

文章编号: 1000-2022(2001) 03-0323-07

# 利用任意时刻 AVHRR 资料近似估计 区域地表温度日较差的试验

刘晶淼<sup>1</sup>, 裕国<sup>2</sup>, 王纪军<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 南京气象学院环境科学系, 南京 210044)

**摘要:** 根据表征土壤温度日变化的土温方程一阶近似解, 提出一种利用一日中任意时刻 NOAA-AVHRR 图像数据估计地表温度日较差的简易推算方法。该方法尤其可用于反演土壤含水量的计算, 当图像数据的时次与热惯量法所要求的最高、最低温度时次配不准的情况下, 近似地估计地表温度日较差, 进而计算地表热惯量及相应的土壤含水量。用实例验证了该方法的可行性, 为进一步推广应用奠定基础。

**关键词:** 热惯量, 遥感信息, 温度日较差

**中图分类号:** P423.31 **文献标识码:** A

## 1 问题的提出

利用 NOAA-AVHRR 数字图像资料, 借助于热惯量方法, 就可由热惯量与土壤含水量的准线性关系导出一种遥感信息模型。由此可估算出大范围地区的土壤含水量。实践表明, 这种方法具有一定的可行性, 并便于操作, 且费用较低。近年来, 国内外学者已在这方面做了大量研究试验<sup>[1~5]</sup>。然而, 在实际工作中, 往往会遇到某些技术性难题, 其中最为棘手的问题之一就是资料的完整性和匹配性。例如, 热惯量(记为  $I_{TH}$ )法, 首先必须计算表观热惯量( $I_{ATH}$ ), 由此计算真实热惯量( $I_{RTH}$ ), 但计算前者必须考虑地表反照率  $\alpha$  和昼夜地面温度差  $\Delta T_g$ 。文献[4~8]已经证明,  $\Delta T_g$  可由通道 4(以下记为 CH4)的亮度温度在白天最高温度时刻的记录和夜间最低温度时刻的记录来估计。换言之,  $\Delta T_g = T_{gmax} - T_{gmin} = T_{dCH4} - T_{nCH4}$ 。但是, 由于种种原因, 实际上并不都能获得相应时刻的 CH4 图像。由于 NOAA-AVHRR 一般有两种轨道: 1) 上午轨道; 2) 下午轨道, 其过境的地方时大约是: 1) 14: 30 与 02: 30; 2) 07: 30 与 19: 30。实际上因天气条件的差异, 往往得不到上述匹配时刻的 AVHRR, 有时甚至只能得到一日中某一时刻的 CH4 图像。这就给估算  $\Delta T_g$  及计算  $I_{TH}$  带来了困难。

鉴于上述缘故, 本文提出一种考虑地表温度日变化的谐波模式, 借助于 AVHRR 图像来推算  $\Delta T_g$  的近似方法。由于本文并不直接参与反演土壤含水量的计算, 况且土壤含水量的影响因素并不仅限于地表温度日较差, 所以, 文中只讨论有关  $\Delta T_g$  的计算及其误差与订正。关于利用 AVHRR 资料反演土壤水分的试验将另文讨论。

收稿日期: 2000-12-04; 改回日期: 2001-04-24

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 4989270; 国家重点基础研究项目 G1998040911

第一作者简介: 刘晶淼, 男, 1956 年 6 月生, 研究员, 博士后。

## 2 理论基础和计算方案

### 2.1 理论基础

根据热惯量的定义和物理性质,理论上可证明<sup>[4]</sup>

$$I_{TH} = \overline{kY_H \rho} = \overline{k^2 / D_H}. \quad (1)$$

这里,  $I_{TH}$  为热惯量,  $D_H$  为热扩散系数(导温率),  $\rho$  为物体密度,  $Y_H$  为物体的比热稀疏。上式又可写为

$$D_H = (k / I_{TH})^2. \quad (2)$$

显然, (1) 和 (2) 式正是从一维热传导方程出发, 利用温度日变化的周期函数为边界条件, 求解方程所得结果。由此最终可导出表观热惯量表达式

$$I_{ATH} = (1 - \alpha) / (\Delta T_g). \quad (3)$$

式中,  $I_{ATH}$  为表观热惯量,  $\Delta T_g$  为地面温度日较差,  $\alpha$  为反照率。可以证明, NOAA 气象卫星的 AVHRR 红外通道 CH4 的波长为  $10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$ 。对于土壤和植被而言, 可近似认为, 地表发射率  $\epsilon(\lambda)$  与波长关系不大<sup>[4]</sup>。因为据维恩定律, 有  $\lambda_{\max} T = 2.8978 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ , 而通常地表温度平均约为  $300 \text{ K}$ , 由此可推得地物发射的辐射能其中心波长约为  $\lambda_{\max} = 10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$ 。换言之, CH4 亮温代表了地物发射的辐射能量主频带。由斯忒芬玻尔兹曼定律可知

$$M_{bb} = \epsilon \sigma T_g^4. \quad (4)$$

式中,  $M_{bb}$  为地物辐射通量密度,  $\sigma$  为玻尔兹曼常数 ( $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ),  $T_g$  为实际地表温度,  $\epsilon$  为地物发射率。又据辐射亮温的定义可知

$$\epsilon \sigma T_g^4 = \sigma T_b^4. \quad (5)$$

式中,  $T_b$  为地物辐射温度。显然, 由 (5) 式得

$$\epsilon = (T_b / T_g)^4. \quad (6)$$

文献[1]证明, 每一辐射温度  $T_b$ , 都有一个对应的常数  $x$ , 使得

$$T_b = C_2 / (\lambda x). \quad (7)$$

其中,  $C_2$  为第 2 辐射常量 ( $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ),  $\lambda$  为相应波长。由此推得一般情况下,  $\Delta T_b = T_{b\max} - T_{b\min} = 27 \text{ K}$ ,  $\Delta T_g = T_{g\max} - T_{g\min} = 27.71 \text{ K}$ 。由此可见,  $\Delta T_g \gg \Delta T_b$ 。换言之, 亮温温差  $\Delta T_b$  与实际温差  $\Delta T_g$  相差的最大绝对误差小于  $1 \text{ K}$ 。在一般情况下, 可将大气衰减及发射率  $\epsilon = 1$  造成的误差降到最小。上述关系表明, 利用一日中最高温度时刻(白天)和最低温度时刻(夜间) CH4 图像资料就可估计昼夜温差。即有关系式

$$\Delta T_g = T_{g\max} - T_{g\min} = T_{dCH4} - T_{nCH4}. \quad (8)$$

通常, 辐射温度又称表观温度。根据上述论证, (3) 式又可写成

$$I_{ATH} = (1 - \alpha) / (T_{dCH4} - T_{nCH4}). \quad (9)$$

另一方面, 根据气候学与小气候学理论及其试验表明, 土壤内各深度的温度, 其日变化基本上都遵循谐波假定, 即对任一地点(或格点)而言, 其地表温度日变化可用下列土壤温度方程描述<sup>[9]</sup>(仅取一阶近似), 即有

$$T_{gi}(t) = T_{gi} + A_i \sin(\omega t + \omega_i) + \epsilon_i. \quad (10)$$

这里,  $A_i$  为第  $i$  格点上的土温日振幅,  $T_{gi}$  为日平均温度,  $\epsilon_i$  为相应的随机误差, 其圆频率  $\omega = 2\pi / 24$ , 而  $\omega_i$  为第  $i$  格点的初位相。众所周知, 根据太阳相对于地球上任一点的视运动轨迹, 当地太阳高度角  $h = 0$  时, 可求得日出(日落)的时角<sup>[9, 10]</sup>

$$\omega_i = \cos^{-1}(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta) \quad (11)$$

这里,  $\varphi$  为当地纬度,  $\delta$  为太阳赤纬。对于任意地点的时间坐标  $t$  而言, 将早晨日出时间  $t_0$  确定后, 就可确定出初位相  $\omega_i$ , 即令

$$T_{gi}(t) - \bar{T}_{gi} = A_i \sin(\pi(t - t_0)/12 + \omega_i) \quad (12)$$

将  $t$  改为新坐标  $t^*$ , 必有

$$T_{gi}(t^*) - \bar{T}_{gi} = A_i \sin(\pi t^*/12 + \omega_i) \quad (13)$$

根据求解 Fourier 级数的方法<sup>[11, 12]</sup>, 上式可写为

$$T_{gi}(t^*) - \bar{T}_{gi} = a_1 \sin \tilde{\omega} + b_1 \cos \tilde{\omega} \quad (14)$$

其中,

$$\bar{T}_{gi} = \frac{1}{N} \sum_{t^*} T_{gi}(t^*), \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{2}{N} \sum_{t^*} T_{gi}(t^*) \sin(\tilde{\omega}), \quad (16)$$

$$b_1 = \frac{2}{N} \sum_{t^*} T_{gi}(t^*) \cos(\tilde{\omega}), \quad (17)$$

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (18)$$

若各地已有实测 24 h 地表温度记录, 即可拟合上述地表温度日变化的一阶谐波曲线。当然, 如取二阶谐波近似, 也未尝不可, 不过, 本文所取一阶近似的精度, 已基本满足要求。例如已知任一格点  $i$  的某日  $t = t_1$  时刻 CH4 图像, 即有对应的卫星遥感数据  $T_{gi}(t_1^*)$ , 尽管我们并不确切知道某日温度振幅  $A_i \approx \Delta T_i/2$ , 但由 (13) 式即可求得  $A_i$  的估计值。

$$\tilde{A}_i = \frac{\Delta \tilde{T}_i}{2} = \frac{T_{gi}(t_1^*) - \bar{T}_{gi}}{\sin(\omega_i^* + \tilde{\omega}_i)} \quad (19)$$

## 2.2 计算方案

对某一地点而言, 日平均地表温度往往并不知道, 但可用间接方法估计。由于  $\Delta \tilde{T}_g$  仅仅是一个相对量, 因而对计算  $T_{gi}$  的结果并无影响。这里提出两种计算方案。

[方案 1] 已知某日的一个时次 CH4 图像。设已知第  $i$  格点上,  $T_{gi}$  具有逐日自相关, 其自回归方程服从  $AR(1)$ , 即有

$$\bar{T}_{gi}^{(k)} = \alpha \bar{T}_{gi}^{(k-1)} \quad (20)$$

其中,  $\bar{T}_{gi}^{(k)}$  表示第  $k$  日平均温度,  $\alpha$  为其一阶自回归系数<sup>[12]</sup>。若已知相邻两日的任何时刻  $t_1$  和  $t_2(t_1 - t_2)$  的 CH4 记录, 则可建立相邻两日的自回归方程。作者对全区域全年各月逐日温度都作了验证, 结果表明, 其自相关均比较高。图 1 为 1 月份逐时温度自回归拟合值与实际值的点聚图。由图可见, 自回归拟合值与实际值非常吻合。

又据 (13) 式, 并省略\* 上标, 可有

$$T_{gi}^{(k)}(t_1) = \bar{T}_{gi}^{(k)} + A_1 \sin(\tilde{\omega}_1 + \varphi), \quad (21)$$

$$T_{gi}^{(k+1)}(t_2) = \bar{T}_{gi}^{(k+1)} + A_2 \sin(\tilde{\omega}_2 + \varphi) \quad (22)$$

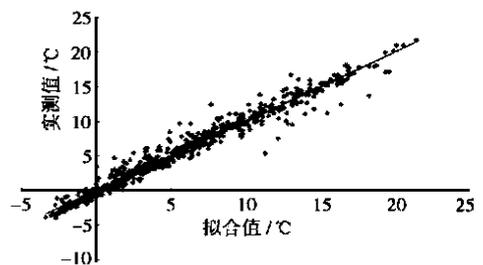


图 1 1 月份逐时温度自回归拟合值与实际值

Fig. 1 Hourly temperature autoregression fitting values and the observed values in Jan.

将(20)式分别应用于(21)和(22)式,就有

$$\begin{cases} T_{gi}^{(k)}(t_1) = \alpha T_{gi}^{(k-1)} + A_1 \sin(\tilde{\omega}_1 + \varphi); \\ T_{gi}^{(k+1)}(t_2) = \alpha T_{gi}^{(k)} + A_2 \sin(\tilde{\omega}_2 + \varphi). \end{cases} \quad (23)$$

由于土壤表面温度在逐日天气状况相差不大的情况下,往往差异不大,即它们有高(自)相关性,因此可近似认为有

$$A_1 = A_2; \quad \varphi = \varphi_0. \quad (24)$$

利用(20)式并综合(21)和(22)式的关系,就可以导出下列近似式

$$A = \frac{\alpha T_{gi}^{(k)}(t_1) - T_{gi}^{(k+1)}(t_2)}{\alpha \sin(\tilde{\omega}_1 + \varphi) - \sin(\tilde{\omega}_2 + \varphi)} \quad (25)$$

或

$$\Delta T_g = 2 \left[ \frac{T_{gi}^{(k+1)}(t_2) - \alpha T_{gi}^{(k)}(t_1)}{\sin(\tilde{\omega}_2 + \varphi) - \alpha \sin(\tilde{\omega}_1 + \varphi)} \right]. \quad (26)$$

上式表明,已知相邻两日不同时刻  $t_1, t_2$  的 AVHRR-CH4 亮温与其自相关系数  $\alpha$  值,就可近似估计日温差  $\Delta T_g$ 。如果各个常规观测点有相应于各个日期的地表温度观测纪录  $\Delta T_i$ ,则可据已知的  $\Delta T_i$  与推算的  $\Delta T_i$  建立经验回归方程。一般说来,已知相邻两日任一天的两次 CH4,如果是下午轨道,即可直接运用该方案,如果是上午轨道,则应改用方案 2。

[方案 2] 已知某日的两个时次 CH4 图像,可更为简便地推出(理论)温度日较差,只要建立下列方程并求解

$$\begin{cases} T_{gi}(t_1) = T_{gi} + A \sin(\pi t_1/12 + \tilde{\omega}); \\ T_{gi}(t_2) = T_{gi} + A \sin(\pi t_2/12 + \tilde{\omega}). \end{cases} \quad (27)$$

于是有

$$\Delta T_g = 2A = 2 \frac{T_{gi}(t_1) - T_{gi}(t_2)}{\sin(\pi t_1/12 + \tilde{\omega}) - \sin(\pi t_2/12 + \tilde{\omega})}. \quad (28)$$

不难看出,上述方案更为直接,因而效果更好。

为了进一步推求区域内各个网格点上的地表温度日较差,假设推算的  $\Delta T_i$  记为  $x_i$ ,实测的  $\Delta T_i$  记为  $y_i$ ,则利用区域上的有限观测站点的资料( $y$ )和相应的计算值( $x$ )就可建立经验回归方程<sup>[11]</sup>

$$\hat{y}_i = f(x_i). \quad (29)$$

一般假定其为线性式

$$y_i = a + bx_i. \quad (30)$$

据此方程就可进一步推算出其他无实测资料的网点相应的  $\Delta T_i$ 。可见,当方程达到一定的显著性标准时,就可作为各网格点  $\Delta T_i$  估计值的方程。另一方面,(30)式又可作为校正误差的订正公式。在样本较大的情况下,上述经验回归方程,实质上也是一种误差平滑公式。它可将偏差太大的计算值按其回归值加以订正。

### 3 数值试验

选取 NOAA-AVHRR 长江三角洲地区图像纪录:1999-04-06T15 和 1999-04-07T15,1999-04-13T03 与 1999-04-13T06,分别依第 1 种和第 2 种方案(即(26)式和(28)式),估计出各自的  $\Delta T_g$ 。例如常熟地区:

(1)4月6日拟合曲线方程:  $T_g = 16.714 + 12.269 \sin(0.2618t + 4.493)$ ; (2)4月7日拟合曲线方程:  $T_g = 15.914 + 9.325 \sin(0.2618t + 4.417)$ ; (3)4月13日拟合曲线方程:  $T_g = 15.555 + 9.518 \sin(0.2618t + 4.438)$ 。

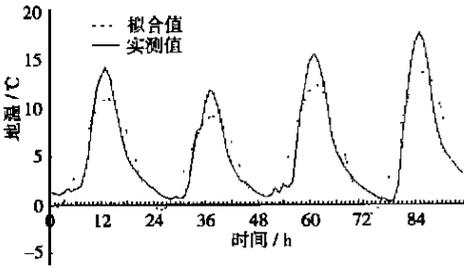


图2 1月1~4日常熟地表温度拟合曲线

Fig. 2 The fitting curve of surface temperature during 1~4th Jan. in Changshu

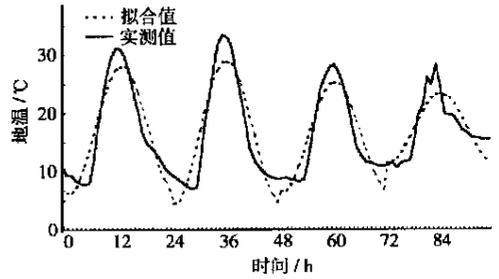


图3 4月5~8日常熟地表温度拟合曲线

Fig. 3 The fitting curve of surface temperature during 5~8th Apr. in Changshu

对于区域内各个网格点的计算, 可用上述方法推广。由于资料的限制, 本文仅选取了有限的站点加以验证。取南京、溧阳、大丰等8站点各日的地表日较差值资料(表1)。

表1 南京等8个代表站地表温度验证及估计误差

Table 1 Test results and estimated errors of the surface temperatures for 8 stations

站名	4月6日			4月7日			4月8日		
	$\Delta T$	$\Delta \bar{T}$	误差/%	$\Delta T$	$\Delta \bar{T}$	误差/%	$\Delta T$	$\Delta \bar{T}$	误差/%
南京	24.9	21.4	16	24.2	20.8	14	22.8	19.4	17
东台	25.8	22.3	15	20.4	17.2	17	22.3	19.0	17
东山	27.9	24.2	15	23.8	20.4	16	24.7	21.2	17
南通	24.7	21.2	16	19.8	16.6	19	21.9	18.9	17
常州	21.2	17.9	18	16.9	13.9	21	21.5	18.2	18
高邮	36.0	31.8	13	28.8	25.1	14	32.6	28.6	14
启东	34.8	30.7	13	27.8	24.1	15	22.4	19.1	17
溧阳	27.1	23.5	15	33.8	29.7	13	27.7	24.0	15

(1) 首先应用(13)、(14)式估计  $\tilde{A}_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ , 并与实测  $\Delta T_i$  建立经验回归关系式。图4为全年各月(1~12月)逐日温度日较差拟合值与实际值的比较。由图可见, 其拟合度相当高。

(2) 根据上述方法, 对长江三角洲地区各网格点计算出的地表日温差结果, 绘制成空间分布(图5和图6)。

(3) 对计算结果进行误差分析。由表1可见, 日较差计算值与实测值的绝对误差虽有少数偏大, 但其相对误差平均仅约为15%, 而其计算值与实测值之间的相关系数已达0.999, 其相关系数的显著性, 已达信度0.01。为了减小误差, 也可求得计算值与实测值之间的回归方程(图7), 作为计算值的订正方程。换言之, 如已反演得地表温度日较差, 即可按方程(29), (30)建立计算值的订正方程(图7),

$$y = 0.9369x - 1.9276. \quad (31)$$

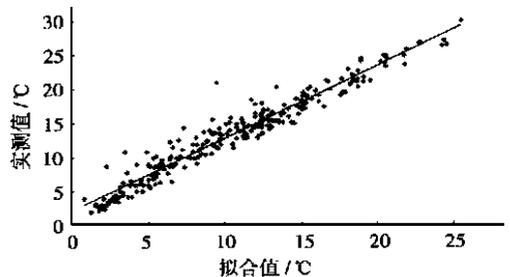


图4 1~12月逐日温度日较差拟合值与实际值  
Fig. 4 Fitted and observed values of daily range of diurnal temperature for each month during a year

式中,  $y$  为日较差的订正值,  $x$  为由上述方法所得的计算值。

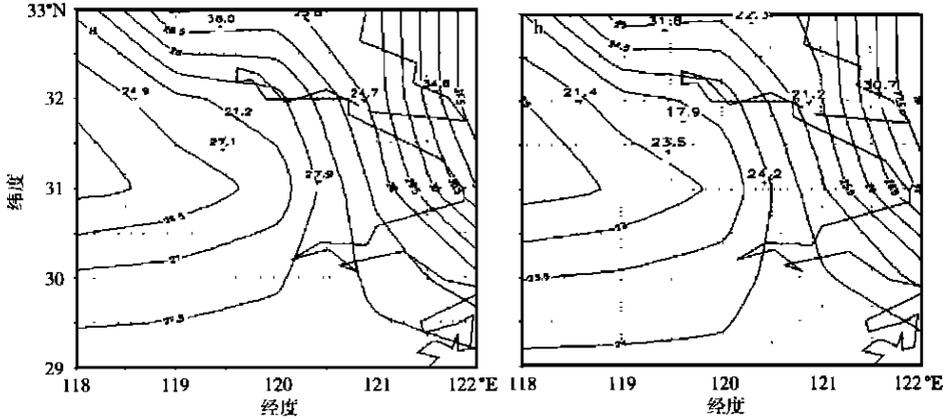


图 5 4月6日的实测值(a)和拟合值(b)分布

Fig. 5 Distribution of observed(a) and simulated daily range of surface temperatures(b) on April 6

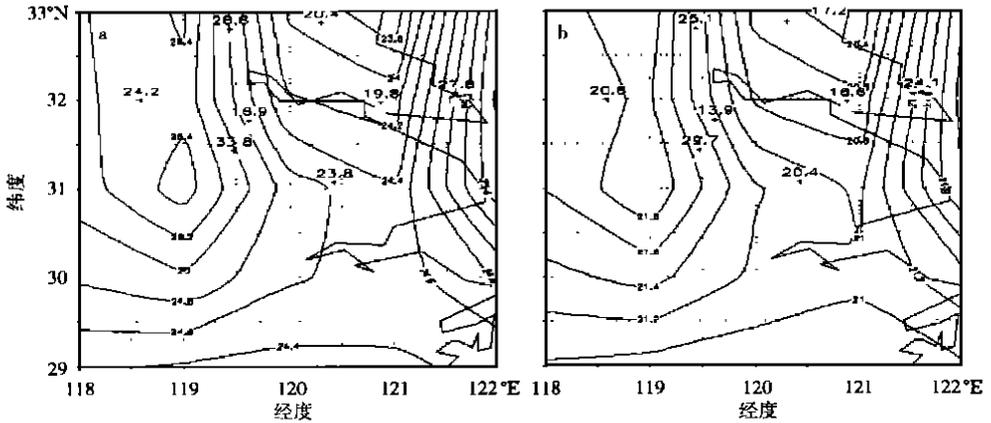


图 6 4月7日的实测值(a)和拟合值(b)分布

Fig. 6 Distribution of observed(a) and simulated daily range of surface temperatures(b) on April 7

综上所述, 由任一时刻  $t = t_i$  的 AVHRR 数字图像, 可据 (13)、(14) 式推算  $\Delta T_E$  (全网格区), 从而为计算表观热惯量  $I_{ATH}$  和真实热惯量  $I_{RTH}$  提供可靠的依据。

### 4 小结

(1) 针对 NOAA-AVHRR 资料反演土壤含水量的问题, 提出一种简易推算方法, 利用一日中任意一两个时次的 NOAA-AVHRR 图像数据可近似估计地表温度日较差, 从而在一定程度上解决了: 在图像数据的时次与热惯量法所要求的最高最低温度时次配不准的情况下, 如何估计地面温度日较差, 以便为计算地表热

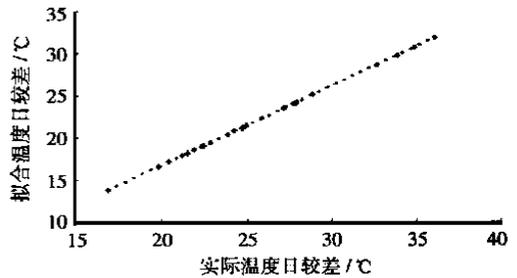


图 7 地表温度日较差估计值与实测值的回归方程

Fig. 7 Regression equation between estimated and observed values for daily range of surface temperatures

惯量及相应的土壤含水量提供可靠的数据。

(2) 实例验证表明, 该方法在一定程度上、一定精度范围内, 具有可行性, 并可进一步推广应用。鉴于目前国内主要应用 NOAA-AVHRR 图象资料反演土壤含水量, 而土壤含水量反演的影响因素并不仅仅取决于地表温度日较差。本文只是从一个方面为该问题提供依据, 而有关土壤含水量的反演, 仍应深究有关的技术性问题。例如, 云对反演精度的影响等。

## 参考文献:

- [1] Engman E T, Chauhan N. Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing[J]. Remote Sensing Environ, 1995, 51(1): 189~198.
- [2] 田国良. 土壤水份的遥感监测方法[J]. 环境遥感, 1991, 6(2): 89~98.
- [3] Evans D, Farr T G, Van Zyl J J, et al. Radar polarimetry: Analysis tools and applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(4): 774~789.
- [4] 马蔼乃. 遥感信息模型[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998. 41~61.
- [5] 刘培君, 张琳. 卫星遥感估测土壤水分的一种方法[J]. 遥感学报, 1997, 1(2): 135~138.
- [6] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 24~31.
- [7] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟. 用 NOAA/AVHRR 资料监测土壤湿度[J]. 遥感信息, 1990, 5(1): 22~25.
- [8] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用气象卫星监测土壤水分的试验研究[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3): 312~318.
- [9] 翁笃鸣, 陈万隆, 高家表, 等. 小气候与农田小气候[M]. 北京: 农业出版社, 1981. 50~54.
- [10] 傅抱璞, 虞静明, 卢其尧. 山地气候资源与开发利用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996. 132~139.
- [11] 么枕生, 丁裕国. 气候统计[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 601~608.
- [12] 丁裕国, 江志红. 气象数据资料的信号处理[M]. 北京: 气象出版社, 1998. 32~37, 81~87.

# EXPERIMENT FOR ESTIMATING DAILY RANGE OF SURFACE TEMPERATURE OVER A REGION USING AVHRR DATA AT ARBITRARY TIME

LIU Jing-miao<sup>1</sup>, DING Yu-guo<sup>2</sup>, WANG Ji-jun<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

2. Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing 210044)

**Abstract:** A simple method to estimate the daily range of surface temperature is presented by using daily arbitrary time NOAA-AVHRR Graph data based on the soil temperature equation which can express the daily variation of soil temperature. Particularly, the method can be applied in the calculation of inverse soil moisture so that when the both times of maximum and minimum temperatures are not consistent with the times that are required by thermal inertia method, this method can approximately estimate the daily range of surface temperature and can calculate thermal inertia of surface and soil moisture. In this paper, the feasibility is demonstrated using real cases.

**Key words:** thermal inertia; remote sensing information; daily range of temperature