

引用格式: Xiao Yao, Ma Mingguo, Wen Jianguang, *et al.* Progress in Land Surface Temperature Retrieval over Complex Surface[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 33-43. [肖尧, 马明国, 闻建光, 等. 复杂地表地表温度反演研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 33-43.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0033

复杂地表地表温度反演研究进展

肖尧^{1,2,3}, 马明国^{1,2,3}, 闻建光⁴, 于文凭^{1,2,3}

(1. 西南大学 地理科学学院重庆金佛山喀斯特生态系统教育部野外科学观测研究站, 重庆 400715;

2. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;

3. 西南大学 地理科学学院遥感大数据应用重庆市工程研究中心, 重庆 400715;

4. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 地表温度是陆表过程研究的关键参数, 卫星反演地表温度是获取区域及全球尺度辐射平衡、能量收支研究中地表温度参数的有效手段。目前, 在平坦地表覆盖均一区域, 基于热红外和微波遥感反演的地表温度已经被验证具有较好精度, 尤其热红外遥感地表温度产品精度可达1 K以内。但是针对复杂地表的地表温度反演研究仍面临较大挑战。系统总结了复杂地形区地表温度反演的局限性, 包括反演模型病态问题、地形复杂性、水汽云雾厚重造成数据缺失、真实性检验不确定性。并在此基础上, 对未来复杂地表温度反演精度提高提出了可能实现的途径。

关键词: 地表温度; 复杂地表; 反演方法; 水汽; 真实性检验

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)01-0033-11

1 引言

地表温度(Land Surface Temperature, LST)是研究地表能量平衡和陆面过程的重要参数^[1], 是区域以及全球尺度土壤水分、蒸散发、城市气候变化、植被、生态监测的关键因子^[2]。从20世纪70年代以来^[3], 研究者利用卫星遥感数据开展地表温度反演的研究, 并取得了众多瞩目的成果。专家学者相继提出了多种地表温度反演算法, 主要分为热红外反演算法和被动微波反演算法。热红外反演的温度为地物表面的表皮温度, 现有的算法有单通道算法^[4]、多通道算法^[5-6]、多角度算法^[7]等。热红外反演的温度精度高, 可达1 K以内; 空间分辨率高, 能获取100 m级地面温度; 但多云雾条件下缺少数据^[7-9]。被动微波反演的温度为一定深度的表层温度, 现有的算法模型有统计模型、物理模型和神经

网络模型^[10]。被动微波反演的温度相对热红外反演温度精度低、空间分辨率低, 但微波具有穿透性, 可以反演出云下温度。这些算法主要基于地势平缓、类型均一的地区开展, 得到了广泛的应用, 并取得了较好的效果。

全球陆地面积约24%为山地, 我国有2/3的陆地面积为山地^[3]。山地调节区域气候变化、维持生态系统功能和涵养水源等方面发挥着重要作用^[4]。在复杂地开展地表温度的监测, 是评估复杂地区水文、气候和生态系统动态变化的重要手段。由于山区地表复杂, 地表温度反演算法在地表起伏大、地表类型复杂、云雾天气多的山地地区研究较少。

山区地形起伏大、空间异质性强, 地表温度反演表现出建模难、长时序数据获取难、验证难等特点。现在大多数地表温度反演算法建立在地面平

收稿日期: 2020-01-13; 修订日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目“西南地区复杂地表陆表过程观测与模拟研究”(41830648)和“西南地区表层岩溶生态系统碳通量观测、分析与模拟”(41771453)资助。

作者简介: 肖尧(1996—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事陆面过程遥感研究。E-mail: xy10086@email.swu.edu.cn

通讯作者: 马明国(1975—), 男, 湖北宜昌人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态与陆面过程遥感研究。E-mail: mmg@swu.edu.cn

坦、地物均一的区域,这些区域地形因素影响小,可以忽略。但针对山区地表温度反演,需要考虑热辐射方向性问题,模型的建立中需要增加地形参数。多云多雾是山区热红外温度缺失的主要原因,将微波的穿透性优势和热红外的高分辨率优势相结合是解决这一问题的有效方法。但是两种反演温度的空间匹配、时间匹配、以及表皮温度和表面温度的转换等问题使填补的温度不能完全让人信服。山区地面验证点稀缺、地表空间异质性强,使用点尺度的站点温度来验证面尺度的卫星反演温度,其中存在的尺度问题可以通过提高转换方法和增加验证点数量来解决。

本文梳理了山区地表温度反演存在的问题,并有针对性地数据获取、模型建立和数据验证等方面讨论了进一步提高山区地表温度反演精度可能的解决方案。

2 地表温度反演方法及温度产品

传统获取地表温度的方式为点温法,一种是通过水银温度计、电阻式温度计接触目标物测量温度,另一种是红外辐射测量法,即使用热像仪、傅里叶红外光谱仪等不接触物体测量目标物表面温度^[8]。直接测量地面温度得到的是点上局部温度,受周围环境热辐射影响大,尤其是接触式测量还会改变物体表面的热状况。对于区域或全球尺度长时间序列的地表温度获取,通过卫星影像反演的方式更为现实。为了便于管理和维护,大部分观测站都架设在平坦的地区^[9],而复杂地形区域的地表温度在地面测量和验证方面也更为复杂。遥感反演过程是通过传感器探测物体的辐射能量,通过普朗克方程来推算出物体温度。普朗克定律表示热平衡状态下的黑体在温度 T 和波长 λ 处的辐射能量,公式为:

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

其中: $B_{\lambda}(T)$ 表示黑体在温度 $T(K)$ 和波长 $\lambda(\mu m)$ 处的辐射亮度 ($W \cdot \mu m^{-1} \cdot m^{-2}$), C_1 和 C_2 表示物理常量:

$$C_1 = 1.191 \times 10^8 W \cdot \mu m^{-4} \cdot Sr^{-1} \cdot m^{-2}$$

$$C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu m \cdot K$$

对于波长较长的微波波段,根据瑞利-琼斯定律,普朗克方程可近似为:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2f^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (2)$$

其中: f 为频率(Hz), 光速 $c = 2.9979 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$, 玻尔

兹曼常量 $k = 1.3806 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ 。

式(1)和式(2)表示黑体辐射在不同波长对温度的响应,根据传输原理可构建辐射传输方程来对地表温度进行求解。根据波谱类型的不同,遥感反演温度的方式可以分为热红外反演和被动微波反演。热红外遥感反演的地表温度是物体表面辐射温度,也称表皮温度。由于微波波长较长,对物体表面有一定穿透能力,微波反演的地表温度是物体一定深度范围内的等效温度^[10]。关于热红外和微波的温度反演算法逐渐成熟,常用的热红外反演方法有单通道算法^[11-16]、多通道算法^[17-23]、多角度算法^[24-27]以及多时相算法^[28-36]等。被动微波地表温度反演模型主要分为统计模型^[37-41]、物理模型^[42-47]和神经网络模型^[48-55]3种,具体方法如表1所示。

传感器和反演算法的不断提高,地表温度产品也逐渐丰富,并应用于气候变化监测、灾害监测和土地覆盖变化等领域。空间尺度上,广泛使用的是MODIS的1 km尺度产品,空间分辨率较高有100 m的Landsat系列产品。时间尺度上,由于静止卫星的应用,15 min到小时变化的地表温度产品也能被获得。常用的几种地表温度产品如表2所示。

3 复杂地表温度反演的局限性和挑战

3.1 病态反演问题

无论是热红外辐射传输模型还是被动微波传输模型,反演过程始终是个病态问题,即方程未知数个数总是比方程个数多。因此在反演过程中,各种模型的建立都基于一定的约束条件和假设,使方程可解。但是约束方程和条件不确定性往往是反演算法的重要误差来源^[56]。

根据辐射传输原理,热红外温度反演过程,需要输入的参数有地表发射率、大气透过率以及上下行大气辐射。而地表温度、发射率和大气下行辐射三者耦合,相互制约,增加了反演难度。其中大气对温度反演结果误差增量和地表亮温呈线性关系,大气越潮湿影响越大,由此大部分反演算法是基于大气校正值较小的干燥大气提出的^[17]。热红外温度反演的大气透过率通常根据与水汽含量的关系来进行估算,常用到的大气模拟模型有MODTRAN、6S和LOWTRAN等^[57]。热红外反演算法中将温度和发射率分离是一大难点,基于发射率已知或未知,分为逐步反演地表发射率与地表温度,以及在大气廓线已知情况下同时获取地表发射率

表 1 地表温度反演算法及特点

Table 1 Algorithms for surface temperature and their characteristics

反演算法		作者及发表时间	特点
热红外反演	单通道算法	Price, 1983 ^[11] ; Susskind, 1984 ^[12] ; Qin, <i>et al</i> , 2001 ^[14] ; Muñoz & Sobrino, 2003 ^[15] ; Jiménez-Muñoz, <i>et al</i> , 2009 ^[4] ; Cristobal, <i>et al</i> , 2018 ^[16]	对单个红外通道进行建模,需要输入地表发射率、大气传输模型、精确大气廓线。
	多通道算法	McMillin, 1975 ^[3] ; Deschamps & Phulpin, 1980 ^[18] ; Becker & Li, 1990 ^[19] ; Sobrino, <i>et al</i> , 1996 ^[20] ; Franca & Carvalho, 2004 ^[21] ; Qian, <i>et al</i> , 2016 ^[22] ; Tang, 2018 ^[23]	对多个红外通道进行建模,无需大气廓线数据,反演精度较高,地表发射率具有不确定性,对算法结果影响较大。
	多角度算法	Chedin, <i>et al</i> , 1982 ^[24] ; Prata, 1993 ^[25] ; Sobrino, <i>et al</i> , 1996 ^[20] ; Li, <i>et al</i> , 2001 ^[26] ; Ren, 2015 ^[27]	根据特定通道在不同角度的亮温差异来消除大气的影 响,无需大气廓线数据,数据源稀缺。
	多时相算法	Watson, 1992 ^[28] ; Wan & Li, 1997 ^[29] ; Wan, 2008 ^[30]	基于地表发射率不随时间变化的假设,无需输入地表发射率,结果对传感器噪声、大气校正误差和影像配准精度敏感,现在主要应用于 MODIS 地表温度反演。
	高光谱反演算法	Kanani, <i>et al</i> , 2007 ^[31] ; Borel, 2008 ^[32] ; Ouyang, <i>et al</i> , 2010 ^[33] ; Wang, <i>et al</i> , 2011 ^[34] ; Zhong, <i>et al</i> , 2016 ^[35] ; Chen, <i>et al</i> , 2019 ^[36]	利用地表发射率固有的光谱特征,无需输入地表发射率,需要精确大气校正。
被动微波反演	统计模型	单通道回归 Mcfarland, 1990 ^[37] ; Njoku, 1999 ^[38] ; 毛克彪, <i>et al</i> , 2006 ^[39] ; Han, <i>et al</i> , 2018 ^[40] ; 多通道回归 Zhou, <i>et al</i> , 2019 ^[41]	算法简单,模型回归需要大量实验数据,模型系数具有较强局地性。
	物理模型	微波辐射传输方程 Xiang, <i>et al</i> , 1997 ^[42] ; Basist, <i>et al</i> , 1998 ^[43] ; Fily, <i>et al</i> , 2003 ^[44] ; Kohn, <i>et al</i> , 2010 ^[45] ; Zhang, <i>et al</i> , 2019 ^[46] ; 基于发射率求解 Huang, <i>et al</i> , 2019 ^[47]	具有物理意义,且反演精度较经验模型高,过于依赖输入参数和假设条件的准确性。
	神经网络模型	Zurk, <i>et al</i> , 1992 ^[48] ; Aires, <i>et al</i> , 2001 ^[49] ; Prigent, <i>et al</i> , 2016 ^[50] ; Ermida, <i>et al</i> , 2017 ^[53] ; Jiménez, <i>et al</i> , 2017 ^[54] ; Mao, <i>et al</i> , 2018 ^[55]	方法简单易行,但不具有实际物理意义,通过输入有代表性的训练样本建立数学公式推导结果,对训练样本的依赖性较大。

表 2 常用地表温度产品

Table 2 Surface temperature products used commonly

传感器	算法	时间范围	时空分辨率	查询及下载地址
MODIS	劈窗算法/温度发射率分离算法	2000~	5min、1 day、8 day、monthly/1 km	https://modis.gsfc.nasa.gov/
VIIRS	劈窗算法/温度发射率分离算法	2011~	1 day/750 m	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/
AVHRR	劈窗算法	2007~	1 day/1 km	https://noaasis.noaa.gov/
AATSR	劈窗算法	2002~2012	3 day/1 km	https://earth.esa.int/web/guest/home
ASTER	温度发射率分离算法	2000~	16 day/90 m	https://ims.aster.ersdac.jpacesystems.or.jp/
FY-2 S-VISSR	劈窗算法	2012~	1 hour/5 km	http://satellite.nsmc.org.cn/
FY-3 VIRR	劈窗算法	2009~	1day/1 km	http://satellite.nsmc.org.cn/
FY-4A AGRI	劈窗算法	2019~	15 min/4 km	http://satellite.nsmc.org.cn/
GOES-16 ABI	劈窗算法	2018~	15 min/2 km	https://www.ospo.noaa.gov/
Landsat 系列	单通道算法	1984~	16 day/~100 m	https://earthexplorer.usgs.gov/
MSG-SEVIRI	劈窗算法	2005~	15 min/3 km	https://www.eumetsat.int/website/
SLSTR	劈窗算法	2016~	1 day/1 km	https://www.asf.alaska.edu/

和地表温度。常用到地表发射率估算方法有:参考通道法、发射率归一化法、两温法、地表类型赋值法和 NDVI 阈值法等^[58-60]。

被动微波地表温度反演物理机制的研究不成熟,大多研究为基于数理统计为基础的经验模型和

神经网络模型,对于物理模型往往通过一定的假设条件简化方程,或是引入经验关系或参数化物理模型来减少未知量^[8]。

为了提高反演精度,大部分研究着力于提高参数的可靠性,如针对地表发射率的大气效应校正和

水汽的校正等^[60]。Bento等^[61]在山区使用总可降水量参数化和降阶两种水汽修正方法来提高单通道算法和劈窗算法精度。消除发射率和大气的影 响是热红外遥感反演着力解决的方向,近几十年来各种改进模型也不断被提出,反演精度能达到1 K以内,但对于复杂地表,环境对热红外波段影响非常复杂,应用模型定量分析热过程,分离温度与发射率仍是热红外遥感的难点^[62],而且在非均质的复杂地形区域,地表温度的邻近效应,非同温混合像元以及辐射方向性等物理机制问题增加了复杂地表温度反演的难度^[63]。热红外遥感受大气、云雾的影响较严重,而被动微波具有全时相、全天候观测能力,并且对云层有一定的穿透能力,因此,使用被动微波反演地表温度可以弥补热红外遥感反演多云雾的山区地区地表温度产品缺失的不足。但微波反演的温度为一定深度的等效温度,并且对于破碎的下垫面微波地表发射率易变,反演温度空间分辨率低,将微波等效温度和热红外表皮温度相结合使用存在的温度转化和尺度转换问题。对于不同厚度的云层,大气对微波反演星上亮温的影响强度是否能够忽略,量化这种影响是被动微波遥感需要进一步提高的一个方向^[64]。

3.2 地表复杂性

相比平坦均一的地表,山区地形更为复杂,景观破碎度和空间异质性更强,对地表发射率的估算带来更大困难。复杂的地形对土壤物理性质、水分分布和地表植被类型存在影响^[65]。土壤介电常数对地表发射率影响显著,土壤介电常数主要由土壤含水量决定,还与土壤质地、土壤组分、土壤有机质和土壤温度相关^[10]。不同土壤类型对辐射的吸收、反射、透射不同,影响地表能量通量变化和地表发射率、反射率和吸收率^[66]。山地水分分布受地形和海拔高度的影响。地表起伏使气流抬升或下沉,山体遮挡阻止水汽移动,使山地地表水分的水平和垂直方向分布表现出异质性^[67]。地表水分分布不均,影响土壤湿度和植被生长,同种土壤或同种植被可能有不同的发射率。植被对地表温度有冷却和保温的作用,可以抑制地表温度剧烈改变。现有地表发射率的估算多基于地表植被与土壤比例或植被覆盖度分级阈值,对于植被类型丰富、地形起伏的复杂地表,以单一的发射率估算方法不能有效解决发射率精度问题。复杂地表区域,下垫面破碎,水分、土壤和植被复杂多变,因子间相互影响,由此地

表发射率的估算必须考虑环境因素。输入参数多源且不确定性大,是复杂地表地表温度反演难度大的主要影响因素。

山区地表具有复杂三维结构,热辐射与地表存在复杂的相互作用。研究山区热辐射传输过程,必须考虑地表方向性,近年来国内外专家学者构建了许多热红外模型,包括辐射传输模型、几何光学模型、3D模型、混合模型和参数模型等^[68-70]。模型的发展需要考虑方向性、地形因素和热力因素,目前的模型多建立于条件可控的实验场或小区域试验区,应用于复杂多变的山区地表温度建模仍存在着挑战性。在坡度、坡向和地形不断变化和相互遮蔽的山区,地表接收到的太阳入射辐射能量,包括直接辐射、散射辐射和邻近地形的反射辐射,辐射间差异显著^[71]。坡度、坡向和地形直接影响地表辐射的分布^[72-74],地形的遮蔽作用同样使温度在空间分布上存在差异^[75]。对山地热辐射建模,不仅需要考 虑复杂的地形因素,还需要考虑能量平衡和流体力学等影响。Yu等^[74]结合太阳高度、建筑高度研究建筑物阴影对地表温度的季节效应,证明地形遮挡对热辐射作用显著。山地地形条件直接影响地表辐射收支和能量平衡,提高复杂地区地表温度反演精度,还需要进一步建立统一且普适性强的模型。提高山区地表温度反演精度,需要考虑地形因素对发射率的影响、邻近效应、能量平衡等,优化复杂地表辐射传输模型、动力模型、核驱动模型,并结合地面多角度观测数据对模型进行修订。

3.3 水汽与云的影响

水汽是大气中重要的吸收气体,其吸收系数与频率、大气温度、大气压强和水汽密度相关,并在时间空间上都有很大变化^[75]。孙常峰等^[67]基于泰山的实验也表明地表水汽特征是影响地表温度主要的因素。云中包含液态水和各种微粒能吸收和散射辐射。当天空晴朗无云时,消光系数主要是水汽和氧气的吸收,在云雨天气,云的存在致使热红外信号失真,使用热红外反演方法无法获取地面温度信息。微波虽然能穿透云层,但是在云中传播还应考虑到液态水的瑞利散射^[76]。云覆盖区下不同地表类型,云对其有不同程度的影响;对于像元的位置而言,位于云边缘像元影响程度小于位于云覆盖中心的像元;云覆盖时间越长,对地表温度影响越大;云阴影与云遮挡的地区,云覆盖对其影响也不一样。现有的地表温度反演算法主要是针对晴空

像元,云下地表温度反演仍是一个难题。许多学者通过插值或热红外与微波相结合的方法对云下地表温度进行估算,比如:周义等^[77]的梯度距离平方反比法,涂丽丽等^[78]的克里格插值和规则样条函数插值方法,Yu等^[79]提出基于土地能量平衡理论和相似像元的方法。这些研究都表明了水汽和云在地表温度反演中的作用不能忽略,尤其是地形起伏大的山区,有效的水汽修正和云下温度估算方法能弥补云下数据缺失状况。云区像元在可见光近红外波段的填补方法较为成熟,但大部分方法建立在短时间地表发射率未改变的假设条件下,而云下地表温度反演所使用的热红外波段的适用性未得到有效的说明^[80]。对于微波遥感,与热红外相结合解决数据缺失问题,存在温度转换和尺度转换的难题。而且现有的被动微波反演地表温度算法大多忽略了大气的影响或只是将大气上行辐射量和大气透过率给定为常数,被动微波温度反演需要对大气的影响做进一步量化。水汽和云是复杂地表温度反

演重要障碍,热红外波段的重建、对不同厚度云像元的识别、云遮挡区域数据填补等问题还有待进一步深入研究。

3.4 真实性验证的不确定性

遥感反演的真实性检验,包含对算法可行性和精度进行检验,对温度产品的精度、稳定性、适用性、生产效能进行检验,以及算法应用是否满足地球科学应用需求的检验^[81-82]。对于地形复杂、地表破碎的复杂地表区域,反演的温度像元与地面观测值存在尺度差异,单个像元值难以反映地面实际状况,有效的检验方法和尺度转换是提高检验可信性的基本要求^[82]。

目前用于复杂地表的地表温度检验方法还是常规地表温度真实性检验方法,主要有基于温度方法、基于辐射的方法、交叉验证以及时间序列分析4种典型的检验方法^[56],如表3所示。这些方法对于复杂地表的地表温度精度验证有一定的借鉴作用,但是仍存在一些限制。

表3 地表温度真实性检验

Table 3 Surface temperature product validation

检验方法	参考对象	适用范围	特点
基于温度检验	地表实测温度	下垫面均一,地势平坦地区	简单直接,对站点数据质量要求高,不适用于无站点和地物破碎区域
基于辐射检验	辐射传输方程模拟辐射值	无地面监测站点地区	需要输入实测大气廓线和地表发射率,复杂地表区域参数获取困难
交叉验证	设为真值的温度产品	无实测温度和模拟参数情况	对参考产品要求高,山区和云覆盖区产品精度无保证;产品匹配问题影响验证结果
时间序列验证	目标物长序列变化	传感器本身监测	传感器运行时间较长,对异常值敏感,不适用于地表温度检验

首先,基于地表实测温度的检验是最直接的一种检验方法,即通过地表监测的地表温度同遥感获取的地表温度进行时空配准后直接进行比较^[83-84],该方法要求下垫面相对均一、地势平坦,如于文凭等^[85]利用黑河流域地表温度观测数据来检验MODIS地表温度产品的精度,选择的地面站点就是地形较为平缓、地物类型相对一致的区域。该方法简单直接,地面数据可以选择单点或多点数据,在一定程度上可以评估温度反演产品质量,但是对于站点数少、地形崎岖、地表类型不均一的复杂地表环境,则需要进一步探讨尺度转换和空间异质性问题^[71]。

基于辐射的地表温度检验方法是以辐射传输方程为基础,通过输入实测大气廓线和地表发射率模拟大气层顶的辐射值,通过调整地表温度的值改变模拟辐射值,使之与卫星过境时测量的辐射值相

等。调整的结果温度与卫星数据反演的地表温度差值即为地表温度产品的精度^[86]。该方法不需要地面实测地表温度数据,因此可以应用于地面测量比较困难的地区,使复杂地形地表温度真实性检验成为可能。但该方法对大气廓线和地表发射率等参数依赖性大^[87-88],对参数的精度要求高,在复杂地表区域这两个参量的获取本身就是一个难题。Jiao等^[69]考虑到观测几何、地形效应和亚像素变化,模拟方向亮温和等效亮温来验证山地区域反演温度精度,证实观测天顶角和地形给基于辐射的验证带来了较大的不确定性。交叉验证是针对于上述两种方法都不适用的情况,即既没有地面站点数据也没有大气廓线数据。该方法通过与已知质量和精度较好的地表温度产品进行比较检验,来评定未知反演产品的精度。目前被大多数研究者公认的具有较好稳定性,且广泛用于地表温度交叉检验的产

品是MODIS地表温度产品^[89]。由于不同传感器间存在差异,观测角度和观测时间也不尽相同,需要对参考产品和比较产品进行位置匹配、空间尺度匹配、时间匹配、光谱匹配,匹配过程存在误差,因此交叉验证的结果不能完全被认可。

最后一种方法主要是用于传感器本身的检验^[81],该方法通过对同一目标进行长时间的观测,分析目标物时序特征,监测传感器在运行周期中是否存在不符合实际情况的异常值,发现传感器运行是否正常。该方法能检验出传感器定标等问题,但不能对产品做出直接评价,对于地表温度真实性检验并不适用。

地表温度真实性检验方法不断被改进,并在复杂地形区开展应用^[90-93],但是仍存在以下问题^[92]:①空间异质性问题,地表破碎区同温像元内部存在较大差异,缺少绝对均一的地表,真实性检验标准存在不确定性。②辐射方向性问题,复杂地表地物多样,地势起伏,地表方向亮温角度差异大,制约地表温度反演精度和长波估算精度。③时空、角度不匹配问题,卫星数据反演的地表温度是卫星过境的瞬时温度,而地面是不断变化的,参考值和比较值间存在着差异性,尤其是对站点分布少的山地区域,得到与卫星过境同时段的高质量观测值更加困难。④仪器观测不确定性,仪器获取数据存在不确定性,站点的布设不均一。复杂地表区域站点数过少,山地区域仪器维护困难,数据质量和参数完整性不能得到有效保障。

4 结 语

目前,学术界基于热红外遥感和被动微波遥感的地表温度反演方法已经取得了诸多进展,也逐步将方法应用于地形崎岖的山地区域,但是对于地面温度的地形校正还未得到较为统一和简单有效的公式。开展山区地面温度反演,还存在着一定局限性:①现有卫星传感器用于地表温度监测的波段空间分辨率低,热红外波段分辨率多数为1 km;微波遥感空间分辨率更低,多数在25 km或者更低,山区地形起伏大,100 m内即有较大的地形差异,混合像元问题不能得到有效解决,并且想要将微波穿透性与热红外相对较高的空间分辨率相结合使用,尺度转化和表层温度与表皮温度转换也是一大难题。②基于山地地形的地表温度反演算法的或缺。尽管很多模型算法对山地区域温度反演可以加以借

鉴,但是考虑邻近像元影响和地形影响的山区地表温度反演通用方法还需进一步确定。③地表温度真实性检验仍面临时空异质性和尺度转换问题。

地表温度在复杂地表的开展是地表温度算法和应用的扩展,从基于地势平坦地类均一的地表温度方法研究引用到更复杂多变的山地地区,有利于丰富地表温度算法和开展其他地表过程研究。要深化山区地表温度研究,还需从以下3个方面进行改进。

(1)提高数据源和相应参数获取质量。卫星遥感反演地表温度波段空间分辨率低是开展精细化地表过程的一大阻碍,除了期许更高精度的遥感数据外,开展无人机遥感观测,建立星—机—地一体化获取小区域和复杂地形区域的陆表过程高精度参量是目前较为适用的方法。同时获取高精度地表发射率和大气廓线也是提高反演精度的可行方式。

(2)算法和复杂地形因子相结合。遥感反演中方程组欠缺问题一直是遥感数据反演地表温度的病态问题,所以提高约束方程和条件的准确性,提高算法有效性和普适性是遥感反演一直以来的需要解决的问题。对于山区地表温度的反演,需要将地形因子融入算法,考虑发射率方向性、辐射的散射效应和邻近效应,填补云区地表温度,从而提高山区地表温度反演精度。

(3)开展复杂地表温度真实性检验。山区地表温度的地面监测数据少是提供高质量地表温度实测数据和地表温度真实性检验的限制因素,想要加强山区陆面过程研究在山区增加观测站建设必不可少。对于不易进行设备维护地区,开展自动化观测和远程数据传输,构建多尺度、多数据源检验场站网。针对时空异质性和尺度转换问题,需要优化数据采样和观测方法,构建多尺度验证方法,对不确定性进行量化分析,提高评价机制。

参考文献(References):

- [1] Zhao L, Lee X H, Schultz N M. A Wedge Strategy for Mitigation of Urban Warming in Future Climate Scenarios[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17(14): 9067-9080. doi: 10.5194/acp-17-9067-2017.
- [2] Chen Y Y, Duan S B, Ren H Z, *et al.* Algorithm Development for Land Surface Temperature Retrieval: Application to Chinese Gaofen-5 Data[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 161. doi: 10.3390/rs9020161.
- [3] McMin L M. Estimation of Sea Surface Temperatures from

- Two Infrared Window Measurements with Different Absorption[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(36): 5113-5117. doi: 10.1029/JC080i036p05113.
- [4] Jimenez-Munoz J C, Cristobal J, Sobrino J A, *et al.* Revision of The Single-channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-infrared Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1), 339-349. doi: 10.1109/TGRS.2008.2007125.
- [5] Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A. Feasibility of Retrieving Land-surface Temperature from ASTER TIR Bands Using Two-channel Algorithms: A Case Study of Agricultural Areas[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1):60-64. doi: 10.1109/LGRS.2006.885869.
- [6] Li Ainong, Bian Jinhu, Yin Gaofei, *et al.* Study on Retrieving Key Ecological Parameters in Mountainous Regions by Remote Sensing Methods and Evaluating Their Spatio-temporal Representativeness[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(2):141-151.[李爱农, 边金虎, 尹高飞, 等. 山地典型生态参量遥感反演建模及其时空表征能力研究[J]. 地球科学进展, 2018, 33(2): 141-151.]
- [7] Li Ainong, Yin Gaofei, Jin Huaan, *et al.* Principles and Methods for the Retrieval of Biophysical Variables in Mountainous Areas[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 1-11.[李爱农, 尹高飞, 靳华安, 等. 山地地表生态参量遥感反演的理论、方法与问题[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 1-11.]
- [8] Li Yunhong. Research on Temperature Measurement Technology and Application based on Infrared Thermal Imager. [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.[李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.]
- [9] Li H, Xia Q, Yin C, *et al.* The Current Status of Research on GNSS-R Remote Sensing Technology in China and Future Development[J]. Journal of Radars, 2013, 2(4): 461-465. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.13080.
- [10] Han Xiaojing. Methodology for Retrieving Land Surface Temperature under Cloudy Conditions from Passive Microwave Measurements[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2018.[韩晓静. 云下地表温度被动微波遥感反演算法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.]
- [11] Price J C. Estimating Surface Temperatures from Satellite Thermal Infrared Data-A Simple Formulation for the Atmospheric Effect[J]. Remote Sensing of Environment, 1983, 13(4):353-361. doi: 10.1016/0034-4257(83)90036-6.
- [12] Susskind J, Rosenfield J, Reuter D, *et al.* Remote Sensing of Weather and Climate Parameters from HIRS2/MSU on TIROS-N[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 1984, 89(D3):4677-4697. doi: 10.1029/JD089iD03p04677.
- [13] Li Z L, Tang B H, Wu H, *et al.* Satellite-derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131:14-37. doi:10.1016/j.rse.2012.12.008.
- [14] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-Egypt Border Region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719-1746. doi: 10.1080/01431160010006971.
- [15] Jiménez-Muñoz 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. doi: 10.1029/2003JD003480.
- [16] Cristóbal J, Jiménez-Muñoz J C, Prakash A, *et al.* An Improved Single-channel Method to Retrieve Land Surface Temperature from the Landsat 8 Thermal Band[J]. Remote Sensing, 2018, 10,431. doi: 10.3390/rs10030431.
- [17] Sobrino J A, Soria G, Prata A J. Surface Temperature Retrieval from Along Track Scanning Radiometer 2 Data: Algorithms and Validation[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D11):D11101. doi: 10.1029/2003JD004212.
- [18] Deschamps P Y, Phulpin T. Atmospheric Correction of Infrared Measurements of Sea Surface Temperature Using Channels at 3.7, 11 and 12 mm[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1980, 18(2): 131-143. doi: 10.1007/BF00121320.
- [19] Becker F, Li Z L. Towards a Local Split Window Method over Land Surfaces[J]. Remote Sensing, 1990, 11(3): 369-393. doi: 10.1080/01431169008955028.
- [20] Sobrino J A, Li Z L, Stoll M P, *et al.* Multi-channel and Multi-angle Algorithms for Estimating Sea and Land Surface Temperature with ATSR Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(11): 2089-2114. doi: 10.1080/01431169608948760.
- [21] Franca G B, Carcalho W S. Sea Surface Temperature GOES-8 Estimation Approach for the Brazilian Coast[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(17): 3439-3450. doi: 10.1080/01431160310001632738.
- [22] Qian Y G, Wang N, Ma L L, *et al.* Land Surface Temperature Retrieved from Airborne Multispectral Scanner Mid-infrared and Thermal-infrared Data[J]. Optics Express, 2016, 24(2):A257. doi: 10.1364/OE.24.00A257.
- [23] Tang B H. Nonlinear Split-window Algorithms for Estimating Land and Sea Surface Temperatures from Simulated Chinese Gaofen-5 Satellite Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(11): 6280-6289. doi: 10.1109/TGRS.2018.2833859.
- [24] Chedin A, Scott N A, Berroir A. A Single-channel, Double-viewing Angle Method for Sea Surface Temperature Determination from Coincident Meteosat and TIROS-N Radiometric Measurements[J]. Journal of Applied Meteorology, 1982, 21(4): 613-618.
- [25] Prata A J. Land Surface Temperatures Derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the Along-track Scanning Radiometer: 1. Theory[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1993, 98(D9): 16689-16702. doi:

- 10.1029/93JD01206.
- [26] Li Z L, Stoll M P, Zhang R H, *et al.* On the Separate Retrieval of Soil and Vegetation Temperatures from ATSR Data [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2001, 44 (2): 97-111.
- [27] Ren H Z, Yan G J, Liu R Y, *et al.* Determination of Optimum Viewing Angles for the Angular Normalization of Land Surface Temperature over Vegetated Surface [J]. Sensors, 2015, 15(4): 7537-7570. doi: 10.3390/s150407537.
- [28] Watson K. Spectral Ratio Method for Measuring Emissivity [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 42(20): 113-116. doi: 10.1016/0034-4257(92)90094-Z.
- [29] Wan Z M, Li Z L. A Physics-based Algorithm for Retrieving Land-surface Emissivity and Temperature from EOS/MODIS Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 980-996. doi: 10.1109/36.602541.
- [30] Wan Z M. New Refinements and Validation of the MODIS Land Surface Temperature/Emissivity Products [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1): 59-74. doi: 10.1016/j.rse.2006.06.026
- [31] Kanani K, Poutier L, Nerry F, *et al.* Directional Effects Consideration to Improve Out-doors Emissivity Retrieval in the 3~13 μm Domain [J]. Optics Express, 2007, 15(19): 12464-12482. doi: 10.1364/OE.15.012464.
- [32] Borel C C. Error Analysis for A Temperature and Emissivity Retrieval Algorithm for Hyperspectral Imaging Data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(17/18): 5029-5045. doi: 10.1080/01431160802036540.
- [33] Ouyang X Y, Wang N, Wu H, *et al.* Errors Analysis on Temperature and Emissivity Determination from Hyperspectral Thermal Infrared Data [J]. Optics Express, 2010, 18(2): 544-550. doi: 10.1364/OE.18.000544.
- [34] Wang N, Wu H, Nerry F, *et al.* Temperature and Emissivity Retrievals from Hyperspectral Thermal Infrared Data Using Linear Spectral Emissivity Constraint [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(4): 1291-1303. doi: 10.1109/TGRS.2010.2062527.
- [35] Zhong X K, Huo X, Ren C, *et al.* Retrieving Land Surface Temperature from Hyperspectral Thermal Infrared Data Using a Multi-channel Method [J]. Sensors, 2016, 16(5): 687. doi: 10.3390/s16050687.
- [36] Chen M S, Ni L, Jiang X C, *et al.* Retrieving Atmospheric and Land Surface Parameters from At-Sensor Thermal Infrared Hyperspectral Data with Artificial Neural Network [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(7): 2409-2416. doi: 10.1109/JSTARS.2019.2904992.
- [37] McFarland M, Miller R, Neale C. Land Surface Temperature Derived from the SSM/I Passive Microwave Brightness Temperatures [J]. IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28: 839-845. doi: 10.1109/36.58971.
- [38] Njoku E G, Li L. Retrieval of Land Surface Parameters Using Passive Microwave Measurements at 6~18 GHz [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 79-93. doi: 10.1109/36.739125.
- [39] Mao Kebiao, Shi Jiancheng, Li Zhaoliang, *et al.* A Physics based Statistical Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from AMSR-E Passive Microwave Data [J]. Science in China (Series D), 2006, 36(12): 1170-1176. [毛克彪, 施建成, 李召良, 等. 一个针对被动微波 AMSR-E 数据反演地表温度的物理统计算法 [J]. 中国科学: D 辑, 2006, 36(12): 1170-1176.]
- [40] Han X J, Duan S B, Cheng H, *et al.* Cloudy Land Surface Temperature Retrieval from Three-channel Microwave Data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2018: 1-15. doi: 10.1080/01431161.2018.1471552.
- [41] Zhou F C, Li Z L, Wu H, *et al.* A Remote Sensing Method for Retrieving Land Surface Emissivity and Temperature in Cloudy Areas: A Case Study over South China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(5-6): 1724-1735. doi: 10.1080/01431161.2018.1519288.
- [42] Xiang X W, Smith E A. Feasibility of Simultaneous Surface Temperature-emissivity Retrieval Using SSM/I Measurements from HAPEX-Sahel [J]. Journal of Hydrology, 1997, 188: 330-360. doi: 10.1016/S0022-1694(96)03165-4.
- [43] Basist A, Grody N C, Peterson T C, *et al.* Using the Special Sensor Microwave/Imager to Monitor Land Surface Temperature, Wetness, and Snow Cover [J]. Journal of Applied Meteorology, 1998, 37: 888-911. doi: 10.1175/1520-0450(1998)0372.0.CO;2.
- [44] Fily M, Royer A, Goita K, *et al.* A Simple Retrieval Method for Land Surface Temperature and Fraction of Water Surface Determination from Satellite Microwave Brightness Temperatures in Sub-arctic Areas [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85: 328-338. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00011-7.
- [45] Kohn A, Birkenmeier G, Holzhauer E, *et al.* Generation and Heating of Toroidally Confined Over-dense Plasmas with 2.45 GHz microwaves [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2010, 52(3): 035003. doi: 10.1088/0741-3335/52/3/035003.
- [46] Zhang X D, Zhou J, Gottsche F M, *et al.* A Method based on Temporal Component Decomposition for Estimating 1 km All-weather Land Surface Temperature by Merging Satellite Thermal Infrared and Passive Microwave Observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(7): 4670-4691. doi: 10.1109/TGRS.2019.2892417.
- [47] Huang C, Duan S B, Jiang X G, *et al.* Intercomparison of AMSR2 and MODIS Derived Land Surface Temperature Under Clear-sky Conditions [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(9): 3286-3294. doi: 10.1109/JSTARS.2019.2935737.
- [48] Zurk L M, Davis D, Njoku E G, *et al.* Inversion of Parameters for Semiarid Regions by A Neural Network [J]. IEEE In-

- ternational Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1992, 2: 1075-1077.
- [49] Aires F, Prigent C, Rossow W B, *et al.* A New Neural Network Approach Including First Guess for Retrieval of Atmospheric Water Vapor, Cloud Liquid Water Path, Surface Temperature, and Emissivities over Land from Satellite Microwave Observations[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2001, 106: 14887-14907. doi: 10.1029/2001JD900085.
- [50] Prigent C, Jimenez C, Aires F. Toward "All Weather," Long Record, and Real-time Land Surface Temperature Retrievals from Microwave Satellite Observations[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 2016, 121: 5699-5717. doi: 10.1002/2015jd024402.
- [51] Peng Jingjing, Liu Qiang, Liu Qinhuo, *et al.* Kernel-driven Model Fitting of Multi-angle Thermal Infrared Brightness Temperature and Its Application[J]. Journal Infrared and Millin Waves, 2011, 30(4): 361-365, 371. [彭菁菁, 刘强, 柳钦火, 等. 多角度热红外亮温值的模型拟合与应用. 红外与毫米波学报, 2011, 30(4): 361-365, 371]
- [52] Ramachandran B, Justice C O, Abrams M J. Land Remote Sensing and Global Environmental Change[J]. Remote Sensing & Digital Image Processing, 2011, 11. doi: 10.1007/978-1-4419-6749-7.
- [53] Mao K B, Zuo Z Y, Shen X Y, *et al.* Retrieval of Land-surface Temperature from AMSR2 Data Using a Deep Dynamic Learning Neural Network[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(01): 3-13. doi: 10.1007/s11769-018-0930-1.
- [54] Ermida S L, Jiménez C, Prigent C, *et al.* Inversion of AMSR-E Observations for Land Surface Temperature Estimation: 2. Global Comparison with Infrared Satellite Temperature [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122, 3348-3360. doi: 10.1002/2016JD026148.
- [55] Jimenez C, Prigent C, Ermida S L, *et al.* Inversion of AMSR-E Observations for Land Surface Temperature Estimation: 1. Methodology and Evaluation with Station Temperature [J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 2017, 122: 3330-3347. doi: 10.1002/2016JD026144.
- [56] Li Zhaoliang, Duan Sibao, Tang Bohui, *et al.* Review of Methods for Land Surface Temperature Derived from Thermal Infrared Remotely Sensed Data[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 899-920. [李召良, 段四波, 唐伯惠, 等. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 899-920.]
- [57] Zhang Jiahua, Li Xin, Yao Fengmei, *et al.* The Progress in Retrieving Land Surface Temperature based on Thermal Infrared and Microwave Remote Sensing Technologies[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2103-2107. [张佳华, 李欣, 姚凤梅, 等. 基于热红外光谱和微波反演地表温度的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2103-2107.]
- [58] Li Z L, Wu H, Wang N, *et al.* Land Surface Emissivity Retrieval from Satellite Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(9-10): 3084-3127. doi: 10.1080/01431161.2012.716540.
- [59] Mira M, Valor E, Caselles V, *et al.* Soil Moisture Effect on Thermal Infrared (8~13 μm) Emissivity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(5): 2251-2260. doi: 10.1109/tgrs.2009.2039143.
- [60] Liu Fei, Wang Xinsheng, Xu Jing, *et al.* Sensitivity Analysis of Retrieving Land Surface Emissivity based on NDVI Threshold Method[J]. Remote Sensing Information, 2012, 37(4): 3-12. [柳菲, 王新生, 徐静, 等. 基于NDVI阈值法反演地表比辐射率的参数敏感性分析[J]. 遥感信息, 2012, 37(4): 3-12.]
- [61] Bento V A, DaCamara C C, Trigo I F, *et al.* Improving Land Surface Temperature Retrievals over Mountainous Regions[J]. Remote Sensing, 2017, 9(1), 38. doi: 10.3390/rs9010038.
- [62] Yang Yong, Chen Rensheng, Song Yaoyuan. An Overview of Measurement and Calculation Methods on The Land Surface Temperature on Alpine Mountainous Cold Regions[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(12): 1383-1393. [阳勇, 陈仁升, 宋耀选. 高寒山区地表温度测算方法研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(12): 1383-1393.]
- [63] Meng Pengyan, Xu Yuanjin, Chen Xi. Influence of Topography on The Woodland Surface Temperature Retrieved from Thermal Infrared Remote Sensing Data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31(1): 32-36. [孟鹏燕, 徐元进, 陈曦. 地形对热红外数据反演林地表面温度的影响[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(1): 32-36.]
- [64] Chen Xiuzhi, Chen Shuisen, Li Dan, *et al.* Progress in Land Surface Temperature Retrieval from Passive Microwave Remote Sensing Data[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(8): 827-835. [陈修治, 陈水森, 李丹, 等. 被动微波遥感反演地表温度研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 827-835.]
- [65] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in Surface Moisture Content along a Hillslope Transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 1998, 210(1-4): 285-291. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00187-5.
- [66] Ma Hongzhang, Liu Qinhuo, Yang Le, *et al.* Algorithm of Reconstructing Bare Soil Temperature Time Series by Combining Thermal Infrared and Passive Microwave Remote Sensing Technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 418-423. [马红章, 柳钦火, 杨乐, 等. 热红外联合被动微波重构裸土区地表温度时间序列数据算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 418-423.]
- [67] Sun Changfeng, Kong Fanhua, Yin Haiwei, *et al.* Analysis of Factors Affecting Mountainous Land Surface Temperature in The Summer: A Case Study over Mount Tai[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3396-3404. [孙常峰, 孔繁花, 尹海伟, 等. 山区夏季地表温度的影响因素——以泰山为例[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3396-3404.]

- [68] Cao B, Liu Q H, Du Y M, *et al.* A Review of Earth Surface Thermal Radiation Directionality Observing and Modeling: Historical Development, Current Status and Perspectives[J]. Remote Sensing of Environment. 2019, 232 (111304). doi: 10.1016/j.rse.2019.111304.
- [69] Jiao Z H, Yan G J, Wang T X, *et al.* Modeling of Land Surface Thermal Anisotropy based on Directional and Equivalent Brightness Temperatures over Complex Terrain [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12 (2) : 410-423. doi: 10.1109/JSTARS.2018.2855192.
- [70] Huang P, Zhao W, Li A. The Preliminary Investigation on the Uncertainties Associated With Surface Solar Radiation Estimation in Mountainous Areas[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017: 1-5. doi: 10.1109/LGRS.2017.2696973.
- [71] Zhao Wei, Li Ainong, Zhang Zhengjian, *et al.* A Study on Land Surface Temperature Terrain Effect over Mountainous Area based on Landsat 8 Thermal Infrared Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31 (1) : 63-73. [赵伟, 李爱农, 张正健, 等. 基于 Landsat 8 热红外遥感数据的山地地表温度地形效应研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1):63-73.]
- [72] Rorison I H, Sutton F, Hunt R. Local Climate, Topography and Plant Growth in Lathkill Dale NNR. I. A Twelve-year Summary of Solar Radiation and Temperature[J]. Plant Cell and Environment, 1986, 9: 49-56. doi: 10.1111/1365-3040.ep11612961.
- [73] Lu Lili, Xie Yaowen, Dong Longlong. The Comparison of Reflectance based on Different Terrain Correction[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(4): 751-759. [吕利利, 颀耀文, 董龙龙. 基于不同地形校正模型的影像反射率对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(4):751-759.]
- [74] Yu K, Chen Y, Wang D, *et al.* Study of the Seasonal Effect of Building Shadows on Urban Land Surface Temperatures based on Remote Sensing Data[J]. Remote Sensing, 2019, 11 (5). doi: 10.3390/rs11050497.
- [75] Staelin D H, Kunzi K F, Pettyjohn R L, *et al.* Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor and Liquid Water with the Nimbus 5 Microwave Spectrometer[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(11):1204-1214. doi: 10.1175/1520-0450(1976)0152.0.CO;2.
- [76] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry[J]. United States: Addison-Wesley Publishing Company. 1981, 2-78. doi: US2911 300 A.
- [77] Zhou Yi, Qin Zhihao, Bao Gang. Land Surface Temperature Estimation under Cloud Cover with GIDS[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(3): 492-504. [周义, 覃志豪, 包刚. GIDS 空间插值法估算云下地表温度[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 492-504.]
- [78] Tu Lili, Qin Zhihao, Zhang Jun, *et al.* Estimation and Error Analysis of Land Surface Temperature under The Cloud based on Spatial Interpolation[J]. Remote Sensing Information, 2011(4):59-63. [涂丽丽, 覃志豪, 张军, 等. 基于空间内插的云下地表温度估计及精度分析[J]. 遥感信息, 2011(4):59-63.]
- [79] Yu W P, Tan J L, Ma M G, *et al.* An Effective Similar-pixel Reconstruction of the High-frequency Cloud-covered Areas of Southwest China[J]. Remote Sensing, 2019, 11, 336. doi: 10.3390/rs11030336.
- [80] Du W H, Qin Z H, Fan J L, *et al.* An Efficient Approach to Remove Thick Cloud in VNIR Bands of Multi-temporal Remote Sensing Images[J]. Remote Sensing, 2019, 11, 1284. doi: 10.3390/rs11111284.
- [81] Wu Xiaodan, Wen Jiangaung, Xiao Qing, *et al.* Advances in Validation Methods for Remote Sensing Products of Land Surface Parameters[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(1): 76-92. [吴小丹, 闻建光, 肖青, 等. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展[J]. 遥感学报, 2015, 19(1):76-92.]
- [82] Ma Jin, Zhou Ji, Liu Shaomin, *et al.* Review on Validation of Remotely Sensed Land Surface Temperature[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(6): 615-629. [马晋, 周纪, 刘绍民, 等. 卫星遥感地表温度的真实性检验研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(6): 615-629.]
- [83] Li Jun, Gong Wei, Xin Xiaozhou, *et al.* Land Surface Temperature Retrieval and Its Spatial Heterogeneity in Summer in Chongqing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5): 820-829. [李军, 龚围, 辛晓洲, 等. 重庆地表温度的遥感反演及其空间分异特征[J]. 遥感技术与应用, 33(05):48-57.]
- [84] Li Z L, Tang B H, Wu H, *et al.* Satellite-derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 14-37. doi: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
- [85] Yu Wenping, Ma Mingguo. Validation of the MODIS Land Surface Temperature Products——A Case Study of the Heihe River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 705-712. [于文凭, 马明国. MODIS 地表温度产品的验证研究——以黑河流域为例[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 705-712.]
- [86] Niclòs R, Galve J M, Valiente J A, *et al.* Accuracy Assessment of Land Surface Temperature Retrievals from MSG2-SEVIRI Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8):2126-2140. doi: 10.1016/j.rse.2011.04.017.
- [87] Coll C, Valor E, Galve J M, *et al.* Long-term Accuracy Assessment of Land Surface Temperatures derived from the Advanced Along Track Scanning Radiometer[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 116: 211-225. doi: 10.1016/j.rse.2010.01.027.
- [88] Li Z L, Duan S B, Tang B H, *et al.* Review of Methods for Land Surface Temperature Derived from Thermal Infrared Remotely Sensed Data[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20

- (5): 899–920. doi: 10.11834/jrs.20166192.
- [89] Cho A R, Suh M S. Evaluation of Land Surface Temperature Operationally Retrieved from Korean Geostationary Satellite (COMS) Data[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 3951–3970. doi: 10.3390/rs5083951.
- [90] Simó G, García-Santos V, Jiménez M A, *et al.* Landsat and Local Land Surface Temperatures in a Heterogeneous Terrain Compared to MODIS Values [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 849. doi: 10.3390/rs8100849.
- [91] Sun D, Yu Y, Yang H, *et al.* A Case Study for Intercomparison of Land Surface Temperature Retrieved from GOES and MODIS [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2015, 8(6): 476–494. doi: 10.1080/17538947.2014.906509.
- [92] Schneider P, Ghent D, Corlett G K, *et al.* AATSR Validation: LST Validation Protocol[R]. Leicester: University of Leicester, 2012.
- [93] Yang C, Zhan Q M, Gao S H, *et al.* Characterizing the Spatial and Temporal Variation of the Land Surface Temperature Hotspots in Wuhan from a Local Scale [J]. 2020, 23(4): 327–340. doi: 10.1080/10095020.2020.1834882.

Progress in Land Surface Temperature Retrieval over Complex Surface

Xiao Yao^{1,2,3}, Ma Mingguo^{1,2,3}, Wen Jianguang⁴, Yu Wenping^{1,2,3}

(1. *Southwest University, School of Geographical Sciences, Chongqing Jinpo Mountain Field Scientific Observation and Research Station for Karst Ecosystem, Ministry of Education, Chongqing 400715, China;*
 2. *School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;*
 3. *Chongqing Engineering Research Center for Remote Sensing Big Data Application, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;*
 4. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: Land Surface Temperature (LST) is a crucial input parameter in the study of land surface processes. It's effective to estimate the radiation balance and energy budget at local and global scales using remotely sensed data. Currently, the fast development of LST retrieval algorithm based on thermal infrared and microwave remote sensing has made a series of progress. Its accuracy can reach within 1K in the uniform area of flat surface coverage derived from thermal infrared remotely sensed data especially. However, it is still a great challenge for their application over complex surface area. This paper systematically summarizes the limitations of LST retrieval in complex topographic areas, including pathological absence of inversion model, terrain complexity, data loss caused by thick vapor cloud, and uncertainty of authenticity test. Furthermore, we present suggestions for the future research to improve the accuracy of LST retrieval over complex surface.

Key words: Land surface temperature; Complex surface; Retrieval algorithm; Water vapor; Validation