

王圆圆, 闵文彬. 西藏林芝地区混合像元 MODIS 地表温度产品验证. 应用气象学报, 2014, 25(6): 722-730.

西藏林芝地区混合像元 MODIS 地表温度产品验证

王圆圆¹⁾* 闵文彬²⁾

¹⁾(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 国家卫星气象中心, 北京 100081)

²⁾(中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071)

摘 要

西藏林芝地区地形复杂、土地覆盖类型多样, MODIS 地表温度(land surface temperature, LST)产品验证面临处理混合像元的难题, 为获得与像元尺度(1 km)相匹配的地表温度数据, 该文提出采用多点同时观测结合面积加权的方法, 将该方法应用于验证林芝地区 2013 年 6 月 10 日夜间晴空 MODIS/LST 产品。结果显示: 单点观测对像元的代表性不足, 容易低估产品精度(10 个样本均方根误差为 2.2 K), 面积加权法可获得综合性更好的地面 LST 信息, 对 MODIS/LST 产品的精度给出更高的评价(30 个样本均方根误差为 1.40 K)。对于地表类型混杂程度高且地势较为平坦的像元, 面积加权法的优势更为明显, 可将卫星 LST 产品与地面 LST 之间的差异由 3 K 降至 1 K 以内。

关键词: MODIS/LST; 验证; 混合像元; 林芝地区

引 言

地表温度(land surface temperature, LST)是地表辐射平衡、地表-大气能量传输中一个重要参数^[1-2]。遥感卫星通过探测热红外信号, 结合反演算法, 可以周期性、重复性地获取全球区域 LST 信息。在众多 LST 产品中, MODIS/LST 产品因为获取免费、使用方便、时空分辨率多样、时间序列长等优势, 深受研究人员的青睐, 其产品现已在干旱监测、蒸散估算、城市热岛、森林火灾、气候变化等领域中有着广泛而深入的应用^[3-9]。

为了保证遥感产品的准确应用, 质量检验非常关键^[1]。但地表温度在时空上变化迅速的特点使得公里级 LST 产品的验证存在很大不确定性。以往的验证工作多选择平坦、均匀的下垫面^[1, 10-12], 在此条件下, 点状测量结果对像元尺度的代表性较好, 但地表并不总是均匀的, 在复杂下垫面条件下开展 LST 验证工作也十分必要。

如果是针对地表覆盖类型多样、地形起伏的复杂下垫面开展 MODIS/LST 产品验证, 通常需要借助高空间分辨率热红外传感器数据(如 ASTER,

TM 等), 将实地获取的单点观测扩展到区域上^[13-14]。然而此类卫星的回归周期较长, 对于云雨天气多的地区, 晴空数据很难获取, 限制了该方法在实际中的应用。近期有学者尝试采用陆表模型的方法^[15], 首先利用气象站点位置的 MODIS/LST 时间序列来优化陆表模型参数, 而后结合 250 m 分辨率的植被指数(MODIS/NDVI)和气象数据, 用优化后的陆表模型推算站点周围区域 LST。虽然该方法物理意义明确, 无需依赖其他高空间分辨率传感器数据, 但计算复杂, 难以推广。

综上所述, 混合像元的 LST 验证很重要, 但可用方法不多。本文设计了多点同时采样结合面积加权方法, 该方法的思路是在研究区内的几种典型下垫面上同时采集观测数据, 然后根据混合像元内每种典型下垫面所占面积比例加权求和, 推算出可以与像元尺度相匹配的地面 LST 信息。在西藏林芝地区的 MODIS/LST 产品验证中, 面积加权法简单易行, 效果令人满意。

1 MODIS/LST 产品介绍

MODIS 传感器搭载于两个极轨卫星平台上:

2014-04-24 收到, 2014-09-09 收到再改稿。

资助项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206041), 国家自然科学基金项目(41301461)

* email: wangyuany@cma.gov.cn

Terra 卫星和 Aqua 卫星。Terra 卫星于 1999 年 12 月 8 日发射,大约在当地时间白天 10:30 和夜间 22:30 过境,Aqua 卫星于 2002 年 5 月 4 日发射,大约在当地时间白天 13:30 和夜间 01:30 过境。MODIS 传感器具有 36 个通道(0.4~14.4 μm),3 种分辨率(250 m,500 m,1000 m)。利用 MODIS 数据可以获取多种不同时空分辨率的陆地产品,地表温度系列产品则是其中一个。

MODIS/LST 产品反演基于分裂窗算法^[16-17]。该算法无需知道大气的温湿廓线,利用相邻两个通道辐射亮温(第 31 通道,10.8~11.3 μm ;第 32 通道,11.8~12.3 μm)的线性组合来消除大气的影响。分裂窗算法首先在海温反演中得到广泛应用,后被用于地表温度反演,但由于地表不能近似为黑体,发射率的估算影响 LST 的反演精度。MODIS 的发射率估算方法,是根据地表覆盖及其季节变化特征,将陆表分成 14 种发射率类型^[18],针对每种类型,利用核驱动模型模拟热红外波段的双向反射率(BRDF, bi-directional reflection distribution functions),而后通过积分获取半球方向反射率 $\rho(\theta)$,由于发射率和反射率互补,因此发射率可以通过 $1 - \rho(\theta)$ 计算得到,详细说明见文献^[18]。

MODIS 提供多种时空分辨率的 LST 产品,本文利用的是空间分辨率为 1 km 的日产品,包括 Terra 卫星获取的 MOD11A1 产品和 Aqua 卫星获取的 MYD11A1 产品,如果卫星过境时为晴空状态,1 天之内可以有 4 次 LST 观测值(大约为当地时间 10:30,13:30,22:30,01:30),但在日产品中,云遮挡情况非常普遍,易造成 LST 数据缺失。MODIS/LST 日产品中,除了日、夜两次 LST 数据,还有观测时间、观测角度、发射率、晴空比例、产品质量标识等信息。

很多学者验证了 MODIS/LST 产品,概括地讲,产品精度受地表类型、水汽含量、观测角度、薄云等因素的影响。Wan 等^[10]根据 20 个晴空条件下的实地观测,得出在 263~322 K 的变化范围内,MODIS/LST 产品误差小于 1 K;在半干旱和干旱地区,由于 MODIS 采用的算法易高估地表发射率,导致 LST 小于实际观测值^[10,19]。Coll 等^[11]在均匀的稻田里进行多点观测,发现在无云和观测天顶角小于 60° 的前提下,MODIS/LST 平均偏差为 $0.1 \pm$

0.6 K,但当 31 通道和 32 通道亮温差很大时,由于算法对水汽吸收校正不足,MODIS/LST 精度偏低。Wang 等^[1]利用 8 个站点的长时期夜间 LST 观测数据对 MODIS 产品进行验证,发现在某些站点,MODIS/LST 可能出现 2~3 K 的低估,而在其他一些站点,绝对偏差不超过 0.8 K,LST 误差与观测角度有关,与气温、湿度、风速、土壤湿度等因素无明显相关。Wang 等^[12]利用 2000—2007 年 SURFRAD 站点地表的长波辐射观测资料,验证了夜间 Aqua MODIS/LST 产品,发现其平均偏差为 -0.2 K,地表的均匀程度以及辐射观测资料的准确性会影响验证结果。已有的验证工作绝大多数在地形平坦、均一的下垫面上开展,在复杂下垫面上的验证工作的报道还十分少见。

2 研究区、数据及方法简介

2.1 研究区及数据

本文研究区是西藏林芝,该地区位于青藏高原东南缘,是南亚气候系统与青藏高原相互作用的关键区,是青藏高原转运水汽的主要区域^[20]。该地区地形起伏大,天气气候复杂,受到气候恶劣、维持条件差等因素的影响,气象站点稀少。此外,林芝地区地表覆盖类型多样,混合像元非常普遍,且混杂程度高。受湿度大、云量多的影响,晴空状态下的高空间分辨率热红外数据少见。至目前为止,还未见到有学者在该区域开展 MODIS/LST 产品的验证工作的报道。如果 LST 产品在该区域质量较好,可部分弥补站点稀少的缺陷,具有重要的应用价值。

2013 年 5 月 20 日—7 月 9 日来自中国科学院大气物理研究所、成都高原气象研究所的研究人员在西藏林芝雅江两侧设立 5 个站点开展观测试验,主要目的是研究藏东南地区复杂下垫面上的地气交换过程,获得该地区地气水热交换参数。观测内容包括四分量辐射(观测仪器为 HUKSEFLUX NR01)、常规气象变量、涡度相关仪测得的感热、潜热等。站点的属性、位置以及下垫面状况见图 1 和表 1 所示。图 1 显示了研究区两景不同季节的假彩色合成图(30 m 分辨率),白色网格是 MODIS/LST 产品像元(1 km 分辨率),可以看出,观测站点虽然彼此相距较近,但仍位于不同的网格内,每个网格内

部,下垫面情况非常复杂,单点的测量结果很难代表像元的总体情况。

2.2 方法

2.2.1 土地覆盖分类

研究区主要有6种土地覆盖类型:草地、农田、河滩、水体、阴坡林地、阳坡林地。用于分类的数据是两景30 m分辨率的遥感数据(图1),是近年来由陆地卫星获取的研究区仅有的两幅晴空遥感图像,分别为2013年8月的陆地成像仪(operational land imager,OLI)数据和2010年3月的专题制图仪

(thematic mapper, TM)数据。通过目视解译,结合Google Earth,从图像中为每种覆盖类型选择具有代表性的训练样本,而后利用最大似然法^[21],得出土地覆盖分类图。阴坡林地和阳坡林地的识别分成两步,首先是用最大似然法将林地与其他覆盖类型区分开,而后利用了ASTER DEM(30 m分辨率)的坡向信息,将林地分成阴坡和阳坡两种,坡向在 $135^{\circ}\sim 315^{\circ}$ 之间的为阳坡(坡向定义北方为 0° ,顺时针增加),其他为阴坡。

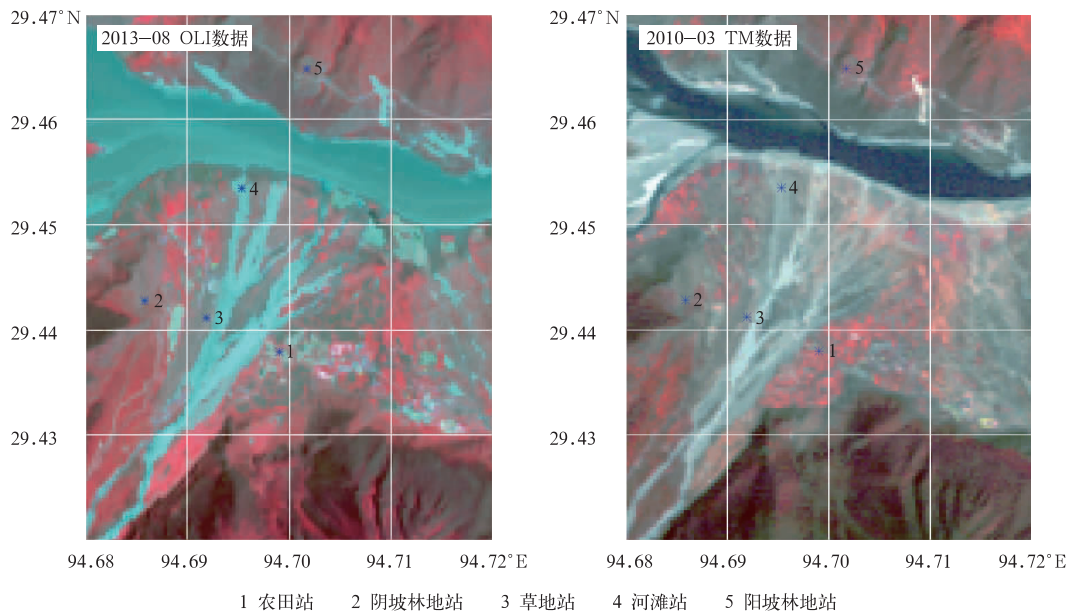


图1 研究区30 m分辨率假彩色图像

(研究区面积约 20 km^2 ,蓝色星状标识为观测站点,数字为站点编号,白色网格为1 km MODIS网格位置)

Fig. 1 The false color composite image of the study region

(with an area of 20 km^2 , blue stars denote field experiment stations,

numbers denote corresponding stations, white box denotes the MODIS pixel of 1 km)

表1 观测站点信息汇总

Table 1 Information summary of observation stations

站点信息	农田站点	阴坡林地站点	草地站点	河滩站点	阳坡林地站点
纬度	29.4459°N	29.4502°N	29.4487°N	29.4589°N	29.4685°N
经度	94.6980°E	94.6859°E	94.6914°E	94.6947°E	94.7006°E
高程/m	2939	3022	2965	2904	3166
坡度/(°)	16.9	21.7	2.5	15.5	32.7
坡向/(°)	356.5	105.5	343.7	235.8	212
辐射计距地面距离	距农田地面 1.7 m	距冠层 1.5 m	距地面 1.5 m	距地面 1.6 m	距离冠层 1.2 m

2.2.2 面积加权法估算地面 LST

根据卫星过境时间,确定地面站点观测的上行、

下行长波辐射值,而后利用像元内每种土地覆盖所占面积比例信息,通过面积加权方式获取观测站点

所在 1 km 像元上的上行、下行长波辐射,

$$L_{\uparrow} = \sum_{i=1}^5 c_i \times L_{\uparrow}^i, \quad (1)$$

$$L_{\downarrow} = \sum_{i=1}^5 c_i \times L_{\downarrow}^i. \quad (2)$$

其中, c_i 为 1 km 像元内土地覆盖类型 i 所占面积比例, L_{\uparrow}^i 和 L_{\downarrow}^i 分别为在土地覆盖类型 i 上观测站点测量的地表上行、下行长波辐射。 L_{\uparrow} 和 L_{\downarrow} 为面积加权后 1 km 像元尺度上的上行、下行长波辐射。利用 Stefan-Boltzmann 规律, 可以从长波观测中推算 1 km 像元尺度上的地表温度 T_s [12]。

$$L_{\uparrow} = \epsilon_b \times \sigma \times T_s^4 + (1 - \epsilon_b) \times L_{\downarrow}, \quad (3)$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{L_{\uparrow} - (1 - \epsilon_b) \times L_{\downarrow}}{\epsilon_b \times \sigma}}. \quad (4)$$

其中, σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, 取值为 $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, ϵ_b 是宽波段发射率。由于站点没有实测的宽波段发射率, 本文提取了 MODIS/LST 产品中反演的 31 通道和 32 通道的发射率, 采用式(5) [22], 获取宽通道发射率 ϵ_b ,

$$\epsilon_b = \epsilon_{31} \times 0.4587 + \epsilon_{32} \times 0.5414. \quad (5)$$

式(5)是首先利用红外发射率数据库和 MODIS 的光谱响应函数模拟通道发射率数据、而后回归计算得出的经验公式。宽通道发射率考虑了发射率随波段的变化, 在用于能量估算或地表温度计算时, 比单通道发射率效果更好 [23]。

3 结果分析

3.1 土地覆盖分类

图 2 显示了研究区 30 m 分辨率土地覆盖分类图, 经过目视检查, 分类效果较为理想。表 2 给出了研究区内各种覆盖所占面积比例, 可以看出, 虽然草地和阴坡森林的比例偏高, 但没有任何一种类型的比例占绝对优势, 说明地表类型具有很高的多样性。表 3 显示了每个观测站点所在 1 km 像元内的各种

土地覆盖类型比例, 除阳坡森林站点外, 其他站点所在 1 km 像元的内部结构都非常复杂, 尤其是农田站所在的 1 km 像元内包含了农田、河滩、林地、草地等多种类型。除了土地覆盖类型混杂, 像元内的地形变化也很明显, 可以从表 4 中给出的地形起伏度和坡度标准差两个变量(由 30 m 分辨率的 ASTER DEM 数据计算得出)的统计结果看出。

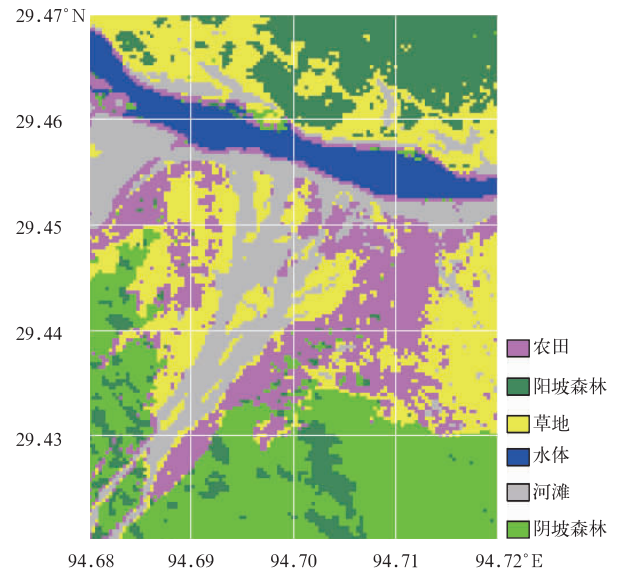


图 2 基于 30 m 分辨率 TM 数据获取的研究区土地覆盖分类

Fig. 2 Land cover classification map derived from TM image with 30 m spatial resolution

表 2 研究区内(面积约 20 km²)各种土地覆盖类型所占面积比例

Table 2 Fraction occupied by each land cover type in the study region (with an area of 20 km²)

土地覆盖类型	比例/%
农田	17.73
阴坡森林	21.91
草地	24.35
河滩	15.21
水体	6.21
阳坡森林	14.58

表 3 每个站点所在的 1 km 像元内的各种土地覆盖类型所占比例

Table 3 Fraction occupied by each land cover type for the pixel of 1 km where the observation station locates

土地覆盖类型	农田覆盖	阴坡森林覆盖	草地覆盖	河滩覆盖	阳坡森林覆盖	水体覆盖
	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%
农田站点像元	35.27	16.34	13.55	32.69	2.15	0
阴坡森林站点像元	21.93	36.67	40.54	0.86	0	0
草地站点像元	10.75	0	36.02	53.12	0.11	0
河滩站点像元	14.95	1.61	25.81	32.04	0	25.59
阳坡森林站点像元	0	0	8.90	3.11	87.99	0

表 4 基于 30 m ASTER 高程数据计算的每个站点所在 1 km 像元范围内的地形起伏度以及坡度标准差

Table 4 Terrain index and standard deviation of slope for the pixel of 1 km with the observation station located

像元类型	地形起伏度/m	坡度标准差/m
农田站点像元	148	7.75
阴坡森林站点像元	209	10.13
草地站点像元	85	4.99
河滩站点像元	118	8.98
阳坡森林站点像元	617	6.64

注:地形起伏度的定义是一定范围内最高海拔和最低海拔之差。

3.2 卫星反演和地面估算 LST 对比

在观测期间仅有 2013 年 6 月 10 日这天晴朗无云。由于白天受到太阳辐射的影响, LST 具有很强的空间异质性, 随时间的变化速度也很快, 而夜间 LST 空间均一性好, 随时间变化缓慢, 更适合产品

的验证^[1,12], 因此本文只针对夜间 LST 进行分析。Terra 卫星 6 月 10 日夜间过境时间为当地时间 22:30(相当于北京时间 6 月 11 日 00:23), Aqua 卫星 6 月 11 日夜间过境时间为当地时间 01:12(相当于北京时间 6 月 11 日 02:53)。

结合长波辐射信息(表 5)和土地覆盖比例信息(表 3), 可以计算混合像元的 LST。表 6 及表 7 显示了两次夜间过境时, 基于面积加权法长波辐射计算的 LST 和基于单点法的长波辐射计算的 LST, 以及 MODIS/LST 产品数值。综合所有样本, 面积加权法得出的均方根误差在 1.5 K 以内, 而单点法的均方根误差却是 2 K 以上, 说明面积加权法的效果好。但对于不同类型的像元, 面积加权法的改善程度明显不同。

表 5 卫星过境时刻站点所测的上行长波辐射和下行长波辐射(单位: $W \cdot m^{-2}$)

Table 5 Upward and downward long wave radiation measurements of each observation station obtained at satellite overpass time(unit: $W \cdot m^{-2}$)

站点类型	Terra 卫星过境时刻		Aqua 卫星过境时刻	
	上行长波辐射	下行长波辐射	上行长波辐射	下行长波辐射
农田站点	338.6	263.8	330.1	261.7
阴坡森林站点	356.2	259.0	345.9	257.0
草地站点	344.8	249.1	336.4	249.1
河滩站点	367.2	248.8	354.9	248.9
阳坡森林站点	355.8	252.2	346.3	255.8

对于地表类型混杂程度高的像元, 面积加权法得出的 LST 和 MODIS/LST 产品更为接近, 以农田站点像元为例, 基于站点辐射测量值计算(单点法)得出的 LST 比 Terra 卫星和 Aqua 卫星的 LST 产品分别偏低 3.40 K 和 3.58 K, 如果采用面积加权法, 与两个产品的差异则缩小到 0.63 K 和 1.07 K, 对于草地站点像元, 效果也是非常显著, 面积加权法将地面和卫星产品的差异从 3.35 K 和 1.98 K 分别减少到 1.07 K 和 0.08 K。

对于阳坡森林站点像元, 面积加权法和单点法的差别很小, 因为像元内地表类型较为单一, 有大约 88% 的面积被阳坡森林类型所覆盖。阳坡森林站点所在的海拔较高(3166 m), 其周围的草地、河滩也都处于海拔较高处, 而草地和河滩的观测站点位于海拔较低处(2900 m), 其测量值对高海拔的地区代表性有限, 故面积加权法未改善阳坡森林站点像元的 LST 计算结果。

对于阴坡森林站点像元, 面积加权法比单点辐

射测量结果略差。与 Terra 卫星、Aqua 卫星两次过境时的 LST 相比, 面积加权法得到 LST 误差为 2.84 K 和 1.57 K, 而由单点法得到 LST 误差为 1.16 K 和 0.08 K。阴坡森林站点的位置比较特殊, 介于林地和草地的交汇处, 故对于两种类型均有一定代表性, 而阴坡森林站点所处 1 km 像元中, 地形起伏大, 坡度变化大(表 4), 面积加权法对此种情况的适应性降低, 造成误差增加。

由表 6 及表 7 还可以看出, Terra 卫星过境时卫星反演 LST 和地表估算 LST 更加接近(Terra 卫星和 Aqua 卫星均方根误差分别为 1.43 K 和 1.48 K), 这与期望略有不符, 因为从观测时间来说, Aqua 卫星更接近于一天气温最低的时刻, 同时也是地面均一性最好的时刻(因为白天太阳辐射的影响已经几乎完全消退)^[12], Aqua 卫星反演 LST 的精度应该更高。造成 Terra 卫星 LST 精度更好的原因可能与观测角度有关, Terra 卫星当天过境时的观测天顶角为 34°, 而 Aqua 卫星当天过境时的天顶角为

63°, 卫星反演 LST 是基于某个观测角度上获取的热红外通道的瞬时辐亮度信息, 而地面推算 LST 用到的是半球方向长波辐射测量值, 由于地面发射率和

辐射具有明显的方向性, 当卫星观测天顶角度越大, 其获取的 LST 与垂直观测时的 LST 差异越大^[11-12]。

表 6 Terra MODIS/LST 与面积加权法和单点法估算地面 LST 对比
Table 6 Comparison of Terra MODIS/LST observations with field LST measurements, including AWA(area-weighted average) method and point-based method

像元类型	LST/K			Terra 卫星 发射率
	面积加权法	单点法	MOD11A1 产品	
农田站点像元	281.01	278.23	281.64	0.9843
阴坡森林站点像元	280.24	281.92	283.08	0.9803
草地站点像元	281.95	279.67	283.02	0.9793
河滩站点像元	284.31	284.31	284.32	0.9733
阳坡森林站点像元	281.74	281.87	282.52	0.9803

注: 河滩 1 km 像元内有约 25.59% 的水体, 因为没有水体上方的辐射观测值, 无法基于面积加权法计算 LST, 故采用单点法计算的 LST 代替。

表 7 Aqua MODIS/LST 与面积加权法和单点法估算地面 LST 对比
Table 7 Comparison of Aqua MODIS/LST observations with field LST measurements, including AWA(area-weighted average) method and point-based method

像元类型	LST/K			Aqua 卫星 发射率
	面积加权法	单点法	MYD11A1 产品	
农田站点像元	278.95	276.44	280.02	0.9851
阴坡森林站点像元	278.35	279.84	279.92	0.9803
草地站点像元	279.84	277.94	279.92	0.9783
河滩站点像元	281.77	281.77	280.78	0.9773
阳坡森林站点像元	279.80	279.93	282.32	0.9803

利用面积加权法也可以计算研究区内其他像元的 LST, 但因为其他像元没有站点实测长波辐射, 因此无法进行面积加权法和单点法的对比。图 3 显示了两次卫星过境时刻面积加权法获得的 LST 和 MODIS/LST 之间的散点图(因为没有水体上方的辐射观测值, 去除了 10 个包含水体的像元, 剩余 30

个)。由图 3 可以看出, 卫星和地面的 LST 有较好的一致性, 除若干像元外, 大部分像元两种 LST 之间的差异均在 2 K 以内, 当综合两次过境时刻的数据, 均方根误差为 1.40 K。与前面针对站点像元的分析结果一致, Terra 卫星过境时刻的 LST 精度略高于 Aqua 卫星过境时刻 LST 的精度, 两者的均方根误差分别为 1.29 K 和 1.49 K。

4 关于混合像元 LST 验证的讨论

混合像元的 LST 产品验证非常困难, 其难点在于获取可以与卫星像元相匹配的地面观测, 本文结果显示, 在缺乏高空间分辨率热红外数据的情况下, 多点同时采样结合面积加权法, 也可以在地面上获取像元尺度的地表温度, 用于遥感产品的验证, 该方法简单易行, 关键在于选择具有代表性的站点和获取准确的地表分类图。对于地表类型混杂程度高的像元, 像元内单点测量结果的代表性差, 面积加权法的优势明显。然而, 如果像元的均一性较高(例如本文的阳坡森林像元), 或者像元内的地形起伏很大且类型多样(如阴坡森林像元), 面积加权法效果有限。

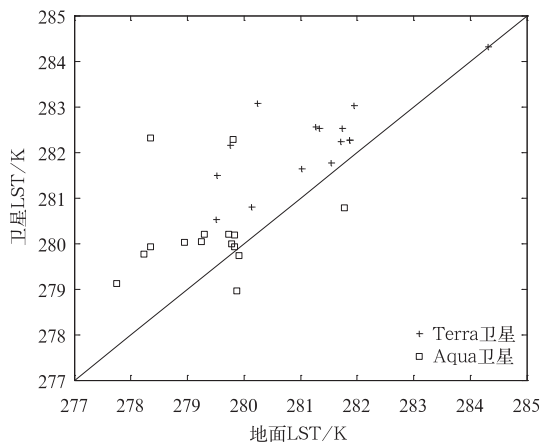


图 3 研究区 MODIS/LST 与面积加权法估算的地面 LST 散点图

Fig. 3 Comparison of MODIS/LST with field LST measurements obtained with AWA method for the study region

为了进一步改善面积加权法,可以考虑引入地形修正方案。研究区地形复杂,即使对于同种土地覆盖类型,若地形特征发生变化,能量平衡过程也会随之改变^[24],而导致单个站点观测值对其他区域的代表性降低。地形影响白天显著,夜间减弱,本文只对夜间 LST 进行了验证,故虽然没考虑地形,但仍获得了较为满意的结果。若是对白天 LST 进行验证,是否进行地形修正将会对结果产生显著影响。如何利用单点观测推算其他地形条件下的观测数据,是一个亟待解决的问题。

LST 产品的误差主要受到薄云、大气水汽含量、地表发射率、观测角度等因素的影响^[1-2],本文选择的观测时间晴朗无云,大气水汽含量不高,因此主要误差来源于地表发射率。本文采用的地表发射率是 MODIS/LST 产品,宽波段发射率 ϵ_b 也是利用文献中的经验公式,更好的办法是实测发射率,或利用波谱库推算宽波段发射率。但由于目前研究区缺乏这样的数据,因此难以实施。为了评估 ϵ_b 对精度的影响,本文根据观测数据进行了敏感性分析,发现在夜间,当上行和下行长波辐射之间的差异较小时, ϵ_b 变化 0.01, LST 大约变化 0.16 K,而 ϵ_b 误差一般不会超过 0.02,说明 LST 对 ϵ_b 的敏感性不高,不会对结果造成很大影响,这与 Wang 等^[12]的结论相近。如果考虑 ϵ_b 误差的影响,面积加权法的均方根误差约为 1.11 ~ 1.80 K。另外,由于面积加权法需要利用多台仪器同时观测,仪器的定标非常重要,如果土地覆盖分类存在较大误差,也会大大降低面积加权法的应用效果。

5 小结

本文根据多站点同时观测地表上行和下行长波辐射,结合面积加权法,对西藏林芝地区夜间 MODIS/LST 产品进行验证。结果表明:

1) 面积加权法是一种简单、实用、可行的 LST 尺度变换方法,可以比单点法更好地代表混合像元的整体状况,单点法对像元的代表性不足,容易低估产品精度(10 个样本均方根误差为 2.2 K),而面积加权法则对 MODIS/LST 产品的精度给出更高的评价(30 个样本均方根误差为 1.40 K)。

2) 对于地表类型混杂程度高的 MODIS 像元,面积加权法的优势更为明显,可将卫星产品与地面观测之间的差异由 3 K 降至 1 K 以内,对于地表较

为均一的 MODIS 像元,两种方法的效果相似。

本文采取的面积加权法仅考虑了地表覆盖的影响,认为同种地表覆盖具有相同的地表辐射参数,为进一步提高面积加权法的应用效果、扩大应用范围,可考虑加入地形修正因素,因为地形也是控制地表能量平衡过程的一个重要因子。本研究结果还显示,西藏林芝地区夜间 MODIS/LST 产品精度较高,考虑到夜间 LST 与气温有很好的相关性^[25],遥感数据可以弥补该区域站点稀少的不足。长时间序列 LST 产品在该区域的气候变化、通量估算等方面具有很大的应用潜力。

参考文献

- [1] Wang W H, Liang S L, Meyers T. Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements. *Remote Sens Environ*, 2008, 112: 623-635.
- [2] 周纪, 李京, 张立新. 针对 MODIS 数据的地表温度反演算法检验——以黑河流域上游为例. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 239-246.
- [3] 王圆圆, 李贵才, 张艳. 利用 MODIS/LST 产品分析基准气候站环境代表性. *应用气象学报*, 2011, 22(2): 214-220.
- [4] Keramitsoglou I, Kiranoudis C T, Ceriola G, et al. Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 3080-3090.
- [5] Mildrexler D J, Zhao M S, Running S W. A global comparison between station air temperature and MODIS land surface temperature reveals the cooling role of forests. *J Geophys Res*, 2011, 116, G03025, doi:10.1029/2010JG001486.
- [6] Wang Y Y, Li X, Tang S H. Validation of the SEBS-derived sensible heat for FY3A/VIRR and TERRA/MODIS over an alpine grass region using LAS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 226-233.
- [7] 申双和, 赵小艳, 杨沈斌, 等. 利用 ASTER 数据分析南京城市地表温度分布. *应用气象学报*, 2009, 20(4): 458-464.
- [8] 石涛, 杨元建, 马菊, 等. 基于 MODIS 的安徽省代表城市热岛效应时空特征. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 484-494.
- [9] 于敏, 程明虎. 基于 NDVI-Ts 特征空间的黑龙江省干旱监测. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 221-228.
- [10] Wan Z, Zhang Y, Zhang Q. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *Inter J Remote Sens*, 2004, 25: 261-274.
- [11] Coll C, Caselles V, Galve J M, et al. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sens Environ*, 2005, 97: 288-300.
- [12] Wang K C, Liang S L. Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term sur-

- face longwave radiation observations at SURFRAD sites. *Remote Sens Environ*, 2009, 113: 1556-1565.
- [13] 高懋芳,覃志豪. 中国 MODIS 地表温度产品验证. 国土资源遥感, 2006(3): 15-18.
- [14] Liu Y B, Hiyama T, Yamaguchi Y. Scaling of land surface temperature using satellite data; A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area. *Remote Sens Environ*, 2006, 105: 115-128.
- [15] Guillevic P C, Privette J L, Coudert B. Land surface temperature product validation using NOAA's surface climate observation networks—Scaling methodology for the Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS). *Remote Sens Environ*, 2012, 124: 282-298.
- [16] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34: 892-905.
- [17] 吴晓,陈维英. 利用 FY-1D 极轨气象卫星分裂窗区通道计算陆表温度. 应用气象学报, 2005, 16(1): 45-53.
- [18] Snyder W, Wan Z, Zhang Y, et al. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 2753-2774.
- [19] Li H, Sun D L, Yu Y Y, et al. Evaluation of the VIIRS and MODIS LST products in an arid area of Northwest China. *Remote Sens Environ*, 2014, 142: 111-121.
- [20] 高登义,邹捍,王维. 雅鲁藏布江水汽通道对降水的影响. 山地学报, 1985, 3(4): 239-249.
- [21] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003: 197-198.
- [22] Jin M L, Liang S L. An improved land surface emissivity parameter for land surface models using global remote sensing observations. *J Climate*, 2006, 19: 2867-2881.
- [23] Wang K C, Wan Z M, Wang P C, et al. Estimation of surface long wave radiation and broadband emissivity using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) land surface temperature/emissivity products. *J Geophys Res*, 2005, 110, D11109, doi:10.1029/2004JD005566.
- [24] 申彦波,张顺谦,郭鹏,等. 四川省太阳能资源气候学计算. 应用气象学报, 2014, 25(4): 493-498.
- [25] Vancutsem C, Ceccato P, Dinku T, et al. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystem over Africa. *Remote Sens Environ*, 2010, 114: 449-465.

MODIS/LST Product Validation for Mixed Pixels at Linzhi of Tibet

Wang Yuanyuan¹⁾ Min Wenbin²⁾

¹⁾ (*Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration (LRCVES/CMA), Beijing 100081*)

²⁾ (*Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610071*)

Abstract

Southeastern part of Tibet is featured with complicated terrain and diverse land cover types. Validation of MODIS/LST product (1-km spatial resolution) in this region is faced with mixed pixel issue. Point-based LST measurements cannot represent the pixel well. To obtain ground LST measurements at pixel scale, traditional method usually depends on the high spatial resolution of thermal images, such as Aster and TM. However, these data are often unavailable due to persistent cloud cover and long repeat cycle. Therefore, a new simple method called area-weighted average (AWA) method is proposed, in which land cover map at high spatial resolution is combined with multi-site field observations to model the hypothetical observations at moderate pixel scale. The assumption of AWA method is that field observations can be shared within the same land cover. The AWA method is applied and analyzed on the case of Linzhi (with an area of 20 km²) which locates in southeastern part of Tibet. First, 5 field stations are set up on 5 typical land covers: Grassland, farmland, floodplain, forest at sunny slope, and forest at shadowy slope. The upward and downward long-wave radiations are measured simultaneously. Then the land cover map at 30 m spatial resolution is derived from TM image using maximum likelihood classification method. For every 1-km MODIS pixel, the fraction of each typical land cover is calculated, and the radiation at MODIS pixel-scale is estimated through area-weighted averaging. The broadband emissivity is calculated using linear combination of narrowband emissivity of MODIS band 31 and 32. Finally, LST at MODIS pixel-scale can be calculated based on Stefan-Boltzmann law. The AWA method is used for validating daily product of MODIS/LST from Terra and Aqua platforms on 10 June 2013 (LST at night is used because it changes slowly both in temporal and spatial domain). Results show that the RMSE of MODIS/LST is below 1.4 K ($n=30$) when applying the AWA method. If a point-based measurement is used to directly represent a MODIS pixel, the RMSE is more than 2.2 K ($n=10$), showing a tendency of over-estimation. The error of Aqua LST is slightly greater than that of Terra LST, probably due to a larger sensor view zenith angle during overpass. Superiority of the AWA method is more noticeable for pixels with high land cover heterogeneity and gentle terrain. The difference in LST between satellite and field observations can be decreased from 3 K to 1 K. However, for pixels with homogeneous land covers or with very tough terrains, the advantage of AWA method is limited. To further improve the AWA method, terrain adjustment should be taken into account when extrapolating point-based measurements to the same land cover but from another region, because the slope and aspect will influence the surface energy balance process even when the land cover stays the same. Results also indicate MODIS/LST data at nighttime in Linzhi Area are accurate, which are very meaningful considering the low density of meteorological stations in this area.

Key words: MODIS/LST; validation; mixed pixel; Linzhi Area