

# FY-4A 卫星数据可视化及应用

王清平<sup>1</sup> 吴晓京<sup>2\*</sup> 陈阳权<sup>1</sup> 段杰<sup>1</sup>

(1 民航新疆空中交通管理局气象中心, 乌鲁木齐 830016; 2 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要** 2016 年 12 月 11 日我国发射了 FY-4A 新一代静止气象卫星, 其高时间和空间分辨率能够加强航空气象中的监测应用, 为了更好地应用 FY-4A 卫星的各类观测产品, 本文利用 Python 语言实现对 FY-4A 卫星 AGRI 观测仪器所探测的 2 km、4 km 分辨率的全圆盘和中国区域可见光、红外图像资料及 7.8 km 分辨率闪电监测资料进行解码并可视化显示出图, 将绘制的卫星图像与国家卫星气象中心网站对外开放的卫星云图进行对比。结果表明: 两者显示较为一致, 可以用于航空气象业务。Python 语言语法简练, 对于卫星 HDF 和 NC 格式数据读取速度快, Python 的 Numpy 工具包基于矩阵的运算能快速处理卫星观测数据, Basemap 库中多种投影方式可供业务应用, 值得推广。

**关键词** Python; FY-4A; 闪电; 全圆盘; LMI

**中图分类号:** P413 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20180336 **文献标识码:** A

## 引言

截止 2018 年 7 月, 我国已发射近 16 颗气象卫星, 极轨气象卫星由最初的 FY-1A 已发展至 FY-3D, 静止卫星由 FY-2A 发展至新一代静止气象卫星 FY-4A。FY-4A 于 2016 年 12 月 11 日在西昌卫星发射中心发射, 风云四号是我国新一代静止气象卫星, 装载多种观测仪器, 包括多通道扫描成像辐射计、干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和空间环境监测仪器等<sup>[1-2]</sup>。FY-4A 星装载的多通道扫描成像辐射计, 其 14 个成像通道与国际水平相当。装载的干涉式大气垂直探测仪在世界上首次实现了静止轨道红外高光谱探测, 可以获取大气温湿度三维结构, 处于国际领先水平。风云四号装载的闪电成像仪首次实现了对亚洲大洋洲区域的静止轨道闪电持续观测。国外只有美国新一代静止轨道气象卫星 GOES-R 搭载了闪电成像仪, 并对西半球美洲区域进行观测。FY-4A 卫星分辨率高、产品丰富, 但如何更好地使用这些新型探测资料是摆在我们面前的一个问题。

目前国际上用于气象行业的绘图可视化软件主

要有 GrADs (Grid Analysis and Display System)<sup>[3]</sup>, NCL<sup>[4]</sup> 是美国 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 开发的主要针对模式输出数据的绘图软件包, NCL 提供了大量的大气科学领域的函数, 包括插值、小波分析、谱分析、统计分析等方面。IDL<sup>[5]</sup> (Interactive Data Language) 是美国 RSI 公司开发的对科学数据进行获取、分析和可视化的软件工具, 它可以进行二维、三维数据可视化分析和显示, 另外还有 MATLAB<sup>[6]</sup>, 也可用于数据可视化分析和应用, 但是 MATLAB 和 IDL 均为商业软件, 购买费用较贵。而 Python 是目前国际上较为流行的开源软件, 且具有成千上万的各种行业工具包, 在科学领域有 Numpy、Scipy, 绘图领域有 Matplotlib、Mayavi 等, 其中 Matplotlib 绘图包还自带 Basemap 包, 可用于气象数据地理信息绘制, 方便气象人员使用。国内使用 Python 对气象领域的研究也有不少<sup>[7-8]</sup>。高大伟<sup>[7]</sup>等使用 Python 对每日 CMAcast 下发的最新风云二号 G 星 (FY-2G) 云导风 (CMV) 和射出长波辐射 (OLR) 两个定量业务产品进行实时自动化解码和可视化出图, 显示效果与国家卫星气象中心下发的卫星天气应用平台

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

作者简介: 王清平, 男, 1985 年生, 学士, 工程师, 主要从事航空气象预报工作, Email: wqp1001@163.com

收稿日期: 2018 年 6 月 17 日; 定稿日期: 2018 年 10 月 30 日

\* 通信作者, Email: xiaolingwu@nsmc.cma.gov.cn

(SWAP)显示较为一致。王清平<sup>[8]</sup>利用 Python 对中国气象局自动气象站数据进行了解码,并利用 MICAPS 数据接口实现了气象数据的显示。

### 1 Python 语言介绍

Python 语言是一种面向对象的解释型计算及程序设计语言,由荷兰人 Guido van Rossum 于 1989 年发明,第 1 版公开发布于 1991 年。Python 是纯粹的自由软件,源代码和解释器 Cpython 遵循 GPL(GNU General Public License)协议。Python 语法简洁清晰,它具有丰富和强大的库。常被戏称为胶水语言,能够把用其他语言制作的各种模块(尤其是 C/C++)很轻松的连结在一起。由于 Python 语言的简洁性、易读性及可扩展性,在国外用 Python 做科学计算的研究机构日益增多,一些知名大学已经采用 Python 来教授程序设计课程。例如卡耐基梅隆大学的《编程基础》、麻省理工学院的《计算机科学及编程导论》就使用 Python 语言讲课。在科学计算方面,Python 有很多工具包可用, Numpy、Scipy、Matplotlib 是使用较为广泛的工具包,他们分别为 Python 提供了快速数组处理、数值运算以及绘图功能。

Matplotlib 工具包中包括 Basemap 子工具包,该工具用于绘制地图,且包含二十多种地图投影,非常适合气象领域绘图。大气科学是一门海量数据的科学,数值预报与卫星、雷达等其他探测资料数据量非常大,因此存储格式的选择对后续数据的读取、使用至关重要。常用的格式有 netCDF 和 HDF,而 Python 有对应的 netCDF4 和 h5py 工具包用于处理 netCDF 和 HDF 格式。

### 2 NC 和 HDF 数据格式介绍

美国大学大气研究协会(University corporation for Atmosphere Research, UCAR) Unidata 项目科学家针对科学数据的特点开发了一种面向数组型并适用于网络共享数据模式和编码标准,即 netCDF(Network Common Data Form)数据格式, netCDF 格式开始主要用于存储大气科学数据,已经成为许多数据采集软件生成文件的格式。通过 netCDF 格式可以对网格数据进行高效的存储、管理、获取和分发。该数据格式还有一大优点,即自描述特性,可将数据类型、创建时间、数据范围等信息写入文件,当数据使用者没有数据格式说明时可通

过读取文件属性获得数据的说明,方便使用。目前大气科学、水文、海洋、环境、地球物理领域广泛使用 netCDF 格式,例如:美国 NCEP(美国国家环境预报数据中心)发布的再分析资料,NOAA 的 CDC(气候数据中心)发布的海洋与大气综合数据集均采用 netCDF 作为标准<sup>[9]</sup>。

另一种广泛使用的科学数据格式为 HDF(Hierarchical Data Format),HDF 是美国国家高性能计算应用中心(National Center for Supercomputing Application, NCSA)为了满足各种领域研究需求而研制的一种能高效存储和分发科学数据的新型数据格式,该格式可以存储不同类型的图像和数码数据,并且可以在不同类型的机器上传输。HDF 格式具有:自描述性、通用性、扩展性、跨平台性等优点。HDF 文件可以包含 6 种基本数据类型:光栅图像、调色板、科学数据集、注解、虚拟数据和虚拟组。HDF 最初产生于 20 世纪 80 年代,现在已经发展到 HDF5,目前应用领域广泛,许多遥感领域的影像采用 HDF 格式存取,一些大的图形图像处理软件也提供接口读取 HDF 文件。例如:IDL、MATLAB、Python 等。

### 3 FY-4A 卫星数据可视化设计

FY-4A 于 2016 年 12 月 11 日在西昌卫星发射中心发射,风云四号是我国新一代静止气象卫星,装载多种观测仪器,包括多通道扫描成像辐射计(AGRI)、干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和空间环境监测仪器等。其 AGRI 包含 14 个通道,其中 0.65  $\mu\text{m}$  通道最高分辨达到 500 m,具体各通道指标见表 1。中国气象局用户主要通过 CIMISS 和国

表 1 FY-4A 卫星多通道扫描成像辐射计 (AGRI)通道参数

通道	波长 $\mu\text{m}$	分辨率 km	通道	波长 $\mu\text{m}$	分辨率 km
1	0.47	1	8	3.725	4
2	0.65	0.5~1*	9	6.25	4
3	0.825	1	10	7.1(6.9~7.3)	4
4	1.37	2	11	8.5(8.0~9.0)	4
5	1.61	2	12	10.8(10.3~11.3)	4
6	2.225	2~4*	13	12.0(11.5~12.5)	4
7	3.725H	2	14	13.5(13.2~13.8)	4

注: \* 表示该通道可以进行抽样降低分辨率。

家卫星气象中心网站目前对外公布的 AGRI 观测数据获取。AGRI 数据文件主要包括全圆盘图和中国区域,闪电成像仪 LMI 数据为 1 min 间隔观测数据。目前没有下发具体的解码显示软件。因此本文利用 Python 对 FY-4A 卫星的 AGRI 和 LMI 仪器探测数据进行可视化出图,以便对卫星资料进行研究。

本研究采用 Python 语言进行 FY-4A 卫星观测数据可视化技术实现,其可视化处理流程如下:首先通过 Python 的 netCDF4 和 h5py 等工具包对 AGRI 和 LMI 数据进行读取,然后利用 Matplotlib、Basemap 等工具包将带有地理信息的 AGRI 和 LMI 数据在 orthography 和 Geostationary 两种投影模式中投影,最终对投影图像进行自动保存,该程序可设置图片保存格式,例如:png、jpg 或者 pdf,同时可以设置图片的 dpi 分辨率,具体流程见下图 1。

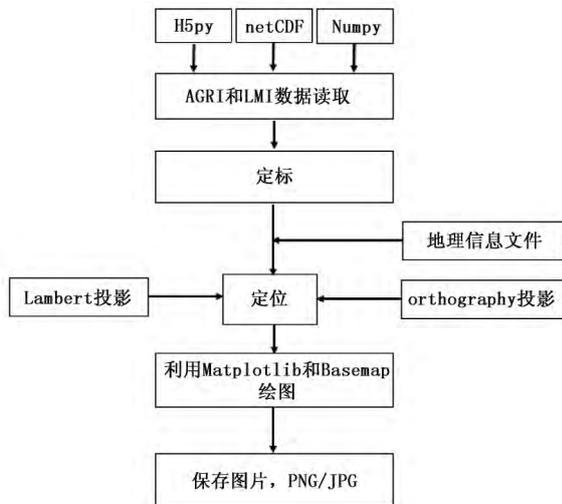


图 1 数据可视化流程图

### 3.1 经纬度地理信息文件的生成

卫星观测数据和地理信息数据是分别存放的,因此要准确的显示观测数据需要生成观测数据对应的经纬度信息表。本文采用文献[10]的计算方法将风云 4A 卫星标称上的行列号与经纬度进行转换。具体计算方法如下:

第 1 步:求  $x, y$

$$x = \pi(c - C_{\text{OFF}}) / (180 \times 2^{-16} C_{\text{FAC}}) \quad (1)$$

$$y = \pi(l - L_{\text{OFF}}) / (180 \times 2^{-16} L_{\text{FAC}}) \quad (2)$$

式中,  $C_{\text{OFF}}$  表示列偏移,  $C_{\text{FAC}}$  表示列比例因子,  $L_{\text{OFF}}$  表示行偏移,  $L_{\text{FAC}}$  行比例因子,  $c$  为标称数据上的行号,  $l$  为标称数据上列号。

第 2 步:求  $S_d, S_n, S_1, S_2, S_3, S_{xy}$

$$S_d = \{ (h \cos x \cos y)^2 - [\cos^2 y + (e_a^2 / e_b^2) \sin^2 y] (h^2 - e_a^2) \}^{1/2} \quad (3)$$

$$S_n = \frac{h \cos x \cos y - S_d}{\cos^2 y + (e_a^2 / e_b^2) \sin^2 y} \quad (4)$$

$$S_1 = h - S_n \cos x \cos y \quad (5)$$

$$S_2 = S_n \sin x \cos y \quad (6)$$

$$S_3 = -S_n \sin y \quad (7)$$

$$S_{xy} = (S_1^2 + S_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

式中,  $h$  为地心到卫星质心的距离,  $e_a$  表示地球的半长轴,  $e_b$  表示地球的短半轴

第 3 步:求  $l_{\text{on}}, l_{\text{at}}$ , 即标称数据对应的经纬度

$$L_{\text{on}} = (180 / \pi) \arctan(S_2 / S_1) + \lambda_D \quad (9)$$

$$L_{\text{at}} = (180 / \pi) \arctan[(e_a^2 / e_b^2) (S_3 / S_{xy})] \quad (10)$$

式(9)中  $\lambda_D$  表示卫星下点所在经度。

使用 Python 根据上述公式编写函数,可以生成圆盘图的经纬度信息,具体关键代码如图 2。

```

def _GetLonLat():
    DEG2RAD = np.pi / 180.
    RAD2DEG = 180. / np.pi
    SCLUNIT = np.power(2., -16)
    xx, yy = np.meshgrid(columns, lines)
    print(xx.shape, yy.shape)
    del lines, columns
    x = DEG2RAD * (xx - COFF) / (SCLUNIT * CFAC)
    y = DEG2RAD * (yy - LOFF) / (SCLUNIT * LFAC)
    del xx, yy
    Sd = np.sqrt(np.square(DIS * np.cos(x) * np.cos(y)) -
                (np.square(np.cos(y)) + CON * np.square(np.sin(y))) * ECSTD)
    Sn = (DIS * np.cos(x) * np.cos(y) - Sd) / (np.square(np.cos(y)) +
        CON * np.square(np.sin(y)))
    S1 = DIS - Sn * np.cos(x) * np.cos(y)
    S2 = Sn * np.sin(x) * np.cos(y)
    S3 = -Sn * np.sin(y)
    Sxy = np.sqrt(np.square(S1) + np.square(S2))
    del x, y, Sd, Sn
    lons = RAD2DEG * np.arctan2(S2, S1) + SubLon
    lats = RAD2DEG * np.arctan2(CON * S3 / Sxy)
    return lons, lats
lons, lats = _GetLonLat()
file=h5.File('lonlat.h5','w')
file.create_dataset('lon',data=lons)
file.create_dataset('lat',data=lats)
  
```

图 2 利用计算方法生成经纬度信息的关键代码

由于 500 m、1000 m、2000 m、4000 m 分辨率数据的卫星参数不同,例如:列偏移(COFF)、列比例因子(CFAC)、行偏移(LOFF)、行比例因子(LFAC)在不同分辨率下有所不同,因此程序计算时需要进行对应的修改。

### 3.2 AGRI 数据可视化

AGRI 数据有 500 m、1000 m、2000 m、4000 m 四种不同分辨率的文件,500 m 文件仅有 Channel02 通

道(0.67  $\mu\text{m}$ ), 1000 m 通道有 Channel01(0.47  $\mu\text{m}$ )、Channel02(0.67  $\mu\text{m}$ )、Channel03(0.83  $\mu\text{m}$ ), 2000 m 文件有 Channel01 ~ Channel07 通道, 而 4000 m 数据包含全部 14 个通道数据。AGRI 数据的全圆盘图为 15 min 间隔, 中国区域为 4 min 间隔。HDF 文件中每个通道的数据存储在 NOM-ChannelX(X:1~14)数据集下, 而定标文件存在 CALChannelX(X:1~14)数据集下, 其中 NOM-ChannelX 中的数据指向 CALChannelX 中的级数, 如何将 NOMChannelX 中的定标级数与定标表中每一级观测的数据一一对应应是数据可视化的关键之一。本文采取的关键代码如图 3。

```

CALChannel01=np.array(dset_CALChannel01)
NOMChannel01=np.array(dset_NOMChannel01)
print 'NOMChannel01 shape:',NOMChannel01.shape
NOMChannel01[NOMChannel01>65530]=0
NOM=NOMChannel01.astype(dtype='float32')
print NOM
print 'NOM shape:',NOM.shape
print 'The length of CALChannel01:',len(CALChannel01)
for i in range(len(CALChannel01))[:]:
    NOM[NOM==float(i)]=CALChannel01[i]
    
```

图 3 通道数据与定标表映射关键代码

通道数据与定标表映射之后, 可调用 Basemap 进行绘制地图, 将卫星观测数据叠加在地图上便可生成卫星云图。图 4 是 2018 年 5 月 19 日 19:00 0.65  $\mu\text{m}$  通道 4000 m 分辨率圆盘图。

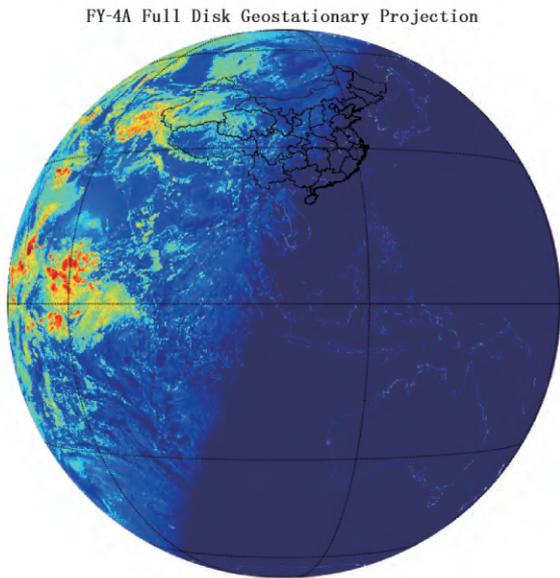


图 4 2018 年 5 月 19 日 19:00 FY-4A 卫星 0.65  $\mu\text{m}$  通道 4000 m 分辨率的可见光圆盘图

### 3.3 LMI 闪电数据可视化

LMI 闪电成像仪是全球第一批两颗静止气象卫星闪电成像仪之一, 我国首次研制, 采用 CCD 面阵和光学成像技术, 对观测区域内包括云闪、云间闪、云-地闪在内的总闪电进行凝视和观测, 实现对雷暴系统的实时、连续监测和跟踪, 为强对流天气监测、民航、铁路、电力等行业安全保障等提供服务, FY-4A 卫星闪电成像仪每年从春季到秋季观测中国地区, 其他时间观测印度洋和澳大利亚西部地区。LMI 分钟数据以 netCDF 格式为主, 因此 Python 读取时需调用 netCDF4 库, LMI 数据中包含闪电发生的经纬度和闪电强度值, 因此使用 Numpy 读取数据, 采用 Matplotlib 和 Basemap 进行可视化绘图, 图 5 是 2018 年 5 月 20 日 15:55—16:05 闪电监测数据。闪电数据与 FY-4A 卫星 2000 m 高分辨率可见光云图对比较为一致。

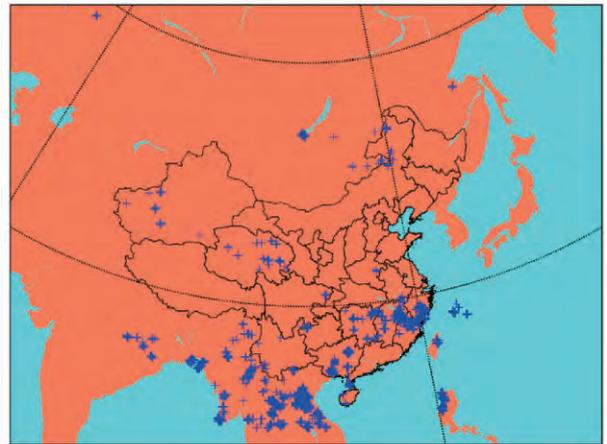


图 5 2018 年 5 月 20 日 15:55—16:05 闪电监测数据 (图中“+”表示闪电监测数据)

### 4 FY-4A 数据在对流监测中的应用

2018 年 5 月 20 日下午至傍晚, 新疆维吾尔自治区南部的阿克苏地区出现了雷暴冰雹天气, 其中 15:00—16:00 温宿站 1 h 降水量达到 9.3 mm, 拜城站 18:00—19:00 小时降水量 4.9 mm。对农业、交通造成了较大影响, 本文使用 FY-4A 卫星多种资料结合 FY-2E 卫星 TBB 产品主要对温宿站的冰雹强对流天气进行监测分析研究。20 日 14:00(图略) 在温宿北部天山山区有弱的  $\gamma$  尺度对流云团, 南疆西部喀什、和田等地有较为明显的对流云团, 随着高空槽系统的移动和天山山区地形的共同作用, 温宿

北部的对流云团迅速发展,15:00 云团呈现东北—西南向为长轴的椭圆状,并明显加强,TBB 云顶亮温中心值达到  $-45^{\circ}\text{C}$ ,且云团左边界较为清晰,右边界相对模糊,15:15 开始,云团椭圆状的长轴继续加长,南部边界更加清楚,伸展至温宿站上空。16:00(图 6a),温宿处于云团西南侧,云团边界光滑,可见光图中色调白亮,反照率大于 80%,且对应时刻的闪电资料显示温宿站附近出现了闪电(图 6c),TBB(图 6d)中心亮温  $< -45^{\circ}\text{C}$  范围增大,

且 TBB 中心呈现“L”状,温宿位于“L”拐角处的 TBB 梯度大值区内。15:00—16:00,地面 1 h 降水达到 9.3 mm,对于西北干旱区,这样强度的降水量足以引起山洪,冲断了温宿北部山区牧场的道路。16:00 以后,云团逐渐向东北移动,中心强度有所减弱,18:00 开始影响拜城站,18:45 云团最强中心位于拜城站上空(图 6b),18:00—19:00 拜城站出现明显降水。

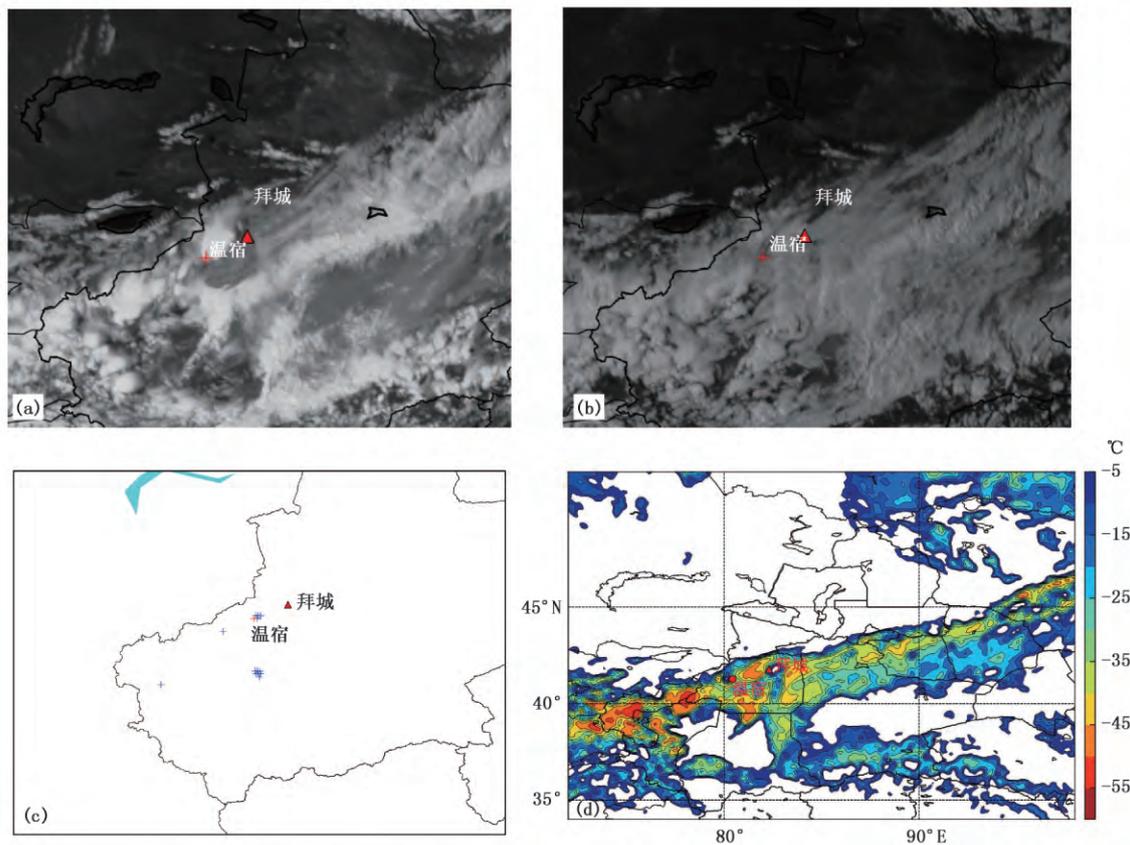


图 6 2018 年 5 月 20 日 16:00(a)和 18:45(b)FY-4A 气象卫星  $0.65\ \mu\text{m}$  可见光 4000 m 分辨率云图, 16:00 FY-4A 逐分钟闪电监测数据(c)和 FY2G TBB 对流监测图(d)

## 5 结论

(1) 本文使用 Python 语言对 FY-4A 卫星观测数据及业务产品进行绘图可视化,程序运行情况良好,绘制的图表清晰度较好,且可对图表进行定制,参数修改更贴近业务使用。

(2) FY-4A 高时空分辨率观测数据对生产、生活及灾害性天气的监测效果明显较 FY-2 系列卫星

更好,其中风云四号卫星的闪电定位监测数据能更好地识别强对流云团分布范围,对于民航气象预报而言,能更好地提供空中强对流的分布,能更好保障飞行安全,值得推广使用。

致谢:感谢安徽省黄山市气象局胡玥琦同志对本文中计算机程序编写的帮助!

## 参考文献

- [1] 许建民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用[J]. 气象, 2010, 36(7): 94-100.
- [2] 张鹏, 郭强, 陈博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析[J]. 气象科技进展, 2016(6): 72-75.
- [3] 邓莲堂. GrADS 绘图汉字显示的技术研究与实现[J]. 气象, 2010, 36(11): 115-119.
- [4] 王继竹, 王咏春, 李春虎. NCL 在气象数据图形化中的应用[J]. 山东气象, 2007, 27(2): 33-36.
- [5] 何全军, 张月维, 曹静, 等. 基于 IDL 的 MODIS1B 数据 SST 反演[J]. 热带气象学报, 2009, 25(2): 205-208.
- [6] 陈林, 牛生杰, 仲凌志. Matlab 对基于 HDF 格式的 MODIS1B 数据的提取方式与实现[J]. 气象科学, 2006, 26(6): 676-681.
- [7] 高大伟, 郁珍艳, 姚益平, 等. Python 在 FY-2G 定量业务产品自动可视化中的应用[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 43-50.
- [8] 王清平. 基于 python 的气象自动站数据解码与显示[C]// 第 31 届中国气象学会年会——S13 气象通信与信息技术应用实践与新技术探索. 北京: 中国气象学会, 2014.
- [9] 刘培宁, 韩笑, 杨福兴. 基于 R 语言的 NetCDF 文件分析和可视化应用[J]. 气象科技, 2014, 42(4): 629-634.
- [10] 国家卫星气象中心. FY-04A 成像仪上行列号和经纬度的互相转换方法[EB/OL]. [2018-06-17]. <http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/StaticContent/DocumentDownload.aspx?TypeID=10>.

## Visualization and Application of FY-4A Satellite Data

Wang Qingping<sup>1</sup> Wu Xiaojing<sup>2</sup> Chen Yangquan<sup>1</sup> Duan Jie<sup>1</sup>

(1 Meteorological Department of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, CAAC, Urumqi, 830016; 2 National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract :** On 11 December 2016, China launched FY-4A, a new-generation geostationary meteorological satellite, whose high temporal and spatial resolution can enhance the monitoring applications in aeronautical meteorology. In order to better apply the various observation products of FY-4A satellite, this paper uses the Python language to realize decoding and visualizing of the 2-km and 4-km resolution full discs, the visible and infrared images over China, and 7.8-km resolution lightning monitoring data detected by the AGRI observation instrument of FY-4A satellite, and compares the resulted satellite images with those from the website of the National Satellite Meteorological Center that are open to public. The results show that the two sorts of images are consistent and can be used in aeronautical meteorological services. The Python language syntax is concise and has fast reading speed for satellite HDF and NC format data. Python's Numpy toolkit based on matrix operation can quickly process satellite observation data. The various projection methods in the Basemap library are available for operational application, which is worthy of promotion.

**Keywords :** Python; FY-4A; lightning; full disk