

热红外遥感反演地表温度研究现状

朱怀松¹, 刘晓锰², 裴欢³(1. 新疆乌鲁木齐市环境信息中心, 新疆 乌鲁木齐 830063; 2. 新疆乌苏市水利局, 新疆 乌苏 833000;
3. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

摘要:地球表面温度是一个重要的水文、气象参数,它影响着大气、海、陆之间的感热和潜热交换,是诸多研究领域不可或缺的基础资料,精确定量反演陆面温度的成果将推动旱灾预报和作物缺水研究、农作物产量估算、数值天气预报、全球气候变化和全球碳平衡等领域研究的进展。因此,利用卫星遥感资料进行地表温度的反演已成为目前遥感定量研究中的重要任务之一。本文阐述了遥感反演地表温度的原理及各种方法,对各种方法所要解决的关键问题及优缺点做了评述,最后展望了遥感反演地表温度的发展趋势。

关键词:地表温度;单窗算法;劈窗算法;组分温度反演

中图分类号:P407.6

文献标识码:A

引言

地表温度是监测地球资源环境动态变化的重要指标之一,对水文、生态、环境和生物地球化学等研究有重要意义。传统获取地表温度的做法是采用温度计测量,所测的结果只代表观测点的局部温度,唯有遥感可以提供二维陆面温度分布信息^[1],并且可以快速同步地获取大面积区域地表温度。因此利用卫星数据演算地表温度,探讨卫星热通道的理论及其实际应用方法,已经成为遥感科学的一个重要领域。热红外遥感记录的是地物发射的热辐射能量,具有不破坏地表热力学状态的特点,用其反演陆面温度早已被科学家重视,可以从1962年发射的TIROS卫星算起。由于热红外遥感本身较为复杂,如地表发射率的测定、大气效应订正、温度与发射率的分离以及非同温像元混合问题等,使得反演陆地温度复杂了许多^[2],精度也受到了限制。随着空间信息技术的发展,遥感陆面温度的反演技术也取得了很大进步,已发展出了多套地面温度反演方法。本文介绍了地表温度遥感反演的原理及各种方法,并对各种方法的优缺点及适用性进行了阐述,最后分

析了遥感反演地表温度的发展趋势。

1 遥感反演地表温度的原理

目前遥感反演地表温度的方法主要有传统的大气校正法、单窗算法、劈窗算法。这些算法最基本的理论依据是维恩位移定律和普朗克定律。从理论上讲,自然界任何高于热力学温度(Kinetic temperature)的物体都不断地向外发射具有一定能量的电磁波。其辐射能量的强度和波谱分布的位置是温度的函数。随着温度的增加,总辐射能量将相应增加,辐射能量的最大波长也将逐渐变短。通常用Planck定律来描述这种现象。根据Planck定理,黑体的光谱发射特性可以表示为:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

式中 $B_{\lambda}(T)$ 是黑体辐射强度,单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, λ 是波长, C_1 和 C_2 是辐射常数, $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} W \cdot m^{-2}$; $C_2 = 1.4387685 \times 10^4 \mu m \cdot K$, T 是温度,单位是K。

Planck函数给出了黑体辐射的辐射强度与温度

收稿日期:2007-03-19; 改回日期:2007-05-07

作者简介:朱怀松(1975-),男,硕士研究生,工程师,主要从事地理信息系统应用和环境保护方面工作。

通讯作者:裴欢(1981-),女,在读博士,主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail:1982197950@163.com

和波长的定量关系。从(1)式可以看出,温度确定后,由 Planck 函数可以确定辐射源的能量谱分布,进而可以推算出物体的能量谱峰值的波长^[3-4]。反之,从物体的能量谱分布及辐射强度也可计算出物体的实际温度。这也是地表温度能被反演的理论基础。

2 遥感反演地表温度方法

从 20 世纪 80 年代至今,遥感反演地表温度经历了 20 多 a 的发展,取得了很大成果,但地表温度的精确反演仍然是当前研究的热点与难点之一,下面对各种算法做一介绍。

2.1 单窗算法

单窗算法适用于只有一个热波段的遥感数据,主要用于 TM6 数据进行地表温度反演。长期以来,从 TM6 数据中演算地表温度通常是通过所谓大气校正法,这一方法需要估计大气热辐射和大气对地表热辐射传导的影响,计算过程很复杂,误差也较大,在实际中应用不多。覃志豪根据地表热辐射传导方程,推导出一个简单易行并且精度较高的演算方法,把大气和地表的影响直接包括在演算公式中^[5]。该算法需要用地表辐射率、大气透射率和大气平均温度 3 个参数进行地表温度的演算。验证表明,该方法的地表温度演算精度较高。当参数估计没有误差时,该方法的地表温度演算精度达到 0.4 °C,在参数估计有适度误差时,演算精度仍达 1.1 °C。Jmenez - Munoz 等提出了一种仅需知道大气水汽含量即可反演地表温度的单窗算法^[6]。Sobrinho J A 等用实测资料对传统的大气校正法和上述 2 种方法的结果进行了验证,指出 Jmenez - Munoz 提出的算法发射率的均方根误差仅为 0.0009,地表温度的误差 < 1 K^[7]。毛克彪把针对 TM 影像的单窗算法改进成适应于 ASTER 传感器的单窗算法,先对 ASTER 的 13 波段(10.25 ~ 10.95 μm)和 14 波段(10.95 ~ 11.65 μm)的 Planck 方程进行线性简化,然后用单窗算法分别对 ASTER 的第 13 和 14 波段建立方程,从而形成了针对 ASTER 传感器的单窗算法,并对参数的获取做了简要的介绍^[8]。

2.2 劈窗算法

劈窗算法以地表热辐射传导方程为基础,利用 10 ~ 13 μm 大气窗口内,2 个热红外通道(一般为

10.5 ~ 11.5 μm、11.5 ~ 12.5 μm)对大气吸收作用的不同,通过 2 个通道测量值的各种组合来剔除大气的影 响,进行大气和地表比辐射率的修正^[9]。劈窗算法主要是针对 NOAA/AVHRR 开发的,并被首先运用到海面温度反演。经过 20 多 a 的发展,目前公开发表的劈窗算法已经将近 20 个^[10]。

2.2.1 分裂窗算法的一般形式

基于 NOAA/AVHRR 数据的分裂窗算法的一般形式为:

$$T_s = T_4 + A(T_4 - T_5) + B \quad (2)$$

式中 T_s 为陆面温度, T_4 、 T_5 为 AVHRR 通道 4、通道 5 的亮温值,系数 A 、 B 由大气状况及其它影响通道 4、通道 5 的辐射和透过率的有关因子决定,不同的分裂窗算法有不同的 A 、 B 值^[11-12]。

Price 首次将分裂窗算法应用于地表温度的反演^[13],他将地表看作黑体,且只考虑大气水汽的吸收和散射,取系数 $B = 0$,表达式为:

$$T_s = [T_4 + 3.33(T_4 - T_5)](5.5 - \varepsilon_4) / 4.5 + 0.75T_s \Delta \varepsilon \quad (3)$$

式中 $\Delta \varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$, ε_4 、 ε_5 分别为 AVHRR 通道 4 和通道 5 的地表辐射率。

Coll 对 Price 提出的算法进行了改进,他引入了地表比辐射率对 T 的修正,给出的系数 B 是由大气效应和地表比辐射率决定,然而系数 A 也仅是大气状况的函数^[14]。Franca 和 Cracknell 的算法中,地表比辐射率、大气吸收系数和水汽含量的影响直接表现在系数 A 、 B 的表达式中。Sobrinho 和 Caselles 提出了表示系数 A 和 B 的一种简化算法,在这一算法中, A 、 B 直接表示为通道 4 和通道 5 的地表比辐射率的函数,而大气效应则以常数表示^[15]。

2.2.2 分裂窗算法的其它形式

劈窗算法的另一种常用表达式为(式中 A_0 、 A_1 、 A_2 是参数):

$$T_s = A_0 + A_1 T_4 + A_2 T_5 \quad (4)$$

以这种形式为代表的方法有:Becker 等、Kerretal、Wan 等,见表 1。

表 1 分裂窗算法的其它表现形式^[15]
Tab. 1 The other form of split - window algorithm

反演算法		系数
Becker et al. (1990)	$T_S = A_0 + P(T_4 + T_5)/2 + M(T_4 - T_5)/2$	$A_0 = 1.274$ $P = 1 + 0.15616(1 - \varepsilon)/\varepsilon - 0.482\Delta\varepsilon/\varepsilon^2$ $M = 6.26 + 3.89(1 - \varepsilon)/\varepsilon + 38.33\Delta\varepsilon/\varepsilon^2$
Wan et al. (1996)	$T_S = A_0 + P(T_4 + T_5)/2 + M(T_4 - T_5)/2$	$P = A_1 + A_2\Delta\varepsilon/\varepsilon^2 + A_3(1 - \varepsilon)/\varepsilon$ $M = B_1 + B_2\Delta\varepsilon/\varepsilon^2 + B_3(1 - \varepsilon)\varepsilon$
Ottle et al. (1992)	$T_S = a_0 + a_1 T_4 + a_2 T_5$	
Kerr et al. (1992)	$T_S = CT_v + (1 - C)T_{bx}$	$C = (NDVI - NDVI_{bx}) / (NDVI_v - NDVI_{bx})$

通过对大气向下热辐射的近似解和对 Planck 辐射函数的线性化, Qin 推导了他们的劈窗算法, 该算法仅需要 2 个因素来进行地表温度的演算。这一算法有如公式(2)所示的一般形式, 并且提出了地表比辐射率和大气透过率的算法。该算法已在 MODIS 数据中得到了广泛的应用^[16]。

覃志豪对 12 种劈窗算法进行了对比并且对精度进行了验证, 指出 Sobrino 和 Caselles、Franca 和 Cracknell 和 Qin 的地面温度演算误差 $< 0.25\text{ }^\circ\text{C}$, 表明其演算精度远高于其它算法。由于 Sobrino 和 Franca 的算法需要较多大气参数, 可以认为 Qin 的算法是一个较好的地面温度算法^[10]。

2.3 组分温度反演技术

无论是单窗算法还是劈窗算法, 它们都有一个共同的缺陷, 就是只把像元看成同温同质体, 反演得到的陆面温度只是像元的等效温度或平均温度。对于复杂目标而言, 像元内的组分温度才具有实用价值, 并且现有传感器的热红外通道间高度相关, 不可能获得稳定的高精度解, 即使增加通道数也无济于事^[17], 而且在目前传感器精度限制的情况下, 热红外通道间信息的高度相关会导致温度解不稳定, 并限制温度反演精度的提高^[18]。因此热红外多角度遥感数据的地表组分温度的反演逐渐发展起来。

李小文等向热红外遥感界的传统观点提出了挑战, 提出了一个能够描述不同温表面方向性辐射的概念模型(LSF)。在此概念模型中, 承认地表不再是同温的物体, 而是有不同的组分温度, 同时构造了等效发射率。这个等效发射率一部分由地表的二向性反射分布函数 BRDF 决定, 另一部分是由组分温度的差别引起的等效发射率。LSF 模型为不同温地表热辐射的方向性建模奠定了基础^[19]。徐希孺等

提出了有效发射率模型、矩阵表达式等。这些模型从概念上揭示了组分温度和温差的分布对像元热辐射的影响, 以及像元内各组分互为光源的特性, 真正从原理上阐明了地表热辐射方向性产生的机理^[20]。

刘强通过在辐射传输方程中添加热发射项的方式, 直接把一个常用的可见光波段的冠层模型——SAIL 模型改造成热红外波段模型, 此模型适用于各种类型的多层水平均匀植被并且可以计算组分的有效发射率或发射率的多次散射增量^[21]。范文捷等根据热红外辐射矩阵表达式建立了组分温度反演的矩阵方法, 提出了“最优视角组合的方法”^[22]。王锦地、李小文等提出了一种在遥感反演中度量数据空间和参数空间信息量的方法, 研究应用多角度方向辐射观测数据对非同温像元组分温度的估计, 提出了多组分像元热红外辐射模型的线性反演方法^[23]。庄家礼等在连续植被热辐射方向性模型基础上, 采用遗传算法, 从模拟和实测的热红外多波段、多角度遥感数据中同时反演混合像元的组分温度、叶面积指数等多维参数, 为地表组分温度的精确反演提供了一种新途径^[24]。李召良提出了一种用 ASTER 数据分解土壤和植被温度的方法, 利用同一图像中观测得到的方向性辐射值分别反演了土壤和植被的温度, 并估算了大气状况和地表覆盖不确定度对 2 个估测值的影响程度^[25]。

从上面各种地表温度反演算法的介绍可以看出, 地表发射率在热红外遥感反演陆面温度中起着重要作用, 关系着陆面温度的精确程度, 目前估算地表比辐射率的方法可归纳为 3 类:

(1) 根据可见光和近红外的光谱信息, 利用经验和半经验公式来估计比辐射率, 如建立地表发射率和归一化植被指数 NDVI 之间的统计关系模

型^[26-28];

(2)根据热红外光谱仪里最小比辐射率与最大相对比辐射率之差的统计关系来确定比辐射率^[29-30];

(3)假定比辐射率或者与温度无关的波谱指数不变,利用多时相热红外数据来确定比辐射率^[31]。如李召良根据 2 个通道与温度无关的波谱指数的概念,并利用白天和晚上中红外和热红外的空间测量值,提出了一种用于提取方向比辐射率的物理方法,同时提出了一个用于描述反射率(或比辐射率)角度变化的 3 参数现象模型^[32]。

显然,方法(1)、(2)均没有完全考虑发射率的变化,势必会对反演结果产生较大误差。方法(3)物理意义明确,可以产生较精确的地表比辐射率。

2.4 各种方法比较

通过上述对各种地表温度遥感反演方法的对比,可以看出单窗算法所应用的数据 TM/ETM 与多通道 NOAA、MODIS 等数据相比,空间分辨率较高,并且对地表发射率的敏感性较低,单从反演的技术及精度来讲,具有较大优势,但如果反演大区域地表温度则需要很大的资金投入。

分裂窗法是目前应用最广、最成熟的方法,精度较高。相对而言,它不需要输入大气廓线值。但是,分裂窗法还不完善,例如只限于晴空大气条件下的反演,对于混合像元只能给出有效平均温度,而没有考虑亚像元问题。另外,算法中的系数对整幅图像是相对固定的,这对较大的研究区域会产生较大误差^[15]。

单窗方法和劈窗方法不能直接反演混合像元组分温度,因此反演精度和应用价值都受到极大的限制。基于热红外多角度遥感数据的地表组分温度反演物理意义明确,可以反演出混合像元组分温度,因此如何提高其反演精度,是当前陆温反演研究的重点和难点,也是地表温度反演的主要发展方向。

3 结语与讨论

热红外遥感反演陆面温度在应用上取得了显著的成就,但是,它的许多基础理论问题均未很好地解决,如地表热红外辐射及发射的方向性问题、温度与比辐射率的分离问题、混合像元比辐射率的尺度转换与非同温混合像元的分解问题等,基础研究的不足,制约了应用的进一步发展。

综合以上分析,笔者认为,为提高热红外遥感数据反演地表温度的精度及可应用性,今后应加强以

下几方面的研究:

首先,大气订正方法研究。尽管 MOTRAN 等大气订正模型、分裂窗法可以进行热红外大气订正,但是,其不同区域参数调整精度仍需提高;

其次,提高地表比辐射率计算精度。地表发射率信息提取方法很多,但对这些方法的提取精度、大气校正误差敏感性、仪器噪声敏感性及对各种地物的适用性等方面进行综合定量评价还未完成,并且对现有的发射率数据库也需要进行更新,它的前进会加速陆面温度反演的步伐;

再次,将多角度、多光谱和多极化遥感相结合。这种结合为热红外遥感反演地表温度提供了更好的信息源。由于地表被测物的辐射均具有方向性的特点,因此从不同的方向可以获取不同的地物信息,利用多角度遥感可以明显增加地物三度空间的信息量,可以改善大气辐射纠正的能力;

最后,开展非同温像元组分温度反演。目前多角度遥感所能提供的方向性观测信息量相对来说仍十分有限,要尽量地扩充观测信息的获取范围,合理地使用先验知识。

参考文献:

- [1] 徐希孺,柳钦火,陈家宜. 遥感陆面温度[J]. 北京大学学报, 1998, 34 (2): 248 - 253.
- [2] 甘甫平,陈伟涛,张绪教. 热红外遥感反演陆地表面温度研究进展[J]. 国土资源遥感, 2006, 67 (1): 6 - 11.
- [3] Cracknell A P, Xue Y. Dynamic aspects study of surface temperature from remotely sensed data using advanced thermal inertia model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17 (6): 2517 - 2532.
- [4] 江东,王乃斌. 陆面温度的遥感反演:理论、推倒及应用[J]. 甘肃科学学报, 2001, 13 (4): 36 - 40.
- [5] 覃志豪, Zhang M, Karnieli A. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456 - 466.
- [6] Jimenez - Munoz J C, Sobrino J A. A generalized single - channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. Journal of geophysical research, 2003, 108(D22): 4688 - 4695.
- [7] Sobrino J A, Jimenez - Munoz J C, Leonardo Paolini. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 [J]. Remote Sensing of environment, 2004(90): 434 - 440.
- [8] 毛克彪,覃志豪,徐斌. 针对 ASTER 数据的单窗算法[J]. 测绘学院学报, 2005, 22(1): 40 - 42.
- [9] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] 覃志豪, Zhangming - hua, Aron Karnieli. 用 NOAA/AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. 国土资源遥感, 2001, 48(2): 33 - 42.

- [11] Henrik Steen Andersen. Land surface temperature estimation based on NOAA - AVHRR data during the HAPEX - Sahel experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 188 - 189: 88 - 814.
- [12] Franca G B, Cracknell A P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA - 9 AVHRR data in north eastern Brazil [J]. *International Journal of Remote sensing*, 1999(15): 695 - 712.
- [13] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channel of the NOAA7/AVHRR [J]. *Geophys Res*, 1984 (89): 7231 - 7237.
- [14] Coll C, Caselles V. On the atmospheric dependence of the split - window equation for land temperature [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994 (15): 105 - 122.
- [15] 俞宏, 石汉青. 利用分裂窗算法反演陆地表面温度的研究进展 [J]. *气象科学*, 2002, 22(4): 494 - 500.
- [16] Qin Z, Olmo G D, Karnieli A, et al. Derivation of Split Window Algorithm and Its Sensitivity Analysis for Retrieving Land Surface Temperature from NOAA - advanced Very High Resolution Radiometer Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (D19): 22655 - 22670.
- [17] 李小文, 王锦地, 胡宝新. 先验知识在遥感反演中的作用 [J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(1): 67 - 72.
- [18] 陈良富, 庄家礼, 徐希孺. 热红外遥感中通道间信息相关性及其对陆面温度反演的影响 [J]. *科学通报*, 1999, 44(19): 2122 - 2127.
- [19] Li Xiaowen, Alan H Strahler, Mark A Friedl. A Conceptual Model for Effective Directional Emissivity from Nonisothermal Surfaces [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2508 - 2517.
- [20] Xu Xiru, Fan Wenjie, Chen Liangfu. Matrix Expression of Thermal Radiative Characteristics for an Open Complex [J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 2002, 45(7): 654 - 661.
- [21] 刘强, 陈良富, 柳钦火. 作物冠层的热红外辐射传输模型 [J]. *遥感学报*, 1999, 44(19): 161 - 165.
- [22] 范闻捷, 徐希孺. 论热红外多角度遥感数据的相关性及视角优化配置 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(8): 809 - 815.
- [23] 王锦地, 李小文. 用热辐射方向性模型反演非同温像元组分温度 [J]. *中国科学(E 辑)*, 2000, 30(增刊): 54 - 60.
- [24] 庄家礼, 徐希孺. 遗传算法在组分温度反演中的应用 [J]. *国土资源遥感*, 2000(1): 28 - 33.
- [25] 李召良, 张仁华. 利用 ASTER 数据分解土壤和植被温度的研究 [J]. *中国科学(E 辑)*, 2000, 30(增刊): 28 - 38.
- [26] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 利用 landsatTM6 反演地表温度所需地表辐射率参数的估算方法 [J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(增刊): 129 - 137.
- [27] Van de Griend A A, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces [J]. *Int J Remote Sere*, 1993, 14(6): 1119 - 1131.
- [28] Valor E, Casellos V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas [J]. *Remote Sens Environ*, 1996 (57): 167 - 184.
- [29] Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE Tram Geosci Remote Sens*, 1998, 36(4): 1113 - 1126.
- [30] Kealy P S, Hook S J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1993, 31(6): 1155 - 1164.
- [31] Watson K. Two - temperature method for measuring emissivity [J]. *Remote Sens Environ*, 1992(42): 117 - 121.
- [32] 李召良, 张仁华. 一种从中红外和热红外数据中反演地表比辐射率的物理算法 [J]. *中国科学(E 辑)*, 2000, 30(增刊): 18 - 26.

Summary on Retrieval of Land Surface Temperature Using Thermal Infrared Remote Sensing

ZHU Huaisong¹, LIU Xiaomeng², PEI Huan³

(1. *Environment Information Center in Urumqi, Urumqi 830036, China*; 2. *Water Conservancy Bureau in Wusu, Wusu 833000, China*; 3. *International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract: The land surface temperature is an important parameter to hydrology and meteorology, it affects the exchange of sensible and latent heats between atmosphere, sea and land, and it cannot be lack in many research fields. To retrieve land surface temperature exactly and quantificationally will promote the development of research areas such as drought forecasting, crop yield estimating, numerical weather forecast, global climate change and carbon balance. Therefore, retrieval of land surface temperature using thermal infrared remote sensing becomes one of the most important tasks in quantificational remote sensing study. This article introduces the theory and methods of land surface temperature retrieval, and reviews their merit and insufficiency as well as the key questions in each method. Finally, it prospects the developing trend of land surface temperature retrieval.

Key words: land surface temperature; single - window algorithm; split - window algorithm; retrieval of component temperature