

全天候地表温度遥感获取进展与挑战

丁利荣¹, 周纪^{1,2}, 张晓东^{3,4}, 王韶飞¹, 唐文彬⁵, 王子卫¹,
马晋¹, 艾丽皎⁶, 李明松¹, 王伟¹

1. 电子科技大学 资源与环境学院, 成都 611731;
2. 电子科技大学 长三角研究院(湖州), 湖州 313001;
3. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;
4. 上海航天测控通信研究所, 上海 201109;
5. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059;
6. 重庆市风景园林科学研究院, 重庆 401329

摘要: 如何获取全天候地表温度对促进相关研究具有十分重要的意义。卫星热红外遥感地表温度虽然在反演理论方法和科学数据产品等方面已相对成熟, 但热红外难以穿透云雾的特点导致反演得到的地表温度在云下有大量缺失; 被动微波遥感虽能获取云下地表温度, 但由于物理机制和成像方式的限制, 存在空间分辨率不足、精度较低、轨道间隙较大等问题。通过卫星单源遥感难以直接获取中等空间分辨率、不受云雾影响的全天候地表温度。从原理、方法、产品和应用方面回顾并归纳了当前全天候地表温度的研究进展和面临的主要问题。基于有效观测重构和多源数据集成是获取全天候地表温度的两种基本途径, 前者可分为时空插值和基于能量平衡方程插值两类, 后者则可分为热红外与被动微波遥感集成、热红外与再分析资料集成。多源数据集成可以整合热红外遥感、被动微波遥感、再分析资料各自的优势, 具有较大的研究价值和潜力。在产品方面, 分析了当前学术界已公开发布的5种全天候地表温度产品。在应用方面, 虽然部分全天候地表温度产品已在土壤湿度、地表蒸散发估算与同化方面取得了一些应用成果, 但其在其他领域的应用亟待挖掘。此外, 对全天候地表温度的未来研究方向和重点进行了讨论和展望。

关键词: 遥感, 全天候地表温度, 重构, 插值, 多源数据集成

中图分类号: P2

引用格式: 丁利荣, 周纪, 张晓东, 王韶飞, 唐文彬, 王子卫, 马晋, 艾丽皎, 李明松, 王伟. 2023. 全天候地表温度遥感获取进展与挑战. 遥感学报, 27(7): 1534–1553

Ding L R, Zhou J, Zhang X D, Wang S F, Tang W B, Wang Z W, Ma J, Ai L J, Li M S and Wang W. 2023. Estimation of all-weather land surface temperature with remote sensing: Progress and challenges. National Remote Sensing Bulletin, 27(7): 1534–1553 [DOI: 10.11834/jrs.20211323]

1 引言

地表温度 LST (Land Surface Temperature) 在陆地表面与大气的相互作用中扮演着重要角色, 是地表与大气能量交互过程的直接体现, 对诸多地表过程具有重要影响 (Anderson 等, 2008; Wu 等, 2015; Xia 等, 2019)。因此, LST 在气候变化 (Sruthi 和 Aslam, 2015; Tomlinson 等, 2011; Zhang 等, 2017)、生态环境监测与评估 (Meng 等,

2018; Quan 等, 2014; Shen 等, 2016; Voogt 和 Oke, 2003)、水文过程模拟 (Bai 等, 2019; Kalma 等, 2008; Semmens 等, 2016; Song 等, 2018; Sun 等, 2017a; Tagesson 等, 2018)、辐射收支与能量平衡 (Kustas 等, 2016; Liang 等, 2010) 等研究中均扮演着不可替代的角色。质量较高的 LST 数据还可以在天气模型和陆表过程的验证和修正中发挥重要作用 (Cammalleri 等, 2014; Chen 等, 2011; Gong 等, 2017; Hu 等, 2014;

收稿日期: 2021-05-14; 预印本: 2021-07-05

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2017YFB0503903); 国家自然科学基金 (编号: 41871241)

第一作者简介: 丁利荣, 研究方向为全天候地表温度反演与深度学习。E-mail: dlryouxiang@163.com

通信作者简介: 周纪, 研究方向为定量遥感。E-mail: jzhou233@uestc.edu.cn

Huang等, 2013; Lei等, 2018; Ma等, 2018)。随着全球气候和陆表的持续变化, LST在上述领域的重要性日益突出, 政府间气候变化专门委员会IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 与世界气象组织WMO (World Meteorological Organization) 均将LST作为表征气候变化的重要参量之一, 与其直接或间接相关的地学研究也已广泛开展 (Zhou等, 2012)。

鉴于LST的重要性, 学术界十分关注LST的准确获取。与传统的站点观测方式相比, 通过遥感手段获取LST具有显著优势 (Ford和Quiring, 2019; Li等, 2013b; Schollaert Uz等, 2019; Sheffield等, 2018), 如空间覆盖范围广、可长时间序列重复观测、获取成本较低等。因此, LST获取从20世纪70年代开始就已成为遥感科学的重要研究方向, 利用卫星遥感反演LST已经成为遥感科学领域长期而经典的研究主题之一。

长期以来, 卫星热红外遥感是获取LST的主要途径, 但当前学术界广泛使用的热红外LST受云影响, 一般只包含晴空条件下的LST, 云覆盖像元由

于缺乏有效的热红外亮温观测数据, 导致反演得到的LST存在显著的空间缺失 (Wentz等, 2000)。然而, 云覆盖在全球尺度上广泛存在, 因此就物理机制而言单源卫星热红外遥感无法消除云覆盖的影响。图1为基于MODIS数据统计得到的2000年—2014年全球平均云覆盖率 (Wilson和Jetz, 2016; Østby等, 2014)。图1(a)和(b)显示了1月与7月的云覆盖率, 可以发现全球超过一半的陆表云覆盖率在50%以上; 图1(c)为云覆盖率的年内标准差, 除少数区域外, 云覆盖率的标准差均低于20%, 表明绝大部分区域云覆盖情况在一年中是相对稳定的; 图1(d)为云覆盖率的年际标准差, 与图1(c)相比, 标准差高于20%的区域减少, 表明全球云覆盖情况在年际间是相对连续的, 即云覆盖是常态。云覆盖导致的LST空间缺失, 也显著降低了卫星热红外遥感LST的时间分辨率 (Duan等, 2012; Götsche和Olesen, 2001; Jin和Dickinson, 1999; Quan等, 2018; Zhan等, 2014; Zhou等, 2013)。

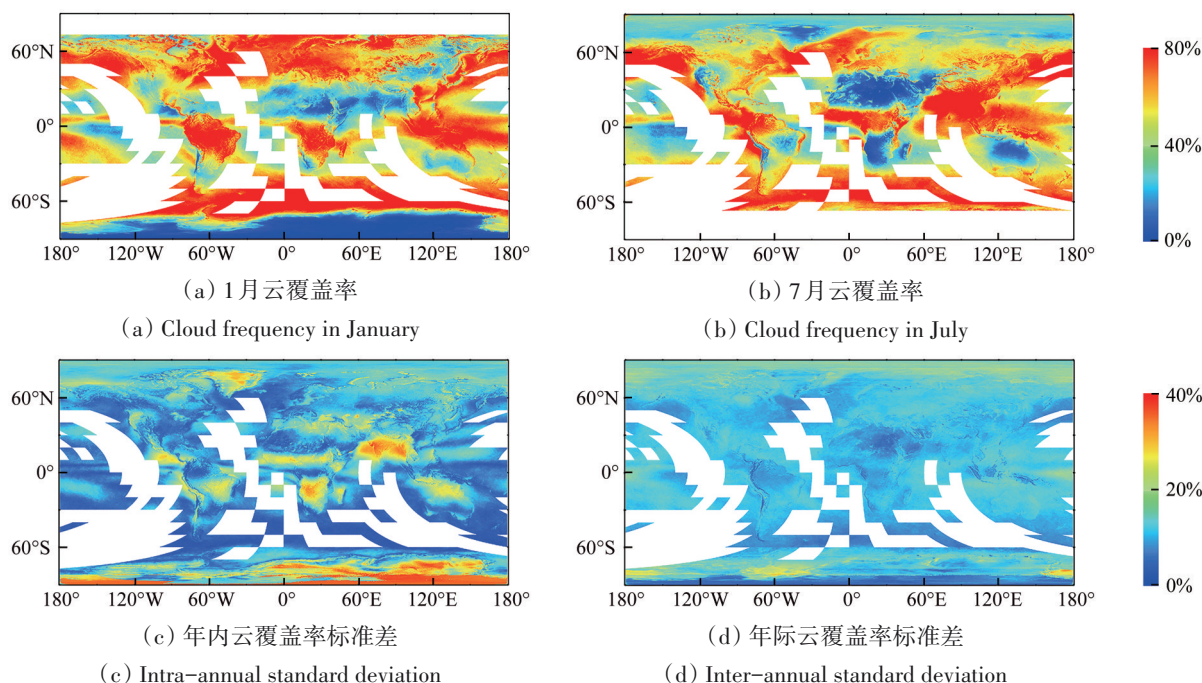


图1 根据MODIS数据统计得到的2000年—2014年全球平均云覆盖率

Fig. 1 Global cloud coverage from 2000 to 2014 based on MODIS data

因此, 随着地学及相关领域研究的持续发展, 现有卫星热红外LST难以满足需求: 使用者往往希望得到不受云覆盖影响的LST数据产品 (Long等, 2019; Wu等, 2015; Xia等, 2019; Zhu等,

2016)。这种不受云影响的LST当前主流称谓有“全天候地表温度” (All-weather LST) 和“全天空地表温度” (All-sky LST)。其中, “全天候地表温度”这一概念的出发点是强调其获取不受云影响,

“全天候”严格意义上包括各种天气状况，并非特指晴天和云覆盖天气，但其字面含义十分直观，便于非专业人士理解，先前绝大多数研究采用了此称谓。相对地，“全天空地表温度”则主要强调天空状态，包含了晴空和云覆盖的非晴空条件，相对于“全天候地表温度”含义更加具体，但对于非专业人士具有一定理解难度。为了便于理解并与先前研究一致，本文将不受云覆盖影响的LST称为“全天候地表温度”(Fu等，2019；Kang等，2018；Li等，2018；Zhou等，2017b)。

如前文所述，卫星热红外遥感获取LST拥有悠久历史，相关数据产品丰富。因此，填补热红外遥感LST产品中由云造成的空间缺失、提高LST空间覆盖率，是获取全天候LST的一个有效途径。如何填补卫星热红外LST的空间缺失、进而获取全天候LST近年来已成为学术界关注的焦点问题(Wu等，2021)。在Google Scholar上分别以“all-sky land surface temperature”、“all-weather land surface

temperature”、“seamless land surface temperature”和“cloudy land surface temperature”为关键词进行检索，2001年—2020年条目数如图2所示。4种关键词的检索结果在数量上都呈现总体上升趋势，表明学术界对具有全天候属性的LST有越来越强的需求。其中，“cloudy land surface temperature”检索条目数最多，表明学术界对云下LST的关注度最高，也从侧面反映了云下LST是获取全天候LST的关键。此外，以上述4个主题词组为关键词，以2001年—2021年为时间范围，在Web of Science(SCI数据库)上进行搜索，共计得到578篇相关论文。对这578篇SCI论文之间的相互引用关系进行了分析，整理出了引用排名前6且与全天候LST相关的论文，如表1所示。其中，Li等(2013b)的综述论文被引排名第一，其早已指明被动微波与热红外集成是获取全天候LST的重要研究方向。其余5篇文章均与获取全天候LST或云下LST直接相关。以上分析结果都显示了全天候LST受到广泛关注。

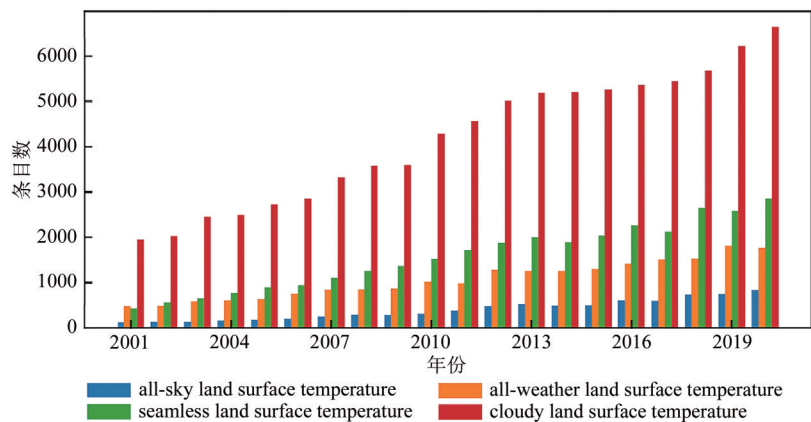


图2 基于Google Scholar的检索结果数目(检索时段:2001年—2020年;检索时间:2021年6月9日)
Fig. 2 The number of search items based on Google Scholar (Searching period: 2001–2020; searching time: June 9, 2021)

表1 Web of Science主题搜索结果中互引排名前6的论文

Table 1 The top six cross-cited papers in Web of Science topic search results

被引频次	论文题目	是否涉及全天候地表温度	参考文献
27	Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives	是	(Li等,2013b)
19	A framework for the retrieval of all-weather land surface temperature at a high spatial resolution from polar-orbiting thermal infrared and passive microwave data	是	(Duan等,2017)
13	Prediction of high spatio-temporal resolution land surface temperature under cloudy conditions using microwave vegetation index and ANN	是	(Shwetha和Kumar,2016)
12	Estimation of land surface temperature through blending MODIS and AMSR-E data with the Bayesian maximum entropy method	是	(Kou等,2016)
10	Toward “all weather,” long record, and real-time land surface temperature retrievals from microwave satellite observations	是	(Prigent等,2016)
6	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	是	(Zhang等,2019)

鉴于获取全天候LST已经成为遥感LST领域的前沿和热点,以及相应数据产品的良好实用价值,本文从原理、方法、产品和应用方面回顾了当前全天候地表温度的研究进展和实际问题,并探讨了全天候地表温度下一步研究方向。本文逻辑结构如图3所示,包括全天候地表温度获取基础(第二节)、基于有效观测重构全天候地表温度(第三节)、多源数据集成获取全天候地表温度(第四节)和全天候地表温度产品及其应用(第五节)共4个方面。最后,对全文进行总结和展望(第六节)。

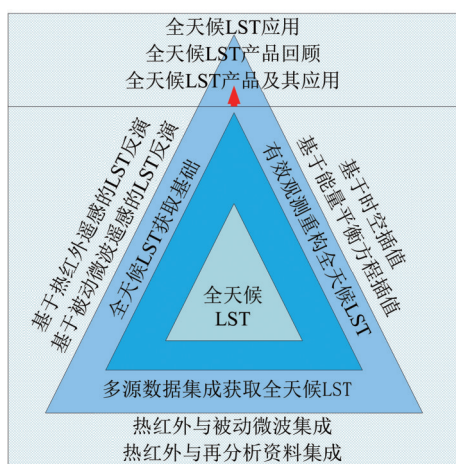


图3 本文逻辑结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the structure of this paper

2 全天候LST获取基础

2.1 基于热红外遥感的LST反演

先前的遥感LST反演绝大部分都是基于热红外遥感进行的,经过几十年的发展,热红外遥感LST反演已经趋于成熟,相应的数据产品具有较高精度。Li等(2013b)对热红外LST反演做了全面深入的回顾总结。分裂窗算法(Wan和Dozier, 1996)、单窗/单通道算法(Jiménez-Muñoz和Sobrino, 2003; Qin等, 2001)以及地表温度—发射率分离算法(Gillespie等, 1998; Hulley等, 2014)等一系列经典反演算法的发展,推动相关机构发布了众多卫星热红外遥感LST产品。例如,美国宇航局(NASA)发布了MODIS LST产品(Wan和Dozier, 1996; Wan, 2008, 2014)、美国海洋与大气管理局(NOAA)发布了VIIRS LST产品(Yu等, 2008)、欧洲航天局(ESA)和欧洲气象卫星开发组织(EUMETSAT)发布了AATSR、SLSTR和

SEVIRI LST产品(Ghent等, 2017; Sobrino等, 2016; Trigo等, 2008);中国气象局(CMA)发布了VIRR LST产品(董立新等, 2012)。全球陆表特征参量反演团队发布了GLASS-LST产品(Liang等, 2021; Ma等, 2020; Zhou等, 2019)。这些LST产品在许多学科领域发挥了重要作用,促进了相关研究的发展(Li等, 2019; Lu等, 2018; Wang和Liang, 2009)。

热红外遥感LST是全天候LST获取中十分重要的基础数据和参考源。此外,热红外LST产品的精度和空间分辨率已被学术界广泛接受,因此,全天候LST在精度和空间分辨率上大多对标当前被广泛使用的MODIS LST产品。

2.2 基于被动微波遥感的LST反演

相对于热红外谱区,被动微波波长较长,故来自地表表层的微波辐射可以穿透云层为卫星被动微波传感器所获取。因此,卫星被动微波遥感同样可以实现LST的反演,一些研究将基于被动微波遥感获得的原始分辨率的LST作为获取中分辨率全天候LST的重要基础数据之一。

从20世纪80—90年代开始,学者们开始关注基于被动微波遥感反演LST。周芳成等(2014)和Duan等(2020)先后对被动微波LST反演现状和方向做了详细回顾。由于篇幅所限,本部分对现有被动微波遥感的LST反演算法仅做简述。

被动微波遥感的LST反演算法可以被大致分为经验模型、半经验模型、物理模型等。其中,经验模型的主要原理是建立LST“真值”/“相对真值”与被动微波通道亮温及其衍生参数之间的统计经验关系。第1种经验模型是单通道回归模型(Holmes等, 2009; Owe和Van De Griend, 2001; 毛克彪等, 2006)。第2种经验模型是建立多通道微波亮温、微波亮温衍生参数与LST之间的回归模型,通常被称为多通道回归模型(McFarland等, 1990; 李万彪等, 1998; 毛克彪等, 2005; Aires等, 2001; Catherinot等, 2011; Zhang和Jia, 2013; Zhou等, 2015; Wang等, 2020)。

物理模型是以微波辐射传输方程为基础,LST与大气辐射、亮温、各通道微波地表发射率(比辐射率)有关。相对于经验模型,物理模型意义明确。但是微波对土壤湿度十分敏感,土壤湿度对地表发射率有显著影响,存在方程未知数个数

多于方程个数的情况。针对物理模型这一问题,科学家们基于不同的假设来间接求解被动微波 LST (Basist 等, 1998; Gao 等, 2008; Jones 等, 2007; Morland 等, 2001; Njoku 和 Li, 1999; 潘广东 等, 2003; 谷松岩 等, 2004)。

半经验模型将不同通道微波地表发射率、通道亮温之间的相关性纳入到区域被动微波辐射传输方程求解过程中,使得半经验模型即简单易行,又兼具物理意义 (André 等, 2015; Fily 等, 2003; Royer 和 Poirier, 2010; Zhao 等, 2011; 代冯楠, 2016)。

尽管被动微波可以获取云下 LST,具有不受云影响的属性,但当前主流被动微波传感器搭载于极轨卫星上,在极轨运行方式下,被动微波亮温数据空间覆盖不完整,存在较大轨道间隙,一般称缺乏有效观测的被动微波轨道间隙为条带。此外,还存在空间分辨率粗、精度低等问题,在大部分研究中难以满足应用需求,因此不被广泛使用,在小区域尺度的应用中存在较大局限,故本文对其不做详细回顾。

3 基于有效观测重构全天候 LST

热红外 LST 虽会受云覆盖影响而缺乏有效观测值,但同一像元在时间序列上不会完全缺失。此外,在较大区域内,也极少出现所有像元均被云覆盖导致 LST 全部缺失的情况。被动微波虽存在条带现象导致空间覆盖不完全,但在同一目标像元,不会长时间缺乏观测。因此,基于有效 LST 观测获取全天候 LST 是可行的。

3.1 基于时空插值

此类方法是获取全天候 LST 最直接和使用数据来源较少的一类方法,它往往只使用遥感 LST 作为基础数据,在部分研究中会使用少量其他辅助数据,诸如植被指数、地表覆盖类型等。这类方法可以分为空间加权插值、时间加权插值和时空加权插值 3 类。这 3 类方法都是基于现有遥感 LST 数据集中的有效值来重构由于云或其他原因造成的缺失值,操作简单易行。

3.1.1 空间加权插值

空间加权插值是基于某一区域 LST 数据中的有效值,在假设有效值与缺失值具有相同统计和几

何结构的前提下,利用 LST 的空间相关性通过插值的方法获得缺失像元 LST 值。其原理表示为 (Wu 等, 2021):

$$T_s(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^m f(T_s(x_i, y_i)) \quad (1)$$

式中, T_s 为 LST; (x_0, y_0) 为需要重构 LST 的像元; (x_i, y_i) 为 (x_0, y_0) 空间邻近且具有有效 LST 观测值的像元; f 为加权函数; m 为有效像元数量。

一些常用的 LST 空间插值方法包括地理统计法、样条函数、克里金插值、回归树分析等都直接将目标缺失像元周围空间邻近的有效像元作为重构时的输入数据 (Fan 等, 2014; Kilibarda 等, 2014)。Neteler (2010) 利用数据直方图剔除了 MODIS LST 数据中由云污染造成的低温异常值后,使用基于体积样条插值重建的温度梯度填补了山区由于云造成的 LST 缺失,输入数据中,除了 LST 产品本身,没有使用其他气象数据。

3.1.2 时间加权插值

时间加权插值是指使用同一区域在不同时间的多时相或时间序列 LST 信息去重建缺失像元 LST。该类方法主要包含线性时间法、时间傅里叶分析法、谐波分析法、小波变换等 (Jonsson 和 Eklundh, 2002; Lu 等, 2007; Scharlemann 等, 2008; Zhang 等, 2015)。这些方法都是利用目标缺失像元时间窗口前后的有效 LST 观测去重构缺失时间点的 LST。时间加权可以被表示为如下形式 (Wu 等, 2021):

$$T_s(x_0, y_0, t_0) = \sum_{i=1}^m f(T_s(x_0, y_0, t_i)) \quad (2)$$

式中, (x_0, y_0, t_0) 为 t_0 时刻存在 LST 缺失的目标像元 (x_0, y_0) ; t_i 为像元 (x_0, y_0) 在 t_0 时间点前后具有 LST 有效观测的时刻。

学者们进行了一系列基于时间插值的 LST 缺失重构研究。基于奇异谱分析 SSA (Singular Spectrum Analysis), Ghafarian Malamiri 等 (2018) 和 Zhang 等 (2020) 分别填补了 MODIS 时序 LST 产品中的条带和中国 FY-3B 卫星微波成像仪 (MWRI) 亮温产品中的条带,得到了空间覆盖更为全面的 MODIS LST 产品和空间无缝的 MWRI 亮温产品。基于经验正交函数 EOF (Empirical Orthogonal Function) 的数据插值也被用来填补 LST 缺失,如 Xu 和 Cheng (2021) 基于 DINEOF 填补了

AMSR2 被动微波 LST 的条带空白, 获得了粗分辨率空间无缝的被动微波遥感 LST。基于日内温度循环模型 DTC (Diurnal Temperature Cycle) 的插值也是时间插值的一个重要思路 (Jin 和 Dickinson, 1999; Udaheureka 等, 2008)。此外还有学者利用不同传感器在不同时间的观测集成来提高 LST 在某一时刻的空间覆盖, 得到更接近全天候的 LST 产品。例如, Crosson 等 (2012) 将 Terra MODIS LST 校正到 Aqua 过境时间后, 直接用来填补 Aqua MODIS LST 由于云覆盖导致的观测空白, 得到一个新的逐日集成 LST 数据集, 较集成前, 云覆盖引起的空间缺失显著减少。

3.1.3 时空加权插值

时空加权插值是同时利用目标缺失像元空间邻近和时间邻近的有效观测像元去预测和重构缺失像元 LST, 与单一空间插值或时间插值相比, 时空插值利用的有效观测更多, 从空间和时间两个维度去考虑有效观测与目标缺失像元的关系。因此该方法相较于前两种方法更加稳定和有效 (Metz 等, 2014)。时空加权插值可以表达为

$$T_s(x_0, y_0, t_0) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(T_s(x_i, y_j, t_j)) \quad (3)$$

式中, (x_i, y_j, t_j) 为像元 (x_0, y_0) 的时空邻近像元, 这些时空邻近像元具有 LST 有效观测值; m 和 n 分别为时间和空间邻近有效像元的数量。

Sun 等 (2017b) 认为在局部区域内, 相邻像元之间的 LST 差异在不同天是接近的, 利用缺失像元周边有效像元以及缺失像元观测时间点前后多天的有效观测值, 通过加权求和的方式来重构目标像元缺失值。Zeng 等 (2015) 利用地表分类数据和缺失像元时空邻近的 LST 数据来预测 MODIS LST 产品中的缺失值, 取得较好效果。Liu 等 (2017) 基于温度日循环模型和空间插值, 重构了 FY-2F 静止轨道卫星 LST 产品中云覆盖像元的 LST, 在该过程中多个时间和空间插值方法被引入到其中。Weiss 等 (2014) 利用目标缺失像元及其邻近像元在缺失值观测时间前后的有效观测值, 在时间维度上对缺失像元进行时间序列插值, 最终填补了缺失有效观测的像元。

3.2 基于能量平衡方程插值

基于 LST 有效观测通过时空插值获取的云下像

元 LST 并非该像元真实的非晴空 LST, 原因是这种方法本质上只考虑了像元之间的时空关系, 并没有考虑云下像元与晴空像元之间地表辐射差异带来的 LST 差异。通过时空插值获取的 LST 实质上是云下像元假定为晴空时的 LST。基于地表能量平衡方程的插值则考虑了晴空与云下像元之间的辐射差异, 进一步校正了云下 LST。

3.2.1 地表能量平衡方程插值原理

一般情况下, 地表热通量可表示为

$$G = R_{s-n} + R_{l-n} - SH - LH \quad (4)$$

式中, G 为地表热通量; R_{s-n} 是净短波辐射 (太阳辐射), 代表下行短波辐射 (R_s^d) 与上行短波辐射 (R_s^u) 之差; R_{l-n} 是净长波辐射, 代表下行长波辐射 (R_l^d) 与上行长波辐射 (R_l^u) 之差; SH 和 LH 分别是感热通量和潜热通量。

R_{l-n} 、 SH 和 LH 均可表示为与地表温度 (T_s) 相关的函数, 因此式 (4) 的偏导数形式可以写成:

$$\frac{\partial G}{\partial T_s} = \frac{\partial R_{s-n}}{\partial T_s} - \frac{\partial R_{l-n}}{\partial T_s} - \frac{\partial S_{hle}}{\partial T_s} \quad (5)$$

式中, T_s 为 LST; S_{hle} 是 SH 和 LH 之和。

式 (5) 等号右边的第一项并不说明 R_{s-n} 是 LST 的函数, 表达为该微分形式是因为式 (4) 中 R_{s-n} 是与 LST 相关的能量项。基于 Force-Restore 理论, G 和其微分形式进一步简化为 (Deardorff, 1978; Dickinson, 1988)

$$G = k_g \frac{\partial T}{\partial Z} = k_g \frac{(T_s - T_d)}{\Delta Z} \quad (6)$$

式中, k_g 是地面土壤热传导系数 ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$); ΔZ 是渗透深度, 定义为热扩散率的函数, 热扩散率是热导率与体积比热的比值; T_d 是地下层温度。

由于地下层温度对太阳辐射的敏感性远低于 LST (Stull, 1988), 故式 (6) 可进一步简化为式 (7):

$$\frac{\partial G}{\partial T_s} = \frac{\partial}{\partial T_s} \left(k_g \frac{(T_s - T_d)}{\Delta Z} \right) \approx \frac{k_g}{\Delta Z} \quad (7)$$

R_{l-n} 、 S_{hle} 与 R_{s-n} 之间具有线性相关关系 (Jin, 2000):

$$\begin{cases} R_{l-n} = a_0 + aR_{s-n} \\ S_{hle} = b_0 + bR_{s-n} \end{cases} \quad (8)$$

式中, a 和 b 是线性相关系数。基于式 (6)、式 (7) 和式 (8), 式 (5) 等号右边的第 2 项和第 3 项可进一步表达为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial S_{\text{hlc}}}{\partial T_s} &\approx \frac{\Delta S_{\text{hlc}}}{\Delta T_s} = \frac{\Delta S_{\text{hlc}}}{\Delta R_{s-n}} \frac{\Delta R_{s-n}}{\Delta T_s} \\ &= a \frac{\Delta R_{s-n}}{\Delta T_s} \\ \frac{\partial R_{l-n}}{\partial T_s} &\approx \frac{\Delta R_{l-n}}{\Delta T_s} = \frac{\Delta R_{l-n}}{\Delta R_{s-n}} \frac{\Delta R_{s-n}}{\Delta T_s} \\ &= b \frac{\Delta R_{s-n}}{\Delta T_s} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

综合式 (6)、(7)、(8) 和 (9) 可以得出式 (10):

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta T_s &= \frac{\Delta Z}{k_g} (\Delta R_{s-n} - \Delta R_{l-n} - \Delta S_{\text{hlc}}) \\ \Delta T_s &= \frac{1}{\lambda} (1 - a - b) \Delta R_{s-n} = \frac{1}{K} \Delta R_{s-n} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中, λ 为 $\Delta Z/k_g$; K 为 $\Delta Z/k_g (1 - a - b)$ 。

由式 (10) 可知, 晴空与非晴空 LST 的差异可以表示为净短波辐射差异的函数, 即两个相似像元的 LST 差异主要是由其净短波辐射差异引起的。在晴空条件下, 相似邻近像元具有非常接近的 LST, 某一个相似邻近像元被云覆盖时, 会使像元接收的净短波辐射产生变化而引起 LST 变化。因此, 云覆盖像元 LST 可表达为相似邻近像元的 LST 加上前者和后者由于云覆盖造成的净短波辐射差异带来的 LST 变化:

$$T_{\text{cloud}}(i) = T_{\text{clear}}(j) + \frac{1}{K} \Delta R_{s-n}(i, j) \quad (11)$$

当使用多个与云覆盖像元相似的邻近像元去重建云覆盖像元 LST 时 (邻近既可以指像元空间邻近也可以指同一像元在是时间序列上的邻近), 上式可被进一步表达如下:

$$T_{\text{cloud}}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f_j(T_{\text{clear}}(j)) + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f_j(\lambda \Delta R_{s-n}(i, j)) + d \quad (12)$$

式中, $T_{\text{cloud}}(i)$ 是像元 i 被云覆盖时的地表温度; 则 $T_{\text{clear}}(j)$ 是像元 i 相似邻近像元的晴空地表温度; f_j 是相似邻近像元 j 对应的映射函数; N 是相似邻近像元数量; d 是偏差。

式 (12) 等号右边第一项可以看做是像元 i 被假定为晴空时的 LST ($T_{\text{cloud-clear}}(i)$), 第二项是云给像元 i 带来的 LST 变化 $T_{\text{difference}}(i)$ 。因此, 基于能量平衡方程利用晴空相似邻近像元获取 $T_{\text{cloud-clear}}(i)$ 和 $T_{\text{difference}}(i)$ 是该方法获取全天候 LST 的关键。

3.2.2 地表能量平衡插值现状

Jin (2000) 首先基于地表平衡理论提出了一种“邻近像元”法用来估算极轨卫星热红外云覆盖像元 LST。该方法中, 云覆盖像元 i 的 $T_{\text{cloud-clear}}(i)$ 由其时空邻近的晴空 LST 通过插值而来, 基于实测数据建立 R_{l-n} 和 S_{hlc} 与 R_{s-n} 之间的相关关系, 最终得到 $T_{\text{difference}}(i)$ 并获取了云下 LST。Lu 等 (2011) 利用 MSG/SEVIRI 提供的时域观测信息和太阳辐射数据, 基于能量平衡方程, 将云下像元的 LST 表达为该像元时间邻近的晴空 LST 与净短波辐射差异带来的影响之和。Martins 等 (2019) 同样基于能量平衡方程, 利用 LSA-SAF (Satellite Application Facility on Land Surface Analysis) 提供的地表参数成功填补了 MSG/SEVIRI 官方 LST 产品由于云覆盖造成的 LST 缺失, 并生成了全天候 LST 产品 MLST-AS。Yang 等 (2019) 首先利用校正后和填补空白后的 MODIS 8 d 合成 LST 产品 (MOD11A2) 时间插值得到逐日空间全覆盖的 LST, 建立了 MOD11A1 LST 产品晴空像元与对应插值地表温度之间的函数关系, 并将此关系应用于云覆盖像元从插值地表温度中得到校正后的 $T_{\text{cloud-clear}}(i)$, 在此基础上, 基于 GLASS 提供的下行短波辐射产品来计算 $T_{\text{difference}}(i)$, 两者相加获得全天候地表温度。

前述研究都是直接基于地表能量平衡方程来获取热红外遥感 LST 产品中云覆盖像元 LST 从而得到全天候 LST。一些研究将净短波辐射差异导致的 LST 变化隐式地考虑在研究中。例如, Zhao 和 Duan (2020) 利用随机森林方法建立了晴空条件下 LST 和地表特征参量、地形参量、累积太阳辐射之间的映射关系, 并将晴空条件下得到的映射关系用于非晴空, 重构了 MODIS LST 产品中云覆盖像元 LST 值。

3.3 有效观测重构的局限性

基于有效观测重构缺失 LST 虽然已经被广泛运用于填补各种 LST 产品中由于云覆盖及其他原因造成的缺失, 具有意义明确、操作简单、数据依赖少等优点, 但在实际操作中仍存在诸多局限性。

时空插值重构缺失像元 LST 是利用缺失像元时空邻近的晴空有效像元 LST 通过插值进行。因此, 重构的 LST 是假定该像元为晴空时的 LST。当 LST 观测缺失是由云覆盖引起时, 时空插值重构的 LST 和缺失像元实际 LST 存在一个背景差异。此外, 时

空插值的应用要求缺失像元形成的时空窗口不能过大, 当缺失像元周边依然是大面积缺失时, 空间插值无效; 当缺失像元观测时间点前后存在长时间观测空白时, 时间插值无效。因此, 时空插值无法应用于长时间、大面积处于多云雾状况的地区。

能量平衡法虽然引入了地表净辐射差异来表征时空插值时晴空像元和非晴空像元之间的LST差异, 校正了天气背景差异, 但是当使用能量平衡法获取全天候LST时, 辐射分量之间的关系建立依赖大量地面站点数据。在重构LST阶段, 准确计算各个像元的净短波辐射本身就十分困难, 净短波辐射的精度直接影响全天候LST的精度。此外, 能量平衡法同样依赖于时间、空间和时空插值, 即同样依赖于晴空有效LST像元, 在填补热红外LST缺失时也存在无法应用于长时间、大面积处于多云雾状况地区的局限。

4 多源数据集成获取全天候LST

众所周知, 卫星遥感的时空分辨率一般难以兼顾。当极轨卫星热红外传感器的空间分辨率较高时, 其时间分辨率较低 (如 Landsat 8 卫星的LST空间分辨率为 100 m, 但其时间分辨率为 16 d); 当其时间分辨率较高时, 其空间分辨率则会受到限制 (如 MODIS 空间分辨率约为 1 km, 其时间分辨率约为半天); 被动微波传感器则可以提供不受云影响的较高空间覆盖率的LST观测, 但其空间分辨率较低 (如 AMSR-E LST 平均分辨率约为 25 km, AMSR2 则约为 10 km)。此外, 再分析资料中也提供了时间和空间连续的LST及相关参量, 但再分析资料同样面临着两个方面的限制。一方面, 再分析资料中LST及相关参量不确定性大, 难以直接被应用。另一方面, 再分析资料的空间分辨率较热红外LST则十分粗糙, 难以满足局部区域相关研究, 对其进行空间降尺度和率定都存在困难。

热红外、被动微波遥感及再分析资料提供的LST及相关参量都各有优势与弊端, 如何整合这些多源数据, 在优势互补的情况下集成得到时空分辨率与准确性都可以接受的全天候LST已成为学术界的研究焦点。本部分将从热红外与被动微波集成、热红外与再分析资料集成两方面回顾多源数据集成获取全天候LST的现状。

4.1 热红外与被动微波遥感集成

如前文所述, 被动微波遥感是获取全天候LST的一个重要基础数据源。但是基于单源被动微波遥感获取的LST存在空间分辨率低、轨道间隙大等问题。单源被动微波遥感LST难以满足小区域精细化应用需求, 但其可以穿透云层的特性与热红外遥感形成了良好互补, 因此被动微波与热红外遥感协同已成为获取全天候LST的一条重要途径。

第一种实现被动微波与热红外集成的方式是: 将被动微波遥感LST降尺度到与热红外遥感LST一致的空间尺度, 然后直接与后者集成得到全天候LST, 其集成流程如图4所示。对于该方法, 被动微波LST的降尺度十分关键, 直接影响到最终集成的全天候LST质量。

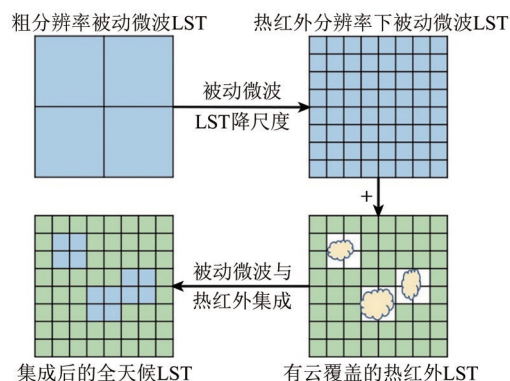


图4 被动微波LST降尺度后与热红外LST集成获取全天候LST示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the process for obtaining all-weather LST by integrating the downscaled passive microwave LST and the thermal infrared LST

基于该思想, 大量相关研究已经涌现, 这些研究的区别在于降尺度方法和集成方式的不同。例如, Li等 (2013a) 将此思想用于全天候海表温度获取, 将 4 km 的 MODIS 海表温度和 25 km 的 AMSR-E 被动微波海表温度作为训练贝叶斯集成模型的输入参数, 基于低分辨率 AMSR-E 像元和所含高分辨率 MODIS 子像元的位置关系, 通过贝叶斯空间最大熵对 AMSR-E 海表温度进行空间降尺度, 然后与 MODIS 海表温度直接合成得到 4 km 全天候海表温度。Duan 等 (2015) 首先使用 NDVI 阈值将中国大陆地区划分为 4 种地表类型; 其次, 分别在 4 种地表类型上建立 AMSR-E LST 与粗分辨率 NDVI 的回归关系; 接着将 1 km 分辨率的 NDVI 带入第 2 步得到的回归关系中获得降尺度后空间分辨

率为 1 km 的 AMSR-E LST; 最后将 1 km AMSR-E LST 与 MODIS LST 融合得到中国大陆 1 km 分辨率的全天候 LST。Xu 等 (2019) 也采用贝叶斯最大熵, 将降尺度后的 AMSR-E LST 与 1 km MODIS LST 集成得到了青藏高原和黑河流域空间分辨率为 1 km 的全天候 LST。Duan 等 (2017) 认为一个 AMSR-E 像元内所包含的 1 km MODIS 像元 LST 差异是由高程决定的, 利用高空间分辨率高程数据对 AMSR-E LST 数据降尺度得到 1 km 非晴空 LST, 最后将上述 1 km 的非晴空 LST 与 MODIS LST 融合得到中国区域 1 km 全天候 LST。Yoo 等 (2020) 认为高程不是唯一影响 LST 的因子, 除了 Duan 等 (2017) 考虑的高程因素以外, 植被指数、年积日、经纬度和太阳高度角也被作为 AMSR-E LST 降尺度影响因子, 将降尺度后的 AMSR-E LST 与 MODIS LST 融合, 最终得到韩国陆表空间分辨率为 1 km 的全天候 LST。

上述研究中, 降尺度后的被动微波 LST 都直接被用来与热红外集成, 没有经过校正或其他率定处理, 因此集成的全天候 LST 在图像质量和云下精度两方面都存在不确定性。降尺度不充分的被动微波 LST 与热红外集成后得到的全天候 LST 可能存在“斑块效应”。

为了解决上述问题, 一些学者从微波 LST 与热红外 LST 精度统一以及晴空和云下 LST 整体重构的角度做了另外一些尝试。基于 LST 时间分解理论 (Bechtel, 2012; Weng 和 Fu, 2014; Zhan 等, 2014), LST 时间序列可分为年内变化分量 (ATC)、日内变化分量 (DTC) 和天气变化分量 (WTC)。Zhang 等 (2019) 根据热红外和被动微波 LST 分别计算晴空和云下 ATC 和 DTC, 加权后得到全天候 ATC 与 DTC, 再由再分析资料计算出 WTC, 最后根据每个分量的物理特性对其进行优化或空间降尺度, 并将优化分量进行叠加, 得到晴空与非晴空均为重构的全天候 LST。基于上述方法, Zhang 等 (2019) 集成了 MODIS 和 AMSR-E 以及 MODIS 和 AMSR2 LST, 精度相对于第一种思路有所改善。Xu 和 Cheng (2021) 先从被动微波亮温数据中反演得到被动微波 LST 数据, 然后利用 DINEOF 插值填补被动微波条带; 再对被动微波 LST 数据进行降尺度, 得到 0.01° 的 LST 数据; 进一步利用 MODIS 晴空 LST 数据作为参考数据, 降尺度晴空被动微波 LST 数据作为目标数据, 利用累

积分布函数纠正降尺度被动微波 LST 数据; 继而融合纠正后的降尺度被动微波 LST 数据, 得到初步的全天候 LST; 最后利用多分辨率卡尔曼滤波对上述全天候 LST 数据进行处理得到最终的全天候 LST 数据。通过校正和滤波既降低了全天候 LST 的不确定性, 又提高了其图像质量。

当前大多数热红外与被动微波遥感集成获取全天候 LST 都是基于 Aqua MODIS 和 AMSR-E/2 进行的, 一个十分棘手的问题是 AMSR-E 和 AMSR2 存在长达 8 个月的时间空白和极轨运行方式造成的条带缺失。这使得目前热红外和被动微波遥感观测直接集成的 LST 难以达到“空间无缝”和“时间连续”的要求。为解决这一问题, Zhang 等 (2020) 建立了基于缺失微波亮温重构的全天候 LST 估算方法 RBT (Reconstruction of Brightness Temperature)。该方法利用风云三号 B 卫星 (FY-3B) 上 MWRI 被动微波亮温数据, 基于 SSA 重构了 2011 年—2012 年 AMSR-E 和 AMSR2 时间和空间缺失窗口内的被动微波亮温数据, 基于重构后时空连续的 AMSR-E 和 AMSR2 亮温数据与 MODIS LST 数据集得到时空严格连续且空间分辨率为 1 km 的全天候 LST。该研究将被动微波与热红外集成获取全天候 LST 的范围推广到了更大领域, 不再受限于被动微波观测与热红外观测需要时间严格一致, 而是可以借助多个卫星上多个被动微波传感器去弥补微波传感器的时间断档缺失和极轨运行方式造成的轨道间隙缺失。Tang 等 (2021) 提出了一种能够估算近实时全天候 LST 的方法 (NRT-AW), 该方法首先在 FY MWRI 和 AMSR2 亮温之间建立映射关系, 然后在 AMSR2 的轨道间隙区域内进行应用以获得近实时的空间无缝微波亮温。在两个相邻的年尺度周期内, 热红外遥感 LST 和被动微波亮温之间的映射关系是相似的, 基于此映射关系, 通过空间无缝的被动微波亮温估算全天候 LST。

4.2 热红外遥感与再分析资料集成

除了热红外与被动微波集成获取全天候 LST 以外, 再分析资料中 LST 及相关参量的时空连续性, 为集成热红外和再分析资料获取全天候 LST 提供了另一种思路。然而, 如前所述, 再分析资料面临着不确定性大和空间分辨率低等问题, 使得再分析资料与热红外集成面临率定和空间降尺度两大难题。到目前为止, 成功实现再分析资料与

热红外遥感集成获取全天候 LST 的研究较少。但不可否认, 这种方式有巨大研究潜力, 因此本文亦专门对这个主题进行了回顾和梳理。

目前仅有少数研究开展了集成热红外 LST 和再分析资料进而获得全天候 LST 的研究。例如, Long 等 (2020) 基于自适应时空反射率融合模型 ESTARFM (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model) (Zhu 等, 2010), 集成 CLDAS LST 和 MODIS LST 估算了中国华北地区 1 km 全天候 LST, 在区域尺度取得了很好表现。该研究在大幅填补了热红外 LST 空间缺失的同时, 也有十分稳定的精度。基于该方法生成的全天候 LST 被成功用于估算空间连续的地表蒸散发数据 (Zhang 等, 2021a)。张晓东 (2020) 和 Zhang 等 (2021b) 则基于改进的 LST 时间分解模型, 提出了一种新的再分析数据与热红外遥感数据集成的全天候 LST 估算方法 RTM (Reanalysis and Thermal Infrared Remote Sensing Merging), RTM 将 LST 分解为高频分量与低频分量, 然后用 MODIS LST 产品来拟合低频分量和晴空高频分量, 利用再分析资料拟合了非晴空高频分量, 最后累加得到全天候 LST。基于 RTM, 集成了 Aqua MODIS 和 GLDAS/CLDAS, 生成了逐日 1 km 全天候 LST 产品, 对应的数据产品 TRIMS LST 及其空间子集 TRIMS LST-TP 已在国家青藏高原科学数据中心正式发布。

4.3 多源数据集成的局限性

多源数据集成获取全天候 LST 与基于有效观测数据重构全天候 LST 相比, 可以利用具有不同特性的数据克服云带来的影响, 从而使全天候 LST 在空间分辨率上达到热红外 LST 的水平, 并在精度上与其接近。然而, 多源数据集成同样也存在一些局限。

热红外与被动微波集成要求热红外传感器与被动微波传感器具有相同或相近的过境时间, 这要求这两种传感器最好搭载于同一卫星上。这也是当前大多数研究都集中在 Aqua MODIS 与 AMSR-E/2 的集成中的原因, 因为它们有十分接近的过境时间, 可以减少由于过境时间差异带来的 LST 变化, 减小集成的难度。

被动微波 LST 反演中存在的问题也给该类方法的应用带来了诸多限制。第一, 与热红外相比, 被动微波遥感空间分辨率主要取决于微波辐射计

天线尺寸和采用的频率, 但受限于目前星载辐射计整体重量的限制, 天线尺寸扩展空间十分有限, 特别是低频波段的空间分辨率难以通过硬件提升, 所以被动微波 LST 空间分辨率较低 (数十公里不等) (李靖 等, 2004)。其多用于大区域尺度 LST 的监测 (国家尺度或者全球尺度), 其粗糙的空间分辨率使得其在区域尺度的应用 (干旱监测、生态监测、气候变化监测等) 十分受限 (Prigent 等, 1999)。此外, 粗糙的空间分辨率使得其难以直接与热红外 LST 集成。第二, 微波对地表具有一定穿透性, 也是被动微波与热红外集成面临的限制之一。在先前的检验中发现, 基于被动微波观测反演得到的 LST 较热红外 LST, 存在明显低估, 在裸地和植被稀疏区域这种现象更为严重 (Catherine 等, 2011; Holmes 等, 2013, 2015; Parinussa 等, 2008)。导致这一现象的原因是微波波长较长, 微波亮温中包含地表以下的辐射信息, 即被动微波和热红外拥有不同的热采样深度 TSD (Thermal Sampling Depth) (Galantowicz 等, 2011; Zhou 等, 2017a)。因此, 热红外与被动微波集成未来主要研究方向是实现被动微波数据的有效降尺度及被动微波热采样深度纠正, 从而为全天候 LST 获取提供更有效的集成数据。

热红外与再分析资料集成获取全天候 LST 则尚处于初步阶段, 与此相关的研究十分稀少, 关于二者集成获取全天候 LST 的方法到目前为止仍然十分匮乏。此外再分析资料本身的低空间分辨率和不确定性也是集成过程中亟需解决的问题。但热红外遥感和再分析资料集成确实提供了一种获取全天候 LST 的新思路, 将有助于区域乃至全球尺度全天候 LST 数据集的生成。热红外与再分析资料集成获取全天候 LST 未来研究方向应该包括如何实现再分析资料的率定和空间降尺度, 以及如何从再分析资料中提取有效的时序信息。

5 全天候 LST 产品及其应用

5.1 全天候 LST 产品回顾

全天候 LST 对于局地与全球气候变化十分重要, 全天候 LST 的关注度日益上升。学者们从各个方面探究了获取全天候 LST 的可行性。基于有效观测重构和多源数据集成的思路, 当前已经发布了一些全天候 LST 产品, 这些产品对用户是公开可用

的。本文搜集并整理了当前公开发布的全天候 LST 产品（表 2，截至投稿时），尽管当前有较多关于全天候 LST 的研究，但目前已经公开发布的产品却

十分稀少。如表 2 所示，现有的全天候 LST 产品中尚缺乏同时满足全球尺度不受云影响、时间跨度长、空间分辨率高等应用需求的产品。

表 2 当前已发布的全天候 LST 产品
Table 2 Currently released all-weather LST products

产品名	空间分辨率/km	时间分辨率	空间覆盖范围	时间覆盖范围	发布平台与网址	参考文献
中国全天候 1 km 地表温度产品 (CWLST)	1	逐日一次 (13:30)	中国主要陆地地区 (包含港澳台地区, 不含南海岛礁等区域)	2002 年—2011 年	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/index.html)	(Duan 等, 2017)
中国西部逐日 1 km 空间分辨率全天候地表温度数据集 V1 (CWWLST)	1	逐日两次 白天: 12:30; 夜间: 1:00	中国西部 (45.00°N—22°N, 65.00°E—108°E)	2003 年—2018 年	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn)	(Zhang 等, 2019, 2020)
MLST-AS (LSA-005)	3—5	30 min	MSG 标称圆盘 (静止点为赤道 0 经线位置)	2020—11—23 起 (目前)	The SAF (Satellite Application Facility) on LSA (Land Surface Analysis), (https://landsaf.ipma.pt/en)	(Martins 等, 2019)
中国西部逐日 1 km 全天候地表温度数据集 V2 (TRIMS LST-TP)	1	逐日两次 (白天: 12:30; 夜间: 1:00)	中国西部 (45.00°N—20°N, 72.00°E—104°E)	2000 年—2019 年	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn)	(Zhang 等, 2021b)
中国陆域及周边逐日 1 km 全天候地表温度数据集 (TRIMS LST)	1	逐日两次 (白天: 12:30; 夜间: 1:00)	中国主要陆地及周边 (包含中国港澳台地区, 暂不含中国南海岛礁等区域) (19.00°N—55°N, 72.00°E—135°E)	2000 年—2019 年	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn)	(Zhang 等, 2021b)

Duan 等 (2017) 发布了中国全天候 1 km 地表温度产品 (CWLST)，空间覆盖上包含了中国大陆主要区域（包含港澳台地区，不含南海岛礁等区域），空间分辨率为 1 km。时间跨度上在已发布的产品中较长，时间跨度为 10 a（2002 年—2011 年）。其数据满足了全天候 LST 不受云雾影响的要求，是首个基于热红外与被动微波融合的全天候 LST 产品。

Zhang 等 (2019, 2020) 发布的中国西部逐日 1 km 空间分辨率全天候地表温度数据集 V1 (CWWLST) 在集成热红外与被动微波 LST 时，采用了基于时间分解模型整体重构晴空和非晴空 LST，具有良好的图像质量和精度，尤其是在中国西南部的长期多云雾地区，更具明显优势。此外，该数据产品时间跨度为 16 a，时间跨度较长，空间分辨率较高（1 km），可以用于长时序研究。该产品现已被中国西部逐日 1 km 全天候地表温度数据集

V2 (TRIMS LST-TP) 替代 (Zhang 等, 2021b)。由于该产品在生产过程中是逐像元建模重构 LST，因此产品生产需要巨大算力支持，这限制了该产品的大范围生产。使得该产品空间覆盖范围较小，前期发布的版本只包含中国西部区域。

中国陆域及周边逐日 1 km 全天候地表温度数据集 (TRIMS LST) 是集成 MODIS 热红外地表温度和 GLDAS 与 CLDAS 等再分析资料后，重构晴空与非晴空 LST，得到的 1 km 全天候 LST。其算法同样是基于 LST 时间分解理论，与 CWWLST 相比较，TRIMS 的验证精度和图像质量得到进一步优化。此外，TRIMS 进一步拓展了该系列产品的时空覆盖范围，时间上由 CWWLST 的 2003 年—2018 年拓展至 2000 年—2019 年（后期会不断更新）；空间上由 CWWLST 的中国西部拓展至 TRIMS 的中国主要陆地及周边区域（包含中国港澳台地区，暂不包含中国南海岛礁等区域）。TRIMS LST-TP 是

TRIMS LST的子集,其目的是为了更方便用户在青藏高原及周边地区的使用,除了空间覆盖范围有所变化外,其余参数指标与TRIMS LST完全一致。由于TRIMS与CWWLST一样都是逐像元建模重建LST,所以重建大面积全天候LST时,仍然需要大量算力,因此空间范围上尚未覆盖全球。

Martins等(2019)发布的MLST-AS产品是基于能量平衡方程插值获取的全天候LST。MLST-AS是利用LSA-SAF提供的地表辐射数据集填补了MSG/SEVIRI官方LST产品中由于云覆盖造成的LST空白后获取的全天候LST数据集。由于其基础数据来自于静止轨道卫星,所以其时间分辨较高(半小时)。其空间覆盖范围为静止点在赤道上空 0° 经线处的标称全圆盘(约 75.00°N — 75°S , 75.00°W — 75°E),星下点像元空间分辨率约为3 km,离星下点越远,空间分辨率越低。其空间分辨率较TRIMS LST更低。此外,云下LST验证精度约为4 K。另外一个限制其应用的主要问题是,该数据处于初始发布阶段,目前其数据可用时间范围始于2020年11月23日(截止2021年5月),实际可用时间范围有限,尚难以满足长时间序列相关研究的需求。

尽管全天候LST相关研究已经开展多年,但当前全天候LST产品依然十分匮乏。截止目前,已发布的产品在空间分辨率、时空覆盖、精度等方面还存在较大提升空间。

5.2 全天候LST的应用

学术界十分关注全天候LST研究进展的一个重要原因是全天候LST可以促进以LST为驱动数据的相关研究。目前常用的热红外遥感LST数据均存在空间缺失,这必然制约相关研究的进一步深入和全面理解。因此将全天候LST数据应用到与LST相关的研究中,从而改善研究结果或发现新的科学问题是全天候LST的重要作用之一。

Qu等(2021)利用中国西部逐日1 km空间分辨率全天候地表温度数据集V1作为土壤湿度的降尺度因子,对基于微波亮温和机器学习方法生成的粗分辨率土壤湿度数据进行空间降尺度,得到了青藏高原地区2002年—2015年空间分辨率为1 km且空间连续的土壤湿度数据。全天候LST在获取中分辨率空间连续的土壤湿度数据中,扮演了十分关键的角色。He等(2020)在中国西南河

流源区,将中国西部逐日1 km空间分辨率全天候地表温度数据集V1同化进热传导方程,估算了该区域云下地表蒸散发,并将估算结果与只用MODIS热红外LST作为同化输入的结果进行了比较。结果显示,同化全天候LST估算的云下地表蒸散发具有更高精度。Zhang等(2021a)使用Long等(2020)生成的1 km全天候LST作为地表蒸散发估算的输入参数,成功估算了中国华北平原2008年—2017年逐日1 km空间连续的地表蒸散发,与国际广泛使用的两种地表蒸散数据相比,其估算结果在该区域表现更好。

文献调研结果表明,除了上述少量已有研究之外,目前很少有直接应用全天候LST产品的相关研究。认为有两个主要原因:(1)如5.1所述,全天候LST产品匮乏和产品时空覆盖不足等客观因素使得全天候LST应用尚处于初级阶段;(2)当前已发布的全天候LST产品都是近几年陆续发布,全天候LST产品在学术界的传播范围较小。

除了利用全天候LST估算空间连续的土壤湿度、地表蒸散发外,其还有望被应用于气候变化研究、干旱监测、城市热环境分析等诸多领域。在未来,除了进一步获取更高质量和更广泛空间覆盖范围的全天候LST之外,促进对已有全天候LST产品的直接应用,进一步发现和理解相关过程也十分重要。

6 结 论

目前,学术界已经就全天候LST遥感获取展开了丰富研究,全天候LST获取已取得诸多进展,为LST相关应用提供了有力支撑。从当前两类获取全天候LST的方法来看,多源数据集成方法表现出较大的潜力:它可以将多种数据的优势通过集成手段整合到一起,从而使获取的全天候LST在时间上连续、空间上不受云雾影响,同时在空间分辨率上也可以与当前主流的卫星热红外遥感LST保持一致,精度上有稳定表现。而基于有效观测重构全天候LST对输入数据要求较少,操作简单易行,这种方法非常适合于填补热红外LST中短时间、小面积、碎片状的空间缺失(碎云或者其他原因引起的缺失)。被动微波LST尽管存在空间分辨率低和空间条带等问题,但其对云层的穿透能力是当前获取云下地表信息的有效手段,最大限度地提高

被动微波 LST 的准确性可以给多源数据集成获取全天候 LST 提供一个十分重要的数据源, 从而间接促进全天候 LST 的发展。

基于前文的分析, 全天候 LST 还可从以下方面开展深入研究:

(1) 被动微波热采样深度纠正和条带填补。由于微波波长较长, 对地表有一定穿透性, 因此被动微波观测信息具有一定热采样深度, 被动微波 LST 与热红外 LST 具有不同物理含义, 如何统一它们的物理含义是提高被动微波 LST 精度面临的关键问题。此外, 极轨运行方式造成的条带, 使被动微波存在较大空间缺失, 如何填补条带缺失也是一个关键问题。从传感器角度出发, 如果未来的被动微波传感器在设计中可以在控制信噪比的前提下增加微波成像仪的扫描幅宽, 则可以缩小甚至消除被动微波数据中的条带, 得到空间连续的被动微波 LST。解决上述两个问题后, 被动微波 LST 可以为多源数据集成提供空间覆盖广、精度稳定的基础数据。

(2) 加强多源数据集成获取全天候 LST 的研究。多源数据集成获取全天候 LST 虽已获得学术界关注, 有一些研究涌现, 但当前研究尚处于初步阶段。未来的研究应该考虑如何形成系统有效的集成策略。当前对于热红外与被动微波集成的研究大多数都停留在将被动微波数据降尺度后与热红外简单叠加, 进一步的研究应该注重它们之间观测差异的校正。此外, 如何协同观测时间不一致的多平台多传感器来提高某一时刻 LST 的空间覆盖, 也是未来的研究主题。此外, 热红外与再分析资料集成受到的关注度不够, 二者之间的协同潜力没有被充分挖掘, 未来应该充分利用再分析资料的时空连续性和热红外数据的高空间分辨率与高精度特性, 获取 100% 时空连续的全天候 LST。

(3) 加强全天候 LST 产品的生产、共享与应用。当前可以被用户直接应用的全天候 LST 产品寥寥无几。在接下来的全天候 LST 研究中, 应该将生成全球尺度上时空连续且具有中高空间分辨率的全天候 LST 产品作为全天候 LST 研究的重要任务。此外, 在提高全天候 LST 数据质量和可靠性的同时, 也应该注重方法在实际应用中的可操作性和低成本性, 让全天候 LST 成为真正推动相关研究进步的可用数据。

参考文献 (References)

- Aires F, Prigent C, Rossow W B and Rothstein M. 2001. 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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D14): 14887-14907 [DOI: 10.1029/2001JD900085]
- Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, Houborg R, Starks P J and Agam N. 2008. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales. *Remote Sensing of Environment*, 112(12): 4227-4241 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.07.009]
- André C, Ottlé C, Royer A and Maignan F. 2015. Land surface temperature retrieval over circumpolar Arctic using SSM/I-SSMIS and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 162: 1-10 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.01.028]
- Bai L L, Long D and Yan L. 2019. Estimation of surface soil moisture with downscaled land surface temperatures using a data fusion approach for heterogeneous Agricultural Land. *Water Resources Research*, 55(2): 1105-1128 [DOI: 10.1029/2018WR024162]
- Basist A, Grody N C, Peterson T C and Williams C N. 1998. Using the special sensor microwave/imager to monitor land surface temperatures, wetness, and snow cover. *Journal of Applied Meteorology*, 37(9): 888-911 [DOI: 10.1175/1520-0450(1998)037<0888:UTSS-MI>2.0.CO;2]
- Bechtel B. 2012. Robustness of annual cycle parameters to characterize the urban thermal landscapes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(5): 876-880 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2185034]
- Cammalleri C, Anderson M C, Gao F, Hain C R and Kustas W P. 2014. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion. *Agricultural and Forest Meteorology*, 186: 1-11 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.11.001]
- Catherinot J, Prigent C, Maurer R, Papa F, Jiménez C, Aires F and Rossow W B. 2011. Evaluation of "all weather" microwave-derived land surface temperatures with in situ CEOP measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D23): D23105 [DOI: 10.1029/2011JD016439]
- Chen J, Brissette F P and Leconte R. 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 401(3/4): 190-202 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.020]
- Crosson W L, Al-Hamdan M Z, Hemmings S N J and Wade G M. 2012. A daily merged MODIS Aqua - Terra land surface temperature data set for the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 119: 315-324 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.019]
- Dai F N. 2016. Retrieval and Validation of Land Surface Temperature from AMSR2 Data. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China. (代冯楠. 2016. 面向 AMSR2 被动微波遥感数据的地表温度反演方法与验证研究. 成都: 电子科技大学)

- Deardorff J W. 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 83(C4): 1889-1903 [DOI: 10.1029/JC083iC04p01889]
- Dickinson R E. 1988. The force - restore model for surface temperatures and its generalizations. *Journal of Climate*, 1(11): 1086-1097 [DOI: 10.1175/1520-0442(1988)001<1086:TFMFST>2.0.CO;2]
- Dong L X, Yang H, Zhang P, Tang S H and Lu Q F. 2012. Retrieval of land surface temperature and dynamic monitoring of a high temperature weather process based on FY-3A/VIRR data. *Journal of Applied Meteorological Science*, 23(2): 214-222 (董立新, 杨虎, 张鹏, 唐世浩, 陆其峰. 2012. FY-3A 陆表温度反演及高温天气过程动态监测. *应用气象学报*, 23(2): 214-222)
- Duan S B, Han X J, Huang C, Li Z L, Wu H, Qian Y G, Gao M F and Leng P. 2020. Land surface temperature retrieval from passive microwave satellite observations: state-of-the-art and future directions. *Remote Sensing*, 12(16): 2573 [DOI: 10.3390/rs12162573]
- Duan S B, Li Z L and Leng P. 2017. A framework for the retrieval of all-weather land surface temperature at a high spatial resolution from polar-orbiting thermal infrared and passive microwave data. *Remote Sensing of Environment*, 195: 107-117 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.008]
- Duan S B, Li Z L, Leng P, Han X J and Chen Y Y. 2015. Generation of an all-weather land surface temperature product from MODIS and AMSR-E data//*Proceedings of SPIE 9808, International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications 2015*. Guilin: SPIE: 980816 [DOI: 10.1117/12.2207848]
- Duan S B, Li Z L, Wang N, Wu H and Tang B H. 2012. Evaluation of six land-surface diurnal temperature cycle models using clear-sky *in situ* and satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 124: 15-25 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.04.016]
- Fan X M, Liu H G, Liu G H and Li S B. 2014. Reconstruction of MODIS land-surface temperature in a flat terrain and fragmented landscape. *International Journal of Remote Sensing*, 35(23): 7857-7877 [DOI: 10.1080/01431161.2014.978036]
- Fily M, Royer A, Goïta K and Prigent C. 2003. A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-arctic areas. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 328-338 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00011-7]
- Ford T W and Quiring S M. 2019. Comparison of contemporary *in situ*, model, and satellite remote sensing soil moisture with a focus on drought monitoring. *Water Resources Research*, 55(2): 1565-1582 [DOI: 10.1029/2018WR024039]
- Fu P, Xie Y H, Weng Q H, Myint S, Meacham-Hensold K and Bernacchi C. 2019. A physical model-based method for retrieving urban land surface temperatures under cloudy conditions. *Remote Sensing of Environment*, 230: 111191 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.010]
- Galantowicz J F, Moncet J L, Liang P, Lipton A E, Uymin G, Prigent C and Grassotti C. 2011. Subsurface emission effects in AMSR-E measurements: implications for land surface microwave emissivity retrieval. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116 (D17): D17105 [DOI: 10.1029/2010JD015431]
- Gao H L, Fu R, Dickinson R E and Juárez R I N. 2008. A practical method for retrieving land surface temperature from AMSR-E over the amazon forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(1): 193-199 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.906478]
- Ghafarian Malamiri H R, Rousta I, Olafsson H, Zare H and Zhang H. 2018. Gap-filling of MODIS time series Land Surface Temperature (LST) products using singular spectrum analysis (SSA). *Atmosphere*, 9(9): 334 [DOI: 10.3390/atmos9090334]
- Ghent D J, Corlett G K, Göttsche F M and Remedios J J. 2017. Global land surface temperature from the along-track scanning radiometers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(22): 12167-12193 [DOI: 10.1002/2017JD027161]
- Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, Cothorn J S, Hook S and Kahle A B. 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1113-1126 [DOI: 10.1109/36.700995]
- Gong T T, Lei H M, Yang D W, Jiao Y and Yang H B. 2017. Monitoring the variations of evapotranspiration due to land use/cover change in a semiarid shrubland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2): 863-877 [DOI: 10.5194/hess-21-863-2017]
- Göttsche F M and Olesen F S. 2001. Modelling of diurnal cycles of brightness temperature extracted from METEOSAT data. *Remote Sensing of Environment*, 76(3): 337-348 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00214-5]
- Gu S Y, Qiu H and Zhang W J. 2004. Retrieval of land surface microwave emissivity by using satellite-borne AMSU data. *Chinese Journal of Radio Science*, 19(4): 452-457 (谷松岩, 邱红, 张文建. 2004. 先进微波探测器资料反演地表微波辐射率试验. *电波科学学报*, 19(4): 452-457) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-0388.2004.04.014]
- He X L, Xu T R, Bateni S M, Ek M, Liu S M and Chen F. 2020. Mapping regional evapotranspiration in cloudy skies via variational assimilation of all-weather land surface temperature observations. *Journal of Hydrology*, 585: 124790 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124790]
- Holmes T R H, De Jeu R A M, Owe M and Dolman A J. 2009. Land surface temperature from Ka band (37 GHz) passive microwave observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114 (D4): D04113 [DOI: 10.1029/2008JD010257]
- Holmes T R H, Crow W T, Hain C, Anderson M C and Kustas W P. 2015. Diurnal temperature cycle as observed by thermal infrared and microwave radiometers. *Remote Sensing of Environment*, 158: 110-125 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.10.031]
- Holmes T R H, Crow W T, Tugrul Yilmaz M, Jackson T J and Basara J B. 2013. Enhancing model-based land surface temperature estimates using multiplatform microwave observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(2): 577-591 [DOI: 10.1002/jgrd.50113]
- Hu L Q, Brunsell N A, Monaghan A J, Barlage M and Wilhelm O V. 2014. How can we use MODIS land surface temperature to validate long-term urban model simulations? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(6): 3185-3201 [DOI: 10.1002/

- 2013JD021101]
- Huang B, Wang J, Song H H, Fu D J and Wong K K. 2013. Generating high spatiotemporal resolution land surface temperature for urban heat island monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5): 1011-1015 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2227930]
- Hulley G, Veraverbeke S and Hook S. 2014. Thermal-based techniques for land cover change detection using a new dynamic MODIS multispectral emissivity product (MOD21). *Remote Sensing of Environment*, 140: 755-765 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.014]
- Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of geophysical research: atmospheres* 108.
- Jin M L. 2000. Interpolation of surface radiative temperature measured from polar orbiting satellites to a diurnal cycle: 2. Cloudy-pixel treatment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105 (D3): 4061-4076 [DOI: 10.1029/1999JD901088]
- Jin M L and Dickinson R E. 1999. Interpolation of surface radiative temperature measured from polar orbiting satellites to a diurnal cycle: 1. Without clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D2): 2105-2116 [DOI: 10.1029/1998JD200005]
- Jones L A, Kimball J S, McDonald K C, Chan S T K, Njoku E G and Oechel W C. 2007. Satellite microwave remote sensing of boreal and arctic soil temperatures from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(7): 2004-2018 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.898436]
- Jonsson P and Eklundh L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8): 1824-1832 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.802519]
- Kalma J D, McVicar T R and McCabe M F. 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29(4): 421-469 [DOI: 10.1007/s10712-008-9037-z]
- Kang J, Tan J L, Jin R, Li X and Zhang Y. 2018. Reconstruction of MODIS land surface temperature products based on multi-temporal information. *Remote Sensing*, 10(7): 1112 [DOI: 10.3390/rs10071112]
- Kilibarda M, Hengl T, Heuvelink G B, Gräler B, Pebesma E, Perčec Tadić M and Bajat B. 2014. Spatio-temporal interpolation of daily temperatures for global land areas at 1 km resolution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(5): 2294-2313 [DOI: 10.1002/2013JD020803]
- Kou X K, Jiang L M, Bo Y C, Yan S and Chai L N. 2016. Estimation of land surface temperature through blending MODIS and AMSR-E data with the Bayesian maximum entropy method. *Remote Sensing*, 8(2): 105 [DOI: 10.3390/rs8020105]
- Kustas W P, Nieto H, Morillas L, Anderson M C, Alfieri J G, Hipps L E, Villagarcía L, Domingo F and García M. 2016. Revisiting the paper "Using radiometric surface temperature for surface energy flux estimation in Mediterranean drylands from a two-source perspective". *Remote Sensing of Environment*, 184: 645-653 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.024]
- Lei H M, Gong T T, Zhang Y C and Yang D W. 2018. Biological factors dominate the interannual variability of evapotranspiration in an irrigated cropland in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 262-276 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.01.007]
- Li A H, Bo Y C, Zhu Y X, Guo P, Bi J and He Y Q. 2013a. Blending multi-resolution satellite sea surface temperature (SST) products using Bayesian maximum entropy method. *Remote Sensing of Environment*, 135: 52-63 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.021]
- Li H, Yang Y K, Li R B, Wang H S, Cao B, Bian Z J, Hu T, Du Y M, Sun L and Liu Q H. 2019. Comparison of the MuSyQ and MODIS Collection 6 Land surface temperature products over barren surfaces in the Heihe River Basin, China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10): 8081-8094 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2918259]
- Li J, Wang T, Zhang S W and Jiang J S. 2004. Spatial resolution enhancement of microwave radiometer using BG algorithm. *Journal of Remote Sensing*, 8(5): 409-413 (李靖, 王涛, 张升伟, 姜景山. 2004. 利用BG算法提高微波辐射计空间分辨率. *遥感学报*, 8(5): 409-413) [DOI: 10.11834/jrs.20040505]
- Li W B, Zhu Y J, Hong G and Zhao B L. 1998. The acquisition of land surface temperature in eastern China Using SSM/I Data. *Progress in Natural Science*, 8(3): 305-313 (李万彪, 朱元竟, 洪刚, 赵柏林. 1998. SSM/I 遥感中国东部地面温度. *自然科学进展*, 8(3): 305-313)
- Li X M, Zhou Y Y, Asrar G R and Zhu Z Y. 2018. Creating a seamless 1 km resolution daily land surface temperature dataset for urban and surrounding areas in the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 206: 84-97 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.010]
- Li Z L, Tang B H, Wu H, Ren H Z, Yan G J, Wan Z M, Trigo I F and Sobrino J A. 2013b. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131: 14-37 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008]
- Liang S L, Cheng J, Jia K, Jiang B, Liu Q, Xiao Z Q, Yao Y J, Yuan W P, Zhang X T, Zhao X and Zhou J. 2021. The global Land surface satellite (GLASS) product suite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(2): E323-E337 [DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0341.1]
- Liang S L, Wang K C, Zhang X T and Wild M. 2010. Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(3): 225-240 [DOI: 10.1109/JSTARS.2010.2048556]
- Liu Z H, Wu P H, Duan S B, Zhan W F, Ma X S and Wu Y L. 2017. Spatiotemporal reconstruction of land surface temperature derived from FengYun geostationary satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(10): 4531-4543 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2716376]
- Long D, Bai L L, Yan L, Zhang C J, Yang W T, Lei H M, Quan J L, Meng X Y and Shi C X. 2019. Generation of spatially complete and daily continuous surface soil moisture of high spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111364 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111364]

- Long D, Yan L, Bai L L, Zhang C J, Li X Y, Lei H M, Yang H B, Tian F Q, Zeng C, Meng X Y and Shi C X. 2020. Generation of MODIS-like land surface temperatures under all-weather conditions based on a data fusion approach. *Remote Sensing of Environment*, 246: 111863 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111863]
- Lu L, Venus V, Skidmore A, Wang T J and Luo G P. 2011. Estimating land-surface temperature under clouds using MSG/SEVIRI observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(2): 265-276 [DOI: 10.1016/j.jag.2010.12.007]
- Lu L, Zhang T J, Wang T J and Zhou X M. 2018. Evaluation of Collection-6 MODIS land surface temperature product using multi-year ground measurements in an Arid Area of Northwest China. *Remote Sensing*, 10(11): 1852 [DOI: 10.3390/rs10111852]
- Lu X L, Liu R G, Liu J Y and Liang S L. 2007. Removal of noise by wavelet method to generate high quality temporal data of terrestrial MODIS products. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing: Journal of the American Society of Photogrammetry*, 73(10): 1129-1139
- Ma J, Zhou J, Götsche F M, Liang S L, Wang S F and Li M S. 2020. A global long-term (1981-2000) land surface temperature product for NOAA AVHRR. *Earth System Science Data*, 12(4): 3247-3268 [DOI: 10.5194/essd-12-3247-2020]
- Ma Y F, Liu S M, Song L S, Xu Z W, Liu Y L, Xu T R and Zhu Z L. 2018. Estimation of daily evapotranspiration and irrigation water efficiency at a Landsat-like scale for an arid irrigation area using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 216: 715-734 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.019]
- Mao K B, Shi J C, Li Z L, Qin Z H and Jia Y Y. 2005. The land surface temperature and emissivity retrieved from The AMSR passive microwave data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 17(3): 14-17 (毛克彪, 施建成, 李召良, 覃志豪, 贾媛媛. 2005. 用被动微波 AMSR 数据反演地表温度及发射率的方法研究. *国土资源遥感*, 17(3): 14-17) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-070X.2005.03.004]
- Mao K B, Shi J C, Li Z L, Qin Z H, Li M C and Xu B. 2007. A physical-based statistical algorithm for retrieving land surface temperature from AMSR-E passive microwave data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(7): 1115-1120 (毛克彪, 施建成, 李召良, 覃志豪, 李满春, 徐斌. 2006. 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. *中国科学: 地球科学*, 36(12): 1170-1176) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2006.12.012]
- Martins J P A, Trigo I F, Ghilain N, Jimenez C, Götsche F M, Ermida S L, Olesen F S, Gellens-Meulenberghs F and Arboleda A. 2019. An all-weather land surface temperature product based on MSG/SEVIRI observations. *Remote Sensing*, 11(24): 3044 [DOI: 10.3390/rs11243044]
- McFarland M J, Miller R L and Neale C M U. 1990. Land surface temperature derived from the SSM/I passive microwave brightness temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28: 839-845 [DOI: 10.1109/36.58971]
- Meng Q Y, Zhang L L, Sun Z H, Meng F, Wang L and Sun Y X. 2018. Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: a 12-year case study in Beijing, China. *Remote Sensing of Environment*, 204: 826-837 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.019]
- Metz M, Rocchini D and Neteler M. 2014. Surface temperatures at the continental scale: tracking changes with remote sensing at unprecedented detail. *Remote Sensing*, 6(5): 3822-3840 [DOI: 10.3390/rs6053822]
- Morland J C, Grimes D I F and Hewison T J. 2001. Satellite observations of the microwave emissivity of a semi-arid land surface. *Remote Sensing of Environment*, 77(2): 149-164 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00202-4]
- Neteler M. 2010. Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data. *Remote Sensing*, 2(1): 333-351 [DOI: 10.3390/rs1020333]
- Njoku E G and Li L. 1999. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6-18 GHz. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1): 79-93 [DOI: 10.1109/36.739125]
- Østby T I, Schuler T V and Westermann S. 2014. Severe cloud contamination of MODIS Land Surface Temperatures over an Arctic ice cap, Svalbard. *Remote Sensing of Environment*, 142: 95-102 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.005]
- Owe M and Van De Griend A A. 2001. On the relationship between thermodynamic surface temperature and high-frequency (37 GHz) vertically polarized brightness temperature under semi-arid conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 22(17): 3521-3532 [DOI: 10.1080/01431160110063788]
- Pan G D, Wang C, Zhang W G, Wang H M and Tian G L. 2003. Analysis of seasonal change of land cover characteristics with SSM/I Data in China. *Journal of Remote Sensing*, 7(6): 498-503 (潘广东, 王超, 张卫国, 王红梅, 田国良. 2003. SSM/I 微波辐射计数据中国陆地覆盖特征季节变化分析. *遥感学报*, 7(6): 498-503)
- Parinussa R M, de Jeu R A M, Holmes T R H and Walker J P. 2008. Comparison of microwave and infrared land surface temperature products over the NAFE'06 research sites. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(4): 783-787 [DOI: 10.1109/LGRS.2008.2005738]
- Prigent C, Jimenez C and Aires F. 2016. Toward "all weather," long record, and real-time land surface temperature retrievals from microwave satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(10): 5699-5717 [DOI: 10.1002/2015JD024402]
- Prigent C, Rossow W B, Matthews E and Marticorena B. 1999. Microwave radiometric signatures of different surface types in deserts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D10): 12147-12158 [DOI: 10.1029/1999JD900153]
- Qin Z H, Dall'Olmo G, Karnieli A and Berliner P. 2001. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D19): 22655-22670 [DOI: 10.1029/2000JD900452]
- Qu Y Q, Zhu Z L, Montzka C, Chai L N, Liu S M, Ge Y, Liu J, Lu Z, He X L, Zheng J and Han T. 2021. Inter-comparison of several soil moisture downscaling methods over the Qinghai-Tibet Pla-

- teau, China. *Journal of Hydrology*, 592: 125616 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125616]
- Quan J L, Chen Y H, Zhan W F, Wang J F, Voogt J and Wang M J. 2014. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model. *Remote Sensing of Environment*, 149: 33-46 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.037]
- Quan J L, Zhan W F, Ma T, Du Y Y, Guo Z and Qin B Y. 2018. An integrated model for generating hourly Landsat-like land surface temperatures over heterogeneous landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 206: 403-423 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.003]
- Royer A and Poirier S. 2010. Surface temperature spatial and temporal variations in North America from homogenized satellite SMMR-SSM/I microwave measurements and reanalysis for 1979-2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D8): D08110 [DOI: 10.1029/2009JD012760]
- Scharlemann J P W, Benz D, Hay S I, Purse B V, Tatem A J, Wint G R W and Rogers D J. 2008. Global data for ecology and epidemiology: a novel algorithm for temporal Fourier processing MODIS data. *PLoS One*, 3(1): e1408 [DOI: 10.1371/journal.pone.0001408]
- Schollaert Uz S, Ruane A C, Duncan B N, Tucker C J, Huffman G J, Mladenova I E, Osmanoglu B, Holmes T R H, McNally A, Peters-Lidard C, Bolten J D, Das N, Rodell M, McCartney S, Anderson M C and Doorn B. 2019. Earth observations and integrative models in support of food and water security. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 2(1): 18-38 [DOI: 10.1007/s41976-019-0008-6]
- Semmens K A, Anderson M C, Kustas W P, Gao F, Alfieri J G, McKee L, Prueger J H, Hain C R, Cammalleri C, Yang Y, Xia T, Sanchez L, Mar Alsina M and Vélez M. 2016. Monitoring daily evapotranspiration over two California vineyards using Landsat 8 in a multi-sensor data fusion approach. *Remote Sensing of Environment*, 185: 155-170 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.025]
- Sheffield J, Wood E F, Pan M, Beck H, Coccia G, Serrat-Capdevila A and Verbist K. 2018. Satellite remote sensing for water resources management: potential for supporting sustainable development in data-poor regions. *Water Resources Research*, 54(12): 9724-9758 [DOI: 10.1029/2017WR022437]
- Shen H F, Huang L W, Zhang L P, Wu P H and Zeng C. 2016. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: a 26-year case study of the city of Wuhan in China. *Remote Sensing of Environment*, 172: 109-125 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.005]
- Shwetha H R and Kumar D N. 2016. Prediction of high spatio-temporal resolution land surface temperature under cloudy conditions using microwave vegetation index and ANN. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117: 40-55 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.011]
- Sobrinho J A, Jiménez-Muñoz J C, Sòria G, Ruescas A B, Danne O, Brockmann C, Ghent D, Remedios J, North P, Merchant C, Berger M, Mathieu P P and Göttsche F M. 2016. Synergistic use of MERIS and AATSR as a proxy for estimating Land Surface Temperature from Sentinel-3 data. *Remote Sensing of Environment*, 179: 149-161 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.035]
- Song L S, Liu S M, Kustas W P, Nieto H, Sun L, Xu Z W, Skaggs T H, Yang Y, Ma M G, Xu T R, Tang X G and Li Q P. 2018. Monitoring and validating spatially and temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale. *Remote Sensing of Environment*, 219: 72-88 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.002]
- Sruthi S and Aslam M A M. 2015. Agricultural drought analysis using the NDVI and Land surface temperature data; a case study of raichur district. *Aquatic Procedia*, 4: 1258-1264
- Stull R B. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/978-94-009-3027-8]
- Sun L, Anderson M C, Gao F, Hain C, Alfieri J G, Sharifi A, McCarty G W, Yang Y, Yang Y, Kustas W P and McKee L. 2017a. Investigating water use over the Choptank River Watershed using a multisatellite data fusion approach. *Water Resources Research*, 53(7): 5298-5319 [DOI: 10.1002/2017WR020700]
- Sun L, Chen Z X, Gao F, Anderson M, Song L S, Wang L M, Hu B and Yang Y. 2017b. Reconstructing daily clear-sky land surface temperature for cloudy regions from MODIS data. *Computers and Geosciences*, 105: 10-20 [DOI: 10.1016/j.cageo.2017.04.007]
- Tagesson T, Horion S, Nieto H, Zaldo Fornies V, Mendiguren González G, Bulgin C E, Ghent D and Fensholt R. 2018. Disaggregation of SMOS soil moisture over West Africa using the Temperature and Vegetation Dryness Index based on SEVIRI land surface parameters. *Remote Sensing of Environment*, 206: 424-441 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.036]
- Tang W B, Xue D J, Long Z Y, Zhang X D and Zhou J. 2021. Near-real-time estimation of 1-km all-weather land surface temperature by integrating satellite passive microwave and thermal infrared observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 7001305 [DOI: 10.1109/LGRS.2021.3067908]
- Tomlinson C J, Chapman L, Thornes J E and Baker C. 2011. Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review. *Meteorological Applications*, 18(3): 296-306 [DOI: 10.1002/met.287]
- Trigo I F, Monteiro I T, Olesen F and Kabsch E. 2008. An assessment of remotely sensed land surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D17): D17108 [DOI: 10.1029/2008JD010035]
- Udahemuka G, Van den Bergh F, Van Wyk B J and Van Wyk M A. 2008. Robust fitting of diurnal brightness temperature cycles: pattern recognition special edition. *South African Computer Journal*, 2008(40): 31-36
- Voogt J A and Oke T R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 370-384 [doi: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8]
- Wan Z M. 2008. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 59-74 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.026]
- Wan Z M. 2014. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140: 36-45 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.027]

- Wan Z M and Dozier J. 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 892-905 [DOI: 10.1109/36.508406]
- Wang K C and Liang S L. 2009. Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term surface Longwave radiation observations at SURFRAD sites. *Remote Sensing of Environment*, 113(7): 1556-1565 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.03.009]
- Wang S F, Zhou J, Lei T J, Wu H, Zhang X D, Ma J and Zhong H L. 2020. Estimating land surface temperature from satellite passive microwave observations with the traditional neural network, deep belief network, and convolutional neural network. *Remote Sensing*, 12(17): 2691 [DOI: 10.3390/rs12172691]
- Weiss D J, Atkinson P M, Bhatt S, Mappin B, Hay S I and Gething P W. 2014. An effective approach for gap-filling continental scale remotely sensed time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 98: 106-118 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.10.001]
- Weng Q H and Fu P. 2014. Modeling annual parameters of clear-sky land surface temperature variations and evaluating the impact of cloud cover using time series of Landsat TIR data. *Remote Sensing of Environment*, 140: 267-278 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.09.002]
- Wentz F J, Gentemann C, Smith D and Chelton D. 2000. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds. *Science*, 288(5467): 847-850 [DOI: 10.1126/science.288.5467.847]
- Wilson A M and Jetz W. 2016. Remotely sensed high-resolution global cloud dynamics for predicting ecosystem and biodiversity distributions. *PLoS Biology*, 14(3): e1002415 [DOI: 10.1371/journal.pbio.1002415]
- Wu P H, Shen H F, Zhang L P and Göttsche F M. 2015. Integrated fusion of multi-scale polar-orbiting and geostationary satellite observations for the mapping of high spatial and temporal resolution land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 156: 169-181 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.013]
- Wu P H, Yin Z X, Zeng C, Duan S B, Göttsche F M, Ma X S, Li X H, Yang H and Shen H. 2021. Spatially continuous and high-resolution land surface temperature product generation: a review of reconstruction and spatiotemporal fusion techniques. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(3): 112-137 [DOI: 10.1109/MGRS.2021.3050782]
- Xia H P, Chen Y H, Li Y and Quan J L. 2019. Combining kernel-driven and fusion-based methods to generate daily high-spatial-resolution land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 224: 259-274 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.006]
- Xu S and Cheng J. 2021. A new land surface temperature fusion strategy based on cumulative distribution function matching and multiresolution Kalman filtering. *Remote Sensing of Environment*, 254: 112256 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112256]
- Xu S, Cheng J and Zhang Q. 2019. Reconstructing all-weather land surface temperature using the Bayesian Maximum entropy method over the Tibetan Plateau and Heihe River Basin. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(9): 3307-3316 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2921924]
- Yang G, Sun W W, Shen H F, Meng X C and Li J L. 2019. An integrated method for reconstructing daily MODIS land surface temperature data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(3): 1026-1040 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2896455]
- Yoo C, Im J, Cho D, Yokoya N, Xia J S and Bechtel B. 2020. Estimation of all-weather 1 km MODIS Land surface temperature for humid summer days. *Remote Sensing*, 12(9): 1398 [DOI: 10.3390/rs12091398]
- Yu Y Y, Privette J L and Pinheiro A C. 2008. Evaluation of split-window land surface temperature algorithms for generating climate data records. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(1): 179-192 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.909097]
- Zeng C, Shen H F, Zhong M L, Zhang L P and Wu P H. 2015. Reconstructing MODIS LST based on multitemporal classification and robust regression. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3): 512-516 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2348651]
- Zhan W F, Zhou J, Ju W M, Li M C, Sandholt I, Voogt J and Yu C. 2014. Remotely sensed soil temperatures beneath snow-free skin-surface using thermal observations from tandem polar-orbiting satellites: an analytical three-time-scale model. *Remote Sensing of Environment*, 143: 1-14 [DOI: 10.1016/J.RSE.2013.12.004]
- Zhang A Z and Jia G S. 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 134: 12-23 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.023]
- Zhang C J, Long D, Zhang Y C, Anderson M C, Kustas W P and Yang Y. 2021a. A decadal (2008-2017) daily evapotranspiration data set of 1 km spatial resolution and spatial completeness across the North China Plain using TSEB and data fusion. *Remote Sensing of Environment*, 262: 112519 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112519]
- Zhang G L, Xiao X M, Dong J W, Kou W L, Jin C, Qin Y W, Zhou Y T, Wang J, Menarguez M A and Biradar C. 2015. Mapping paddy rice planting areas through time series analysis of MODIS land surface temperature and vegetation index data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 106: 157-171 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.05.011]
- Zhang L F, Jiao W Z, Zhang H M, Huang C P and Tong Q X. 2017. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 190: 96-106 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.010]
- Zhang X D. 2020. Estimation of All-weather Land Surface Temperature from Multi-source Satellite Remote Sensing Observations. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (张晓东. 2020. 多源遥感协同下的全天候地表温度估算研究. 成都: 电子科技大学) [DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2020.004684]
- Zhang X D, Zhou J, Göttsche F M, Zhan W F, Liu S M and Cao R Y. 2019. 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. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(7): 4670-4691 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2892417]
- Zhang X D, Zhou J, Liang S L, Chai L N, Wang D D and Liu J. 2020. Estimation of 1-km all-weather remotely sensed land surface temperature based on reconstructed spatial-seamless satellite passive microwave brightness temperature and thermal infrared data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167: 321-344 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.07.014]
- Zhang X D, Zhou J, Liang S L and Wang D D. 2021b. A practical re-analysis data and thermal infrared remote sensing data merging (RTM) method for reconstruction of a 1-km all-weather land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112437 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112437]
- Zhao T J, Zhang L X, Shi J C and Jiang L M. 2011. A physically based statistical methodology for surface soil moisture retrieval in the Tibet Plateau using microwave vegetation indices. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D8) [DOI: 10.1029/2010JD015229]
- Zhao W and Duan S B. 2020. Reconstruction of daytime land surface temperatures under cloud-covered conditions using integrated MODIS/Terra land products and MSG geostationary satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111931 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111931]
- Zhou F C, Song X N and Li Z L. 2014. Progress of land surface temperature retrieval based on passive microwave remote sensing. *Remote Sensing for Land and Resources*, 26(1): 1-7 (周芳成, 宋小宁, 李召良. 2014. 地表温度的被动微波遥感反演研究进展. *国土资源遥感*, 26(1): 1-7)
- Zhou J, Chen Y H, Zhang X and Zhan W F. 2013. Modelling the diurnal variations of urban heat islands with multi-source satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(21): 7568-7588 [DOI: 10.1080/01431161.2013.821576]
- Zhou J, Dai F N, Zhang X D, Zhao S J and Li M S. 2015. Developing a temporally land cover-based look-up table (TL-LUT) method for estimating land surface temperature based on AMSR-E data over the Chinese landmass. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34: 35-50 [DOI: 10.1016/j.jag.2014.07.001]
- Zhou J, Liang S L, Cheng J, Wang Y J and Ma J. 2019. The GLASS land surface temperature product. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(2): 493-507 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2870130]
- Zhou J, Zhang X D, Zhan W F, Gottsche F M, Liu S M, Olesen F S, Hu W X and Dai F N. 2017a. A thermal sampling depth correction method for land surface temperature estimation from satellite passive microwave observation over Barren Land. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(8): 4743-4756 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2698828]
- Zhou L M, Tian Y H, Baidya Roy S, Thorncroft C, Bosart L F and Hu Y L. 2012. Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change*, 2(7): 539-543 [DOI: 10.1038/nclimate1505]
- Zhou W, Peng B and Shi J C. 2017b. Reconstructing spatial – temporal continuous MODIS land surface temperature using the DINEOF method. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4): 046016 [DOI: 10.1117/1.jrs.11.046016]
- Zhu X L, Chen J, Gao F, Chen X H and Masek J G. 2010. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2610-2623 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.032]
- Zhu X L, Helmer E H, Gao F, Liu D S, Chen J and Lefsky M A. 2016. A flexible spatiotemporal method for fusing satellite images with different resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 172: 165-177 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.016]

Estimation of all-weather land surface temperature with remote sensing: Progress and challenges

DING Lirong¹, ZHOU Ji^{1,2}, ZHANG Xiaodong^{3,4}, WANG Shaofei¹, TANG Wenbin⁵,
WANG Ziwei¹, MA Jin¹, AI Lijiao⁶, LI Mingsong¹, WANG Wei¹

1. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. The Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou 313001, China;
3. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;
4. Shanghai Spaceflight Institute of TT and C and Telecommunication, Shanghai 201109, China;
5. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
6. Chongqing Landscape and Gardening Research Institute, Chongqing 401329

Abstract: Land Surface Temperature (LST) is an important parameter for characterizing the surface – air exchange process, which plays an important role in climate change, ecological monitoring, hydrological simulation, and other studies. The traditional LST estimated from Thermal Infrared (TIR) remote sensing is mature in terms of retrieval methods, data production, and quality control. However, the TIR LST has considerable missing data under clouds because of the limitation that the TIR radiation from the ground surface cannot penetrate the

clouds. In addition, Passive Microwave (PMW) remote sensing has disadvantages, such as strip gaps and coarse spatial resolution, because of the limitations of the physical mechanisms and imaging methods. Therefore, the all-weather LST unaffected by cloudiness must be obtained to support the subsequent studies. In the present study, we review and organize the basic principles and methods of the acquisition of all-weather LST. The methods are classified into two categories: (i) all-weather LST reconstruction from effective observation and (ii) multisource data integration.

The comparative analysis indicates that multisource data integration can combine the advantages of TIR, PMW, and reanalysis data. Thus, it has the highest research value and potential for further research. Multisource data integration can be employed to obtain global long-time all-weather LST products characterized by spatial and temporal continuity. The LST retrieved from PMW remote sensing suffers from coarse spatial resolution and strip gaps. However, it is still an effective method of obtaining land surface information under clouds and an important input parameter for multisource data integration. The reconstructions of all-weather LST based on effective observation only apply to small areas with cloud cover in short periods. They are not practicable for long-term cloudy areas.

From the analysis and conclusion, this study also collects and analyzes information about five currently released all-weather surface temperature products. The advantages and disadvantages of the existing products are also summarized. A global all-weather LST product with high quality and spatial resolution is urgently needed by the scientific community. After reviewing the all-weather LST products, we further summarize the applications of all-weather LST. Its applications are still in their infancy. Research on the applications of all-weather LST is relatively small in the current stage. However, all-weather LST has great potential for applications when its products further mature.

Finally, further study directions and theoretical development of all-weather LST are discussed and prospected. First, with PMW LST as the basis for all-weather LST, two issues must be addressed: (i) filling the PMW LST strip gap to make the PMW surface temperature a complete spatial coverage; (ii) correcting thermal sampling depth to make that PMW LST obtain the same physical meaning as TIR LST. The reason is that the inconsistent observation caused by the varying thermal sampling depth is the actual reason for the inconsistent physical meaning of PMW and TIR observation information. Second, we should further strengthen the study on estimating all-weather LST from multisource data. The current study of multisource data integration is still in the preliminary stage, and no systematic and effective integration strategy has been developed. Third, the scientific community should enhance the production, publication, and application of all-weather LST products. Few all-weather LST products can be directly applied by users. Generating all-weather LST products with global spatial and temporal continuity and high spatial resolution should be the task of an all-weather LST study. Besides improving the data quality and reliability of all-weather LST, focusing on the operability and cost of the method in practical applications is necessary to make the all-weather LST usable data, thereby truly promoting the progress of the related studies.

Key words: remote sensing, all-weather land surface temperature, reconstruction, interpolation, multi-source data integration

Supported by Special Projects of National Key Research and Development Program (No.2017YFB0503903); National Natural Science Foundation of China (No.41871241)