

全局性遥感真实性检验的思考

肖青¹, 吴小丹², 闻建光¹, 卞尊健¹, 林兴稳³, 游冬琴¹, 尹高飞²

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;

2. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756;

3. 浙江师范大学 地理与环境科学学院, 金华 321004

摘要: 真实性检验问题、反演问题和尺度问题并列为定量遥感3大科学问题。真实性检验是反映和揭示遥感算法和产品误差的重要基础, 也是遥感产品质量不断改进的重要保障。经过近40年的发展, 真实性检验的方法和手段也日益丰富和多样化。从传统的基于统计学的比对分析, 到基于物理模型的仿真验证, 真实性检验技术已经形成了一套完整的体系。这些技术的泛化应用也为定量遥感研究提供了更加丰富的数据支持和验证手段, 已经成为定量遥感发展的一大助力。经过多年的技术积累与发展, 真实性检验内涵与外延均已远超简单的比对和评价, 逐渐向一个全面、系统的过程发展, 深入到遥感数据获取、遥感辐射定标、模型算法、产品生产等多个环节。各种与地理相关的宏观与微观应用的深入拓展, 客观上推动了业界从遥感科学与技术学科层面, 系统性地全局分析遥感信息不确定性出现、转移或者转化规律, 耦合时代技术条件与优势, 不断迭代提升空间观测能力。业界当前已经具备从卫星成像、数据标定、模型算法验证、遥感数据产品检验、应用效果评价, 乃至于遥感辐射传输理论与对地观测方法等全方位检验的能力。但是遥感信息具备时间、空间、光谱和事件的多维度特性, 如何通过全局性的遥感真实性检验方法, 系统性地提升遥感空间观测能力, 尚需要系统性重新梳理真实性检验的内涵、方法体系和产出, 亦需要形成学科内和跨学科交叉合作的工作机制。本文对真实性检验的概念和内涵进行了新的阐释, 对主要阶段真实性检验的内涵、方法与技术发展现状进行了分析和总结, 剖析了目前真实性检验亟需突破的关键难题。最后, 本文对真实性检验发展的具体思路和发展方向进行了展望。

关键词: 遥感, 全局性真实性检验, 像元参考真值, 不确定性, 误差溯源

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 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

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[DOI:10.11834/jrs.20254466]

1 引言

遥感数据产品的生产是一个复杂且多步骤的过程(Wu等, 2019), 其质量和效率受到卫星数据定标能力、生产算法模型的鲁棒性、模型输入的可靠性、前序产品质量的精度、生产的快捷性、一致性和精度之间的取舍等诸多因素限制。遥感数据产品最终是为应用服务的, 而其质量问题直接影响到应用的效果和可靠性。遥感数据产品是后续分析、建模和决策的基础, 如果数据存在误差、不完整或不一致性问题, 那么基于这些数

据得出的结论和决策就可能产生偏差, 甚至误导。这种情况下, 对遥感数据产品质量的严格要求就显得尤为重要(柳钦火等, 2023)。

由于技术、材料、成本等多方面的限制, 卫星载荷实际制造出的载荷性能与设计指标存在偏差; 卫星在发射过程中会经历剧烈的振动和冲击, 这些物理作用可能对载荷的结构和性能造成损害; 如果卫星封装设计不合理或环境隔离措施不到位, 极端的高温或低温可能导致载荷内部的电子元件失效或性能下降; 卫星的姿态和轨道控制对载荷的观测效果和数据质量也有重要影响。诸多因素

收稿日期: 2024-10-17; 预印本: 2025-02-18

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2023YFB3905804)

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

通信作者简介: 吴小丹, 研究方向为定量遥感真实性检验及不确定性分析。E-mail: wuxd@my.swjtu.edu.cn

综合导致遥感初级产品的辐射精度和稳定性,依赖于载荷内定标能力以及外场定标的频次与水平。内定标系统精度受传感器内部元件老化、环境变化等因素的影响,会逐渐降低。外场定标可对载荷开展综合校准,频次越高,越能够及时发现并纠正卫星数据的辐射精度偏差,从而确保数据的长期稳定性。然而,高频次的外场定标也会增加成本和复杂度。外场定标的水平还取决于定标场地的选择、测量设备的精度以及定标方法的科学性等因素。

算法模型的鲁棒性是指算法在输入数据存在噪声、异常值或不完全符合模型假设的情况下,仍能保持输出结果的稳定性和可靠性的能力,算法模型的鲁棒性直接关系到产品质量的稳定性和一致性。模型输入数据的准确性和完整性将直接影响产品的质量。输入的类型包括模型的系数、辐射定标后的卫星数据、大气等配套参数,高级产品还需要前序产品。

随着遥感技术的快速发展,数据量也越来越大。遥感数据产品的生产是效率、稳定性和精度的综合考量。为了快速响应需求,生产者可能会选择使用更简单、计算量更小的标准化的处理流程和算法模型,更保守的处理策略,这虽然能更快地产生结果,但可能在细节处理上不如更复杂的模型精细,从而导致精度下降。

遥感产品的应用目前也存在诸多问题。首先是对遥感数据产品的认识不足,遥感产品有着较强的空间、时间、波段和多角度等诸多属性,其数值是通过地表参数与该像元的辐射值的相关性计算得到的。因此很多参数产品本质上和生态环境等专业传统的定义不完全一致,如水体透明度、土壤湿度等。遥感产品诸多属性中,最关键的还是空间属性,一个遥感像元代表的是一定覆盖面积内的统计相关量,覆盖面积有时达到公里级。很多应用场景直接将卫星数据产品与地面传统点或者小样地采样的结果去对比,势必会出现较大的偏离。

综上所述,遥感产品的质量确实不仅仅受限于产品生产能力,还受卫星平台与传感器的稳定性、定标精度、算法模型、产品生产水平和应用能力等多个环节的综合影响,应用的效果也受限于使用者对产品的理解和使用策略。

对遥感产品质量的关注促进了真实性检验技

术的发展。遥感产品应用得越广泛,真实性检验工作开展得也越充分。MODIS传感器在1999年发射成功后,美国国家航空航天局(NASA)专门成立了MODIS陆地产品(MODLAND)真实性检验小组,对MODIS发展的各种全球陆地数据产品进行系统的真实性检验(Morisette等,2002)。基于真实性检验结果的反馈、迭代和算法优化、MODIS产品的质量不断得到提升,至今已经迭代6次,成为目前真实性检验最充分,也是应用最广泛的遥感数据产品。

近年来,国内非常重视遥感数据产品真实性检验能力的发展。早在李小文院士主持的国家重点基础研究发展计划(973计划)中,就针对真实性检验开展了研究,并提出了“一检两恰”的真实性检验方法(张仁华等,2010)。在黑河遥感试验中多尺度观测方法和遥感产品真实性检验方面取得了突破,通过观测方法创新,实现分布式、多尺度嵌套的星机地一体化观测;发展了单点、足迹尺度观测的采样和尺度上推方法,将地面观测与遥感像元以及模型模拟格网的尺度匹配起来,实现了像元/格网尺度真值估计,突破了它们之间空间尺度不匹配的瓶颈(李新等,2023;Liu等,2016,2018;Wu等,2023;Li等,2024)。在理论与实践的双重驱动下,真实性检验标准规范建设有了显著的进步和发展,建设发布了真实性检验通则(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2018,2020),制定了地表发射率(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2023f)、积雪面积(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2023c)、土地覆被(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2023b)、气溶胶光学厚度(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2023a)、地表温度(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2023d)、植被覆盖度(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2022c)、光合有效辐射(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2022b)、反照率(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2022a)、土壤水分(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2021d)、植被指数(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2021c)、叶面积指数(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员

会, 2021b)、地表蒸散发(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2021a)遥感产品真实性检验系列国家标准。此外, 在高分辨率对地观测系统重大专项项目的支持下, 高分共性产品真实性检验团体标准也正在不断地更新和完善。自2018年开始, 中国先后启动了国家民用空间基础设施陆地卫星真实性检验场网和高分卫星真实性检验站网建设(高海亮等, 2023; 闻建光等, 2023a), 具备了卫星遥感共性产品验证的能力。随着对数据共享重视程度的日益加深, 真实性检验系统平台的建设也在不断地优化和完善(Lin等, 2018; 闻建光等, 2023b), 旨在将高质量观测数据和像元“真值”入库, 积极推动数据共享。

从遥感科学与技术发展的角度来看, 仅仅对遥感数据产品进行质量评价是远远不够的。从定量遥感产生的过程来分析, 成像探测—辐射建模—定量反演—真实性检验—产品应用是一个有机联系的整体, 这些重要环节的误差评价和溯源都需要真实性检验作为重要的技术手段。针对成像传感器, 需要开展辐射和几何定标精度的检验, 以明确传感器的能力。针对遥感模型和反演方法, 需要开展算法检验以确定算法精度。针对遥感产品, 需要开展遥感产品真实性检验以明确产品的准确性和精度。一直到末端, 利用遥感产品进行应用后, 应开展应用效果的检验。不同阶段真实性检验的概念、内涵、检验内容和检测方法都具有差异性, 不能将其混为一谈, 即不能用设备标定的思想来检验地表共性产品, 也不能用产品的检验方法来简单分析应用中遇到的不确定性问题。定量遥感的真实性检验, 需要针对遥感数据从产生、处理、产品生成和应用全生命周期, 有针对性地开展。需要基于检验结果进行系统性、全局性的分析, 深入探究数据产生、处理、产品生成以及应用方法中不确定性产生和传递的过程, 并耦合时代技术条件, 探讨各个环节可能改善的空间, 并采取相应的措施来优化和改进, 以促进对地观测理论、定量遥感反演方法与技术, 以及合理高效应用的迭代发展。这些不同阶段, 真实性关注的对象、检验的内容和采用的方式方法都不相同。需要从真实性检验的概念和内涵, 各阶段检验的内容和方法层面, 系统性地梳理, 并分别提出相应的策略。

2 全局性真实性检验的内涵

2.1 真实性检验的内涵

深入理解真实性检验的内涵首先需要回答两个基本问题:

(1) 真实性检验的检验对象是什么? 对模型和算法的适应性和精度进行的评估是否也是真实性检验? 广义来讲, 真实性检验包括初级数据产品的检验、模型算法的检验、遥感产品的检验和遥感应用效果的检验几个阶段。狭义上, 真实性检验指的是对遥感数据及产品开展的质量评估过程。当前对算法的适应性和稳定性进行的评估可以一般称作算法测评, 而对遥感数据产品开展质量评估的过程称为真实性检验。

(2) 真实性检验的参考真值是什么? 无论是广义还是狭义的真实性检验, 都包括了待检验的对象和衡量待检验对象客观程度的参考真值。理想情况下, 这个参考值应该是评估对象的绝对真值。实际条件下, 由于仪器本身的精度限制和测量过程的随机因素的影响, 绝对真值很难获取, 只能获取无限接近绝对真值的相对真值。参考真值从不同阶段来说, 可以是太空或者地面某目标的真实辐射亮度值, 可以是某参数的地面或近地面的观测值, 还可以是已知准确性和精度的遥感产品或是模式产品。一个基本的要求是参考值本身的准确性要远大于待检验的对象。Akitsu 和 Nasahara (2022) 在验证陆地生态产品时指出将参考真值的精度阈值定义为遥感产品精度阈值的1/4。

当前针对遥感产品的真实性检验工作把地面观测或者近地面观测(如有人机或者无人机观测)作为参考值来评价遥感产品的准确性和不确定性。理论上, 越接近目标的观测越准确。然而, 由于观测的方法、尺度、以及地表异质性, 地面观测在遥感像元尺度上的误差可能更大(Bailey 和 Werdell, 2006; Hooker 和 Maritorena, 2000)。如果遥感产品质量足够好, 甚至可作为参考值来评价地面观测数据的质量, 如Naethe等(2024)认为Sentinel-2的TOC的反射率标准化做得好且在全球尺度上质量相对一致, 基于该数据对全球10个地面站点原位观测的一致性进行了验证。这些案例模糊了真实性检验的真值的含义。

尺度差异的存在使地面观测并不能直接作为像元尺度参考真值(李新, 2013)。因此, 真实性检验不是地面观测数据和遥感像元之间的简单对比, 需要在地面观测数据的基础上获取与待验证遥感像元空间位置、尺度、属性完全一致的参考真值后对遥感产品进行质量评估。空间上的一致性和时间上的稳定性并不能全面反映遥感产品的质量, 遥感产品的准确性和精度是遥感产品质量的重要指示因子。准确性和精度需要在真值的基础上进行量化。真值是一个真实地存在的物理量, 但受限于测量能力往往获取不到。真实性检验应该是在一系列不确定性约束和控制的基础上获取准确性尽可能高、不确定性尽可能小的像元参考真值后开展的遥感产品的质量评估。要实现此目标, 需要发展完善的真实性理论和方法。

已有的真实性检验工作主要关注遥感产品与地面参考真值的一致性和差异性, 以此评估遥感产品的准确性和精度。然而, 随着遥感技术的不断进步和应用需求的多样化, 真实性检验中的“真值”概念已经超越了传统遥感最终产品的相对参考范畴, 而是逐渐渗透到遥感数据产品生产的每一个环节。“真值”不再仅仅是一个静态的、单一的参考标准, 而是成为了一个动态的、多维度的概念。它贯穿于遥感数据产品生产的每一个环节, 包括数据采集、预处理、算法应用、产品生成等, 为每一个环节提供质量分析和控制的依据。

2.2 全局性遥感真实性检验

定量遥感的真实性检验是一个复杂且系统的过程, 它贯穿于遥感初级数据产品处理、模型算法、产品生产到应用的全生命周期。在不同阶段, 真实性检验的方法相类似, 均是将被检验对象与一个参考真值相比较, 但是关注对象、检验内容有所不同。

2.2.1 遥感初级数据产品的检验

这个阶段真实性检验主要关注数据的完整性及与观测目标的一致性。检验内容包括数据的辐射标定精度、几何校正定位精度等, 也就是数据生产部门地面标定和检校结果的评价。检测方法主要采用比对分析、统计检验等。

参考真值是观测目标真实的辐射亮度值, 它可以通过多种方式来获取, 如选择月球或外太空,

或为地表的均质目标。对于地面目标反射或发射的辐射亮度值, 由于大气层的影响, 需要经过大气辐射传输计算来反推到传感器入瞳位置的辐射强度。这个过程需要精确的大气参数和辐射传输模型来支持。由于检验的目标是传感器观测辐射能量的精度、灵敏度、信噪比和长期稳定性等, 而非被观测目标的属性参数, 只要保证定标源的质量, 即能保证检验的精度, 且可以通过多目标多频次的累计叠加得到优化, 客观性得到增强。

2.2.2 算法模型的检验

算法的开发者对算法都会开展验证工作, 但是限于数据条件, 一般验证的较为简略。而产品生产涉及到更广阔的区域和更复杂的地表条件, 因此, 对算法的检验可以认为是验证的深入。

在此阶段检验关注的是算法的有效性和稳定性, 以及算法在不同条件下的适用性。检验内容: 包括算法的输出结果是否与真实情况相符, 算法在不同输入条件下的表现如何, 以及算法的鲁棒性、精度和不确定性等。检测方法主要采用仿真实验、敏感性分析、交叉验证等方法, 通过模拟不同的输入条件来评估算法的性能, 并确定算法的适用范围和局限性。

算法适应性指的是模型在面对不同环境和条件下, 仍能保持其反演精度和可靠性的能力。在遥感领域, 由于地物分布和属性的差异性, 以及电磁波在复杂环境中的传输过程, 模型的适应性面临着严峻的挑战。高分辨率遥感数据的出现, 使得地物分布的刻画更加复杂, 属性差异更加明显, 这进一步加剧了模型适应性的难度。算法稳定性是模型检验的另一个核心要素。稳定性指的是模型在不同时间、不同条件下, 其输出结果的一致性和可重复性。在遥感反演中, 由于目标物反射和辐射电磁波的能力会受到多种因素的影响, 如天气、季节、观测角度等, 因此模型的稳定性也面临着很大的挑战。如果模型在这些因素变化时输出结果波动较大, 那么其在实际应用中的可靠性就会大打折扣。

为了检验模型的适应性和稳定性, 需要一套完备的数据集。这套数据集包括模型算法的输入和输出等全部数据, 并且这些输入和输出数据需要满足样本空间分布的合理性要求。因此, 需要确保数据集的多样性、代表性和均衡性, 以充分

反映实际环境中可能遇到的各种情况。此外，类似于人工智能算法，遥感反演模型的验证也需要大量的样本。样本的丰富性和质量直接影响到模型算法的鲁棒性。如果样本数量不足或者质量不高，那么模型在面对新数据时就可能表现出较差的泛化能力。因此，在收集样本时，我们需要尽可能覆盖更多的地物类型和分布情况，以确保模型的全面性和准确性。

此外，需要建立完善的算法评测体系，包括仿真实验、敏感性分析、交叉验证等方法。针对不同类型的算法和应用场景，制定相应的评测标准和指标，确保算法的有效性和稳定性（闻建光等，2023b）。

2.2.3 遥感数据产品检验

遥感反演产品的准确性和精度无疑是定量遥感领域关注的核心对象。真实性检验在此阶段关注产品的综合质量和可用性，包括产品的精度、稳定性等。检验内容包括与地面参考真值的偏差等，以及产品是否符合特定的应用需求和标准。检测方法主要采用地面真值测量、与其他高精度数据源的比对、产品内部的一致性检验等方法，确保产品能够满足实际应用的需求。

为了确保遥感反演产品的质量和可靠性，需要进行一系列的产品精度检验工作。对地观测产品之间的相互比较和交叉验证可以提供它们之间一致性的信息。但是，要量化遥感的准确性还需要利用独立手段获取真值对其进行评估（Brown等，2020）。在测量仪器进行严格定标和测量过程尽量规范的前提下，地面观测由于观测直接，被认为是最准确的观测方式（Wu等，2023；Xu等，2021）。基于地面观测数据开展遥感产品的真实性检验也被认为是量化遥感产品准确性的必要手段（Brown等，2020；Barnes等，2019）。

除了产品准确性和精度的检验外，还需要进行产品稳定性的检验。GCOS（2016）将遥感产品质量的稳定性定义为在十年时间尺度上测量的遥感产品的系统误差的最大可接受变化。稳定性是确保遥感反演产品能够长期、稳定地提供可靠信息的重要基础。产品稳定性的检验主要包括以下几个方面：时间序列分析，通过对遥感反演产品在时间序列上的变化进行分析，可以评估其稳定性。如果产品在时间序列上表现出较大的波动或

不一致性，那么可能需要对算法或模型进行进一步的优化和改进；与其他数据源对比，将遥感反演产品与其他数据源（如气象观测数据、卫星遥感数据等）进行对比，以进一步评估其稳定性。这有助于了解产品在不同时间和空间尺度上的表现，从而采取相应的措施进行校正和改进。

遥感产品的检验结果与检验方法及参考数据有关，但是不同于定标，检验的结果也与目标有关。同一个模型算法，针对同一种地物，亦会因地物自身的空间分布和三维结构而产生差异，导致检验结果的差异，且这种差异是由于地物自身属性的差异化导致的，带有强烈的局地属性，不会因为多点的综合检验而降低。

2.2.4 数据产品应用检验

在此阶段真实性检验关注的是遥感产品是否适合用户的需求（Fang等，2019a）。检验内容包括产品的实际应用效果、用户反馈、产品在特定应用场景下的性能等。检测方法通过应用效果评估、用户调查、与其他方法的比较等方法来进行（Randerson等，2009），确保产品能够在实际应用中发挥预期的作用。

遥感专题产品是基于遥感技术，针对特定应用领域（如环境监测、资源调查、灾害预警等）开发的专题数据产品。它们通常具有特定的物理或生态意义，并能够为相关领域的决策和规划提供科学依据。这一阶段的检验内容包括产品的实际应用效果、用户反馈、产品在特定应用场景下的性能等。通过与地面实测数据、其他来源的专题产品或应用效果进行对比，验证遥感应用专题产品的准确性。评估遥感应用专题产品在实际应用中的表现，包括其能否准确反映地表特征、满足用户需求以及在实际应用中的适用性。可以选择其他来源的专题产品作为真值参考，如地面实测数据、高分辨率遥感数据等。通过与这些专题产品的对比，可以评估遥感应用专题产品的精度和可靠性。也可以将遥感应用专题产品的应用效果作为真值参考。例如，在环境监测领域，可以通过评估遥感应用专题产品在监测环境污染、生态变化等方面的效果，来验证其准确性和可靠性。在可能的情况下，进行实地验证以评估遥感应用专题产品的实际应用效果。这可以通过实地考察、现场观测等方式进行。应用的检验还需要关注产

品在特定的空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率和辐射分辨率下是否满足地球科学的应用需求,需要定性和定量相结合地综合多个方面进行的综合考量。

当遥感数据产品表现不佳时,用户往往会直接归咎于数据产品的生成过程,而较少考虑到卫星平台和载荷设计的潜在问题,或者对地观测理论本身的局限性。有些卫星及载荷设计过于依赖传统惯例或工程化思维,而未能充分满足实际应用的具体需求,开展有针对性地优化设计工作。开展应用效果检验,通过实际应用场景中的数据表现来评估卫星与载荷设计的合理性。根据检验结果,为卫星和载荷的调整和优化设计提供参考。

3 真实性检验的新思考

前期的研究中,针对初级数据产品处理、生产模型算法评测、产品生成和应用,均发展了真实性检验技术和方法,但是未能打通这些环节,彼此之间只是简单固化的输入和输出关系,未能发掘各个阶段不确定性的关联性和继承关系,这种固化的模式忽略了各个环节之间的内在联系和相互影响,往往只能针对单个环节进行检验,而无法从整体上系统性地解决问题。仅仅“评价”遥感产品的准确性和不确定性是远远不够的。真实性检验的终极目标是进一步提高遥感产品的质量,增强遥感产品应用的准确性和提升其应用价值。因此,亟须改变当前重评价、轻质量追溯的现状,而需要从“评价过程”走向“解释过程”。相应地,真实性检验的定义和内涵也需要不断深化。

真实性检验结果只能反映遥感数据/产品的“终端”误差,并不能指示误差的来源和起因,真实性检验与遥感产品的质量提升之间尚有鸿沟需要跨越。在高准确性、高精度的像元尺度参考真值获取的基础上,遥感产品的误差和不确定性可以定量评估和刻画。然而,要跨越真实性检验和遥感产品质量再提升的鸿沟,还需要在这两项工作的基础上反向对遥感产品的误差进行溯源,实现遥感产品误差的精准定位,并发展有效的质量控制和提升方法,最终实现遥感产品质量的再提升。因此,真实性检验的定义、内涵和范畴需要重新定义和阐释。遥感产品真实性检验是一个系统性工程,以像元尺度参考真值获取为核心,以

评估遥感产品质量和追溯遥感产品误差为目标,进而实施有效的质量控制,实现遥感产品质量的再提升,提升遥感数据产品的服务能力,促进中国遥感卫星应用落地,为生态、环境、资源的保护,社会经济建设,可持续发展研究提供更有利、更全面的数据支撑和服务(图1)。

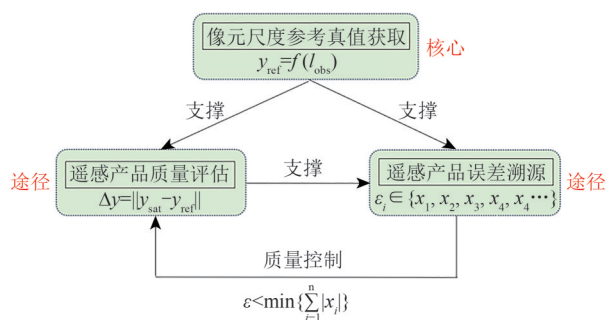


图1 真实性检验的新内涵

Fig.1 The new intension of validation of remote sensing products

像元尺度参考真值作为衡量遥感产品是否准确的“尺子”,其准确与否直接关系着验证结果的可靠性。如何尽可能准确地获取像元尺度参考真值是真实性检验的关键科学问题。这需要发展像元尺度参考真值获取的理论方法和技术体系,使像元尺度参考真值的获取更科学化、规范化,真正服务于遥感数据产品的质量评估、误差溯源、质量控制及进一步推进定量遥感的发展和进步。

获取像元尺度参考真值后,理论上就可以对遥感产品进行质量评估,定量分析其误差。然而,由于遥感产品的准确性和精度通常在空间和时间上表现出显著的变异性,特定地点和时间段的质量评估结果往往不足以全面反映遥感产品的整体准确性和不确定性。理想情况下,遥感产品的质量评估应逐像元进行,并为每个像元提供不确定性(Fang等,2019a)。然而,由于地面观测的成本限制,逐像元的质量评估难以实现。因此,如何逐像元进行评估以全面反映遥感产品的准确性和不确定性,成为真实性检验中的另一个关键问题。

遥感产品误差量化后,还需要在像元尺度参考真值的基础上对遥感产品的误差开展全链路的系统分析,明确遥感数据产品生产全链路过程中的问题和限制因素,进而实施有效的质量控制、提升遥感数据产品的精度和稳定性。然而,遥感

数据产品生产的链路非常复杂，涉及卫星观测数据的质量、数据预处理、前序产品和辅助数据的质量，反演算法，产品后处理等各个环节。如何量化各个环节对遥感产品误差的贡献以及各个环节的误差传递方程，从而厘清遥感数据产品误差传递链路，是真实性检验的另一关键问题。

真实性检验包含的3个关键部分相辅相成：像元尺度参考真值的获取支撑了遥感产品的质量评估和遥感产品的误差溯源；遥感产品质量的全面评估和全链路的误差溯源也为像元尺度参考真值获取提出了基本要求（如空间上的典型性和代表性、时间上的周期性）；遥感产品的质量评价结果支撑遥感产品的误差溯源；遥感产品的误差溯源结果可支撑遥感数据产品生产过程中的有效质量控制，但控制的有效性还需要开展遥感产品的质量评价以进行证实。这3个关键部分构成了完整的真实性检验理论框架，实现遥感数据产品质量的综合评估和质量回溯及提升，有利于满足中国基于遥感数据产品开展资源、环境和生态精确监测的科技需求。

CEOS的陆地产品真实性检验LPV工作小组将真实性检验工作划分为4个阶段，4个阶段的逐级定义主要围绕真实性检验开展的时空范围，检验结果指标的完善性，检验的自动化和实时化。然而，对参考真值本身的准确程度以及随之引起的检验结果的不确定性并没有充分地重视。由于真实性检验中参考值的来源不同、质量不同、地表异质性不同、参考值的计算方法，真实性检验结果之间不具有可比性（Concha等，2021；Buman等，2022），一方面降低了真实性检验结果的可信度，另一方面也降低了真实性检验这一理论和技术的公众认可度。

随着对参考真值不确定性的关注，越来越多的学者开始致力于构建标准化、一致性好、不确定性小的参考数据集的构建（Naethe等，2024；Wu等，2023；Akitsu和Nasahara，2022；Buman等，2022；Origo等，2020；Nightingale等，2019；Bouvet等，2019）。CEOS在2019年进一步提出了CARD4L概念定义了标准化真实性检验处理流程，ESA进一步提出了“基准参考测量（FRM）”概念，目前已形成FRM观测计划和网络。方红亮等（2021）进一步提出了建设中国陆表遥感产品真实性检验基准参考站网的思路。LPV小组定义的真实性检

验的4个阶段只是时空尺度和验证范畴的扩张，并没有针对像元参考真值。在真实性检验内涵进一步深化的基础上，真实性检验的等级也需要进行进一步扩展。真实性检验的第5个阶段可定义为空间和时间连续性好的像元参考真值获取阶段，且参考真值的准确性和不确定性有量化的表达，并根据不确定性大小将参考真值数据集进行分级。例如，可以将基准站观测获取的参考真值赋予最优级别。这个阶段在一定程度上不仅仅只服务于真实性检验，还服务于陆表参数像元尺度全样本集的构建。可以预想真实性检验的第6个阶段，是在像元参考真值获取和遥感数据产品质量评估的基础上，开展遥感误差溯源，支持数据产品生产能力的提升，以及定量遥感观测能力系统性的提升。

4 真实性检验发展问题

从模型算法验证和遥感数据产品验证两个方面探讨一下所面临的问题及其可能的解决办法。

4.1 机理模型的检验

4.1.1 机理模型的发展现状

遥感辐射传输建模研究发展迅速，目前研究呈现出以下几个特征：从均质场景到复杂场景；从结构统计数据到三维精细特征；从地表建模到地表一大气耦合建模；从单波段到多波段建模；时空谱角联合模型。

均质场景到复杂场景：随着定量遥感的发展，辐射传输建模的研究重心逐渐从均质植被地表转向异质性复杂地表。例如，考虑更多的植被结构特征（Bian等，2018），考虑地形的影响（Wen等，2022）。随着建模从均质到异质的转变，有助于提升地表物理过程的刻画能力，但需要更多的结构数据测量工作。

从结构统计数据到三维精细特征：随着遥感数据空间分辨率不断提高，对地表环境监测的能力增强了，推动遥感辐射传输机理模型也向着三维精细化方向发展。例如，Liu等（2023）基于真实森林场景的辐射传输模拟，发现随着采样比例的增加，模型精度提升。Martin等（2024）研究表明了冠层顶部叶片的分布方式以及叶片透过率等特征对辐射传输模拟的重要性。Zhao等（2023）

通过模型分析了精细结构在植物病虫害方向的应用潜力。精细化辐射传输建模工作需要更精细的结构和光谱测量工作作为支撑。

从地表建模到地表—大气耦合建模：卫星观测受到大气与地表的共同影响，近年来建模工作已从单独建模地表建模，发展为地表和大气辐射传输协同建模（Verhoef 和 Bach, 2007）。例如，Yang 等（2020）提出了一种用于土壤—植物—大气系统的辐射传输模型，该模型旨在模拟传感器观测到的冠层顶和大气层顶的反射率，可以从大气层顶反射率中直接反演植被属性。Shi 等（2022）提出了一种基于四流近似理论并考虑地形因素的模型，其考虑了地表—大气影响，实现了大气层顶的模拟。当前的辐射传输建模研究不仅需要地面的参数测量，还需要大气参数的测量。

从单波段到多波段建模：辐射传输建模正逐渐从单波段向多波段融合发展。例如，Fan 等（2024）将可见光、近红外波段的辐射传输模型扩展至热红外波段，成功模拟了山区温度的各向异性。Zeng 等（2020）则基于光谱不变理论，从可见光波段延伸至荧光波段，构建了相应的植被辐射传输模型。此外，Van der Tol 等（2009）提出的 SCOPE 模型，将多波段融合在一起，从辐射传输与能量平衡的角度，将冠层顶的可见光至红外波段（0.4—50 μm ）的辐射光谱与水、热量和植被生理生化联系起来。多波段辐射传输研究可以更好研究能量收支过程，但需要多个谱段的观测和测量同步开展。

时空谱角联合模型：有时候单一维度的遥感观测信息难以支撑地表反演的需要，发展时空谱角多维度联合模型可以有效提升遥感反演的精度。Zhang 和 Dietze（2023）采用多源遥感卫星观测，采用贝叶斯反演框架进行了 PROSAIL 模型中的植被参数反演，得到更为可靠的时间序列反演结果。Bian 等（2024）通过地表温度日尺度变化模型以及角度效应模型，实现了地表温度的时角变化特征的准确模拟。Liu 等（2020）通过空间以及时间信息的耦合，有效地提高了组分温度反演的精度。相比于单一数据源、单个维度特征，多源数据协同提升了反演的健壮性，促进了面向多个维度辐射传输模型的发展，其也需要多个特征的同步测量数据。

4.1.2 机理模型真实性检验存在的问题

机理模型的验证目前存在的问题概括为以下几个方面：

（1）可靠的验证数据量不足：当前辐射传输模型的验证数据极为匮乏，主要受限于经济和人力成本，导致实验数量有限。现有的数据大多仅针对特定地表类型，无法充分满足模型验证的需求。此外，随着辐射传输模型的发展，地表异质性参数和大气参数等的缺失进一步限制了模型的发展与验证，影响了模型在多样性场景下的适用性。

（2）验证的异质性强：目前的观测工作往往聚焦于特定任务，难以实现多角度和多时相的协调观测。基于地面或近地面的多角度观测常常假设观测目标在时间上保持不变，而长期观测站通常固定观测条件，忽视了观测—太阳几何带来的影响。这些测量的预先假设增加了测量的不确定性，虽然协同实验可作为解决方案，但其实施所需的人力和物力投入显著增加，形成新的挑战。

（3）测量成本与精度的权衡：随着辐射传输模型的细化，验证过程中对观测的精度要求也随之提高。然而，成本限制迫使研究者需进行适当的权衡。例如，多飞机同步进行多角度观测可以显著减少时间影响，但伴随而来的成本增加及观测之间的校正需求又为后续验证引入了新的不确定性。精度与成本之间的权衡策略尚未得到充分研究，这为辐射传输模型的验证带来了新的问题。

（4）缺乏有效规范：现有的测量工作多为特定任务设定，缺乏统一且有效的测量及数据处理规范。这使得费时费力获得的测量数据难以被其他研究者所利用，降低了数据的共享性和应用价值，从而制约了辐射传输模型验证的进展。

多尺度观测显著提高了观测数据的可用性。单一尺度的观测常受限于方法，导致在采样角度、范围或观测时间上存在明显不足。近年来，借助无人机进行观测的方法能够在不同分辨率下高精度地获取数据，成功实现了成本与精度之间的理想平衡。多设备协同观测：通过结合光学和热红外传感器进行多设备协同观测，可以有效获取更多信息，从而提升数据的应用价值。多传感器协同观测的方法能够提供更全面的视角，支持多波段辐射传输模型的发展，为深入理解辐射传输过

程提供强有力的支持。

遥感试验场的数字孪生体发展为模型验证开辟了全新的方向（肖青 等，2023）。当实测数据难以满足具体的模型验证要求时，三维模型可以作为重要的样本生成工具。基于真实辐射传输过程的三维模型，能够更准确地模拟不同条件下的辐射传输情境。这种数字化再现不仅保留了真实场景的特征，还可以深入模拟复杂情况下的辐射传输过程，例如一天中不同时间、植被生长阶段以及各种气候条件下的变化。这使得数字孪生技术成为辐射传输模型验证的重要未来发展方向，有助于提高模型的准确性和实用性。

4.2 遥感数据产品的检验

目前遥感产品在真实性检验结果存在较大的不确定性，检验过程的不确定性确定是关键。不确定性的存在降低了真实性检验结果的准确性和可信度，也是目前真实性检验面临的重要挑战之一。真实性检验结果的不确定性分析是一个基于过程的分析，来源于地面观测、尺度转换、真值生成和比对分析等全链路，而非对于某一特定模型的不确定分析。关于真实性检验中不确定性的研究还未系统开展，亟须研究真实性检验中每一部分不确定性的定量表达和各种不确定性引起的误差之间的传播模型。

遥感产品真实性检验由平坦均质地表逐步向异质性地表发展。围绕像元尺度参考真值的获取已发展了从场地选择、异质性评价、站点布设、地面观测再到尺度转换系列方法。真实性检验实践方面目前已经构建了从任务规划—质量控制—数据汇聚—算法测评/真实性检验—共性分发—一站式服务能力真实性检验平台。但尚有一些难题亟待解决。

4.2.1 不确定性的量化和不确定性的约束与控制

真实性检验中像元尺度参考真值常作为衡量遥感产品是否准确的尺子。然而，这把“尺子”的获取过程包含不确定性因素的影响（Wu 等，2023；Akitsu 和 Nasahara，2022），直接影响遥感产品的质量评估。因为参考值与遥感产品之间的差异不仅仅来自遥感产品本身的误差，还包含参考真值本身的误差（Niro 等，2021）。目前，参考真值获取过程中的不确定性已经成为真实性检验

领域关注的焦点。

不确定性的影响可以从两个方面进行改善。一是对像元参考真值的不确定性进行估计（Buman 等，2022）并设置一定阈值，选择满足该阈值条件的参考真值对遥感产品进行真实性检验。二是对像元尺度参考真值获取的不确定性进行约束控制，使其尽可能降到最小。如 Akitsu 和 Nasahara（2022）根据参考真值的精度阈值对参考真值获取过程中的每一个环节（如验证场地的选择、观测的仪器以及方法、样方数目、样方大小）进行优化，以确保验证结果的准确性。无论是哪种方式，都需要对参考真值的不确定性进行回溯和量化。需要注意的是，影响参考真值不确定性的因素众多（图2），不仅仅包括地面观测误差，还包含采样误差、模型误差、尺度转换误差、几何匹配误差等（Duncanson 等，2021；Wu 等，2023）。但是，这些因素对参考真值不确定性的贡献并不是等价的，一方面取决于该因素本身引起的不确定性大小，另一方面取决于该因素引起的不确定性到参考真值总的不确定性的传递机制。因此，参考真值获取全过程中的不确定性的估算及其到像元参考真值的传递规律是亟须关注的（Niro 等，2021）。

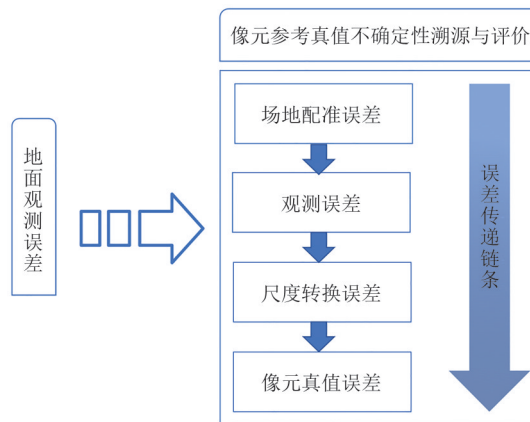


图2 像元参考真值不确定性发展趋势

Fig. 2 The development trend of uncertainty analysis and quantification of pixel scale reference in validation

4.2.2 像元参考真值的时空覆盖范围

已有的大部分真实性检验工作仍然以地面“点”—像元“面”的直接对比为主，或者在小区内采用地毯式的观测来捕捉地表的空间变异性。前者往往局限在个别均质的站点，后者往往局限

在个别几个时相。以全球范围内的公里尺度像元为例,能够直接利用地面站点观测进行验证的像元比例不超过十万分之一;而仅仅在个别时相开展的真实性检验也不能充分评估遥感产品对地表时变特征的捕捉能力。

但是,遥感产品本身的准确性和不确定性表现出很强的空间异质性和时间变异性。因此,仅仅在个别均质站点或者个别时相开展的真实性检验工作,其时间和空间覆盖不均衡、不充分,真实性检验结果不具有典型性、可扩展性和可移植性,并不能全面反映遥感产品本身的准确性和不确定性。该问题也逐渐引起学者们的关注,Fang等(2019b)在中国东北的农田区域开展了全生长季的地面LAI观测,并利用该实测数据对中等分辨率的LAI产品进行了时间序列检验。Xu等(2018)利用黑河流域地表过程综合观测网多种地表类型的36个站点观测数据,结合遥感信息与大气驱动数据,利用机器学习方法,得到了2012年—2016年黑河流域逐日1 km的流域尺度地表蒸散发相对真值,并应用于黑河流域6种地表蒸散发遥感产品的真实性检验中,解决了像元尺度真值时空覆盖范围不足的问题(Zhang等,2022)。

因此,获取时空连续的像元尺度参考真值是全面、客观、准确地进行遥感产品质量评估的关键,也实现遥感产品误差精准定位和产品质量再提升的重要保障,亦是遥感产品真实性检验向更高阶段发展的必经之路。这一方面需要新建真实性检验站网,另一方面针对已有观测基础的站点发展时空代表性提升方法。

5 结 语

真实性检验和反演、尺度转换并列为定量遥感领域的3大科学问题之一。它通过厘清遥感产品的误差分布,迭代实现遥感产品质量再提升,达到遥感产品的有效应用的目的。虽然针对不同参数的遥感数据产品都开展了大量的真实性检验工作,但仍然有一些基本的认知和概念还很模糊。导致不同的真实性检验研究中得出的结果不一致性,不同产品的准确性和精度之间没有可比性(Concha等,2021;Origo等,2020),无法准确回答遥感产品是否可用、什么时候可用什么时候不可用、哪些地方可用哪些地方不可用,以及不能满足后续的专题产品的生产以及后续的基于遥

感数据产品的高质量监测的需求。未来真实性检验的发展建议围绕以下几个方面:

(1) 地面原位(in situ)观测与卫星数据的尺度匹配问题。中国已经通过不同途径支持了遥感产品真实性检验网络的初步建立,但是针对卫星像元或模型网格等具有遥感特色的面尺度地面观测设备普遍较少,从而导致地面样点的布设存在诸多问题,增加了像元“真值”的不确定性。我们需要持续突破像元尺度观测的理论基础和技术方法,发展面向遥感像元尺度的观测设备与方法(Liu等,2016,2018),在未来很长的一段时期仍是遥感数据产品真实性检验的核心内容。

(2) 检验能力的不足,特别是复杂山区的真实性检验。中国67%以上的领土是山地,然而,已有的真实性检验工作主要集中在平坦地表,山区的真实性检验工作很少或者几乎没有。这一方面源于高质量的山区地面观测数据的缺失。另一方面,复杂地形加剧了陆表参数的空间尺度效应和地形效应,已有的理论方法在山区的适用性降低,导致像元参考真值获取十分困难。如何发展适用于山区地表的地面观测设备与技术以及像元尺度参考真值获取理论和方法,也是未来亟须解决的关键问题。

(3) 真实性检验工作发挥的效能不够。多年来,真实性检验一直在聚焦于检验自身的真实性问题,即纠结于真实性检验中用作标尺的参考真值到底真不真的问题。未能有效地通过真实性检验对遥感数据产品,尤其是国产数据产品,给出客观性的评价,进而推动遥感数据产品的迭代升级。真实性检验提供的是遥感产品的终端误差,并不指示误差来自产品生产的哪个环节。如何在遥感产品误差(真实性检验结果)和产品生产过程中各参数的像元参考真值的基础上,实现遥感产品生产全链路的误差回溯,进而构建遥感产品生产各环节的误差控制模型,最终实现遥感产品的质量提升(图3),亦是未来亟须解决的科学问题。

(4) 真实性检验与空天信息产业。真实性检验是实现空天数据质量可量化、可定标、可利用、可估值的关键所在,对促进空天信息产业高质量和可持续发展、加速释放数据应用价值、支撑数据要素市场发展至关重要。真实性检验为空天数据质量评价制定了“标尺”,为监测空间数据的真

真实性、准确性和量值统一提供量测理论和方法基础。然而，空天数据质量评价不仅仅包括数据的准确性和不确定性的评价，还包括数据的时效性、规范性、完整性、稳定性等。如何在已有的真实性检验理论方法的支撑下发展新一代的星载对地观测技术体系、优化载荷参数设计也是未来需要重点发展的方向。

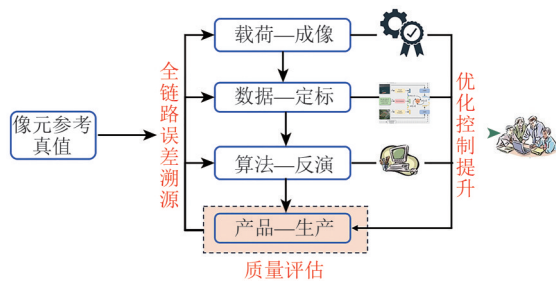


图3 全链路的误差溯源与遥感产品质量再提升

Fig.3 The error traceability in the whole chain of remote sensing and the quality upgrade of satellite products

为了实现对定量遥感数据产品全生命周期的真实性检验，确保遥感数据产品的准确性和可靠性，为遥感应用提供有力支持，需要实施以下策略：

(1) 需要建立一个综合性的遥感数据产品真实性检验框架。该框架应涵盖从初级数据产品处理到产品生成和应用的各个环节，并考虑各个环节之间的内在联系和相互影响。在检验框架中，应加强对各个环节不确定性的分析。通过深入研究不确定性因素的来源、传播和影响机制，建立不确定性评估模型和方法，为产品的质量控制在提供科学依据。

(2) 注重多学科的交流与互动。全局性的遥感数据产品的真实性检验涉及多个学科领域，如地理学、大气科学、计算机科学等。为了系统地解决问题，需要加强跨学科的合作与交流，共同研究新技术、新方法，推动遥感技术的不断创新与发展。

(3) 加强基础设施建设，对各阶段检验所需要的地面基础设施不断完善，从标定、产品验证到应用验证，配套齐全并相互支持，同时加强观测网络、数据处理中心、实验室等基础设施建设，提高检验处理能力和水平。并加强数据的共享和开放，促进资源的有效利用，遥感数据产品真实性检验的标准和规范也需要相应完善。

(4) 加强人才培养和团队建设：培养一支具备专业知识和技能的检验团队，为真实性检验工作提供有力的人才保障。

未来真实性检验将发展成为一种全面、深入的分析方法。它通过对遥感产品生产过程中的不确定性全链路进行解析和定量评估，为遥感量化水平的整体提升提供了有力的技术支持。未来，随着遥感技术的不断发展和应用领域的不断拓展，真实性检验将继续发挥重要作用，推动遥感技术的创新和发展。

志 谢 论文撰写过程中李增元研究员、李新研究员、刘绍民教授、方红亮研究员等对论文提出了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢！

参考文献 (References)

- Akitsu T K and Nasahara K N. 2022. *In-situ* observations on a moderate resolution scale for validation of the Global Change Observation Mission-Climate ecological products: the uncertainty quantification in ecological reference data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107: 102639 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102639]
- Bailey S W and Werdell P J. 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. *Remote Sensing of Environment*, 102(1/2): 12-23 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.015]
- Barnes B B, Cannizzaro J P, English D C and Hu C M. 2019. Validation of VIIRS and MODIS reflectance data in coastal and oceanic waters: an assessment of methods. *Remote Sensing of Environment*, 220: 110-123 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.034]
- Bian Z J, Cao B, Li H, Du Y M, Lagouarde J P, Xiao Q and Liu Q H. 2018. An analytical four-component directional brightness temperature model for crop and forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, 209: 731-746 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.010]
- Bian Z J, Zhong S Y, Roujean J L, Liu X Y, Duan S B, Li H, Cao B, Li R B, Du Y M, Xiao Q and Liu Q H. 2024. An integrated method for angular and temporal reconstruction of land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 313: 114357 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114357]
- 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 network 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 photosyntheti-

- cally 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]
- Buman B, Hueni A, Colombo R, Cogliati S, Celesti M, Julitta T, Burkart A, Siegmann B, Rascher U, Drusch M and Damm A. 2022. Towards consistent assessments of in situ radiometric measurements for the validation of fluorescence satellite missions. *Remote Sensing of Environment*, 274: 112984 [DOI: 10.1016/J.RSE.2022.112984]
- Concha J A, Bracaglia M and Brando V E. 2021. Assessing the influence of different validation protocols on ocean colour match-up analyses. *Remote Sensing of Environment*, 259: 112415 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112415]
- Duncanson L, Armston J, Disney M, Avitabile V, Barbier N, Calders K, Carter S, Chave J, Herold M, MacBean N, McRoberts R, Minor D, Paul K, Réjou-Méchain M, Roxburgh S, Williams M, Albinet C, Baker T, Bartholomeus H, Bastin J F, Coomes D, Crowther T, Davies S, De Bruin S, De Kauwe M, Domke G, Dubayah R, Falkowski M, Fatoyinbo L, Goetz S, Jantz P, Jonckheere I, Jucker T, Kay H, Kellner J, Labriere N, Lucas R, Mitchard E, Morsdorf F, Næsset E, Park T, Phillips O L, Ploton P, Puliti S, Quegan S, Saatchi S, Schaaf C, Schepaschenko D, Scipal K, Stovall A, Thiel C, Wulder M A, Camacho F, Nickeson J, Román M and Margolis H. 2021. Aboveground woody biomass product validation good practices protocol. Version 1.0. Land Product Validation Subgroup (WGCV/CEOS), [DOI: 10.5067/doc/ceoswgcv/lpv/agb.001] https://lpvs.gsfc.nasa.gov/PDF/CEOS_WGCV_LPV_Biomass_Protocol_2021_V1.0.pdf
- Fan T Y, Wen J G, Jiao Z H, Bian Z J, Zhong S Y, Zhu W Z, Cao B, Li H, Du Y M, Xiao Q and Liu Q H. 2024. Modeling the topographic effect on directional anisotropies of land surface temperature from thermal remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 4: 0226 [DOI: 10.34133/remotesensing.0226]
- Fang H L, Baret F, Plummer S and Schaepman-Strub G. 2019a. An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57(3): 739-799 [DOI: 10.1029/2018RG000608]
- Fang H L, Che T, Jin R, Li A N, Li X, Li Z Y, Liu S M, Ma M G, Xiao Q and Zhang Y G. 2021. On the construction of China's fiducial reference measurement network for land surface remote sensing product validation. *Advances in Earth Science*, 36(12): 1215-1223 (方红亮, 车涛, 晋锐, 李爱农, 李新, 李增元, 刘绍民, 马明国, 肖青, 张永光. 2021. 建设中国陆表遥感产品真实性检验基准台站网络的思考. *地球科学进展*, 36(12): 1215-1223) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.003]
- Fang H L, Zhang Y H, Wei S S, Li W J, Ye Y C, Sun T and Liu W W. 2019b. Validation of global moderate resolution leaf area index (LAI) products over croplands in northeastern China. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111377 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111377]
- Gao H L, Gu X F, Zhou X, Yu T and Wang Y X. 2023. Analysis of the development trend of Chinese remote sensing validation sites and infrastructure construction. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1088-1098 (高海亮, 顾行发, 周翔, 余涛, 王艺学. 2023. 中国遥感真实性检验基础设施建设发展态势分析. *遥感学报*, 27(5): 1088-1098) [DOI: 10.11834/jrs.20231694]
- GCOS. 2016. The Global Observing System for Climate: Implementation Needs. GCOS-200. World Meteorological Organization
- Hooker S B and Maritorena S. 2000. An evaluation of oceanographic radiometers and deployment methodologies. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(6): 811-830 [DOI: 10.1175/1520-0426(2000)017<0811:AEOORA>2.0.CO;2]
- 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 X, Liu S M, Ding J L, Song L S, Xu T R, Ma Y F, Xu Z W, Yang X F, Zhang Y and Wang J J. 2024. A framework for quantifying the uncertainty in upscaling evapotranspiration from homogeneous to heterogeneous underlying surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4413624 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3453589]
- Li X, Liu S M, Liu Q H, Xiao Q, Che T, Ma M G, Jin R, Ran Y H, Wen J G, Xu Z W and Li Z Y. 2023. Heihe remote sensing experiments: retrospect and prospect. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(2): 224-248 (李新, 刘绍民, 柳钦火, 肖青, 车涛, 马明国, 晋锐, 冉有华, 闻建光, 徐自为, 李增元. 2023. 黑河遥感试验: 回顾与展望. *遥感学报*, 27(2): 224-248) [DOI: 10.11834/jrs.20235013]
- Lin X W, Wen J G, Tang Y, Ma M G, You D Q, Dou B C, Wu X D, Zhu X B, Xiao Q and Liu Q H. 2018. A web-based land surface remote sensing products validation system (LAPVAS): application to albedo product. *International Journal of Digital Earth*, 11(3): 308-328 [DOI: 10.1080/17538947.2017.1320593]
- Liu C, Calders K, Origo N, Disney M, Meunier F, Woodgate W, Gastellu-Etchegorry J P, Nightingale J, Honkavaara E, Hakala T, Markelin L and Verbeeck H. 2023. Reconstructing the digital twin of forests from a 3D library: quantifying trade-offs for radiative transfer modeling. *Remote Sensing of Environment*, 298: 113832 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113832]
- 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 S M, Li X, Xu Z W, Che T, Xiao Q, Ma M G, Liu Q H, Jin R, Guo J W, Wang L X, Wang W Z, Qi Y, Li H Y, Xu T R, Ran Y H, Hu X L, Shi S J, Zhu Z L, Tan J L, Zhang Y and Ren Z G. 2018. The

- Heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China. *Vadose Zone Journal*, 17(1): 1-21 [DOI: 10.2136/vzj2018.04.0072]
- Liu S M, Xu Z W, Song L S, Zhao Q Y, Ge Y, Xu T R, Ma Y F, Zhu Z L, Jia Z Z and Zhang F. 2016. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230-231: 97-113 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.04.008]
- Liu X Y, Tang B H, Li Z L, Zhou C H, Wu W B and Rasmussen M O. 2020. An improved method for separating soil and vegetation component temperatures based on diurnal temperature cycle model and spatial correlation. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111979 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111979]
- Martin B, & Kobayashi H. 2024. Drivers of deciduous forest near-infrared reflectance: a 3d radiative transfer modeling exercise based on ground lidar. *Remote Sensing of Environment*, 302.
- Morisette J T, Privette J L and Justice C O. 2002. A framework for the validation of MODIS land products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 77-96 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00088-3]
- Naethe P, de Sanctis A, Burkart A, Campbell P K E, Colombo R, di Mauro B, Damm A, El-Madany T, Fava F, Gamon J A, Huemmrich K F, Migliavacca M, Paul-Limoges E, Rascher U, Rossini M, Schüttemeyer D, Tagliabue G, Zhang Y and Julitt T. 2024. Towards a standardized, ground-based network of hyperspectral measurements: combining time series from autonomous field spectrometers with Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 303: 114013 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114013]
- Nightingale J, Mittaz J P D, Douglas S, Dee D, Ryder J, Taylor M, Old C, Dieval C, Fouron C, Duveau G and Merchant C. 2019. Ten priority science gaps in assessing climate data record quality. *Remote Sensing*, 11(8): 986 [DOI: 10.3390/rs11080986]
- Niro F, Goryl P, Dransfeld S, Boccia V, Gascon F, Adams J, Themann B, Scifoni S and Doxani G. 2021. European Space Agency (ESA) calibration/validation strategy for optical land-imaging satellites and pathway towards interoperability. *Remote Sensing*, 13(15): 3003 [DOI: 10.3390/rs13153003]
- Origo N, Gorroño J, Ryder J, Nightingale J and Bialek A. 2020. Fiducial reference measurements for validation of Sentinel-2 and Proba-V surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment*, 241: 111690 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111690]
- Randerson J T, Hoffman F M, Thornton P E, Mahowald N M, Lindsay K, Lee Y H, Nevison C D, Doney S C, Bonan G, Stöckli R, Covey C, Running S W and Fung I Y. 2009. Systematic assessment of terrestrial biogeochemistry in coupled climate-carbon models. *Global Change Biology*, 15(10): 2462-2484 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01912.x]
- Shi H Y, Xiao Z Q, Wen J G and Wu S B. 2022. An optical-thermal surface-atmosphere radiative transfer model coupling framework with topographic effects. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4400312 [DOI: 10.1109/tgrs.2020.3044061]
- 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. 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 area 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. 2023f. 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. 2023f. 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)
- Van der Tol C, Verhoef W, Timmermans J, Verhoef A and Su Z. 2009. An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences*, 6(12): 3109-3129 [DOI: 10.5194/bg-6-3109-2009]
- Verhoef W and Bach H. 2007. Coupled soil-leaf-canopy and atmosphere radiative transfer modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data. *Remote Sensing of Environment*, 109(2): 166-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.013]
- 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]
- Wen J G, You D Q, Han Y, Lin X W, Wu S B, Tang Y, Xiao Q and Liu Q H. 2022. Estimating surface BRDF/Albedo over rugged terrain using an extended multisensor combined BRDF inversion (EMC-BI) model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 2503505 [DOI: 10.1109/LGRS.2022.3143197]
- 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, 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, Huang H G, Bian Z J, Qi J B, Du Y M, Li J X, Wen J G, Xie D H, Bai J H, Cao B, Gong B C, Zhou X and Liu Q H. 2023. Digital twin of remote sensing experiment field: theory and key technology. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 584-598 (肖青, 黄华国, 卞尊健, 漆建波, 杜永明, 李嘉昕, 闻建光, 谢东辉, 柏军华, 曹彪, 宫宝昌, 周翔, 柳钦火. 2023. 关于遥感实验场数字孪生体构建的思考. 遥感学报, 27(3): 584-598) [DOI: 10.11834/jrs.20232247]
- Xu L, Chen N C, Zhang X, Moradkhani H, Zhang C and Hu C L. 2021. In-situ and triple-collocation based evaluations of eight global root zone soil moisture products. *Remote Sensing of Environment*, 254: 112248 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112248]
- Xu T R, Guo Z X, Liu S M, He X L, Meng Y F Y, Xu Z W, Xia Y L, Xiao J F, Zhang Y, Ma Y F and Song L S. 2018. Evaluating different machine learning methods for upscaling evapotranspiration from flux towers to the regional scale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(16): 8674-8690 [DOI: 10.1029/2018JD028447]
- Yang P Q, Van Der Tol C, Yin T G and Verhoef W. 2020. The SPART model: a soil-plant-atmosphere radiative transfer model for satellite measurements in the solar spectrum. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111870 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111870]
- Zeng Y L, Badgley G, Chen M, Li J, Anderegg L D L, Kornfeld A, Liu Q G, Xu B D, Yang B, Yan K and Berry J A. 2020. A radiative transfer model for solar induced fluorescence using spectral invariants theory. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111678 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111678]
- Zhang D C and Dietze M. 2023. Towards uninterrupted canopy-trait time-series: a Bayesian radiative transfer model inversion using multi-sourced satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 287: 113475 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113475]
- Zhang R H, Tian J, Li Z L, Su H B, Chen S H and Tang X Z. 2010. Principles and methods for the validation of quantitative remote

- sensing products. *Science China Earth Sciences*, 53(5): 741-751 (张仁华, 田静, 李召良, 苏红波, 陈少辉. 2010. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法. *中国科学: 地球科学*, 40(2): 211-222) [DOI: 10.1007/s11430-010-0021-3]
- Zhang Y, Liu S M, Song L S, Li X, Jia Z Z, Xu T R, Xu Z W, Ma Y F, Zhou J, Yang X F, He X L, Yao Y J and Hu G C. 2022. Integrated validation of coarse remotely sensed evapotranspiration products over heterogeneous land surfaces. *Remote Sensing*, 14(14): 3467 [DOI: 10.3390/rs14143467]
- Zhao X, Qi J B, Xu H F, Yu Z X, Yuan L J, Chen Y W and Huang H G. 2023. Evaluating the potential of airborne hyperspectral LiDAR for assessing forest insects and diseases with 3D Radiative Transfer Modeling. *Remote Sensing of Environment*, 297: 113759 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113759]

Thoughts on the global validation of remote sensing

XIAO Qing¹, WU Xiaodan², WEN Jianguang¹, BIAN Zunjian¹, LIN Xingwen³,
YOU Dongqin¹, YIN Gaofei²

1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
2. *Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;*
3. *College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China*

Abstract: Validation, inversion, and scale problems have been listed as the three major scientific problems in quantitative remote sensing. Validation serves as a crucial foundation for reflecting and revealing the errors in remote sensing algorithms and products. It is also an important guarantee for the continuous improvement of remote sensing product quality. After nearly 40 years of development, validation has received widespread attention in the international remote sensing community. Thus far, the theory and methods of validation have become relatively mature, and an increasing number of practical validation works have been conducted. This scenario has played a wide role in clarifying the error distribution of remote sensing products, thereby iteratively improving the quality of remote sensing products and promoting the application benefits of remote sensing products. However, given the development of remote sensing science and technology, the connotation of validation should not be limited to assessing the accuracy of remote sensing products. The in-depth expansion of various macro and micro applications related to geography objectively promotes the proactive and systematic global analysis of various uncertainties in the entire process of remote sensing information from data acquisition to application from the perspective of remote sensing science and technology disciplines. As a result, the technological conditions and advantages of the era are linked, and the iterative space observation capabilities are improved. With 40 years of academic accumulation, particularly the development of remote sensing product validation technology, the theory, method, and technology of validation have evolved into a comprehensive system from traditional comparative analysis based on statistics to simulation validation grounded in physical models. At present, we have the validation capability for the whole chain of remote sensing, including quantitative remote sensing mechanism model validation, satellite imaging data calibration, remote sensing data product assessment, application effect evaluation, and even remote sensing observation theory and methods. However, remote sensing information has multidimensional characteristics of time, space, spectrum, and events. In previous research, validation techniques and methods were developed for various stages, including primary data product processing, model/algorithm evaluation, production, and application. However, these stages were merely linked through simplistic, rigid input-output relationships. The correlations and inheritance of uncertainties across these stages were not explored. This rigid model overlooked the intrinsic connections and mutual influences among various stages. Thus, validation was often limited to individual stages rather than addressing problems systematically as a whole. Merely “evaluating” the accuracy and uncertainty of remote sensing products is far from sufficient because the ultimate goal of validation is to enhance further the quality of remote sensing products. Systematically reorganizing the connotation, methodology, and output of validation, as well as forming a working mechanism for interdisciplinary cooperation within and across disciplines, is necessary to enhance remote sensing spatial observation capabilities systematically through validation. This study provides a new interpretation of the concept and connotation of validation, analyzes and summarizes the current status of methods and technological development, and examines the key challenges that urgently need to be overcome in validation at present. Finally, this study provides a view of the specific ideas and development prospects of validation in the future.

Key words: remote sensing, global validation, pixel scale reference, uncertainty, error traceability

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