

赵磊,张继,张德军.一种 Suomi NPP VIIRS L1 数据智能化再处理技术研究[J].陕西气象,2024(2):61-68.

文章编号:1006-4354(2024)02-0061-08

# 一种 Suomi NPP VIIRS L1 数据 智能化再处理技术研究

赵磊,张继,张德军

(重庆市气象科学研究所,重庆 401147)

**摘要:** Suomi NPP 卫星可见光红外探测仪(VIIRS)监测数据应用广泛,但重庆针对该卫星数据的智能化再处理能力有待加强。利用 Python 的 h5py 和 GDAL 库,研究一种面向 Suomi NPP VIIRS L1 数据的智能再处理技术,实现数据检测读取、辐射定标、反射率/亮温计算、等经纬投影、区域裁剪、栅格图像生产及归档等功能耦合衔接和自动运行。结果表明,该技术提高了数据处理效率,自动生成 750 m 和 375 m 空间分辨率的等经纬投影栅格图像产品,与原处理方法相比,图像误差小、质量高,能够应用于重庆区域遥感监测业务中。

**关键词:** 可见光红外探测仪;等经纬投影;反射率;辐射定标;区域裁剪

**中图分类号:** TP3

**文献标识码:** A

Suomi NPP 是美国新一代对地监测卫星,用于替代上一代 EOS 卫星(Terra、Aqua 和 Aura)<sup>[1]</sup>。该星搭载高级微波探测器(advanced technology microwave sounder, ATM)、可见光红外辐射成像仪(visible infrared imaging radiometer suite, VIIRS)等多个载荷<sup>[2]</sup>,能全方位监测地球系统和宇宙空间。VIIRS 作为美国第二代光谱成像仪,在陆地、大气、冰和海洋的遥感监测研究中广泛应用<sup>[2]</sup>。国际上早已开展该数据研究应用。国内也基于 VIIRS 数据,开展了城市群发展特征监测<sup>[3]</sup>、近地表气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)监测评估<sup>[4-5]</sup>、区域 PM<sub>2.5</sub> 浓度估算<sup>[6-7]</sup>、地区人口变化<sup>[8]</sup>和区域碳排放估算等研究<sup>[9]</sup>。

重庆市气象卫星接收站能够实现 Suomi NPP VIIRS L1 监测数据实时接收,数据量约 15 GB/d,针对该数据的业务应用,主要开展辐射定标、几何校正、通道反射率/亮温计算、区域裁剪、等经纬投影、文件格式转换等再处理操作。原

数据处理方式主要基于多个软件工具,以人机交互为主,处理模块分散,效率低下,需研究设计一种智能化数据再处理技术,实现 VIIRS 数据再处理操作的集约化、智能化、自动化,提高数据处理效率。本文采用 h5py 和 GDAL<sup>[10,12]</sup>,研究实现一种 Suomi NPP VIIRS L1 数据的智能化再处理技术,主要包括:卫星数据智能检测,自动读取和解析卫星监测数据和地理信息,构建辐射定标<sup>[13]</sup>、几何校正、波段的反射率/亮温计算、区域裁剪、等经纬投影和栅格图像生成等模块的智能化异步运行机制,自动处理输出和规范归档 750 m 和 375 m 两种空间分辨率的图像产品。

## 1 研究数据

研究数据来源于重庆卫星接收站的 Suomi NPP VIIRS L1 监测数据,VIIRS 共有 22 个波段通道,中心波长范围 0.412~12.013  $\mu\text{m}$ 。其中,375 m 分辨率波段通道 5 个,750 m 分辨率波段通道 17 个。与中分辨率光谱成像仪 MODIS 的 36 个波段通道信息对比(表 1)发现,VIIRS 虽比

收稿日期:2023-01-05

作者简介:赵磊(1984—),男,汉族,陕西咸阳人,硕士,高级工程师,主要从事并行计算和卫星遥感信息处理。

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(2021YFB3901400)

MODIS 减少了 14 个波段通道,但 VIIRS 具备 1 个白天夜间波段(Day Night Band, DNB),利用微光特征加强了夜间对地监测能力。VIIRS 监测幅宽达 3 000 km,比 MODIS(2 330 km)的幅宽多

了 670 km,且 VIIRS 在扫描方向上,采用合并方式抑制空间分辨率随扫描角增大而增长,提高了数据质量和精度,增强了数据可用性<sup>[2]</sup>。

表 1 Suomi NPP VIIRS 和 MODIS 波段通道对比

通道类别	波段通道	中心波长/ $\mu\text{m}$	空间分辨率/m	用途	对应的 MODIS 通道
可见光、近红外	M1	0.412	750	海洋水色、气溶胶	8
	M2	0.445	750	海洋水色、气溶胶	9
	M3	0.488	750	海洋水色、气溶胶	3 或 10
	M4	0.555	750	海洋水色、气溶胶	4 或 12
	I1	0.640	375	对地成像	1
	M5	0.672	750	海洋水色、气溶胶	13 或 14
	M6	0.746	750	大气	15
	I2	0.865	375	植被指数	2
	M7	0.865	750	海洋水色、气溶胶	16 或 2
夜间微光	DNB	0.700	750	对地夜间成像	
短、中红外	M8	1.240	750	云粒子大小	5
	M9	1.378	750	卷云、云覆盖	26
	I3	1.610	375	云图	6
	M10	1.610	750	雪	6
	M11	2.250	750	云	7
	I4	3.740	375	对地成像	20
	M12	3.700	750	洋面温度	20
	M13	4.050	750	洋面温度、火灾	21 或 22
热红外	M14	8.550	750	云顶性质	29
	M15	10.763	750	洋面温度	31
	I5	11.450	375	云成像	31 或 32
	M16	12.013	750	洋面温度	32

重庆卫星接收站的 Suomi NPP VIIRS L1 监测数据由 30 个 EOS-HDF5 格式的数据文件组成,包含了 750、375 m 空间分辨率单波段通道文件和地理信息文件,文件名称包含了卫星、载荷、监测时间、波段通道和地理坐标等基础信息<sup>[13]</sup>,便于用户快速了解和解析数据。

## 2 技术方法

主要通过数据读取和解析、反射率计算、亮温计算、等经纬投影、栅格图像生成等处理过程,阐述 Suomi NPP VIIRS L1 数据智能再处理技术。

### 2.1 数据读取和解析

基于 h5py 和 Numpy 库,快速读取和解析 Suomi NPP VIIRS L1 监测数据。除 DNB 外,各波段通道像元辐射量化值的数据类型为整型,该卫星数据在远离星下点会发生蝴蝶结(即 Bow-Tie)效应,各波段通道均使用 65533 标记图像 BowTie 像元,图像两侧会有明显的 BowTie 条带。在数据读取解析过程中,把图像中 BowTie 像元的经纬度设置为无效值,确保后续处理为非 BowTie 像元,再对图像产品进行辐射定标、太阳

高度角订正、和几何校正、和等经纬投影处理,一定程度上消除 BowTie 效应的影响。

## 2.2 反射率计算

反射率是卫星接收到被监测物体反射太阳辐射亮度与被监测物体吸收太阳辐射亮度的比值,表征被监测物体对太阳辐射吸收和反射的能力。本文计算的反射率为大气表观反射率,即卫星载荷传感器接收到的大气和地面物体反射率的总和<sup>[13]</sup>。Suomi NPP VIIRS L1 监测数据有 14 个太阳反射波段(reflective solar bands,RSB),数据为整型辐射量化值  $R$ 。在图像像元异常值处理后,采用公式(1)进行辐射定标,计算辐射定标反射率  $R_e$ ,

$$R_e = R \times s + I, \quad (1)$$

式中, $s$  和  $I$  为增益和偏移系数, $R$  为像元整型辐射量化值, $R_e$  为辐射定标反射率。

在辐射定标后,利用太阳天顶角开展太阳高度角订正处理,通过公式(2)计算大气表观反射率  $\rho_{\text{toa}}$ 。

$$\rho_{\text{toa}} = \frac{\pi \times L_{\text{sensor}} \times d^2}{E_m \times \cos((\theta/100.0) \times \pi/180.0)}, \quad (2)$$

式中, $E_m$  ( $\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}/\text{cm})$ ) 为大气顶层平均光谱辐射,日地天文单位  $d=0.990\ 544$ , $\theta(^{\circ})$  为太阳天顶角; $\pi$  为圆周率, $L_{\text{sensor}}$  ( $\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}/\text{cm})$ ) 为卫星监测载荷的入瞳辐射亮度。通过  $L_{\text{sensor}}$  和辐射定标反射率  $R_e$ 、大气顶层平均光谱辐射  $E_m$  之间的关系,简化计算公式,降低计算复杂度,得到公式(3),从而实现大气表观反射率的快速计算。

$$\rho_{\text{toa}} = \frac{R_e \times d^2}{E_m \times \cos((\theta/100.0) \times \pi/180.0)}。 \quad (3)$$

## 2.3 亮温计算

当被监测物体光谱辐射亮度与某一黑体光谱辐射亮度相等时,可利用该黑体物理温度表征该物体的亮度温度(即亮温,单位为 K)。虽然物体的亮温具备温度量纲,但不具备温度物理含义,它是物体辐射亮度代名词<sup>[14]</sup>。Suomi NPP VIIRS L1 数据的热红外发射波段(Thermal Emissive Bands,TEB)共有 7 个。在完成波段异常值检测处理后,通过普朗克函数变换得到公式(4),计算图像热红外波段的亮温,再通过公式(5)对波段亮温进行订正。

$$T_f = \frac{C_2 \times v}{\ln(C_1 \times v^3 \times L_{\lambda}^{-1} + 1.0)} \quad (C_1 = 2 \times h \times c^2, \\ C_2 = \frac{h \times c}{k}), \quad (4)$$

式中: $v$ (单位为  $\text{cm}^{-1}$ ) 为波数, $L_{\lambda}$ (单位为  $\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}/\text{cm})$ ) 为辐射定标后的辐射亮度; $C_1$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^2$ ) 和  $C_2$  ( $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ ) 为系数,普朗克常量  $h=6.626\ 068\ 76 \times 10^{-34}$  J · s,光速  $c=2.997\ 924\ 58 \times 10^8$  m/s,玻尔兹曼常量  $k=1.380\ 650\ 3 \times 10^{-23}$  J/K。因陆表温度反演算法有时要求波段辐射亮度单位为 ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$ ),需通过波数  $v$  和波长  $\lambda$  互为倒数的关系,实现计算单位的转换,再去计算亮温。

$$T_b = T_f \times s + I, \quad (5)$$

式中, $T_f$ (K) 为未订正亮温, $s$  和  $I$  为订正系数, $T_b$ (K) 为订正后的亮温。

## 2.4 等经纬投影

在等经纬投影处理过程中,首先确定了图像研究区域经纬度范围,本文研究区域范围为  $104.0^{\circ}$  E~ $112.0^{\circ}$  E 和  $26.0^{\circ}$  N~ $34.0^{\circ}$  N。在利用 numpy 库高效处理辐射定标后的图像数据和地理信息数据,通过设置研究区域的最大纬度  $L_{\text{at,max}}$ 、最小经度  $L_{\text{on,min}}$ 、像元行高  $R_{\text{line}}$  和列宽  $R_{\text{pixel}}$ ,实现图像研究区域的裁剪;再通过设置投影转换仿射参数,构建等经纬投影图像网格,采用公式(6)和(7)实现图像的地理坐标和等经纬投影网格行列号的快速转换。

$$L_{\text{at,var}} = L_{\text{at,max}} + l_{\text{index}} \times R_{\text{line}}, \quad (6)$$

$$L_{\text{on,var}} = L_{\text{on,min}} + c_{\text{index}} \times R_{\text{pixel}}, \quad (7)$$

式中: $L_{\text{at,max}}(^{\circ})$  为研究区域卫星图像最大纬度, $L_{\text{at,var}}(^{\circ})$  为原卫星图像像元纬度, $R_{\text{line}}$  为设置的投影网格行高, $l_{\text{index}}$  为新投影网格的行号; $L_{\text{on,min}}(^{\circ})$  为研究区域卫星图像最小经度, $L_{\text{on,var}}(^{\circ})$  为原卫星图像像元经度, $R_{\text{pixel}}$  为投影网格列宽, $c_{\text{index}}$  为新投影网格的列号。利用 GDAL 的 gdalWarp 函数,进行几何校正处理<sup>[15]</sup>,将研究区裁剪和等经纬投影实现集约化自动处理,提高处理效率。

## 2.5 栅格图像生成

将研究区内的卫星图像太阳观测角、卫星观测角、反射率和亮温等数据集进行叠加,分别构建

了 750 m 空间分辨率大小为  $22 \times 800 \times 800$ 、375 m 空间分辨率大小为  $53 \times 3\ 200 \times 3\ 200$  的三维矩阵数据,再利用 GDAL 加工生成 750 m、375 m 两种分辨率栅格遥感图像产品。图像产品命名为 NPP\_VIIRS\_L2\_PRJ\_YYYYMMDDH-Hmm\_750M\_GLL.tif、NPP\_VIIRS\_L2\_PRJ\_YYYYMMDDHHmm\_375M\_GLL.tif,其中 PRJ 为投影操作标识,YYYYMMDDHHmm 为卫星过境起始监测时间,GLL 为等经纬度网格标识,以及卫星、载荷、数据等级和空间分辨率等基础信息,便于用户直观了解应用图像产品。

### 2.6 智能化再处理技术

针对 Suomi NPP VIIRS L1 数据的智能化再处理技术是基于 Python 框架,通过编码,把原来较分散、人机交互多的数据再处理操作进行集约,实现数据智能检测、辐射定标、反射率计算、亮温计算、区域裁剪、等经纬投影和栅格图像生成等处理操作的智能化运行,提高该卫星数据的再处理效率。基于现有卫星接收站业务数据网络,采用网络文件传输协议(NFS)和计划任务(CronD)服务<sup>[10]</sup>,采用高频轮询的方法,设计卫星数据智能检测流程(图 1),实现重庆卫星接收站 VIIRS L1 数据文件的智能检测,当重庆接收站数据目录有新卫星数据时,将自动生成新数据标识文件,轮询检测到新标识文件后,及时智能开展数据完整性检查,后自动读取数据。

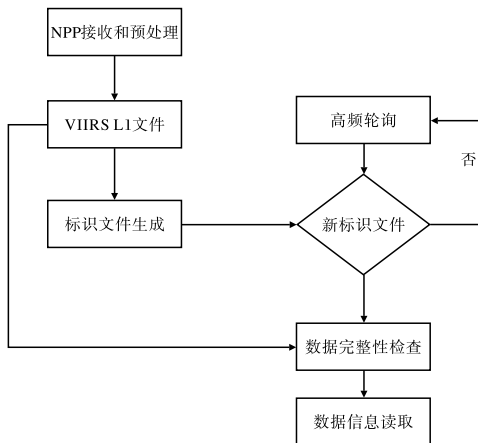


图 1 重庆卫星接收站 Suomi NPP VIIRS L1 数据智能检测流程

卫星数据智能检测部分与卫星接收站的数据

库紧密连接,采用 Python 编程框架,利用 h5py、GDAL、numpy、pandas 等库,设计实现卫星数据智能化再处理技术流程(图 2),把数据智能检测、辐射定标、太阳高度角订正、区域裁剪和等经纬投影等处理操作的集约管理,实现处理操作间的智能化触发运行,减少人机交互,自动生成栅格图像产品。

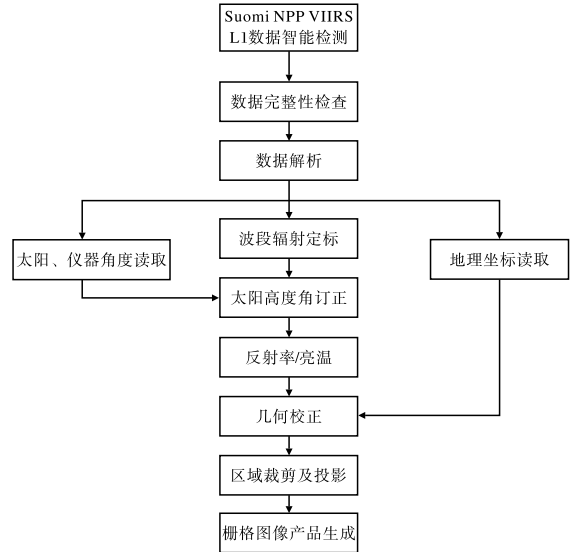


图 2 重庆卫星接收站 Suomi NPP VIIRS L1 数据智能化再处理技术流程

## 3 结果分析

通过对比分析处理前后数据量大小、新的智能化再处理技术(简称新处理技术)较原处理方法的加工耗时和图像产品质量等指标,综合评估新处理技术的特征。

### 3.1 数据量大小

新处理技术通过波段通道数据读取和区域裁剪等方式,能够将 750 m 分辨率数据由处理前的 11 GB 处理缩减至 127 MB,将 375 m 分辨率数据由处理前的 11 GB 处理缩减到 205 MB,缩小了卫星图像数据量,一定程度上节省了存储空间资源。新处理技术将卫星图像波段通道数据处理成浮点类型,直观显示卫星图像监测值。

### 3.2 处理时效

以 2022 年 5 月 Suomi NPP VIIRS L1 数据为例,测试新处理技术的运行时间,发现处理运行时间范围 69~95 s,平均处理耗时 80.6 s,因业务

服务器实际运行性能和网络带宽的波动,导致处理耗时出现了波动。为有效对比新处理技术与原处理方法的处理时效,从数据检测读取、辐射定标、区域选择及重投影、栅格产品生成 4 个主要处理环节开展测试。结果发现,原处理方法的文件检测和读取需人机交互完成,耗费较多时间;新处理技术采用高频轮询方式,实现数据快速自动检测和读取,比原处理方法平均减少约 36 s。新处理技术其他处理环节也优于原处理方法,特别是区域裁剪和等经纬投影,比原方式节省了约 7 s。栅格图像产品生成方面,比原方式节省了约 6 s。总体而言,新处理技术的处理时效要优于原处理方法,提高了数据处理效率。

### 3.3 图像质量

以 2022 年 8 月 16 日 13:51 的 Suomi NPP VIIRS L1 数据为例,选取 M7(0.865  $\mu\text{m}$ )和 M15

(10.763  $\mu\text{m}$ )两个波段通道开展图像产品直观分布比较。图像产品的 M7(0.865  $\mu\text{m}$ )是近红外波段通道,可用于生态植被监测。M15(10.763  $\mu\text{m}$ )是热红外波段通道,因处于大气窗口内,可用于陆表温度产品反演。图 3a 为原处理方法的 M7(0.865  $\mu\text{m}$ )近红外波段通道反射率图像,图 3b 为新处理技术的反射率图像,通过对比两幅图像发现,地物和云空间分布一致,重庆市主城区和长江流域清晰,主城区位置均定位准确。图 3c 为原处理方法的 M15(10.763  $\mu\text{m}$ )红外波段通道亮温图像,图 3d 为新处理技术的亮温图像。对比发现,因受山地地形和云的影响,两幅亮温图像均呈现明显的空间变化特征,在重庆市中西部,亮温空间分布基本一致,一定程度反映出 8 月重庆中西部地区高温特征,能监测到重庆东北部的云变化。

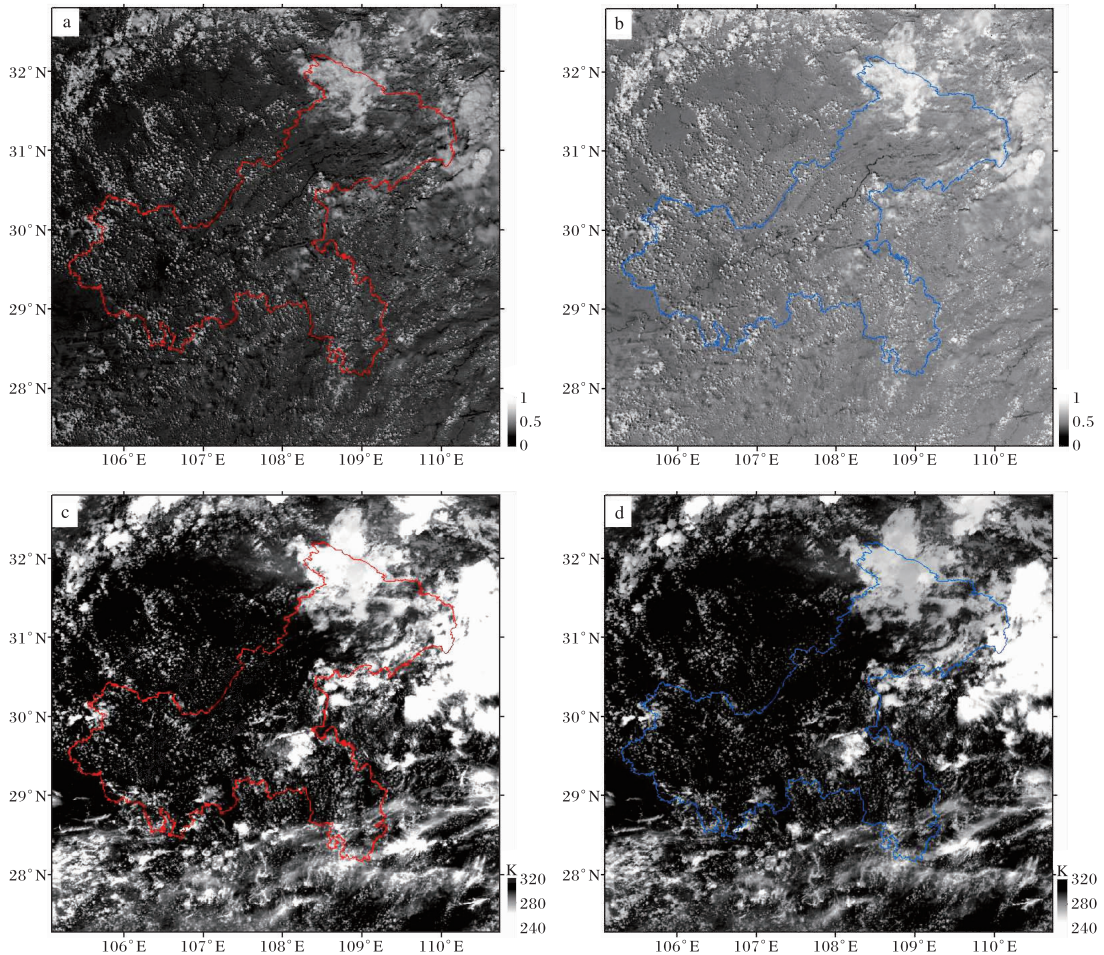


图3 重庆地区 M7(0.865  $\mu\text{m}$ )波段反射率图像(a 原处理方法;b 新处理技术)和 M15(10.763  $\mu\text{m}$ )波段亮温图像(c 原处理方法;d 新处理技术)对比(审图号:渝 S(2020) 071 号)

为定量分析新处理技术和原处理方法的图像产品,计算两种处理方式下RSB、TEB的平均绝对误差和均方根误差。对比RSB中各波段的误差(图4a、图4b),结果发现,RSB的平均绝对误差小于0.08,均方根误差小于0.14,其中M6波段的误差最小,I2波段误差较大,总体上看,空间分辨率375 m波段误差较大。对比TEB各波段

的误差(图4c、图4d),结果发现,TEB整体上误差较大,平均绝对误差小于2.60 K,均方根误差小于4.50 K,其中M12波段误差较小。总体而言,因新处理技术和原处理方法的图像产品存在一定的差异,但总体上各波段误差较大,可以表征遥感图像中地物、云的空间分布特征。

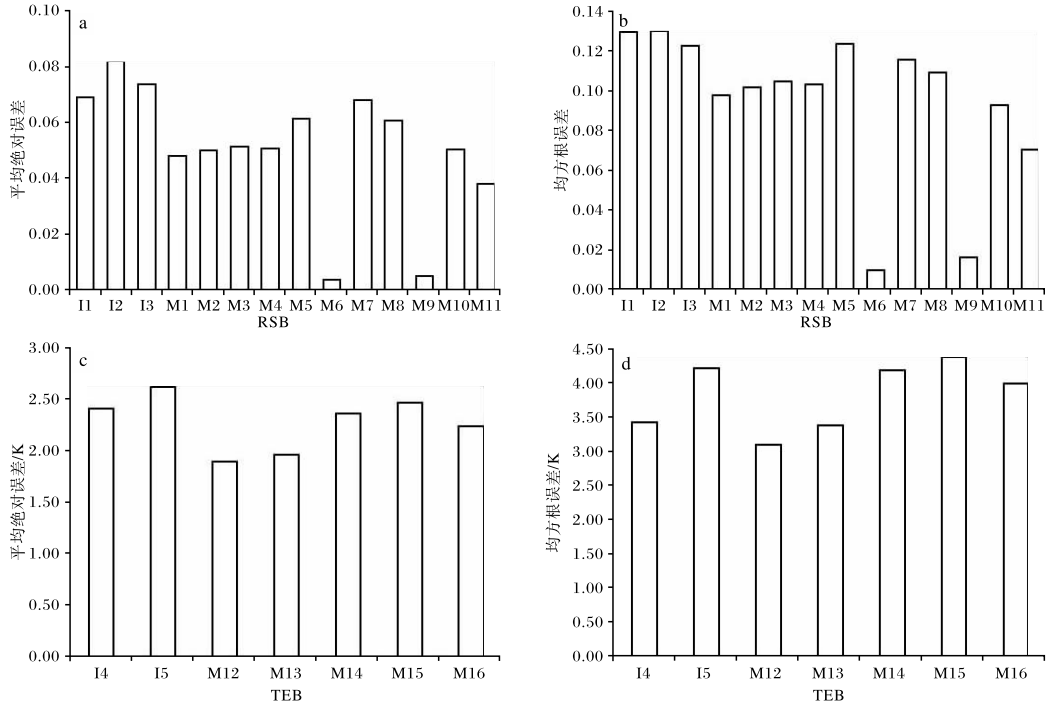


图4 两种处理方式的RSB平均绝对误差(a)和均方根误差(b)、TEB平均绝对误差(c)和均方根误差(d)

Suomi NPP VIIRS L1 数据的 DNB 是其区别于其他卫星的主要特征之一, DNB 在夜间能够监测到云层反射的月光和人造地物发射的可见光, 在夜间火灾、城市不透水面、电力消耗评估等方面应用广泛<sup>[16-18]</sup>。以 2022 年 8 月 13 日 01:51 Suomi NPP VIIRS L1 的 DNB 数据为例, 对比分析原处理方法和新处理技术的 DNB 辐射亮度图像(图 5a、图 5b), 对比结果发现, 两幅图像均能呈现重庆中心城区夜间辐射亮度大、渝东北和渝东南夜间灯光亮度较小的特征, 能够表征重庆市中心城区人口和经济发展优于渝东北和渝东南地区。两幅卫星图像的夜间辐射亮度分布基本准确, 图像空间地理定位准确, 能反映重庆市大城市建设的规划格局。新处理技术的 DNB 辐射亮度图像能够替代原处理方法的图像产品, 开展城市

夜间遥感监测业务。

#### 4 结论与讨论

本文研究一种面向重庆卫星接收站 Suomi NPP VIIRS L1 数据的智能化再处理技术, 主要基于 Python 平台, 利用 h5py、GDAL 处理库, 设计实现卫星数据文件检测和读取、辐射定标、太阳高度角订正、几何校正、等经纬投影和区域裁剪、栅格图像生成等再处理操作的智能化运行, 自动生成和归档 750 m、375 m 空间分辨率栅格图像产品。该卫星数据智能化再处理技术, 能够逐步取代重庆卫星遥感监测业务中原较分散、人机交互多的数据处理方式, 提高了该卫星数据的处理效率。通过多个指标的对比, 得出以下结论。

(1) 生成的图像产品数据量小。新处理技术能删除数据中不必要的元数据信息和自动完成区

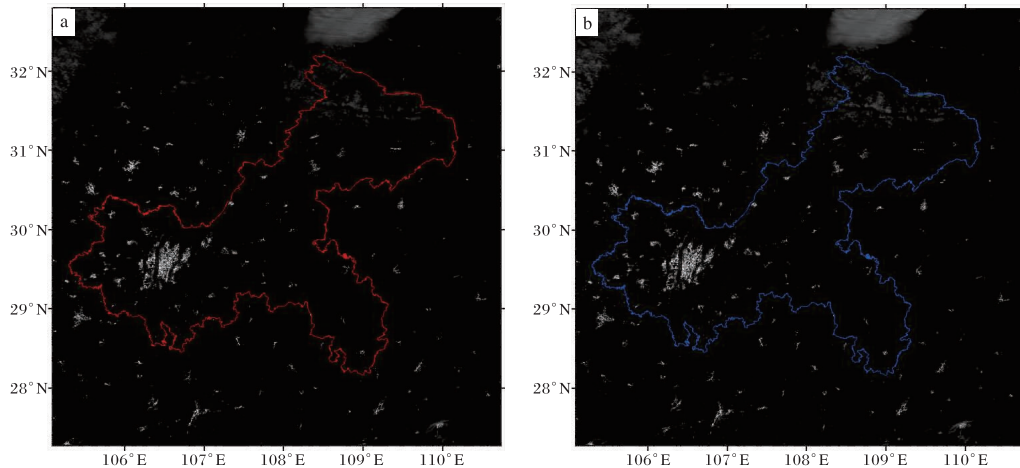


图5 重庆地区 DNB(0.700  $\mu\text{m}$ ) 辐射亮度图像(a 原处理方法;b 新处理技术)

对比(审图号:渝 S(2020) 071 号)

域裁剪,生成的栅格图像产品大小比处理前的数据量缩减了 91.4%,且像元值仍保持为浮点高精度值。

(2)数据处理耗时低。新处理技术实现数据再处理操作的智能化运行,减少人机交互,平均处理耗时 80.6 s,比原处理方法减少约 36 s。

(3)图像产品质量高。新处理技术生成的图像产品几何地理定位准确,各波段通道图像像元值与原处理方法图像基本一致,图像产品质量较高,可替代原处理方法开展重庆本地遥感监测业务。

(4)虽然该技术一定程度上提高了 Suomi NPP VIIRS L1 数据再处理的效率,但图像产品未采用压缩技术,且未能加入大气校正和云检测,图像产品质量仍有进一步提升的空间。未来计划从两方面继续深入研究:开展图像数据压缩应用技术研究,进一步节省存储空间资源;增加先进的云检测方法,进一步提升卫星图像质量。

#### 参考文献:

- [1] 孙伟伟,杨刚,陈超,等. 中国地球监测遥感卫星发展现状及文献分析[J]. 遥感学报,2020,24(5):479-510.
- [2] 夏浪,毛克彪,孙知文,等. Suomi Npp VIIRS 数据介绍及其在云检测上的应用分析[J]. 地球科学前沿,2013,3(5):271-276.
- [3] 姜梦蝶,陈林,何玉清,等. 利用 NPP/VIIRS 微光数据反演夜间气溶胶光学厚度[J]. 遥感学报,2022,26(3):493-504.
- [4] 李桂华,范俊甫,周玉科,等. 基于 VIIRS 夜间灯光数据的山东半岛城市群发展特征研究[J]. 遥感技术与应用,2020,35(6):1348-1359.
- [5] 王联霞,张衡,徐青. VIIRS 高分辨率地表反射率关系库支持下的气溶胶光学厚度反演[J]. 测绘科学技术学报,2021,38(4):295-300.
- [6] 李轲,刘朝顺,焦鹏龙. 基于 NPP/VIIRS 夜间灯光遥感数据估算上海地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度[J]. 环境科学学报,2019,39(6):1913-1922.
- [7] 赵笑然,石汉青,杨平吕,等. NPP 卫星 VIIRS 微光反演夜间 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度[J]. 遥感学报,2017,21(2):291-299.
- [8] 金耀,李士成,倪永,等. 基于地表覆盖及夜间灯光数据的分区人口空间变化:以京津冀地区为例[J]. 遥感信息,2021,36(5):81-90.
- [9] 王艳军,王孟杰,李少春,等. 由 NPP-VIIRS 影像估算广东省碳排放的尺度效应分析[J]. 测绘通报,2021(11):25-30.
- [10] CHUN W J. Python 核心编程 [M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,2007:7-10.
- [11] 蒋世豪,江洪. 基于 GDAL 的遥感图像变化检测技术[J]. 计算机工程与应用,2020,56(16):169-175.
- [12] 陈文彬. 基于 GDAL 的遥感影像快速裁切技术[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(4):150-152.
- [13] 胡申森. VIIRS 微光通道数据辐射定标与应用技术[D]. 湖南:国防科技大学,2019.

- [14] 田国良. 热红外遥感[M]. 北京:电子工业出版社, 2006:25-77.
- [15] 查东平,林辉,孙华,等. 基于 GDAL 的遥感影像快速读取和显示方法研究[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(1):58-62.
- [16] 陈颖彪,郑子豪,吴志峰,等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J]. 地理科学进展,2019,38(3):205-223.
- [17] 张莉,谢亚楠,屈晨阳,等. 基于夜间灯光数据的中国城市电力消费模拟影响因素[J]. 遥感信息,2020,35(4):114-123.
- [18] 伍亿真,施开放,余柏浪,等. 利用 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据分析城市蔓延对雾霾污染的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(5):777-789.