

EASE-Grid 投影风云卫星产品地理信息写入方法

韩书新¹, 安英玉², 高昂^{3*}, 于敏¹, 秦铁⁴, 王志晓⁵

- (1. 黑龙江省生态气象中心, 黑龙江 哈尔滨 150030;
2. 黑龙江省人民政府人工降雨办公室, 黑龙江 哈尔滨 150030;
3. 国家卫星气象中心, 北京 100081;
4. 黑龙江省气象局机关服务中心, 黑龙江 哈尔滨 150030;
5. 西安理工大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:风云卫星遥感数据服务网的卫星遥感产品数据集中, 风云三系列气象卫星遥感产品数据集中很多采用的是等面积可伸缩地球网格(EASE-Grid)投影方式进行处理, 实际应用中使用者具有较高的数据处理能力要求, 不利于遥感产品数据集的省级应用。基于数据集使用中的这些问题, 该文以 FY3D 雪水当量数据集产品为例, 采用程序化方法对 EASE-Grid 投影产品数据集的地理信息进行写入, 通过构建地理坐标系参考对象和地理信息目录, 将数据矩阵中写入地理信息并以 GeoTiff 格式文件输出。结果表明, 经过该方法处理过的产品数据可与矢量文件实现准确的经纬度信息的匹配, 降低了数据分析处理的难度。该方法具有较好的适用性, 对于 EASE-Grid 的三种不同的投影方式均适用, 可在一定程度上提高卫星遥感产品数据集的省级科研与应用水平。

关键词:卫星遥感; 等面积可伸缩地球网格; 数据投影; 数据集; 地理信息

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2024)03-0076-07

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2024.03.012

Geographic Information Writing Method of Fengyun Satellite Products Based on EASE-Grid Projection

HAN Shu-xin¹, AN Ying-yu², GAO Ang^{3*}, YU Min¹, QIN Tie⁴, WANG Zhi-xiao⁵

- (1. Heilongjiang Ecology Meteorological Centre, Harbin 150030, China;
2. Artificial Precipitation Office of Heilongjiang Provincial People's Government, Harbin 150030, China;
3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;
4. Heilongjiang Meteorological Bureau Office Service Centre, Harbin 150030, China;
5. School of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Many of the FY-3 series meteorological satellite remote sensing product datasets in Fengyun Satellite Remote Sensing Data Service Network are processed using the Equal-Area Scalable Earth Grid (EASE-Grid) projection method, which requires high data processing capability for users in practical applications, and is not conducive to the provincial application of remote sensing product datasets. To address these issues, taking the snow water equivalent (SWE) datasets of FY3D as an example, we propose a method of geographic information writing in EASE-Grid projection product datasets using the programming. By constructing reference raster cells to geographic coordinates (GeographicCellsReference) and geographic information directory (GeoKeyDirectoryTag), geographic information is written into the data matrix and output in GeoTIFF format. The results show that the product data processed by the proposed method can accurately match with the vector files in terms of geographic information, reducing the difficulty of data analysis and processing. The proposed method is applicable to all three different projection methods of EASE-Grid and can improve the provincial-level scientific research and application of satellite remote sensing product datasets.

Key words: satellite remote sensing; equal-area scalable earth grid; data projection; datasets; geographic information

收稿日期: 2023-03-01

修回日期: 2023-07-04

基金项目: 风云卫星应用先行计划项目 (FY-APP-2021.0303); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J041); 2021 年度黑龙江省气象局科技攻关项目 (HQGG202107)

作者简介: 韩书新 (1979-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为卫星遥感与生态环境监测评估; 通信作者: 高昂 (1978-), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为机器学习、深度学习理论与应用研究。

0 引言

随着国内卫星工程的迅速发展及气象卫星相关技术如晴空数据合成^[1]、地面测距精度和卫星数据可视化等卫星应用技术能力的提高^[2-5],国内气象卫星遥感应用能力得到迅速提升。目前,气象卫星在林火、水体洪涝、植被、降水、积雪等陆表监测方面^[6-10]及天气预报、台风等大气环境监测方面^[11-13]的应用提供重要的数据产品支撑;同时,作为全球地球观测系统(GEOSS)的重要成员^[14],风云卫星积极参与国际多卫星集成业务系统的研发^[15-16];中国在气象卫星应用效益评估方法上也进行了深入研究^[17]。

国家卫星气象中心在风云卫星遥感数据服务网发布了很卫星遥感应用产品数据集,得益于国家卫星气象中心科学的反演算法和高效的数据处理能力,这些产品数据集可实现实时、批量生产^[18-20]。对于省级卫星遥感应用来说,采用这些国家级产品数据集对提高省级遥感业务能力、标准化程度和工作效率都有着积极的作用。

目前,风云卫星产品数据集在黑龙江省的利用率较低。由于省级卫星遥感能力上的不足,导致在数据集的使用中也存在问题。该文通过基于 EASE-Grid 投影的风云系列卫星遥感产品数据集在省级应用中发现的问题进行研究并提出解决方法,对提高风云卫星遥感产品的省级应用和提升省级卫星遥感业务能力水平都有着积极的作用。

1 EASE-Grid 投影简介

等面积可伸缩地球网格(Equal-Area Scalable Earth Grid, EASE-Grid),是依据美国雪冰数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)的数字地图和网格定义理论设计的一种网格,假定网格数据集被完全定义为地图投影和网格点的覆盖栅格,最初用于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的开拓者计划的微波成像(SSM/I)项目制作数据产品开发出来的^[21]。

EASE-Grid 包含 3 种投影,采用其投影的数据可被较好的扩展和应用,可作为通用工具用于处理全球尺度的网格数据。作为全球尺度网格数据(包括处理遥感数据)的通用投影格式,EASE-Grid 投影格式是一种等面积投影,可使数据表示为具有多种网格分辨率的数字阵列(12.5 km 和 25 km 等),依据适用范围的不同分为 3 种子投影:全球圆柱等面积投影(Global)、北半球方位角等面积投影(Northern Hemisphere)、南半球方位角等面积投影(Southern

Hemisphere)。都是基于“1984 全球大地坐标系统(World Geodetic System 1984, WGS84)”的椭球体,但投影方式有所差异,其中,EASE-Grid 的 Global 属于“等面积圆柱投影(Cylindrical Equal Area)”,属于一种切投影,标准纬线为赤道;“EASE-Grid Northern Hemisphere”和“EASE-Grid Southern Hemisphere”采用“兰伯特等面积方位投影(Lambert Azimuthal Equal Area)”,切点分别为南、北极点^[22-23]。

目前 EASE-Grid 有两个版本,即 EASE-Grid 和 EASE-Grid2.0,中国风云气象卫星遥感产品设计中主要使用的是 EASE-Grid 版,该文主要对 EASE-Grid 的数据格式进行分析处理。EASE-Grid 投影区域如图 1 所示。

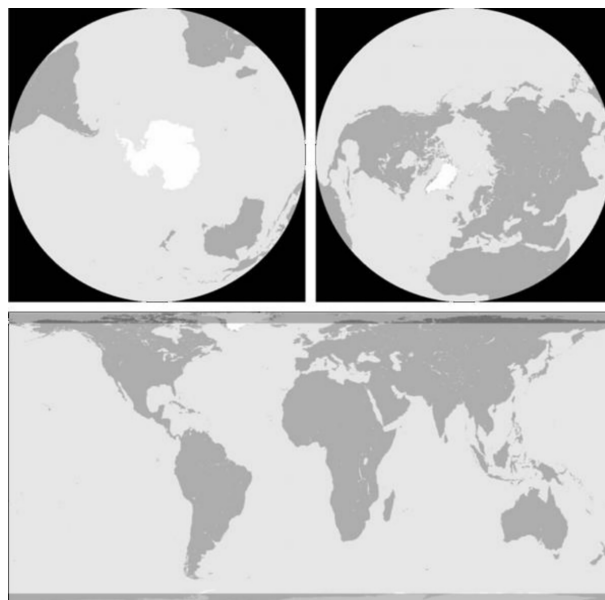


图 1 EASE-Grid 投影区域

EASE-Grid 地图投影包括:南、北半球方位角投影,全球圆柱投影和温带圆柱投影(不含灰色阴影区域)。其中,温带圆柱投影属于 EASE-Grid2.0 投影,覆盖的纬度范围为(67°S, 67°N),在其覆盖范围内与全球圆柱投影相同,全球圆柱投影纬度范围为(84°S, 84°N)。25 km 分辨率的 EASE-Grid 参数如表 1 所示。

EASE-Grid 的 3 种投影定义^[22]如下:

南半球的方位角等面积投影定义如公式 1~4 所示:

$$r = 2 \times R/C \times \sin(\text{lon}) \times \cos(\pi/4 - \text{lat}/2) + r_0 \quad (1)$$

$$s = -2 \times R/C \times \cos(\text{lon}) \times \cos(\pi/4 - \text{lat}/2) + s_0 \quad (2)$$

$$h = \sin(\pi/4 - \text{lat}/2) \quad (3)$$

$$k = \csc(\pi/4 - \text{lat}/2) \quad (4)$$

北半球方位角等面积投影定义如公式 5~8 所示:

$$r = 2 \times R/C \times \sin(\text{lon}) \times \sin(\pi/4 - \text{lat}/2) + r_0 \quad h = \cos(\pi/4 - \text{lat}/2) \quad (7)$$

$$(5) \quad k = \sec(\pi/4 - \text{lat}/2) \quad (8)$$

$$s = 2 \times R/C \times \cos(\text{lon}) \times \sin(\pi/4 - \text{lat}/2) + s_0 \quad (6)$$

表 1 25 km 分辨率的 3 种 EASE-Grid 投影参数

投影	矩阵大小	网格单元区域/m ²	左上角 x 轴地图坐标/m	左上角 y 轴地图坐标/m
Southern Hemisphere, Lambert Azimuthal	721×721	25 067.53×25 067.53	-9 036 842.76	9 036 842.76
Northern Hemisphere, Lambert Azimuthal	721×721	25 067.53×25 067.53	-9 036 842.76	9 036 842.76
Global, Equal-Area	586×1 383	25 067.53×25 067.53	-17 334 193.54	7 344 784.83

全球圆柱等面积投影定义如公式 9~12 所示:

$$r = r_0 + R/C \times \text{lon} \times \cos(30^\circ) \quad (9)$$

$$s = s_0 - R/C \times \sin(\text{lat})/\cos(30^\circ) \quad (10)$$

$$h = \cos(\text{lat})/\cos(30^\circ) \quad (11)$$

$$k = \cos(30^\circ)/\cos(\pi) \quad (12)$$

其中, r 为列号, s 为行号, h 为沿经线方向的比例, k 为沿纬线方向的比, lon 为经度(弧度), lat 为纬度(弧度), R 为地球半径(km), C 为像元大小(km), r_0 为地图原点列号, s_0 为地图原点行号。

2 FY3D 雪水当量产品介绍

国家卫星气象中心的 FY3D 雪水当量(SWE)产品数据集是基于微波成像仪(MWRI)数据开发的,数据类型为 HDF5 格式,投影方式为南、北半球方位角投影(Southern Hemisphere, Lambert Azimuthal & Northern Hemisphere, Lambert Azimuthal),分辨率为 25 km,数据集包括雪深(SD)雪水当量(SWE)全球区域(南、北半球)升/降轨产品^[24-26],数据集描述如表 2 所示。

表 2 FY3D 微波成像仪雪水当量产品数据集属性

名称	说明
数据级名称	MWRI Daily Snow Depth and Snow Water Equivalent
传感器	MWRI
数据区域	GBAL
数据级别	L2
投影类型	EASE-Grid Southern & Northern Hemisphere
数据类型	INTEGER
分辨率	25 km
矩阵大小	721×721
单位	mm
特征值	1008:Off_Earth; 1012:Land_Snow_Impossible; 1013:Ice; 1014:Water

用 ArcMap 导入 FY3D 的雪水当量日产品,输出图像如图 2 所示。可以看出, FY3D 雪水当量产品的

地理坐标不是常规的 WGS84 坐标系,而是 EASE-Grid 的北半球方位角投影,并且其数据本身没有附带经纬度等地理信息,无法与基于 WGS84 坐标系的全球区域矢量(图中左上角的全球矢量数据)进行匹配。

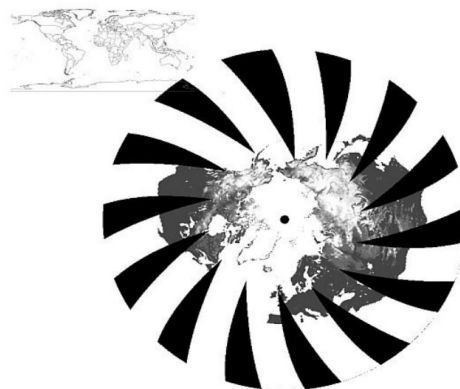


图 2 基于 EASE-Grid 投影的 FY3D 雪水当量日产品(升轨)

为了便于后续科研和业务工作中使用 GIS 类软件对数据进行分析处理,需要将其转换为带经纬度等地理信息的 GeoTiff 格式的数据。

3 数据投影转换

3.1 GeoTiff 文件的地理信息目录结构

GeoTiff 是一种 Tiff6.0 文件,它继承了 Tiff6.0 文件规范中的相应部分^[27],所有的 GeoTiff 特有的信息都编码在 Tiff 的一些预留标签(Tag)中,它没有自己的图像文件目录、二进制结构等一些对 Tiff 来说用来描述 GeoTiff 不可见的投影参数及类型信息^[28]。独立的信息标签会导致标签用量占用过高,进而消耗 Tiff 有限的标签资源。

为了解决上述问题,GeoTiff 文件采用键(Keys)来存储这些信息,这些键在功能上相当于标签,但它处在 Tiff 的更上一层,与格式化的标签值一起共存,用来支持 Tiff 文件中的图像数据。这些键也称为 GeoKeys,所有键都由‘GeoKeyDirectoryTag’标签来索引,该标签就相当于表示数据地理信息键的一个目录。

3.2 地理信息目录写入方法

国家卫星气象中心风云卫星遥感数据服务网上发布了大量的卫星遥感应应用产品数据集。很多产品数据集投影方式采用的都是 EASE-Grid 的投影方式。下面以 FY3D 雪水当量日产品北半球投影数据(SWE_Northern_Daily)为例,对原始 EASE-Grid 投影数据产品的地理信息写入方法进行阐述,并将 HDF 格式转为 GeoTiff 格式输出。

3.2.1 构建空间参考

通过 EASE-Grid 参数创建地理坐标系栅格参考对象(GeographicCellsReference)。创建地理坐标系栅格参考对象的主要参数包括 25 km 分辨率下的 x,y 坐标系下的范围大小,取值见表 1,均为 $[-9\ 036\ 842.76, 9\ 036\ 842.76]$,栅格数据矩阵大小为 721×721 。通过 maprefcells 命令建立地理坐标系栅格参考对象 R,如表 3 所示。对于北半球地区,需要单独将变量‘ColumnsStartFrom’和‘RowsStartFrom’的值分别设置为‘north’和‘west’。

3.2.2 构建地理信息目录

EASE-Grid 投影数据所对应的地理信息目录^[29](GeoKeyDirectoryTag)的键值共 19 个,这些键值描述

的是 EASE-Grid 投影坐标系的固有属性并与分辨率无关,故在设置 12.5 km 分辨率时可采用与 25 km 相同的标签设置,地理信息目录结构体的键值内容如表 4 所示。

表 3 地理坐标系栅格参考对象 R 属性

变量	值	数据类型
RasterInterpretation	cells	Char
XIntrinsicLimits	[0.500 0,721.500 0]	Double
YIntrinsicLimits	[0.500 0,721.500 0]	Double
CellExtentInWorldX	25 067.524 993 065 2	Double
CellExtentInWorldY	25 067.524 993 065 2	Double
XWorldLimits	[-9 036 842.76,9 036 842.76]	Double
YWorldLimits	[-9 036 842.76,9 036 842.76]	Double
RasterSize	[721,721]	Double
ColumnsStartFrom	north	Char
RowsStartFrom	west	Char
RasterExtentInWorldX	18 073 685.52	Double
RasterExtentInWorldY	18 073 685.52	Double
TransformationType	rectilinear	Char
CoordinateSystemType	planar	Char

表 4 GeoKeyDirectoryTag 主要键值属性

键	值	数据类型
GTModelTypeGeoKey	1	Double
GTRasterTypeGeoKey	1	Double
GTCitationGeoKey	PCS Name = NSIDC_EASE_Grid_North	Char
GeographicTypeGeoKey	32 767	Double
GeogCitationGeoKey	GCS Name = GCS_Sphere_International_1924_Authalic Datum = Sphere_International_1924_Authalic Ellipsoid = Sphere_International_1924_Authalic Primem = Greenwich	Char
GeogGeodeticDatumGeoKey	32 767	Double
GeogAngularUnitsGeoKey	9 102	Double
GeogEllipsoidGeoKey	32 767	Double
GeogSemiMajorAxisGeoKey	6 371 228	Double
GeogSemiMinorAxisGeoKey	6 371 228	Double
GeogPrimeMeridianLongGeoKey	0	Double
ProjectedCSTypeGeoKey	32 767	Double
ProjectionGeoKey	32 767	Double
ProjCoordTransGeoKey	10	Double
ProjLinearUnitsGeoKey	9 001	Double
ProjFalseEastingGeoKey	0	Double
ProjFalseNorthingGeoKey	0	Double
ProjCenterLongGeoKey	0	Double
ProjCenterLatGeoKey	90	Double

3.2.3 地理信息目录写入

通过 `geotiffwrite` 函数将构建好空间参考系和地理信息目录与数据矩阵一起输出为后缀为 `tif` 的 `GeoTiff` 文件。写入格式为: '`geotiffwrite('filename.tif', Data_Matrix, R, 'GeoKeyDirectoryTag', info_Northern)`'。其中, `filename.tif` 为所要输出的文件名, `Data_Matrix` 为读入的 EASE-Grid 投影下的雪水当量产品数据矩阵, 其矩阵大小应满足 721×721 大小, `R` 为构建的空间参考系, `info_Northern` 为构建的 `GeoKeyDirectoryTag`。

经过地理信息目录写入的数据以 `tif` 文件格式输出, 如图 3 所示, 用 `ArcMap` 软件导入后, 数据文件已带有 EASE-Grid 北半球投影的经纬度信息, 比较图 2 可以看出矢量地图可与雪水当量数据进行准确的匹配。

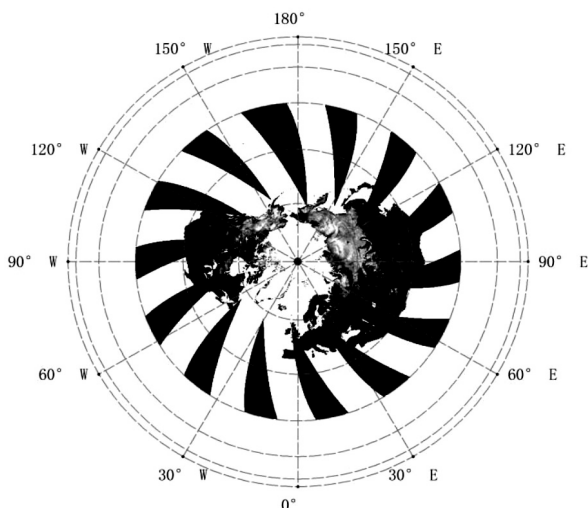


图 3 NSIDC_EASE_Grid_North 投影坐标系下的雪水当量日产品(升轨)

由于数据写入了地理信息, 因此可以方便导入 GIS 类软件进行遥感数据处理, 图 4 为 `GCS_WGS_1984` 地理坐标系下的图像数据。

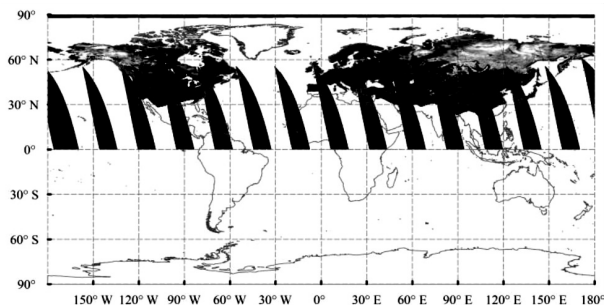


图 4 GCS_WGS_1984 地理坐标系下的雪水当量日产品(升轨)

通过比较数据写入前后的信息属性可以看出, 写入地理信息后的数据已包含 EASE-Grid 北半球投影的空间参考, 如图 5 所示。

Property	Value
Extent	
Top	0.5
Left	-0.5
Right	720.5
Bottom	-720.5
Spatial Reference	<Undefined>
Linear Unit	
Angular Unit	
Statistics	

(a) 写入前(HDF5 格式)

Property	Value
Extent	
Top	9036842.76
Left	-9036842.76
Right	9036842.76
Bottom	-9036842.76
Spatial Reference	NSIDC_EASE_Grid_North
Linear Unit	Meter (1.000000)
Angular Unit	Degree (0.0174532925199433)
false_easting	0

(b) 写入后(GeoTiff 格式)

图 5 地理信息写入前后的数据属性

3.3 数据的投影转换

数据写入地理信息后, 虽然可匹配 GIS 数据框属性中设置的坐标系统(WGS1984), 但写入地理信息的数据仍为等面积投影, 在某些情况下可能涉及到与其它数据像元的经纬度匹配的问题, 所以在进行多源或综合数据分析计算时, 根据需求对数据进行投影转换, 如图 6 所示。

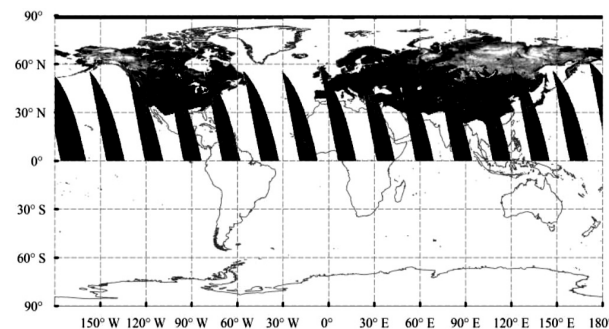


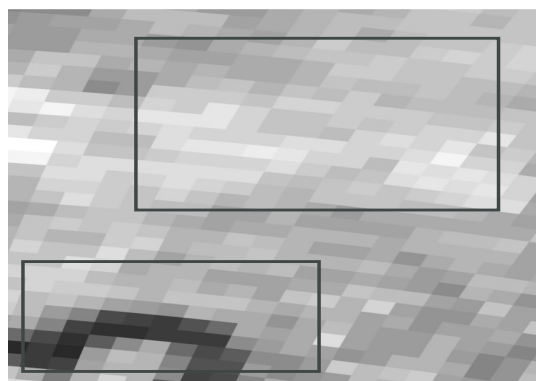
图 6 EASE-Grid 转 WGS1984 投影

将 EASE-Grid 投影下的数据转换到 WGS1984 投影坐标系, 如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出, `FY3D` 的雪水当量产品数据在写入地理信息后仍为基于 EASE-Grid 的一种方位角等面积投影, 在 WGS1984 坐标系下像元会发生变形; 数据经过临近差值法处理后如图 7(b) 所示, 处理后的数据便于匹配其它数据进行后续的分析计算。图 7 所示的仅是基于 EASE-Grid 坐标系到 WGS1984 坐标系的投影转换。工作中可根据实际情况需求, 在保证数据精度和可用性的情况下, 采用不同的差值方法转换为所需的投影方式。

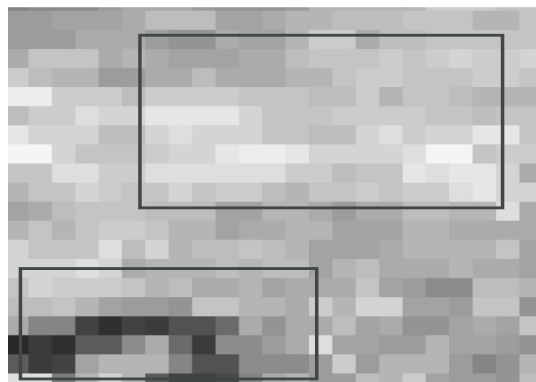
3.4 方法适用性

以上所述的是以 `FY3D` 雪水当量产品为例, 阐述了 EASE-Grid 投影数据产品的地理信息写入方法。采用该方法可以解决其它产品的类似问题。图 8 所示的是经过文中方法处理后的其它数据集产品。写入地理信息后的数据集产品可与矢量数据进行较好的匹

配,满足开展科研与业务工作数据需求。



(a) EASE-Grid(栅格范围不一致)



(b) WGS1984(栅格范围一致)

图7 雪水当量日产品处理前后的图像差异 (NEAREST)



(a) 全球陆表温度(LST)



(b) 北极海冰密集度(SIC)

图8 处理后的数据集产品

4 结束语

针对基于 EASE-Grid 投影的国家级卫星遥感产品在省级应用中发现的数据投影问题,以 FY3D 的雪水当量(SWE)日产品数据为例,通过建立并写入地理信息目录对数据产品进行地理信息写入,解决了卫星遥感产品省级应用中出现的产品数据集与矢量文件或辅助数据(如地形数据等)在分析处理中的地理信息匹配问题,总结如下:

(1)数据处理过程是首先建立与数据相适应的空间参考信息(投影方式、矩阵大小、分辨率等),其次根据空间参考信息构建地理信息目录,最后将已经构建好的空间参考和地理信息目录与原始 HDF5 格式的数据矩阵一起写入 GeoTiff 文件类型并输出。

(2)输出的具有地理信息的产品数据仍是 EASE-Grid 等面积投影,在其它坐标系下图像会发生变形,为满足数据分析处理中的地理信息匹配需要,需根据实际需求对数据进行投影转换操作,再进行后续的数据处理。

(3)采用文中方法也可以用于处理其它产品的类似问题。目前已在 FY3D 全球陆表温度数据(LST)、海冰密集度(SIC)等数据集产品上进行了适应性验证,经过处理后的数据集产品适用性较好。

针对基于 EASE-Grid 投影的风云极轨气象卫星遥感反演产品进行地理信息写入,通过投影转换使其适应科研业务应用,对提升省级卫星遥感应用能力有一定的促进作用。该方法虽然在多种反演产品中做了适用性试验,但在具体业务化过程中仍可能出现各种问题,将在今后研究工作中持续改进。

参考文献:

- [1] 瞿建华,鄢俊洁,王燕婷. 基于 FY-3D 的 MERSI 全球晴空数据合成技术[J]. 气象科技,2019,47(4):539-545.
- [2] 贾耀红,任立清,郭强. 风云四号气象卫星地面测距系统精度改进技术[J]. 气象科技,2020,48(5):630-634.
- [3] 王清平,吴晓京,陈阳权,等. FY-4A 卫星数据可视化及应用[J]. 气象科技,2019,47(3):502-507.
- [4] MIN M, WU C Q, LI C, et al. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: fengyun-4 series[J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(4): 708-719.
- [5] 王山海,刘谦,马鑫鑫. 基于图像识别的人工影响天气业务的研究[J]. 计算机技术与发展,2019,29(5):172-177.
- [6] 单海滨,刘玉洁,樊昌尧,等. 极轨气象卫星森林火灾实时监测系统[J]. 气象科技,2008,36(3):335-340.
- [7] 朱政霖,林友明,黄鹏,等. 遥感卫星对地覆盖仿真系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2017,27(10):126-129.
- [8] 许健民,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.
- [9] 武胜利, 刘畅, 陈洁. FY-3 卫星积雪监测产品概述及在遥感服务中的应用[J]. 上海航天, 2018, 35(2): 60-65.
- [10] JIANG L M, WANG P, ZHANG L X, et al. Improvement of snow depth retrieval for FY3B-MWRI in China[J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 57(6): 1278-1292.
- [11] 夏士明, 李 蹇, 谢凯翔. 形状特征的卫星云图检索方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(4): 60-64.
- [12] TAPIADOR F J, TURK F J, PETERSEN W, et al. Global precipitation measurement: methods, datasets and applications [J]. Atmospheric Research, 2012, 104-105(1): 70-97.
- [13] 胡龙平, 吴健平, 王 晨, 等. 基于 Flex 的热带气旋检索分析 WebGIS 开发研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(9): 162-165.
- [14] 杨 军. 我国“风云”气象卫星及其应用的回顾与展望[J]. 航天器工程, 2008, 17(3): 23-28.
- [15] 徐 宾, 师春香, 姜立鹏, 等. 东亚多卫星集成降水业务系统[J]. 气象科技, 2015, 43(6): 1007-1014.
- [16] LU Q F, BELL W, BAUER P, et al. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(658): 1298-1311.
- [17] 王 富, 陆其峰, 于天雷. 气象卫星应用效益评估方法及其应用[J]. 气象科技, 2021, 49(3): 348-354.
- [18] 郑 伟, 王 新, 张晔萍, 等. 风云气象卫星在防灾减灾中的应用[J]. 科技导报, 2021, 39(15): 31-38.
- [19] 李 雪, 咸 迪. 跨平台文件共享系统设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(6): 191-194.
- [20] 咸 迪, 徐 喆, 李 雪, 等. 气象卫星数据共享服务及其应用平台[J]. 卫星应用, 2021(7): 39-46.
- [21] 戴立峰, 张胜茂. 等面积可伸缩地球网格投影分析与应用[J]. 海洋测绘, 2012, 32(6): 17-19.
- [22] 宾婵佳, 邱玉宝, 牛静静, 等. EASE-Grid 投影对青藏高原雪水当量产品的验证影响分析[J]. 遥感信息, 2015(1): 96-100.
- [23] OLSON J M. Map projections and the visual detective: how to tell if a map is equal-area, conformal, or neither[J]. Journal of Geography, 2006, 105(1): 13-32.
- [24] 刘 畅, 武胜利, 郑照军, 等. 风云卫星在积雪覆盖监测方面的应用[J]. 卫星应用, 2018(11): 34-39.
- [25] 孙知文, 于鹏珊, 夏 浪, 等. 被动微波遥感积雪参数反演方法进展[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 9-15.
- [26] 武胜利, 刘畅, 陈洁. FY-3 卫星积雪监测产品概述及在遥感服务中的应用[J]. 上海航天, 2018, 35(2): 60-65.
- [27] 陈端伟, 束 炯, 王 强, 等. 遥感图像格式 GeoTIFF 解析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2006(2): 18-26.
- [28] 杨建钦, 周子勇. GeoTIFF 在处理海量遥感图像中的实现及应用[J]. 计算机应用, 2007(S1): 434-435.
- [29] 刘修国, 花卫华. GeoTiff 中 GeoTag 域解析[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(3): 246-249.