引文格式：蒋艳玲,胡锋,尚媛媛,等. FY-4A/AGRI地表温度产品真实性检验[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):9-14. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.002

FY-4A/AGRI地表温度产品真实性检验
——以贵州省为例

蒋艳玲[1]，胡　锋[1*]，尚媛媛[1]，龙杰琦[1]，罗传山[2]，刘轩铭[1]，鲁　霞[1]
（1. 贵州省生态与农业气象中心，贵州 贵阳 550002；2. 贵州省地矿局地球物理地球化学勘查院，贵州 贵阳 550018）

摘　要：FY-4A是我国气象卫星的先进代表，对其地表温度反演产品进行真实性检验可以验证产品的准确度和可靠性，进一步推动产品的广泛应用。以贵州省为研究区，基于MODIS地表温度产品（MOD11A1、MOD11A2）和84个国家气象观测站同步地表温度观测资料，通过差值分析、一致性分析和趋势检验等方法对FY4A/AGRI地表温度产品（LST）精度进行验证。结果表明：①FY4A/AGRI反演的地表温度略低于MODIS反演的地表温度；②FY4A/AGRI地表温度反演产品与MODIS地表温度反演产品之间的标准差在2 K左右，均方根误差在5 K左右，相关系数处于强相关及以上水平；反演精度：夜间>全天>白天；③从长时序趋势检验上看，FY4A/AGRI地表温度反演产品与地面站点实测地表温度趋势的一致性（R^2=0.56）低于MODIS地表温度反演产品（R^2=0.71）。

关键词：FY-4A/AGRI；MODIS；地表温度；真实性检验；贵州省
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0009-06

Authenticity Validation of FY-4A/AGRI Land Surface Temperature Products: A Case Study of Guizhou Province

JIANG Yanling[1], HU Feng[1], SHANG Yuanyuan[1], LONG Jieqi[1], LUO Chuanshan[2], LIU Xuanming[1], LU Xia[1]
(1. Guizhou Ecological Meteorology and Agrometeorology Center, Guiyang 550002, China;
2. Institute of Geophysical and Geochemical Prospecting, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Guizhou Province, Guiyang 550018, China)

Abstract: FY-4A is an advanced representative of Chinese meteorological satellites. Validating its land surface temperature (LST) inversion products can verify the accuracy and reliability of products, further promoting their widespread application. Taking Guizhou Province as the research area, based on MODIS LST products (MOD11A1 and MOD11A2) and 84 national meteorological observation stations synchronized land surface temperature observation data, we used the methods such as difference analysis, consistency analysis, and long-term trend analysis to validate the accuracy of FY4A/AGRI LST products. The results show that ①the LST derived by FY4A/AGRI is slightly lower than that derived by MODIS. ②The standard deviation between FY4A/AGRI and MODIS LST products is about 2 K, with a root mean square error of about 5 K, and a strong correlation coefficient indicating a high level of correlation. The inversion accuracy of night is the highest, and the inversion accuracy of day is lowest. ③From the long-term trend analysis, the consistency between the FY4A/AGRI LST products and the LST measured at ground stations (R^2=0.56) is lower than that of the MODIS LST products (R^2=0.71).

Keywords: FY-4A/AGRI, MODIS, LST, authenticity validation, Guizhou Province

地表温度（land surface temperature，LST）是气候变化的一个重要指示因子，为土壤水分、城市热岛、火点识别、干旱监测等研究提供重要参数[1-4]。地表温度空间异质性较强，在时空尺度上变化迅速，通过传统地面站点监测来研究地表温度时空分布和变化具有很大局限性，在大范围或全球尺度上难以实现[5]。卫星遥感数据获取方便、信息量大、成本低、效率高，在地表温度反演、动态监测方面应用前景广阔，但由于尺度、时段、地表环境等因素的影响，反演结果存在一定误差[6]，因此在应用数据前需要开展遥感地表温度产品真实性检验与精度评价以保证产品质量。目前国内外对遥感反演LST产品进行真实性检验的方法主要有4种：基于地面的验证、基于辐射的验证、基于卫星LST产品的交叉验证和基于时间序列的比较[7]。地表温度遥感产品的真实性检验多基于MODIS地表温度产品[8-11]，针对风云卫星尤其是FY-4A/AGRI地

项目来源：贵州省气象局科研业务资助项目（黔气科登[2023]11-07号）。
第一作者简介：蒋艳玲（1997—），硕士，工程师，主要从事GIS与遥感应用工作，E-mail：18213553714@163.com。
通信作者：胡锋（1990—），硕士，工程师，主要从事GIS与遥感应用工作，E-mail：hufengdxzy@163.com。

表温度产品真实性检验方面的研究还较少。

本研究以贵州省为例，基于标准差、均方根误差、相关性分析、趋势分析等多种评估方法，对FY-4A/AGRI地表温度产品进行真实性检验，以评估其准确性和可靠性，以期为贵州省气候变化、环境监测、城市规划和农业管理等领域的研究、决策和应用提供科学依据，为相关研究提供有益参考[12]。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

贵州省（24°37′~29°13′N，103°36′~109°35′E）简称“黔”或“贵”（图1），位于中国西南部云贵高原强烈岩溶化山区，东毗湖南、南接广西、西连云南、北邻四川与重庆，东西长约595 km，南北相距约509 km，总面积176 167 km^2，其中喀斯特（出露）面积109 084 km^2。境内地势西高东低，自中部向北、东、南三面倾斜，平均海拔约1 100 m，最高点位于赫章县韭菜坪，海拔2 900.6 m，最低点位于黎平县水口河出省界处，海拔147.8 m。气候温暖湿润，属亚热带温湿季风气候区，冬无严寒、夏无酷暑、降水丰富、雨热同季，年平均气温15℃左右[13-14]。截至2023年，贵州省内辖6个地级市、3个自治州，共88个县级政区，年末常住人口为3 865万人，全年地区生产总值20 913.25亿元。

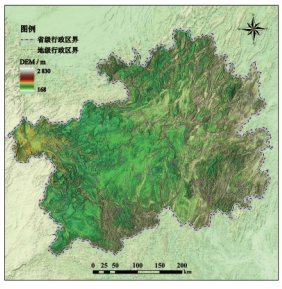


图1 贵州省地形图

审图号：GS(2024)0650号

1.2 数据来源与预处理

本文使用的地表温度产品LST来源于FY-4A/AGRI、Terra&Aqua/MODIS仪器（表1）。

表1 卫星地表温度产品概况

卫星名称	FY-4A	Terra/Aqua
传感器	AGRI	MODIS
地表温度数据集简称	LST	LST_Day_1 km LST_Night_1 km
数据维度	全圆盘：2 748×2 748 中国区域：1 092×2 748	1 200×1 200 1 200×1 200
存储格式	.nc	.hdf
空间分辨/km	4	1
数据单位	K	K

FY-4A/AGRI为标称（NOM）投影、MODIS为正弦曲线（Sinusoidal）投影，对两类产品进行投影转换、剔除异常值、重采样、裁剪等数据预处理，将地理坐标系统一为WGS1984，空间分辨率统一为1 km。相较于FY-4A/AGRI产品的分钟（min）数据，MODIS的产品更为丰富，包括分钟（min）、日（d）、旬（8 d）、月（Monthly）等数据，本文主要使用Terra/MODIS产品，由于两者时间分辨率不同，故须统一时间分辨率。通过Python编程将FY-4A/AGRI地表温度产品的Min数据根据Terra/MODIS过境时间均值处理为与其相对应的d、8 d等数据，使得二者具有可比性[15-17]。

本文使用的地表温度实测数据为贵州省84个国家气象观测站的8—10月逐日平均0 cm地面温度数据，数据来源于贵州省气候中心。

2 研究方法

2.1 一致性分析

选定多种一致性分析指标对FY-4A/AGRI、MODIS产品进行对比。参照各指标定义（GB/T 36296-2018），可分别给出标准差、均方根误差、相关系数的计算方法。

1）不确定度评价指标。标准差（standard deviation）：对同一被测量对象作n次测量，表征测量结果分散性的量，符号为$s(x)$，公式如下：

$$s(x)=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}}{n-1} \tag{1}$$

式中，$\bar{x}$为变量x的n次测量（或n个样本）算术平均值；x_i为变量x的第i个值

2）准确度评价指标。均方根误差（root mean square error）：误差平方和与样本量n比值的平方根，符号为RMS_e，公式如下：

$$\mathrm{RMS}_e=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}e_i^2}{n}} \tag{2}$$

相关系数（correlation coefficient）：2个随机变量之间相互依赖性的度量，等于2个变量间的协方差除以各自方差之积的正平方根，符号为$r(x_1,x_2)$，公式如下：

$$r(x_1,x_2)=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{1,i}-\overline{x_1}\right)\left(x_{2,i}-\overline{x_2}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{1,i}-\overline{x_1}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(x_{2,i}-\overline{x_2}\right)^2}} \tag{3}$$

式中，$x_{1,i}$ 为变量 x_1 第 i 次测量结果；$x_{2,i}$ 为变量 x_2 第 i 次测量结果；$\overline{x_1}$ 为变量 x_1 的算术平均值；$\overline{x_2}$ 变量 x_2 的算术平均值。相关系数取值范围为[-1,1]，当取值为正数时，表示2个变量之间存在正相关的线性关系；当取值为负数时，表示2个变量之间存在负相关的线性关系；当取值为0时，表示2个变量之间没有线性关系（表2）。

表2　相关系数取值范围的定义

相关系数（绝对值）	说明
[0.0，0.1）	无或极弱相关
[0.1，0.3）	弱相关
[0.3，0.5）	中等程度相关（*）
[0.5，0.7）	强相关（**）
[0.7，0.9）	非常强相关（***）
[0.9，1.0]	极强相关（****）

2.2　差值分析

通过计算两组数据之间的差异，分析这些差异的统计特性。对于栅格数据，计算每一个地理位置上的两个像素之间的差值，再通过计算平均差值（mean difference）对所有像素的差值进行统计分析，公式如下：

$$D_i = A_i - B_i \tag{4}$$

$$\mu_D = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} D_i \tag{5}$$

式中，A_i 和 B_i 分别为数据集 A 和数据集 B 在第 i 个像素的值。

2.3　趋势检验

通过线性回归分析探究卫星反演的地表温度与地面气象站测量的气温之间的定量关系，线性回归模型如下：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \tag{6}$$

式中，Y 为响应变量（气温）；X 为解释变量（地表温度）；β_0 为截距；β_1 为斜率；ϵ 为误差项。回归参数 β_0 、β_1 通过最小二乘法估计，模型拟合优度通过决定系数 R^2 评估，参数稳定性通过计算95%置信区间来评估。

决定系数 R^2 计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}} \tag{7}$$

式中，SS_{res} 为残差平方和；SS_{tot} 为总平方和；R^2 越接近1表示模型拟合度越高。

3　结果与分析

3.1　对比分析

1）数据产品对比。由FY-4A和MODIS地表温度日合成数据产品对比可知，2023年9月1日白天（图2a、2b），FY-4A对于贵州中西部地区地表温度的反演存在一定偏差，在中西部地区FY-4A反演的地表温度较低，而MODIS反演的地表温度较高。9月16日夜间（图2c、2d），FY-4A和MODIS反演的地表温度无明显差异。

由FY-4A和MODIS地表温度8 d合成数据产品对比可知，2023年8月29日白天（图2e、2f）和夜间（图2g、2h）的两类产品间存在较大差异，主要表现为FY-4A在贵州北部、东部地区的地表温度反演结果较高，温度识别区域边界较为模糊，而MODIS对于高温的识别更为保守，边界更为清晰。

通过统计指标，MODIS反演结果较FY-4A更为稳定，标准差均为2 K左右，FY-4A反演的地表温度略低于MODIS反演的地表温度，二者的日合成产品差异小于8 d合成产品，对于日合成产品，FY-4A的低温识别结果较高温更接近MODIS，8 d合成产品则相反。

2）差值分析。通过FY4A和MODIS的地表温度产品差值分析（图3）可以看出，对于日合成数据产品，FY4A和MODIS的差异分布范围较广，2023年9月1日白天（图3a），地表温度差值大于12 K的范围主

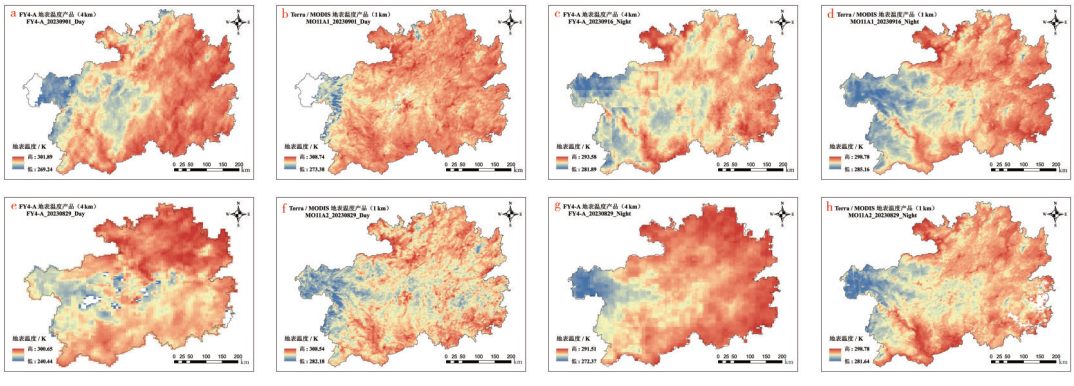


图2　FY-4A和MODIS地表温度产品对比

审图号：GS(2024)0650号

要分布在贵州北部、中部及西部地区，2023年9月16日夜间（图3b），地表温度差值大于6 K的范围主要分布在贵州北部、西部及东南部地区。

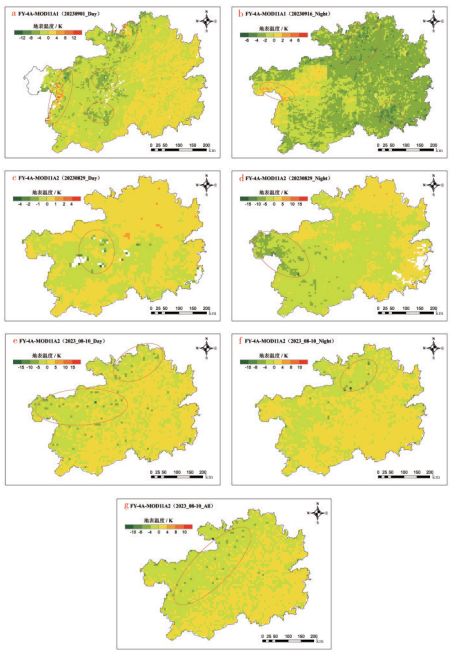


图3 FY-4A和MODIS的差值分布

审图号：GS(2024)0650号

对于8 d合成数据产品，FY4A和MODIS的差异分布范围较集中，2023年8月29日白天（图3c），地表温度差值大于4 K的范围主要集中在贵州中部地区。2023年8月29日夜间（图3d），地表温度差值大于15 K的范围主要集中在贵州西部地区。

对2023年8—10月数据产品做均值处理，得到月合成数据产品，统计8—10月数据可以看出，2023年8—10月白天（图3e），FY4A和MODIS的差异分布范围较零碎，地表温度差值大于15 K的范围主要分布在贵州北部及中西部地区。2023年8—10月夜间（图3f），FY4A和MODIS的差异分布范围较集中，地表温度差值大于10 K的范围主要集中在贵州北部地区。2023年8—10月全天（图3g），FY4A和MODIS的差异分布范围较集中，地表温度差值大于10 K的范围主要沿贵州西北一线地区分布。

整体上，FY-4A地表温度反演结果与MODIS地表温度反演结果差异分布较为均匀，主要分布在贵州北部及中西部地区，FY-4A反演的地表温度略低于MODIS反演的地表温度。

3.2 个例分析

在等经纬度投影的基础上，对2种卫星地表温度产品进行逐点比较，根据标准差、均方根误差、相关系数的公式，分别计算同一条件下FY-4A与MODIS地表温度产品的一致性，统计结果如表3~6所示。

由表3~6可知，不同时间的白天，FY-4A与MODIS地表温度产品相关性为中等到强的相关（表3和表5）；不同时间的夜间，FY-4A与MODIS地表温度产品相关性为非常强的相关（表4和表6）；同一时间的白天，FY-4A与MODIS地表温度产品相关性为中等相关（表5）；同一时间的夜间，FY-4A与MODIS地表温度产品相关性为非常强的相关（表6）。

此外，除2023-08-29白天的检验结果外，FY-4A与MODIS地表温度产品两两之间的标准差在2 K左右，均方根误差在5 K左右。综上可知，FY-4A与MODIS地表温度产品的一致性较高，且夜间的地表温度产品最为接近。

表3 2023年9月1日白天地表温度产品一致性检验结果

评价指标	FY-4A&MOD11A1
标准差/K	2 161.3
均方根误差/K	5 404.4
相关系数	0.679 7（**）

表4 2023年9月16日夜间地表温度产品一致性检验结果

评价指标	FY-4A&MOD11A1
标准差/K	1 275.6
均方根误差/K	4 340.8
相关系数	0.841 7（***）

表5 2023年8月29日白天地表温度产品一致性检验结果

评价指标	FY-4A&MOD11A2
标准差/K	4 615.6
均方根误差/K	9 926.3
相关系数	0.482 7（*）

表6 2023年8月29日夜间地表温度产品一致性检验结果

评价指标	FY-4A&MOD11A2
标准差/K	2 282.7
均方根误差/K	6 433.3
相关系数	0.769 5（***）

3.3 统计分析

在个例分析的基础上，进一步对产品进行批量统计分析。统计分析2023年8—10月FY-4A与MODIS（MOD11A2）地表温度产品的一致性指标。

对逐时刻逐像元的地表温度产品进行两两统计，分析2种不同产品的一致性，统计结果如表7所示。只考虑白天时，FY-4A与MODIS地表温度产品相关性为强相关（0.656 1）；只考虑夜间时，FY-4A与MODIS地表温度产品相关性为非常强的相关（0.869 5）；考虑全天时，FY-4A与MODIS地表温度产品相关性为非常强的相关（0.796 0）。

此外，FY-4A与MODIS地表温度产品两两之间的标准差均在2 K左右，均方根误差均在5 K左右。

综上可知，无论白天、夜间还是全天，FY-4A与MODIS地表温度产品的一致性均较高，且地表温度产

表7　2023年8—10月FY-4A和MOD11A2地表温度产品统计检验

类别	标准差	均方根误差	相关系数
白天	1 816.1	5 320.1	0.656 1（**）
夜间	1 142.9	4 103.9	0.869 5（***）
全天	1 356.3	4 546.3	0.796 0（***）

品一致性：夜间>全天>白天。

3.4　趋势分析

利用贵州省84个国家气象观测站的8—10月逐日平均0 cm地面温度数据对FY-4A和MODIS地表温度产品进行趋势检验。主要采用相关性分析方法来探究卫星反演的地表温度与地面观测站实测的地表温度之间的趋势关系，通过散点图和线性回归模型分析每个观测站点的遥感地表温度与实测地表温度之间的相关性。

图中，每个点代表一个观测站的数据。X轴代表卫星反演的地表温度（FY-4A或MODIS），Y轴代表观测站测量的地表温度。蓝色线为线性回归线，表示卫星反演的地表温度和观测站测量的地表温度之间的最佳拟合线，该线通过最小化数据点和线之间的垂直距离计算得出。蓝色阴影区域是95%的置信区间，表示如果在相同条件下重复实验，预期95%的线性回归线会落在这个区域内。红色虚线为1∶1线，表示理想情况下的关系。R^2（决定系数）表示模型拟合优度的统计量，也即卫星反演的地表温度和观测站测量的地表温度之间的线性关系强度，取值范围是0~1，值越接近1，表示模型对数据的拟合度越好。Slope（斜率）表示每增加一单位的卫星反演的地表温度，观测站测量的地表温度预期会增加的数量。

由2023年8月FY-4A和MODIS地表温度数据反演的趋势与地面观测站测量的地表温度数据趋势对比可知（图4），MODIS反演的趋势（R^2=0.69，Slope=0.78）较FY-4A反演的趋势（R^2=0.40，Slope=0.48）更接近地表温度实测数据趋势。

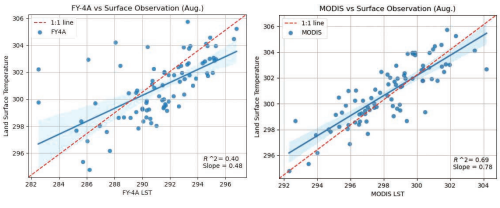


图4　FY-4A、MODIS与地面观测数据的趋势对比（8月）

由2023年9月FY-4A和MODIS地表温度数据反演的趋势与地面观测站测量的地表温度数据趋势对比可知（图5），FY-4A反演的趋势（R^2=0.50，Slope=0.79）和MODIS反演的趋势（R^2=0.53，Slope=0.66）与地表温度实测数据趋势相当。

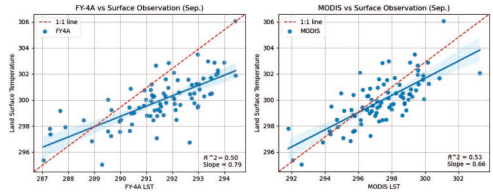


图5　FY-4A、MODIS与地面观测数据的趋势对比（9月）

由2023年10月FY-4A和MODIS地表温度数据反演的趋势与地面观测站测量的地表温度数据趋势对比可知（图6），FY-4A反演的趋势（R^2=0.58，Slope=0.78）较MODIS反演的趋势（R^2=0.45，Slope=0.74）更接近地表温度实测数据趋势。

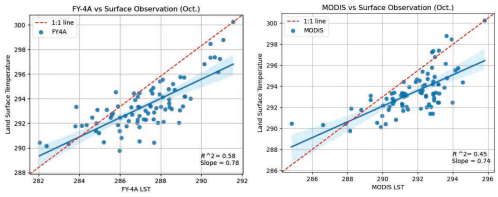


图6　FY-4A、MODIS与地面观测数据的趋势对比（10月）

由2023年8-10月FY-4A和MODIS地表温度数据反演的趋势与地面观测站测量的地表温度数据趋势对比可知（图7），MODIS反演的趋势（R^2=0.71，Slope=0.80）较FY-4A反演的趋势（R^2=0.56，Slope=0.73）更接近地表温度实测数据趋势。

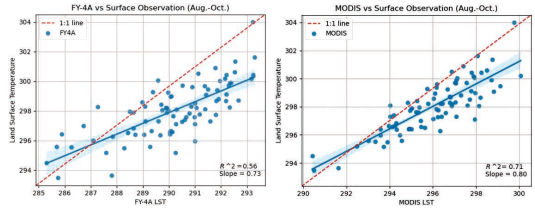


图7　FY-4A、MODIS与地面观测数据的趋势对比（8-10月）

综上可知，FY-4A和MODIS反演的地表温度时间序列趋势与国家气象站地面观测的地表温度数据时间序列趋势都具有较高的一致性，但MODIS整体表现优于FY-4A。

4　结　论

基于标准差、均方根误差、相关系数、差值分析、趋势检验等多种评估方法，在核心数据解读和预处理的基础上，对FY-4A/AGRI、MODIS卫星遥感地表温度产品和地面观测数据进行一致性分析，检验FY-4A/AGRI卫星反演地表温度产品的真实性与准确性，结论如下：

1）从地表温度产品对比来看，FY-4A地表温度反演结果对于贵州北部及中西部的判识与MODIS存在一定偏差；从地表温度反演结果来看，FY-4A反演的地表温度整体上略低于MODIS反演的地表温度。

2）从个例分析及批量对比来看，FY-4A地表温度反演精度和MODIS地表温度反演精度相近，整体上看，两者之间的标准差在2 K左右，均方根误差在5 K左右，相关系数处于强相关及以上水平；反演精度：夜间>全天>白天。

3）由2023年8-10月FY-4A和MODIS地表温度产品与地面观测地表温度数据趋势对比分析来看，FY-4A（R^2=0.56，Slope=0.73）和MODIS（R^2=0.71，Slope=0.80）反演的地表温度趋势与地面观测的地表温度数据趋势都具有较高的一致性，但MODIS整体表现优于FY-4A。

总的来说，FY-4A在地表温度反演方面的能力较强、效果较好，值得进一步推广改进和应用。

参考文献

[1] 尹磊,李佳乐,李玉,等. 基于陆地表面温度反演土壤水分及监测干旱的适用性研究[J]. 防灾科技学院学报,2024,26(1):26-37

[2] 陈春辉,马苗苗. 基于多源遥感数据的城市热岛特征与机理研究[J]. 地理空间信息,2023,21(1):119-122

[3] 杨远垚,陈海燕,陈邵莹,等. 基于全红外光谱的火点识别与林火灾后评估[J]. 林业与生态科学,2021,36(2):170-178

[4] 王园园,许君一,于臻,等. 基于温度植被干旱指数的河南省旱情演化分析[J]. 地理空间信息,2017,15(2):98-101

[5] 程元良,吴骅,李召良,等. FY-3D MERSI-II地表温度遥感反演与验证[J]. 遥感学报,2021,25(8):1 792-1 807

[6] 马晋,周纪,刘绍民,等. 卫星遥感地表温度的真实性检验研究进展[J]. 地球科学进展,2017,32(6):615-629

[7] 肖尧,马明国,闻建光,等. 复杂地表地表温度反演研究进展[J]. 遥感技术与应用,2021,36(1):33-43

[8] 王玮,王丽娟,孙伍红,等. 祁连山草地MODIS LST产品真实性检验[J]. 草业科学,2020,37(12):2 444-2 456

[9] 闵文彬,李跃清,周纪. 青藏高原东侧MODIS地表温度产品验证[J]. 高原气象,2015,34(6):3-8

[10] 张琪,李大成,历华,等. 基于DTW的HJ-1B卫星地表温度产品质量检验[J]. 中国空间科学技术,2022,42(3):93-104

[11] 王艳丽,宋承运. FY-3B/VIRR地表温度产品那曲地区适用性分析[J]. 无线电工程,2021,51(12):1 517-1 522

[12] 胡泽银,王世杰,白晓永,等. 贵州省地表温度的遥感反演评价及时空分异规律[J]. 生态学杂志,2018,37(9):2 794-2 807

[13] 程清平,王平,谭小爱. 1961-2013年贵州省地面温度时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(2):122-131

[14] 何兴潼,袁淑杰,谷晓平,等. 贵州省喀斯特区域土壤水分持续上升时期气象要素对土壤水分的影响[J]. 水土保持通报,2018,38(2):87-94

[15] 崔鹏,王素娟,陆风,等. FY-4A/AGRI海表温度产品和质量检验[J]. 应用气象学报,2023,34(3): 257-269

[16] 李可相,肖玖军,谢元贵, 等. 基于MODIS数据的云贵高原地表温度时空特征分析[J]. 贵州科学,2020,38(6):43-48

[17] 郑贵洲,熊良超,廖艳雯,等. 利用MODIS数据反演南海南部海表温度及时空变化分析[J]. 遥感技术与应用,2020,35(1):132-140

（上接第8页）

[39] Amantai N,Meng Y,Wang J,et al. Climate Overtakes Vegetation Greening in Regulating Spatiotemporal Patterns of Soil Moisture in Arid Central Asia in Recent 35 Years[J]. GIScience & Remote Sensing,2023,61(1):2 286 744

[40] Seneviratne S I,Corti T,Davin E L,et al. Investigating Soil Moisture-climate Interactions in a Changing Climate:A Review[J]. Earth-science Reviews,2010,99(3-4):125-131

[41] Wang Y,Yang J,Chen Y,et al. Quantifying the Effects of Climate and Vegetation on Soil Moisture in an Arid Area,China[J]. Water,2019,11(4):767-769

[42] 王思楠,李瑞平,吴英杰,等. 基于环境变量和机器学习的土壤水分反演模型研究[J]. 农业机械学报,2022,53(5):332-341

[43] Chen S,She D,Zhang L,et al. Spatial Downscaling Methods of Soil Moisture Based on Multisource Remote Sensing Data and Its Application[J]. Water,2019,11(7):1 401-1 405

[44] Santi E,Paloscia S,Pettinato S,et al. On the Synergy of Smap,Amsr2 and Sentinel-1 for Retrieving Soil Moisture[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2018,65:114-123

[45] Wagner W,Hahn S,Kidd R,et al. The Ascat Soil Moisture Product:A Review of Its Specifications,Validation Results,and Emerging Applications[J]. Meteorologische Zeitschrift,2013,22(1):5-13

[46] Imanpour F,Dehghani M,Yazdi M. Improving SMAP Soil Moisture Spatial Resolution in Different Climatic Conditions Using Remote Sensing Data[J]. Environ Monit Assess,2023,195(12):1 476

[47] 郑小坡,孙越君,秦其明,等. 基于可见光-短波红外波谱反射率的裸土土壤含水量反演建模[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(8):2 113-2 118

[48] Bidgoli R D,Koohbanani H,Keshavarzi A,et al. Measurement and Zonation of Soil Surface Moisture in Arid and Semi-arid Regions Using Landsat8 Images[J]. Arabian Journal of Geosciences,2020,13(17):1-10

[49] 张鹏,张巧凤,于红博,等. FY-3B/3C和AMSR2土壤水分产品在内蒙古地区的适用性评价[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(12):95-106