - T_5)^2 + D$. Meanwhile, the calculating method of LST by using FY-1 D HRPT data and the regression equation were described. Finally, the accuracy of the calculated LST in main land of China was given: compared with the 0 cm soil temperatures observed by Chinese meteorological ground stations, the LSTs calculated by FY-1 D data are very coordinate with the station observations. For most ground stations, the deviations between the satellite LST and stations observations are less than 3.0 K.

Key words: Land Surface Temperature (LST) Polar meteorological satellite Brightness temperature AVHRR window