Vol.32 No.6 Jun., 2017

晋锐 李新 冯明国 等.陆地定量遥感产品的真实性检验关键技术与试验验证[J].地球科学进展 ,2017 ,32(6):630-642 ,doi:10.11867/j.issn. 1001-8166.2017.06.0630. [Jin Rui , Li Xin ,Ma Mingguo , et al. Key methods and experiment verification for the validation of quantitative remote sensing products [J]. Advances in Earth Science 2017 ,32(6):630-642 ,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.06.0630.]

陆地定量遥感产品的真实性检验 关键技术与试验验证*

晋 锐¹² 李 新¹² ,马明国³ 葛 咏⁴ ,刘绍民⁵ ,肖 青⁶ , 闻建光⁶ ,赵 凯⁷ ,辛晓平⁸ ,冉有华¹ 柳钦火⁶ 张仁华⁴

(1.中国科学院西北生态资源环境研究院 甘肃省遥感重点实验室 中科院黑河遥感试验研究站,

甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心,北京 100101;

3.西南大学,重庆 400715; 4.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;

5.北京师范大学地理科学学部,北京 100875; 6.中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100094; 7.中国科学院东北地理与农业生态研究所,吉林 长春 130102;

8.中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统野外科学观测研究站,北京 100081)

摘 要: 遥感产品真实性检验是评价遥感产品质量、可靠性和适用性的唯一手段,是提高遥感产品精度、改善遥感产品质量的主要依据,更是推动遥感产品应用范围和应用水平的重要保障。主要介绍国家高技术研究发展计划地球观测与导航技术领域"星机地综合定量遥感系统与应用示范(一期)"项目在"遥感产品真实性检验关键技术及其试验验证"方面取得的主要进展: 研制了一系列国家标准,包括陆地定量遥感产品真实性检验通用方法,遥感产品真实性检验地面观测场的选场和布设规范,以及 24 个遥感产品真实性检验的单项国家标准; 研建了遥感产品真实性检验的完整技术流程体系,发展和完善了真实性检验过程中的空间优化采样一尺度上推一检验策略的关键技术方法; 通过星机地同步试验获取多尺度配套观测数据集,系统实证了遥感产品真实性检验标准与技术体系; 构建了遥感产品真实性检验网,开展核心观测场的多模式联网观测实践,初步形成全国真实性检验网的原型体系和运行机制,为我国遥感产品真实性检验的业务化运行奠定了坚实的基础。

关 键 词: 定量遥感产品; 真实性检验; 像元尺度真值; 地表异质性; 尺度上推

中图分类号: P237 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2017) 06-0630-13

1 引 言

遥感产品真实性检验是指通过和参考数据(相 对真值)比较,独立地评价从定标后的卫星遥感数 据延伸出的遥感产品的精度和不确定性的过程。遥感产品的真实性检验是评价遥感产品质量、可靠性和适用性的唯一手段,是提高遥感产品精度、改善遥感产品质量的主要依据,更是推动遥感产品应用范

^{*} 收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-05-09.

^{*}基金项目: 国家高技术研究发展计划项目"遥感产品真实性检验关键技术及其试验验证"(编号:2012AA12A305);国家自然科学基金重点项目"陆表遥感产品真实性检验中的关键理论与方法研究"(编号:41531174)资助.

作者简介: 晋锐(1979-) ,女 ,山西临汾人 ,副研究员 ,主要从事冰冻圈遥感、水文遥感、陆面数据同化及真实性检验研究. **E-mail**: jinrui@ lzb.ac.cn

围和应用水平的重要保障。

早在遥感技术发展的初期,遥感产品真实性检验就受到国际上相关机构的密切关注和重视。美、英、法、加拿大和澳大利亚等国家在这方面积累了几十年的经验,在每颗遥感卫星发射升空前后都花费了大量的时间和经费进行传感器定标,开展算法研究以及遥感产品的真实性检验,以保证数据产品的质量。例如,国际地球观测卫星委员会(Committee on Earth Observation Satellites,CEOS)在1984年就成立了定标和真实性检验工作组(Working Group on Calibration and Validation,WGCV)在全球范围开展相关工作和研究[1]。但是,由于遥感产品的真实性检验涉及范围广、难度大,既费力耗时又耗资,因此,以往的工作大多集中在传感器的外场定标及其验证上,重点是对遥感数据本身的检验,而较少涉及遥感产品的真实性检验。

地球观测系统计划自 1990s 实施以来,以美国 为首的几个遥感强国,才逐步开始尝试在大范围开 展遥感产品的真实性检验。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)于 1999年启动了大足迹研究计划(Big-Foot) 通过对站点周围 5 km×5 km 范围的土地覆 盖、叶面积指数、光合有效辐射、净初级生产力等参 数的地面观测 验证 MODIS 的相应产品并改进生产 算法[2]。欧州空间局(European Space Agency, ESA) 也于 21 世纪初启动了 VALERI (Validation of Land European Remote Sensing Instruments) 计划 ,对 MODIS , VEGETATION , MERIS 和 AVHRR 等传感器 制备的陆地遥感产品,包括地表反照率、植被覆盖 度、叶面积指数、fAPAR 等进行全球范围的真实性 检验[3]。2000年 在上述两大真实性检验计划基础 之上,CEOS WGCV 专门成立了陆地产品真实性检 验(Land Product Validation, LPV)工作小组。其任 务是:协调包括两大真实性检验计划在内的国际陆 地遥感产品真实性检验活动 制定真实性检验的标 准指南与规范,促进相关数据和信息的共享和交 换^[4]。2005 年 LPV 在前期真实性检验工作的基础 上 提出了 BELMANIP (Benchmark Land Multisite Analysis and Intercomparison of Products) 计划 强调除 了利用地面观测进行直接检验外,还可开展多传感 器数据产品间的交叉检验[3]。

同时,国际上针对一些特定遥感传感器或地表参数,也组建了专门研究团队推进定量遥感算法研究与数据产品研制,并组织开展了诸多综合观测试

验和验证计划。如美国早在1992年和1994年就开 展了著名的 Little Washita 水文观测试验 ,用于验证 L 波段微波辐射计在监测土壤水分方面的潜力; 1997年和1999年,该试验扩展到更大空间范围,即 著名的美国南部大平原水文试验(SGP'97, SGP'99) 试验手段也从以地面观测为主扩展到地 面和航空遥感相结合的综合观测,在约10 000 km² 范围开展了土壤水分遥感反演与真实性检验。 2002-2005 年,进一步开展了土壤水分试验 SMEX02 通过地面试验和航空微波辐射计观测验证 AMSR-E 等传感器的土壤水分遥感产品[5 6]。随着 L波段微波辐射计 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)和 SMAP (Soil Moisture Active Passive)的在 轨运行 相应的地面标定/验证工作组也在全球范围 展开了大量验证活动[78]。以上试验积累了宝贵的 土壤水分产品验证数据集,极大促进了产品精度的 提高。NASA 还专门成立了 MODIS 陆地遥感产品 的定标、质量控制和验证小组(MODLAND),对各种 MODIS 全球陆地遥感产品进行系统的真实性检 验[9] 包括定标后的初级遥感数据和高级遥感产 品,如地表反射率、地表温度、归一化植被指数、叶面 积指数、净初级生产力、气溶胶光学厚度等。针对 MODIS 高级遥感产品的真实性检验研究成果于 2006年7月以专刊形式发表在 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 上[4]。这是国际上有 关遥感真实性检验研究成果的首次集结发表,为后 续工作的深入开展奠定了基础。我国遥感界也开展 了部分真实性检验的研究和试验。例如,在中国西 北干旱区黑河流域开展了针对地表温度、反照率、土 壤水分、雪水当量等遥感产品的真实性检验[10,11]; 2001 年在北京顺义开展了针对 MODIS 陆表参数反 演算法的真实性检验试验[12];针对国产卫星(如气 象卫星 FY 系列、海洋 HY 卫星、中巴资源 CBERS 以 及环境和减灾卫星 HJ) 数据和产品进行了场外定标 试验和真实性检验工作等[13~15]。此外,全球各种专 项观测网络也在遥感产品真实性检验中发挥着重要 作用。例如 各国相互配合在全球范围内建立的通 量观测网(FLUXNET)[16]、气溶胶地面观测网 (AERONET: Aerosol Robotic NETwork) [17]、国际土 壤水分网络(International Soil Moisture Network ,IS-MN) [18] 等。以上这些研究计划、观测网络和综合试 验在遥感产品的算法预研、改进和定型 遥感产品质 量评价和不确定性分析方面均发挥了重要的、基础 性的数据支撑作用。

在遥感产品真实性检验的理论研究和技术流程 方面 国际上针对地面观测样点布设、观测代表性、 像元尺度真值的观测和估计、尺度转换 以及真实性 检验不确定性的影响等方面都开展了广泛而深入的 探讨。在真实性检验方案上,以上真实性检验计划 发展和采用了基本一致的"自下而上(Bottom-Up)" 的框架 ,其基本构成和检验流程为:根据不同地表类 型或生物群落的分布特征,在全球设置一定数量的 真实性检验样地,每个样地内有若干基本采样单元 (Elementary Sampling Unit, ESU);在每个 ESU 内进 行一定数量的单点测量,然后通过转换方法将多点 测量转换到 ESU 尺度上 再进一步结合高分辨率遥 感影像 建立 ESU 与样地之间的尺度转换关系 ,得 到样地尺度的地表参数值;最后,通过全球不同地表 类型多个样地的地面观测结果与陆地遥感数据产品 进行比较和相关性分析,评价全球遥感数据产品的 精度[3]。张仁华等[19 20]则提出了"一检两恰"的真 实性检验方案和当地毯式扫描难以实现时可以采用 的多点观测法。Martínez-Fernández 等[21] 提出了时 间稳定性分析的概念,并被广泛应用于全球土壤水 分观测网络的站点筛选和代表性评价中[18 22] ,为高 效确定有限数量的代表性站点或站点组合提供了简 单易行的解决方案。在像元尺度地面观测技术方 面 ,刘绍民等构建了由大孔径闪烁仪、涡动相关仪和 自动气象站组成的 ,结合足迹模型的卫星像元尺度 蒸散发的观测系统 提出了一套完整的蒸散发遥感 产品的地面验证方法,涉及精度评价、误差原因分析 以及误差评估等[23 24]。从单点观测到遥感像元的 尺度转换方面 MODIS 陆地产品真实性检验工作组 提出了通过高分辨率遥感数据作为过渡尺度,首先 在地表参数单点观测与高分辨率遥感数据之间建立 转换关系 得到高分辨率遥感像元尺度上的地表参 数分布 再通过线性聚合方法得到待验证遥感产品 像元尺度的参考值。VALERI 计划则通过对像元内 多个单点观测进行空间插值得到像元尺度的参考 值[3]。在真实性检验的不确定性研究方面,Tan 等^[25]分析了配准误差对 MODIS 遥感产品真实性检 验不确定性的影响。Huang 等[26] 以 MODIS LAI 产 品真实性检验为例,评价了地面观测误差对高分辨 率参考数据估计精度的影响。

虽然国际上已经组织了诸多遥感产品真实性检验的观测试验和研究计划,但大多相互独立运行,尚未形成全球遥感产品真实性检验观测网络,难以满足对多要素、多尺度遥感产品的真实性检验需求;特

别是某些观测网的设计初衷并非针对遥感产品的真实性检验,存在观测资料空间代表性不足的问题。此外,传统的真实性检验方案主要针对相对均质的像元。但是,地表异质性是自然界的基本特征,很少存在真正意义上的均质像元;即使验证了均质像元的遥感产品,也不能保证异质性像元的相应遥感产品是准确的。因此,如何针对多种地表类型混合或观测变量空间变异性较强的异质性地表,在遥感像元尺度上合理地开展真实性检验,还一直是一个悬而未决的问题。

及时启动并推进遥感产品的真实性检验研究具有重要的科学意义和战略价值 *注*要体现在:

- (1) 遥感的应用价值、前景乃至于未来发展前途 在很大程度上取决于遥感产品的质量。遥感作为一种宏观观测手段 必然需要一个计量标准 而真实性检验就是定量遥感的计量器。只有在真实性检验的基础上对各种遥感产品的精度给出定量评估 ,才能进一步提高遥感定量化水平 ,促使遥感产品更好地成为应对全球变化等人类社会所面临的严峻挑战的可靠信息源。
- (2)目前,我国已成为世界上发射遥感卫星最多的国家之一,环境、测绘、气象、海洋、水等系列遥感卫星陆续升空,"高分"等观测计划相继实施,我国成为了当之无愧的遥感大国。但是,目前遥感在国民经济和资源环境监测中的应用深度及其发挥的效益还不充分。这与我国在遥感产品真实性检验方面的工作相对滞后有关,尤其是真实性检验的理论体系与方法、技术流程、实用模型、标准化检验方法、业务化运行手段等的严重缺乏,极大地制约着我国遥感产品的推广应用和遥感定量化水平的提高,导致大量宝贵的遥感数据和遥感产品被束之高阁。因此,遥感产品真实性检验工作的滞后已成为我国从遥感大国向遥感强国跨越式发展的一个重要瓶颈,已经成为全国遥感领域迫切需要解决的重大现实问题。

在以上背景和科学问题驱动下,国家高技术研究发展计划"星机地综合定量遥感系统与应用示范(一期)"重大项目中专门设置了"遥感产品真实性检验关键技术及其试验验证"课题。本文主要介绍和梳理了该项目在遥感产品真实性检验理论方法、标准制定、关键技术、试验验证和全国遥感产品真实性检验网等方面取得的主要进展和思考,为进一步深入推进遥感产品在各领域的深化应用提供完整的理论方法和技术流程体系。

2 遥感产品真实性检验的关键技术

遥感产品真实性检验的研究思路可概括为以"理论方法—技术体系—试验验证—场网建设"为主线,包括4项研究内容:①陆地遥感产品真实性检验标准规范与技术体系;②遥感产品真实性检验技术与标准规范的星机地试验验证;③遥感产品真实性检验网;④遥感产品真实性检验系统集成与示范运行(图1)。其中,标准规范和技术体系侧重于理

论与方法研究;星机地综合遥感试验和遥感产品真实性检验网中的有关试验共同构成实证研究,用于优化标准规范和技术体系;遥感产品真实性检验网的场网建设和集成系统则共同构成准业务化运行的全国真实性检验网原型。其中,涉及到的关键技术包含陆地遥感产品真实性检验标准体系、异质性地表空间优化采样设计、像元尺度"真值"估计、遥感产品真实性检验关键技术与标准规范的星机地试验验证,以下将分别展开介绍。

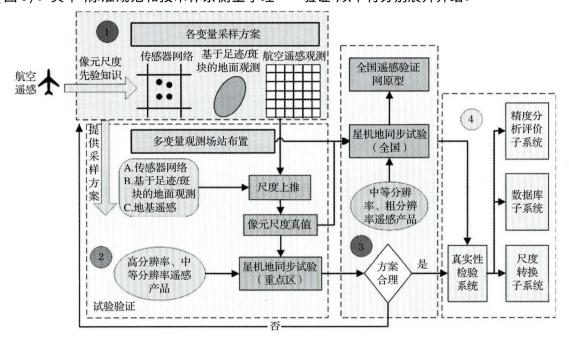


图 1 总体技术路线图

Fig.1 Flowchart of land surface remote sensing products validation

2.1 陆地遥感产品真实性检验标准体系

标准是贯穿于遥感产品真实性检验整个过程的规范性文件。通过总结国内外遥感产品真实性检验方面的已有经验和研究成果,参考国家与行业已有标准和技术体系,根据陆地定量遥感产品的特点,制定了遥感产品真实性检验的系列性标准,最终形成一套符合国家标准的、对遥感产品真实性检验具有指导意义的遥感产品真实性检验标准和技术流程体系(图2)。目前,已完成"陆地遥感产品真实性检验地面观测场的选址和布设"以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设"以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设"以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设"以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设"以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设"以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设"以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设"以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设。以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设。以及24项变量的真实性检验地面观测场的选址和布设。以及24项变量的真实性检验地面观测场的选择,是一个方式。

太阳总辐射、大气下行辐射、地表净辐射、吸收光合有效辐射比率、南极接地线、南极边缘线、南极冰盖表面高程及高分辨率光学卫星遥感影像质量检查。

2.2 异质性地表空间优化采样设计

采样是指导多尺度观测、开展尺度转换和真实性检验研究的重要前期工作。优化的采样设计,不仅能够有效捕捉观测变量的空间异质性特征,减少采样成本;也更有利于得到遥感像元尺度真值的无偏最优估计。根据空间采样理论,一个像元内样本点的数量及其位置直接影响着像元真值估计的精度。通常,采样点数量越多,估计精度越高。然而在实践中,如何使有限的观测点在空间上优化布设,如何利用有限观测点的数据得到异质像元上地表变量的最优估计是亟需攻克的关键难点。为此,我们确定了基于空间抽样和统计推断理论,利用异质表面

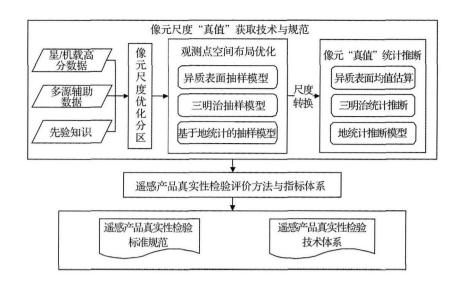


图 2 遥感产品真实性检验标准的技术路线

Fig.2 Technology of the guideline and standards about the remote sensing products validation

均值估计(Mean of Surface with Non-homogeneity, MSN)模型来计算像元估计值及其方差^[27],并根据采样点数量、位置与估计方差之间的定量关系,结合智能算法(例如空间模拟退火法,粒子群算法),寻找出给定条件下像元尺度采样点的最优数量和空间分布位置的解决方案(图3)。针对不同的观测目标和地表条件,发展了异质性表面空间优化采样^[28]、多变量空间优化采样^[29]、时空动态观测网优化采

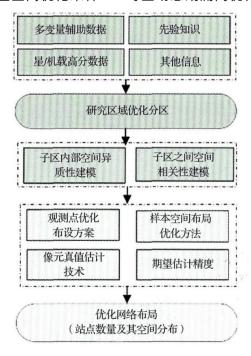


图 3 异质像元尺度优化采样的技术路线
Fig.3 Optimal sampling of the observations in the heterogeneous remote sensing pixels

样^[30]、空间混合优化采样^[31]等方法,可满足大多数陆地遥感产品真实性检验的布点需求。

2.3 像元尺度"真值"估计

根据多点/足迹观测进行尺度上推 从而经由升尺度获得遥感像元尺度的"真值"估计 ,是开展遥感产品质量客观评价的基础 ,也是截然不同于传统以点代面验证方法的显著特征^[32]。根据观测方式和尺度的不同 ,分 3 个方面分别描述:

(1) 基于传感器网络多点观测的遥感像元"真值"估计

通过优化布设得到多点观测后 采用异质性地 表尺度上推算法得到像元"真值"。同时估计其不确 定性。像元尺度的真值估计采用2种方式进行。在 没有长时间序列连续观测或观测变量缺少动态变化 规律的情况下,采用非均质表面空间推断模型[33]、 回归克里格[34]、贝叶斯最大熵[35]等方法,并引入与 估计变量相关性较强或空间分布模式具有相似性的 辅助信息以提高估计精度:对于具有特定时间变化 规律且具有连续观测的变量,充分利用时间维信息, 模拟其动态变化规律,在相关辅助信息和高分辨率 遥感观测支持下 构建层次贝叶斯模型或采用时空 克里格方法 综合各种先验信息和时空观测数据 在 变量时变规律约束下实现像元真值的估计及其不确 定性评价[30]。此外、针对不同来源传感器的多点观 测,还发展了不等精度观测误差的尺度上推方 法[36,37]。

(2) 基于足迹/斑块观测的遥感像元"真值" 估计 已有的观测经验告诉我们,大尺度地面观测和 遥感像元反演值更为接近,因此基于足迹/斑块的新型地面观测技术在遥感产品真实性检验中被高度重视。目前实际应用中主要包括:①足迹观测:例如大孔径闪烁仪和涡动相关仪,以及以矩阵方式观测地表感热通量与蒸散发、GPP 与 NPP、净辐射;②斑块观测:基于宇宙射线观测仪的土壤水分观测。但是,这些仪器的足迹/斑块和遥感像元在空间上并不完全吻合,并受到几何配准误差的影响,使得这些观测并非严格意义上的像元真值。因此,需要发展从足迹/斑块尺度观测转换为遥感像元"真值"的空间转换方法,而且这种转换和观测仪器的足迹响应模型密切相关。

基于足迹/斑块的观测仪器的空间代表性具有时变特性,如大孔径闪烁仪的观测足迹呈现纺锤形,且随风向和大气稳定度、架高等因素而变化,使得异质像元内观测点的代表性也随之变化,进而导致异质像元真值估计的不确定性。为有效精确地估计像元真值,需要分析足迹/斑块及其观测的变化规律,并结合非均质表面空间推断模型、面到面克里格和时空尺度转换算法,获得非均质像元真值的最优无偏估计[38-40]。

(3) 基于航空遥感的遥感像元"真值"估计

航空遥感可获得甚高分辨率(约10 cm)到高分辨率(约5 m)的多尺度遥感数据,在尺度转换中发挥着重要的桥梁作用。然而,航空遥感和卫星遥感一样,也非直接观测得到的最终反演量——"遥感产品"因此,从航空遥感获取卫星像元尺度真值,同样需要经历反演和尺度上推2个过程。但由于航空遥感具有严格的可控性和高分辨率这2个优势,其反演和尺度上推均可在严格控制和精确的先验信息支持的条件下进行,因此得到的卫星像元尺度真值的不确定性较小,常被作为地面和卫星之间过渡尺度的观测,用于"一检两恰"的验证方案中[41]。

2.4 遥感产品真实性检验关键技术与标准规范的 星机地试验验证

开展星机地综合遥感试验,生成多尺度的星机地同步试验数据集,能够系统地实证和优化遥感产品真实性检验的关键技术与标准规范;定量评价遥感产品真实性检验的不确定性;分析遥感产品精度的评价方法与指标体系的合理性。通过试验验证,最终形成标准化的、具备可操作性的真实性检验标准规范与技术流程体系,以及优化的遥感产品精度评价方法与指标体系(图4)。

2.4.1 星机地综合谣感试验

在我国西北、东北、华北地区分别针对农田、草地、林地等北方典型下垫面,选择相对均匀和相对异质的试验区,各建立 1~2 个 2 km×2 km 至 4 km×4 km、针对不同遥感产品的真实性检验观测场,开展星机地同步的综合遥感试验(图 5),包括航空遥感试验、卫星地面同步观测试验、地面传感器网络与仪器观测矩阵试验;在试验基础上,生成一套多尺度、星机地同步的基准数据集,用于遥感产品真实性检验流程各环节的验证和优化。具体包括:

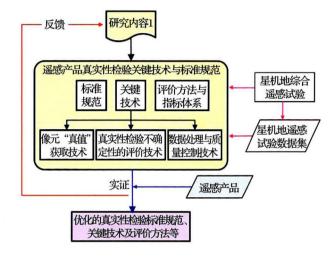


图 4 遥感产品真实性检验技术和标准规范的 星机地试验验证

Fig.4 Verification of key technology and standard by synchronized satellite-aircraft-ground experiment

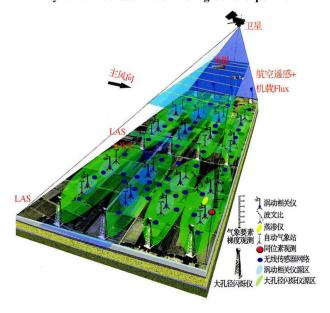


图 5 星机地综合遥感试验的设计
Fig.5 Design of the synchronized satellite-aircraftground experiment

(1) 航空遥感

依托有人机和无人机平台,开展多种遥感传感器的航空飞行试验,获取可见光、红外、微波、激光雷达等机载遥感数据。航空遥感获取的高分辨率影像一方面为地面真实性检验场的采样优化提供必不可少的先验信息,还可为地面观测值升尺度为卫星遥感像元尺度"真值"提供转换桥梁或空间辅助信息。

(2) 传感器网络

基于优化采样方案 ,采用 Zigbee ,GPRS 及微波 等多种无线或有线传输手段集成遥感真实性检验场内的多源异构传感器 ,有效管理密集分布的、多层嵌套的传感器网络 ,例如:叶面积指数、土壤水分、土壤温度及地表温度等;实现观测数据的实时、自动化采集、传输、数据质量控制以及仪器观测行为的远程控制 ,为遥感产品真实性检验提供高质量、时空一致性和误差可度量的地面观测数据 ,并可通过尺度扩展获取像元尺度真值 [42 43]。

(3) 仪器观测矩阵

针对地表异质性较强的西北地区黑河中游 4 km×4 km 真实性检验场 ,基于空间优化模型 ,设计最佳的布设方案(空间位置、架高、朝向等),架设由大孔径闪烁仪、涡动相关仪、自动气象站构成的观测矩阵 ,开展感热通量与蒸散发、GPP 与 NPP、净辐射等的观测 ,通过尺度转换得到遥感像元尺度真值。在观测矩阵内排列 4 组大孔径闪烁仪 ,并尽量垂直于主风向来测量感热通量;同时在大孔径闪烁仪源区内密集地观测净辐射与土壤热通量 ,通过能量平衡余项法得到蒸散发 ,并通过尺度转换获取像元尺度的感热通量与蒸散发的像元真值 [40 44]。

2.4.2 真实性检验关键技术的试验验证

试验验证主要通过同步的地面和航空观测来实现。首先 经过质量检验的地面观测通过尺度扩展得到像元尺度 "真值"(真值1)。在航空测量部分,利用辐射传输正向模型 模拟分析提取敏感的关键参数 结合在地面相同区域获取的高分辨率机载遥感辐射/反射数据和地面传感器网络/观测矩阵测量参数 建立适用于研究区的经验性反演模型。反演模型需要通过像元辐射传输正向模型的检验 从保证精度 满足定量化不确定性评估的需求。通过结合地面测量信息的反演模型 ,能够从航空遥感数据获得高分辨率的遥感产品 同样通过尺度扩展技术,获得像元尺度的"真值"(真值2)。对比真值1和真值2 如果不能满足一致性要求 需要重新评估地面采样方案和尺度转换方法。在满足一致性检验的前

提下 输出最终的像元尺度"真值",作为与卫星遥感产品对比的地面真值(图 6)。

2.4.3 真实性检验的不确定性评价

从星机地遥感试验获取的像元"真值"不可避免地存在一定的误差。需要从以下几方面对真实性检验过程的不确定性进行定量评价,包括:仪器观测误差、空间采样代表性误差、尺度扩展误差、反演模型误差、像元空间配准误差等。同时基于误差积累和传递理论,评估各种误差传递到像元"真值"的量化程度,以及对真实性检验结果的影响;并且结合真实性检验流程的各个环节予以分析,为优化真实性检验的关键技术提供依据。

3 全国遥感产品真实性检验网

遴选部分有遥感观测基础的已有站点,建立标准观测场 根据各自的下垫面特征分别设计待验证变量;在此基础上按照制定的真实性检验标准,开展各具特色的针对卫星遥感产品的真实性检验试验研究,实证标准与关键技术的合理性和可操作性,不断地完善标准规范和检验技术系统;并为最终形成全国遥感产品真实性检验网的原型,示范联合观测方式,以及协作运行与管理的机制(图7)。

(1) 遥感产品全国真实性检验网点设计与建设综合考虑地域特色、下垫面代表性、已有基础条件和观测设施。初期选择了4个遥感站纳入遥感产品全国真实性检验网作为试点,联网协同开展星机地同步观测试验和遥感产品真实性检验工作,包括:中国科学院怀来遥感综合试验站、长春净月潭遥感实验站和黑河遥感试验研究站,以及中国农业科学院呼伦贝尔草甸草原国家野外生态试验站。这4个遥感站分别代表了我国西北地区绿洲农田和高寒草原、华北地区农田、东北地区农田、草原和森林等主要地表类型(表1)。长期规划在全国7个地区改造和建设12个左右观测场作为遥感产品全国真实性检验网的核心观测场,其分布设计如图8所示[45,46]。

在每个遥感站,针对典型下垫面 布设 1~3 个 3 km×3 km 的面向真实性检验的标准观测场,个别区域可酌情布设成 2 km×2 km;对应被动微波卫星遥感产品的验证可考虑布设成 25 km×25 km 至 50 km×50 km 的观测场。针对每个标准观测场,利用多分辨率卫星影像、地面调查,绘制目标区域的观测要素本底,初步确定每个标准观测场的具体位置;获取观测场的各类先验知识,利用异质像元优化采

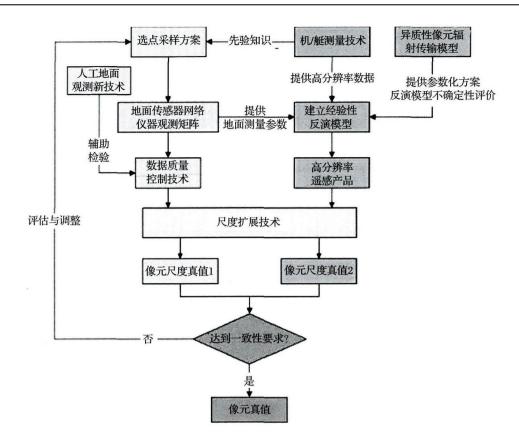


图 6 真实性检验关键技术的试验验证

Fig.6 Verification of the ground truth derivation method at remote sensing pixels scale

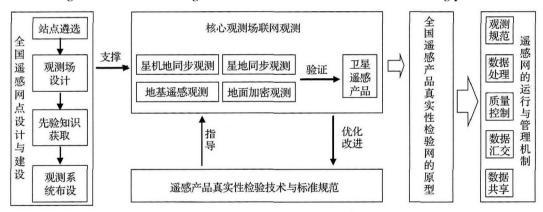


图 7 遥感产品全国真实性检验网原型建设技术路线图

Fig.7 Construction of national validation network of remote sensing products

样方法对观测场内各要素的地面观测系统进行优化布设;在此基础上,进行观测节点和观测设备的布设。为了应对不同分辨率卫星遥感产品的真实性检验,观测系统采用传感器网络(几到几十公里级)、大孔径闪烁仪(公里级)、涡动相关仪(百米级)、地基遥感(米级)和单点等多尺度嵌套的布设方式。

(2) 运行和观测规范的制定

在遥感产品真实性检验技术与标准规范的基础

上,针对全国真实性检验网的联网观测需求,制订以下运行和观测的制度和规范:①站点遴选原则、观测场选择与布设、观测系统布设等观测规范;②真实性检验数据处理标准流程;③真实性检验数据的一致性和完整性检查、自动查错、人工纠错、质量标识符生成等数据质量控制流程;④真实性检验数据汇交和共享制度。

(3) 核心观测场的联网观测

表 1 核心观测场及其功能

Table 1 Core validation sites and their functions

序号	区域	下垫面类型	验证变量	主要验证方法	针对的遥感传感器
1	- 西北地区	绿洲农田	植被生理参数、辐射与能量参数、水文 参数、空气动力学粗糙度	传感器网络 星机地同步试验、星地同步试验、地面加强试验、通量塔、野外高精度差分测量	可见光、近红外、热红外、 主动微波、激光雷达
2		高寒草原	植被生理参数、辐射与能量参数、水文参数、积雪参数、空气动力学粗糙度、 卫星遥感原始影像、DOM、DLG、DEM	同上	可见光、近红外、热红外、 激光雷达
3	东北地区	农田	植被生理参数、辐射与能量参数、水文 参数、空气动力学粗糙度	传感器网络、星机地同步试验、星地同步实验、地面加强试验、车载观测平台、通量塔	可见光、近红外、热红外、被动微波
4		森林	LAI、VI、NPP、Fcover、AOD、ES ↓、 EL ↓ 、Albedo	星机地同步试验、星地同步试验、地面加强试验、通量塔	可见光、近红外、激光雷达
5	华北地区	农田	植被生理参数、辐射与能量参数、水文参数	传感器网络、车载观测平台、飞艇、星 地同步试验、地面加强试验、通量塔、 野外高精度差分测量	可见光、近红外、热红外、 主动微波、激光雷达

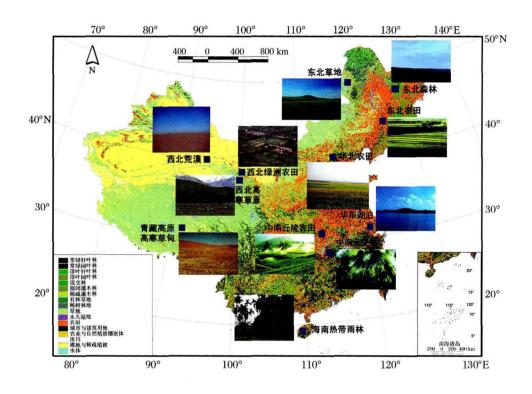


图 8 遥感产品全国真实性检验网观测场布置的长期规划

Fig.8 Long-term planning of the national validation network of remote sensing products

定期开展多观测场的星机地同步观测试验,形成同一遥感产品的全国真实性检验的协同观测能力,逐渐完善协同观测机制,最终实现全国遥感产品真实性检验网的原型建设。

联网试验方式分为星机地同步观测(各站点协同开展)、星地同步观测试验(各站点协同开展)、地基遥感观测试验(各站点独立开展)、地面加密观测

试验(各站点独立开展)等。在充分考虑每个观测场的下垫面和物候特征的基础上,分别对以上观测试验的观测时期、观测要素、观测方案、卫星产品获取计划等方面进行详细设计;针对同一要素的观测,各观测场尽量统筹考虑,同步开展,便于后期的比对研究。在完成数据处理和质量控制后,形成多尺度的地面测量数据集。随后,通过对地面观测结果进

行尺度转换,生成不同空间分辨率(光学:30~1~000 m;被动微波:25~50~km)的像元"真值"。同时,获取同期的相应卫星遥感产品,进行产品的真实性检验和质量报告的编写。

4 总结与讨论

本文通过介绍"遥感产品真实性检验关键技术 及其试验验证"的最新进展,总结了遥感产品真实 性检验研究的关键技术和总体技术流程。概括而 言,本研究形成了一套遥感产品真实性检验标准规 范与技术体系;开展了一次星机地综合试验,实证和 优化了真实性检验的标准规范和关键技术;建立了 一个遥感产品全国真实性检验网原型。具体如下:

- 一套标准规范与技术体系: 形成一套针对陆表定量遥感产品的真实性检验标准及完整技术流程体系,包括像元尺度真值的获取标准与观测技术(地面采样、测量与尺度扩展等)、具体针对各遥感产品的真实性检验标准、地面检验场的选址和布设标准、质量评价方法和指标体系等。
- 一次试验: 选择我国北方 3 个典型区域 联合开展了针对真实性检验的星机地同步试验,以全球和我国陆地遥感产品为对象,系统地实证 20 余种遥感产品的真实性检验方案,通过试验优化了各种标准规范与技术流程。
- 一个网络: 针对全球和我国主要卫星遥感产品,协同建立一个分布在全国北方主要区域,涵盖主要地表类型和气候区,由传感器网络、通量塔、闪烁仪和其他自动观测设备为主,能长期开展卫星遥感产品真实性检验的自动观测网络。

本研究的创新之处主要体现在:

- (1) 突破了把遥感产品真实性检验局限在均质像元的传统思路,汲取空间采样理论、尺度扩展方法以及观测技术等方面的最新进展,在方法和技术上系统地研究了非均质像元真值获取方法,在非均质像元地面采样、尺度转换、不确定性分析等困扰真实性检验的关键科学问题和技术难点上有所突破。
- (2) 充分利用新型观测技术和观测方式,例如传感器网络、仪器观测矩阵、航空遥感等,建立了一个高度自动化的、更客观、更有效、更经济的用于遥感产品真实性检验的观测系统,并首次开展了专门针对遥感产品真实性检验的大型星机地综合遥感试验。
- (3) 更多地依赖于我国各部门已建立的地面台站网络,并根据遥感产品真实性检验的需求和特点,

综合已有的遥感地面观测场/站的优势和条件,建立了一个涵盖我国北方主要自然地理单元和气候区的遥感产品真实性检验网,实现定量遥感基础设施建设的重要跨越。

(4) 集成遥感产品真实性检验网的观测系统与 真实性检验方法,研发遥感产品真实性检验系统,实 时开展遥感产品的真实性检验和质量评估,为遥感 产品在全球资源环境、农业和林业等领域的推广应 用提供保障。

我们在遥感产品真实性检验方面的具体研究进展 集中发表在 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 专栏 "Understanding the Heterogeneity of Soil Moisture and Evapotranspiration"和 Remote Sensing 专刊"The Development and Validation of Remote Sensing Products for Terrestrial, Hydrological, and Ecological Applications at the Regional Scale"。试验相关数据集均发布共享于寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn/hiwater),可免费申请下载。

参考文献(References):

- [1] Justice C , Belward A , Morisette J T , et al. Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface [J]. International Journal of Remote Sensing , 2000 , 21 (17): 3 383-3 390.
- [2] Running S, Baldocchi D, Turner D, et al. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(1): 108-127.
- [3] Baret F, Morissette J, Fernandes R, et al. Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and intercomparison of land biophysical products: Proposition of the CEOSBELMANIP [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7): 1794–1803.
- [4] Morisette J, Baret F, Privette J, et al. Validation of global moderate-resolution LAI products: A framework proposed within the CEOS land product validation subgroup [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7): 1 804-1 817.
- [5] Choi M, Jacobs J, Bosch D. Remote sensing observatory validation of surface soil moisture using Advanced Microwave Scanning Radiometer E, Common Land Model, and ground based data: Case study in SMEX03 Little River Region, Georgia, US[J]. Water Resources Research, 2008, 44(8): 853-861.
- [6] Bosch D, Lakshmi V, Jackson T, et al. Large scale measurements of soil moisture for validation of remotely sensed data: Georgia soil moisture experiment of 2003 [J]. Journal of Hydrology, 2006, 323

- (1/4): 120-137.
- [7] Sanchez N, Martinez-fernandez J, Scaini A, et al. Validation of the SMOS L2 soil moisture data in the REMEDHUS network (Spain) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(5): 1 602-1 611.
- [8] Colliander A, Jackson T, Bindlish R, et al. Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 215-231.
- [9] Morisette J , Privette J , Justice C. A framework for the validation of MODIS land products [J]. Remote Sensing of Environment , 2002 , 83(1/2): 77-96.
- [10] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, et al. Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: Scientific objectives and experiment design [J]. Advance in Earth Sciences, 2008, 23(9): 897-914. [李新,马明国,王建,等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验:科学目标与试验方案[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 897-914.]
- [11] Li Xin , Li Xiaowen , Li Zengyuan , et al. Watershed allied telemetry experimental research [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres , 2009 , 114 (D22) : 2 191–2 196.
- [12] Li Xiaowen. Review of the project of quantitative remote sensing of major factors for spatial-temporal heterogeneity on the land surface [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21 (8): 771-780. [李小文. 地球表面时空多变要素的定量遥感项目综述[J]. 地球科学进展, 2006, 21(8): 771-780.]
- [13] Hu X , Liu J , Sun L , et al. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun (FY) series sensors [J]. Canadian Journal of Remote Sensing , 2010 , 36(5): 566-582.
- [14] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. HJ-IA HIS on-orbit radiometric calibration and validation reseach [J]. Science in China (Series E), 2010, 40(11): 1312-1321. [高海亮,顾行发,余涛,等. 环境卫星 HJ-IA 超光谱成像仪在轨辐射定标及真实性检验[J]. 中国科学: E辑, 2010, 40(11): 1312-1321.]
- [15] Jiang Xiaoguang, Li Zhaoliang, Xi Xiaohuan, et al. Basic frame of remote sensing validation system [J]. Arid Land Geography, 2008, 31 (4): 567-571.[姜小光,李召良,习晓环,等. 遥感真实性检验系统框架初步构想[J]. 干旱区地理,2008,31 (4): 567-571.]
- [16] Dennis B. Turner Review No. 15. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems [J]. Australian Journal of Botany, 2008, 56(1): 1-26.
- [17] Holben B , Eck T , Slutsker I , et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization

- [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 1-16.
- [18] Dorigo W , Wagner W , Hohensinn R , et al. The international soil moisture network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements [J]. Hydrology and Earth System Sciences , 2011 , 15(5): 1 675-1 698.
- [19] Zhang Renhua. Quantitative Thermal-Infrared Remote Sensing Modelling and Ground—Based Experiment Basis [M]. Beijing: Science Press, 2009. [张仁华. 定量热红外遥感模型及地面实验基础[M].北京:科学出版社, 2009.]
- [20] Zhang Renhua, Tian Jing, Li Zhaoliang, et al. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products
 [J]. Science in China (Series D), 2010, 40(2): 211-222.[张仁华,田静,李召良,等.定量遥感产品真实性检验的基础与方法[J].中国科学:D辑, 2010, 40(2): 211-222.]
- [21] Martínez-Fernández J , Ceballos A. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in spain [J]. Soil Science Society of America Journal , 2003 , 67(6): 1 647-1 656.
- [22] Cosh M, Jackson T, Moran S, et al. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 304–313.
- [23] Liu Shaomin, Li Xiaowen, Shi Shengjin, et al. Measurement, analysis and application of surface energy and water vapor fluxes at large scale [J]. Advances in Earth Science, 2010, 25 (11): 1113-127. [刘绍民,李小文,施生锦,等.大尺度地表水热通量的观测、分析与应用[J]. 地球科学进展, 2010, 25 (11): 1113-127.]
- [24] Jia Zhenzhen , Liu Shaomin , Mao Defa , et al. A study of the validation method of remotely sensed evapotranspiration based on observation data[J]. Advances in Earth Science , 2010 , 25 (11): 1 248-1 260. [贾贞贞 , 刘绍民 , 毛德发 ,等. 基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法研究[J]. 地球科学进展 , 2010 , 25 (11): 1 248-1 260.]
- [25] Tan B , Woodcock C , Hu J , et al. The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation , compositing , and band-to-band registration across resolutions [J]. Remote Sensing of Environment , 2006 , 105(2): 98-114.
- [26] Huang D , Yang W , Tan B , et al. The importance of measurement errors for deriving accurate reference leaf area index maps for validation of moderate-resolution satellite LAI products [J].
 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing , 2006 , 44
 (7): 1 866-1 871.
- [27] Wang J , Zhang T , Fu B. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators* , 2016 , 67: 250-256.
- [28] Wang J, Ge Y, Heuvelink G B M, et al. Spatial sampling design for estimating regional GPP with spatial heterogeneities [J]. IEEE

- Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 539-543.
- [29] Ge Y , Wang J H , Heuvelink G B M , et al. Sampling design optimization of a wireless sensor network for monitoring ecohydrological processes in the Babao River Basin , China [J]. International Journal of Geographical Information Science , 2015 , 29(1): 92–110.
- [30] Wang J, Ge Y, Heuvelink G, et al. Upscaling in situ soil moisture observations to pixel averages with spatio-temporal geostatistics [J]. Remote Sensing, 2015, 7(9): 11 372-11 388.
- [31] Kang J, Li X, Jin R, et al. Hybrid optimal design of the ecohydrological wireless sensor network in the middle reach of the Heihe River Basin, China [J]. Sensors, 2014, 14(10): 19 095– 19 114
- [32] Li Xin , Jin Rui , Liu Shaomin , et al. Upscaling research in Hi-WATER: Progress and prospects [J]. Joural of Remote Sensing , 2016 , 20(5): 1 993-2 002. [李新 , 晋锐 , 刘绍民 , 等.黑河遥感试验中尺度上推研究的进展与前瞻[J]. 遥感学报 , 2016 , 20(5): 1 993-2 002.]
- [33] Wang J, Christakos G, Hu M. Modeling spatial means of surfaces with stratified nonhomogeneity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 4 167-4 174.
- [34] Kang J, Jin R, Li X. Regression kriging-based upscaling of soil moisture measurements from a wireless sensor network and multiresource remote sensing information over heterogeneous cropland [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 92-96.
- [35] Gao S , Zhu Z , Liu S , et al. Estimating the spatial distribution of soil moisture based on Bayesian maximum entropy method with auxiliary data from remote sensing [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation , 2014 , 32 (10): 54-66.
- [36] Kang J , Jin R , Li X , et al. Block kriging with measurement errors: A case study of the spatial prediction of soil moisture in the middle reaches of Heihe River Basin [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters , 2016 , 14(1):87-91.

- [37] Wang J, Ge Y, Song Y, et al. A geostatistical approach to upscale soil moisture with unequal precision observations [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11 (12): 2 125-2 129.
- [38] Ge Y , Liang Y , Wang J , et al. Upscaling sensible heat fluxes with area-to-area regression kriging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters , 2015 , 12(3): 656-660.
- [39] Hu M , Wang J , Ge Y , et al. Scaling flux tower observations of sensible heat flux using weighted area-to-area regression kriging
 [J]. Atmosphere , 2015 , 6(8): 1 032-1 044.
- [40] Liu S , Xu Z , Song L , et al. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces [J]. Agricultural and Forest Meteorology , 2016 230/231:97-113.
- [41] Mu X , Hu M , Song W , et al. Evaluation of sampling methods for validation of remotely sensed fractional vegetation cover [J]. Remote Sensing , 2015 , 7(12): 16 164-16 182.
- [42] Jin R, Li X, Yan B, et al. A nested ecohydrological wireless sensor network for capturing the surface heterogeneity in the midstream areas of the Heihe River Basin, China [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(11): 2015-2019.
- [43] Li X , Cheng G , Liu S , et al. Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society , 2013 , 94(8): 1 145-1 160.
- [44] Xu Z , Liu S , Li X , et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres , 2013 , 118 (23): 13 140-13 157.
- [45] Ma M, Che T, Li X, et al. A prototype network for remote sensing validation in China [J]. Remote Sensing, 2015, 7 (5): 5187-5202.
- [46] Wang S, Li X, Ge Y, et al. Validation of regional-scale remote sensing products in China: From site to network [J]. Remote Sensing, 2016, 8(12): 980.

Key Methods and Experiment Verification for the Validation of Ouantitative Remote Sensing Products

Jin Rui^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Ma Mingguo³, Ge Yong⁴, Liu Shaomin⁵, Xiao Qing⁶, Wen Jianguang⁶, Zhao Kai⁷, Xin Xiaoping⁸, Ran Youhua¹, Liu Qinhuo⁶, Zhang Renhua⁴

(1. Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 6. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 7. Northwest Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 8. Hulunbeier State Station of Grassland Ecosystem Field Observation and Scientific Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The validation is an important guarantee of quality, reliability and applicability of Remote Sensing Products (RSPs), and is also the foundation to improve the RSPs accuracy, extend the application domain and strength the application ability. This paper introduced the progresses and lessons learned from a project titled by 'key technology of remote sensing products validation and its experimental evaluation' supported by Ministry of Science and Technology of China. The progresses included: (1) Formulating a series of national standards composed of general methods for the validation of terrestrial quantative RSPs, field-site selection and instrumentation for land surface RSPs, and other 24 individual standards of remote sensing variables; ②Building integral technique process system of RSPs validation; 3 Developing some key methods from optimized spatial sampling, upscaling to validation strategy; @Obtaining the multi-scale satellite-airborne-ground synchronized observation and evaluating systematically the validation standard and techniques; Setting up national validation network for RSPs, exploring multimode allied observation experiment and forming the prototype and operation mechanism for the validation network.

Key words: Quantative remote sensing products; Validation of remote sensing products; Ground truth; Heterogeneous surface; Up-scaling.

Foundation item: Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China "Key techniques for remote sensing products validation and its experiment verification" (No.2012AA12A305); The National Natural Science Foundation of China "Key theory and methods for validation of land surface remote sensing products" (No. 41531174).

First author: Jin Rui (1979-) female "Linfen City Shanxi Province "Associate professor. Research areas include hydrological remote sensing , cryosphere remote sensing , land data assimilation , validation. E-mail: jinrui@lzb.ac.cn