

文章编号: 1007-6301 (2001) 03-0262-06

地表热辐射方向性研究进展

陈良富¹, 范闻捷², 柳钦火¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101;

2. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘要: 地表热辐射方向性是基于多角度热红外遥感数据反演组分温度的基本问题, 论文分析了国内外近来从等效比辐射率和热辐射模型两个角度研究非同温热辐射方向性所取得的进展和存在的问题, 并指出今后应继续基本概念的探讨, 加强遥感基础实验和热辐射理论模型简化和验证工作, 进一步探讨基于热红外多角度遥感数据反演组分温度的新方法。

关键词: 热辐射方向性; 非同温混合像元

中图分类号: P413 **文献标识码:** A

1 地表热辐射方向性研究的意义

陆面温度 (LST) 在地表与大气相互作用过程中起着重要的作用, 它在气象、水文、生态等众多领域有着广泛的需求^[1]。然而, 非同温混合像元的普遍存在使 LST 的反演变得异常复杂, 许多实践已经证明这一问题的难度, 前文已经综述过至今绝大部分的 LST 遥感反演方法都基于多通道热红外遥感数据来反演像元的平均温度和等效比辐射率^[2]。但因通道信息之间存在高度的相关性而使反演结果对误差敏感^[3], 且平均温度无法反映植被冠层和土壤的真实温度。因此 Jackson 等人在 1981 年就告诫说, 土壤温度与植被温度有很大的差异, 如果土壤温度掺入植被冠层温度则将引起 CWSI 值的严重误差^[4]。由于多角度热红外遥感信息包含地物几何结构信息和组分温度信息, 有利于直接反演混合像元的组分温度^[5,6], 但其前提是对非同温混合像元热辐射亮度的方向性规律要有正确的认识。

2 地表热辐射方向性的研究现状与存在问题

基于热平衡条件, 二维同温同质非黑体的辐射亮度的方向性可以用比辐射率的概念来描述, 即: $L_K(H) = \epsilon_K(H) \cdot L_{bk}(T)$ 。其中 $L_K(H)$ 代表温度为 T 的非黑体向 H 方向发射的辐射亮度值, K 为波长, $\epsilon_K(H)$ 为 H 方向的比辐射率, $L_{bk}(T)$ 为普朗克黑体辐射亮度值。上式表明二维同温同质非黑体辐射亮度的方向性完全取决于比辐射率的方向性。如 Barton 等^[7], Labed 和 Stoll^[8]对几种裸露土壤比辐射率的实验表明, 比辐射率的角度效应确实存在, 在视角达 60° 之后, 比辐射率迅速变小。Dozier 和 Warren 发现同温状态下雪面的比幅

收稿日期: 2001-06; 修订日期: 2001-08

基金项目: 国家攀登项目 (95-预-38) 和国家重点基础研究发展规划项目 (G2000077900)

作者简介: 陈良富 (1965-), 男, 博士, 副研究员。主要从事可见光、热红外定量遥感基础理论研究

射率方向特性导致 3 K 的辐射亮温角度变化^[9]。对于热红外遥感中普遍存在的非同温混合像元, Balick 和 Hutchinson 报道了落叶林的有效辐射温度有 7 K 的角度变化^[10], Kimes 等人表明当观测方向从水平面变化到天顶角时, 作物冠层的有效辐射温度差异为 2 K^[11], 这两种情况辐射亮度值的角度变化幅度差异达到 5 K。Lagouarde 等人报道了对玉米地在视角为 $\pm 60^\circ$ 观测到的亮度温度要比垂直观测时小 4 K, 而对深耕裸露土壤视角 $\pm 60^\circ$ 的亮温要比垂直观测时高 3.5 K^[12], 出现了辐射亮度值角度变化趋势相反的结果。此外还有不少学者对草地、小麦、大麦、大豆等多种作物和林冠的热辐射角度效应做了野外观测^[13~17], 且 Paw U 对这些观测做过总结回顾^[18]。对于热辐射方向性问题, Kimes 曾解释说由于地表结构引起的阴影效应使像元内产生组分温度差异, 并由此导致辐射亮度随角度发生变化^[11]。除了对非同温混合像元热辐射方向性问题的实验观测外, 人们还从以下思路进行了研究和探讨:

一是试图定义新的发射率概念来说明非同温表面的热辐射方向性, 这一研究是 90 年代中期才开始重视的。同温地物表面的比辐射率定义是该物体的热辐射亮度与同温下黑体辐射亮度的比值, 是相对于黑体的发射能力。根据这一思路, 如 Norman 和 Becker 定义了 e-emissivity^[19], 即自然物体表面的总辐射与同样温度分布下的黑体总辐射之间的比值。Wan 和 Dozier 在文中定义的波段平均发射率 (Band-averaged emissivity) 使这一概念适用于具体的波段^[20]。这种定义的主要特点是直接将同温同质情况下的发射率概念扩展到非同温混合像元, 默认了普朗克定律对非同温状况的适用性。李小文近期探讨了普朗克定律的尺度效应问题, 指出非同温状况不能简单地利用“等效比辐射率”来套用普朗克公式, 否则会出现像元平均温度随波长和视角变化的不合理情况^[21]。另外从经典的基尔霍夫定律出发, Norman 和 Becker^[19], Becker 和 Li 定义了 r-emissivity 概念^[22], 认为 r-emissivity 是“半球—方向”反射率的补集。Francois 和 Ottle 的 canopy emissivity^[23] 概念是基于局地热平衡条件, 从体系反射率的角度来考虑的, 这个概念充分考虑了多次散射的作用, 认为发射率与组分温度无关。可见, 目前非同温地表有效或等效发射率的定义已经成为探讨地表热辐射方向性机理的最基本问题^[24]。但目前对这一问题仍未形成一致的看法。

另一种方法是通过建立辐射模型来解释热辐射亮度值的方向性问题。如 Kimes^[5], Kimes 和 Kirchner^[11], Sobrino 和 Caselles^[25] 建立了纯几何模型来说明行播作物热辐射的角度变化。但这些模型将行播作物抽象为按垄延伸的无空隙矩形实体, 不考虑垄内作物叶子组分之间的辐射传输。Kimes 等也利用几何方法计算了三层树冠的方向辐射亮度值^[26]。这些模型考虑到了组分温度差异的各层对辐射亮度值的贡献, 但忽视作物组分间的辐射传输和多次散射的作用。Francois 等人在 Kimes 孔隙率模型的基础上从测量反射亮度的角度建立的 10 层冠层模型模型考虑了多次散射^[23], 但该模型离实际应用有较大的差距。

由于对非同温热辐射方向性规律认识的程度直接影响组分温度反演的精度, 我国“九五”攀登项目“地球表面能量交换的遥感定量研究”把热辐射方向性研究作为核心研究内容, 并从以下几个方面进行了有益的探索:

(1) 理论模型研究: Li 和 Strahler 等人在考虑同温下多次散射的基础上将体系温差引起的辐射亮度的变化用“视在比辐射率增量”概念来表达, 由此提出的非同温地表比辐射率模型首次将多次散射和非同温状况结合起来^[24, 27]。牛铮等从辐射传输角度给出了零散射近似的冠层热辐射红外间隙率模型。模型还对非同温状况的“热点效应”进行了初步分

析^[28]。基于热辐射机理分析,在地球背景环境和物理性质不变的前提下,比辐射率不随温度变化以及满足局地热平衡两个条件,从体系吸收的角度提出了组分有效比辐射率概念^[29]。基于这一概念构成的热辐射方向性一般模型,考虑了影响非同温混合像元热辐射亮度方向性的两个因素即组分温度空间分布和体系的多次散射,用组分有效比辐射率概念描述了视场内非同温混合像元的组分面积比和多次散射效应,组分有效比辐射率决定于组分的光学特性和体系的空间结构状况。同时组分有效比辐射率之和构成了体系总有效比辐射率(下称“吸收比辐射率”),这一概念并与 r-emissivity 概念^[19]和 canopy emissivity^[23]概念具有同样的物理意义。

(2) 室内实验、野外地面实验和航空飞行实验研究:张仁华等通过实验分析了地物热辐射方向性影响的主因子^[30],苏红波等分析了离散植被的热辐射模型,认为植被辐射温度方向性主要是由于植被温度和土壤温度的差异以及太阳和传感器所处的角度的不同而造成的^[31];柳钦火等利用中法合作的机载红外热像仪多角度数据获得了农作物冠层热红外辐射方向特性,结果表明在不同生长季节热辐射方向性具有显著差异^[32]。

(3) Monte Carlo 模拟研究:Monte Carlo 模拟有正向模拟和反向模拟两种,苏理宏采用正向模拟方法探讨了连续植被的热辐射方向性^[33],陈良富等用反向模拟方法研究了离散体^[34]和连续植被的热辐射方向性特征^[35],在考虑行播作物孔隙和组分间多次散射的情况下从天顶角和方位角两个方面探讨了行播作物的热辐射方向性^[36]。

(4) 基于非同温方向性模型对组分温度进行初步反演研究:王锦地等基于室内非同温实验的多角度观测数据,对非同温像元组分温度进行了估计^[37],庄家礼、徐希孺等基于蒙特卡罗模拟模型利用遗传算法初步实现了地面冬小麦组分温度的反演^[38]。

3 地表热辐射方向性研究的发展方向

(1) 需从基本概念上进一步研究:地表热辐射方向性问题已被公认为复杂的基本理论问题,它所涉及物理学、信息科学、地学领域中没有解决的基本理论问题。如在热平衡条件下的热辐射规律可以通过普朗克公式加以描述,而非同温状况下的热辐射规律物理学却没有解决。近年来国内外遥感学界开始重视这一问题,并分别从重新定义比辐射率和建模等方面对非同温热辐射问题进行了有益的探讨,但离问题的完全解决还有距离:如从材料比辐射率本身的特性出发,由于在地球环境温度下非金属材料的比辐射率不随温度变化已成共识,换句话说材料比辐射率本身并不因为其具有温差分布而改变,具有温差情况下的热辐射亮度值是同一材料两个温度辐射贡献的和。若体系因三维结构存在多次散射,则体系的辐射亮度值包括多次散射辐射部分,这是大家能够认可的。源于不同视角的视场中、具有不同温度的组分比例和多次散射差异的非同温混合像元的热辐射方向性,在这些参数变化中得到反映。而直接引入同温条件下的比辐射率概念,并基于像元的平均温度来建立非同温混合像元的“等效比辐射率”概念反而因基本物理机制不清而出错。对第2类模型,在非同温体系的局地热平衡条件下,从反射辐射和吸收的角度考虑,无论体系中的非同温状况如何,只要体系中的组分特性和结构状况不发生变化,体系的“方向—半球”反射率和吸收率是不会变化的。所以,只要“局地热平衡”条件得到满足,基尔霍夫定律是可适用的。这种“反射比辐射率”和“吸收比辐射率”应该存在。但这一概念与前述的“等效比

辐射率”有本质的区别,后者与体系的温度无关。问题是如何从理论和实际的角度来验证这样一个与温度无关的概念?对于这些类似的基本问题,还需要进一步从物理学基本定律这个层次来探讨。

(2) 从模型的角度来看,目前国内外学者已经提出了不少热辐射模型,这些模型是否广泛适用于实际热辐射状况,还需要进一步验证。而且模型应朝着简单、易用的方向发展,将理论模型或概念模型进一步解析化,但模型仍要保证精度。解析化是基于多角度热红外遥感数据进行组分温度反演必须要需解决的另一问题。

模型的适用如何要得到不同尺度的验证,验证需要相关数据,所以热红外遥感的基础实验需进一步加强,包括温度可控条件的室内实验、野外地面实验、航空飞行实验以及与卫星数据的同步实验。从地面角度来看,模型的地面验证需测量目标的物理特性,如组分比辐射率、组分温度,需要目标的结构参数和环境辐射值等。而组分比辐射率尤其是方向比辐射率的测量问题仍没有很好地解决。组分温度的测量时若用窄视场角的热辐射计,则辐射亮度值中包括了环境辐射的反射和多次散射辐射,而且组分的比辐射率是未知参数;若直接用面源或点状数值点温度计直接接触目标测量温度,则直接接触会破坏目标表层的热平衡而无法得到目标表层的真实辐射温度。模型的验证还须准确剔除环境辐射项,由于环境辐射是非各向同性的,有限点的测量只能近似描述其量值,况且从辐射测量值中剔除环境辐射项还需要已知目标的反射率。从航空尺度来说,除多角度热红外辐射计的研制与开发这一硬件方面的工作外,多角度红外数据的配准,不同航带飞行时间测量得到的数据间的温度归一化问题,航空飞行数据的辐射纠正问题等都是需要解决的基本问题。

(3) 热辐射方向性研究的目的,是为了能利用多角度热红外遥感数据提高地表温度的反演精度和反演组分温度。攀登课题中利用多角度热红外数据反演组分温度的尝试只停留在利用地面数据这一层次,要实现卫星或航空热红外多角度遥感数据对组分温度的反演,除大气纠正问题外,多角度热红外信息之间的相关性问题的也应与多通道一样受到同样的重视。此外,由于组分温度反演是多参数反演,继续探讨多参数的非线性反演方法也是当务之急。

正是由于热辐射方向性研究方面还存在这些问题,国家重点基础研究发展规划项目“地球表面时空多要素的定量遥感理论及应用”将这几方面作为热辐射方向性研究的重要内容,试图在这几个问题上有所突破和创新,实现基于多角度热红外遥感反演组分温度的目标。

致谢: 徐希孺教授、李小文教授、张仁华教授给本文提出修改建议,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Running S W, Justice C, Salomonson V et al. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15: 3587-3620.
- [2] 陈良富, 徐希孺, 张仁华. 地表温度遥感反演的现状与发展趋势[J]. 地理科学进展, 1998, 18(增): 208-215.
- [3] Chen L, Zhuang J, Xu X. The correlationship of multi-channel thermal infrared remote sensing information and its effect on retrieval of land surface temperature[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(17): 1627-1632.
- [4] Jackson R D, Reginato R J, Pinter P J. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resource Research, 1981, 17: 1133-1138.
- [5] Kimes D S. Remote sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric tem-

- peratures and inversion techniques[J]. Remote Sensing of Environment, 1983, 13: 33-55.
- [6] 徐希孺, 陈良富, 庄家礼等. 基于多角度热红外遥感的混合像元组分温度演化反演方法[J]. 中国科学.
- [7] Barton I J, Talashima T. An AVHRR investigation of surface emissivity near lake Eyre[J]. Australia, Remote Sens. Environ., 1986, 20: 153-163.
- [8] Labed J, Stoll M P. Spatial variability of land surface emissivity in the thermal infrared band: Spectral signature and effective surface temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 38: 1-17.
- [9] Dozier J, Warren S G. Effect of viewing angle on Infrared Brightness Temperature of Snow[J]. Water Resources Research, 1982, 18: 1424-1434.
- [10] Balick L E, Hutchinson B A. Directional thermal infrared exitance distributions from a leafless deciduous forest[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 1997, 24: 693-698.
- [11] Kimes D S, Kirchener J A. Directional radiometric measurements of row-crop temperatures[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4: 299-311.
- [12] Lagouarde J P, Kerr Y H, Brunet Y. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77: 167-190.
- [13] Fuchs M, Kunenm E T, Ker J P et al. Effect of viewing angle on canopy temperature measurements with infrared thermometers[J]. Agron. J., 1967, 59: 494-496.
- [14] Hatfield J L. Canopy temperatures: the usefulness and reliability of remote measurements[J]. Agron. J., 1979, 71: 889-892.
- [15] Huband N D S, Monteith J L. Radiative surface temperature and energy balance of a wheat canopy. I. Comparison of radiative and aerodynamic canopy temperature[J]. Boundary Layer Meteorol., 1986, 36: 107-116.
- [16] Heilman J L, Heilman W E, Moore D G. Remote sensing of canopy temperature at incomplete cover[J]. Agron. J., 1981, 73: 403-406.
- [17] Kustas W P, Choudhury B J, Inoue Y et al. Ground and aircraft infrared observations over a partially-vegetated area[J]. Int. J. Remote Sens., 1990, 11: 409-327.
- [18] Paw U K T, Ustin S L, Zhang C. Anisotropy of thermal infrared exitance in sunflower canopies[J]. Agric. Forest Meteorol., 1989, 48: 45-48.
- [19] Norman J, Becher F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surface[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1995, 77: 153-176.
- [20] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 34: 892-905.
- [21] Li Xiaowen, Wang Jindi, A Strahler. Scale effects of Planck law over a non-isothermal blackbody surface[J]. Science in China (Series E), 1999, 42(6): 652-656.
- [22] Becker F, Li Z. Surface temperature and emissivity at various scale: definition, measurement, and related problem[J]. Remote Sensing Review, 1995, 12: 225-253.
- [23] Francois C, Ottle C, Prevot L. Analytical parameterization of canopy directional emissivity and directional radiance in the thermal infrared. Application on the retrieval of soil and foliage temperatures using two directional measurements[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 18: 2587-2621.
- [24] Li Xiaowen, Strahler A, Friedl M. A conceptual model for effective directional emissivity from non-isothermal surface[J]. IEEE on GARS, 1999, 37(5): 2508-2517.
- [25] Sobrino J A, Caselles V. Thermal infrared radiance model for interpreting thermal radiation from a terrestrial surface[J]. Journal of Applied Meteorology, 1990, 18: 759-763.
- [26] Kimes D S, Smith J A, LINK L E. Thermal IR exitance model of a plant canopy[J]. Applied Optics, 1981, 20: 623-632.
- [27] Li Xiaowen, Wang Jindi. On the definition of effective emissivity of land surface at the scale of remote sensing pixels[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 29(5): 422-426.
- [28] 牛铮, 柳钦火, 高彦春等. 零散射近似的冠层热红外辐射间隙率模型[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(增): 89-

98.

[29] Chen L, Zhuang J, Xu X et al. The Concept of effective emissivity of non-isothermal mixed pixel and its test[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45: 788-795.

[30] 张仁华, 孙晓敏, 李召良 等. 地物热辐射方向性影响主因子的揭示——提高辐射温度方向性观测精度的新途径及数据剖析[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(增): 39-44.

[31] 苏红波, 张仁华, 唐新斋 等. 像元尺度离散植被的热模型及其数值图象解[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(增): 61-65.

[32] 柳钦火, 顾行发, 李小文 等. 地表热红外辐射方向特性的航空飞行实验研究[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(增): 99-105.

[33] 苏理宏. 地表热辐射方向性和尺度效应研究[A]. 见: 中国科学院遥感技术应用研究所博士学位论文[C]. 中国科学院图书馆, 2000.

[34] 陈良富, 庄家礼, 徐希孺 等. 非同温离散体热辐射方向性模拟与验证[J]. 遥感学报, 2000, 4(增): 48-52.

[35] 陈良富, 庄家礼, 徐希孺 等. Monte Carlo 方法模拟连续植被热辐射方向性[J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 261-265.

[36] 陈良富, 庄家礼, 柳钦火 等. 行播作物热辐射方向性规律探讨[J]. 中国科学(E), 2000, 30(增): 77-88.

[37] 王锦地, 李小文, 孙晓敏 等. 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): 54-60.

[38] 庄家礼, 陈良富, 徐希孺. 地表组分温度反演[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(6): 850-857.

The Study on Thermal Infrared Radiant Directionality of Non-isothermal Land Surface

CHEN Liang-fu¹, FAN Wen-jie^{2,1}, LIU Qin-huo¹

(1. Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China; 2. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The angular effects of emitted radiation from non-isothermal land surface are the basis for component temperatures retrieval from multi-angle thermal infrared remote sensing data. This paper reviews two different directions in the studies of this field. One is to define new concepts of emissivity, for example, the “e-emissivity”, “t-emissivity”, the band-averaged emissivity, and “canopy emissivity” et al. Some of the them are component temperatures dependent. Another is to build thermal radiant model to illustrate the emitted radiation from non-isothermal mixed pixel. This paper then shows the recent progress of this field in China. It also points out in final section that several trends should be strengthened, such as the basic theories and concept, the remote sensing field measurement, the simplification and test of radiant model, and algorithms of component temperatures retrieval from multi-angle data of thermal infrared remote sensing.

Key words: radiant directionality; non-isothermal mixed pixel