

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201904004



采用地表反射率模型的 Landsat 时序数据集重构

李凯^{1,2}, 陈芸芝^{1,2}, 汪小钦^{1,2}, 陈雪娇^{1,2}

(1. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350116;
2. 福州大学 卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 福建 福州 350116)

摘要: 选择福州市区东部面积近 300 km² 的区域作为研究区, 基于地表反射率模型, 对 2013—2016 年研究区内所有有效像元进行拟合, 重构时序数据集, 并通过原始影像与实测光谱对拟合结果进行评价. 研究结果表明: 拟合结果与原始影像在蓝、绿、红、近红外波段的相关系数均高于 0.9, 可见光波段均方根误差在 0.01 左右, 近红外波段略高于 0.02; 拟合结果能清晰地表达不同类型植被的物候差异, 与原始影像、实测归一化植被指数 (NDVI) 均保持较高的一致性; 基于重构的数据集, 可以保证选择相同时相的数据进行年度植被变化监测, 进一步提高植被动态变化监测的准确性和实效性.

关键词: 地表反射率模型; Landsat 卫星; 时间序列; 变化监测

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)03-0381-07

Reconstruction of Landsat Time-Series Dataset Using Surface Reflectance Model

LI Kai^{1,2}, CHEN Yunzhi^{1,2}, WANG Xiaoqin^{1,2}, CHEN Xuejiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
2. National Eng. Research Center of Satellite Spatial Information Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: This paper selected a study area with an area of about 300 km² in eastern Fuzhou, based on the surface reflectance model, fitting all the effective pixels in the study area from 2013 to 2016, reconstruction time-series dataset, and the fitting results were evaluated by original image and measured optical spectrum. The research results showed that the correlation coefficients between the fitting results and the original image in the blue, green, red and near infrared bands are higher than 0.9, the root mean square error of visible band is about 0.01, near infrared band is slightly higher than 0.02. The fitting results can clearly express the phenological differences of different types of vegetation, and maintain a high consistency with the original image and the measured normalized difference vegetation index (NDVI). Based on the reconstructed data set, annual vegetation change monitoring can be guaranteed by choosing the same timephase data, the accuracy and effectiveness of vegetation dynamic change monitoring can be further improved.

Keywords: surface reflectance model; Landsat satellite; time-series; change monitoring

收稿日期: 2019-04-04
通信作者: 陈芸芝(1982-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事资源环境遥感应用的研究. E-mail: chenyunzhi@fzu.edu.cn.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41401488); 国家重点研发计划项目(2017YFB0504203); 中央引导地方科技发展专项(2017L3012)

高时空分辨率遥感数据在监测土地快速变化、作物生长,以及物候参数反演等方面具有重要的作用^[1]. Landsat 系列卫星以较长的数据、较高的空间分辨率,以及较好的传感器性能在植被覆盖变化监测、植被生长评估等方面得到广泛应用^[2]. 但在多云地区, Landsat 系列卫星影像云覆盖率较高,且晴空条件下获取的影像数据时间间隔较长、季相不一致,这些都限制了影像的有效利用,使得这类传感器难以实现高频次、周期性的监测. 通过重构 Landsat 时序数据集,插补缺失观测值,可加强对地表动态监测的能力. 噪声的影响普遍存在于遥感图像中,通过一系列方法降低时序数据中的噪声水平,可为各种研究提供可靠的时序数据集^[3]. 朱慧等^[4]利用不同方法对重庆 2010—2014 年中分辨率成像光谱仪(MODIS)时序数据进行重建,认为 WS(whittaker smoother)方法能较好地对不同土地覆盖类型进行重建. 宋春桥等^[5]对藏北地区各植被类型拟合效果较好的非对称高斯函数进行拟合,重构 2007—2009 年 MODIS NDVI(归一化植被指数)时序数据集. 刘亚南等^[6]在传统单 Logistic 模型的基础上,采用参数构建模型对秦岭样区 2001—2013 年 MODIS NDVI 时序数据进行重建. 李明等^[7]利用同一类地物高质量像元均值代替噪声的 S-G 滤波算法,对江西省 2001—2003 年 MODIS NDVI 时间序列进行重建. 殷悦等^[8]通过 6 种方法对鄱阳湖平原地区 2001—2013 年的地球观测系统(SPOT)和 MODIS 时序数据进行重构,认为对于高植被覆盖区域 S-G 滤波算法的去噪效果最优. 为满足大范围、高精度、快速变化的遥感监测, 郭明权等^[9]提出多源遥感数据时空融合技术,此类方法可以克服中等空间分辨率影像时间分辨率过低的局限^[10]. 郭文静等^[11]通过光谱差异改进 ESTARFM(enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model)模型,对 TM(thematic mapper)和 AVHRR 的 NDVI 数据进行融合,有效地实现若尔盖高原 NDVI 数据集的重构. 孙锐等^[12]采用分类拟合的方法,计算光谱距离权重改进 STARFM(spatial and temporal adaptive reflectance fusion model)模型,融合中国环境一号 A/B 星 CCD(HJ-1CCD),重构山东省西北部 NDVI 时序数据集. 张猛等^[13]利用 STARFM 算法,对 Landsat OLI(operational land imager)和 MODIS 数据融合构建空间分辨率为 30 m、时间间隔为 16 d 的时序数据集,用于区域植被净初级生产力(NPP)的遥感估算. Meng 等^[14]基于 STARFM 算法,提出一种新的植被指数融合模型用于融合 HJ-1CCD 和 MODIS 数据,生成 NDVI 时序数据集.

目前,一系列基于降噪的时序数据重构方法已经取得了很好的成果,重构的遥感数据能准确地反映地表特征的变化^[15],但更适用于时间分辨率较高的时序数据集. 时空融合算法利用时间信息和空间信息进行时序数据集的重构,但存在一定的局限性. 首先,时空融合技术非常依赖较低空间分辨率影像的观测值;其次,该方法始终需要清晰无云的影像. 因此,对于快速发生变化的区域,使用时空融合的方法进行变化监测效率较低. 针对目前时间序列数据重构存在的局限性, Zhu 等^[16]提出地表反射率模型,该模型不依赖高时间分辨率影像,生成任意时间的清晰无云的 Landsat 影像. 本文以福州市区某东部面积近 300 km² 的区域作为研究区,采用地表反射率模型进行 Landsat 时序数据集重构.

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

研究区位于福建省福州市区东部,北纬为 26°0′55.81″~26°8′47.41″,东经为 119°21′45.16″~119°33′39.22″,面积约为 300 km². 研究区位置,如图 1 所示.

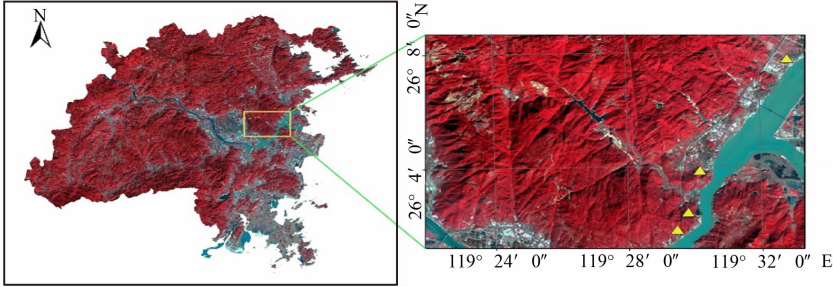


图 1 研究区位置
Fig. 1 Position of study area

由图 1 可知：地形以山地丘陵为主，植被类型多样，森林覆盖率达到 57.8%。研究区属典型的亚热带季风气候，全年云雨天气较多，质量好的遥感影像相对较少。

1.2 数据源及其预处理

基于研究目标，选取 2013—2016 年云覆盖 90% 以下的 Landsat OLI 影像，收集到的影像共 44 景。通过对原始影像进行大气校正，消除大气吸收和散射造成的辐射量误差。大部分影像受云、云阴影等影响严重，对于少量云覆盖的影像，采用 Landsat OLI 自带的第 9 波段云检测，设定阈值对云进行掩膜；对于含云量较高的影像，采用基于对象的 Fmask 算法进行云和云阴影的检测。由于去云、去云阴影后影像依然存在异常值，拟合去云、去云阴影后的时序影像。将拟合影像与 Fmask 算法检测结果进行对比，结果表明：对于没有检测出的异常值，其在蓝光波段的值明显高于模型的拟合值^[17]。

2 研究方法

时序地表反射率预测模型由谐波模型和一个趋势分量组成，用于预测每个波段的地表反射率，模型较为稳定、强健，不容易受噪声（云，云阴影等）影响。Zhu 等^[16,18]利用地表反射率模型，重构美国新英格兰地区 1982—2011 年 Landsat 影像，并利用拟合影像进行土地覆盖的连续变化监测；利用 1982—2013 年 Landsat TM 和 ETM+ 影像，重构美国 6 个地区的 Landsat 时序数据集，并对重构影像进行评价。

地表反射率模型由 4 个系数组成： $a_{0,i}$ 用于估算 i 波段整体的像元值或平均值； $a_{1,i}$ 、 $b_{1,i}$ 用于模拟 i 波段由物候和太阳角度差异引起的年内变化； $c_{1,i}$ 表示 i 波段的年际变化，用于估计 i 波段的长期趋势。影像去云、去云阴影和去异常值等预处理后，剩余每个像元的有效观测值个数达到 12 个，保证模型的精度和稳定。对于有效观测值个数小于 12 大于 6 的像元，采用地表反射率模型；对于有效观测值小于 5 个的像元，使用所有有效观测值的中位数来表示地表反射率。

采用最小二乘法 (OLS) 拟合，时序模型为

$$\rho(i, x) = a_{0,i} + a_{1,i} \cos\left(\frac{2\pi x}{T}\right) + b_{1,i} \sin\left(\frac{2\pi x}{T}\right) + c_{1,i} x.$$

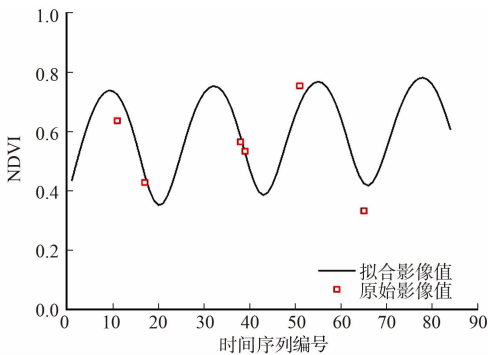
上式中： x 为日期； T 为一年的天数 ($T=365.25$)。

3 结果与分析

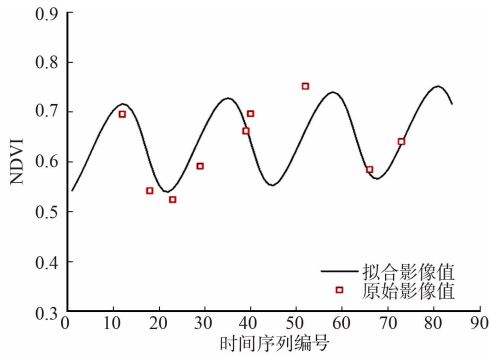
3.1 拟合结果分析

为研究区内每个 Landsat 像元生成时间序列模型，重构 2013—2016 年时序数据集，对 2013—2016 年所有可用的 Landsat OLI 观测值拟合 NDVI 时间序列。选取荷叶、阔叶树、柳树、马尾松 4 种不同类型的植被像元，拟合结果与原始 NDVI 对比，如图 2 所示。图 2 中：时间序列编号 1~16 代表 2013 年，17~39 代表 2014 年，40~61 代表 2015 年，62~84 代表 2016 年。

由图 2 可知：原始序列中大部分点的 NDVI 值都与拟合序列较为接近；对于季节特征变化大的荷叶，NDVI 值变化范围明显大于其他 3 种植被，对于四季常绿的阔叶树和马尾松 NDVI 值全年保持在较高的水平；随着有效像元数的增加，模型拟合效果越好，拟合结果与原始 NDVI 值越为接近。因此，拟合结果与原始有效像元保持较好的一致性，模型能够拟合不同植被稳定的生长变化过程。



(a) 荷叶



(b) 阔叶树

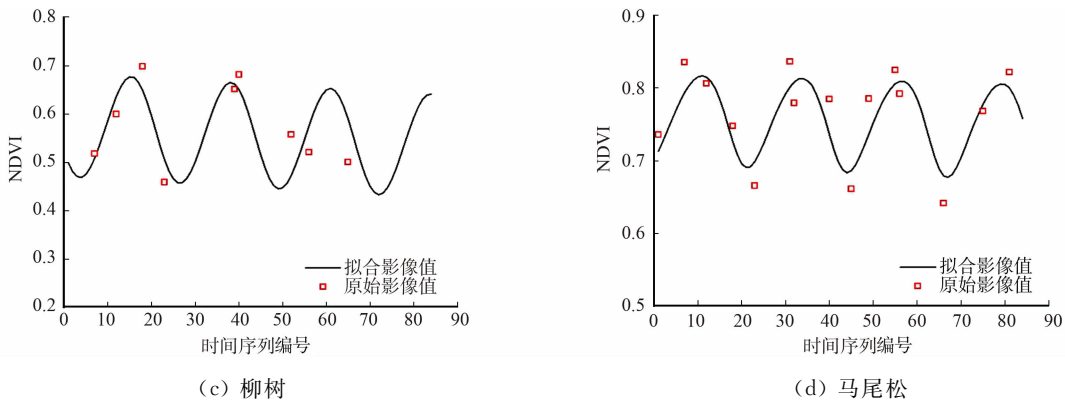


图 2 拟合结果与原始 NDVI 对比

Fig. 2 Comparison of fitting results with original NDVI

3.2 实测光谱验证

2016 年 7 月 22 日、2016 年 11 月 16 日和 2016 年 12 月 23 日分别对研究区内荷叶、阔叶树、柳树、马尾松 4 种类型植被的光谱(图 1)进行测量,利用实测数据,验证模型拟合结果。

拟合结果与实测 NDVI 对比,如图 3 所示。由图 3 可知:阔叶树、柳树的拟合结果变化趋势与实测 NDVI 基本保持一致,7—11 月份 NDVI 值逐渐增大,11—12 月份缓慢降低;马尾松、荷叶的 NDVI 值变化幅度小,NDVI 保持在较高的水平,7—11 月份的拟合结果变化幅度小于实测 NDVI 变化幅度,11—12 月份两者变化趋势基本保持一致;样点的实测值高于拟合结果的 NDVI 值,主要是因为像元尺度下,存在混合信息现象,导致拟合结果的 NDVI 值偏低,而实测值为一个纯净点且植被本身存在覆盖不均匀。因此,不同类型植被的拟合结果与实测值保持了较好的一致性。

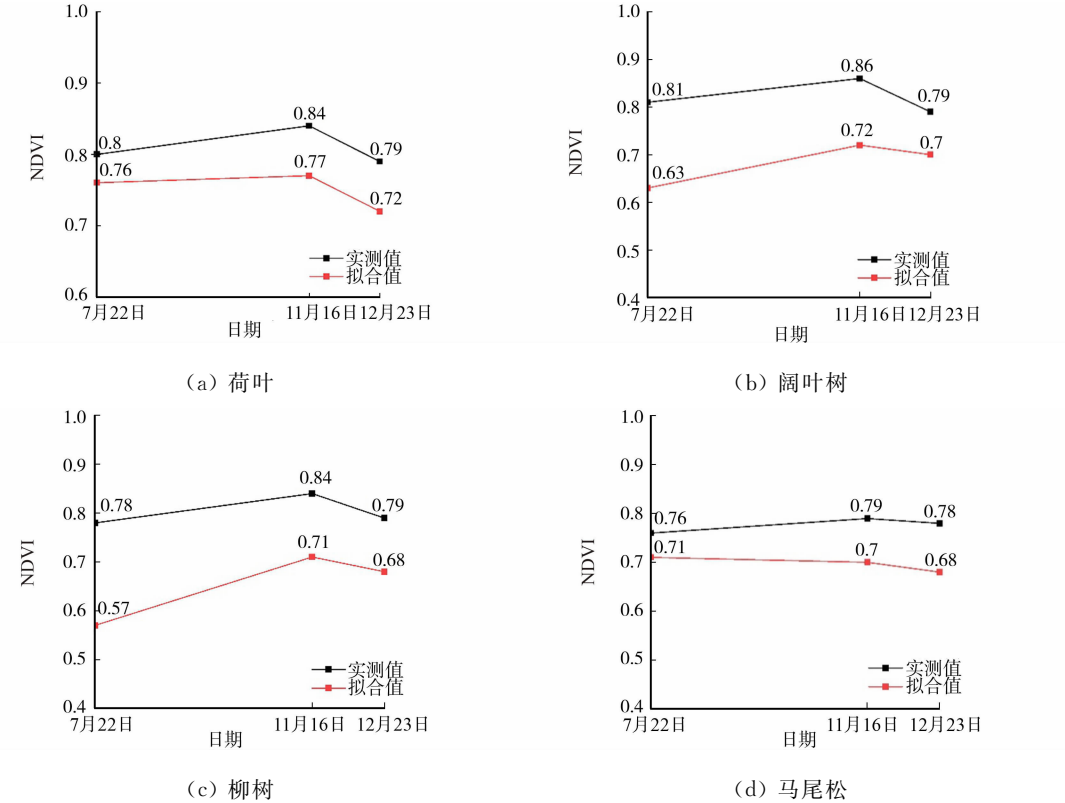


图 3 拟合结果与实测 NDVI 对比

Fig. 3 Comparison of fitting results with measured NDVI

3.3 原始影像验证

选择不同季节且影像质量较好的原始影像与拟合影像进行均方根误差分析,拟合结果与原始影像均方根误差,如表 1 所示。表 1 中:RMSE 为均方根误差;Blue,Green,Red,NIR 为影像波段的名称。

由表 1 可知:可见光波段的 RMSE 较小(以地表反射率为单位,约为 0.01);近红外波段的 RMSE 值较大,这是因为研究区的大部分被植被覆盖,植被在近红外波段能产生较高的反射率;拟合结果与原始影像非常相近,差异很小,拟合精度较高.

分析 2015 年第 270 天的拟合结果与原始影像各波段相关性,拟合结果与原始影像散点图,如图 4 所示.

图 4 中: x 为拟合结果; y 为原始影像; R 为相关系数.由图 4 可知:拟合结果与原始影像的散点分布集中,4 个波段都集中在直线 $y=x$ 附近;各波段的相关系数均高于 0.9,表明两者具有较强的相关性,整体拟合精度较高.

表 1 拟合结果与原始影像均方根误差

Tab.1 Root mean square error of fitting results and original image

时间	RMSE			
	Blue	Green	Red	NIR
2015 年第 270 天	0.06	0.06	0.08	0.020
2016 年第 65 天	0.01	0.11	0.13	0.024
2016 年第 209 天	0.11	0.11	0.14	0.260

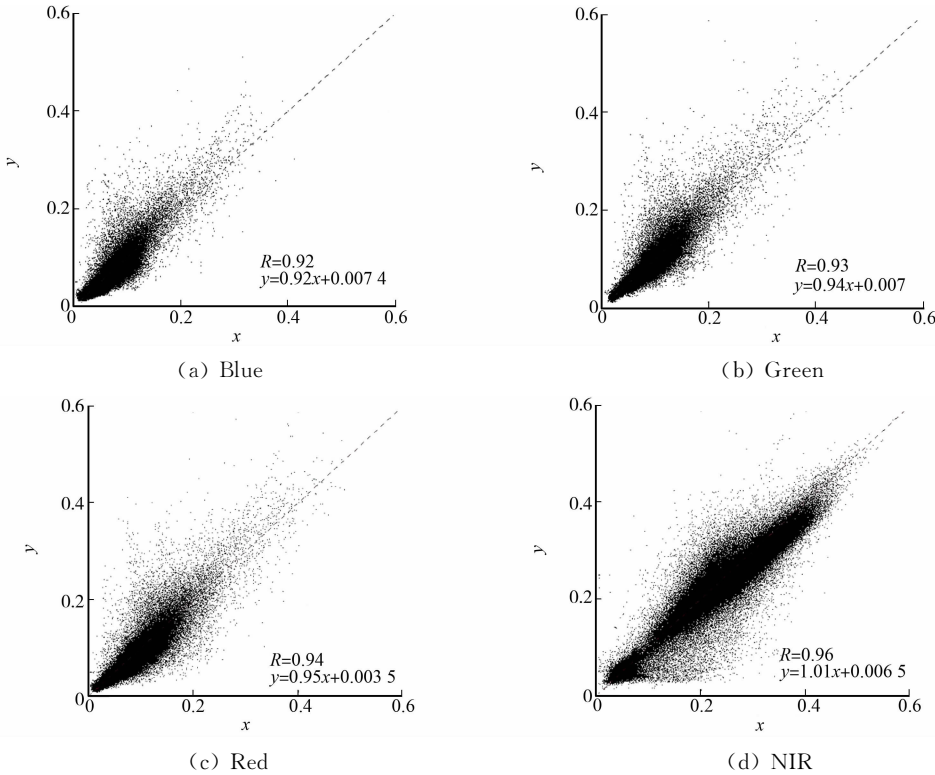
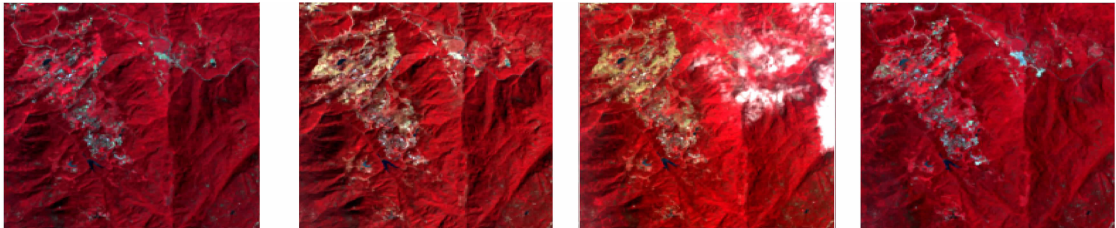


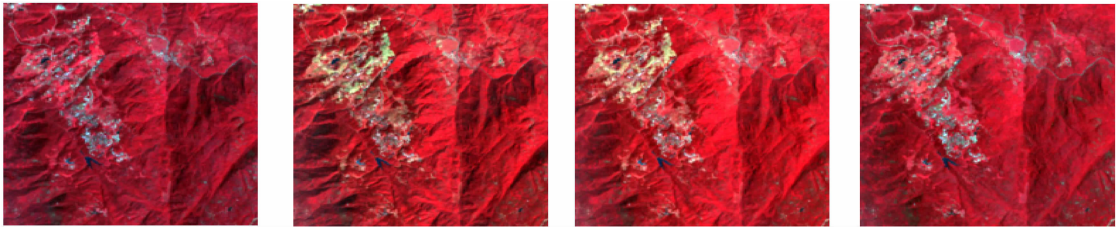
图 4 拟合结果与原始影像散点图

Fig.4 Fitting results and original image scatter image

为了进一步验证模型的能力,拟合 4 个不同季节(2015 年第 270 天;2016 年第 49 天;2016 年第 97 天;2016 年第 209 天)影像,拟合结果与原始影像对比图,如图 5 所示.由图 5 可知:Landsat OLI 波段 5,4,3 合成标准假彩色图像,植被在影像中大致呈红色;2015 年第 270 天与 2016 年第 209 天的拟合影像红色区域面积明显高于 2016 年第 49 天与 2016 年第 97 天,夏秋两季植被覆盖明显高于春夏秋冬两季;拟合影像空间信息与地表覆盖的变化过程均与同一时间的原始影像保持较高的一致性,并且能够清晰地表达植被的物候差异;对于真实 Landsat 影像被云和云阴影覆盖的地方,拟合影像仍然可以提供



(a) 2015 年第 270 天(原始)(b) 2016 年第 49 天(原始)(c) 2016 年第 97 天(原始)(d) 2016 年第 209 天(原始)



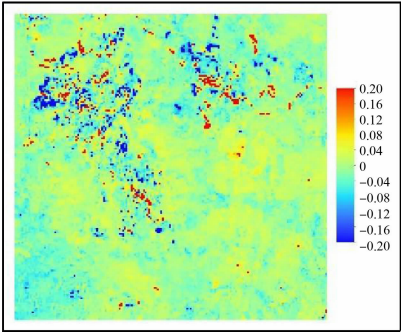
(e) 2015 年第 270 天(拟合)(f) 2016 年第 49 天(拟合)(g) 2016 年第 97 天(拟合)(h) 2016 年第 209 天(拟合)

图 5 拟合结果与原始影像对比图

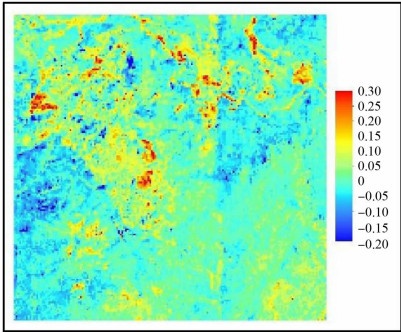
Fig. 5 Comparison of fitting results with original image

清晰的观测。

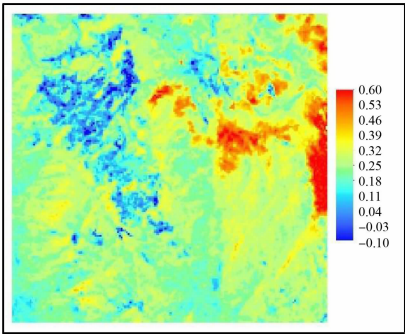
拟合结果与原始影像 NDVI 差值图,如图 6 所示. 由图 6 可知:2015 年第 270 天、2016 年第 49 天、2016 年第 209 天这 3 个时间点的大部分区域 NDVI 差异较小,极小部分差异较大的区域主要集中在地表覆盖变化幅度大的区域;图 5(c)影像存在云的影响,原始影像红光波段的反射率整体偏高,导致拟合结果与原始影像 NDVI 的差值偏大;拟合结果与原始影像的差异较小,说明模型的拟合效果较好。



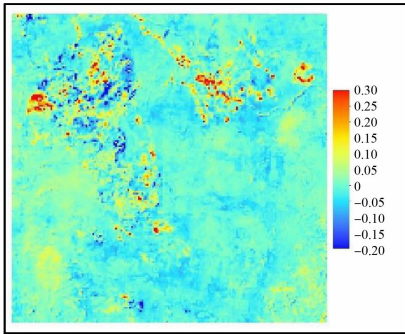
(a) 2015 年第 270 天



(b) 2016 年第 49 天



(c) 2016 年第 97 天



(d) 2016 年第 209 天

图 6 拟合结果与原始影像差值图

Fig. 6 Difference of fitting results with original image

4 结论

采用地表反射率模型,基于 2013—2016 年云覆盖 90% 以下的所有 Landsat OLI 影像,构建 Landsat 遥感时序数据集. 通过地表反射率模型获得的拟合结果与真实影像之间整体具有较高的相关性,各波段的相关系数均高于 0.9,均方根误差较低,可见光波段在 0.01 左右,近红外波段在 0.02 左右. 对不同类型植被均能取得较好的拟合效果,不同类型植被拟合 NDVI 与实测 NDVI 变化趋势基本保持一致. 拟合结果能清晰表现出植被的物候差异,与原始影像之间的差异较小,其空间信息及地表覆盖的变化过程也与原始影像保持较高的一致性. 通过地表反射率模型提供的密集清晰无云影像可用于植被动态变化监测研究,进一步提高植被变化监测的准确性和时效性。

该模型需要大量清晰的 Landsat OLI 影像进行精确的时间序列模型预测,对于长期多云和雪覆盖的区域,可能没有足够的清晰影像满足模型的要求,无法进行精确的时间序列模型预测,下一步将针对这方面进行改进,提出更加全面的时序重建方法.

参考文献:

- [1] 董文全,蒙继华. 遥感数据时空融合研究进展及展望[J]. 国土资源遥感,2018,30(2):4-14. DOI:10.6046/gtzyyg.2018.02.01.
- [2] DIRK P. Moderate resolution remote sensing alternatives: A review of Landsat-like sensors and their applications [J]. Journal of Applied Remote Sensing,2007,1(1):012506. DOI:10.1117/1.2819342.
- [3] 胡光成,周杰,贾立. 中国地区 MODIS NDVI 时序数据集重建及其年际变化趋势分析[C]// 海峡两岸遥感遥测会议. 哈尔滨:[出版者不详],2011:1-7.
- [4] 朱慧,李军. 三种时序 NDVI 重建方法的对比研究:以重庆为例[J]. 山地学报,2017,35(6):919-927. DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000294.
- [5] 宋春桥,游松财,柯灵红,等. 藏北地区三种时序 NDVI 重建方法与应用分析[J]. 地球信息科学学报,2011,13(1):133-143. DOI:10.3724/SP.J.1047.2011.00133.
- [6] 刘亚南,肖飞,杜耘. Logistic 函数方法拟合多时序 NDVI 数据的改进研究[J]. 遥感技术与应用,2015,30(4):737-743. DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0737.
- [7] 李明,沈润平,王迪,等. 基于像元质量分析的 S-G 滤波重建 MODIS-NDVI[J]. 生态与农村环境学报,2015,31(3):425-431. DOI:10.11934/j.issn.1673-4831.2015.03.024.
- [8] 殷悦,陈倩,时光训. NDVI 时间序列数据的去噪重建方法对比[J]. 江苏科技信息,2017(7):39-47. DOI:10.3969/j.issn.1004-7530.2017.07.017.
- [9] 邬明权,牛铮,王长耀. 多源遥感数据时空融合模型应用分析[J]. 地球信息科学学报,2014,16(5):776-783. DOI:10.3724/SP.J.1047.2014.00776.
- [10] GAO Feng, MASEK J, SCHWALLER M, *et al.* On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2006,44(8):2207-2218. DOI:10.1109/tgrs.2006.872081.
- [11] 郭文静,李爱农,赵志强,等. 基于 AVHRR 和 TM 数据的时间序列较高分辨率 NDVI 数据集重构方法[J]. 遥感技术与应用,2015,30(2):267-276. DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.2.0267.
- [12] 孙锐,荣媛,苏红波,等. MODIS 和 HJ-1 CCD 数据时空融合重构 NDVI 时间序列[J]. 遥感学报,2016,20(3):361-373. DOI:10.11834/jrs.20165173.
- [13] 张猛,曾永年. 融合高时空分辨率数据估算植被净初级生产力[J]. 遥感学报,2018,22(1):143-152. DOI:10.11834/jrs.20186499.
- [14] MENG Jihua, DU Xing, WU Bingfang. Generation of high spatial and temporal resolution NDVI and its application in crop biomass estimation [J]. International Journal of Digital Earth,2013,6(3):203-218. DOI:10.1080/17538947.2011.623189.
- [15] 顾娟,李新,黄春林. NDVI 时间序列数据集重建方法述评[J]. 遥感技术与应用,2006,21(4):391-395. DOI:10.3969/j.issn.1004-0323.2006.04.024.
- [16] ZHU Zhe, WOODCOCK C E, HOLDEN C, *et al.* Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting Landsat surface reflectance at any given time[J]. Remote Sensing of Environment,2015,162:67-83. DOI:10.1016/j.rse.2015.02.009.
- [17] ZHU Zhe, WOODCOCK C E. Automated cloud, cloud shadow, and snow detection in multitemporal Landsat data: An algorithm designed specifically for monitoring land cover change[J]. Remote Sensing of Environment,2014,152:217-234. DOI:10.1016/j.rse.2014.06.012.
- [18] ZHU Zhe, WOODCOCK C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data[J]. Remote Sensing of Environment,2014,144:152-171. DOI:10.1016/j.rse.2014.01.011.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)