#### DOI: 10.5846/stxb202205241462

陈峰,王辰星,孙倩,张文浩,柳林,宋月君. 高分一号宽幅多光谱影像辐射定标偏差及其植被指数影响.生态学报,2023,43(5):1861-1873. Chen F, Wang C X, Sun Q, Zhang W H, Liu L, Song Y J.Radiometric calibration bias of the Gaofen-1 WFV multispectral imagery and its influence on vegetation index. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5):1861-1873.

# 高分一号宽幅多光谱影像辐射定标偏差及其植被指数 影响

峰1,2,王辰星3,孙 倩4,张文浩1,柳 林5,宋月君6,7,\* 陈

1 厦门理工学院,计算机与信息工程学院,厦门 361024

- 2 厦门理工学院数字福建自然灾害监测大数据研究所,厦门 361024
- 3 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
- 4 国家地质实验测试中心,北京 100037
- 5 华中科技大学,物理学院,武汉 430074
- 6 江西省水利科学院,江西省土壤侵蚀与防治重点实验室,南昌 330029
- 7 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,杨凌 712100

摘要:自 2013 年 4 月在轨运行以来,高分一号 (GF-1) 宽幅 (WFV) 多光谱相机已实现持续对地观测,为包括生态学在内的相 关研究领域与行业应用提供了丰富的数据源。当前场地定标频次偏低以及定标参数更新、发布滞后的现状,一定程度上影响了 GF-1 WFV 多光谱数据的定量应用。然而,现有文献仅在数据预处理流程中谈及对 GF-1 WFV 影像的辐射定标处理,很少讨论 定标参数选取不当甚至误用产生的可能影响。基于已公布的辐射定标参数(2014—2021年)和4景 GF-1 WFV Level1A级影 像产品数据,重点围绕辐射定标偏差及其对多光谱波段星上反射率和常用植被指数的影响等展开模型分析和讨论。结果显示: 即使两个相邻年份间,在多数情况下误用辐射定标参数会导致不可忽视的波段星上反射率相对偏差;进而给不同类型植被指数 的实际应用带来不同程度的挑战。因辐射定标偏差的影响,常用的两波段归一化型植被指数在监测稀疏植被覆盖区时会存在 明显的误差;而对高植被覆盖区的监测时采用两波段简单比值型植被指数将面临更大的挑战。针对存档 GF-1 WFV Level1A 数 据的应用需求,提出利用时间距离加权的线性内插法来修正基于公开定标参数的辐射定标结果,并通过案例分析表明了该处理 方法的有效性。最后,希望研究结果能引起普通用户对卫星遥感影像辐射定标的关注和重视。 关键词:多光谱影像;高分一号;植被指数;辐射定标;反射率;相对偏差

# Radiometric calibration bias of the Gaofen-1 WFV multispectral imagery and its influence on vegetation index

CHEN Feng<sup>1, 2</sup>, WANG Chenxing<sup>3</sup>, SUN Qian<sup>4</sup>, ZHANG Wenhao<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>5</sup>, SONG Yuejun<sup>6,7,\*</sup>

1 College of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China

2 Big Data Institute of Digital Natural Disaster Monitoring in Fujian, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China

- 5 School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
- 6 Jiangxi Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China

基金项目:国家重点研发计划课题项目 2019YFB2102004);福建省自然科学基金项目 (2021J011190);厦门理工学院高层次人才项目 (4010520004); 江西省水利科技项目 (202224ZDKT11)

收稿日期:2022-05-24; 网络出版日期:2022-12-07

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: well3292@126.com

7 Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China

Abstract: Since its on-orbit operation in April 2013, the wide field of view (WFV) sensors onboard Gaofen-1 (GF-1), where "Gaofen" means high resolution in Chinese, have continuously collected multispectral imagery of the Earth's surface. The GF-1 WFV sensors have provided abundant data sources for many fields including ecology. The fact that insufficient site calibration (i.e. once a year) as well as the updates lag of calibration parameters might limit the quantitative application of the GF-1 WFV imagery to a certain extent. However, current literature has only mentioned radiometric calibration of the GF-1 WFV images as a pre-processing procedure, whereas has rarely discussed the possible impacts caused by improper selection or misuse of calibration parameters. Based on the radiometric calibration parameters published for the GF-1 WFV imagery (from 2014 to 2021) and four scenes of the Level1A data products, the issue on radiometric calibration bias was investigated. Furthermore, impacts of the radiometric calibration bias on the top of atmosphere (TOA) reflectance and on several vegetation indices commonly used were discussed accordingly. It showed that, generally, even the calibration difference between two neighboring years were considered, in most cases, improper selection of the calibration parameters could result in a significantly relative bias in the TOA reflectance. The bias in TOA reflectance further challenged different types of vegetation indices with varying degrees of patterns in practice. In particular, mainly due to the radiometric calibration biases, the obvious errors were more likely in the normalized difference vegetation index based on two bands, for monitoring sparse vegetation coverage area. Actually, the normalized difference vegetation index has been commonly used in assessing vegetation status as well as surface dynamics. At the same time, for monitoring high vegetation coverage area, the simple ratio vegetation index with two bands was possibly confronted with greater challenges. Consequently, to make full use of the GF-1 WFV Level1A products, it is critical to solve the radiometric calibration problems. In this study, a time weighted linear interpolation method was proposed. In the interpolation process for a specific GF-1 WFV imagery, both radiometric parameters obtained closely before and after the imagery acquisition were integrated. A case study suggested the effectiveness of the proposed processing to improve the radiometric calibration of the GF-1 WFV images in Level1A products, as compared against the results obtained merely based on public calibration parameters. Finally, general users should pay much attention to the radiometric calibration of satellite remotely sensed data (e.g., the GF-1 WFV multispectral imagery) for their quantitative applications, as discussed in this investigation.

Key Words: multispectral imagery; Gaofen-1; vegetation index; radiometric calibration; reflectance; relative bias

高分一号(Gaofen-1,简称 GF-1)于 2013年4月成功发射并持续在轨运行,是我国高分辨率对地观测重 大专项计划的首发星,它突破了高空间分辨率、多光谱与宽覆盖相结合的光学遥感等关键技术<sup>[1]</sup>。GF-1 搭载 了四台 16 m 分辨率的宽幅/宽视场(WFV)多光谱相机,每台相机均具备蓝光波段(Blue,450—520 nm)、绿 光波段(Green,520—590 nm)、红光波段(Red,630—690 nm)和近红外波段(NIR,770—890 nm)四个波段。 同时,通过拼接组合四台 WFV,可实现兼顾较高时空分辨率、大范围区域动态监测能力<sup>[1]</sup>。得益于上述特点 和优势,GF-1 WFV 影像已在多个领域得到应用。对知网(CNKI)的文献检索结果显示(分别以"高分一号" "GF-1""Gaofen-1"为搜索关键词,并人工剔除不相关论文),2013—2021年期间涉及 GF-1 应用的文献共计 474 篇,其中与植被指数应用相关的文献有 128 篇。

卫星遥感植被指数对植物的叶绿素含量、叶子表面冠层、冠层结构比较敏感,与单个波段光谱反射率相比,能更有效地度量绿色植被的数量和生长状况<sup>[2-5]</sup>。因此,植被指数被认为是描述植被状况最简单有效的参数之一,常用于指示各类生态系统的健康状况,并作为提取和估算植被其他信息和参数的基本变量<sup>[6-8]</sup>。同时,利用时序卫星遥感植被指数,可开展植被物候研究、地表动态监测、土地利用与覆盖、气候变化影响评估、植被生产力建模以及灾害胁迫与评估等方面的工作<sup>[5,9-12]</sup>。从 CNKI 文献检索结果来看,对 GF-1 WFV 植

被指数的讨论和应用主要集中在典型植被指数计算<sup>[13]</sup>、植被覆盖度<sup>[14-16]</sup>、作物叶面积指数<sup>[17-18]</sup>、生物 量<sup>[14,19]</sup>、叶绿素相对含量<sup>[20]</sup>、植被(如农作物、森林树种等)覆盖类型与分布<sup>[21-25]</sup>以及动态监测<sup>[26-27]</sup>与灾 害评估<sup>[28-29]</sup>等。与Landsat-8 陆地成像仪(OLI)的对比分析表明,因波段设置的差异,两类传感器影像在获取 植被指数方面有一定的偏差<sup>[13]</sup>;然而,与Landsat-8 OLI相比,GF-1 WFV 在估算植被覆盖度、叶面积指数和生 物量等方面能获得较一致的结果,且具备高时间、空间分辨率优势<sup>[14-15,17]</sup>。此外,依据实际应用场景和 GF-1 WFV 影像数据的特征,研究人员开发了专门性的植被指数,如翅碱蓬植被指数<sup>[30]</sup>、冬小麦条锈病指数<sup>[31]</sup>。

与 Landsat 卫星系列遥感数据的标准处理和分发共享方式不同,我国目前发布的卫星遥感数据(如 GF-1)以 Level1级相对辐射校正产品为主。普通数据用户通常需要在经过辐射定标、几何校正等一系列处理后, 才能进行信息提取及生产相应的产品<sup>[32]</sup>。准确的辐射定标是开展卫星遥感定量参数提取与应用的必要前提 和基本保障<sup>[33-36]</sup>。尤其是对应用时序卫星遥感植被指数产品而言,因传感器辐射性能改变引起的微小定标 偏差会影响甚至误导最终的分析结果<sup>[37]</sup>。然而,现有文献仅在数据预处理流程中谈及对 GF-1 WFV 影像的 辐射定标处理,很少讨论可能的定标偏差及其对包含植被指数在内的相关参数的影响。中国资源卫星应用中 心一般于每年的 7—9 月在敦煌绝对辐射校正场和青海湖辐射校正场开展针对国产陆地资源环境及高分系列 卫星传感器(包括 GF-1 WFV)的外场定标试验,并于同年的 12 月左右公布定标参数,供数据用户参考、使用 (http://www.cresda.com/CN/)。因此,当前的辐射定标参数更新公布机制显得相对滞后,难以准确、及时体 现在轨运行中 GF-1 WFV 传感器辐射性能的改变情况,势必导致波段星上反射率误差并影响常用植被指数的 计算结果。

本文围绕 GF-1 WFV 影像数据的辐射定标偏差及其对典型植被指数的影响展开分析和讨论。主要工作 包括:(1)针对两类典型植被指数,即两波段简单比值型和两波段归一化型,给出辐射定标的植被指数影响分 析模型;(2)讨论基于已公布的 GF-1 WFV 定标参数的统计分析结果;(3)特别针对存档 GF-1 WFV Level1A 影像数据,且其获取时相前、后两次的辐射定标参数均已知,提出基于时间距离加权的线性内插法来修正其辐 射定标结果,并结合实际案例,展示该修正策略的有效性。

#### 1 方法

#### 1.1 辐射定标的植被指数影响分析模型

截至 2021 年 12 月底,已公布的定标文件中给出了 4 台 GF-1 WFV 多光谱相机的辐射定标参数 (表 1) 和相应的定标公式 (式(1)) (http://www.cresda.com)。

$$L_i^s = \operatorname{Gain}_i \times DN_i \tag{1}$$

式中,  $DN_i$  为卫星载荷在波段的观测值(影像原始值),  $L_i^*$  为经辐射定标转换后的星上光谱辐亮度,单位为 W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>  $\mu$ m<sup>-1</sup>; Gain<sub>i</sub> 为增益量,即定标斜率,单位为 W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>  $\mu$ m<sup>-1</sup>。

进一步,通过式(2)可从星上光谱辐亮度得到星上反射率:

$$s_i = \pi \times L_i^s \times d^2 / (\text{ESUN}_i \times \cos\theta s)$$
<sup>(2)</sup>

式中, *s<sub>i</sub>* 为波段 *i* 的星上反射率; ESUN<sub>i</sub> 为大气顶层太阳辐照度(可从官方公布的资料获取 http://www. cresda.com); θs 为太阳天顶角,可从影像头文件获得; d 为日地天文距离。星上反射率在一定程度上减小了时空差异对星上辐射亮度的影响,便于不同时相、不同传感器获取的影像之间的对比<sup>[38]</sup>。

由式(2)得到辐射定标的星上反射率影响分析模型,可表述为:

$$\Delta s_i = \Delta L_i^s \times \pi \times d^2 / (\text{ESUN}_i \times \cos\theta s)$$
(3)

式中,  $\Delta s_i$  是指波段 *i* 的辐射定标偏差  $\Delta L_i^s$  引起的星上反射率误差。

同时,定义星上反射率相对偏差:

$$\Delta s_{i\_Re} = \frac{\Delta s_i}{s_i} = \frac{\Delta L_i^s}{L_i^s} = \frac{\Delta \operatorname{Gain}_i}{\operatorname{Gain}_i}$$
(4)

#### http://www.ecologica.cn

### 式中, $\Delta s_{i Re}$ 为波段 i 的星上反射率相对偏差, Gain<sub>i</sub> 和 $\Delta$ Gain<sub>i</sub> 分别为波段 i 的增益量和增益量偏差。

传感器及波段	年份 Year								
Sensor and band	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
宽幅相机1 蓝波段 WFV1 Blue	0.2004	0.1816	0.1843	0.2165	0.1824	0.2144	0.1932	0.1722	
绿波段 Green	0.1648	0.1560	0.1477	0.1685	0.1546	0.1647	0.1604	0.1496	
红波段 Red	0.1243	0.1412	0.1220	0.1354	0.1270	0.1228	0.1280	0.1227	
近红外波段 NIR	0.1563	0.1368	0.1365	0.1507	0.1344	0.1213	0.1341	0.1262	
宽幅相机2蓝波段WFV2Blue	0.1733	0.1684	0.1929	0.2097	0.1851	0.2368	0.2057	0.1792	
绿波段 Green	0.1383	0.1527	0.1540	0.1630	0.1538	0.1745	0.1648	0.1534	
红波段 Red	0.1122	0.1373	0.1349	0.1339	0.1231	0.1254	0.1260	0.1232	
近红外波段 NIR	0.1391	0.1263	0.1359	0.1521	0.1314	0.1163	0.1187	0.1291	
宽幅相机3 蓝波段 WFV3 Blue	0.1745	0.1770	0.1753	0.1870	0.1894	0.2139	0.2106	0.2044	
绿波段 Green	0.1514	0.1589	0.1565	0.1619	0.1728	0.1797	0.1825	0.1844	
红波段 Red	0.1257	0.1385	0.1480	0.1295	0.1343	0.1344	0.1346	0.1429	
近红外波段 NIR	0.1462	0.1344	0.1322	0.1383	0.1373	0.1337	0.1187	0.1453	
宽幅相机4蓝波段 WFV4 Blue	0.1713	0.1886	0.1973	0.1770	0.1866	0.2442	0.2522	0.2102	
绿波段 Green	0.1600	0.1645	0.1714	0.1521	0.1599	0.1945	0.2029	0.1808	
红波段 Red	0.1497	0.1467	0.1500	0.1322	0.1307	0.1547	0.1528	0.1442	
近红外波段 NIR	0.1435	0.1378	0.1572	0.1349	0.1251	0.1037	0.1031	0.1362	

	表1	已正式公布自	匀 GF-1 WF	V 多光谱相机定	目标参数	(増益)	量)	
Table 1	Calibration r	<b>parameters</b> (ga	ins) <b>publicl</b>	v accessed for t	he GF-1	WFV	multispectral	sensors

 近红外波段 NIR
 0.1435
 0.1378
 0.1572
 0.1349
 0.1251
 0.1037
 0.1031
 0.1362

 GF-1 WFV:
 高分一号宽幅相机 Gaofen-1 Wide Field of View;
 表中 WFV1 2020 年的定标参数是四舍五人后的结果(原来为小数点后5位);

 2013 年的定标系数包含了增益和偏移量,为了展示的方便,没有在本表中列出;已公布的2014—2021 年 GF-1 WFV 各波段的偏移量均为0,所以

表中仅列出增益量;所有定标参数均来自 http://www.cresda.com/

由于目前是每年更新公布一次 GF-1 WFV 的辐射定标参数,为了后文分析和表述的需要,特别地将某年份 y 相对参考年份的反射率相对偏差表达为:

$$(\Delta s_{i\_Re})_{y} = \frac{(\Delta \operatorname{Gain}_{i})_{y}}{(\operatorname{Gain}_{i})_{0}} = \frac{(\operatorname{Gain}_{i})_{y} - (\operatorname{Gain}_{i})_{0}}{(\operatorname{Gain}_{i})_{0}}$$
(5)

式中,  $(Gain_i)_0$  是参考年份波段 *i* 的增益量,  $(Gain_i)_y$  是年份 *y* 的增益量。相应地,式(5) 表示在本该使用增益量 ( $Gain_i$ )\_0 时,用户错误地采用了年份 *y* 的增益量 ( $Gain_i$ )\_y,进而产生的波段星上反射率相对偏差值。

基于星上反射率相对偏差构建辐射定标的植被指数影响分析模型。本文重点讨论两种形式的植被指数,即两波段简单比值型和两波段归一化型 (表 2),相应的误差影响模型分别为式(6)和式(7)。

两波段简单比值型的误差模型:

$$\Delta VI = VI \times (\Delta s_{i \ Re} - \Delta s_{j \ Re}) \tag{6}$$

两波段归一化型的误差模型:

$$\Delta VI = \frac{1}{2} (1 - VI^2) \left( \Delta s_{i\_Re} - \Delta s_{j\_Re} \right)$$
<sup>(7)</sup>

式中,  $\Delta VI$  和 VI 分别为植被指数误差和植被指数,  $\Delta s_{i,Re}$  和  $\Delta s_{j,Re}$  分别为波段 i 和波段 j 的反射率相对偏差, 本 文将两个波段的相对变化量(( $\Delta s_{i,Re} - \Delta s_{j,Re}$ ))定义为植被指数偏差系数。

由式(6)和式(7)可知,针对两波段简单比值型和两波段归一化型两类植被指数,因波段辐射定标偏差带 来的影响程度均与植被指数大小和两个波段的反射率相对变化量有关。当两个波段的相对偏差(Δs<sub>i,Re</sub>和 Δs<sub>j,Re</sub>)同向时,则会在一定程度上抵消因辐射定标偏差带来的影响;反之,则会增大因辐射定标偏差带来的影 响。不同的是,针对简单比值型,植被指数误差与指数本身大小呈线性关系;而两波段归一化型植被指数,其 误差则与指数本身大小呈非线性关系。

Table 2         Two types of vegetation index to be discussed in this paper							
	参考文献 References						
比值型 Simple ratio $VI = \frac{s_i}{s_j}$	$SR = \frac{s_{\rm NIR}}{s_{\rm Red}}$	[ 39 ]					
	$GRVI = \frac{s_{NIR}}{s_{Green}}$	[40]					
归一化型 Normalized difference $VI = \frac{s_i - s_j}{s_i + s_j}$	NDVI = $\frac{(s_{\text{NIR}} - s_{\text{Red}})}{(s_{\text{NIR}} + s_{\text{Red}})}$	[41]					
	$\text{GNDVI} = \frac{(s_{\text{NIR}} - s_{\text{Green}})}{(s_{\text{wm}} + s_{\text{Green}})}$	[42]					

表 2	研究讨论的两类植被指数
表 2	研究讨论的两类植被指数

 Table 2
 Two types of vegetation index to be discussed in this paper

表中 s<sub>Green</sub>、s<sub>Red</sub>和 s<sub>NIR</sub>分别为绿、红和近红外波段;除特别说明外,本文将含红波段和绿波段的植被光谱指数分别统称为基于红波段植被指数 (Red based,如 SR 和 NDVI) 和基于绿波段植被指数 (Green based,如 GRVI和 GNDVI);SR:红波段比值型植被指数 Red based simple ratio vegetation index;GRVI:绿波段比值型植被指数 Green based simple ratio vegetation index;NDVI:红波段归一化植被指数 Red based normalized difference vegetation index;GNDVI:绿波段归一化植被指数 Green based normalized difference vegetation index

### 1.2 基于传感器辐射性能线性变化假设的定标结果修正

假定每次场地辐射定标获取的定标参数是准确的,则可认为增益量的(年际)波动变化能反映 GF-1 WFV 各传感器辐射性能的稳定性情况。由表1可推测,截至2021年,在轨运行中,GF-1 WFV 各传感器辐射性能发生了一定程度的改变;与 WFV4相比,WFV1的辐射性能更稳定。然而,当前 GF-1 WFV 辐射定标参数的更新公布显得相对滞后,往往无法体现影像采集时传感器真实的辐射性能(图1),进而可能导致波段星上反射率误差并影响常用植被指数的计算结果。



图 1 GF-1 WFV 现有场地定标机制及本文线性内插修正方案示意图

Fig.1 The routine of field calibration and parameters updates for the GF-1 WFV sensors, and the proposed method based on linear interpolation for correction

GF-1 WFV: 高分一号宽幅相机 Gaofen-1 Wide Field of View

若影像采集前、后两次的辐射定标参数均已知,参照文献[34]中的作法,从应用存档 GF-1 WFV Level1A 影像数据的需求出发,假定在两次场地定标试验之间(*m*<sub>*i*<sub>1</sub></sub>和*m*<sub>*i*<sub>2</sub></sub>,仅精确到月份)GF-1 WFV 传感器辐射性能 是匀速稳定改变的,可采用时间距离加权的线性内插来对辐射亮度值进行修正:

$$(L_{i}^{s})_{t} = \frac{m_{t} - m_{t_{1}}}{m_{t_{2}} - m_{t_{1}}} \times [(L_{i}^{s})_{t_{2}} - (L_{i}^{s})_{t_{1}}] + (L_{i}^{s})_{t_{1}}$$

$$(8)$$

式中,  $(L_i^i)_i$ 为通过内插方法估算得到的波段 *i* 的辐射亮度值 (t代表影像采集时相),  $(L_i^i)_{i_1}$ 和  $(L_i^i)_{i_2}$ 分别是 采用前一次(年)和后一次(年)的定标参数得到的波段 *i* 的辐射亮度值,  $m_i - m_{i_1}$ 为影像获取时相  $(m_i$ 为影 像采集月份)与前一次(年)场地定标时相  $(m_{i_1})$ 的时间距离,  $m_{i_2} - m_{i_1}$ 为相邻两次场地定标的时相差(本 文中按 12 个月计)(图 1)。为了处理方便,将每年的场地定标时相统一假定为 8 月份。

$$(L_i^s)_t = \frac{m_t - 8}{12} \times \left[ (\operatorname{Gain}_i)_{t_2} - (\operatorname{Gain}_i)_{t_1} \right] \times DN_i + (\operatorname{Gain}_i)_{t_1} \times DN_i$$
(9)

式中, (Gain<sub>i</sub>)<sub>1</sub>和 (Gain<sub>i</sub>)<sub>1</sub>分别是与影像采集时相对应的前一次(年)和后一次(年)波段 i 的增益量。

#### 2 数据

本文采用了 4 景 GF-1 WFV 影像数据(表 3) 来开展相应的案例分析:定标参数使用不当的影响和辐射 定标修正策略的有效性。GF-1 WFV 影像数据均来自中国资源卫星应用中心的陆地观测卫星数据服务平台 (http://36.112.130.153:7777/DSSPlatform/index.html)。一个影像数据压缩文件(.tar)通常主要包含 WFV 多光谱影像数据(.tiff)、影像数据元数据文件(.XML)以及用于几何校正的模型文件(.rpb)。值得注意的 是,不同 WFV 传感器间(WFV1/2/3/4)在波段设置方面存在一定的差异<sup>[43]</sup>,这类设置的差异会给不同传感 器间观测一致性带来挑战<sup>[3-4]</sup>。因此,本文在辐射定标修正案例中仅采用相邻(近)时相 GF-1 WFV1 影像数 据(表 3),即对比定标修正前后星上反射率和植被指数情况。

Ta	able 3 Data collection of the GF-1 WFV imagery used in case study	
传感器 Sensors	影像数据文件 Imagery files	
宽幅相机 1 WFV1	GF1_WFV1_E117.9_N24.6_20181218_L1A0003693183.tar	
	GF1_WFV1_E117.4_N24.6_20190124_L1A0003786905.tar	
	GF1_WFV1_E117.3_N24.6_20191210_L1A0004460277.tar	
宽幅相机 4 WFV4	GF1_WFV4_E119.4_N25.2_20191124_L1A0004418207.tar	

表 3 本文实际案例分析中采用的 GF-1 WFV 影像数据集

#### 3 结果与讨论

3.1 波段反射率相对偏差与植被指数偏差系数的分布关系

图 2 中 红 色 线 多 边 形 范 围 之 外 为 植 被 指 数 偏 差 增 大 区,即 植 被 指 数 偏 差 系 数 的 绝 对 值 ( $|(\Delta s_{i_{Re}} - \Delta s_{j_{Re}})|$ )高于波段反射率相对偏差的绝对值 ( $|\Delta s_{i_{Re}}|$ 和  $|\Delta s_{j_{Re}}|$ );相应地,红色线多边形范围内 为植被数偏差系数减小区,即植被指数偏差系数的绝对值 ( $|(\Delta s_{i_{Re}} - \Delta s_{j_{Re}})|$ )低于波段反射率相对偏差的绝 对值。可见,在多数情况下,植被指数偏差系数会出现在增大区。相应地,当两个波段的反射率相对偏差同号 出现时,会在一定程度上抵消因辐射定标偏差给植被指数带来的影响;尤其是两波段的反射率相对偏差值相 近时,相应的植被指数偏差系数集中在减小区 (约占 25%)。

3.2 基于当前 GF-1 WFV 定标参数的统计分析结果

#### 3.2.1 波段星上反射率相对偏差和植被指数偏差系数

图 3 和图 4 分别展示了针对 GF-1 WFV1 和 WFV4 的统计分析结果(保留小数点后三位)。需要指出的 是,图 3 和图 4 内各子图中每个偏差(系数)值均是以所在行对应的年份为参考,得到相应(所在列的)年份 因辐射定标导致的波段星上反射率相对偏差(或植被指数偏差系数)。如前所述,该偏差(系数)表示在本 该用参考年份的辐射定标参数(增益量)时而用户错误地采用了其他年份的辐射定标参数(增益量),引起 的波段星上反射率相对偏差(或植被指数偏差系数)。具体而言,图 3 中近红外波段(NIR)星上反射率相对 偏差在(2019,2017)处对应的值(0.242),表示的是以 2019年的增益量为参考得到的与 2017年增益量相对应 的相对偏差(即波段星上反射率相对偏差)。也就是说,在本该采用 2019年的辐射定标参数时却采用了 2017年 的辐射定标参数的情况下,会导致 GF-1 WFV1 NIR 波段星上反射率相对偏差达到 0.242(24.2%)。同时,与其对 应的基于红波段的植被指数偏差系数和基于绿波段的植被指数偏差系数分别达到 0.140 和0.219(图 3)。

整体上,对某参考年份而言,误用其他年份的辐射定标参数均会导致波段星上反射率和两类植被指数分



Fig.2 Relationship between relative bias in channel reflectance and the deviation coefficients for vegetation index 图中黑色虚线为 1:1 参考线

别出现不同程度的相对偏差和偏差系数(图3和图4)。然而,相对偏差和偏差系数与时相间距(参考年份与 误用辐射定标参数对应年份的间时相差,单位按年计)并非是线性关系,而是呈现出无规律的波动变化。以 GF-1 WFV1的NIR为例(图3),若以2021年为参考年份,误用其他年份的增益量,相应的最大偏差和最小偏 差分别对应2014年和2019年,而次大误差对应2017年。同时,即使两个相邻年份间,多数情况下,相互误用 辐射定标参数也将导致不可忽视的波段星上反射率相对偏差。就GF-1WFV1的NIR而言,除了2015年与 2016年份间外,其他两个相邻年份间对应的相对偏差均较明显,多数在0.10左右(图3)。显然,辐射定标参 数误用引起的较明显且无规律的星上反射率相对偏差,势必给后续的定量应用带来影响和挑战。

同时,星上反射率相对偏差表现出的波段间差异会导致相应的植被指数出现不同程度的偏差系数。对 GF-1 WFV1 而言,在本该采用 2019 年的定标参数而误用 2018 年的定标参数时,绿波段、红波段和近红外波段 的星上反射率相对偏差值分别为-0.061、0.034 和 0.108;相应地,基于绿波段的植被指数和基于红波段的植被 指数的偏差系数值分别为 0.169 和 0.074 (图 3)。可见,辐射定标参数误用导致的星上反射率偏差及其波段 间差异,使得两类植被指数的偏差系数呈现不同分布规律和大小。即使两个相邻年份间,在多数情况下因误 用辐射定标参数导致的植被指数偏差系数不容忽视。以 GF-1 WFV1 基于红波段的植被指数为例,除了 2020 年份与 2021 年份间和 2016 年份与 2017 年份间外,其他两个相邻年份间对应的偏差系数均在 0.05 左右,明显 的偏差系数则达到 0.262 (出现在 2014 年份与 2015 年份间)。

3.2.2 不同传感器及不同植被指数模型的偏差对比分析

误用辐射定标参数引起的波段星上反射率相对偏差以及相应的植被指数偏差系数大小和分布规律还表现出明显的传感器间差异。因篇幅限制,文中仅展示了针对WFV1和WFV4的统计结果(图3和图4)。整体上,与WFV1相比,WFV4会出现更明显的相对偏差(或偏差系数)。就GF-1WFV4的近红外波段而言,除了2014年份与2015年份间和2019年份与2020年份间外,其他两个相邻年份间对应的相对偏差均较明显,多数在0.15左右(图4)。特别地,误用2020年份的辐射定标参数会导致近红外波段的星上反射率相对偏差在2021年份达到0.321。相比而言,GF-1WFV4会出现更明显的植被偏差系数;相邻年份间两个最显著的植





misusing the calibration parameters  $(\,\mathrm{gains}\,)$  for the GF-1 WFV1

被指数偏差系数(约0.40)分别对应2018年份与2019年份间、2020年份与2021年份间。

结合植被指数偏差情况(图3和图4)和两类植被指数的误差模型(式(6)和式(7)),得到因GF-1WFV 辐射定标偏差导致的植被指数误差。以2019年误用2018年定标参数为例,因误用辐射定标参数给四个 WFV 传感器带来不同影响(图5)。整体上,WFV4 的植被指数误差更明显,WFV2 次之,而对WFV3 的植被 指数影响相对较小;且对不同植被指数模型的影响呈现出差异。就同一传感器而言,对基于绿波段的植被指 数影响要相对明显一些。同时,针对简单比值型,植被指数的误差与其本身大小呈线性关系,表现出随着植被 指数增加(误差)线性增加的趋势;而两波段归一化型植被指数模型,其误差则与指数本身大小呈非线性关 系,明显的误差出现在0值植被指数附近(图5)。可见,辐射定标偏差将给应用两类植被指数带来不同程度 的挑战。在监测稀疏植被覆盖区时,辐射定标偏差会严重影响归一化型植被指数的应用;相应地,在监测高植 被覆盖区时,则应用比值型植被指数的挑战更明显。

图 6 中展示了因辐射定标参数误用导致的 GF-1 WFV1 和 WFV4 植被指数误差情况,对应的影像子区主 要覆盖厦门岛及其周边区域。本案例中定标参数误用是指对两景 2019 年的 WFV1 和 WFV4 影像(见表 3) 相应地采用 2018 年的定标参数(见表 1)。整体上,因误用辐射定标参数给两个传感器的植被指数监测均带



图 4 因定标参数(增益量)误用导致的 GF-1 WFV4 各波段星上反射率相对偏差及植被指数偏差系数情况

Fig.4 The relative bias in channel reflectance of the top of atmosphere and the deviation coefficients for vegetation index resulted from misusing the calibration parameters (gains) for the GF-1 WFV4

来偏差(图6)。考虑同类型植被指数,相对而言,在本案例中定标参数误用给WFV4影像带来的误差更明显,有近50%的归一化型植被指数误差超过0.15。

如前文所述,误用不同年份定标参数而引起的植被指数偏差存在时相差异(年际变化),进而使得植被指数误差分布也呈现出时相差异,以及影响的传感器间差异(图3和图4)。限于篇幅文中仅给出了以2019年误用2018年定标参数导致误差的情况(图5和图6)。分析结果表明,改善辐射定标结果,减小因辐射定标参数误用带来的影响及其不确定性显得至关重要。

3.3 定标结果修正策略案例分析

采用相近时相的 GF-1 WFV1 影像数据 (表 3) 开展定标结果修正策略案例分析,主要包括定标修正前和 定标修正后的处理和分析:

(1)定标修正前。分别采用对应年份的定标参数(表1)对各 WFV1 影像进行辐射定标(式(1)),随后 计算相应波段的星上反射率(式(2))和典型植被指数(表2)以及这些变量在各时相间的差异;

(2) 定标修正后。采用时间距离加权的线性内插法策略(式(9)), 分别修正各 WFV1 影像的星上辐射亮度值, 进而计算相应波段的星上反射率(式(2))和典型植被指数(表 2)以及这些变量在各时相间的差异。

需要说明的是,本文假定机场道路(图6中黄色方形框示意)是不变目标,即在较短时相间隔内其反射特性无明显变化,且两个时相的大气环境条件相近时,则由两景影像获取的波段星上反射率和典型植被指数 值应该一致,无明显时相间差异。历史天气和大气环境质量监测数据显示:3景 GF-1 WFV1影像数据采集当



图 5 与 GF-1 WFV 辐射定标偏差相关的植被指数误差分布;简单比值型植被指数和归一化型植被指数

Fig.5 Errors in vegetation index related to the bias in radiometric calibration for the GF-1 WFV sensors: simple ratio vegetation index and normalized difference vegetation index

图中展示了以 2019 年误用 2018 年定标参数所导致的误差结果



图 6 厦门岛及周边 GF-1 WFV1 影像和因辐射定标参数误用引起的植被光谱指数误差情况:简单比值型植被指数和归一化型植被指数 Fig.6 A GF-1 WFV1 imagery over Xiamen Island and its surroundings and the errors in vegetation indices resulted from misusing calibration parameters: simple ratio vegetation index and normalized difference vegetation index

图中黄色方形框指示了反射特性不变目标 (机场跑道)

天均为晴天,且天气状况和大气环境质量相近,相应的最高、最低气温和空气质量指数分别为 20℃、11℃和 52 (2018 年 12 月 18 日),18℃、10℃ 和 63 (2019 年 1 月 24 日),以及 22℃、13℃ 和 71 (2019 年 12 月 10 日) (http://tianqi.2345.com/wea\_history/59134.htm)。同时,案例分析的不变目标位于影像星下点附近,减小了 因观测几何条件带来的影响。

统计结果显示 (表 4),不变目标 (机场道路)属于中低反射体,在 WFV1 四个波段的星上反射率均在 0.20左右,两个比值型植被指数 (*SR*和 GRVI)的值近似为1,而两个归一化型植被指数 (NDVI和 GNDVI)的 值在 0 附近。同时,经过定标修正处理后,明显缩小了不变目标在不同时相 GF-1 WFV 影像间的波段星上反 射率和植被指数差异,表明了本文所提出的辐射定标修正策略的有效性。

表 4 不变目标在相近时相 GF-1 WFV1 影像的星上反射率和植被指数情况

# Table 4 Channel reflectance of the top of atmosphere and vegetation indices for the invariant object in two GF-1 WFV1 imagery acquired at

变量	定标修正前 Before correction					定标修正后 After correction				
Variables	时相1	时相 2	差值1	时相3	差值 2	时相1	时相 2	差值1	时相3	差值2
蓝波段 Blue	0.203	0.236	0.033	0.230	0.027	0.215	0.216	0.001	0.222	0.007
绿波段 Green	0.210	0.217	0.007	0.220	0.010	0.214	0.209	-0.005	0.218	0.004
红波段 Red	0.215	0.199	-0.016	0.205	-0.010	0.212	0.203	-0.009	0.208	-0.004
近红外波段 NIR	0.231	0.198	-0.033	0.202	-0.029	0.223	0.210	-0.013	0.209	-0.014
红波段比值型植被指数 SR	1.075	0.995	-0.080	0.985	-0.090	1.051	1.037	-0.014	1.005	-0.046
绿波段比值型植被指数 GRVI	1.098	0.912	-0.186	0.918	-0.180	1.039	1.006	-0.033	0.959	-0.080
红波段归一化植被指数 NDVI	0.036	-0.003	-0.039	-0.008	-0.044	0.025	0.018	-0.007	0.003	-0.022
绿波段归一化型植被指数 GNDVI	0.047	-0.046	-0.093	-0.043	-0.090	0.019	0.003	-0.016	-0.021	-0.040

时相 1、时相 2 和时相 3 分别对应 2018 年 12 月 18 日、2019 年 1 月 24 日和 2019 年 12 月 10 日 (见表 3);各植被指数相应的计算公式见表 2;差值 1 和差值 2 分别为相应的变量在时相 2 和时相 3 的值减去在时相 1 的值

## 3.4 讨论

借助卫星遥感可以提取(或反演)生态系统组成、能量流动和物质循环过程中的关键要素,进而为生态 系统类型、结构、功能以及生物多样性等研究提供必不可少的数据源<sup>[44]</sup>。然而在承认和发挥卫星遥感优势的 同时,其潜在的不足或不确定性也应得到重视。卫星在轨运行过程中,因极端温度和辐射条件等空间环境的 影响,传感器会发生老化进而导致其辐射性能退化。即便是被大家认为成熟、稳定的 Landsat 卫星系列传感器 和中分辨率成像光谱仪(MODIS),也不可避免地出现过传感器辐射性能退化现象<sup>[37-38,45-46]</sup>。过去 20 年,尤 其是得益于高分辨率对地观测系统重大专项计划的顺利实施(2010—2020 年),我国成功发射并运行了涵盖 陆地、资源、环境以及高分系列的多颗民用卫星,同时采集、积累了大量对地观测数据。充分挖掘国产卫星遥 感历史存档数据的价值,使其更好支撑包括生态学在内的相关学科研究和行业应用,认为对其数据质量及相 关问题(包括辐射定标)的分析、讨论与改善提升是首要任务。

同时,以归一化型植被指数(如 NDVI)为代表的遥感植被指数已被广泛用于生态系统研究及相关领域, 它们往往扮演着"数据源"或中间变量的角色,因此辐射定标引起的植被指数偏差如何影响相关生态学问题 的结果(或结论)还需要开展深入研究和案例分析;面向生态系统功能监测的新指标<sup>[47]</sup>,辐射定标等预处理 的影响也有待进一步探讨。

值得注意的是,本研究提出的辐射定标修正策略(式(9)),对前、后两次的辐射定标参数均已知的存档 GF-1 WFV Level1A 级影像数据是适用的。如果仅已知前一次的定标参数,理论上可采用线性外推的策 略<sup>[34]</sup>;但是如前文所述,GF-1 WFV 各传感器辐射性能变化呈现年际波动(表1),这给直接线性外推带来不 确定性。下一步,将讨论采用交叉定标的策略<sup>[48]</sup>评估和改善WFV 辐射定标结果。

#### 4 结论

GF-1 WFV 具备宽覆盖、高频率的多光谱影像数据获取能力,自 2013 年 4 月成功发射、在轨运行以来,持 续为相关行业应用提供了丰富的数据源,很大程度上减少了我国对国外同类卫星遥感数据的依赖。文献检 索、统计结果显示,GF-1 WFV 影像数据的应用集中在农业、水环境、土地利用与覆盖及变化监测、植被及林业 等方面,其中植被指数是讨论和应用的焦点之一。卫星遥感数据的定量应用离不开稳健、准确的辐射定标。 然而,当前受限于每年一次的场地定标和定标参数更新发布的相对滞后,普通数据用户难免对定标参数选取 与辐射定标处理产生困惑,往往会误用辐射定标参数,进而导致错误的处理结果,阻碍 GF-1 WFV 影像数据的 定量应用。本文对 GF-1 WFV 影像数据辐射定标偏差及其对波段星上反射率和常见植被指数的影响展开深 入分析,主要结论如下:

different but approximate times

(1)即使两个相邻年份间,在多数情况下误用辐射定标参数会引起不可忽视的 GF-1 WFV 波段星上反射率相对偏差;同时,波段星上反射率相对偏差呈现出波段间和传感器间差异,且无规律性,给联合应用来自不同 WFV 传感器的影像数据和时序分析带来不确定性和挑战。

(2) 对常见植被指数的误差分析表明,辐射定标参数误用导致的星上反射率偏差及其波段间差异会给两 类植被指数的实际应用带来不同程度的影响和挑战。具体而言,针对两波段简单比值型,误差随着植被指数 值增加呈线性增加趋势,相应地会在高植被指数中(如对高植被覆盖区的监测结果)引入更显著的误差;而 两波段归一化型植被指数,其误差则与本身指数值呈非线性关系,明显的误差出现在0值植被指数附近,即在 监测稀疏植被覆盖区时采用两波段归一化型植被指数(如 NDVI 和 GNDVI)会存在更明显的误差。因此,改 善辐射定标结果,减小因辐射定标参数误用带来的偏差及其不确定性显得至关重要。

(3)针对当前辐射定标参数更新及发布方面存在的不足,从应用存档 GF-1 WFV Level1A 级影像数据的 需求出发,本研究提出了基于时间加权的线性内插法。在案例分析中(表4),两个时相间影像在 NIR 波段的 星上反射率偏差,在定标修正前约为 0.030,而定标修正后的偏差约为 0.013;相应的,归一化植被指数的偏差 减少了约 0.020—0.030。分析结果表明,通过该内插方法可以在一定程度修正基于公开定标参数的辐射定标 结果(星上辐射亮度值)。

(4)最后,希望本研究所讨论的话题以及展示的相关结果能引起普通用户对卫星遥感影像辐射定标的关注和重视。同时针对当前 GF-1 WFV 多光谱影像数据应用中的辐射定标问题给出的定标结果修正策略,可供普通用户参考和采用。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘斐, 吕大旻. 我国成功发射高分一号卫星. 中国航天, 2013(5): 10-13.
- [2] 罗亚,徐建华,岳文泽.基于遥感影像的植被指数研究方法述评.生态科学,2005,24(1):75-79.
- [3] Chen F, Lou S L, Fan Q C, Wang C X, Claverie M, Wang C, Li J. Normalized difference vegetation index continuity of the Landsat 4-5 MSS and TM: Investigations based on simulation. Remote Sensing, 2019, 11(14): 1681.
- [4] Chen F, Fan Q C, Lou S L, Yang L M, Wang C X, Claverie M, Wang C, Junior J M, Gonalves W N, Li J. Characterization of MSS channel reflectance and derived spectral indices for building consistent Landsat data record. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(12): 8967-8984.
- [5] Zeng L L, Wardlow B D, Xiang D X, Hu S, Li D R. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 111511.
- [6] 高明亮, 宫兆宁, 赵文吉, 高阳, 胡东. 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究. 生态学报, 2014, 34(5): 1178-1188.
- [7] Jia K, Liang S L, Gu X F, Baret F, Wei X Q, Wang X X, Yao Y J, Yang L Q, Li Y W. Fractional vegetation cover estimation algorithm for Chinese GF-1 wide field view data. Remote Sensing of Environment, 2016, 177: 184-191.
- [8] Morais T G, Teixeira R F M, Figueiredo M, Domingos T. The use of machine learning methods to estimate aboveground biomass of grasslands: A review. Ecological Indicators, 2021, 130: 108081.
- [9] Ulsig L, Nichol C J, Huemmrich K F, Landis D R, Middleton E M, Lyapustin A I, Mammarella I, Levula J, Porcar-Castell A. Detecting interannual variations in the phenology of evergreen conifers using long-term MODIS vegetation index time series. Remote Sensing, 2017, 9(1): 49.
- [10] Jiao W, Wang L, McCabe M F. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. Remote Sensing of Environment, 2021, 256: 112313.
- [11] Yan W, Wang H S, Jiang C, Jin S F, Ai J L, Sun J X. Satellite view of vegetation dynamics and drivers over southwestern China. Ecological Indicators, 2021, 130: 108074.
- [12] Zhang D W, Wu L L, Huang S Q, Zhang Z Y, Ahmad F, Zhang G L, Shi N, Xu H. Ecology and environment of the Belt and Road under global climate change: A systematic review of spatial patterns, cost efficiency, and ecological footprints. Ecological Indicators, 2021, 131: 108237.
- [13] 赵琳琳,张锐,刘焱序,朱西存. GF1-WFV 与 Landsat8-OLI 对植被信息的提取差异研究. 生态学报, 2020, 40(10): 3495-3506.
- [14] 孙斌,李增元,郭中,高志海,王琫瑜. 高分一号与 Landsat TM 数据估算稀疏植被信息对比. 遥感信息, 2015, 30(5): 48-56.
- [15] 杨斌,高桂胜,王磊,程璐.基于GF-1WFV和 Landsat-8 OLI 提取植被信息方法比较研究. 测绘工程, 2018, 27(8): 7-12.
- [16] 彭继达,张春桂.基于高分一号遥感影像的植被覆盖遥感监测——以厦门市为例.国土资源遥感,2019,31(4):137-142.
- [17] 贾玉秋, 李冰, 程永政, 刘婷, 郭燕, 武喜红, 王来刚. 基于 GF-1 与 Landsat-8 多光谱遥感影像的玉米 LAI 反演比较. 农业工程学报, 2015, 31(9): 173-179.

1872

- [18] 贾洁琼,刘万青,孟庆岩,孙云晓,孙震辉. 基于 GF-1 WFV 影像和机器学习算法的玉米叶面积指数估算. 中国图象图形学报, 2018, 23 (5): 719-729.
- [19] 王磊, 耿君, 杨冉冉, 田庆久, 杨闫君, 周洋. 高分一号卫星影像特征及其在草地监测中的应用. 草地学报, 2015, 23(5): 1093-1100.
- [20] 黄汝根,刘振华,胡月明,肖北生.基于"高分一号"遥感影像反演华南地区亚热带典型作物冠层 SPAD.华南农业大学学报,2015,36 (4):105-111.
- [21] 刘吉凯, 钟仕全, 徐雅, 陈燕丽. 基于多时相 GF-1 WFV 数据的南方丘陵地区甘蔗种植面积提取. 广东农业科学, 2014, 41(18): 149-154.
- [22] 麻错,查东平,王宝健.基于高分一号宽幅多光谱影像的鄱阳湖湿地分类研究.测绘与空间地理信息、2016、39(6):107-110.
- [23] 左宪禹,韩林果,葛强,张哲,田军锋.基于 GF-1 卫星的县域冬小麦面积提取及年际变化监测.河南大学学报:自然科学版,2019,49 (1):69-77.
- [24] 徐凯健,田庆久,徐念旭,岳继博,唐少飞.基于时序 NDVI 与光谱微分变换的森林优势树种识别.光谱学与光谱分析,2019,39(12): 3794-3800.
- [25] 万丛,梁治华,张锦水.基于高分一号宽幅时序影像的冬小麦分布识别研究.安徽农业科学,2020,48(23):256-259.
- [26] 尹凌宇, 覃先林, 孙桂芬, 刘树超, 祖笑锋, 陈小中. 利用 KPCA 法检测高分一号影像中的森林覆盖变化. 国土资源遥感, 2018, 30(1): 95-101.
- [27] 肖莎, 汪小钦. 基于高分一号的敖江流域水源保护区植被变化监测. 测绘地理信息, 2019, 44(1): 93-96.
- [28] 孙桂芬, 覃先林, 刘树超, 李晓彤, 陈小中, 钟祥清. 典型植被指数识别火烧迹地潜力分析. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 204-211.
- [29] 廖瑶,李雪,刘芸,黄林峰,田鹏举,谷晓平.基于植被指数的高分一号遥感影像火烧迹地提取评价.自然灾害学报,2021,30(5): 199-206.
- [30] 李营, 陈云浩, 陈辉, 王晨. GF-1 WFV 影像的翅碱蓬植被指数构建. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(12): 1823-1831.
- [31] 王利民,刘佳,杨福刚,杨玲波,姚保民,高建孟.基于 GF-1/WFV 数据的冬小麦条锈病遥感监测.农业工程学报,2017,33(20): 153-160.
- [32] 赵忠明,高连如,陈东,岳安志,陈静波,刘东升,杨健,孟瑜.卫星遥感及图像处理平台发展.中国图象图形学报,2019,24(12): 2098-2110.
- [33] Miura T, Huete A R, Yoshioka H. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(3): 1399-1409.
- [34] 陈峰, 殷守敬, 朱利, 尹锴, 何报寅, 杨崧. HJ-1B 热红外辐射定标对地表温度反演的影响. 遥感学报, 2016, 20(4): 601-609.
- [35] Dubovik O, Schuster G L, Xu F, Hu Y, Bsch H, Landgraf J, Li Z. Grand challenges in satellite remote sensing. Frontiers in Remote Sensing, 2021, 2: 619818.
- [36] 申茜,姚月,李利伟,龙腾飞,陈甫,张兵.北京市平原区 2015 年—2019 年 0.8 m 地表反射率数据集. 遥感学报, 2021, 25(11): 2303-2312.
- [37] Zhang Y L, Song C H, Band L E, Sun G, Li J X. Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 145-155.
- [38] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [39] Birth G, McVey G. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. Agronomy Journal, 1968, 60: 640-643.
- [40] Sripada R P, Heiniger R W, White J G, Meijer A D. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. Agronomy Journal, 2006, 98(4): 968-977.
- [41] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. Advances in Space Research, 1998, 22(5): 689-692.
- [42] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [43] Chen F, Zhang W H, Hu J, Zhao B S, Wang C X, Song Y J. Preliminary comparisons among the Gaofen-1 wide field of view sensors. In Proceedings of the International Conference on Geoinformatics 2022, Beijing, China, 15-18 August 2022 (in press).
- [44] 郭庆华, 胡天宇, 马勤, 徐可心, 杨秋丽, 孙千惠, 李玉美, 苏艳军. 新一代遥感技术助力生态系统生态学研究. 植物生态学报, 2020, 44 (4): 418-435.
- [45] Barsi J A, Hook S J, Schott J R, Raqueno N G, Markham B L. Landsat-5 thematic mapper thermal band calibration update. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(4): 552-555.
- [46] Xiong X X, Butler J J. MODIS and VIIRS calibration history and future outlook. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2523.
- [47] 吴炳方,曾源,闫娜娜,曾红伟,赵旦,张森.生态系统遥感;内涵与挑战.遥感学报,2020,24(6):609-617.
- [48] Li W K, Xia G P, Song Q J, Tong R Q, Tian L Q. Evaluation and adjustment of the radiometric degradation of HY-1B satellite COCTS via a stable marine site. Geo-Spatial Information Science, 2022: 1-12.

5期