

引用格式: Xu Yanhao, Liu Xiaolong, Shi Zhengtao, *et al.* Study on Invalid Pixel Repair Methods for Landsat Dry Season Images in Tropical Areas[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6): 1394-1403. [徐艳豪, 刘晓龙, 史正涛, 等. 热带地区 Landsat 干季数据的无效像元修复方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1394-1403.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1394

热带地区 Landsat 干季数据的无效像元修复方法研究

徐艳豪^{1,3}, 刘晓龙^{1,2}, 史正涛¹, 高书鹏¹

(1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南师范大学高原地理过程与环境变化云南省重点实验室, 云南 昆明 650500;

3. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: 热带地区完整中分辨率时间序列遥感数据对于地表过程及地表扰动观测具有重要应用价值。针对热带地区 Landsat 数据存在云、雾污染及传感器本身缺陷导致的大量数据缺失问题, 在现有的条带数据缺失填充算法(GNSPI)基础上, 提出三次修复法。该方法能自动识别当前待修复像元前后 48 d 内有效参考像元, 继而经三次修复法实现当前缺失数据的修复。实验结果表明: 三次修复法整体平均修复精度(R^2)可达 0.88, 该方法弥补了 GNSPI 填充算法需要整幅参考影像不存在无效像元方可执行的苛刻要求, 提高了有效观测像元的利用率, 对于获取热带地区长时间序列有效观测数据具有重要意义。

关键词: Landsat; 数据缺失; 数据修复; 热带地区

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)06-1394-10

1 引言

自美国陆地卫星(Landsat)于1972年7月23日发射以来, Landsat数据被广泛应用于农林测绘、土地利用规划、水资源规划、环境质量、公共卫生等领域^[1]。Landsat数据成为应用最广泛的卫星遥感数据源之一。特别是Landsat 8 OLI从2013年2月发射到目前为止, 获取了全球范围覆盖的大量卫星数据。其空间分辨率较高、波段覆盖较全的特点, 在遥感应用中发挥着重要作用^[23]。然而, 在可见光遥感成像中, 受到云雾等天气条件的影响, 可用数据缺失严重, 特别是在热带地区及蒸腾作用强的森林、冰川等地区Landsat数据缺失更为常见^[2-4]。

如何修复由于Landsat本身缺陷(如Landsat-7条带缺失)或天气条件引起的数据缺失(如云、雾覆

盖导致的无效观测), 提高热带地区数据的利用率, 是可见光遥感应用面临的重要问题。针对这一问题, 大量学者提出了多种解决方法, 如Sebastián Martinuzzi等^[5]通过数据融合技术修复Landsat数据缺失部分。Jin等^[6]基于光谱相似群概念, 通过在目标影像中寻找参考影像相似像元来替代待修复影像像元修复影像。在Landsat 7条带缺失数据修复方法的研究中, USGS/NASA的学者曾提出5种方法, 即全景直方图匹配法(Global Histogram Match, GHM)、全景差分直方图匹配法(Global Difference Histogram Match, GDHM)、局部直方图匹配(Local Histogram Match, LHM)、局部差分直方图匹配法(Local Difference Histogram Match, LDHM)、自适应局部回归(Adaptive Local Regression, ALR)法, 虽然这些方法对于地表覆盖均一区域的修复效

收稿日期: 2019-08-25; 修订日期: 2020-11-20

基金项目: 云南省青年基金“基于多源遥感数据的植被类型精细分类方法研究”(2016FD021), 云南省水利厅水利科技项目“云南主要人工经济林对区域水资源安全的影响调查研究”(2014003)。

作者简介: 徐艳豪(1997—), 女, 云南保山人, 硕士研究生, 主要从事热带植被遥感分类研究。E-mail: 1913830603@qq.com

通讯作者: 刘晓龙(1986—), 男, 内蒙古赤峰人, 讲师, 博士, 主要从事高分辨率热带植被遥感的理论和应用研究。E-mail: liuxl@mail.bnu.edu.cn

果较好,但是要求辅助影像与目标影像之间的时间间隔较小并且有较少的云、雪覆盖^[7]。Zeng等^[8]则提出了加权线性回归法(The Weighted Linear Regression, WLR)以及在缺少像素时,使用正则化算法(Laplacian Prior Regularization Method, LPRM)对缺失像元进行填充。Pringle等^[9]提出了利用地统计插值的方法进行影像的修复,得到了较好的影像修复效果,但是这类方法计算效率低,花费的时间长^[9]。在近几年国内学者的研究中,孙悦等^[21]提出了一种面向对象的像元插值方法(Object-Oriented Pixel Interpolator, OOPi),该插值方法能获得较好的影像修复结果,但是要求获取的辅助影像与待修复影像间没有较大的地表覆盖差异^[21]。虽然以上的方法都能取得一定的影像修复效果,但是在异质性较强的区域,其影像修复精度还存在一定的不足。为解决这一问题,Zhu等^[12]在邻近相似像元插值^[11]与地统计插值^[9]的基础上,提出了地统计邻域相似像元插值方法(Geostatistical Neighborhood Similar Pixel Interpolator, GNSPI)。GNSPI方法解决了由于地表异质性强而导致修复精度低的问题,相关研究表明,相较于WLR、LLHM、LPRM以及NSPI 4种方法,GNSPI方法在地表空间异质性强的区域及不同季节的数据缺失修复精度都表现更佳^[22]。但该方法对于参考影像的要求较为苛刻,对于待修复影像的某一缺失数据,它要求在该像元位置的前后时期内至少有一景参考影像存在,且数据完整时才能对该区域进行完整修复,否则,该区域将不能被完整修复。

现有方法在数据缺失不严重的中、高纬度地区的Landsat影像缺失值(或无效观测值)修复中能得到较好的修复结果。但是,针对热带地区数据缺失量大的特点,如何更好地利用有限的有效观测数据,通过无效像元修复构建这一地区时间序列Landsat数据,依然是亟待解决的问题。针对这一问题,本文在现有可见光遥感数据填充方法(GNSPI)的基础上,提出一种有效利用有限有效观测数据的Landsat数据修复方法,以提高热带地区Landsat可用数据量。该方法对于提高热带地区陆表资源观测具有重要的应用价值。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

研究区为云南省西双版纳傣族自治州,位于云

南省最南端(21°10′~22°36′N, 99°55′~101°50′E),面积19 582.45 km²^[13]。研究区属热带季风气候,长夏无冬,干湿季分明,年平均气温年际变化平稳,一般在15~25℃之间,年降雨量1 161.80~1 515.10 mm。中海拔地区无霜期较长,大概在320 d以上,而低海拔地区终年无霜,年日照时数1 837.1~2 174.20 h^[14]。该地区地形复杂,多低山和丘陵,盆地较少,海拔高度大部分在1 500 m以下。在冬半年(10月~3月)该地区常被大雾所覆盖,20世纪90年代以来,冬半年平均雾日数达54 d^[16]。地表覆盖类型多,空间异质性较高。由于特殊的地理环境特征,导致该地区陆地遥感观测数据存在大量由于云、雾覆盖导致的无效数据^[17]。

2.2 数据

随机选取了研究区内Landsat 5、Landsat 7、Landsat 8部分时段数据。研究区受季风影响干、湿季分明,湿季云、雾覆盖持续时间长,导致可用数据较少^[18]。因此,本文选取各年份干季为研究窗口(即当年的10月初至次年的3月末),包括Landsat 5数据:1989~1990年10景、1994~1995年10景、2000~2001年12景、2006~2007年13景;Landsat 7数据:2002~2003年11景;Landsat 8数据:2013~2014年12景、2014~2015年12景、2015~2016年12景(如表1所示),所选影像均下载自美国地质勘探局(<http://glovis.usgs.gov/>)。本文修复数据为可见光、近红外和短波红外波段,红外波段不在考虑范围内。

3 研究方法

由于热带地区大量缺失数据的存在,对有效时间窗口内可用的完整参考影像搜索形成了较大障碍,GNSPI的这一使用条件限制了该模型的应用。为了解决参考数据不足的问题,本文提出了对数据缺失部分的参考影像搜索方法。该方法通过缩小数据搜索范围,提高可用参考数据数量。为方便解释整个算法流程,将参考影像搜索方法命名为“有效观测数据自动识别方法”,基于搜索数据的GNSPI填补方法命名为“三次修复法”。

3.1 有效观测数据自动识别

本文所指“无效”观测数据是指陆地资源遥感观测中,由于云、雾遮挡和传感器本身缺陷导致的观测数据不可用或缺失。Landsat数据的无效像元主要指由于云、雾覆盖及传感器本身导致的数据缺失。本文采用FMask算法进行识别中云、雾覆

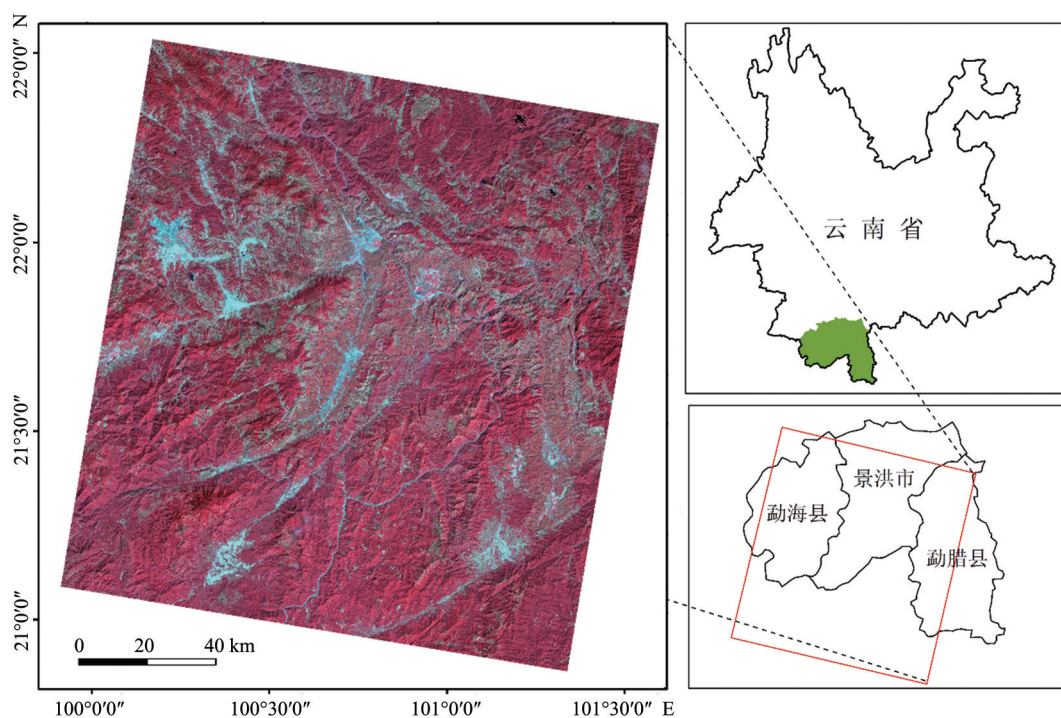


图1 研究区地理位置

审图号:云S(2017)055号

Fig.1 Location of the study area

盖^[19]。Landsat 7 ETM+影像自2003年后出现的条带缺失源自USGS发布的数据产品。通过云、雾识别和条带缺失数据提取,对相应观测数据进行无效观测数据去除。

对去除云、雾和条带缺失像元后的待修复像元,采用相邻前后时间的有效观测像元进行修复。由于随时间间隔的增加,地物的变化变大,影像像元值的相关性降低,采用时间间隔较大的参考影像修复当前待修复像元时修复精度会降低^[20]。因此,本文设置待修复像元前后各48 d内的可用数据为有效数据选取的窗口。Landsat系列卫星数据的时间分辨率为16 d,因此,当数据的可用性在时间序列上保持完整时,前后各有3景观观测数据(前48天3景,后48天3景)可以作为修复中的参考数据源。首先,以当前待修复影像获取时间为基准,针对影像待修复区域,搜索其前、后各48 d内的有效像元,并将离当前待修复像元成像时间最近的影像像元作为修复参考像元(前、后第16 d);当第1个成像周期(前后第16 d)内没有可用参考像元时,则搜索成像时间间隔为第2个周期(前、后第32 d)的影像像元,若存在有效观测像元,则选为参考像元;否则,以此类推,搜寻第3个成像周期(前、后第48 d)的可用参考像元;若前后48 d内均不存在有效参考影像,则设待修复区域像元值为背景值。其过程示意

图如图2所示。

3.2 三次修复法

采用基于空间地统计插值理论的GNSPI模型对缺失数据进行修复。GNSPI算法需要在待修复像元位置的前后时期同时具备有效参考数据时才能进行修复,否则,不能对影像缺失进行填补。由于在有效参考数据自动识别中,获取的能够用于当前无效像元修复的数据存在3种情况,即待修复像元前后均存在参考数据、仅在前一时期存在有效参考影像和仅在后一时期存在有效参考影像,本文将这种数据修复方法命名为三次修复法,其方法流程如图3所示。

在三次修复法中,针对待修复像元的第一次修复采用待修复像元前期、后期参考像元均存在的情况;第二次修复在第一次的修复中没有得到修复的像元,但待修复像元前期像元存在、后期像元不存在的情况;第三次修复在第二次修复中对尚未修复,但待修复像元前期像元不存在、后期像元存在的情况。三次修复法的目的是提高参考数据的利用效率以及待修复数据的修复效率。

4 结果分析

针对热带地区数据缺失修复的关键在于高质量参考数据的选取,本文提出的三次修复法与GN-

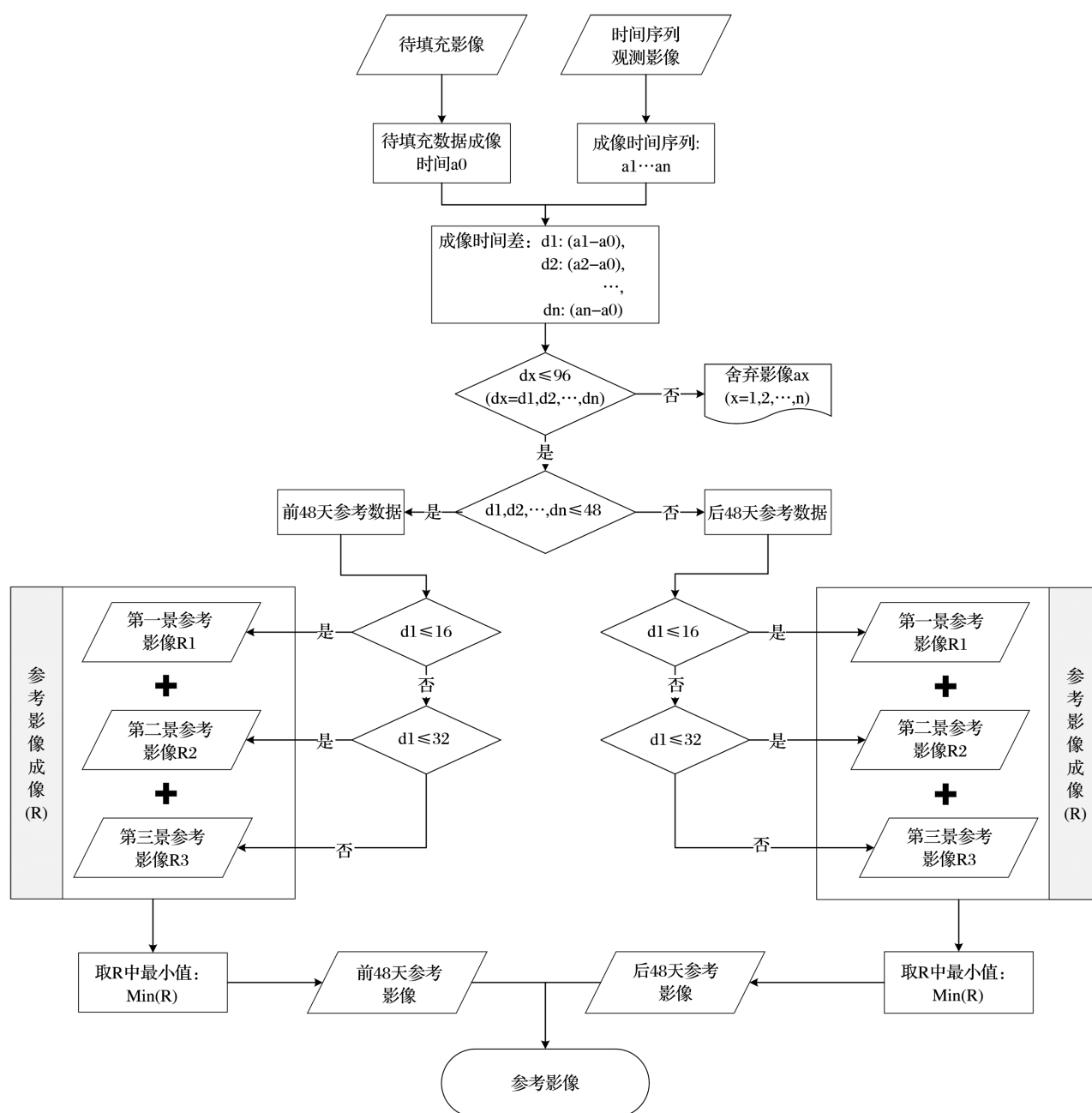


图2 有效观测数据自动识别方法流程

Fig.2 Flow chart of the automatic identification of effective observation data

SPI方法获取的参考数据量(GNSPI参考影像数)如表2所示。结果表明,在待修复数据量保持一致的情况下,虽然最终得到的修复数据也是一致的,但本文所提方法能够得到更多的参考数据量(三次修复法参考影像数),在本文所选研究区内,三次修复法的参考影像数大约是 GNSPI 参考影像数的 1.45 倍。

4.1 “三次修复法”的修复精度

为验证结果的可靠性,本次采用对真实影像进行模拟然后修复,将修复结果与真实影像进行比

对,验证得出修复结果的可靠性。而为了更有效地评价修复结果的有效性,本次研究还采用两个评价指标定量分析修复后的结果与真实影像值之间的差异,第一个是决定系数(R^2),其主要是将观测数据的像元实际值与影像修复值进行对比计算,一般说来, R^2 越接近于1,表示影像修复效果越好。另外一个评价指标是均方根误差(RMSE),其中,RMSE越大,表示修复的误差越大;反之,越小^[21]。

为验证有效观测数据自动识别、三次修复方法的有效性,选取了 Landsat 8 数据作为研究数据,其

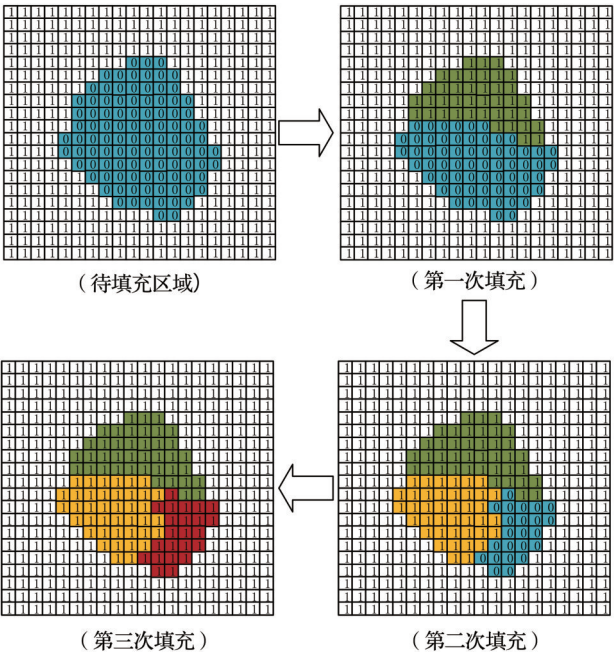


图 3 三次修复法示意

Fig.3 Schematic diagram of triple repair method

中,待填充数据获取自 2014 年 2 月 25 日,参考数据源有 6 景,前期参考数据来自于 2014 年 1 月 8 日、1

月 24 日和 2 月 9 日,后期参考数据来自于 2014 年 3 月 11 日、3 月 27 日和 4 月 12 日,填充结果如图 4 所示。

影像修复结果如图 4 所示,三次修复法实现了地表异质性强烈区域影像的较好修复结果。图 5 所示的各个波段修复精度表明,修复精度最高的为 Coastal 波段, R^2 高达 0.92,其余依次为 Blue、Green、Red、SWIR2 和 SWIR1 波段, R^2 分别为 0.91、0.90、0.89、0.88 和 0.87,修复精度较低的波段为 NIR 波段, R^2 为 0.83。整体平均修复精度为 0.88。从 RMSE 看,修复误差较小的在 Coastal、Blue 波段,而修复误差较大的为 NIR、SWIR1 波段,与 R^2 基本上保持着修复精度越高,修复误差越小的反比关系。

对三次修复法的实验结果表明,虽然该方法能够获取较高精度的影像修复结果,但是修复精度同样受到了若干因素的影响。

4.2 影像修复精度的影响因素

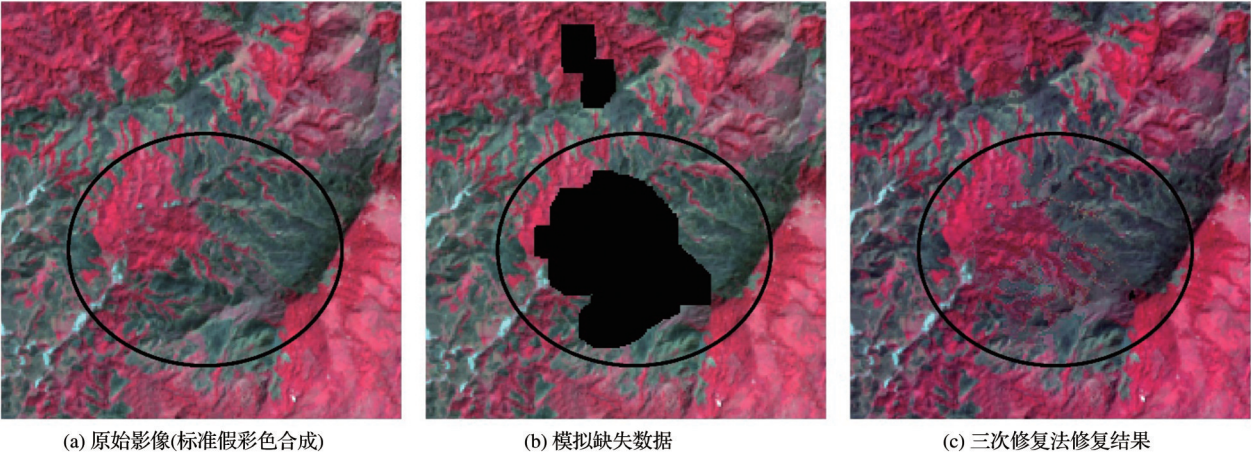
4.2.1 云识别对影像修复精度影响

尽管本文采用 Fmask 云检测算法识别云、云阴影,但是受云识别精度所限,并不能将所有的云、

表 1 不同方法获取到的参考影像数量

Table 1 The number of reference images obtained by different methods

数据	获取年份	待修复数据(景)	GNSPI参考影像数(景)	三次修复法参考影像数(景)	修复数据(景)
Landsat-5	1989~1990	10	18	26	10
	1994~1995	10	18	26	10
	2000~2001	12	22	32	12
	2006~2007	13	24	35	13
Landsat-7	2002~2003	11	20	29	11
Landsat-8	2013~2014	12	22	32	12
	2014~2015	12	22	32	12
	2015~2016	12	22	32	12



(a) 原始影像(标准假彩色合成) (b) 模拟缺失数据 (c) 三次修复法修复结果

图 4 影像修复结果

Fig.4 Image repair result

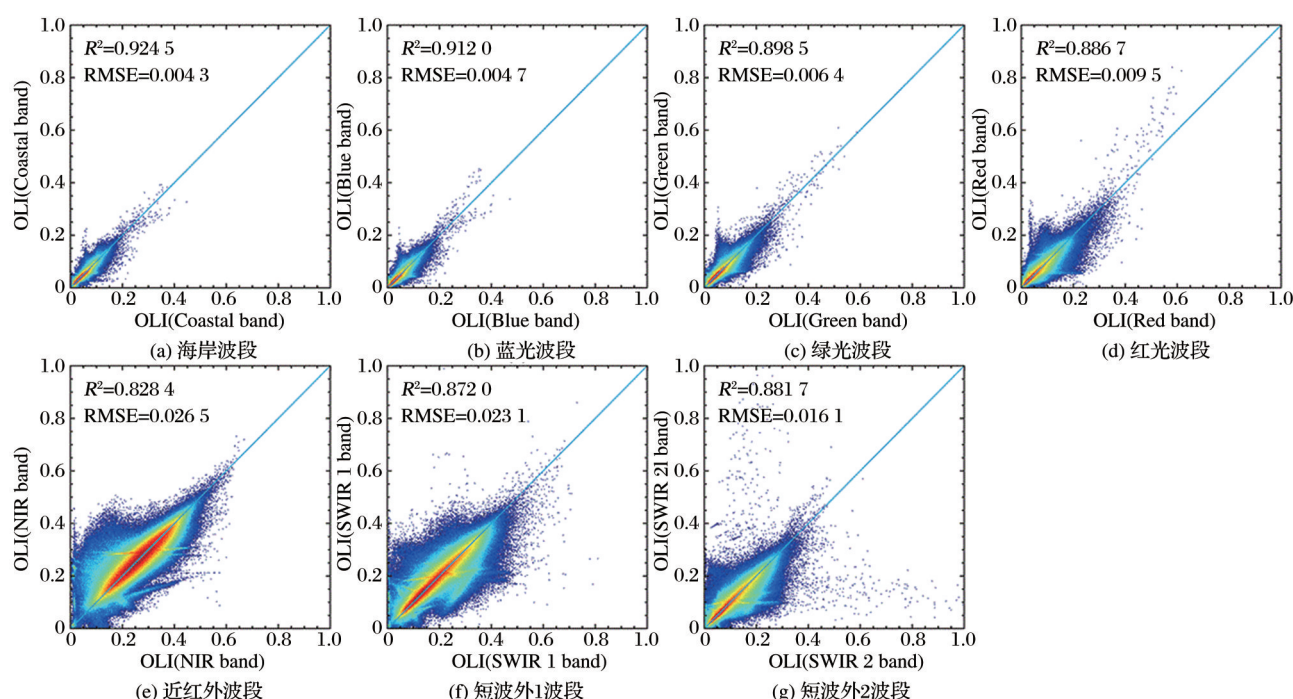


图5 影像修复结果在各个波段上的修复精度

Fig.5 Repairing accuracies for each of the Landsat data bands

雾、云阴影精确识别出来^[19]。因此,在经过预处理的影像中,仍有部分残留云、雾、云阴影。残留的云、雾、云阴影会对本文所提修复方法的修复精度产生很大影响。为此选取了Landsat 5数据分析三次填充法中云识别对影像修复精度的影响。待修复数据获取自2007年1月21日,可用参考数据3景,前期参考数据获取自2007年1月5日,后期参考数据获取自2007年2月6日和2月22日。

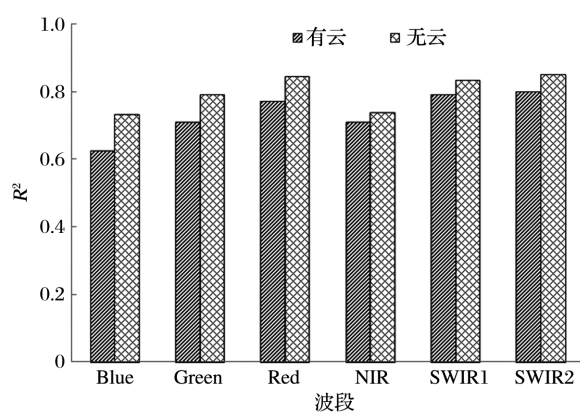


图6 云覆盖对三次修复法修复精度的影响

Fig.6 Influence of cloud coverage to the image repair accuracy of the triple repair method

数据修复精度如图6所示,当参考影像未经过手动去云时(仅采用Fmask进行云识别及去除),平均修复精度(R^2)为0.73。而手动去除Fmask不能识

别的云、雾、和云阴影时,平均修复精度(R^2)为0.80,比前者提高了0.07。通过决定系数 R^2 可以看出,对参考影像去云后修复,其修复精度在各个波段上均高于不去云的情况,精度提高最大的波段为Blue波段, R^2 提高了0.11,其余依次为Green、Red、SWIR2、SWIR1波段,提高精度分别为0.08、0.07、0.06、0.05,精度提高最小的NIR波段也达到了0.03。从波段上看,参考影像不去云的情况下最高修复精度为SWIR2波段, R^2 达到了0.80,其余依次为SWIR1、Red、Green、和NIR波段, R^2 分别为0.79、0.77、0.71、0.71,修复精度最低的波段为Blue波段, R^2 为0.62。而在参考影像经过手动去云的情况下,修复精度在SWIR2波段最高, R^2 为0.85,其余依次为Red、SWIR1、Green和NIR波段,修复精度最低的波段为Blue波段, R^2 为0.73。

4.2.2 不同修复方法对影像修复精度的影响

为了分析本文所提方法的有效性,采用上述研究参考影像未经过手动去云所用数据,针对同一待修复Landsat影像分别用本文所提方法和GNSPI方法进行了对比分析。结果表明,与GNSPI方法相比,本文方法不仅能实现缺失数据的最大化修复,而且修复精度也优于GNSPI方法。如图7所示的模拟云缺失Landsat 5影像,对该模拟影像采用相同的GNSPI填充参数,分别采用本文修复方法和GN-

SPI方法对该数据进行修复,从图7可以看出,在参考数据量相同的情况下,直接采用GNSPI方法时,并不能将影像完全修复,修复好的影像依然存在部分缺失,而三次修复法则能够实现影像的完全修复。

修复结果的精度分析如图8-9所示,三次修复法与GNSPI方法整体精度相差较小。但本文所提修复方法修复精度整体高于GNSPI方法,在NIR波段最为明显,该三次修复法精度(R^2)高出GNSPI方法0.05,其次是SWIR1、Green、SWIR2、Blue波段,分别高出GNSPI方法0.04、0.01、0.01、0.005,而在Red波段二者趋于一致, R^2 偏差接近零,所有结果的均方根误差(RMSE)均小于0.05。从波段上看,两种修复方法的修复精度最高均为SWIR2波段,GNSPI方法精度为0.79,三次修复法精度为0.80,GNSPI方法修复中其余波段(次分别为Red、SWIR1、Green、和NIR波段)依 R^2 分别为0.77、0.75、0.70、0.66,修复精度最低的波段为Blue波段, R^2 为0.61。三次修复法修复中其余各波段(依次为SWIR1、Red、Green和NIR波段)的 R^2 分别为0.79、0.77、0.71、0.71,修复精度最低的波段为Blue波段, R^2 为0.62。

4.2.3 影像修复参考数据源对修复精度的影响

除云识别精度和不同修复方法对影像修复结果精度有影响外,数据源对修复精度同样会产生影响,Landsat同源数据的修复精度高于不同源Landsat数据的修复精度。分别以Landsat-8作为同源数据(4.1节)、Landsat 8和Landsat 7作为不同源数据,验证本文方法中数据源对修复精度的影响。在不同源数据的修复中,以Landsat 7数据为参考数据修复Landsat 8数据,参考数据为6景,前期参考数据获取自2014年1月16日、2月1日、2月17日,后期参考数据分别获取自2014年3月5日、3月21日、4月6日。数据修复精度及其对比如图10所示,对于不同源数据之间的修复精度, R^2 平均值为0.70,最小值为0.47,而同源数据的修复精度在各个波段上均高于前者,平均修复精度为0.88,高于不同源数据修复精度0.18。精度差别最大的波段为NIR波段,基于同源数据的修复精度(R^2)高于非同源数据修复精度0.36,其余依次为Blue、SWIR1、Green、SWIR2波段,分别高于0.18、0.17、0.16、0.12,差别最小为Red波段,高于非同源数据修复精度0.11修

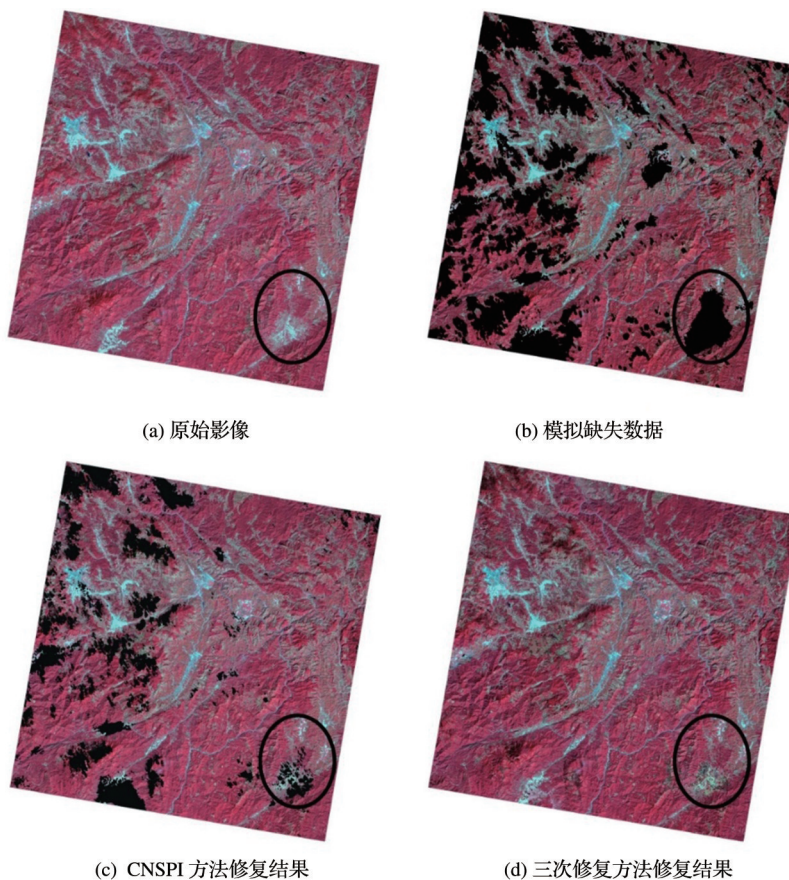


图7 不同修复方法修复结果

Fig.7 The repair results of different repair methods

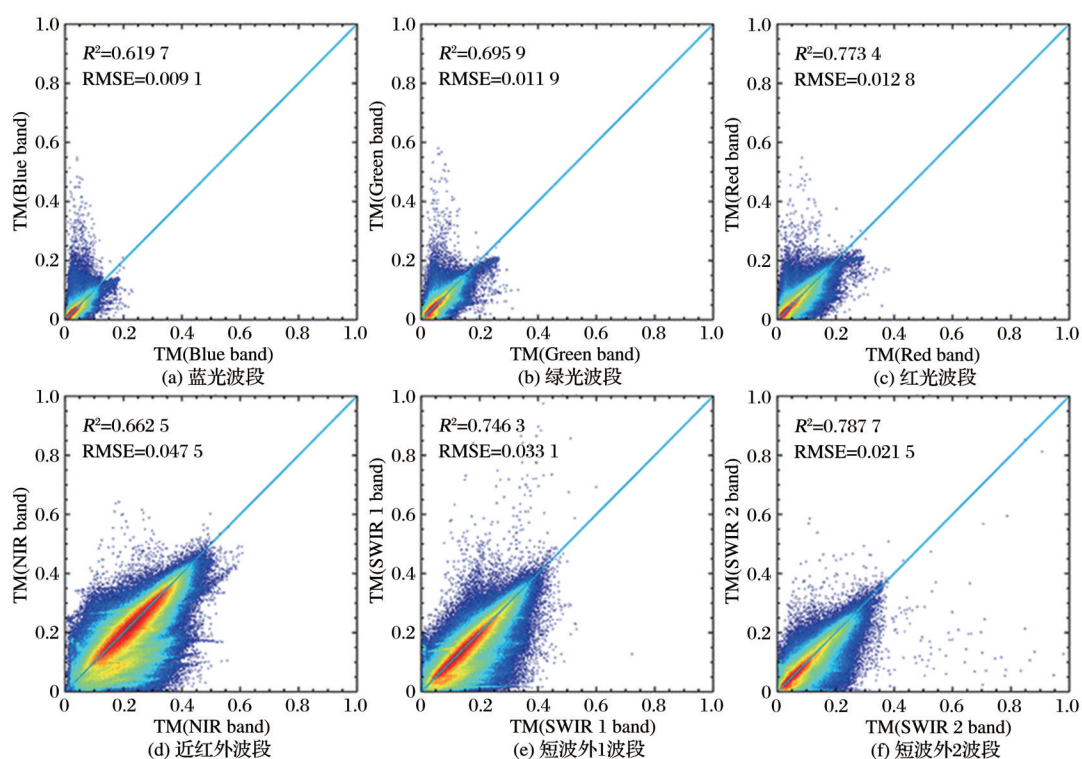


图 8 GNSPI方法在各个波段的修复精度

Fig.8 The repair accuracy of GNSPI method in each band

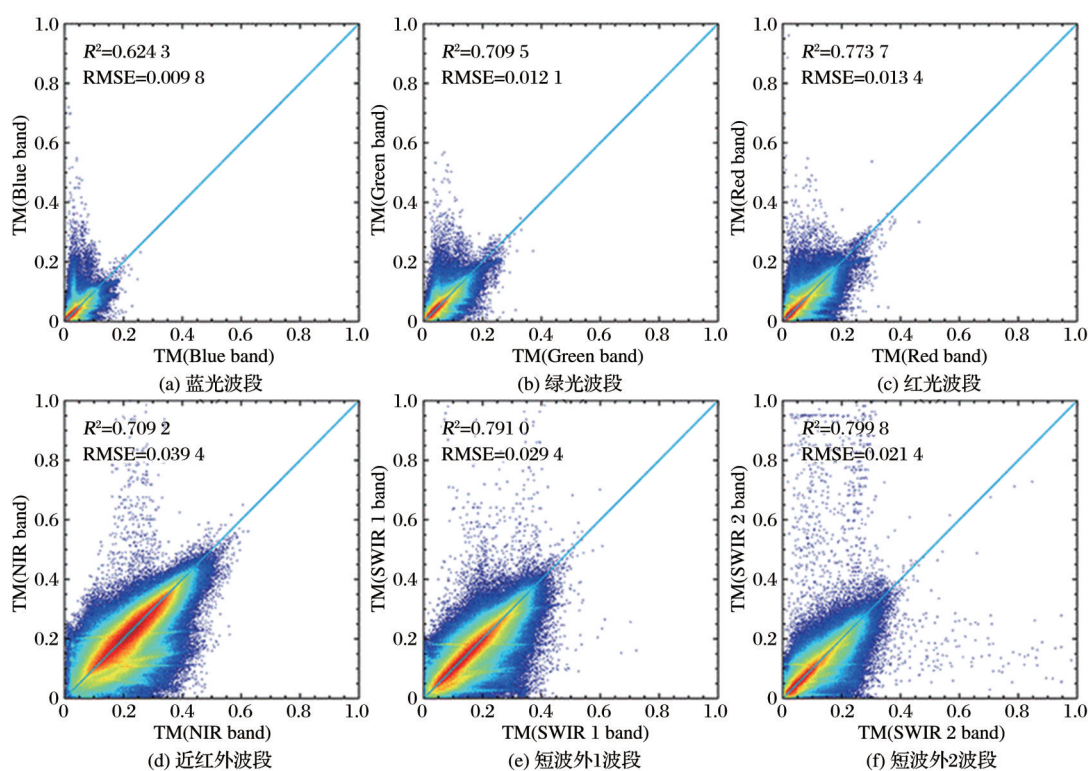


图 9 三次修复法在各个波段的修复精度

Fig.9 Data repair accuracy for each band of Landsat by the triple repair method

复结果中,同源数据的最高修复精度为 Blue 波段, R^2 达到了 0.91, 其次为 Green、Red、SWIR2 和 SWIR1 波段, R^2 分别为 0.90、0.89、0.88、0.87, 修复

精度最低的波段为 NIR 波段, R^2 为 0.83。而在不同源数据的修复中,修复精度在 Red 波段最高, R^2 为 0.77, 其次为 SWIR2、Green、Blue 和 SWIR1, R^2 分别为

0.76、0.73、0.73、0.71,在NIR波段修复精度最低, R^2 为0.47。

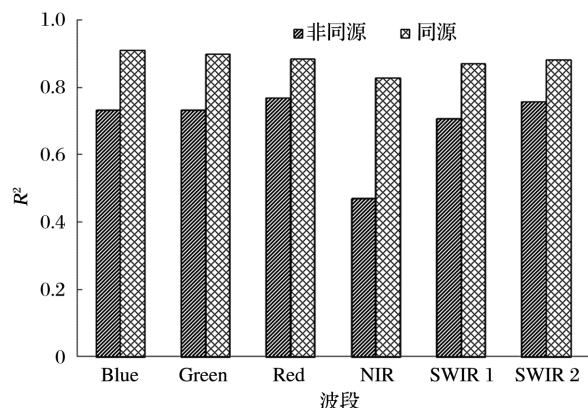


图10 数据源对Landsat各波段修复精度的影响

Fig.10 Influence of data sources to the repairing accuracy for each Landsat data bands

综上,影像修复总体而言取得了较好的修复结果,但是修复精度受云识别精度、修复方法、数据源的影响。整体来说,受数据源的影响较大,其次是云识别精度,最后为修复方法。而在不同影响因素之间,云识别精度和不同修复方法对Blue波段的修复结果影响最大,而对SWIR2的修复结果影响最小,而数据源对修复结果的影响在近红外波段影响最大,而对蓝光、红光波段的影响较小。在对影像数据修复时,无云、三次修复法、数据同源是高精度Landsat数据修复的较理想的途径。

5 结 论

热带地区由于特殊的气候原因,在遥感成像中常受到云、雾的污染导致数据缺失严重。针对这一地区无效Landsat陆地观测数据修复的问题,本文提出了一种基于GNSPI算法的Landsat无效观测数据修复方法,即三次修复法。该方法采用有效观测数据自动识别方法针对当前缺失数据寻找在前后时期内的参考数据作为Landsat数据的修复参考,以提高Landsat有效观测像元的利用率。三次修复法解决了GNSPI方法修复热带地区Landsat数据中受限于参考数据的问题,能够结合现有Landsat数据实现缺失数据的最大化修复,从而实现更多的热带地区Landsat数据修复,因此,一定程度上提高了热带地区可用的Landsat数据量。

本研究取得了较好的Landsat数据修复结果,但是也存在一些问题,如由于该地区雨季获取影像有大量云覆盖,因此在研究中只采用了干季观测数

据,造成了数据的短缺以及同年数据连续性的中断,而该方法是否适用于Landsat雨季数据的修复仍需验证;由于云识别算法的局限性,并不能将所有的云、云阴影都去除,特别是对于薄云、薄雾的去除难度较大,而采用手动去除的方法,效率低且精度不足。

参考文献 (References):

- [1] Man D C, Luu, V H, Hoang V T, *et al.* Cloud Detection Algorithm for Landsat 8 Image Using Multispectral Rules and Spatial Variability[C]// Proceedings of International Conference on Knowledge and Systems Engineering, 2014.
- [2] Hughes M J, Hayes D J. Automated Detection of Cloud and Cloud Shadow in Single-date Landsat Imagery Using Neural Networks and Spatial Post-Processing[J]. Remote Sensing, 2014, 6(6):4907-4926. doi:10.3390/rs6064907
- [3] Ju J, Roy D P. The Availability of Cloud-free Landsat ETM+ Data over the Conterminous United States and Globally[J]. Remote Sensing, 2008, 112(3):1196-1211. doi:10.1016/j.rse.2007.08.011.
- [4] Zhu Xifang, Wu Feng, Zhuang Yanbin. An Improved Approach to Remove Cloud and Mist from Remote Sensing Digital Images based on Mallat Algorithm[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2):241-246.[朱锡芳, 吴峰, 庄燕滨. 基于Mallat算法遥感图像去云雾处理的改进方法[J]. 遥感学报, 2007, 11(2):241-246.]
- [5] Martinuzzi S, Gould W A, González O M R. Creating Cloud-Free Landsat ETM+ Data Sets in Tropical Landscapes: Cloud and Cloud-Shadow Removal[J]. General Technical Report IITF-GTR-32. International Institute of Tropical Forestry (IITF), U.S. Department of Agriculture (USDA), Forest Service. Puerto Rico: IITF. 2007. doi:10.2737/IITF-GTR-32.
- [6] Jin S, Homer C, Yang L, *et al.* Automated Cloud and Shadow Detection and Filling Using Two-date Landsat Imagery in the USA[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(5):1540-1560. doi:10.1080/01431161.2012.720045.
- [7] Shou Jingwen. Research on Recovering and Application of the Landsat 7 ETM+ SLC-off Image[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.[寿敬文. 陆地卫星7号ETM+图像数据缺行的修复与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.]
- [8] Zeng C, Shen H, Zhang L. Recovering Missing Pixels for Landsat ETM+ SLC-off Imagery Using Multi-temporal Regression Analysis and a Regularization Method[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131(4):182-194. doi:10.1016/j.rse.2012.12.012.
- [9] Pringle M J, Schmidt M, Muir J S. Geostatistical Interpolation of SLC-off Landsat ETM+ Images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2009, 64(6):654-664. doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.06.001.
- [10] Chen J, Zhu X, Vogelmann J E, *et al.* A Simple and Effective Method for Filling Gaps in Landsat ETM+ SLC-off Images[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(4):1053-1064.

- [11] Guo Huancheng, Zhou Feng, Dao Xu. State-of-art on Geostatistical Methodology[J]. Geographical Research, 2008, 27(5): 1191-1202.[郭怀成, 周丰, 刀谓. 地统计方法学研究进展[J]. 地理研究, 2008, 27(5): 1191-1202.]
- [12] Zhu Xiaolin, Liu Desheng, Chen Jin. A New Geostatistical Approach for Filling Gaps in Landsat ETM plus SLC-off Images[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124(9): 49-60.
- [13] Shi Yulin. On the Utilization and Protection of Natural Resources in Xishuangbanna[J]. Resources Science, 1980(2): 84-89.[石玉林. 关于西双版纳自然资源利用与保护问题[J]. 资源科学, 1980(2): 84-89.]
- [14] Yu Yan. The Rich Climate Resources of Xishuangbanna[J]. Meteorological Knowledge, 2004(1): 27-28.[喻彦. 西双版纳丰富的气候资源[J]. 气象知识, 2004(1): 27-28.]
- [15] Yu Yan, Meng Guiyun, Zhang Licai. Characteristics of Climate Change in Recent 45 Years in Xishuangbanna[J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 36(4): 410-413.[喻彦, 蒙桂云, 张利才. 西双版纳地区近45年来气候变化特征[J]. 气象科技, 2008, 36(4): 410-413.]
- [16] Gong Shixian, Ling Shenghai. Fog Decreasing in Xishuangbanna Region[J]. Meteorological, 1996, 22(11): 10-14.[宫世贤, 凌升海. 西双版纳雾在减少[J]. 气象, 1996, 22(11): 10-14.]
- [17] Liu Xiaolong, Xu Rui, Fu Zhuo, *et al.* Monitoring Land Use for Human Activities in Nabanhe National Nature Reserve based on Multi-source Remote Sensing Data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(19): 266-275.[刘晓龙, 徐瑞, 付卓, 等. 基于多源遥感数据的纳板河国家级自然保护区人类活动用地监测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 266-275.]
- [18] Gao Shupeng, Shi Zhengtao, Liu Xiaolong, *et al.* Identification of Rubber Plantations in Tropical Mountainous Region based on High Spatio-temporal Resolution Visible Remote Sensing Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(6): 142-151.[高书鹏, 史正涛, 刘晓龙, 等. 基于高时空分辨率可见光遥感数据的热带山地橡胶林识别[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 142-151.]
- [19] Zhu Z, Woodcock C E. Object-based Cloud and Cloud Shadow Detection in Landsat Imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118(6): 83-94.
- [20] Liu Xiaolong. Study of Multi-source Remote Sensing Data Integrated Classification Method of Vegetation[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2015.[刘晓龙. 集成多源遥感数据的植被类型分类方法研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2015.]
- [21] Sun Yue, Zhang Hua. Landsat 7 SLC-off Image Restoration based on a New Object-oriented Interpolation Method[J]. Remote Sensing Information, 2018, 33(5): 27-34.[孙悦, 张华. 一种新的面向对象 Landsat 7 SLC-off 影像插值修复算法[J]. 遥感信息, 2018, 33(5): 27-34.]
- [22] Forkuo A, Thiel F. Evaluation of Gap-filling Methods for Landsat 7 ETM+ SLC-off Image for LULC Classification in a Heterogeneous Landscape of West Africa[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(7). doi:10.1080/01431161.2019.1693076.
- [23] Jia Chen, Sun Lin, Chen Yunfang, *et al.* Inversion of Aerosol Optical Depth for Landsat 8 OLI Data Using Deep Belief Network[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(10): 1180-1192.[贾臣, 孙林, 陈允芳, 等. 深度置信网络算法反演 Landsat 8 OLI 气溶胶光学厚度[J]. 遥感学报, 2020, 24(10): 1180-1192.]

Study on Invalid Pixel Repair Methods for Landsat Dry Season Images in Tropical Areas

Xu Yanhao^{1,3}, Liu Xiaolong^{1,2}, Shi Zhengtao¹, Gao Shupeng¹

(1.College of Tourism & Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2.Provincial Key Laboratory of Plateau Geographical Processes & Environmental Change, Kunming 650500, China;

3.School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Time series remote sensing data with moderate resolution is playing an important role for surface process and surface disturbance observation. For Landsat data in tropical areas, there are invalid land observation data and data loss caused by cloud, fog or sensor defects. Based on the existing GNSPI algorithm, a triple repairing method is proposed. This method automatically identifies the effective reference pixels within 48 days that before and after the current invalid pixels, and then obtain effective reference pixels for the current data to be repaired, and then fill the current missing data using the three triple repair which was based on the GNSPI method. The overall average filling accuracy is up to 0.88 in our study area. This method makes up for the GNSPI filling algorithm's harsh requirement that the reference image needs the whole image without invalid pixels, and improves the utilization rate of observed high quality pixels. The method proposed in this paper has a great significance for the establishment of long time series data and the related research.

Key words: Landsat; Data missing; Data repair; Tropical region