

## 一种自适应的方法修复 MODIS 坏像元波段反射率

高博<sup>1,2,3</sup>, 宫辉力<sup>1,2,3</sup>, 周珂<sup>4\*</sup>, 王强<sup>5</sup>

- (1. 首都师范大学水资源安全北京实验室, 北京 100048; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;  
3. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 4. 河南大学计算机与信息工程学院, 开封 475004;  
5. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:** 遥感数据从时间尺度、空间尺度为人类生存的环境要素提取提供了有力的支持。遥感数据资源的重要性日益突出, 数据积累周期越长其存在的潜在价值就越大, 但是随着时间的推移, 遥感数据也会随着传感器的衰退或损坏导致数据质量降低、无效数据等情况。针对该现象提出了一种自适应的多元拟合方法来修复光学遥感数据由于传感器损坏导致的无效观测; 该方法通过考虑地物波谱反射特性实现坏像元修复, 基于地物波谱在不同通道上的反射特性之间的关系, 构建波谱自适应筛选因子来优化波段反射率修复模型, 从而精确地修复坏像元的地表反射率。基于该方法, 修复了 Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 5 波段数据在北京地区的无效观测 (传感器坏像元); 验证表明该方法精度统计指标  $RMSE$  为 0.011, 相比其他方法最好的结果提升大约 8%,  $R^2$  达到 0.82。整体上, 该方法不但具有较好的精度, 且具有更好的适用性。

**关键词:** 图像处理; 像元修复; MODIS; 自适应筛选因子

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)01-0158-07

## An adaptive method for restoring terra MODIS band reflectance of bad pixels

GAO Bo<sup>1,2,3</sup>, GONG Huili<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Ke<sup>4</sup>, WANG Qiang<sup>5</sup>

- (1. Beijing Laboratory of Water Resource Security, Capital Normal University, Beijing 100048;  
2. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048;  
3. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048;  
4. School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004;  
5. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** Remote sensing data become more and more important as the application of spatial data mining is increasing in the field of human health and safety. In addition, the potential values of remote sensing data are increasing with the accumulation of the remote sensing data; however, the deteriorating quality of the remote sensing data will inevitably hinder the further application of remote sensing data in various fields. Considering the contradiction between the urgent requirements from various fields for remote sensing data and the deteriorating quality of the remote sensing data, Restoration of band reflectance observed by optical sensors is of great scientific and practical importance. In this work, a method was used to restore the Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) band 5 land surface reflectance (MOD09GA) by constructing an adaptive model with optimal multi-band information, which considered the converting relation of land surface reflectance between the channels of MODIS and the broadband (e.g., Visible, Near-Infrared and Shortwave). The proposed method has a better physical infrastructure and applicability than other methods. A test conducted in western Beijing showed that the proposed method gave rise to a more precise  $RMSE$  of 0.011 ( $R^2 = 0.82$ ) than other methods (WCLF and Robust M-Estimator Multiregressions). The proposed method is able to address bad pixels under different conditions (e.g., a single bad channel or all bad channel), and it shows better applicability than other methods.

收稿日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (41501380/D0106), 国家自然科学基金重点项目 (41130744/D0107), 中国博士后科学基金 (2016M591209) 和北京市博士后工作经费资助项目共同资助。

作者简介: 高博, 博士, 助理研究员。E-mail: gaobo@irsa.ac.cn

\* 通信作者: 周珂, 博士, 讲师。E-mail: gis418670826@gmail.com

**Key words:** image processing; pixel restoring; MODIS; adaptive filtering factor

当前, 星载传感器已经形成了高、中和低空间分辨率相结合, 高、中和低时间分辨率相结合的局面。不同的轨道, 不同的传感器各有特点, 丰富多样的遥感数据资源为遥感大数据的发展提供了坚实的基础, 更提升了遥感大数据在不同领域的应用潜力<sup>[1-4]</sup>。但是, 传感器发生故障的概率是存在的, 一些运行周期较长的传感器已经出现了故障, 例如 Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 传感器 5 波段和 Aqua MODIS 传感器 6 波段存在规律的坏像元, Landsat-7 搭载的 Enhanced Thematic Mapper (ETM+) 传感器的扫描校正部件损坏导致了多个通道大约 22% 的无效观测, 等等。由此可见, 坏像元在卫星观测中普遍存在, 而且愈发成为影响遥感技术发展以及遥感在各个领域应用的一个重要因素。

有效处理坏像元已经成为当前的研究热点, 也有大量的工作围绕这一问题开展。早期, 图像处理技术被引进来修复图像的异常值, 从简单的数学插值方法, 到考虑空间分布和地类相关性的全局拟合及局部分类拟合 (WCLF)<sup>[5]</sup>, 都较好的实现了小范围局部坏像元的修复。接下来, 依赖于波谱相关性的方法通过匹配波段之间的柱状图来选择相关波段, 并考虑地物类型、样本数据优化来优化拟合方案<sup>[6-7]</sup>, 还有基于影像观测模型的坏像元修复方法<sup>[8]</sup>, 以及考虑用定量遥感的思想来修复坏像元<sup>[9]</sup>。但是, 当前方法普遍局限于单一传感器的单一通道, 且精度评价不完善, 这导致这些方法很少被广泛应用于定量遥感反演中。

本研究从波谱之间的相关性着手, 通过传感器不同通道反射率之间的关系来构建波段修复模型; 同时考虑多波段同时损坏的情况, 引入二向反射分布函数 (BRDF) 经验数据库, 来填补波谱信息; 这些处理使本方法具备了一定的物理属性和意义, 且能够有效处理各种情况下的传感器坏像元。本文

包括以下几个部分: (1) 介绍当前传感器坏像元修复研究的进展和面临的问题, 针对问题提出解决方案; (2) 介绍该方法的物理基础, 并系统阐述该方法; (3) 在北京地区展开实验, 通过验证来讨论不同方法的优缺点; (4) 总结创新点, 讨论存在的不足。

## 1 理论基础与方法

### 1.1 理论基础

**1.1.1 卫星通道反射率与宽波段反射率之间的转换关系** Liang 等在 1999 年的工作中基于辐射传输模型对地表反射率由窄波段转换宽波段的方法进行了总结分析, 提出了一个适用于多种传感器的转换方法<sup>[10]</sup>。基于该工作, MODIS 通道反射率与宽波段反射率之间的经验关系如表 1 所示。可以构建多个 MODIS 5 波段反射率与其他波段反射率的经验关系, 见式 (1)。

$$\rho_{\text{shortwave}} = \sum_l w_l \rho(l) \quad (l = \text{MODIS } b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7)$$

$$\rho_5 = w_0 \rho_{\text{shortwave}} - w_1 \rho_1 - w_2 \rho_2 - w_3 \rho_3 - w_4 \rho_4 - w_5 \rho_6 - w_6 \rho_7 \quad (1)$$

$$\rho_5 = w_0 \rho_{\text{nr}} - w_1 \rho_2 - w_1 \rho_6 - w_2 \rho_7$$

$$\rho_5 = w_0 \rho_{\text{nr}} - w_1 \rho_2 - w_2 \rho_7$$

如上所述, 式 (1) 中的系数和精度随时间、位置的变化而变化。

**1.1.2 BRDF 与地表反射率之间的关系** 相同的地表类型在相同的波谱范围内具有相同的 BRDF。理论上可以认为观测获得的通道地表反射率与 BRDF 模型计算获得的通道地表反射率应该是相同的。实际上, 受限于模型精度、BRDF 反演方法的物理机制, 观测获得的通道反射率与 BRDF 模型计算获得通道反射率仅存在稳定的线性关系, 见式 (2)。

$$\rho_m(\theta_i, \theta_v, \phi_i, \phi_v, \lambda) = Coe \times BRDF_m(\theta_i, \theta_v, \phi_i, \phi_v, \lambda) + offset \quad (2)$$

其中,  $BRDF_m$  是由 BRDF 模型计算获得的 MODIS 通道反射率,  $\rho_m$  是由 MODIS 传感器观测的通道反射率,  $Coe$  是关系的斜率,  $offset$  是截距。

表 1 MODIS 通道反射率与宽波段反射率之间的转换系数<sup>[10]</sup>

Table 1 The converting coefficients between broadband and MODIS band

波段 Band	1	2	3	4	5	6	7	常数 Constant
短波 Short wave	0.3973	0.2382	0.3489	-0.2655	0.1604	-0.0138	0.0682	0.0036
可见光 Visible light	0.3265		0.4364	0.2366				-0.0019
近红外 1 Near infrared 1		0.5447			0.1363	0.0469	0.2536	-0.0068
近红外 2 Near infrared 2		0.5271			0.1795		0.2755	-0.0071

### 1.2 MODIS 坏像元波段反射率修复

传感器坏像元分为两种, 一种是个别通道有坏

像元, 一种是多个、全部通道有坏像元。本研究针对该问题, 拟提出一个兼顾波谱信息、BRDF 经验

知识的坏像元修复方案，该方法是基于物理机制的经验方法，应该具有更好的精度和适用性。该方法包括几个步骤，具体见流程图（图1）。

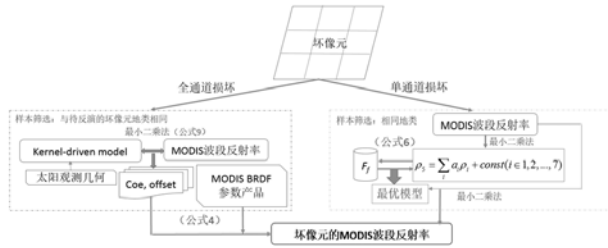


图1 方法流程

Figure 1 The flowchart of the proposed method

**1.2.1 构建自适应的MODIS波段地表反射率修复模型** 基于式(1)中描述的MODIS 5波段地表反射率与其他波段之间的关系可构建3个波段地表反射率修复模型；为了保证修复精度，引入筛选因子 $F_f$  (factor of filter)，见式(3)。首先认为式(1)提供的模型具有相同的精度，然后根据不同的模型进行拟合，并将拟合系数带入的模型中计算各个样本数据的模拟值 $\rho_{model}$ ，统计各个样本数据 $\rho_{sample}$ 与模拟值的绝对差和相关系数，基于相关系数和平均绝对精度来确定自适应筛选因子：

$$F_f = \frac{\sum_{i=1}^n abs(\rho_{model,i} - \rho_{sample,i})}{n} / correlate(\rho_{model}, \rho_{sample}) \quad (3)$$

基于自适应筛选因子可以确定最优模型：

$$\begin{aligned} \rho_3 &= a_1\rho_1 - a_2\rho_2 - a_3\rho_3 - a_4\rho_4 - a_5\rho_5 - a_6\rho_6 - a_7\rho_7 + const & F_{f1} \angle F_{f2}, F_{f1} \angle F_{f3} \\ \rho_3 &= a_1\rho_1 - a_2\rho_2 - a_3\rho_3 + const & F_{f2} \angle F_{f1}, F_{f2} \angle F_{f3} \\ \rho_3 &= a_1\rho_1 - a_2\rho_2 + const & F_{f3} \angle F_{f1}, F_{f3} \angle F_{f2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\rho_3 = \sum_{i=1}^7 a_i \rho_i + const (i \in 1, 2, \dots, 7)$$

其中， $\rho_i$ 是MODIS在第*i*波段观测的地表反射率， $(a_1, a_2, \dots, a_7)$ 是模型系数， $F_{f1}$ 、 $F_{f2}$ 和 $F_{f3}$ 是模型1、2和3的自适应筛选因子。

式(4)将模型中的宽波段项（短波波段、近红外波段等）调整为常数项 $const$ ，构建了针对Terra MODIS 5波段的修复模型，进而可以通过选择自适应筛选因子最优的模型来执行坏像元的修复。

**1.2.2 基于BRDF经验数据库的坏像元修复模型** 由于所有通道受到破坏，坏像元没有参考通道可用，如果依然采用基于波谱的方法修复坏像元必然会导

致异常值或者低精度值的现象。此时，MODIS BRDF参数产品作为经验数据库能够较好地描述各个通道坏像元的反射率。依据理论部分的描述，模型自身必然存在误差，反演方法的控制不可能完美，再加上BRDF参数在时间上与坏像元观测时间不完全匹配，必然存在误差。基于核模型的组合的BRDF可以描述为：

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi_v, \phi_i, t) = f_{iso} + f_{vol} k_{vol}(\theta_i, \theta_v, \phi_v, \phi_i) + f_{geo} k_{geo}(\theta_i, \theta_v, \phi_v, \phi_i) \quad (5)$$

其中，各向同性项为1表示地表的漫反射特性，体散射项 $k_{vol}$ 描述了地表介质对入射能量的吸收反射机制，几何光学项 $k_{geo}$ 描述了地表场景的遮蔽作用对地表反射的影响， $f_{vol}$ 、 $f_{geo}$ 、 $f_{iso}$ 是各项的系数。基于该BRDF模型及BRDF经验数据库，参考地物分类数据，依据不同的地表类型挑选待修复通道的运行像元数据，并根据运行像元数据的太阳观测几何驱动BRDF模型计算的通道反射率，将挑选的同地类通道反射率与对应的BRDF经验参数计算的通道反射率构建驱动数据集 $A$ (BRDF参数计算的通道反射率)和 $Y$ (待修复通道的运行像元反射率)，运用最小二乘法计算获得式(2)中的系数 $Coe$ 和截距 $offset$ 。

$$A = \begin{bmatrix} R_{11} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ R_{n1} & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} Coe \\ offset \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} \rho_{m1} \\ \vdots \\ \rho_{m n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (7)$$

## 2 实验区和实验数据

基于提出的方法，在北京地区展开实验工作。采用了多种遥感数据和产品：(1) MODIS地表反射率数据(MOD09GA)中的5波段数据的坏像元是目标数据，其他波段是驱动数据。(2) MODIS BRDF参数产品(MCD43A1)可以描述其16d反演周期内地物的BRDF，构建日卫星观测的波段地表反射率与BRDF驱动的波段地表反射率之间的经验关系。(3) 地表分类数据MCD12Q1被用于识别研究区的地表覆盖类型(表2)。

本研究对2012年9月26日—29日连续4d的MODIS卫星5波段的坏像元进行修复。

表2 遥感数据参数描述

Table 2 The parameters of experimental data

数据名称 Data name	空间分辨率/m Spatial resolution	时间分辨率/d Temporary resolution	范围 Spatial range	其他 Note
MOD09GA	500	1	北京地区	MODIS 波段反射率
MCD43A1	500	16	北京地区	MODIS BRDF 参数
MCD12Q1	500	365	北京地区	基于IGBP分类体系

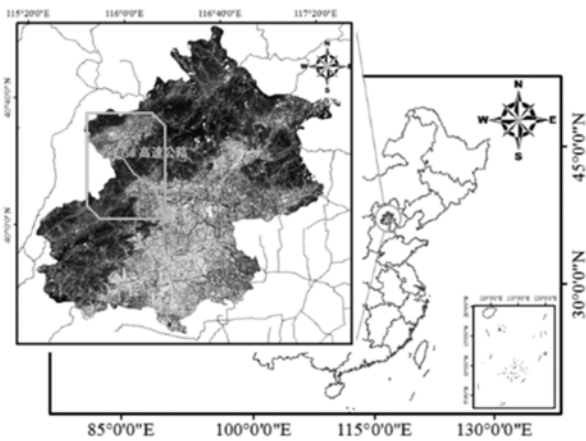


图 2 实验区: 中国北京地区的 Landsat 5 TM 真色彩合成图 (红: band3, 绿: band2, 蓝: band1)

Figure 2 Studying area: the true-color image based on Landsat 5 TM (R: b3, G: b2 and B: b1) in Beijing

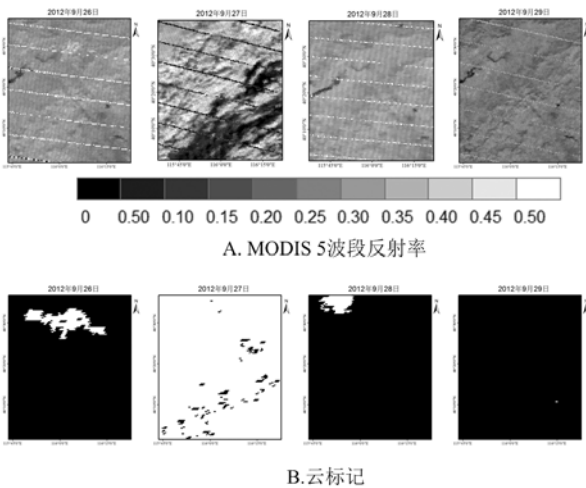


图 3 实验数据: A.MODIS 5 波段地表反射率数据 (2012 年 9 月 26 日—29 日); B 是与 A 中数据对应的云标记产品 (白色为有云, 黑色为无云)

Figure 3 Studying data: A. MODIS band 5 reflectance from September 26th of 2012 to September 29th of 2012, B.Cloud data corresponding with A (White indicated that the sky is cloudy, while black indicated the day with a cloudless)

从图 3 可以看到在不同天气条件 (无云、少云及多云天气), MODIS 5 波段观测的数据总是存在规律的坏点分布, 可以确定传感器损坏是导致坏像元问题的原因。采用 MODIS 质量控制数据来识别坏像元, 并用不同的方法对其进行修复。

### 3 结果与分析

在实验区内, 采用本研究提出的方法开展实验, 并引入其他方法进行对比。

#### 3.1 WCLF 方法的结果

基于上述描述的数据 (图 3), 采用 WCLF 方法

进行修复实验。具体结果展示在图 4 中。该方法有效修复了无云、少云情况下的坏像元数据, 但是对于 2012 年 9 月 27 日的多云情况则无法修复, 分析原因可知, 该方法需要临通道的数据作为样本来修复坏像元, 而云影响了 MODIS1~7 通道的数据。

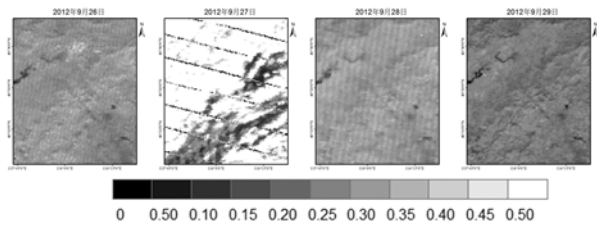


图 4 基于 WCLF 方法反演的 MODIS 5 波段坏像元地表反射率 (2012 年 9 月 26 日—2012 年 9 月 29 日)

Figure 4 Restored MODIS band 5 reflectance of bad pixels by using WCLF from September 26th of 2012 to September 29th of 2012

为了检验该方法的绝对精度, 随机设置了一个模拟坏像元区, 将原本无坏像元的区域设置为坏像元 (图 5-C 白色区域), 并用该方法修复 2012 年 9 月 26 日模拟区内的像元, 进而统计修复结果与真值的差异性, 来确定方法的精度。拟合结果展示了更好的平滑性, 也能较合理的展示地表反射率的空间分布, 精度统计则显示两者的均方根误差 RMSE 为 0.023, 相关系数平方  $R^2$  为 0.30。

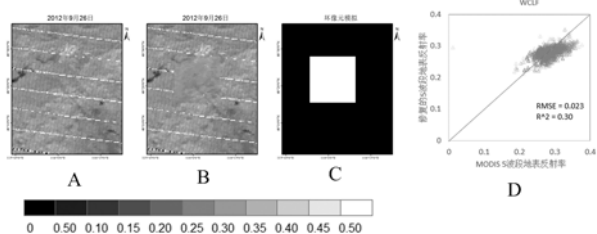


图 5 2012 年 9 月 26 日 MODIS 5 波段地表反射率 A、MODIS 修复实验结果 B 和 MODIS 模拟坏像元区 C, 以及修复结果与观测值的散点图和统计精度 D

Figure 5 MODIS band 5 reflectance on September 26th of 2012 A, restored result at simulating cloud area by using WCLF B, the simulating cloud area C and 2D scattering plot between A and B at the simulating cloud area D

#### 3.2 Robust M-Estimator Multiregressions 方法

Robust M-Estimator Multiregressions 方法采用全通道数据作为自变量, 并在拟合中采用样本优化方案。基于该方法的结果展示在图 6 中。从图 6 中可以看到, 在 2012 年 9 月 26 日、28 日和 29 日的修复结果消除了坏像元的影响, 且空间分布合理;

在 2012 年 9 月 27 日的结果中，坏像元没有被有效的消除。

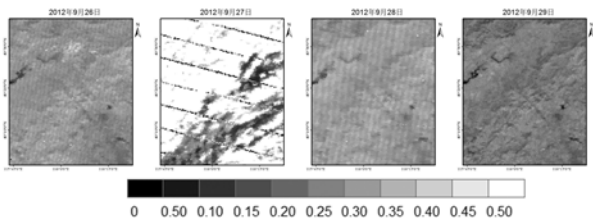


图 6 Robust M-Estimator Multiregressions 修复的 MODIS 5 波段坏像元地表反射率 (2012 年 9 月 26 日—2012 年 9 月 29 日)

Figure 6 Restored MODIS band 5 reflectance of bad pixels by using Robust M-Estimator Multiregressions from September 26th of 2012 to September 29th of 2012

同样, 采用 2012 年 9 月 26 日 MODIS 5 波段数据反演图 5-C 的模拟坏像元来确定该方法的精度 (图 7)。从统计结果中可以看到, 相比 WCLF 方法, 该方法的精度提升明显, 相关性更好。

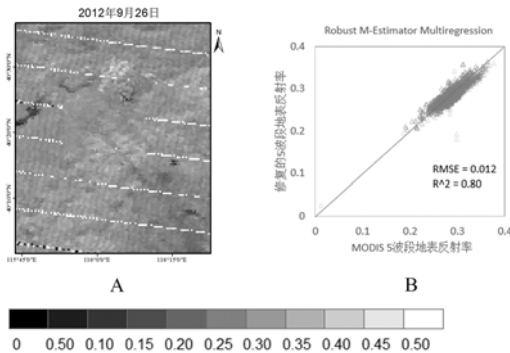


图 7 基于图 5C 的 Robust M-Estimator Multiregressions 修复结果 A 与观测值的散点图及精度统计 B

Figure 7 Restored MODIS band 5 reflectance at simulating cloud area by using Robust M-Estimator Multiregression A and 2D scattering plot B between and MODIS band 5 reflectance at the simulating cloud area

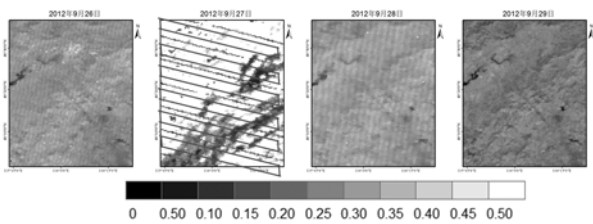


图 8 本方法修复的 MODIS 5 波段坏像元地表反射率 (2012 年 9 月 26 日—2012 年 9 月 29 日)

Figure 8 Restored MODIS band 5 reflectance of bad pixels by using the proposed method from September 26th of 2012 to September 29th of 2012

### 3.3 自适应的多元拟合方法 (本方法)

本方法采用全通道数据作为自变量, 并在拟合

中利用自适应筛选因子优化模型组合方案, 使反演结果具有较好的效果。基于该方法的结果展示在图 8 中。

从图 8 中可以看到在 2012 年 9 月 26 日、28 日和 29 日的修复结果中, 很好的消除了坏像元的影响, 且空间分布合理; 这与上述两个方法的表现相近。在 2012 年 9 月 27 日的结果中, 坏像元也有变化, 但是不能清楚地识别该修复结果是否具有较好的精度和合理性。同样, 采用相同于 WCLF 模拟验证方案来确定本方法的精度。本方法展示了更优的统计精度和结果 (均方根误差 RMSE 为 0.011, 相关系数平方  $R^2$  为 0.82), 相比前两个方法都有不同程度的提升, 具有更好的精度表现。

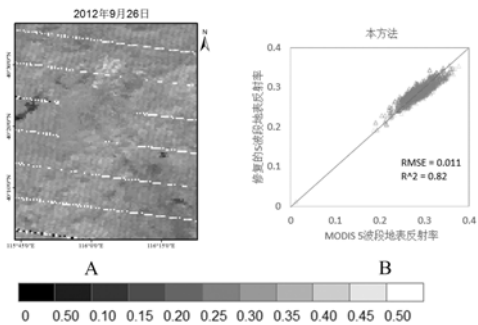


图 9 基于图 5C 模拟数据的本方法修复结果 A 与观测值的散点图和统计精度 B

Figure 9 Restored MODIS band 5 reflectance at simulating cloud area by using the proposed method A and 2D scattering plot B between and MODIS band 5 reflectance at the simulating cloud area

### 3.4 3 个方法的对比与分析

基于以上 3 个方法的实验结果可以清晰地看到, 在单通道坏点的情况下, 3 个方法都可以有效地填充坏像元, 并展示出合理的空间分布。但是, 通过散点图定量统计可得, WCLF 的精度相对最低 ( $RMSE=0.023$ ,  $R^2=0.30$ ); Robust M-Estimator Multiregressions 方法居中 ( $RMSE=0.012$ ,  $R^2=0.80$ ); 本方法最优 ( $RMSE=0.011$ ,  $R^2=0.82$ )。基于上述精度统计可知, 本方法的精度要优于 WCLF 和 Robust M-Estimator Multiregressions。相比 Gao 等人在 2006 年工作中实现日尺度地表反射率反演工作中的绝对误差 (波段 1 是 0.0033, 波段 2 是 0.0035, 波段 3 是 0.0044, 波段 4 是 0.0129, 波段 5 是 0.0103, 波段 7 是 0.0078) [11], 本方法对 MODIS 5 波段反射率修复结果与观测值的绝对误差为 0.0092。综上所述, 本方法的精度是可信的。此外, 本方法具有物理机制, 具有更好的适用性。

从 3 个方法在 2012 年 9 月 27 日反演的结果可

以看出, WCLF 和 Robust M-Estimator Multiregressions 显然不能处理整幅影像有异常值的情况, 而本方法则执行了算法。为了检验本方法的处理效果, 提取图 8 中的红色四边形标注的坏像元数据数据 (2012 年 9 月 26 日—2012 年 9 月 29 日)。如果修复的结果是合理的, 在短时间内相同位置的像元观测应该具有比较接近的空间分布。表 3 中展示了

2012 年 9 月 27 日卫星观测在坏像元位置修复前后的数据与相邻时间数据的相关性统计, 统计显示修复的结果表现出更合理的空间分布。因为在短时间内地表的状况相对稳定, 虽然 BRDF 在不同时间的观测会有变化, 但是仍然会有较大的相关性, 根据 4 d 数据的相关性比较, 可知修复后结果展示的相关性范围是合理的, 因此可以判断该修复方法可行。

表 3 2012 年 9 月 26 日—2012 年 9 月 29 日共 4 d 卫星 5 波段观测在 2012 年 9 月 27 日坏像元位置的观测相关性

Table 3 The correlation coefficients of MODIS band 5 reflectance and restored result at bad pixels from September 26<sup>th</sup> of 2012 to September 29<sup>th</sup> of 2012

日期 Date	2012-09-26	2012-09-27	2012-09-28	2012-09-29	2012-09-27 (修复) Restore
2012-09-26		-0.027	0.078	0.173	0.143
2012-09-27	-0.027		0.001	-0.027	-0.114
2012-09-28	0.078	0.001		0.256	0.243
2012-09-29	0.173	-0.027	0.256		0.793
2012-09-27 (修复) Restore	0.143	-0.114	0.243	0.793	

### 3.5 多通道损坏情况下的数据修复

卫星数据通道坏像元的情况既有单通道坏像元的情况 (Terra Modis 5 波段和 Aqua Modis 6 波段), 也有全通道损坏的现象 (Landsat 7 ETM+)。根据以上的分析和比较不难发现上述两种方法 (WCLF 和 Robust M-estimator Multiregressions) 不能解决全通道损坏的像元修复问题, 本方法则体现出较好的修复能力, 为了定量的验证在全通道损坏情况下本方法的精度, 设计了验证实验。该实验仍然采用图 5-C 的模拟坏像元, 将该坏像元扩展到 MODIS 1~7 全部通道中, 然后, 依然采用本方法处理 2012 年 9 月 26 日 MODIS 5 波段模拟像元中的反射率数据。

图 10 展示了本方法修复的模拟区数据。与观测数据相比, 可以发现该结果基本反映了地表真实的空间分布, 但是相比之下修复结果围绕真值的波动较单通道坏像元情况下的修复结果的波动更大, 这主要是因为全通道损坏导致在相同位置缺乏参考通道数据, 这直接使 WCLF 和 Robust M-estimator Multiregressions 方法不执行, 也间接影响到本方法的精度, 从而使其精度低于单通道坏像元的修复结果。尽管如此, 本方法修复的结果展示出了 0.025 的均方根误差, 其均方根误差百分比 (9%) 仍未超过 10%, 相比 Gladkova 等在 2012 工作中展示的 MODIS 6 波段修复精度 (RMSE 从 0.025 到 0.045) [12], 仍然具有可信的精度。因此, 基于上述工作, 可以确定本方法不但具有一定的物理机制, 并且在实际应用中具有更好的精度, 更重要的是本算法的适用性使其更加实用。

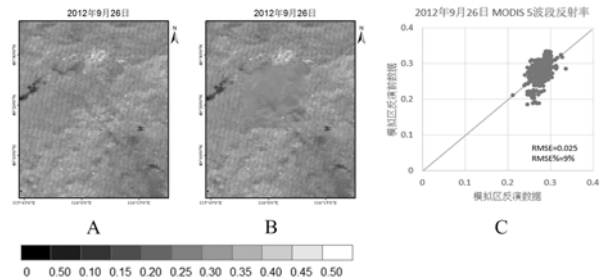


图 10 基于本方法的多通道损坏情况下坏像元修复结果比较, A 修复前的 MODIS 5 波段数据, B 修复后的 MODIS 5 波段数据, C 修复前后数据的对比统计

Figure 10 Restoring MODIS band 5 reflectance while all channels having same bad pixels and statistic the precision of the proposed method, pre-restored MODIS band 5 reflectance A, restored MODIS band 5 reflectance by using the proposed method B, 2D scattering plot C between and MODIS band 5 reflectance

## 4 讨论与结论

本研究针对当前传感器坏像元导致数据质量下降的问题, 考虑地物在不同波谱通道上的相关性, 并引入自适应筛选因子来优化基于多通道的修复模型, 相比前期的工作不但适当引入了对地物波谱反射特性的考虑, 同时解决了基于波谱的方法对多通道同时损坏情况下像元修复能力不足的问题。在验证实验中, 本方法展示出更好的精度和适用性。综上所述, 本方法首次提出了自适应筛选因子, 不但考虑了通道之间的相关性, 更确保了修复模型的自优化能力; 还使该方法具有更广泛的适用性和更好的精度。

但是,在未来的工作中仍然需要针对以下不足之处开展进一步研究:(1)未考虑样本数据的优化方案,而 Robust M-Estimator Multiregressions 考虑了这个问题,虽然修复效果略差,但是样本优化在未来工作中必须引入;(2)需要更精细的分类数据处理,本方法采用的 MODIS 地表分类数据是一种基于 IGBP 分类标准的分类数据,具体到北京地区其分类精度必然受限,这直接影响到修复数据的样本选取质量;(3)需要继续开展更广泛的验证工作,将本方法扩展到不同的区域和不同的传感器上。

### 参考文献:

- [1] 高洪涛, 陈虎, 刘晖, 等. 国外对地观测卫星技术发展[J]. 航天器工程, 2009, 18(3): 84-92.
- [2] 高峰, 冯筠, 侯春梅, 等. 世界主要国家对地观测技术发展策略[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(6): 565-576.
- [3] 汪曦. 卫星遥感气溶胶光学厚度与地面细颗粒物浓度和居民日死亡率的关联性研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [4] 张波. 江宁县钉螺分布与遥感卫星图像中植被指数之间关系的研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2002.
- [5] SHEN H F, ZENG C, ZHANG L P. Recovering reflectance of AQUA MODIS band 6 based on within-class local fitting [J]. IEEE J-STARS, 2011, 4(1): 185-192.
- [6] LI X H, SHEN H F, ZHANG L P, et al. Dead pixel completion of Aqua MODIS band 6 using a robust M-estimator multiregression[J]. IEEE Geosci Remote S, 2014, 11(4): 768-772.
- [7] RAKWATIN P, TAKEUCHI W, YASUOKA Y. Restoration of Aqua MODIS band 6 using histogram matching and local least squares fitting [J]. IEEE T Geosci Remote, 2009, 47(2): 613-627.
- [8] 王荣彬, 曾超, 姜湾, 等. Terra MODIS 第 5 波段红外遥感影像条带噪声的探测与校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 273-277.
- [9] LI X H, SHEN H F, ZHANG L P, et al. Recovering quantitative remote sensing products contaminated by thick clouds and shadows using multitemporal dictionary learning [J]. IEEE T Geosci Remote, 2014, 52(11): 7086-7098.
- [10] LIANG S L, STRAHLER A H, WALTHALL C. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: A simulation study [J]. J Appl Meteorol Clim, 1999, 38(6): 712-725.
- [11] GAO F, MASEK J, SCHWALLER M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance [J]. IEEE T Geosci Remote, 2006, 44(8): 2207-2218.
- [12] GLADKOVA I, GROSSBERG M D, SHAHRIAR F, et al. Quantitative restoration for MODIS band 6 on Aqua [J]. IEEE T Geosci Remote, 2012, 50(6): 2409-2416.