

误差溯源在遥感产品生产与检验中的方法与应用

李子薇^{1,2}, 闻建光^{1,2}, 肖青^{1,2}, 游冬琴¹, 唐勇¹, 吴小丹³,
林兴稳⁴, 朴森¹, 赵娜¹, 李曲曲^{1,2}

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 遥感卫星应用国家工程实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049;

3. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 成都 611756;

4. 浙江师范大学 地理与环境科学学院, 金华 321004

摘要: 遥感产品是地球资源监测的重要数据来源, 随着产品生产与服务体系不断完善, 推进高质量遥感产品发展迫在眉睫。遥感产品质量问题是多源误差综合影响的结果, 虽然可以通过真实性检验计算其整体精度, 但无法详细反映各环节误差的具体来源及大小。为保证遥感产品的可靠性, 地球质量保障框架(QA4EO)特别强调了遥感产品误差溯源, 旨在将遥感产品的误差追溯到统一的参考基准或国际标准。本文聚焦于遥感产品生产与检验中的误差溯源, 参考量值溯源方法, 分析了测量与遥感产品的误差来源, 阐述了真实性检验与误差溯源的基本内涵, 总结了遥感产品生产与检验中误差溯源的基本方法及其典型应用, 并对误差溯源的未来发展趋势进行展望。结果表明, 当前误差溯源的基本方法主要涵盖3大类: 基于不确定度溯源方法、误差分解及反演方法, 以及算法测评和真实性检验综合方法。这些方法典型服务于真实性检验参考真值和遥感基础辐射产品的误差溯源中。未来, 发展全链路误差传递模型并建立可溯源的质量标识是突破溯源瓶颈的关键。本研究可为进一步实现遥感产品生产与真实性检验提供理论和技术支持。

关键词: 遥感产品, 误差, 不确定度, 真实性检验, 误差溯源

中图分类号: P2

引用格式: 李子薇, 闻建光, 肖青, 游冬琴, 唐勇, 吴小丹, 林兴稳, 朴森, 赵娜, 李曲曲. 2025. 误差溯源在遥感产品生产与检验中的方法与应用. 遥感学报, 29(12): 3666–3678

Li Z W, Wen J G, Xiao Q, You D Q, Tang Y, Wu X D, Lin X W, Piao S, Zhao N and Li Q Q. 2025. Error traceability in remote sensing product production and validation: Methods and applications. National Remote Sensing Bulletin, 29(12):3666–3678[DOI:10.11834/jrs.20254475]

1 引言

卫星观测数据及其遥感产品的不断发展(Zhou等, 2019; Wang等, 2020), 为全球变化监测和行业遥感应用提供了大量的有效信息(徐冠华等, 2016)。然而, 遥感产品生成是一个复杂的系统性工程, 多层次遥感数据的复杂处理和反演使得遥感产品的质量存在着很大的不确定性(Wu等, 2020), 其影响过程包括卫星载荷质量、数据定标、数据处理、定量反演等, 因此遥感产品生成中引入的误差是一个不断累积的过程。准确对

遥感产品精度和可靠性进行定量评价是降低遥感产品不确定性, 促进遥感产品广泛应用的保障。

在遥感产品的生产过程中, 首先需要对输入数据进行严格的质量控制并对遥感产品进行真实性检验。遥感产品生产通常需要构建遥感产品体系并进行分级, 现行的国家标准《遥感卫星多光谱数据产品分级》(GB/T 38026–2019)(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2019)依据遥感数据处理水平将遥感产品分为0—6级, 保证了数据的规范性与科学性。高分辨率对地观测重大专项(高分专项)进一步为高分遥感共性

收稿日期: 2024-10-24; 预印本: 2025-04-09

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2023YFB3905804)

第一作者简介: 李子薇, 研究方向为遥感真实性检验。E-mail: liziwei22@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 闻建光, 研究方向为遥感辐射传输建模与试验遥感。E-mail: wenjg@irsa.ac.cn

产品建立了标准—共性—专题的0—7级分级体系,提高了遥感产品的质量和应用水平(廖楚江等, 2023)。数据质量标识是方便用户了解数据质量的重要途径,通过遥感产品质量标识可以清楚地了解影响遥感产品质量的关键因素。以MODIS产品为例,其输入数据的相关信息及产品的误差范围通常以二进制编码等形式进行标识。地球观测数据质量保证框架QA4EO(Quality Assurance Framework for Earth Observation)也提出赋予产品质量标识QI(Quality Indicator),将产品生产过程中的所有步骤记录下来,并证明其可追溯性和由端到端传播的质量信息。中国对外发布的系列遥感产品国家标准也明确规定了产品数据集中需包含与像元值质量相关的标记数据(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2022)。

进一步优化算法、提高产品精度的前提是准确把握遥感产品生成的误差来源。获取遥感产品的误差来源首先需要将产品生产主要过程的误差记录下来,以便产品使用者或者研发人员改进产品质量(闻建光等, 2023a)。无论是记录产品生产过程中的质量问题(赵帅锋等, 2023)还是将生产过程透明化(吴敏等, 2023),其目的都是了解产品生产过程中的误差以便后续回溯。这种数据溯源的方法保留了产品生产过程信息,但缺乏定量评价,遥感产品误差来源及大小仍难以确定。溯源结果不仅反映了遥感产品生产流程中误差分布情况,还为保证产品可靠、一致提供参考依据。对此,于江丰等(2014)提出通过算法解析、产品的不确定性分析以及建立质量标识体系等方法来改善遥感产品质量。高分遥感共性产品生成和检验系统也逐步发展起来,为保障中国高分遥感共性产品质量提供了重要支持(柳钦火等, 2023)。考虑到反演算法和输入数据引入的误差,闻建光等(2023b)还提出建立算法测评和真实性检验两端保障体系。实现算法在线测评和产品的真实性检验,有利于将算法误差和数据输入误差分开,并保留遥感产品生产过程的误差来源。国际上,为了保证产品的一致性和可靠性,QA4EO(2010)明确强调了将遥感产品误差溯源到统一的参考基准,理想情况下为国际单位制(International System of Units, 简称SI),并基于测量不确定度评定指南(GUM)给出了建立溯源证据链的基本方法(NPL QA4EO Team, 2025)。溯

源到同一基准下的遥感产品之间的差异得以量化,同类遥感产品之间具有可比性,突出了不同遥感产品的精度水平。与国际研究相比,在高分共性产品分级体系的基础上,算法测评和真实性检验两端保障为逐级进行产品的误差溯源提供了重要条件,但目前综合算法测评和真实性检验的溯源工作尚未开展。针对QA4EO提出的溯源性要求,从算法测评和真实性检验这一角度寻找突破口,实现将遥感产品误差追溯至基本的物理量将是未来研究的重点及难点。

定量遥感产品误差溯源是对遥感产品质量信息和误差来源的全面反映,有利于遥感产品质量提升,扩大其适用范围,进一步满足用户对遥感产品的应用需求。本文围绕遥感产品生产与检验中的误差溯源问题展开系统研究,首先讨论了误差及误差溯源的基本概念,通过广泛文献调研,梳理了当前误差溯源在遥感产品生产与检验中的基本方法及其典型应用,进而强调了误差溯源对遥感产品质量提升的重要性,并针对未来发展趋势进行了展望,以期为推动误差溯源研究、持续提升遥感产品质量提供理论参考。

2 测量与遥感产品的误差

遥感产品生产与检验过程中,其误差对应来源于两部分:遥感产品自身误差与地面参考真值测量误差。通过获取不确定性最小的地面参考真值与产品进行比较,才能真实反映遥感产品自身的误差大小。

2.1 测量误差来源

在测量过程中,受诸如测量环境、测量方法以及测量人员主观因素等限制,不可避免地造成测量结果与被测量真实性值之间的差异,即为误差,可表达为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1)$$

式中, Δx 为误差, x 为测量值, x_0 为被测量真实值。

误差按性质分为系统误差和随机误差。系统误差(systematic error)指在同一被测量的多次测量过程中保持相同绝对值和符号的误差,或在条件改变时以可预知的方式变化的误差。重复测量条件下,系统误差在数值上等于对同一被测量进行无穷多次测量结果的平均值与被测量的真值之差。如果记被测量真值为 x_0 ,无穷多次测量结果的

平均值即期望为 $E(x)$ ，则可以将系统误差 Δ 记为

$$\Delta = E(x) - x_0 \quad (2)$$

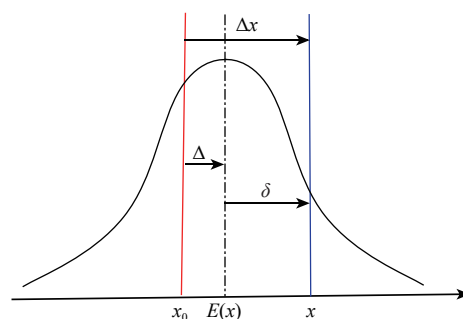
随机误差 (random error) 是在对同一被测量的多次测量过程中，测量误差的分量以不可预知的方式变化的误差。在数值上，随机误差是测量结果与同一被测量进行无限多次重复测量所得平均值之差。记测量结果为 x ，随机误差 δ 可以表示为 (钱政等, 2022)

$$\delta = x - E(x) \quad (3)$$

系统误差与被测量的真实值相关联，而随机误差只与测量结果有关，为了全面反映测量结果的好坏，引入准确度与不确定度来进行综合评价。测量准确度表示测量结果与真值接近的程度，因而它是系统误差的反映。测量不确定度是表征被测量值分散性的非负参数，是相对被测量估计值定义的一个区间参数 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会, 2018)，与被测量真值无关。测量不确定度一般由若干分量组成。其中一些分量可根据一系列测量值的统计分布，按测量不确定度的 A 类评定方法进行评定，并用实验标准偏差表征。而另一些分量则可根据经验或其它信息假设的概率分布，按测量不确定度的 B 类评定方法进行评定，也用标准偏差表征。标准偏差 S 计算公式如下。

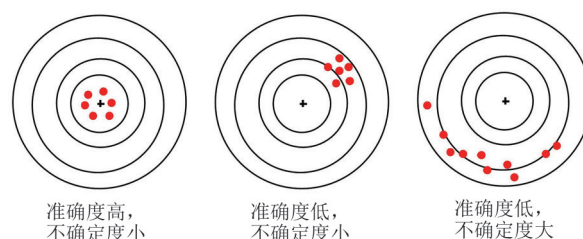
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

式 (1) — (3) 的误差、系统误差与随机误差之间的关系如图 1 所示。由于系统误差是与真值相关联的物理量，测量准确度高，说明测量数据的算术平均值偏离真值的程度较小。而不确定度则不同，图 1 (b) 表明不确定度只与数据的离散程度有关，并不体现估计值与真值之间的关系。因此，全面体现一个测量的质量，需要综合准确度和不确定度分析，准确度高、不确定度小的数据质量高。



— 被测量真值 — 单次测量值
--- 无限多次重复测量所得平均值
(a) 误差、系统误差与随机误差

(a) Error, system error and random error



(b) 准确度与不确定度

(b) Accuracy and uncertainty

图 1 误差、准确度及不确定度

Fig. 1 Error, accuracy and uncertainty

2.2 遥感产品误差来源

遥感产品生产涉及复杂的处理流程，产品误差来源于生产过程中的各个环节，包括数据获取、辐射定标、几何纠正、大气校正及模型算法等 (Wu 等, 2020) (图 2)。在数据获取阶段，传感器特性、卫星平台的稳定性共同影响图像的成像质量。即便是同一载荷，在运行周期内对同一地物目标的响应也有所差异 (Siddiqi 等, 2020)。虽然几何、辐射和大气校正的数据处理可以一定程度上减轻大气效应、地形效应及入瞳处的辐射畸变，但不同的纠正模型可能会在处理过程中引入新的误差 (柳钦火等, 2010)。例如，气溶胶分布、大气水汽等变量作为大气校正算法的重要输入参数，其自身的误差显著影响模型的不确定性 (De Vis 等, 2022)。

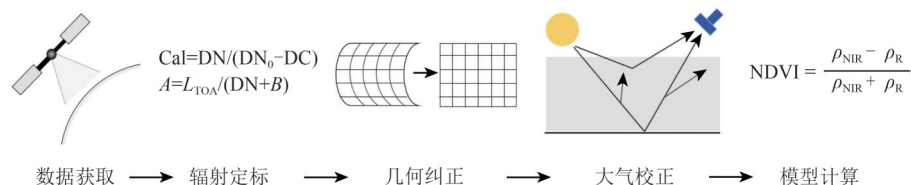


图 2 遥感产品误差来源

Fig. 2 Error source of the remote sensing product

在产品生产环节,反演算法一般基于理想假设和先验知识,模型输入误差、模型机理与变量参数化方案以及待求解参数的“病态”反演问题等进一步增加了产品自身的不确定性(方红亮, 2020; 张圆 等, 2020; Gilerson 等, 2022)。如果将传感器相关误差表示为 ε_s ,数据预处理引入的误差表示为 ε_p ,反演算法误差表示为 ε_m 。遥感产品生产全流程的综合误差可以表示为

$$U_T = \sqrt{\varepsilon_s^2 + \varepsilon_p^2 + \varepsilon_m^2} \quad (5)$$

式(5)假设每个阶段的误差是独立的,但实际各环节的误差是累积传递的,需要考虑它们之间的相关关系,总体误差表达式会更加复杂(Guilloteau 等, 2022)。

3 遥感产品真实性检验与误差溯源

3.1 真实性检验

真实性检验是评估遥感产品质量的重要途径,通过将像元尺度真实值与待检产品进行对比来说明产品的总体误差大小(晋锐 等, 2017; 肖青 等, 2025)。在实际遥感观测中像元尺度真值很难获取,只能是最佳逼近。因此,完整的检验流程一般包括真实性检验场地遴选、样点优化采样、高精度地面实测、时空尺度转换及检验结果评价(闻建光 等, 2023a)(图3)。目的是获取不确定性最小的像元尺度参考真值以真实反映遥感产品自身的不确定性。

然而,受地表空间异质性、尺度效应的影响,像元尺度参考真值获取都会引入误差。理论上均质地表的尺度效应可以忽略,地面参考真值的不确定性主要由自身观测误差决定(Brown 等, 2020)。对于非均质地表,时空异质性及尺度效应带来的样点代表性误差是像元尺度参考真值不确定性的主要来源。地面原位观测所得到的测量值是有限观测时段和观测范围内的“真值”,将其扩展到更加广泛的时间和空间尺度上时,则存在较大的代表性误差(李新, 2013)。解决地面实测与待检产品时空尺度不匹配的方法是通过升尺度模型进行尺度转换,包括经验模型、物理模型及混合模型。但模型自身的适用性、经验系数的不确定性以及各种假设条件引起的误差通过尺度转换过程传递给参考真值,同样增加了检验结果的不确定性(郝大磊 等, 2018)。特别是使用基于数据驱

动和物理驱动相结合的尺度转换方法时(Ge 等, 2019),各变量的误差在复杂建模过程中相互影响,计算结果的不确定性难以量化。对此,吴小丹等(2025)初步建立像元尺度参考真值不确定性度量模型,完善了基于最小不确定性像元参考真值的真实性检验体系。当像元尺度参考真值的不确定性小于规定阈值时,可以认为真实性检验结果真实反映了遥感产品自身的误差(闻建光 等, 2023a)。

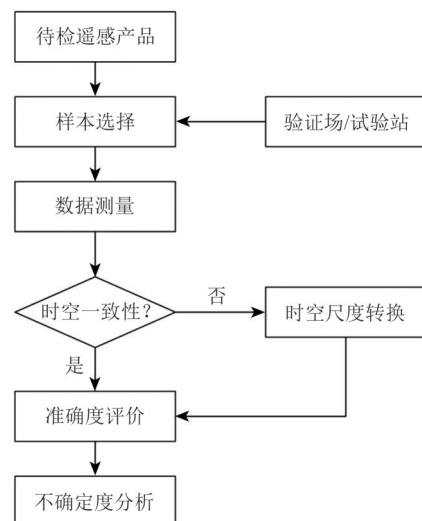


图3 真实性检验流程(国家市场监督管理总局和
国家标准化管理委员会, 2018)

Fig. 3 The process of remote sensing product validation
(Quoted from Administration for Market Regulation,
Standardization Administration of the People's
Republic of China)

3.2 误差溯源

误差溯源是指根据测量结果的总体误差回溯引起这一误差的各项来源及大小。为了规定溯源到何种程度为止,国内外通常引入计量的概念,这为误差溯源提供了一致和可靠的参考基准。采用一致和可靠的各类检定与校准的计量器具,由原始准确度最高的参考基准与各级计量标准共同构成了层次分明的量值传递与溯源体系。依据JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2012),量值传递是指对测量仪器的检定或校准活动,以保证测量所得量值的准确一致。量值溯源,国际上统称计量溯源性,是测量结果的属性。其要求任何一个计量结果都应当能够通过连续的比较链,最终溯源到计量基准或原始标准(钱政 等, 2022)。2018年,

国际计量局 BIPM (Bureau International des Poids et Mesures)、国际法制计量组织 OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale)、国际实验室认可合作组织 ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) 和国际标准化组织 ISO (International Organization for Standardization) 共同发布的声明中明确计量溯源性是通过规定的连续校准链将测量结果与参考对象联系起来的测量结果的特性,且校准链中的每项均会引入测量不确定度 (<https://www.nim.ac.cn/node/1534> [2024-10-24])。为了保证测量结果的一致性和可比性,国际单位制 (SI) 是理想的参考对象 (NPL QA4EO Team, 2010),越接近参考对象,测量结果的不确定度越小。

计量溯源的整体框架是以一条完整的不间断的证据链为核心,基于不确定度评定方法实现被测量误差溯源的目的,其误差传递链路的构建与不确定度估算紧密相联。参考 JJF 1854—2020《标准物质计量溯源性的建立、评估与表达计量技术规范》(国家市场监督管理总局, 2020) 规定的计量溯源性的建立程序,开展测量过程的不确定度估算主要包括 5 个步骤: (1) 测量模型的建立; (2) 参照对象及量值溯源工具的选择; (3) 校准; (4) 测量准确度确认; (5) 测量不确定度评估。最后依据不确定度评定结果对明显影响被测量不确定性的分量进行溯源。

遥感产品从生产到检验经历了辐射定标、几何纠正、遥感反演、真实性检验等系列过程,其中产品生产过程中的累积误差与像元尺度参考真值获取时的不确定性都会影响遥感产品的检验精度。面向遥感产品生产与检验中的误差溯源,关键是确定各环节的误差来源和大小,解析其误差传递机制,并基于误差传递模型进行溯源。溯源的意义一方面使遥感产品具有一致性和可比性,另一方面也为促进算法改进、提升产品质量提供了重要参考。

4 误差溯源的基本方法

无论是遥感产品还是真实性检验误差溯源的关键问题都是如何定位产品生产过程和真实性检验真值获取中各项误差来源并量化其大小。不少学者从误差来源分析入手,通过全局/局部敏感性分析、蒙特卡洛方法 (Zeng 等, 2022; 马瀚青 等,

2022; Kim 等, 2023) 获取目标参量的主要影响因素及其所占权重。在这个分析过程中,当反演模型可以显式表达为函数关系时,模型偏导量化了各项变量引起的不确定性,由此直接得到了各误差的分布情况 (Zhang 等, 2022)。敏感性分析对研究引起遥感产品和真实性检验真值误差的主要因素效果显著,定量分析了各因素敏感程度分布情况,但无法对全流程的误差进行分析。综合计量溯源和动态误差分解与溯源的思想,当前误差追溯主要包括以下 3 种基本方法。

4.1 基于不确定度溯源方法

遥感产品和真实性检验真值误差溯源本质上与计量溯源流程相类似,其核心是通过不确定度估算构建误差回溯证据链以实现被测量误差溯源的目的。

地球观测数据质量保证框架 (QA4EO) 中定义溯源为通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链,使测量结果的值能够与规定的参考标准 (通常是与国家测量标准或国际测量标准) 联系起来的过 程 (Woolliams 等, 2014)。

4.1.1 确定被测量和测量模型

遥感产品输出量值由输入参数经复杂的处理过程得到,理想情况下这一过程可以借助明确可解析的测量模型表达。但实际上由原始输入影像获取到定量遥感产品反演经历了多层级的非线性数据处理,产生了多个新的测量值和测量模型,逐级嵌套的生产流程难以表达成一个完整的数学模型。建立遥感产品生产全流程误差溯源链路,需要考虑各环节输入量和输出量间的关联关系,并厘清前后序产品的层级关系,确定最终待反演参数的模型表达。

4.1.2 用图表形式描述误差传递过程,构建溯源链路

无论测量模型是否可以显式表达,都难以仅通过解析表达式反映各项误差之间的传递关系。以树状图、流程图等图表的形式构建全流程溯源链路,将生产过程中影响产品质量的因素可视化表达,实现不确定性信息回溯 (Velychko 和 Gordiyenko, 2023)。依据图表展示的回溯关系,根据测量不确定度评定方法计算所有影响遥感产品质量因素的不确定度,并引入敏感度系数分析

各项误差源对总体结果的影响大小。

4.1.3 遥感产品误差合成不确定度定量表达

定量遥感产品一般是从遥感观测数据提取的陆表特征参数，其反演关键是明确输入量与待求

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)} \quad (6)$$

式中， $u_c(y)$ 表示被测量的合成标准不确定度， y 表示被测量的估计值， x_i 表示第*i*个输入量的估计值， $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 表示被测量与有关的输入量之间的函数对于输入量 x_i 的偏导数， $u(x_i)$ 表示输入量的标准不确定度， $r(x_i, x_j)$ 表示输入量 x_i 与 x_j 的相关系数， $u(x_i, x_j)$ 表示输入量 x_i 与 x_j 的协方差。

当各输入量均不相关时，相关系数为0，被测量估计值的合成标准不确定度计算公式为

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (7)$$

式中， $u_c(y)$ 表示被测量的合成标准不确定度， y 表示被测量的估计值， x_i 表示第*i*个输入量的估计值， $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 表示被测量与有关的输入量之间的函数对于输入量 x_i 的偏导数， $u(x_i)$ 表示输入量的标准不确定度。偏微分项 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 也称敏感度系数，反映了每一分量对待求解参量的影响大小。然而，对于遥感产品生产全流程而言，除模型算法外，数据输入会相应地引入测量不确定性，且各因素之间相互影响，生产流程难以通过一个明确的模型表示。为了分析其结果的不确定性，对于方程隐式的问题，蒙特卡洛方法（Ramnath, 2022）也是评价不确定性的有效手段。根据一系列模拟值得到被测量的分布情况，从而研究测量结果的误差特性。

不确定度估算方法被广泛应用于建立可溯源的辐射基准，为辐射定标、传感器校准奠定了基础（Shea等，2020；Pagano等，2020）。对于遥感产品误差溯源而言，基于不确定度溯源的方法自上而下构建了一条完整的、由统一的参考基准到遥感产品反演值的误差传递链路。借助树状图、处理流程图、计量溯源图等形式全面分析测量模型的每一项误差来源并计算其不确定性，然后根据测量不确定度合成方法得到被测量总的不确定

解参数的函数关系。对于模型已知的情况，可以通过解析表达式及不确定度传播规律将被测量的不确定度表达为合成标准不确定度的形式。计算公式如下（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会，2018）：

性大小，并利用表格的形式记录与存储（NPL QA4EO Team, 2025）。将这些误差来源及其不确定性信息以质量文件的形式同遥感数据产品发布，可以实现遥感产品不确定性溯源。虽然目前这方面的相关研究还较少，但这种基于不确定度溯源的方法可以为解决遥感产品误差溯源的问题提供一种思路。

4.2 误差分解及反演方法

遥感产品生产过程复杂，各环节难免引入误差。同时，产品生产各环节层层嵌套、相互作用，难以从中确定单一环节引起的误差大小。因此，遥感产品误差溯源的关键难点就是如何解决产品生产过程中误差耦合的问题。下面从深度学习神经网络、仿真模拟、误差传播公式3个方面寻找这一问题的突破口。

4.2.1 神经网络误差建模

遥感产品生产过程中的不确定性的传递很难通过显式表达，对于这种复杂问题，深度学习神经网络表现出独特的优势。以总体误差为输入，产品生产过程中的单项误差为输出，建立大样本的训练模型，从而解析其中的误差传递机制。目前，这种溯源方法在机械制造动态误差追踪中应用较为成熟（Li等，2018；吕向阳，2021；Zhang等，2024）。

4.2.2 仿真模拟误差建模

计算机仿真技术通过建立数学和物理模型，对真实系统进行模拟，追踪至系统运行的各个环节，为研究系统特性提供了便利。通过模拟将类似“黑箱”的生产过程可视化，并同步每一个生产环节，分析其误差来源和大小，从而实现生产过程的误差可追溯性。以数字孪生方法为例，通过模拟产品的加工过程，建立模拟值、实际值以及各环节所产生偏差之间的映射关系，从而实现

生产误差在线溯源分析 (门松辰 等, 2023; 孙军伟, 2019)。

4.2.3 误差传播建模

如第2部分所述, 误差按性质分为系统误差和随机误差。因此, 可以将总体误差简单分解为这两部分并依据误差传播理论分别确定两类误差的大小, 进而对产品的不确定性特征进行分析 (Salminen 等, 2018)。将系统误差和随机误差进一步细化, 通过敏感度分析确定影响最终结果质量的主要误差来源, 并基于这些单项误差建立误差传递模型 (Muttilba 等, 2017; Tang 等, 2019)。其中, 模型的建立可以通过回归、方差分析等方法实现 (De Vis 等, 2022; Zhang 等, 2022)。

综上, 通过误差分解与反演方法实现误差溯源就是将整体误差分解为几个单项误差, 从而直接得到待求误差分量的大小。这种方法基于检验结果的整体误差构建逆向的误差回溯模型, 以此得到遥感产品误差来源及其大小。但该方法针对已知的主要误差来源进行分析, 不能全面反映生产过程中的各项误差。

4.3 算法测评及真实性检验综合方法

任何一个目标参量的误差来源可概括为两个方面, 反演或估算目标参量的算法 (包括算法本

身、反演策略以及支持反演的先验知识), 以及用于遥感产品反演或估算的输入数据。真实性检验虽然量化了遥感产品的准确度和不确定性, 但由算法和输入数据各自引起的误差大小不得而知。在真实性检验基础上, 引入算法测评是解决这一问题的突破口。算法测评是指基于一套高精度的样本数据对算法性能进行评估, 因而它是对算法自身准确度和不确定度的刻画, 算法误差得以量化。输入数据来源于遥感产品体系中目标参量的上一级参量, 通过真实性检验可以同时获取输入数据和目标参量的误差。综合算法测评和真实性检验建立遥感产品误差传递模型, 核心是寻找算法误差、输入误差与遥感产品误差之间的定量关系并逐级传递, 直至追溯到统一的参考基准。基于高分专项真实性检验与算法测评子系统建设任务, 闻建光等 (2023b) 初步提出耦合算法测评和真实性检验实现遥感产品误差回溯的构想, 对后续误差溯源研究具有重要的启示意义。

无论是基于不确定度溯源方法、误差分解与反演方法还是算法测评和真实性检验综合方法, 溯源的核心目的都是准确获取主要误差来源及大小。3种方法从不同角度为解决这一问题提供了思路, 表1列出了它们各自的特点与局限性。

表1 误差溯源基本方法
Table 1 Basic methods of error traceability

方法	特点	局限性
基于不确定度溯源方法	自上而下构建一条完整的、由统一的参考基准到遥感产品反演值的误差传递链路, 并获取各环节的不确定度信息	围绕不确定度进行误差溯源, 忽略了产品的准确度信息
误差分解与反演方法	针对误差耦合的问题, 将整体误差分解为几个单项误差, 从而直接得到待求误差分量的大小	主要误差来源已知, 不能全面反映生产过程中的各项误差
算法测评和真实性检验综合方法	分离算法误差、输入误差与遥感产品误差并寻找它们之间的定量关系, 从而实现误差追溯	存在上下级关系的情况下, 经检验的输入数据误差与遥感产品误差存在一定的差别

5 误差溯源应用

5.1 真实性检验参考真值误差溯源

地面观测是评估遥感产品质量好坏的重要数据来源, 无论是将地面原位观测还是尺度转换后的参考真值与遥感产品像元值进行比较, 获取到的地面参考真值本身具有很大的不确定性 (吴小丹 等, 2024)。为了保证测量数据的准确、可靠,

基于不确定度的溯源方法普遍应用于地面测量参考真值误差溯源中。Bialek 等 (2020) 通过对海色原位辐射参考测量过程建立不确定度估算, 量化了测量过程中由测量仪器、自然环境及测量模型引起的误差, 保证了海色产品验证中观测误差的可追溯性。国际对地观测委员会建立的辐射校准网络 (RadCalNet) 以溯源为目的, 发展了一套可追溯至 SI 的大气层顶反射率参考数据集。野外观

测数据作为输入参数，与对应的大气参数组合估算其不确定性，并通过查找表（Wenny和Thome，2022）方法传播到大气层顶反射率（TOA），然后通过蒙特卡洛模拟计算得到TOA的不确定性并记录下来，由此得到可追溯至SI的反射率参考数据集（Bouvet等，2019）。基于不确定度溯源方法，全球基准参考测量FRM（Fiducial Reference Measurement）也建立了一套可溯源的海面温度和地表温度长期观测数据集，其测量不确定性与统一的测量基准相联系，为地表温度产品提供地面参考真值FRM4STS（Fiducial Reference Measurements for Satellite Derived Surface Temperature Products）。这些实践活动通过建立地面测量参考真值溯源至国际单位制（SI）的测量程序，保证了地面测量参考真值误差可追溯，对卫星遥感产品的验证具有重要意义。

受地表空间异质性的影响，地面观测通常不能直接作为像元尺度参考真值与卫星产品进行比较，需要考虑尺度差异的问题。无论是单个站点、多个站点还是多尺度验证数据获取的像元真值都具有很大的不确定性。基于误差分解方法，Wu等（2019）对几种典型的真实性检验方法计算的像元尺度参考真值的不确定性进行溯源，并基于数值模拟对不同因素（如观测误差、空间异质性、尺度转换误差、几何匹配误差等）在真实性检验过程中引起的不确定性进行建模，在研究误差传递规律的基础上构建了刻画像元尺度参考真值总的不确定性的定量化模型（Wu等，2023）。这一定量关系明确了各误差源在参考真值获取过程中所占权重，使得检验过程的误差传播机制更加清晰。

5.2 辐射定标产品误差溯源

回溯遥感产品误差来源，对指导产品算法改进、提高产品质量具有重要意义。辐亮度和辐照度是遥感卫星具有计量特性的直接观测量，高精度的辐射定标是准确获取遥感产品的前提。地球观测质量保证框架发布的相关文件中，强调了基于量值传递方程和不确定度估算的溯源框架，这为建立可追溯至SI的辐射校准提供了重要保障（Gröbner等，2024；Werfeli等，2024）。基于不确定度的溯源方法以在轨定标系统误差传递链路为

核心，基于可溯源的辐射基准分析误差传递过程，并对其他遥感卫星进行标定，从而提高了在轨定标的精度（马灵玲等，2023）。国际上，由ESA、NASA先后提出的SI可追溯卫星（也称定标星）也是采用这种方法以为其他卫星提供高精度的校准参考（Fox等，2016；Shea等，2020）。结合质量标识信息，基于不确定度溯源的方法有力保障了后续定标过程中的误差追溯。同时，误差溯源方法在辐射定标产品中的应用也对后续更高级别的遥感产品误差溯源研究具有重要的借鉴意义。

5.3 遥感产品误差溯源

构建一条完整的误差传递链路是实现遥感产品误差溯源的关键。遥感产品生产通常涉及一种或多种前序产品，厘清前序输入到遥感产品之间的误差传递关系是追溯遥感产品误差来源和大小的前提条件。基于不确定度溯源方法为遥感产品误差溯源提供了一个初步的溯源框架（图4）。该框架围绕遥感产品反演模型，系统分析相关不确定性来源，并通过不确定性树图进行可视化表达。基于不确定度传播公式或蒙特卡洛模拟方法，量化各误差源的不确定度大小及其合成不确定度，从而获得不确定性溯源结果。针对这一框架，不少学者开展了溯源研究工作。Ma等（2020）为了建立完整的由卫星影像到地表反射率产品的溯源链路，基于不确定度表示指南（GUM）首先分析了从数字高程模型和辐亮度数据到地形校正后辐亮度的不确定性传递过程。地形校正算法中输入影像及算法参数的不确定性特征被量化，这为进一步实现地表反射率产品溯源奠定了基础。De Vis等（2022）基于蒙特卡洛模拟分析了海色反演过程中大气校正算法不确定性至地表反射率不确定性的传递关系，确定了模型参数引起的地表反射率相对误差大小。Popp和Mittaz（2022）通过建立不确定性传递关系，量化了气溶胶光学厚度反演过程中由输入和辅助数据引入的不确定性。Cui等（2019）通过仿真模拟建立了总初级生产力（GPP）的溯源框架，分析了由净初级生产力、地上生物量及叶面积指数在模拟过程中引起的不确定性和相对权重。综上，基于不确定度溯源方法在实现遥感产品误差追溯方面初见成效，围绕误

差传递链路如何进一步回溯遥感产品误差来源和大小将是未来研究的重点及难点。

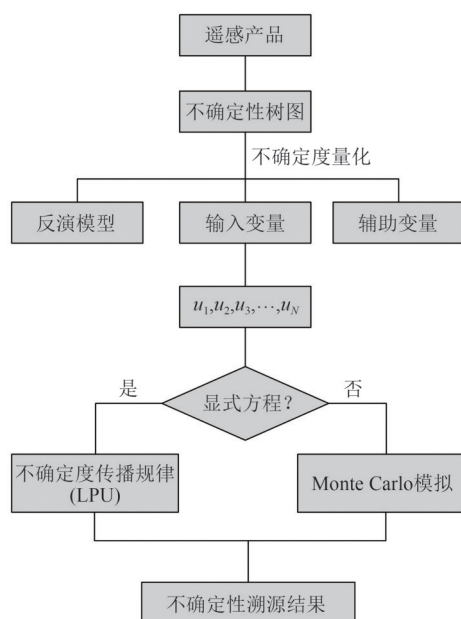


图4 基于不确定度溯源框架

Fig. 4 Uncertainty-based traceability framework for remote sensing products

6 结论

定量遥感产品促进了遥感数据在国民经济和社会发展中的广泛应用。提高遥感产品的可靠性是突破遥感产品应用瓶颈的关键。遥感产品生产与检验中的误差溯源与提高遥感产品质量紧密关联。溯源结果一方面有助于获取不确定性最小的像元尺度参考真值，从而准确反映遥感产品自身误差。另一方面通过控制产品生产与检验中的误差来源及其大小可为产品优化提供指导。面向遥感产品生产与检验中的误差溯源，关键是确定各环节的误差来源和大小，解析其误差传递机制。本文聚焦于遥感产品生产与检验中的误差溯源问题，重点介绍了基于不确定度溯源、误差分解与反演、综合算法测评和真实性检验3种误差溯源的基本方法及其典型应用，为后续遥感产品生产与检验中的误差追溯提供理论支持。

当前，遥感产品生产与检验中的误差溯源是国际前沿，误差溯源仍任重道远。

(1) 如何构建全链路误差传递模型。完整的误差传递链路是回溯遥感产品生产与检验过程中误差来源与大小的前提条件。基于产品结果构建

溯源模型的误差分解与定位实际上是采取逆向思维，将遥感产品整体误差分解为影响程度较大的单项误差，从而得到误差分量的大小。这种方法确定了影响遥感产品质量的主要误差来源，但不能全面反映遥感产品生产过程中的各项误差。

(2) 发展同时考虑准确度与不确定度的溯源方法。不确定度误差溯源方法通过构建可追溯至国际单位制(SI)的溯源证据链保证了遥感产品的不确定性可追溯性。然而，不确定度是对测量值离散程度的表征，忽略了产品像元值或地面测量值与真值的接近程度。因此，完整的溯源信息应综合考虑遥感产品的准确度与不确定度。

(3) 综合算法测评和真实性检验实现误差溯源实践研究。算法性能和输入数据好坏是影响遥感产品质量的主要因素。算法测评结果的误差很好地表征了算法自身的不确定性。真实性检验通过将待检产品与参考值进行对比，给出了产品输入数据的误差大小。由此，针对产品输入和反演算法两大误差源，通过耦合算法测评和真实性检验构建误差回溯模型，有望实现定量遥感产品生产过程中误差来源定位及大小分析。

(4) 建立可溯源的质量标识。产品质量标识是溯源结果呈现形式，满足可追溯性的要求，应当全面反映输入数据、处理环节以及检验过程引起的不确定性。当前遥感产品的质量标识是对产品总体情况的定性评价(梁顺林, 2021)，缺少逐像元误差信息，无法对各部分引起的误差进行追溯，建立满足可溯源的质量标识体系是遥感产品高质量发展的必然要求。

参考文献(References)

- 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)
- Bialek A, Douglas S, Kuusk J, Ansko I, Vabson V, Vendt R and Casal T. 2020. Example of Monte Carlo method uncertainty evaluation for above-water ocean colour radiometry. Remote Sensing, 12(5): 780 [DOI: 10.3390/rs12050780]
- Bouvet M, Thome K, Berthelot B, Bialek A, Czapla-Myers J, Fox N P, Goryl P, Henry P, Ma L L, Marcq S, Meygret A, Wenny B N and Woolliams E R. 2019. RadCalNet: a radiometric calibration net-

- work for earth observing imagers operating in the visible to short-wave infrared spectral range. *Remote Sensing*, 11(20): 2401 [DOI: 10.3390/rs11202401]
- Brown L A, Meier C, Morris H, Pastor-Guzman J, Bai G, Lerebourg C, Gobron N, Lanconelli C, Clerici M and Dash J. 2020. Evaluation of global leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation products over North America using Copernicus Ground Based Observations for Validation data. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111935 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111935]
- Cui E Q, Huang K, Arain M A, Fisher J B, Huntzinger D N, Ito A, Luo Y Q, Jain A K, Mao J F, Michalak A M, Niu S L, Parazoo N C, Peng C H, Peng S S, Poulter B, Ricciuto D M, Schaefer K M, Schwalm C R, Shi X Y, Tian H Q, Wang W L, Wang J S, Wei Y X, Yan E R, Yan L M, Zeng N, Zhu Q A and Xia J Y. 2019. Vegetation functional properties determine uncertainty of simulated ecosystem productivity: a traceability analysis in the East Asian monsoon region. *Global Biogeochemical Cycles*, 33(6): 668-689 [DOI: 10.1029/2018GB005909]
- De Vis P, Mélin F, Hunt S E, Morrone R, Sinclair M and Bell B. 2022. Ancillary data uncertainties within the SeaDAS uncertainty budget for ocean colour retrievals. *Remote Sensing*, 14(3): 497 [DOI: 10.3390/rs14030497]
- Fang H L. 2020. Development and validation of satellite Leaf Area Index (LAI) products in China. *Remote Sensing Technology and Application*, 35(5): 990-1003 (方红亮. 2020. 我国叶面积指数卫星遥感产品生产及验证. *遥感技术与应用*, 35(5): 990-1003) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.5.0990]
- Fox N P, Green P D, Winkler R, Lobb D and Friend J. 2016. Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial- and Helio- Studies (TRUTHS): establishing a climate and calibration observatory in space//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE: 1939-1942 [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729499]
- Ge Y, Jin Y, Stein A, Chen Y H, Wang J H, Wang J F, Cheng Q M, Bai H X, Liu M X and Atkinson P M. 2019. Principles and methods of scaling geospatial Earth science data. *Earth-Science Reviews*, 197: 102897 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102897]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2012. JJF 1001-2011 General terms in metrology and their definitions. Beijing: Standards Press of China (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2012. JJF 1001-2011 通用计量术语及定义. 北京: 中国标准出版社)
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2018. GB/T 27418-2017 Guide to the evaluation and expression of uncertainty in measurement. Beijing: Standards Press of China (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 2018. GB/T 27418-2017 测量不确定度评定和表示. 北京: 中国标准出版社)
- Gilerson A, Herrera-Estrella E, Foster R, Agagliate J, Hu C M, Ibrahim A and Franz B. 2022. Determining the primary sources of uncertainty in retrieval of marine remote sensing reflectance from satellite ocean color sensors. *Frontiers in Remote Sensing*, 3: 857530 [DOI: 10.3389/frsen.2022.857530]
- Gröbner J, Thomann C, Reda I, Turner D D, Feierabend M, Monte C, McComisky A and Reiniger M. 2024. Traceability of surface long-wave irradiance measurements to SI using the IRIS radiometers. *AIP Conference Proceedings*, 2988: 070001 [DOI: 10.1063/5.0183304]
- Group on Earth Observations. 2010. A Quality Assurance Framework for Earth Observation: Principles[EB/OL]. https://qa4eo.org/docs/QA4EO_Principles_v4.0.pdf
- Guilloteau C, Foufoula-Georgiou E, Kirstetter P, Tan J and Huffman G J. 2022. How well do multisatellite products capture the space-time dynamics of precipitation? Part II: building an error model through spectral system identification. *Journal of Hydrometeorology*, 23(9): 1383-1399 [DOI: 10.1175/JHM-D-22-0041.1]
- Hao D L, Xiao Q, Wen J G, You D Q, Wu X D, Lin X W and Wu S B. 2018. Advances in upscaling methods of quantitative remote sensing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(3): 408-423 (郝大磊, 肖青, 闻建光, 游冬琴, 吴小丹, 林兴稳, 吴胜标. 2018. 定量遥感升尺度转换方法研究进展. *遥感学报*, 22(3): 408-423) [DOI: 10.11834/jrs.20187070]
- 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]
- Kim H, Crow W T, Wagner W, Li X J and Lakshmi V. 2023. A Bayesian machine learning method to explain the error characteristics of global-scale soil moisture products. *Remote Sensing of Environment*, 296: 113718 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113718]
- Li X. 2014. Characterization, controlling, and reduction of uncertainties in the modeling and observation of land-surface systems. *Science China Earth Sciences*, 57(1): 80-87 (李新. 2013. 陆地表层系统模拟和观测的不确定性及其控制. *中国科学: 地球科学*, 43(11): 1735-1742) [DOI: 10.1007/s11430-013-4728-9]
- Li Y, Zhao J and Ji S J. 2018. Thermal positioning error modeling of machine tools using a bat algorithm-based back propagation neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5): 2575-2586 [DOI: 10.1007/s00170-018-1978-x]
- Liang S L. 2021. Some thoughts on the development of quantitative remote sensing in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9): 1889-1895 (梁顺林. 2021. 中国定量遥感发展的一些思考. *遥感学报*, 25(9): 1889-1895) [DOI: 10.11834/jrs.20211516]
- Liao C J, Zhao J, Xing J, Wen J G and Liu Q H. 2023. Research on classification of GF satellite data application products and construction of common product system. *National Remote Sensing*

- Bulletin, 27(3): 563-572 (廖楚江, 赵坚, 邢进, 闻建光, 柳钦火). 2023. 高分卫星数据应用产品分级与共性产品体系构建研究. 遥感学报, 27(3): 563-572 [DOI: 10.11834/jrs.20232593]
- 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 (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 [DOI: 10.11834/jrs.20232531]
- Liu Q H, Xin X Z, Tang P, Liao J J and Wu B F. 2010. Quantitative Remote Sensing Models, Applications, and Uncertainty Research. Beijing: Science Press: 1-6 (柳钦火, 辛晓洲, 唐嫔, 廖静娟, 吴炳方). 2010. 定量遥感模型、应用及不确定性研究. 北京: 科学出版社: 1-6)
- Lü X Y. 2021. Coupled Typical Error Inversion of Optical Remote Sensing Imaging Link. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (吕向阳). 2021. 光学遥感成像链路耦合典型误差反演. 南京: 南京航空航天大学)
- Ma H Q, Zhang K, Ma C F, Wu X D, Wang C, Zheng Y, Zhu G F, Yuan W P and Li X. 2022. Research progress on parameter sensitivity analysis in ecological and hydrological models of remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 26(2): 286-298 (马瀚青, 张琨, 马春峰, 吴小丹, 王琛, 郑艺, 朱高峰, 袁文平, 李新). 2022. 参数敏感性分析在遥感及生态水文模型中的研究进展. 遥感学报, 26(2): 286-298 [DOI: 10.11834/jrs.20219089]
- Ma L L, Wang N, Gao C X, Zhao Y G, Yang B Y, Wang X H, Han Q J, Xu N, Song P L and Liu Y K. 2023. On-orbit absolute radiometric calibration for optical remote sensing satellites: progress and trends. National Remote Sensing Bulletin, 27(5): 1061-1087 (马灵玲, 王宁, 高彩霞, 赵永光, 杨本永, 王新鸿, 韩启金, 徐娜, 宋培兰, 刘耀开). 2023. 光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势. 遥感学报, 27(5): 1061-1087 [DOI: 10.11834/jrs.20222117]
- Ma Z N, Jia G R, Schaepman M E and Zhao H J. 2020. Uncertainty analysis for topographic correction of hyperspectral remote sensing images. Remote Sensing, 12(4): 705 [DOI: 10.3390/rs12040705]
- Men S C, Zhou G H, Zhang C, Chang F T and Zou Y C. 2023. Assembly error modeling and traceability analysis method based on digital twin. Journal of Xi'an Jiaotong University, 57(1): 175-184 (门松辰, 周光辉, 张超, 常丰田, 邹永成). 2023. 基于数字孪生的装配误差建模与溯源分析方法. 西安交通大学学报, 57(1): 175-184 [DOI: 10.7652/xjtubxb202301017]
- Mutilba U, Gomez-Acedo E, Kortaberria G, Olarra A and Yagüe-Fabra J A. 2017. Traceability of on-machine tool measurement: a review. Sensors, 17(7): 1605 [DOI: 10.3390/s17071605]
- NPL QA4EO Team. 2025. General Guidance on A Metrological Approach to Fundamental Data Records (FDR), Thematic Data Products (TDP) and Fiducial Reference Measurements (FRM) - Uncertainty Analysis Process[EB/OL]. The Quality Assurance Framework for Earth Observation (QA4EO). https://qa4eo.org/docs/3_Process_Document.pdf
- Pagano T S, Aumann H H, Broberg S E, Cañas C, Manning E M, Overoye K O and Wilson R C. 2020. SI-traceability and measurement uncertainty of the atmospheric infrared sounder version 5 level 1B radiances. Remote Sensing, 12(8): 1338 [DOI: 10.3390/rs12081338]
- Popp T and Mittaz J. 2022. Systematic propagation of AVHRR AOD uncertainties—A case study to demonstrate the FIDUCEO approach. Remote Sensing, 14(4): 875 [DOI: 10.3390/rs14040875]
- Qian Z, Wang Z Y, Qu Y F, Li C and Li Q B. 2022. Error Theory and Data Processing. 2nd ed. Beijing: Science Press: 14-19 (钱政, 王中宇, 屈玉福, 李成, 李庆波). 2022. 误差理论与数据处理. 2版. 北京: 科学出版社: 14-19)
- Ramnath V. 2022. Monte Carlo simulations in uncertainty evaluation for partial differential equations//Aswal D K, Yadav S, Takatsuji T, Rachakonda P and Kumar H, eds. Handbook of Metrology and Applications. Singapore: Springer: 1-23 [DOI: 10.1007/978-981-19-1550-5_124-1]
- Salminen M, Pulliainen J, Metsämäki S, Ikonen J, Heinilä K and Luojus K. 2018. Determination of uncertainty characteristics for the satellite data-based estimation of fractional snow cover. Remote Sensing of Environment, 212: 103-113 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.038]
- Shea Y, Fleming G, Kopp G, Lukashin C, Pilewski P, Smith P, Thome K, Wielicki B, Liu X and Wu W. 2020. Clarreo Pathfinder: mission overview and current status//IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE: 3286-3289 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323176]
- Siddiqi A, Baber S, de Weck O and Durell C. 2020. Error and uncertainty in earth observation value chains//IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE: 3158-3161 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323463]
- State Administration for Market Regulation. 2020. JJF 1854-2020 Metrological technical specification for establishment, evaluation and expression for metrological traceability of reference materials. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局). 2020. JJF 1854-2020 标准物质计量溯源性的建立、评估与表达计量技术规范. 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. 2022. GB/T 41280-2022 Specifications for fractional vegetation cover product from satellite remote sensing imagery. 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). 2022. GB/T 41280-2022 卫星遥感影像植被覆盖度产品规范. 北京: 中

- 国家标准出版社)
- Sun J W. 2019. Research on Error Traceability Method Based on Virtual Manufacturing Principle. Chongqing: Chongqing University of Technology (孙军伟. 2019. 基于虚拟制造原理的误差溯源方法研究. 重庆: 重庆理工大学)
- Tang H, Li C P, Zhang Z L and Ko T J. 2019. A novel geometric error modeling optimization approach based on error sensitivity analysis for multi-axis precise motion system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(7): 3435-3444 [DOI: 10.1007/s12206-019-0638-x]
- Velychko O and Gordiyenko T. 2023. Mathematical modelling of metrological traceability chains. *Ukrainian Metrological Journal*, (1): 4-8 [DOI: 10.24027/2306-7039.1.2023.282453]
- Wang D D, Liang S L, Zhang Y, Gao X Y, Brown M G L and Jia A L. 2020. A New Set of MODIS Land Products (MCD18): downward shortwave radiation and photosynthetically active radiation. *Remote Sensing*, 12(1): 168 [DOI: 10.3390/rs12010168]
- Wen J G, Liu Q H, Li Z Y, Li X, Liu S M, Xiao Q, Gao Z H, Ma M G, Che T, Liu L Y, Fang H L, Yan G J, Ge Y, Chen E X, Zhang Y, Ma L L, Wu X D and Chen X. 2023a. A review of the development of remote sensing field experiments and product validation in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 573-583 (闻建光, 柳钦火, 李增元, 李新, 刘绍民, 肖青, 高志海, 马明国, 车涛, 刘良云, 方红亮, 阎广建, 葛咏, 陈尔学, 张勇, 马灵玲, 吴小丹, 陈曦. 2023a. 中国遥感实验与真实性检验的发展思考. 遥感学报, 27(3): 573-583) [DOI: 10.11834/jrs.20232673]
- 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. 2023b. Technology system for product validation and algorithm test of GF common products and an application example. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 780-789 (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. 2023b. 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]
- Wenny B N and Thome K. 2022. Look-up table approach for uncertainty determination for operational vicarious calibration of earth imaging sensors. *Applied Optics*, 61(6): 1357-1368 [DOI: 10.1364/AO.442170]
- Werfeli M, Hueni A, Ganeva D, Ghielmetti G and Mihai L. 2024. Uncertainty budget for a traceable operational radiometric calibration of field spectroradiometers, calibration of the heliosphere. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 400-410 [DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3329769]
- Woolliams E, Hueni A and Gorroño J. 2014. Intermediate uncertainty analysis for Earth Observation (Instrument Calibration Module): training course textbook. National Physical Laboratory [DOI: 10.5167/uzh-98386]
- Wu M, Zhang M D, Li P P and Zhang Y J. 2023. Research on provenance model for multi-source remote sensing images. *Journal of Geo-Information Science*, 25(7): 1325-1335 (吴敏, 张明达, 李盼盼, 张勇健. 2023. 面向多源遥感影像数据的溯源模型研究. 地球信息科学学报, 25(7): 1325-1335) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2023.230085]
- Wu X D, Wen J G, Tang R Q, Wang J P, Zeng Q C, Li Z, You D Q, Lin X W, Gong B C and Xiao Q. 2023. Quantification of the uncertainty in multiscale validation of coarse-resolution satellite albedo products: a study based on airborne CASI data. *Remote Sensing of Environment*, 287: 113465 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113465]
- Wu X D, Wen J G, Xiao Q, Lin X W, You D Q, Yin G F and Liu Q H. 2025. Theory and method of ground observation on satellite pixel scales-taking numerical land surface parameters as an example. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(5), 1227-1244 (吴小丹, 闻建光, 肖青, 林兴稳, 游冬琴, 尹高飞, 柳钦火. 2025. 面向公里级遥感像元的地面观测理论与方法——以数值型陆表参数为例. 遥感学报, 29(5), 1227-1244) [DOI: 10.11834/jrs.20244296]
- 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.earscirev.2019.102875]
- Xiao Q, Wu X D, Wen J G, Bian Z J, Lin X W, You D Q and Yin G F. 2025. Thoughts on the global validation of remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1739-1753 (肖青, 吴小丹, 闻建光, 卞尊健, 林兴稳, 游冬琴, 尹高飞. 2025. 全局性遥感真实性检验的思考. 遥感学报, 29(6): 1739-1753) [DOI: 10.11834/jrs.20254466]
- 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 (in Chinese)*, 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]
- Yu J F, Xin X Z, Zhang H L, Li L, Gong L F and Liu Q H. 2014. Quality control and quality assessment of photosynthetically active radiation remote sensing products. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 18(2): 390-404 (于江丰, 辛晓洲, 张海龙, 李丽, 龚力峰, 柳钦火. 2014. 光合有效辐射遥感产品质量控制与评价. 遥感学报, 18(2): 390-404) [DOI: 10.11834/jrs.20143111]
- Zeng J Y, Shi P F, Chen K S, Ma H L, Bi H Y and Cui C Y. 2022. Assessment and error analysis of satellite soil moisture products over the third pole. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4405418 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3116078]
- Zhang C J, Liu H L, Zhou Q L and Wang Y L. 2024. A support vector regression-based method for modeling geometric errors in CNC machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(5): 2691-2705 [DOI: 10.1007/s00170-023-12212-4]
- Zhang M W, Ibrahim A, Franz B A, Ahmad Z and Sayer A M. 2022. Estimating pixel-level uncertainty in ocean color retrievals from MODIS. *Optics Express*, 30(17): 31415-31438 [DOI: 10.1364/OE.460735]

- 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 (in Chinese)*, 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]
- Zhao S F, Hu L, Cao Z P, Wang M and Yue P. 2023. Leveraging data provenance for remote sensing data product quality problem tracing and analysis. *Science of Surveying and Mapping*, 48(1): 269-276 (赵帅锋, 胡磊, 曹志鹏, 王密, 乐鹏. 2023. 利用数据溯源的遥感产品质量问题追溯与分析. *测绘科学*, 48(1): 269-276) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2023.01.028]
- Zhou J, Liang S L, Cheng J, Wang Y J and Ma J. 2019. The GLASS land surface temperature product. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(2): 493-507 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2870130]

Error traceability in remote sensing product production and validation : Methods and applications

LI Ziwei^{1,2}, WEN Jianguang^{1,2}, XIAO Qing^{1,2}, YOU Dongqin¹, TANG Yong¹, WU Xiaodan³,
LIN Xingwen⁴, PIAO Sen¹, ZHAO Na¹, LI Ququ^{1,2}

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, National Engineering Research Center for Satellite Remote Sensing Applications, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
4. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

Abstract: Remote sensing products are crucial for Earth resource monitoring, environmental governance, and climate change research. With the continuous enhancement of the product production and service system, high-quality remote sensing products need to be developed. The quality of remote sensing products is inherently influenced by multisource errors originating from sensor performance limitations, radiometric calibration, atmospheric correction, geometric distortions, and retrieval uncertainties. The errors introduced at each stage are cumulatively propagated, leading to substantial uncertainty in the quality of the derived remote sensing products. Although the validation method offers quantitative assessment, it cannot reflect the specific sources and magnitudes of errors in detail. The guidance documents provided by the Quality Assurance Framework for Earth Observation particularly emphasize that data and derived products must be associated with an indicator of quality that is traceable to reference standards (preferably the International System of Units [SI]) to ensure the reliability and consistency of these products. This traceability framework enables quantitative interproduct comparisons and objectively characterizes accuracy disparities.

This study focuses on error traceability in remote sensing product production and validation. Errors originate from two distinct sources: intrinsic product errors and measurement uncertainties associated with ground reference data. The study commences with a detailed description of the origins of these errors in both components. Subsequently, it elucidates the fundamental concepts of validation and error traceability, highlighting the importance of establishing SI-traceable propagation chains. Three main methods of error traceability in remote sensing product production and validation, namely, uncertainty estimation, error decomposition, and combining algorithm test and validation, are also summarized. The core objective is to accurately determine the sources and magnitudes of errors at each stage of product production and validation. Typical applications of these methods are illustrated through case studies, which provide a foundation for analyzing error propagation mechanisms and developing error propagation models. The conclusions and prospects for the future development of error traceability are also summarized.

Understanding the law of error propagation and establishing a comprehensive error transmission chain are crucial issues to be addressed in error traceability research. They are vital for algorithm improvement and product quality enhancement. Currently, the study on error traceability in remote sensing products remains at its infancy, with few existing investigations in this area. Moreover, developing traceable quality indicator systems that fully reflect uncertainties arising from input data, processing, and validation procedures is an essential component of error traceability. These indicators serve as a vital means of presenting traceability results. Producers and users are concerned about the quality of remote sensing products. The findings of this study provide theoretical and technological support for the further advancement of remote sensing product production and validation. However, how to further address the key issues of error traceability in the future, particularly in terms of constructing a whole-process error propagation model and developing a traceability method that considers accuracy and uncertainty, remains a critical area that requires in-depth investigation.

Key words: remote sensing product, error, uncertainty, validation, error traceability

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB3905804)