

MODIS 地表温度产品的验证研究

——以黑河流域为例

于文凭^{1,2}, 马明国¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区遥感观测系统试验站, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:分析了影响 MODIS 地表温度产品精度的主要因素, 并对这些因素综合作用下的 MODIS 地表温度产品的精度验证方法进行了回顾和比较。针对 MODIS 地表温度产品在干旱半干旱地区误差偏大的状况, 以黑河流域为例, 对 MODIS 地表温度产品进行了验证。用于验证的地面观测数据包括自动气象站红外辐射温度计数据和长波辐射数据。这里结合具体的地表情况比较了两种验证方法的优劣, 结果表明: 使用长时间的夜间长波辐射数据验证 MODIS 地表温度产品更合理; 黑河流域的 MODIS 地表温度产品的平均绝对偏差小于 2.2°C 。

关键词:地表温度; MODIS; 产品验证; 黑河流域; 干旱区

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)06-0705-08

引用格式: 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.]

1 引言

地表温度 LST(Land Surface Temperature)是地表物理过程的重要影响因素, 是气候和环境研究的关键变量^[1]。Wan 等^[2-3]用广义劈窗算法以及昼/夜算法从 MODIS 数据反演得到多种地表温度产品。这些温度产品主要用于地表热量的空间分析和地表蒸散发、环境质量、地表—大气相互作用、数值模拟以及全球变化分析等方面^[4]。而在实际应用中, 不同的研究范围、领域和目的对地表温度有不同的精度要求, 如在气象、水文和农业研究领域应用中, 要求从空间分辨率为 $1\sim 10\text{ km}$ 卫星观测数据反演的地表温度精度要达到 $0.5\sim 2^{\circ}\text{C}$ ^[5-6]。所以对 MODIS 地表温度产品精细地验证和评价是其有效应用到各个研究领域的前提, 这也使得地表温度产品的验证成为遥感研究中的重要内容。

MODIS 地表温度产品精度主要受传感器本身误差、算法误差以及算法中的参数估计误差 3 种因

素影响^[7-8]。针对这些因素对地表温度反演精度的影响一般会采取相应的质量控制措施: ① 对于传感器本身的误差, 采取发射前进行室内定标, 而为了确定在传感器发射和运行过程中带来的误差, 发射后要选择晴空条件下的湖泊或海洋作为试验场进行再定标^[9-11]; ② 为了确定算法误差的影响, 在算法应用前要进行精度评价, 这是算法应用的前提, 通常采用大气模拟数据法和地表测量数据法^[12-22]; ③ 对算法中的参数估计带来的误差通常采取参数敏感性分析^[23-25]。通过对以上 3 方面影响的评价, 仍然无法确定 MODIS 地表温度产品最终的实际精度, 因此 MODIS 地表温度产品精度的验证依然是其应用之前必不可少的环节。

2 针对 MODIS 地表温度产品的验证

虽然很多学者对不同级别、不同区域的 MODIS 地表温度产品已经给予了验证, 但是其结果并不能

收稿日期: 2011-04-14; 修订日期: 2011-10-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-312), 国家 863 计划项目(2009AA122104), 国家自然科学基金项目(40875006), 国家 973 计划项目“北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响与适应对策”(2010CB951403)资助。

作者简介: 于文凭(1985—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要从事陆面过程遥感研究。E-mail: ywpgis2005@163.com。

直接应用于全球范围,具体的研究应用之前依然要进行产品验证,以确定所应用的产品能够满足精度要求。根据用于验证的数据源不同可以分为:红外辐射温度计观测数据、地面长波辐射观测数据、探空数据、地面气温观测数据以及其他更高分辨率遥感影像同步反演结果。

2.1 红外温度计观测到的地表温度数据验证

直接使用地面红外温度辐射数据与 MODIS 地表温度进行比较,在验证中根据观测区的地表覆盖类型或进行采样测量来修正地表比辐射率,而反射大气辐射的影响则通过大气传输模拟修正。这种验证方法已经被广泛应用于实验场为大面积的湖泊、草地和农田的验证中^[11,26-29]。虽然这种验证方法应用较多,但也存在缺陷:首先红外辐射温度计的观测直径通常小于 5 m,其在阴影区和光照区的温度差值达到 20 K,所以其单点观测的代表性不足;其次单点观测与 MODIS 1 km 像元尺度的地表温度产品在尺度上相差很大,存在混合像元和尺度效应等问题。也有使用多个可移动的红外温度计,布置样方同步测量地表温度进行验证,以弥补单点测量造成的空间尺度差异大的问题^[30]。在验证过程中试验区的选择比较灵活,可以对不同地表覆盖类型进行验证,以获得比较全面的精度评价;而且验证中样方大小可控,能保证验证空间尺度的一致。但这种布设样方验证方法也存在缺陷:一方面验证过程中要花费大量的人力财力,样方越大、格网越细,花费越多。另一方面引入了人为因素,地表温度测量仪器定标和仪器间差异所引起的误差。

2.2 基于同步探空数据的验证

验证基于大气辐射传输模型,需要探空气球测量 MODIS 过境时同步的大气温度和水汽廓线^[28]。它通过大气辐射传输模拟获得不同地表温度下的地表顶辐射,再与对应的 MODIS 传感器的辐射量进行比较来达到验证目的。这种算法不需要实测的地表温度,但需要获得精确的同步大气廓线和水汽廓线,并且需要精确的辐射传输模型,比如 MODTRAN4.0^[31]。实验中,所使用仪器的定标问题也是实验能否成功的关键。

2.3 地面长波辐射观测数据验证

验证中利用地面观测的长波向上辐射和长波向下辐射数据,基于斯特藩—玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律和热辐射传输原理,根据式(1)间接获得地表温度数据^[32-33],然后进行验证。

$$F_u = \delta T_b^4 = (1 - \epsilon)F_d + \epsilon \delta T^4 \quad (1)$$

其中: F_u [W/m^2]表示地表向上的长波辐射, F_d [W/m^2]表示向下的长波辐射, ϵ 为宽波段地表比辐射率; δ 为斯特藩—玻耳兹曼常数($5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$), T_b 表示亮度温度, T 为地表温度。 F_u 和 F_d 可以从地表长波观测中获得。而所需要的宽波段地表比辐射率一般采取 3 种方式获得:① 通过对观测区域进行采样测量获得;② 以地表植被覆盖类型为基础,从基础光谱库中获得^[34];③ 通过昼/夜算法反演的 MODIS 地表温度产品中的 29、31、32 窄波段地表比辐射率获取所需的地表宽波段地表比辐射率^[35-37]。这种验证的数据因地表长波辐射的观测仪器有一个较大的探测面,所以其观测源区比由红外温度计单点观测更加接近 MODIS 数据的像元尺度,与 MODIS 地表温度产品的可比性更强。但使用长波辐射数据进行验证也存在缺陷:首先安装这种仪器的气象站点数量少,数据量受到限制,很难进行大范围的分析验证;其次在验证过程中间接计算地表温度需要已知地表比辐射率,但是很难获得实时的地表比辐射率,一般以地表覆盖类型为基础,使用 ASTER 等光谱库中相应的数据或是根据已有的文献资料给定一个固定值,而在长时间序列验证中,必然会引入误差;再次因辐射计的观测源区大小随着观测高度变化,一般测点在 20 m 左右,这与 MODIS 空间分辨率差别较大,所以这种方法适用于地表覆盖比较一致的地区进行验证。

2.4 基于气象站气温数据验证

在没有安装红外温度测量设备和辐射测量仪器的区域,或无法得到长时间和大范围这两种观测数据时,可以选择气象站的气温数据^[38-40]。根据地表温度和气温统计关系,进行 MODIS 地表温度产品的初步分析验证。如 Dorothy 等^[41]根据站点的气温和地表温度的统计关系,应用格陵兰冰盖上自动气象站的气温数据,对 MODIS 以及其他传感器的地表温度产品的不确定性进行了验证。由于进行气温测量的气象站数量多,所以这种方法数据量能够得到保证,可以进行大范围验证。不足之处是这种验证一般不能定量描述其精度范围,即使给出定量的描述,也只是根据统计关系给出,这就使得此种验证方法只能用于气温与地表温度存在很稳定关系的区域,如地表由冰或雪覆盖的区域。

2.5 高分辨率遥感影像同步反演验证

这种方法采用与 MODIS 同步、具有更高空间分辨率的传感器卫星数据反演的地表温度进行验证,多采用 ASTER 传感器^[7,41-44]。该方法的优势

是:① 高分辨率的红外影像能更准确地探测地表特征,获得更小尺度上的地表温度,可以从尺度方面验证 MODIS 地表温度产品的实用性;② 由于使用的是与 MODIS 卫星搭载在同一平台上的同步卫星,所以可以保证实现验证的同步性;③ 一般这种高分辨率的数据可以获得地表更细致的结构信息,能更好地确定反演参数。不足之处在于:① 一般来说验证过程相对复杂,而且高分辨率影像反演的地表温度的精度要先进行验证,以确定能否用于验证 MODIS 产品;② 高分辨率遥感影像获取困难也是普及这种验证方法的障碍。

以上验证方法各有优势和缺陷,所以在 MODIS 地表温度产品验证中应尽可能根据区域的实际状况,选择适当的验证方法,并尽可能采取措施以减少其不足带来的误差。以下部分选择位于干旱区的黑河流域作为研究区域,展示了使用两种数据源分析和验证 MODIS 地表温度在该区域精度的具体过程。

3 利用黑河流域气象站数据验证 MODIS地表温度产品(MOD11A1)

3.1 数据说明

在中国西北黑河流域,2008 年开展了黑河流域

综合遥感联合实验 WATER(Watershed Allied Telemetry Experimental Research),获取了连续热红外辐射温度计、辐射表和地表同步手持式红外测温仪共 3 种可以用于 MODIS 地表温度产品验证的观测数据^[45]。周纪等^[30]利用手持式红外测温仪的数据验证了其在黑河流域的精度。本文重点使用气象站点的连续热红外辐射温度计和辐射表的连续测量数据,对 2008~2009 年的 Terra 和 Aqua 的 MODIS 1 km 分辨率的日地表温度产品数据(MOD/MYD11A1)进行验证。

选择其中同时有热红外辐射计和辐射表的 3 个站点进行验证和对比,两种数据都是 10 min 时间分辨率的数据。站点的具体情况及辐射表架设高度如表 1。使用 MODIS 地表温度产品自带的质量控制数据剔除空值和质量差的数据,选取质量控制字段为 0 的数据,即强制质量保证标志为 00,数据质量标志为 00,发射率的平均误差 ≤ 0.01 ,地表温度平均误差 ≤ 1 K 的数据进行验证。使用地表温度产品中时间数据集来确定产品数据的时间,然后选择对应的 10 min 内的站点地表温度值进行匹配。对于产品空间匹配的误差问题,这里考虑到站点一般都选择在空旷且均质的场地,所以可以暂时忽略。

表 1 观测站点信息
Table 1 Observation station information

观测站	经纬度	海拔/m	仪器型号	仪器精度	仪器高度/m	植被类型
盈科灌区绿洲站	38.85714°N 100.41033°E	1 519.1	CG3	±10%	4.0	农田 (玉米地)
大野口关滩森林站	38.53369°N 100.25022°E	2 835.2	CG3	±10%	19.7	山区森林
花寨子荒漠站	38.76520°N 100.31858°E	1 726.0	CG3	±10%	1.5	荒漠草原

3.2 方法原理

在整个验证过程中,使用了地表红外温度计观测数据和长波辐射观测数据两种数据源进行。在使用长波辐射验证时,根据斯特藩—玻耳兹曼定律和热辐射传输原理,使用辐射四分量(短波向上、向下辐射,长波向上、向下辐射)中长波辐射数据间接计算地表温度,具体方法已经在上文使用长波辐射数据验证方法中给出了说明。在验证过程中,由于无法获得实测的实时地表宽波段比辐射率,所以这里根据站点地表覆盖类型从 ASTER 光谱库中获得相应的光谱数据,进而获得宽波段地表比辐射率。为了减小由生长季和非生长季的地表比辐射率差异引起的误差,这里主

要针对生长季进行验证。所获得验证站点的宽波段比辐射率:关滩大野口站的为 0.993,盈科灌区绿洲站为 0.987,花寨子荒漠站为 0.975。对宽波段地表比辐射率引起的误差进行分析:当关滩站大野口的宽波段比辐射率在 0.993 ± 0.005 变动时,引起的地表温度的平均绝对误差 <0.165 °C;盈科灌区绿洲站的宽波段比辐射率在 0.987 ± 0.01 变化时,引起的地表温度的平均绝对误差 <0.141 °C;花寨子荒漠站的宽波段比辐射率在 0.975 ± 0.01 变化时,引起的地表温度的平均绝对误差 <0.227 °C。

对于所用的验证数据和 MODIS 的地表温度的差异情况予以统计,统计验证的误差指标用平均绝对

误差 MAE(Mean Absolute Error),如式(2):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |LST_{MODIS(i)} - LST_{MS(i)}| \tag{2}$$

对其离散程度指标采用均方根偏差 RMSD(Root Mean Square Deviation),如式(3):

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (LST_{MODIS(i)} - LST_{MS(i)})^2} \tag{3}$$

在式(2)和(3)中, $LST_{MODIS(i)}$ 和 $LST_{MS(i)}$ 分别表示与站点对应的 MODIS 地表温度产品和由站点长波辐射量间接获得的 MODIS 过境时间的地表温度。

3.3 结果与分析

图 1、2、3 显示了 3 个站验证的散点图,表 2 显示了其统计结果。由站点辐射四分量中的长波辐射量间接获得的地表温度数据来验证 MODIS LST 的散点图(图 1(b)、2(b)和 3(b))的趋势线比使用站点的红外辐射温度计获得的地表温度来验证 MODIS LST 的散点图(图 1(a)、2(a)和 3(a))的趋势线更接

近 $y=x$,而且散点更加集中。从图 3(a)可以看出该站直接获取的红外地表温度数据在低温处都集中在 0 附近,不符合此站的实际情况。将地表的红外辐射数据中存在问题的数据剔除后进行统计得到表 2。从表 2 可知:根据所有地表温度的误差统计结果,由长波辐射数据获得的地表温度数据验证结果与站点直接获得的红外温度验证结果存在差异,MODIS 地表温度与长波辐射间接反演的地表温度的差异更小。由于辐射表获得的探测面积要比红外辐射温度计大,更具有代表性,在尺度上更接近 MODIS 地表温度产品,因此以 MODIS 地表温度产品与长波辐射数据获得地表温度的差异作为其精度评价的结果要更可靠。由以上分析可知对于地表分布比较均质的站点来说,红外辐射温度计在低温等恶劣环境下不稳定,数据可能会出现质量问题,用于验证会导致很大误差。而使用四分量来验证 MODIS 地表温度产品更合理,结果更具代表性。

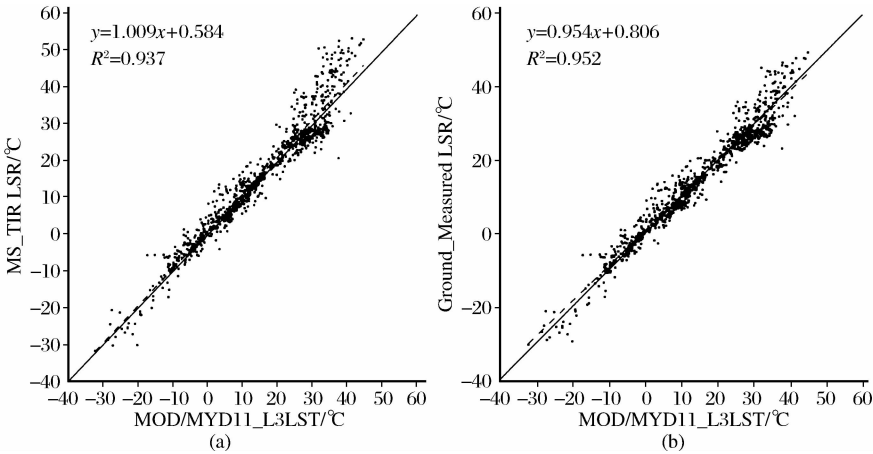


图 1 盈科灌区绿洲站验证散点图

Fig. 1 Scatter plots for the validation of MODIS land surface temperature products in Yingke oasis station

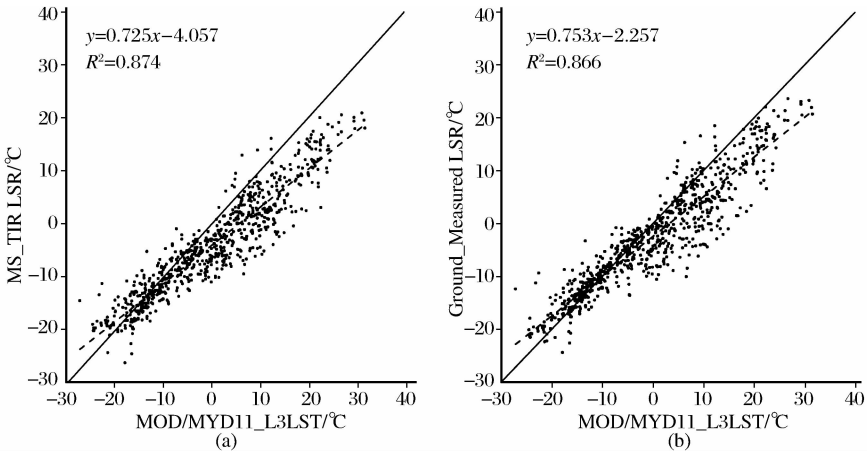
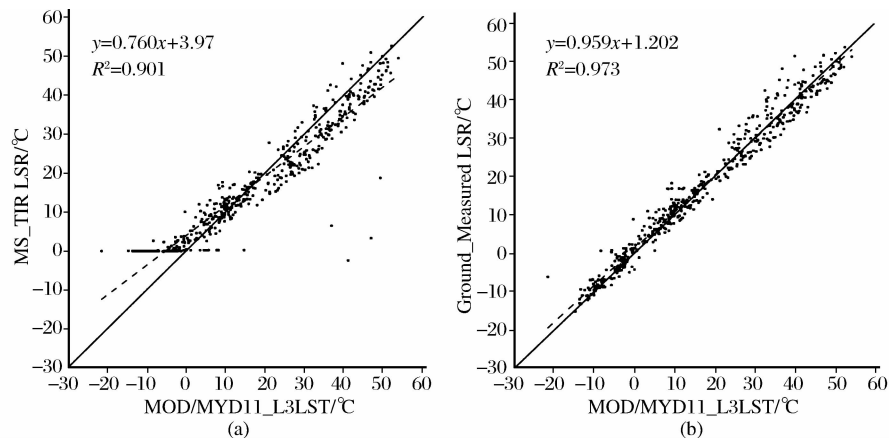


图 2 大野口关滩森林站验证散点图

Fig. 2 Scatter plots for the validation of MODIS land surface temperature products in Dayekou Guantan forest station



注:图 1、2、3 中(a)是用站点的地表红外温度数据验证的结果;(b)是站点的长波辐射数据间接计算出的地表温度验证的结果

图 3 花寨子荒漠站气象站点数据验证散点图

Fig. 3 Scatter plots for the validation of MODIS land surface temperature products in Huazhaizi desert station

表 2 站点的验证统计结果

Table 2 Statistical results of all observation stations

站点	数据	整体验证		Terra		Aqua		昼间产品		夜间产品	
		MAE	RMSD	MAE	RMSD	MAE	RMSD	MAE	RMSD	MAE	RMSD
盈科	TIR	2.86	4.06	2.29	3.42	3.46	4.63	3.76	5.05	2.03	2.85
	LWR	2.52	3.38	2.14	2.94	2.92	3.77	2.92	3.75	2.15	2.98
关滩	TIR	4.95	6.27	4.74	6.31	5.10	6.23	7.94	8.65	2.38	2.97
	LWR	3.86	5.27	3.65	5.32	4.08	5.22	6.17	7.18	1.87	2.71
花寨子	TIR	3.78	5.00	2.65	5.14	3.55	4.84	4.82	5.99	2.75	3.77
	LWR	2.29	3.06	1.92	2.46	2.66	3.57	2.82	3.48	1.86	2.67

注:TIR 为红外辐射温度数据验证的结果;LWR 为长波辐射数据验证的结果

对辐射四分量验证结果进行统计分析,根据所有地表温度产品的验证结果可知盈科和花寨子这两个站的 MODIS 地表温度与地表观测数据的平均绝对偏差分别是 2.29℃和 2.52℃;从辐射四分量验证的散点图,可以看出其回归方程的斜率除关滩外都接近 0.95,截距小于 1.2。而从统计结果和散点图看,与其他两个站相比关滩的误差要更大一些,主要是由于关滩站对应的 1 km 像元内的地表覆盖均质性差,其中有河滩、草地、森林等类型,而测站的观测只能覆盖到森林,站点的代表性差,因此结果较差;从地表比较均匀的两个站点数据对搭载在 Terra 和 Aqua 的 MODIS LST 分别验证结果可以看出:Terra 卫星的地表温度产品精度要高于 Aqua。又因为两颗卫星上的算法和参数是一样的,所以可能是由于仪器本身的差异所导致的。从 3 个站点的昼间和夜间的验证结果来看,昼间的 MAE、RMSD 都要大于夜间,即 MODIS 地表温度产品在夜间数据与站点的数据对应得更好,尤其是关滩站的验证。这主要是由于昼间太阳辐射的方向性造成像元是阴

影与光照地表的混合,而夜间不用考虑太阳辐射造成的阴影区,可以将夜间地表看成是更均质的,因此 MODIS 的产品与地表实测值符合得更好,在这组验证中,能更合理地验证的是夜间的数 据,平均绝对值偏差在 1.8~2.2℃之间。

4 结 语

本文回顾和分析了 MODIS 地表温度产品精度验证的方法,并以黑河流域为例给出了验证和分析 MODIS 地表温度产品的过程,从实例分析可知无论哪种验证方法都有很多影响因素必须要考虑。而现在 MODIS 地表温度产品验证中存在的主要问题是:① 用于验证的数据与 MODIS 地表温度数据存在空间尺度差异以及混合像元的影响;② 因地表温度具有较强的时间差异性,所以如何保证时间匹配也是验证中急需解决的问题;③ 由于验证仪器本身以及多个仪器之间的差异性引起误差;④ 地表比辐射率的时空修正。这些问题都亟待解决。遥感获得的地表温度数据要想更合理地应用就必

须先进行验证,所以如何综合考虑多种影响因素,更合理地验证数据仍是遥感获取地表温度应用研究的重点之一。而随着技术的发展,特别是无线传感器网络的成功组建,将为更好地解决验证中存在的问题、更精确地验证 MODIS 地表温度产品提供新的契机。

参考文献(References):

- [1] Liang S L. An Optimization Algorithm for Separating Land Surface Temperature and Emissivity from Multispectral Thermal Infrared Imagery [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(2): 267-274.
- [2] Wan Z M, Dozier J. A Generalized Split-window Algorithm for Retrieving Land-surface Temperature from Space [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 892-905.
- [3] Wan Z M, Li Z L. A Physics-based Algorithm for Retrieving Land-surface Emissivity and Temperature from EOS/MODIS Data [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 980-996.
- [4] Qin Zhihao, Gao Maofang, Qin Xiaomin, *et al.* Methodology to Retrieve Land Surface Temperature from MODIS Data for Agricultural Drought Monitoring in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(4): 67-71. [覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 等. 农业灾害监测中的地表温度遥感反演方法——以 MODIS 数据为例 [J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 67-71.]
- [5] CEOS. WMO Revision of AOPC Requirements in WMO/CEOS Database [R]. Submitted by the Secretariat, 2010: 4.
- [6] WMO. GCOS-107. Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate [R]. WMO TD 1338, 2006: 90.
- [7] Gao Maofang, Qin Zhihao. The Validation of Chinese Land Surface Temperature Products Retrieved from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2006, (3): 15-19. [高懋芳, 覃志豪. 中国 MODIS 地表温度产品验证 [J]. 国土资源遥感, 2006, (3): 15-19.]
- [8] Jiénez-muñoz J C, Sobrino J A. Error Sources on the Land Surface Temperature Retrieved from Thermal Infrared Single Channel Remote Sensing Data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(5): 999-1014.
- [9] Barnes W L, Pagano T S, Salomonson V V. Prelaunch Characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36 (4): 1088-1100.
- [10] Wan Z M. Estimate of Noise and Systematic Error in Early Thermal Infrared Data of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 47-54.
- [11] Wan Z M, Zhang Y L, Zhang, Q C, *et al.* Validation of the Land-surface Temperature Products Retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 163-180.
- [12] Prata A J. Land Surface Temperatures Derived from the Advanced very High Resolution Radiometer and the Along-Track Scanning Radiometer 2. Experimental Results and Validation of AVHRR Algorithms [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99: 13025-13058.
- [13] Sobrino J A, Coll C, Caselles V. Atmospheric Correction for Land Surface Temperature Using NOAA-11 AVHRR Channels 4 and 5 [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 38: 19-34.
- [14] Dash P, Göttsche F M, Olesen F S, *et al.* Land Surface Temperature Algorithm and Emissivity Estimation from Passive Sensor Data: Theory and Practice-current Trends [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(13): 2563-594.
- [15] Prata A J, Caselles V, Coll C, *et al.* Thermal Remote Sensing of Land Surface Temperature from Satellites: Current Status and Future Prospects [J]. Remote Sensing Review, 1995, 12 (3-4): 175-224.
- [16] Qin Z H, Olmo G D, Karnieli A. Derivation of Split Window Algorithm and Its Sensitivity Analysis for Retrieving Land Surface Temperature from NOAA-Advanced very High Resolution Radiometer Data [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(19): 22655-22670.
- [17] Mao K B, Shi J C, Li Z, *et al.* An RM-NN Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature and Emissivity from EOS/MODIS Data [J]. Journal of Geophysical Research—Atmosphere, 2007, 112, D21102: 1-17.
- [18] Mao Kebiao, Qin Zhihao, Gong Peng, *et al.* The Evaluation of Split-window Algorithm and the Analysis of Parameter Sensitivity [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(3): 319-322. [毛克彪, 覃志豪, 宫鹏, 等. 劈窗算法 LST 精度评价和参数敏感性分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 319-322.]
- [19] Sobrino J A, Kharraz J E L, Li Z L. Surface Temperature and Water Vapour Retrieval from MODIS Data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(24): 5161-5182.
- [20] Mao K B, Qin Z H, Shi J C, *et al.* A Practical Split-window Algorithm for Retrieving Land-surface Temperature from MODIS Data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(15): 3181-3204.
- [21] Mao Kebiao, Tang Huajun, Zhou Qingbo, *et al.* Improvement for Split-window Algorithm and Influence Analysis of Water Vapor Content for Retrieval Accuracy [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33 (2): 116-119. [毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 实用劈窗算法的改进及大气水汽含量对精度影响评价 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33 (2): 116-119.]
- [22] Li Fenling, Liu Yong. Algorithm Comparison of Land Surface Temperature in Qilian Mt. Area based on MODIS [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2008, 44(Sup.): 6-9. [李粉玲, 刘勇. 基于 MODIS 的祁连山区陆表温度反演算法比较

- [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(专辑): 6-9.]
- [23] Qin Z H, Dall O G, Kamieli A, *et al.* Derivation of Split Window Algorithm and Its Sensitivity Analysis for Retrieving Land Surface Temperature from NOAA-AVHRR Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (D19): 22655-22670.
- [24] Mao Kebiao, Qin Zhihao, Shi Jiancheng, *et al.* The Research of Split-window Algorithm on the MODIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30 (8): 703-708. [毛克彪, 覃志豪, 施建成, 等. 针对 MODIS 数据的劈窗算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版) 2005, 30(8): 703-708.]
- [25] Mao Kebiao, Qin Zhihao, Shi Jiancheng. Retrieval of Land Surface Temperature of Shandong Peninsula Using MODIS Image and Split Window Algorithm[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34 (1): 46-50. [毛克彪, 覃志豪, 施建成. 用 MODIS 影像和劈窗算法反演山东半岛的地表温度[J]. 中国矿业大学学报(自然科学版), 2005, 34(1): 46-50.]
- [26] Coll C, Caselles V, Galve J M, *et al.* Evaluation of Split-window and Dual-angle Correction Methods for Land Surface Temperature Retrieval from Envisat/Advanced along Track Scanning Radiometer (AATSR) Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111 (D12105): 1-12, doi: 10. 1029/2005JD006830.
- [27] Coll C, Caselles V, Galve J M, *et al.* Ground Measurements for the Validation of Land Surface Temperatures Derived from AATSR and MODIS Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97: 288-300.
- [28] 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.
- [29] Wan Z M, Zhang Y, Zhang Q. Quality Assessment and Validation of the MODIS Global Land Surface Temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25 (1), 261-274.
- [30] Zhou Ji, Li Jing, Zhang Lixin. Validation of Algorithms for Retrieving Land Surface Temperature base on MODIS Data——A Case Study in the Upper Reaches of Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 239-246. [周纪, 李京, 张立新. 针对 MODIS 数据的地表温度反演算法验证——以黑河流域上游为例. 冰川冻土[J], 2009, 31(2): 239-245.]
- [31] Berk A, Anderson G P, Bernstein L S, *et al.* MODTRAN4 Radiative Transfer Modeling for Atmospheric Correction[C]//SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III, 1999, 3756: 348-353.
- [32] Liang S L. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces [M]. Wiley Series in Remote Sensing. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004: 255-290.
- [33] Yang K, Wang J M. A Temperature Prediction-correction Method for Estimating Surface Soil Heat Flux Soil Temperature and Moisture Data[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(5): 721-729.
- [34] Wang W H, Liang S L, Meyers T. Validation MODIS Land Surface Temperature Products Using Long-term Nighttime Ground Measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 623-635.
- [35] Ogawa K, Schmugge T, Jacob F, *et al.* Estimation of Land Surface Window (8-12 μ m) Emissivity from Multi-spectral Thermal Infrared Remote Sensing: A Case Study in a Part of Sahara Desert [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30 (2): 1067, doi: 10. 1029/2002GL016354.
- [36] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110 (D11109): 1-12. doi: 10. 1029/2004JD005566.
- [37] Wang K C, Liang S L. Evaluation of ASTER and MODIS Land Surface Temperature and Emissivity Products Using Long-term Surface Long-wave Radiation Observation at SURFRSD Sites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113 (7): 1556-1565.
- [38] Min Wenbin, Li Yueqing. Experiment of Correlations between Synchronized Air Temperature, Soil Temperature and Land Surface Temperature Retrieved from MODIS[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(6): 101-104. [闵文彬, 李跃清. 利用 MODIS 反演四川盆地地表温度与地面同步气温、地温观测值的相关性实验[J]. 气象, 2010, 36(6): 101-104.]
- [39] Liu Fang, Lv Yipei, Jiang Liming, *et al.* Correlation Analysis between MODIS Brightness Temperature and Surface Temperature Provided by Meteorological Station[J]. *Seismology and Geology*, 2010, 32(1): 127-137. [刘放, 吕弋培, 江利明, 等. MODIS 亮温与气温以及地温的相关性分析[J]. 地震地质, 2010, 32(1): 127-137.]
- [40] Du Jia, Zhang Bai, Song Kaishan, *et al.* A Comparative Study on Estimated Surface Temperature based on Landsat-5 TM in the Honghe Wetland [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(3): 312-319. [杜嘉, 张柏, 宋开山, 等. 基于 Landsat-5 TM 的洪河湿地地表温度估算方法对比研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 312-319.]
- [41] Dorothy K H, Jason E B, Kimberly A C. Comparison of Satellite-derived and In-situ Observation of Ice and Snow Surface Temperature over Greenland[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3739-3749.
- [42] Jacob F, Petitcolin F, Schmugge T, *et al.* Comparison of Land Surface Emissivity and Radiometric Temperature Derived from MODIS and ASTER Sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90: 137-152.
- [43] Schmugge T, Ogawa K. Validation of Emissivity Estimates from ASTER and MODIS Data[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium &

27th Canadian Symposium on Remote Sensing, Denver, 2006, 31:260-262.

[44] Mihalcea C, Brock B W, Diolaiuti G, *et al.* Comparison of Ground based and ASTER Derived Measurements of Surface Temperature and Supraglacial Debris Thickness on Miage Glacier, Mont Blanc Massif, Italy[J]. Geophysical Research Abstracts, 2007, 9:03765.

[45] Li X, Li X W, Li Z Y, *et al.* Watershed Allied Telemetry Experimental Research[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D22103):1-19. doi:10.1029/2008JD011590.

Validation of the MODIS Land Surface Temperature Products
——A Case Study of the Heihe River Basin

Yu Wenping^{1,2}, Ma Mingguo¹

(1. Cold and Arid Regions Remote Sensing Observation System Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper analyzes the key factors that result in the estimation errors of the MODIS land surface temperature products. Then the principle methods of validating the MODIS LST was discussed and compared. Normally there are bigger uncertainties of MODIS LST products in the semi-arid and arid regions. As a case study, the Heihe river basin was selected to estimate the accuracy of MODIS LST products in Chinese arid and semi-arid regions. The two kinds of ground-measured observation data were obtained from the automatic meteorological stations: Infrared Radiation Thermometer data and longwave radiation data. The comparisons were performed for the validation based on these two types of observation data over three typical land cover types. The result demonstrates that: it is more reasonable to use long-term nighttime surface longwave radiation data to validate the MODIS LST products. The validation results indicate that mean absolute error is less than 2.2 °C in the selected stations.

Key words: Land Surface Temperature (LST); MODIS; Validation; Heihe river basin; Arid regions