

高分遥感共性产品生成和真实性检验技术体系

柳钦火^{1,12}, 闻建光^{1,12}, 周翔^{1,12}, 赵坚², 李增元³, 李新⁴, 马明国⁵,
王维真⁶, 廖小罕⁷, 刘绍民⁸, 范闻捷⁹, 肖青^{1,12}, 仲波¹, 李静^{1,12},
辛晓洲^{1,12}, 李丽¹, 贾立^{1,12}, 高志海³, 金家栋¹⁰, 梁师¹¹, 邢进²,
廖楚江², 吴一戎¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;
2. 国家国防科技工业局对地观测与数据中心, 北京 100101;
3. 中国林业科学院资源信息研究所, 北京 100191;
4. 中国科学院青藏高原研究所 国家青藏高原科学数据中心, 北京 100101;
5. 西南大学 地理科学学院 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715;
6. 中国科学院西北生态环境资源研究院 中国科学院黑河遥感试验研究站, 兰州 730000;
7. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
8. 北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
9. 北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;
10. 中科星图股份有限公司, 北京 101399;
11. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195;
12. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 随着高分辨率对地观测系统重大专项的成功实施, GF-1—GF-7七型卫星共19种主要载荷发射升空, 形成了中国遥感卫星多谱段、多模式的观测能力, 可为各种科研和行业遥感应用提供源源不断的高空间、高时间和高光谱分辨率的高质量遥感数据。如何打通高分卫星遥感数据到信息的转换链, 降低高分卫星数据应用门槛、提升高分卫星应用服务成效已成为急需破解的迫切问题。遥感定量产品的误差来源包括传感器成像、几何与辐射定标、数据预处理、定量反演与产品检验等各个环节, 提高定量遥感产品精度是一个复杂的系统工程, 各行业应用部门和多领域用户难以独立完成全流程数据处理、产品生产和检验。本文在分析高分卫星遥感产品体系的基础上, 针对多用户共同需求, 梳理了7大类共45种共性定量遥感产品; 从全链条误差溯源和质量检验需要出发, 提出了高分遥感共性产品生成和检验的技术体系, 分析了算法测评—算法优化—产品生产—真实性检验等环节面临的关键技术; 进而提出了高分遥感共性产品真实性检验平台与产品定型分系统的初步设计方案, 并介绍了系统研发的最新进展; 最后对高分共性产品应用前景进行了展望, 构建高分遥感共性产品生成与真实性检验技术体系, 对于保障高分卫星遥感共性产品精度和质量、提升高分卫星应用服务效益具有重要的意义。

关键词: 高分卫星, 遥感反演, 遥感共性产品, 算法测评, 像元真值, 真实性检验

中图分类号: P2

引用格式: 柳钦火, 闻建光, 周翔, 赵坚, 李增元, 李新, 马明国, 王维真, 廖小罕, 刘绍民, 范闻捷, 肖青, 仲波, 李静, 辛晓洲, 李丽, 贾立, 高志海, 金家栋, 梁师, 邢进, 廖楚江, 吴一戎. 2023. 高分遥感共性产品生成和真实性检验技术体系. 遥感学报, 27(3): 544-562

Liu Q H, Wen J G, Zhou X, Zhao J, Li Z Y, Li X, Ma M G, Wang W Z, Liao X H, Liu S M, Fan W J, Xiao Q, Zhong B, Li J, Xin X Z, Li L, Jia L, Gao Z H, Jin J D, Liang S, Xin J, Liao C J and Wu Y R. 2023. Technique system of remote sensing product generation and validation of GF common products. National Remote Sensing Bulletin, 27(3): 544-562[DOI:10.11834/jrs.20232531]

收稿日期: 2022-10-12; 预印本: 2022-11-29

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(编号: 21-Y20B02-9003-19/22, 21-Y20B01-9001-19/22)

第一作者简介: 柳钦火, 研究方向为定量遥感。E-mail: liuqh@aircas.ac.cn

1 引言

遥感产品可极大促进遥感数据在人类经济和社会发展中的广泛应用(徐冠华等, 2016)。全球卫星观测系统应用潜力广泛, 如全球变化监测定义了49个基本气候变量ECV(Essential Climate Variables)(GCOS, 2011)、16个基本水变量EWV(Essential Water Variables)(Lawford等, 2014)和21个基本生物多样性变量EBV(Essential Biodiversity Variables)(Pereira等, 2013), 这些基本变量中75%的变量可以由卫星遥感获取, 并通常以变量的类型进行划分(如大气、陆地和海洋)(Giuliani等, 2020)。遥感产品从原始数据到应用产品依据不同的处理加工水平, 将遥感数据产品分成了不同的级别, 如美国MODIS数据划分了5个数据级别: 从原始数据的第0级, 经定标、格式规范、几何和辐射校正后, 到应用模型开发的第4级产品(<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>[2022-10-12])。

中国遥感卫星多光谱数据产品分级国家标准也依据遥感数据处理水平, 将原始数据经过辐射校正、几何校正、参数反演等处理分成了7个级别(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2019)。由于分类分级的差异, 这些不同级别的遥感产品很难正式赋予产品含义, 因而采用了数字来代表不同遥感产品的处理级别。国家高技术研究发展计划(863计划)重大项目“星机地综合定量遥感系统与应用示范”在全球陆表综合观测定量遥感产品技术体系中提出了卫星数据应用的5个层级, 即卫星观测下传数据处理形成的“标准产品”、经几何和辐射校正处理的“基础产品”、经遥感模型反演或定量提取的具有明确地学含义的“共性产品”、结合专业模型生成的具有明确应用意义的“专题产品”、以及为行业应用提供决策支持信息的“应用产品”(柳钦火等, 2018)。

然而, 中国在一定程度上忽视了遥感卫星产品的系统性建设, 未形成遥感卫星产品的生成与检验体系, 极大地限制了遥感应用的技术水平和应用广度。研制和生产标准化、规范化的高精度系列遥感共性产品, 是大幅度降低遥感应用门槛的必由之路。遥感产品的质量是由卫星载荷性能、

辐射定标误差、数据处理水平以及反演算法性能等系列误差累积决定(Wu等, 2019), 因此遥感产品精度的提高是一个系统工程。今天我们已经进入了量化应用倒逼卫星发展的时代, 需要解决并持续研究遥感产品精度提升的问题。

2010年, 中国启动了高分辨率对地观测系统专项(简称高分专项), 目前具备了高时间分辨率、高空间分辨率、高光谱分辨率的全天时、全天候对地观测能力, 具备了覆盖可见光/近红外、热红外、微波等多模式成像观测能力, 使我们拥有了前所未有的海量遥感数据, 在中国遥感应应用业务中发挥了重要作用。如何用好这些国产卫星数据, 提高量化应用精度是当前迫切需要回答的问题。为进一步提升高分卫星遥感应应用水平, 国家国防科技工业局于2018年发布了《2018中国高分卫星应用报告(共性产品卷)》, 指出高分共性产品是中国遥感应应用走向工程化、产业化的重要一步(国家国防科技工业局, 2018)。

遥感真实性检验是评价共性产品质量、可靠性和适用性的重要手段, 是提高共性产品精度、改善遥感产品质量的重要依据。本文围绕高分共性产品及其精度提升的问题, 在梳理高分共性产品体系基础上, 提出了高分共性产品算法测评—算法优化—产品生产—产品真实性检验的高分共性产品质量保障和提升关键技术, 介绍了高分共性产品真实性检验平台和产品定型分系统, 文章最后对高分共性产品应用前景进行了展望。

2 高分遥感共性产品体系

2.1 高分遥感卫星载荷概况

自2013年高分一号卫星发射以来, 已经发射了高分一号至高分七号系列民用遥感卫星。七型高分卫星共搭载了19种载荷(表1), 卫星型号包括极轨卫星和静止卫星, 探测方式包括主动和被动, 探测谱段包括紫外、近红外、可见光、热红外、微波, 空间分辨率从亚米级、米级、十米级、百米级到公里级, 光谱分辨率可达到纳米级, 时间分辨率最高可达秒级, 应用领域可覆盖国土勘察、资源探测、环境监测、农业估产和减灾防灾等国民经济各个领域(童旭东, 2016)。

表1 高分系列卫星主要载荷和技术指标

Table 1 Payloads and technical specifications of CHEOS

卫星名称	发射时间	主要载荷	分辨率	回访周期
高分一号 GF-1	2013-04-26	全色相机 PAN	2 m	4 d
		多光谱相机 MSS	8 m	
		宽幅多光谱相机 WFV	16 m	
高分二号 GF-2	2014-08-19	全色相机 PAN	0.8 m	5 d
		多光谱相机 MSS	3.2 m	
高分三号 GF-3	2016-08-10	C 波段合成孔径雷达 SAR-C	1—500 m	3 d
高分四号 GF-4	2015-12-29	可见光近红外相机 VNIR	50 m	20 s
		中波红外相机 MWIR	400 m	
高分五号 GF-5	2018-05-09	高光谱相机 AHSI	20 m	51 d
		全波段光谱成像仪 VIMS		
		大气多角度偏振探测仪 DPC		
		大气痕量气体差分吸收光谱仪 EMI		
		大气主要温室气体检测仪 GMI		
		大气环境红外甚高分辨率探测仪 AIUS		
高分六号 GF-6	2018-06-02	全色相机 PAN	2 m	4 d
		多光谱相机 MSS	8 m	
		宽幅多光谱相机 WFI	16 m	
高分七号 GF-7	2019-11-03	双线阵相机 DLC	0.65 m	60 d
		多光谱 MUX、全色相机 PAN、激光测高仪 SLA、足印相机 FPA	0.8 m 2.6 m	

2.2 高分遥感产品体系与分级

高分专项以高分共性产品为核心，提出了标准产品—共性产品—专题产品三层0—7级高分遥感产品体系。在这个体系中，高分共性产品仍然是体系的核心，其中标准产品为0—2级、共性产品为3—5级、专题产品分为6—7级。在3—5级共性产品中进一步明确了各级别产品的主要内涵：3级产品为由标准产品经几何精纠正、正射校正后得到的数据产品；4级产品为反映地表反射、辐射、散射特性或支持大气校正的数据产品；5级产品主要为反映地球表层能量、水、植被和大气特征的数据产品。这里特别强调“共性产品”这一概念，是由于共性产品具有2个以上行业专题产品生产所需要、且可被直接或间接真实性检验。遥感共性产品是有效链接标准产品和专题产品，实现遥感数据向遥感信息转化的重要桥梁。

2.3 高分遥感共性产品体系设计

依据高分遥感数据源特点、高分产品分级以及行业应用对高分共性产品的需求，高分专项从中国16个行业部门研制的446种专题产品进行回

溯，梳理了几何产品、辐射基础产品、土地覆盖/土地利用产品、能量平衡产品、植被参量产品、水分参量产品和大气参数等45种，进一步明确了研制这些共性产品所需要的高分系列卫星数据以及对应产品的空间分辨率（表2）。

然而这些遥感共性产品大部分算法仅在局部站点区域进行了测试，并未在全国尺度上进行充分测评，不具备产品生产能力。如何通过算法评测和模型优化，研制全国高分共性产品生产系统，将算法转变为大规模区域生产能力，实现全国高分共性产品的业务化生产，已成为迫切任务。

进一步梳理了具备覆盖全国能力的产品包括：空间分辨率为2 m/8 m的全国正射影像、空间分辨率为16 m的地表反射率、归一化离水辐射率、气溶胶光学厚度、土地覆盖、土地利用、地表反照率、光合有效辐射、下行短波辐射、植被指数、叶面积指数、植被覆盖度、植被光合有效辐射吸收比例、净初级生产力、植被物候、植被叶绿素含量、蒸散发、干旱指数、水体面积、冰川覆盖、积雪覆盖、雪被指数、水体透明度、水体叶绿素含量以及水体悬浮物等25种共性产品（表2中标注*）。

表2 高分共性产品体系以及具备研制全国共性产品能力的参量

Table 2 The system of CHEOS common products

产品类别	序号	共性产品	高分卫星影像	主要空间分辨率
几何产品	1	DOM*	GF-1/2/5/6/7	多光谱 2/4/8/16/20 m
	2	DSM	GF-7	4 m
辐射基础产品	3	地表反射率*	GF-1/2/4/5/6/7	多光谱 2/4/8/16 m/20 m; 高光谱 30 m
	4	归一化离水辐射率*	GF-1/2/5/6	多光谱 8/16/20 m; 高光谱 30 m
	5	雷达后向散射系数	GF-3	10/25 m
	6	地表发射率	GF-4/GF-5	40 m
	7	云掩膜	GF-1/2/4/5/6/7;	多光谱 2/4/8/16 m/20 m; 高光谱 30 m; 红外 40 m
	8	气溶胶光学厚度*	GF-1/2/4/5/6/7	多光谱 2/4/8/16 m/20 m; 高光谱 30 m; 5 km
	9	大气水汽含量	GF-5	5 km
土地覆盖/利用产品	10	土地覆盖*	GF-1/6	16 m
	11	土地利用*	GF-1/6	16 m
能量平衡参量产品	12	地表反照率*	GF-1/6	16 m
	13	地表温度	GF-4/5	40/400 m
	14	海洋温度	GF-4/5	440/400 m
	15	土壤热通量	GF-4	400 m
	16	光合有效辐射*	GF-1/6	16 m
	17	下行短波辐射*	GF-1/6	16 m
	18	下行长波辐射	GF-4/5	40/400 m
	19	地表净辐射	GF-1/4/5/6	40/400 m
植被参量产品	20	植被指数*	GF-1/6	16 m
	21	叶面积指数*	GF-1/6	16 m
	22	植被覆盖度*	GF-1/6	16 m
	23	光合有效辐射吸收比例*	GF-1/6	16 m
	24	植被净初级生产力*	GF-1/6	16 m
	25	植被物候*	GF-1/6	16 m
	26	植被叶绿素含量*	GF-6	16 m
	27	叶绿素荧光	GF-5	30 m
	28	森林地上生物量	GF-7	4 m
	29	森林树高	GF-7	4 m
水分参量产品	30	土壤水分	GF-3	10/25 m
	31	蒸散发*	GF-1/6	16 m
	32	干旱指数*	GF-1/4/6	16/400 m
	33	水体面积*	GF-1/6	16 m
	34	冰川覆盖*	GF-1/6	16 m
	35	积雪覆盖*	GF-1/6	16 m
	36	雪被指数*	GF-1/6	16 m
	37	水体悬浮物浓度*	GF-1/2/5/6	多光谱 8/16/20 m; 高光谱 30 m
	38	水体叶绿素浓度*	GF-1/2/5/6	多光谱 8/16/20 m; 高光谱 30 m
	39	水体透明度*	GF-1/2/5/6	多光谱 8/16/20 m; 高光谱 30 m
大气参数产品	40	对流层 NO ₂ 柱浓度	GF-5	5 km
	41	近地面 NO ₂ 浓度	GF-5	5 km
	42	对流层/近地面 SO ₂ 浓度	GF-5	5 km
	43	对流层 O ₃ 浓度	GF-5	5 km
	44	CO ₂ 柱浓度	GF-5	5 km
	45	CH ₄ 柱浓度	GF-5	5 km

注:*为具备覆盖全国能力的产品。

3 高分共性产品生成与产品真实性检验技术体系

遥感定量产品的误差来源包括传感器成像、几何与辐射定标、数据预处理、定量反演与产品检验等各个环节，提高定量遥感产品精度是一个复杂的系统工程，各行业应用部门和多领域用户难以独立完成全流程数据处理、产品生产和检验。为保障高分遥感共性产品的质量，构建了高分共性产品生成与真实性检验技术体系，通过对共性产品生产算法进行测评、对共性产品进行真实性检验，然后根据检验结果对产品生成算法进行不断优化，最终定型作为共性产品的生成算法。

3.1 高分共性产品生产与真实性检验技术流程

真实性检验是独立地利用观测真值对产品进行精度和不确定性评价的过程，综合反映了高分共性产品的质量。高分共性产品的精度不仅与高分卫星载荷的数据质量有关，还与数据处理技术和产品的反演算法有关，这要求了既要开展产品真实性检验，还要进行算法测评（闻建光等，2023）。这样一方面保障了共性产品生产算法的精度、适用性和稳定性。另一方面，为基于此算法生产的共性产品误差进行溯源提供了重要的参考依据，有利于共性产品问题发现和算法的进一步改进和优化。其业务流程如图1所示，主要过程包括：

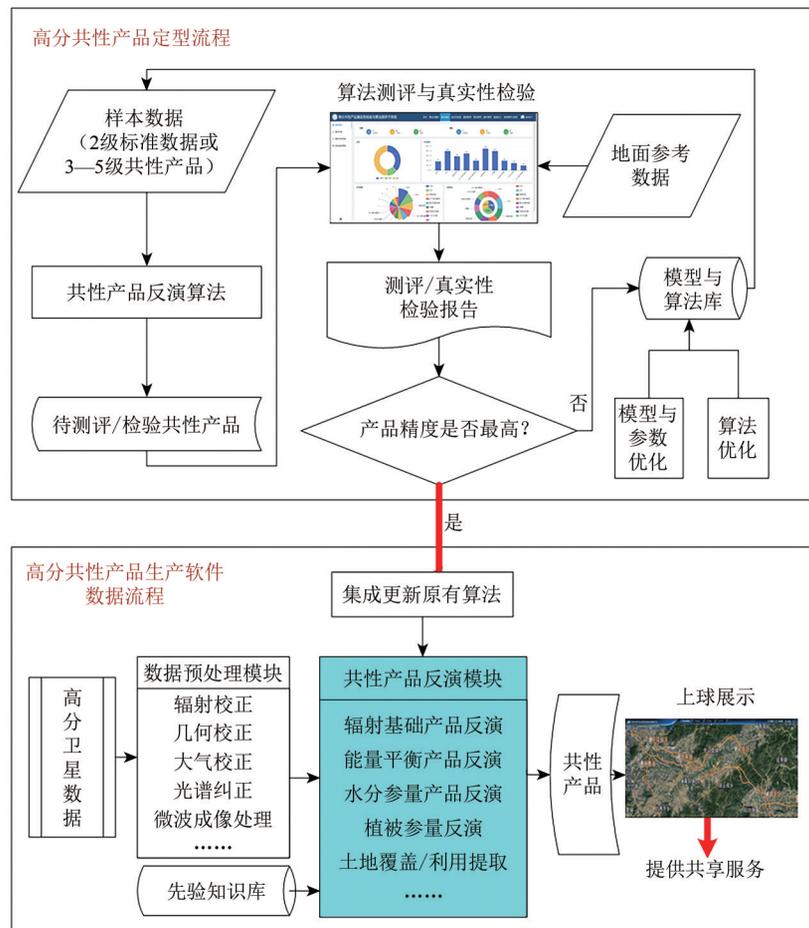


图1 高分共性产品算法定型与产品生产技术流程

Fig. 1 The technique flowchart of Gaofen common products algorithm determination and products generation

(1) 算法测评：把样本数据作为共性产品生产算法的输入，样本数据可能是2级标准数据，如对地表反射率测评的样本数据是辐射校正后的数据，也可能是3—5级共性产品，如植被指数测评的样本数据是地表反射率，经过反演算法运算，

得到待测评的共性产品；

(2) 产品真实性检验：将待测评/检验的共性产品输入到“算法测评与真实性检验子系统”中，与该系统已有的参考数据进行比较分析，自动生成测评/检验报告，评价算法和产品精度是否符合

合要求;

(3) 算法与模型优化: 如果算法精度不符合要求, 则依据高分卫星数据特点, 从卫星数据的精处理、考虑波段和角度特征差异的辐射传输模型和反演算法方面进行进一步改进和优化;

(4) 算法集成: 基于测评/检验报告, 如果算法精度符合要求, 则将新算法集成到全国高分共性产品生成子系统中;

(5) 业务化产品生产: 实现高分卫星共性产

品流程化业务生产, 提供共享服务。

3.2 高分共性产品算法测评与真实性检验关键技术

高分共性产品算法测评和真实性检验是保障和提升高分共性产品质量的必要环节。如何保障算法测评和产品真实性检验的可靠性, 面临指标体系构建、地面采样优化布局、星机地协同观测、时空尺度转换和像元真值不确定定量评价等关键技术环节(图2)。

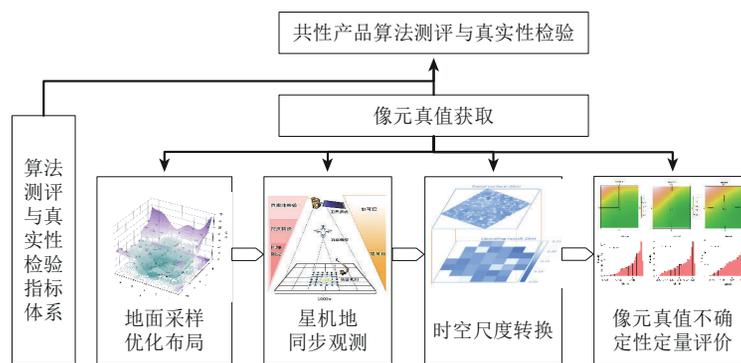


图2 高分共性产品算法测评与真实性检验关键技术

Fig. 2 Key techniques of Gaofen common product algorithm test and validation

(1) 算法测评与真实性检验指标体系。为满足高分共性产品生成的需求, 高分共性产品算法不仅要求具有较好的精度, 还要体现算法的适用性和计算效率等优越性。一个可信的算法测评体系需要全面考虑影响算法性能的因素, 并客观全面地反映算法的特点。因此, 发展高分共性产品算法测评指标体系以及指标定量计算方法是首先需要解决的关键技术。通过文献调研、对比和总结, 对几何类、数值类和类别类高分共性产品算法, 制定了算法精度、算法适用性、算法效率、算法鲁棒性等4个一级测评指标体系, 通过专家打分等方法, 为不同指标赋权重, 构建了科学合理的算法测评指标体系和测评技术(闻建光等, 2023)。

(2) 地面优化采样。空间异质性可显著影响产品的真实性检验(Xu等, 2018; Wu等, 2021), 真实性检验观测网络和无线传感器网络是捕获空间异质性的重要手段(Ma等, 2015; Wang等, 2016)。其核心是需要通过优化采样给出不同像元尺度地面采样点的最优数量和空间分布位置, 以最优观测的点数实现地表空间异质性

捕获。考虑不同高分共性产品的特点, 设计了多目标(同时针对多个高分共性产品)、多尺度的地面优化采样方法(Zeng等, 2014, 2015; Wu等, 2016, 2021)。基于空间抽样或统计推断理论, 利用非均质表面空间推断模型(MSN)计算像元估计值及其方差, 并根据采点数量、位置与估计方差之间的定量关系, 寻找出给定条件下像元尺度上采样点的最优数量和空间分布位置。并针对异质地表量化了地表空间异质性、样点数量及样点位置对像元尺度相对真值不确定性的关系(Wen等, 2022)。

(3) 星机地协同观测。遥感实验可为模型构建、反演算法发展、尺度转换机理、定标与真实性检验提供重要数据(柳钦火等, 2019; 晋锐等, 2017)。高分卫星包括多种尺度遥感观测数据, 可生成的遥感共性产品空间分辨率从米级、十米级、百米级到公里级, 为获取多尺度嵌套、与遥感产品相一致的像元真值, 把航空遥感观测作为链接卫星遥感产品与地面观测的桥梁, 设计了天空地一体化多尺度综合观测技术体系(Peng等, 2015)。在河北怀来、重庆北碚、甘肃黑河、

云南普洱、内蒙古根河区域开展了星机地综合实验，系统性地获取了空天地一体化时空连续的多尺度真实性数据集。

(4) 时空尺度转换技术。高分共性产品分辨率跨度大，其尺度问题在于地面观测的点是否具有足够的空间代表性，否则需要进行尺度上推或尺度下推。通过尺度转换技术，将地面观测或不同分辨率数据尺度转换到与高分共性产品像元空间分辨率相一致的尺度，从而达到像元真值获取目的。依据地面采样点的数量和空间代表性，发展了基于先验知识趋势面的点到面和面到面的尺度转换模型，如单点或多点观测到像元尺度的点面尺度转换 (Wu 等, 2020)、高分辨率到低分辨率尺度的面面升尺度转换 (耿云龙 等, 2022, Lin 等, 2018)。由于诸如地表温度、通量等一些参数本身观测的分辨率比较低，或利用精度较高的低分辨率产品开展交叉检验时，需要开展面面降尺度转换 (Ouyang 等, 2022)，以保障与待检验产品的空间一致性。

(5) 像元真值不确定性定量评价技术。由于像元真值的获取是由优化采样、野外观测、尺度转换等系列过程后得到的，因此像元真值具有不确定性 (张圆 等, 2020)。以往在开展遥感产品真实性检验过程中，忽略了像元真值的不确定性，直接将获取的像元真值用于待检产品的检验，导致很多时候无法准确反映遥感产品的精度和不确定性 (Wu 等, 2019)。为了更加可信地开展高分共性产品真实性检验，在高分共性产品真实性检验技术体系中提出了像元真值不确定性评价的必要环节。只有当像元尺度真值的不确定性小于一定阈值时，才被用于高分共性产品真实性检验 (闻建光 等, 2022)。通过厘清像元尺度真值获取过程中的不确定性因素，初步建立了时空代表性误差、几何匹配误差、模型误差以及尺度转换误差等因素引起像元真值不确定性的定量化评价模型 (Wu 等, 2019)，完善了基于最小不确定性像元真值的算法测评和真实性检验体系。

3.3 高分共性产品生成关键技术

从高分卫星数据获取地球关键参量信息的核心是反演算法 (柳钦火 等, 2016)。然而利用高分卫星平台和遥感传感器获取的数据进行共性产品的反演仍面临着角度信息不足、关键波段缺乏等

问题，例如大幅宽高分卫星遥感观测导致数据的角度效应明显，但观测的有效角度范围和角度信息不足；波段设置上以蓝绿红和近红外4个波段为主，缺少短波红外等主要波段设置，这些问题导致了国外卫星已有的定量反演算法难以应用于国产高分卫星。生产满足精度需求和时空连续的高分共性产品需要解决高分数据高精度处理和产品生成技术，为用户提供高可靠、高精度的共性产品服务。高分共性产品生成仍面临多星协同处理、反演模型优化与产品流程化自动生产等关键技术 (图3)。

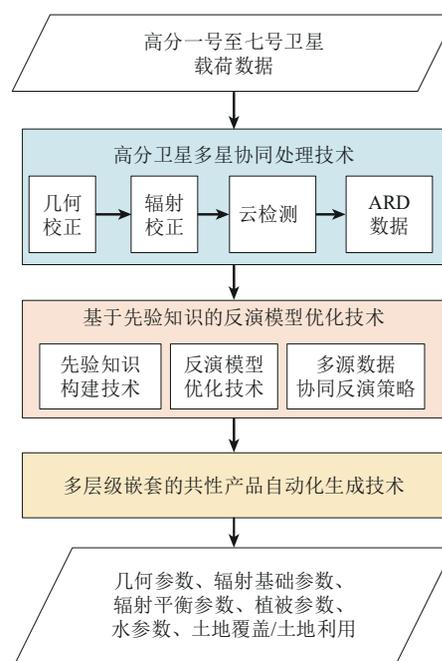


图3 高分共性产品生产关键技术

Fig. 3 Key technology of Gaofen common products generation

(1) 高分卫星多星协同处理技术。高分卫星具备多卫星组网协同观测的能力，然而实现大区域高时空分辨率遥感产品，多种高分卫星数据协同应用主要面临着不同数据间一致性较差的问题，这为高分数据的几何定位和配准、辐射校正和辐射一致性处理等提出了更高的精度要求。针对这一高分数据处理的基本问题，重点解决了高分载荷高频次可溯源的在轨辐射定标和交叉辐射定标 (刘耀开 等, 2023)、大区域几何配准和正射影像自动生成 (龙腾飞 等, 2023)、以及云和云阴影快速识别 (胡昌苗 等, 2023) 等关键技术。这些关键技术的突破有利于实现高分数据的高精度自动化处理。并通过研制分析就绪数据集 (ARD) (Zhong 等, 2021)，为多星协同的大区域高分共性

产品生成提供关键数据和技术支撑。

(2) 基于先验知识的反演模型优化技术。高分卫星数据缺少关键通道和观测角度信息不足导致地球关键参量遥感反演的病态问题凸显。研究表明, 地表先验知识的引入可显著提高地球关键参量的反演精度 (Li 等, 2001; 柳钦火等, 2019)。

多卫星数据协同反演地表二向反射特征 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 是构建地表高分 BRDF 先验知识的重要解决方案之一。如高分地表反照率遥感反演离不开地表 BRDF 先验知识的支持 (Li 等, 2000), 综合低分辨率的多角度信息以及高分辨率的空间信息, 可获取高分 BRDF 先验知识, 以此解决地表反照率高精度遥感估算中角度信息不足的问题 (游冬琴等, 2023), 同理, 基于高分地表 BRDF 的先验知识可进一步减少角度效应对植被指数估算的影响。针对高分卫星波段设置特点, 通过构建先验知识来减少反演信息量不足的问题, 如高分植被覆盖度反演算法, 构建了不同植被类型在不同气候分区的聚集指数先验知识查找表 (赵静等, 2023), 实现了高分植被覆盖度的高精度反演; 针对高分叶面积指数反演, 发展了基于叶片光学特性的模型算法, 通过计算三维随机辐射传输 (3D-SRT) 模型先验知识并构建查找表, 提高了高分卫星叶面积指数的反演的精度 (张虎等, 2023); 针对高分植被光合有效辐射比例反演算法, 构建了不同太阳角度、不同观测角度等条件下的高分地表反射率与光合有效辐射吸收比先验知识样本库, 减少了由于输入参数多造成误差传递的影响, 提高了反演精度 (李丽等, 2023)。因此, 从先验知识和多源数据协同两个方面进行模型算法的优化, 可以极大程度增加反演信息量, 以提高高分卫星共性产品精度和时空连续性 (Wen 等, 2017)。在此基础上, 进一步形成了以地表反照率、植被指数和叶面积指数共性产品为基础的光合有效辐射 (张海龙等, 2023)、地表蒸散发 (郑超磊等, 2023) 等遥感反演算法, 显著提高了产品的空间分辨率。

(3) 多层次嵌套的高分共性产品自动化生成技术。共性产品输入参数众多、输入参数种类和个数动态可变、参数间层次嵌套等给高分共性产品流程化、自动化生产带来了困难。因此, 依据高分卫星数据和产品算法特点, 开展了共性产品

生产架构的体系结构建模, 在高分共性产品分级体系的指导下建立了共性产品的多层次动态科学 workflow 框架, 实现了跨尺度、跨投影的多尺度高分数据统一组织和管理, 多分辨率数据独立处理及跨尺度协同处理能力 (柳钦火等, 2018)。通过制定模型发现和模型注册的规则, 对模型的时间、空间、事件、属性、接口需求进行统一规范描述, 以此实现模型间逻辑的自动集成 (张正等, 2023) 和多层级共性产品的自动化生产。

3.4 高分遥感共性产品标准规范

(1) 共性产品和真实性检验标准规范研制基础。国家高技术研究发展计划 (863 计划) 重大项目“星机地综合定量遥感系统与应用示范”中规划了针对定量遥感产品真实性检验系列规范, 截止到目前已发布了《遥感产品真实性检验导则》(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2018)、《陆地定量遥感产品真实性检验通用方法》(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2020)、陆地遥感产品真实性检验地面观测场的选址和布设 (GB/T 41540-2022) 等 3 项总体标准, 以及植被指数遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2023f)、地表反照率遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2022a)、光合有效辐射遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2022b)、土壤水分遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2021d)、植被覆盖度遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2022c)、地表蒸散发遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2021a)、叶面积指数遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2021b)、气溶胶光学厚度遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2023a)、土地覆盖遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2023b)、积雪面积遥感产品真实性检验 (国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2023c)、地表温度遥感产品真实性检验 (国家市

场监督管理局和国家标准化管理委员会, 2023d)、地表发射率遥感产品真实性检验(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2023e)等12种单项产品真实性检验国家标准;这些真实性检验国家标准的发布,为从事高分共性产品真实性检验提供了重要依据。

(2) 高分专项真实性检验标准体系。标准规范是指导共性产品质量提升的重要保障。在2019年高分专项国家真实性检验系统任务启动后,进一步细化和完善了相关标准。从野外数据获取、共性产品生产和真实性检验等方面,编制了系列标准。

高分专项国家真实性检验系统标准包括地基和无人机野外观测数据获取、高分共性产品真实性检验与高分共性产品生产3类126项标准(图4)。其中野外观测数据获取标准,可约束全国各真实性检验站点观测的样点布设、仪器配套、观测频率、观测方法和数据汇交等工作的统一,从而保障汇交数据的一致性和高质量。野外观测数据获取标准主要包括与真实性检验场地选择和样点优化布设有关的总体类标准以及满足共性产品相关单项参数的地面观测标准。遥感产品生产标准是保障高分系列遥感产品高质量批量生产的基础,规范了产品生产中的数据预处理、生产流程和产品格式等的一致性,主要包括高分共性产品生产体系、产品格式以及单项高分共性产品生产规范。高分共性产品真实性检验标准约束了高分共性产品真实性检验方法、主要技术流程和输出报告格式等内容,主要包括高分共性产品真实性检验通用方法、场地评价、空间代表性评价和像元尺度真值不确定性评价等总体标准以及共性产品真实性检验单项标准。

4 高分共性产品真实性检验平台和产品定型分系统

为满足高分共性产品真实性检验和算法测评所需要的地面观测数据获取的需求,在全国不同生态地理分区建设了42个野外观测台站,形成了高分专项国家真实性检验网络台站。进一步在真实性检验关键技术和标准规范的基础上,设计研发了高分共性产品真实性检验平台和产品定型分系统(图5),包括共性产品与真实性检验共享服

务平台、高分共性产品算法测评与真实性检验子系统、高分共性产品生产国产软件与全国共性产品生成子系统,具备观测任务规划—数据汇聚—数据质检—算法测评—产品生产—真实性检验—共享分发等一站式服务功能。

4.1 共性产品与真实性检验共享服务平台

共性产品真实性检验平台和产品定型分系统围绕“一个平台、一个中心、一个加速引擎、多个核心应用”的建设框架,形成共性产品生成与真实性检验系统的技术框架和平台能力,包括基础设施层、数据资源层、平台层、应用服务层和用户层组成,构建高分共性产品技术服务体系(图6)。

基础层:以一体化运行环境的形式支撑共性产品真实性检验平台和产品定型分系统的并行计算资源、分布式大数据存储资源和网络资源建设。包括多路引接管控集群、分布式资源共享集群、多元自适应处理集群、空间大数据存储集群和综合运维管理。

数据层:通过前置的站网数据采集系统和专线将真实性检验站网观测数据接入并存储到场站网观测数据库中;通过硬盘拷贝或网络等条件将积累的历史高分影像数据存储到原始影像数据库中;通过专线将原始影像数据和待检验的共性产品数据接入到原始影像数据库和共性产品库。除此之外还包括用于共性产品生产的软件工具数据库,用于真实性检验的算法模型库等。包括待检验的共性产品数据、真实性检验场站观测数据、真实性检验参考数据和样本数据、真实性检验结果数据、算法测评结果数据、算法模型数据、软件工具、行业/科研数据资源、军民融合数据以及元数据库的建设。

平台层:包括真实性检验数据引接汇聚子系统、数据管理与共享服务子系统、可视化展示子系统、高分共性产品国产软件工具。

应用层:包括高分共性产品算法测评与真实性检验子系统、全国共性产品生成子系统。

服务层:通过共性产品与真实性检验门户面向行业用户、科研院所和大众用户提供共性产品和产品真实性检验服务。

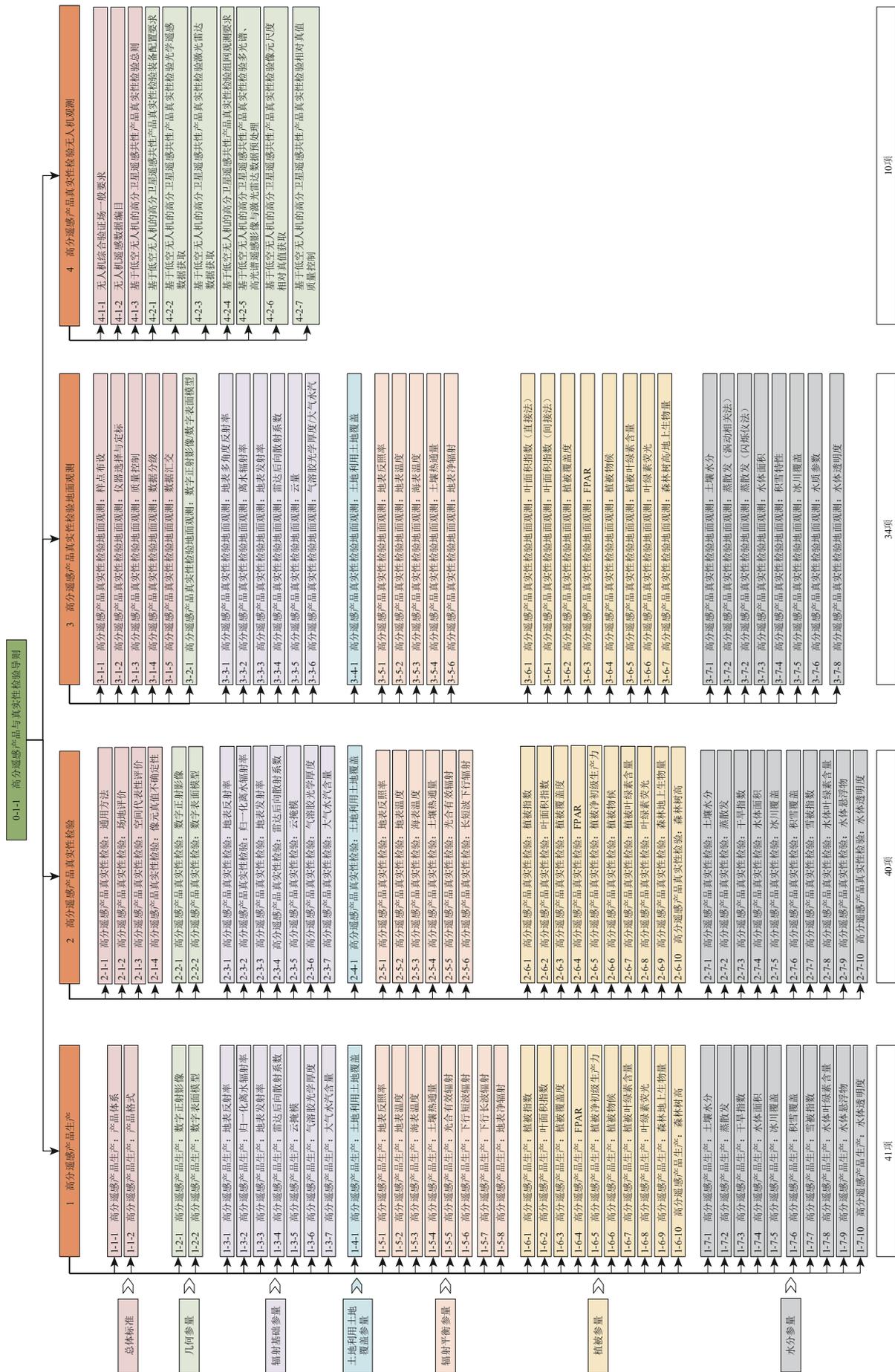


图4 高分专项真实性检验标准体系 Fig. 4 Specifications system of Gaofen common products and validation

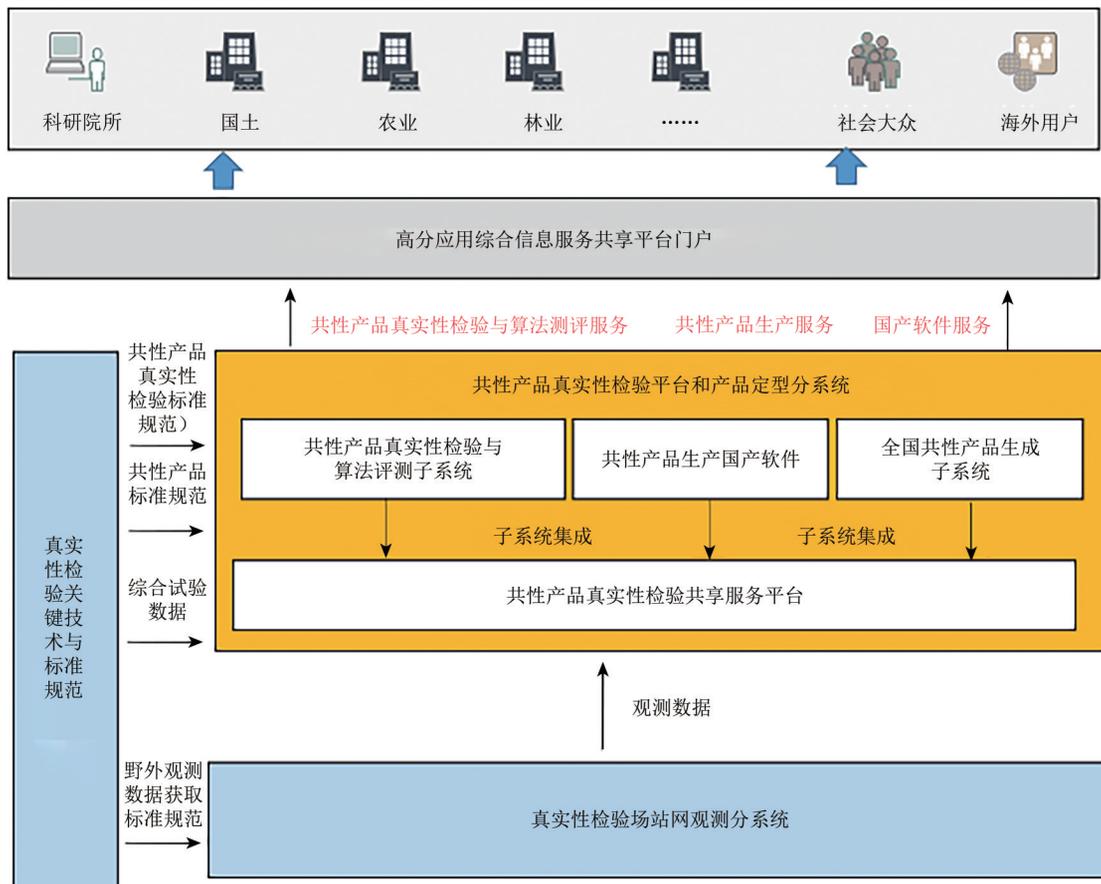


图5 高分共性产品真实性检验平台和产品定型分系统

Fig. 5 GF common product validation platform and products determination system

4.2 高分共性产品算法测评与真实性检验子系统

综合利用全国高分共性产品真实性检验站网观测的数据、高分卫星的样本数据、航空遥感数据和其他已知精度卫星产品，基于高分共性产品算法测评指标体系和真实性检验关键技术，构建了数据质量控制、尺度转换、真实性检验和算法测评为核心服务的高分共性产品算法测评与真实性检验子系统，实现了针对高分共性产品生成算法的全流程在线测评与产品真实性检验（闻建光等，2023），用户可自行进行算法打包上传，选择算法测评服务、自动关联系统数据、计算关联指标、最后进行测评并输出测评报告（图7）。

子系统利用野外台站观测的数据经质量控制和尺度转换功能后，生成满足算法测评和产品真实性检验的像元真值数据。依据遥感产品真实性检验国家标准编排算法测评和真实性检验标准化流程，目前具备了数值类、几何类和类别类3种共性产品类型的算法测评和真实性检验能力。

用户可以依据不同的观测需求，通过观测任

务规划，向全国42个真实性检验台站下达星机地同步观测和常规观测等任务，各台站即可按照任务开展相应的观测并将数据汇聚到子系统。目前子系统已汇聚河北怀来、重庆北碚、云南普洱、甘肃黑河和内蒙古根河5个星机地综合实验数据，以及河北怀来站、甘肃黑河站、长春净月潭站、内蒙古呼伦贝尔站和太湖站等共26个台站的9000多个样点像元真值数据，数据类型覆盖了25种。未来全国高分真实性检验网络42个观测台站建设完成后，可大幅提升像元真值数据的空间代表性，高分共性产品算法测评和真实性检验更具有可靠性和权威性。

4.3 高分共性产品生产国产软件

在共性产品生产插件算法定制性能优化、共性产品生产插件动态更新和自动校验、海量高分数据的自动空间关联更新等技术基础上，研发高分共性产品国产软件（以下简称高分软件），包含桌面软件、集群软件、云端软件3种服务模式。桌面软件在单机环境下提供45种共性产品生产功能，

重点实现数据处理专业插件的研发, 可实现高分共性产品生产算法的调试, 以及算法的单机高性能运行, 包括通用工具模块、高分一号至七号精

能运行, 包括通用工具模块、高分一号至七号精处理模块、45种共性产品生产模块(图8)。

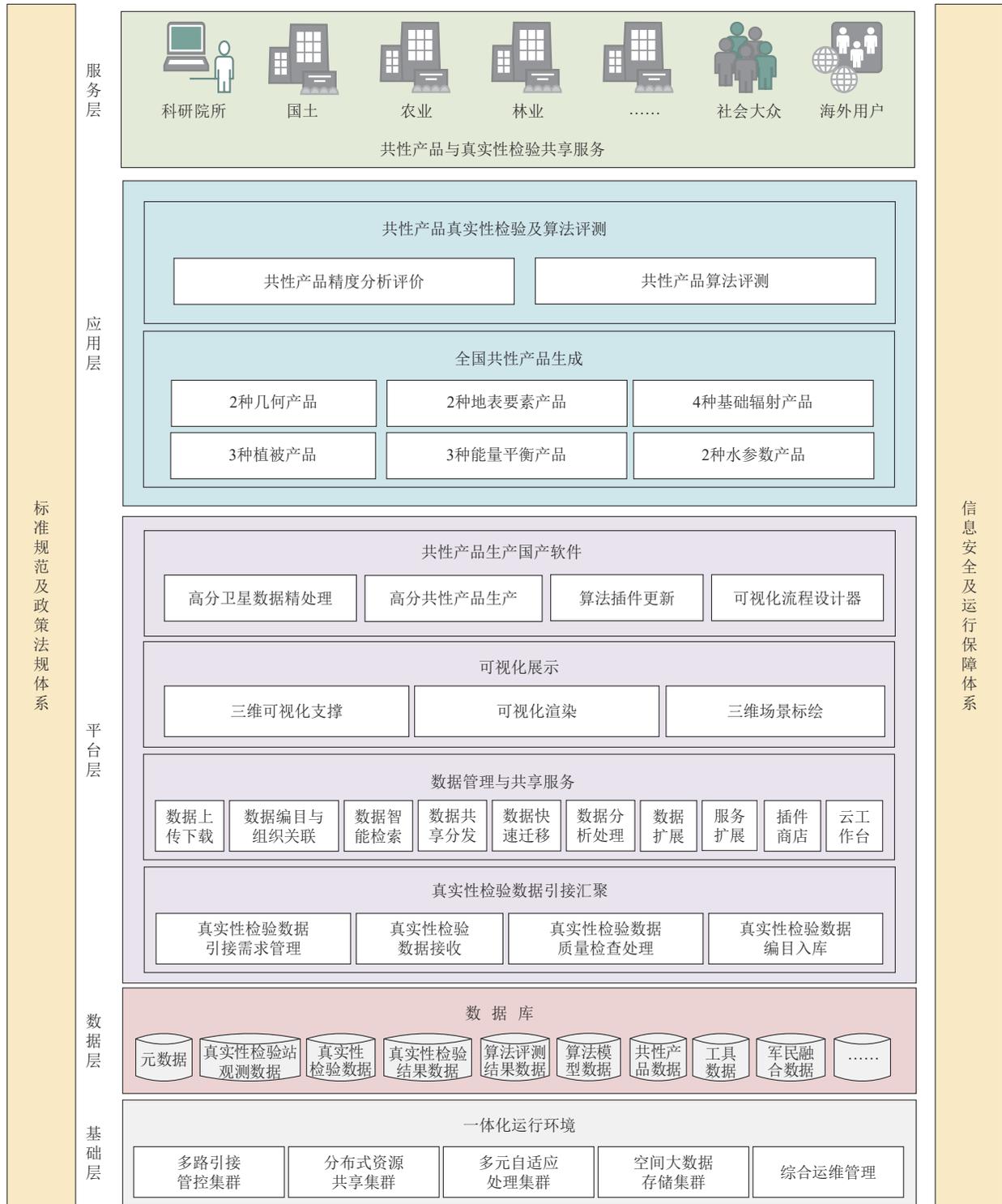


图6 高分共性产品真实性检验平台和产品定型分系统技术架构

Fig. 6 Technique flowchart of Sub-system of GF common product validation platform and products determination

集群软件支持在集群环境下的共性产品生产服务, 云端软件支持在互联网环境下的共性产品生产服务。高分共性产品生产国产软件集群版是

在行业用户已有硬件和数据库基础上构建海量共性产品生产的集群并行处理系统, 可实现共性产品生产算法的自动批量化集群并行计算, 大大

提高产品生产效率。云端版的开发目标是支持共性产品在线生产、算法模块的升级更新、算法执行过程的可视化和开放的系统接口。云端版不仅可实现共性产品生产算法的自动批量化集群并行

计算，还可在线更新算法模块、提交生产任务、查看生产运行状态、处理相关异常信息，进一步提高作业效率。

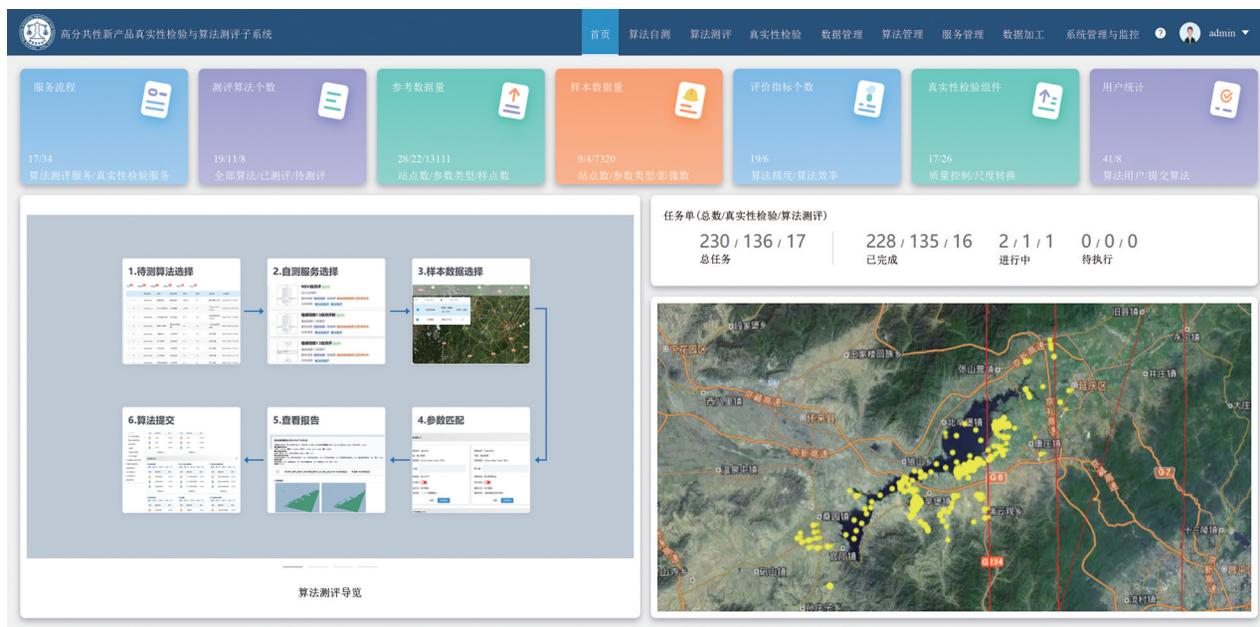


图7 算法测评与产品真实性检验子系统界面

Fig. 7 GF common products algorithm test and validation sub-system

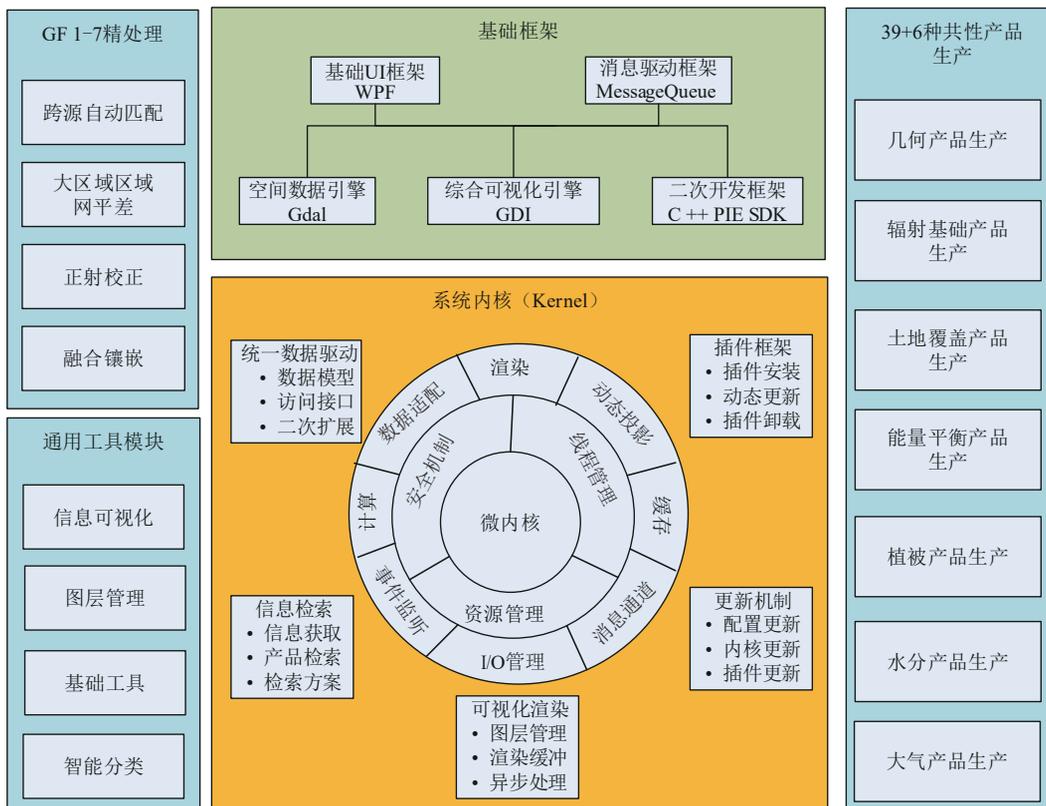


图8 高分共性产品生产国产软件桌面版架构

Fig. 8 Technique flowchart of national software of GF common products generation

4.4 全国共性产品生成子系统

在高分共性产品算法测评、集成和国产软件基础上，面向全国高分共性产品生成面临的高分数据类型多、时空尺度不一致、数据质量差异大等问题，在高分数据库和知识库的支持下，针对全国多个行业部门对同时具有高空间分辨率（十米级）、高时间分辨率（旬）的地表快速变化监测的迫切需求，结合高分卫星数据源的可覆盖性和

可获得性，选择以高分一号、二号、五号、六号卫星为主要数据源，研发全国高分共性产品生成系统（图9），生产和发布全国16 m分辨率为主的全国产品，针对获取的有效卫星数据，以旬为时间单位进行产品生产。以高分一号、二号和六号卫星的2/8 m数据源，以年为单位生产2 m、8 m全国正射影像产品。

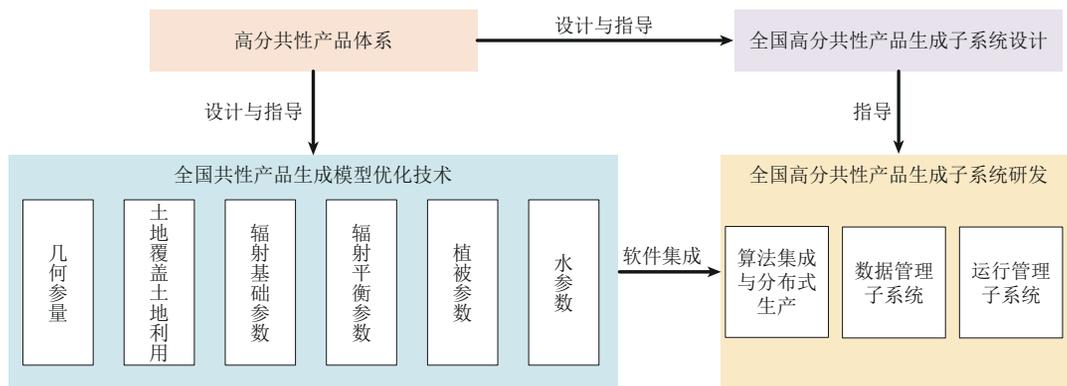


图9 高分全国共性产品生成子系统设计

Fig. 9 Design of GF common products generation sub-system

基于高分卫星高空间分辨率、高时效的优势，研发了几何配准—辐射定标—大气校正—产品生产全链条生产流程，通过算法测评、迭代优化和真实性检验后生成全国高分共性产品，不断提升时空分辨率及产品精度，全国2 m/8 m产品可以每年更新，16 m产品可以每月更新。2021年4月24日，中国科学院空天信息创新研究院在中国第六个“中国航天日”上，率先发布了首批全国高分地表反射率（Zhong等，2021）、地表反照率（游冬琴等，2023；Zhao等，2023）、植被指数（张召星等，2023）、植被叶面积指数（张虎等，2023；贺敏等，2022）、植被覆盖度（赵静等，2023）等共性产品。在此基础上，又生成了植被光合有效辐射吸收比例（李丽等，2023）、光合有效辐射（张海龙等，2023）、蒸散发（郑超磊等，2023）、离水辐射率、水体叶绿素、水体悬浮物和水体透明度高分共性产品（张方方等，2023）等12种16 m全国高分共性产品。

高分共性产品延长了数据服务链，将对外提供服务的1—2级产品延伸到3—5级高分共性产品，显著减少各部门重复处理成本，提升数据行业应用效率。全国高分共性产品已在国土、农业、林业、环保、水利和应急管理12个以上行业部

门及高校和科研机构进行了初步应用，有效降低了遥感应用尤其对共性产品数据应用的技术门槛，显著提升了遥感卫星产品国产替代能力。

5 高分遥感共性产品应用前景展望

高分遥感共性产品生成与服务是降低高分应用门槛、提升高分系统应用效益的重要举措。而共性产品真实性检验是评价遥感产品质量、可靠性和适用性的重要手段，是提高遥感产品精度、改善遥感产品质量的重要依据，是扩大遥感产品应用范围和提升定量化应用水平的重要保障。高分共性产品真实性检验和产品定型分系统的建设与业务化运行，将首次形成遥感共性产品生产和真实性检验的国家能力，引领中国国产卫星行业应用，具有重要意义和应用前景。

(1) 将引接全国真实性检验场站实测数据，实现全国范围内跨行业、跨站网数据的大汇聚，包括地面人工采集、无线传感器网络采集、无人机采集等不同观测平台采集的真实检验数据，为3—5级共性产品的验证提供真实的实测数据。解决高分遥感产品质量与可靠性评价的难题，保障高分共性产品的精度，为共性产品提供真实性检验和产

品定型服务。

(2) 通过算法测评、迭代优化和真实性检验后生成45种高分共性产品, 研制标准化的高分共性产品国产软件, 实现高分共性产品生成运行服务能力。

(3) 通过高分共性产品模型优化及产品精度不断提升, 实现全国高分共性产品生产, 大幅度提高遥感应用的能力和效率, 扩展遥感应用的深度和广度, 逐步提升中国高分遥感应用水平。

(4) 提升高分应用综合信息服务共享水平, 制定高分共享服务机制, 打造空间信息产业优质、快速发展的新业态。通过“云服务”的形式, 将高精度、系列化遥感共性产品和算法进行共享分发, 推动中国遥感应用水平和效能提升, 支撑遥感空间信息产业优质、快速发展。

高分共性产品研发需要全国各部门各单位遥感科研人员, 尤其是青年科研人员积极参与, 共同设计反演算法, 不断测评并提高共性产品的精度, 在此基础上, 才能将共性产品成果转化成为业务化生产能力。未来, 面向地球系统科学研究和行业应用需求, 针对中国遥感卫星快速发展的技术潜力, 不断组织共性产品算法的测评和产品质量的检验, 开展共性定量遥感产品示范应用, 将是推动中国定量遥感应用, 特别是“高分”专项和“国家民用空间基础设施”遥感卫星业务化和产业化应用的重要技术途径。

参考文献 (References)

China National Space Administration. 2018. 2018 China satellite application report of high-resolution earth observation system (common products). China National Space Administration (国家航天局). 2018. 2018 中国高分卫星应用报告(共性产品卷). 国家航天局)

GCOS. 2011. Systematic observation requirements for satellite based products for climate. GCOS-154.

Geng Y L, Tang Y Q, Yin Z Y, Zou B and Feng H H. 2022. Research on scale effect of domestic satellite land cover products considering patch area ratio. *Journal of Remote Sensing (Chinese)* (耿云龙, 汤玉奇, 尹芝勇, 邹滨, 冯徽徽. 2022. 顾及斑块面积比的国产卫星土地覆盖产品尺度效应研究. *遥感学报* [DOI: 10.11834/jrs.20211213])

Giuliani G, Egger E, Italiano J, Poussin C, Richard J P and Chatenoux B. 2020. Essential variables for environmental monitoring: what are the possible contributions of earth observation data cubes?.

Data, 5(4): 100 [DOI: 10.3390/data5040100]

Hu C M, Zhang Z and Tang P. 2023. Research on scale effect of domestic satellite land cover products considering patch area ratio. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 623-634 (胡昌苗, 张正, 唐婷. 2023. 国产卫星多光谱数据云与云影检测算法研究. *遥感学报*, 27(3): 623-634) [DOI: 10.11834/jrs.20211209]

He M, Wen J G, You D Q, Tang Y, Wu S B, Hao D L, Lin X W and Gong Z R. 2022. Review of forest Leaf Area Index retrieval over rugged terrain based on remotely sensed data. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(12): 2451-2472 (贺敏, 闻建光, 游冬琴, 唐勇, 吴胜标, 郝大磊, 林兴稳, 龚张融. 2022. 山地森林叶面积指数(LAI)遥感估算研究进展. *遥感学报*, 26(12): 2451-2472) [DOI: 10.11834/jrs.20210244]

Jin R, Li X, Ma M G, Ge Y, Liu S M, Xiao Q, Wen J G, Zhao K, Xin X P, Ran Y H, Liu Q H and Zhang R H. 2017. Key methods and experiment verification for the validation of quantitative remote sensing products. *Advances in Earth Science*, 32(6): 630-642 (晋锐, 李新, 马明国, 葛咏, 刘绍民, 肖青, 闻建光, 赵凯, 辛晓平, 冉有华, 柳钦火, 张仁华. 2017. 陆地定量遥感产品的真实性检验关键技术与试验验证. *地球科学进展*, 32(6): 630-642) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.06.0630]

Lawford R. 2014. The GEOSS Water Strategy: From Observations to Decisions. Geneva: Group on Earth Observations

Li L, Xin X Z, Tang Y, Bai J H, Du Y M, Sun L, Wen J G, Zhong B, Wu S L, Zhang H L, Yu S S and Liu Q H. 2023. Fraction of absorbed photosynthetically active radiation inversion algorithm of GF-1 data combining radiative transfer model simulation and deep learning. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 700-710 (李丽, 辛晓洲, 唐勇, 柏军华, 杜永明, 孙林, 闻建光, 仲波, 吴善龙, 张海龙, 余珊珊, 柳钦火. 2023. 辐射传输模型模拟与深度学习结合的高分一号卫星植被光合有效辐射吸收比例产品反演算法. *遥感学报*, 27(3): 700-710) [DOI: 10.11834/jrs.20235020]

Li X W, Gao F, Wang J D and Strahler A. 2001. A priori knowledge accumulation and its application to linear BRDF model inversion. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D11): 11925-11935 [DOI: 10.1029/2000JD900639]

Li X W, Gao F, Wang J D, Strahler A H, Lucht W and Schaaf C. 2000. Estimation of the parameter error propagation in inversion based BRDF observations at single sun position. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 43(S1): 9-16 [DOI: 10.1007/BF02916573]

Lin X W, Wen J G, Liu Q H, Xiao Q, You D Q, Wu S B, Hao D L and Wu X D. 2018. A multi-scale validation strategy for albedo products over rugged terrain and preliminary application in Heihe River Basin, China. *Remote Sensing*, 10(2): 156 [DOI: 10.3390/rs10020156]

Liu Q H, Cao B, Zeng Y L, Li J, Du Y M, Wen J G, Fan W L, Zhao J and Yang L. 2016. Recent progresses on the remote sensing radiative transfer modeling over heterogeneous vegetation canopy. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 933-945 (柳钦火, 曹彪, 曾也

- 鲁, 李静, 杜永明, 闻建光, 范渭亮, 赵静, 杨乐. 2016. 植被遥感辐射传输建模中的异质性研究进展. 遥感学报, 20(5): 933-945 [DOI: 10.11834/jrs.20166280]
- Liu Q H, Yan G J, Jiao Z T, Xiao Q, Wen J G, Liang S L and Wang J D. 2019. Geometric-optical remote sensing modeling to quantitative remote sensing theory and methodology development: in memory of academician Li Xiaowen. Journal of Remote Sensing, 23(1): 1-10 (柳钦火, 阎广建, 焦子锦, 肖青, 闻建光, 梁顺林, 王锦地. 2019. 发展几何光学遥感建模理论, 推动定量遥感科学前行——深切缅怀李小院院士. 遥感学报, 23(1): 1-10) [DOI: 10.11834/jrs.20198077]
- Liu Q H, Zhong B, Tang P, Zhang H H, Li H Y, Wu S L, Xin X Z, Li J, Jia L, Shan X J, Zhang Z, Wen J G, Du Y M, Li L, Yang A X, Li H, Hu G C, Zhao J, Zhang H L, Yu S S, Dou B C and Wu J J. 2018. Remote sensing data products oriented quantitative computing system——The GSC best practice data computing environment 2018. Journal of Global Change Data and Discovery, 2(3): 271-278 (柳钦火, 仲波, 唐娉, 张宏海, 李宏益, 吴善龙, 辛晓洲, 李静, 贾立, 单小军, 张正, 闻建光, 杜永明, 李丽, 杨爱霞, 历华, 胡光成, 赵静, 张海龙, 余珊珊, 窦宝成, 吴俊君. 2018. 多源协同定量遥感产品生产系统——2018年中国地理学会地理大数据计算环境“优秀实用案例”. 全球变化数据学报(中英文), 2(3): 271-278) [DOI: 10.3974/geodp.2018.03.04]
- Liu Y K, Ma L L, Wang R F, Zheng Q C, Song P L, Li W, Zhao Y G, Wang N, Gao C X, Hou X X and Jin J. 2023. Time series traceable absolute radiometric calibration of GF-6 WFV based on automatic radiometric calibration field. Journal of Remote Sensing, 27(3): 599-609 (刘耀开, 马灵玲, 王任飞, 郑青川, 宋培兰, 李婉, 赵永光, 王宁, 高彩霞, 侯晓鑫, 金金. 2023. 基于自动辐射定标场的高分六号宽幅载荷时序绝对辐射定标及趋势分析. 遥感学报, 27(3): 599-609) [DOI: 10.11834/jrs.20235017]
- Long T F, Jiao W L, He G J, Wang G Z and Zhang Z M. 2023. Digital orthophoto map products and automated generation algorithms of Chinese optical satellites. Journal of Remote Sensing, 27(3): 635-650 (龙腾飞, 焦伟利, 何国金, 王桂周, 张兆明. 2023. 国产光学卫星正射影像产品及自动生成算法. 遥感学报, 27(3): 635-650) [DOI: 10.11834/jrs.20235021]
- Ma M G, Che T, Li X, Xiao Q, Zhao K and Xin X P. 2015. A prototype network for remote sensing validation in China. Remote Sensing, 7(5): 5187-5202 [DOI: 10.3390/rs70505187]
- Ouyang X Y, Dou Y J, Yang J X, Chen X and Wen J G. 2022. High spatiotemporal rugged land surface temperature downscaling over Saihanba Forest Park, China. Remote Sensing, 14(11): 2617 [DOI: 10.3390/rs14112617]
- Peng J J, Liu Q, Wen J G, Liu Q H, Tang Y, Wang L Z, Dou B C, You D Q, Sun C K, Zhao X J, Feng Y B and Shi J. 2015. Multi-scale validation strategy for satellite albedo products and its uncertainty analysis. Science China Earth Sciences, 58(4): 573-588 [DOI: 10.1007/s11430-014-4997-y]
- Pereira H M, Ferrier S, Walters M, Geller G N, Jongman R H G, Scholtes R J, Bruford M W, Brummitt N, Butchart S H M, Cardoso A C, Coops N C, Dulloo E, Faith D P, Freyhof J, Gregory R D, Heip C, Höft R, Hurtt G, Jetz W, Karp D S, McGeoch M A, Obura D, Onoda Y, Pettorelli N, Reyers B, Sayre R, Scharlemann J P W, Stuart S N, Turak E, Walpole M and Wegmann M. 2013. Essential biodiversity variables. Science, 339(6117): 277-278 [DOI: 10.1126/science.1229931]
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2018. GB/T 36296-2018 Guide for the validation of remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2018. GB/T 36296-2018 遥感产品真实性检验导则. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2019. GB/T 38026-2019 Gradation standard for multispectral data products of remote sensing satellite. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2019. GB/T 38026-2019 遥感卫星多光谱数据产品分级. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2020. GB/T 39468-2020 General methods for the validation of terrestrial quantitative remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2020. GB/T 39468-2020 陆地定量遥感产品真实性检验通用方法. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2021a. GB/T 40033-2021 Validation of land surface evapotranspiration remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2021a. GB/T 40033-2021 地表蒸发遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2021b. GB/T 40034-2021 Validation of leaf area index remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2021b. GB/T 40034-2021 叶面积指数遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2021c. GB/T 40038-2021 Validation of vegetation index remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2021c. GB/T 40038-2021 植被指数遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2021d. GB/T 40039-2021 Validation of soil moisture remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2021d. GB/T 40039-2021 土壤水分遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)

- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2022a. GB/T 41279-2022 Validation of albedo remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2022a. GB/T 41279-2022 反照率遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2022b. GB/T 41281-2022 Validation of photosynthetically active radiation remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2022b. GB/T 41281-2022 光合有效辐射遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2022c. GB/T 41282-2022 Validation of fractional vegetation cover remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2022c. GB/T 41282-2022 植被覆盖度遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2023a. GB/T 41535-2022 Validation of aerosol optical depth remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2023a. GB/T 41535-2022 气溶胶光学厚度遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2023b. GB/T 41536-2022 Validation of land cover remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2023b. GB/T 41536-2022 土地覆被遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2023c. GB/T 41537-2022 Validation of snow cover remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2023c. GB/T 41537-2022 积雪面积遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2023d. GB/T 41534-2022 Validation of surface temperature remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2023d. GB/T 41534-2022 地表温度遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2023e. GB/T 41538-2022 Validation of surface emissivity remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2023e. GB/T 41538-2022 地表发射率遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2023d. GB/T 41540-2022 Selection and arrangement of the surface observation field for the validation of terrestrial remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会). 2023f. GB/T 41540-2022 陆地遥感产品真实性检验地面观测场的选址和布设. 北京: 中国标准出版社)
- Tong X D. 2016. Development of China high-resolution earth observation system. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 775-780 (童旭东. 2016. 中国高分辨率对地观测系统重大专项建设进展. *遥感学报*, 20(5): 775-780) [DOI: 10.11834/jrs.20166302]
- Wang S G, Li X, Ge Y, Jin R, Ma M G, Liu Q H, Wen J G and Liu S M. 2016. Validation of regional-scale remote sensing products in China: from site to network. *Remote Sensing*, 8(12): 980 [DOI: 10.3390/rs8120980]
- Wen J G, Dou B C, You D Q, Tang Y, Xiao Q, Liu Q and Liu Q H. 2017. Forward a small-timescale BRDF/albedo by Multisensor Combined BRDF inversion model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(2): 683-697 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2613899]
- Wen J G, Wu X D, Wang J P, Tang R Q, Ma D J, Zeng Q C, Gong B C and Xiao Q. 2022. Characterizing the effect of spatial heterogeneity and the deployment of sampled plots on the uncertainty of ground "Truth" on a coarse grid scale: case study for near-infrared (NIR) surface reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(11): e2022JD036779 [DOI: 10.1029/2022JD036779]
- Wen J G, Xiao Q, Zhong S Y, Tang Y, Chen X, Wei Q F, Wu X D, Lin X W, Ouyang X Y, You D Q and Liu Q H. 2023. Technology system for product validation and algorithm test of GF common products and an application example. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 780-788 (闻建光, 肖青, 钟守熠, 唐勇, 陈曦, 魏秋方, 吴小丹, 林兴稳, 欧阳晓莹, 游冬琴, 柳钦火. 2023. 高分遥感共性产品算法测评与真实性检验技术体系及应用实例. *遥感学报*, 27(3): 780-789) [DOI: 10.11834/jrs.20221716]
- Wu X D, Wen J G, Xiao Q, Liu Q, Peng J J, Dou B C, Li X H, You D Q, Tang Y and Liu Q H. 2016. Coarse scale in situ albedo observations over heterogeneous snow-free land surfaces and validation strategy: a case of MODIS albedo products preliminary validation over northern China. *Remote Sensing of Environment*, 184: 25-39 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.06.013]
- Wu X D, Wen J G, Xiao Q, Wang J P, Ma D J and Lin X W. 2021. A multiscale nested sampling method for representative albedo observations at various pixel scales. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 8193-8207 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3105562]
- Wu X D, Wen J G, Xiao Q and You D Q. 2020. Upscaling of single-site-based measurements for validation of long-term coarse-pixel albedo products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(5): 3411-3425 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2954879]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G, You D Q and Hueni A. 2019. Advances in quantitative remote sensing product validation: overview and current status. *Earth-Science Reviews*, 196: 102875 [DOI: 10.1016/j.

- earscrev.2019.102875]
- Xu B D, Li J, Park T, Liu Q H, Zeng Y L, Yin G F, Zhao J, Fan W L, Yang L, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2018. An integrated method for validating long-term leaf area index products using global networks of site-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 209: 134-151 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.049]
- Xu G H, Liu Q H, Chen L F and Liu L Y. 2016. Remote sensing for China's sustainable development: opportunities and challenges. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 679-688 (徐冠华, 柳钦火, 陈良富, 刘良云. 2016. 遥感与中国可持续发展: 机遇和挑战. *遥感学报*, 20(5): 679-688) [DOI: 10.11834/jrs.20166308]
- You D Q, Wen J G, Tang Y, Liu Q, Zhong S Y, Han Y, Gong B C, Zhong B, Wu S L and Liu Q H. 2023. The GaoFen land surface albedo product based on the high-spatial-and-temporal-resolution BRDF priori-knowledge and its preliminary validation. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 738-747 (游冬琴, 闻建光, 唐勇, 刘强, 钟守熠, 韩源, 宫宝昌, 仲波, 吴善龙, 柳钦火. 2023. 基于高时空分辨率 BRDF 先验知识的高分卫星地表反照率产品及其初步验证. *遥感学报*, 27(3): 738-747 [DOI: 10.11834/jrs.20235018]
- Zeng Y L, Li J, Liu Q H, Li L H, Xu B D, Yin G F and Peng J J. 2014. A sampling strategy for remotely sensed LAI product validation over heterogeneous land surfaces. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(7): 3128-3142 [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2312231]
- Zeng Y L, Li J, Liu Q H, Qu Y H, Huete A R, Xu B D, Yin G F and Zhao J. 2015. An optimal sampling design for observing and validating long-term leaf area index with temporal variations in spatial heterogeneities. *Remote Sensing*, 7(2): 1300-1319 [DOI: 10.3390/rs70201300]
- Zhang F F, Li J S, Wang C and Wang S L. 2023. Estimation of water quality parameters of GF-1 WFV in turbid water based on soft classification. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 769-779 (张方方, 李俊生, 王超, 王胜蕾. 2023. 高分一号卫星浑浊水体水质参数软分类反演. *遥感学报*, 27(3): 769-779) [DOI: 10.11834/jrs.20235024]
- Zhang H, Li J, Liu Q H, Zhang Z X, Zhu X R, Liu C, Zhao J, Dong Y D, Xu B D and Meng J H. 2023. GF-1 leaf area index product across China based on three-dimensional stochastic radiation transfer model. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 677-688 (张虎, 李静, 柳钦火, 张召星, 朱欣然, 刘畅, 赵静, 董亚冬, 徐保东, 蒙继华. 2023. 基于三维随机辐射传输模型的高分一号中国叶面积指数产品算法. *遥感学报*, 27(3): 677-688) [DOI: 10.11834/jrs.20235016]
- Zhang H L, Wang B C, Li L, Xin X Z, Wen J G, Tang Y, Zhong B, Wu S L, Yu S S and Liu Q H. 2023. A para metric model to estimate photosynthetically active radiation products from synergized GF-1, FY-4 and Himawari-8 data. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 748-757 (张海龙, 王保清, 李丽, 辛晓洲, 闻建光, 唐勇, 仲波, 吴善龙, 余珊珊, 柳钦火. 2023. 融合高分一号、风云四号及葵花-8 的光合有效辐射遥感方法及产品研究. *遥感学报*, 27(3): 748-757) [DOI: 10.11834/jrs.20235029]
- Zhang Y, Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, Xu T R, Yao Y J, Ma Y F, Song L S, Li X, Hu X, Wang Z Y, Guo Z X and Zhou J. 2020. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration. *Journal of Remote Sensing*, 24(8): 975-999 (张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 徐自为, 徐同仁, 姚云军, 马燕飞, 宋立生, 李相, 胡晓, 王泽宇, 郭枝虾, 周纪. 2020. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展. *遥感学报*, 24(8): 975-999) [DOI: 10.11834/jrs.20209099]
- Zhang Z, Li H Y, Hu C M and Tang P. 2023. GF quantitative remote sensing production system: Core design. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 651-664 (张正, 李宏益, 胡昌苗, 唐嫔. 2023. 高分遥感共性产品生产系统关键设计. *遥感学报*, 27(3): 651-664) [DOI: 10.11834/jrs.20210420]
- Zhang Z X, Li J, Liu Q H, Zhao J, Dong Y D, Li S Z, Wen Y, Yu W T. 2023. Verification and analysis of high spatial-temporal resolution vegetation index product based on GF-1 satellite data. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 665-676 (张召星, 李静, 柳钦火, 赵静, 董亚冬, 李松泽, 文远, 于文涛. 2023. 高分一号卫星高时空分辨率植被指数产品验证与分析. *遥感学报*, 27(3): 665-676) [DOI: 10.11834/jrs.20235028]
- Zhao J, Li J, Mu X H, Zhang Z X, Dong Y D, Wu S L, Zhong B and Liu Q H. 2023. Validation and analysis the fractional vegetation cover product from GF-1 satellite data in China. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 689-699 (赵静, 李静, 穆西哈, 张召星, 董亚冬, 吴善龙, 仲波, 柳钦火. 2023. 高分一号卫星中国植被覆盖度高时空分辨率产品验证与分析. *遥感学报*, 27(3): 689-699) [DOI: 10.11834/jrs.20235015]
- Zheng C L, Jia L and Hu G C. 2023. Evapotranspiration Estimation at 16 m resolution in China based on GF-1 Satellite Remote Sensing Datasets. *Journal of Remote Sensing*, 27(3): 758-768 (郑超磊, 贾立, 胡光成. 2023. 高分一号卫星遥感数据驱动 ETMonitor 模型估算 16 m 分辨率蒸散发及验证. *遥感学报*, 27(3): 758-768) [DOI: 10.11834/jrs.20235026]
- Zhong B, Yang A X, Liu Q H, Wu S L, Shan X J, Mu X H, Hu L F and Wu J J. 2021. Analysis ready data of the Chinese GaoFen satellite data. *Remote Sensing*, 13(9): 1709 [DOI: 10.3390/rs13091709]
- 2018 China satellite application report of high-resolution earth observation system (common products). 2018. State administration of science, technology and industry for national defence. (2018 中国高分卫星应用报告(共性产品卷). 2018. 国家国防科技工业局)

Technique system of remote sensing product generation and validation of GF common products

LIU Qinhuo^{1,12}, WEN Jianguang^{1,12}, ZHOU Xiang^{1,12}, ZHAO Jian², LI Zengyuan³, LI Xin⁴, MA Mingguo⁵, WANG Weizhen⁶, LIAO Xiaohan⁷, LIU Shaoming⁸, FAN Wenjie⁹, XIAO Qing^{1,12}, ZHONG Bo¹, LI Jing^{1,12}, XIN Xiaozhou^{1,12}, LI Li¹, JIA Li^{1,12}, GAO Zhihai³, JIN Jiadong¹⁰, LIANG Shi¹¹, XIN Jin², LIAO Chujiang², WU Yirong¹

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Earth Observation System and Data Center, China National Space Administration, Beijing 100101, China;
3. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
4. National Tibetan Plateau Data Center, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
5. Chongqing Jinfo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;
6. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
7. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
8. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
9. Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China;
10. Geovis Technology Company Limited, Beijing 101399, China;
11. Piesat Information Technology Company Limited, Beijing 100195, China;
12. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: GF-1—GF-7 satellite series with 19 major payloads has been launched with the continuous implementation of the high-resolution Earth Observation System (referred to as GF) in the past decade. This progress is vital in forming the multispectral and multimode observation capability of China's Earth Observation System. Remote sensing data with high spatial, temporal, and spectral resolution have been obtained and widely used in scientific research and remote sensing applications. However, obtaining high-quality remote sensing information products from the original satellite data is a complicated scientific issue and faces huge challenges. Hence, the conversion chain from GF data to information must be urgently set up to reduce the remote sensing application threshold and improve the effectiveness of application services.

The errors of remote sensing quantitative products are determined by accumulating a series of errors, such as sensor imaging error, calibration error, remote sensing data processing error, and quantitative inversion error. Thus, improving the accuracy of quantitative remote sensing products is a complex system engineering. Completing the whole process, including data processing, retrieval algorithm development, product generation, and validation independently, is challenging. Remote sensing algorithm test and product validation are the two crucial ways for the quality improvement of remote sensing products. Hence, this study proposes the technique system of GF common product generation and validation to improve the quality of GF remote sensing products further, thereby guaranteeing the improvement of the application quality and the extensive application area of GF remote sensing products. Lastly, the current progress of the GF common product validation and algorithm determination system platform is introduced and discussed.

GF common products are required by more than two thematic remote sensing products. They can be validated using *in situ* observations. According to the GF common product system, the number of 39 + 6 products in seven categories are sorted out for the common requirements of multiple users, including geometric products, basic radiation products, land cover and land type products, energy balance products, vegetation products, water products, and atmosphere products. This study presents the technique flowchart of GF common product algorithm determination and product generation. The key technologies of algorithm testing, algorithm optimization, product generation, and validation are developed. Eleven national standards for remote sensing product validation are issued and implemented. Other group standards, such as GF common product generation, ground *in situ* observation, and validation of GF common remote sensing products, are being designed and compiled. Based on these validation technologies and the *in situ* data from the national network of GF remote sensing product validation field sites, the GF common product validation platform and product algorithm determination system platform can ensure the high quality of GF common products.

Building such a technical system for GF common product generation and validation has great relevance for ensuring high accuracy and high quality to improve the efficiency of application services further. It requires the cooperation of multiple researchers from different units to research and develop common product retrieval algorithms. Moreover, the algorithm should be continuously tested to improve the accuracy of common products.

Key words: GF satellite, remote sensing retrieval, common product, algorithm test, ground truth, product validation

Supported by China High-resolution Earth Observation System (No. 21-Y20B02-9003-19/22, 21-Y20B01-9001-19/22)