

主办 中国地理学会环境遥感分会
中国科学院遥感与数字地球研究所

出版 科学出版社

JOURNAL OF REMOTE SENSING

遥感学报

2015年 Vol.19 第19卷 No.1 第1期 ISSN 1007-4619 CN11-3841 / TP CODEN YXAUAB





遥感学报

Yaogan Xuebao

第 19 卷 第 1 期 2015 年 1 月

目 次

大气遥感专栏

- 大气 CO₂ 浓度卫星遥感进展 陈良富, 张莹, 邹铭敏, 徐谦, 李令军, 李小英, 陶金花 (1)
北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究
..... 陶金花, 王子峰, 徐谦, 李令军, 范萌, 陶明辉, 苏林, 陈良富 (12)
动态气溶胶模型的 PARASOL 多角度偏振卫星气溶胶光学厚度反演算法
..... 陈澄, 李正强, 侯伟真, 李东辉, 张玉环 (25)
大气 CO₂ 浓度时空变化卫星遥感监测的应用潜力分析 布然, 雷莉萍, 郭丽洁, 刘达, 曾招城 (34)
短波红外 CO₂ 反演过程约束研究及初步反演结果
..... 邹铭敏, 陈良富, 陶金花, 张莹, 范萌, 苏林 (46)
高空飞行器尾焰亚毫米波临边探测模拟与分析
..... 李小英, 陈良富, 国爱燕, 苏林, 贾松林, 陶金花, 张莹 (54)

综述

- 森林地上生物量遥感反演方法综述 刘茜, 杨乐, 柳钦火, 李静 (62)
关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展

- 吴小丹, 闻建光, 肖青, 李新, 刘强, 唐勇, 窦宝成, 彭菁菁, 游冬琴, 李小文 (75)

技术方法

- 临边遥感大气辐射传输的宽光谱快速计算模型 郭晶, 杨春平, 曾丹丹, 叶玉堂, 饶长辉 (100)
元胞自动机最短路径算法优化 任志国, 郭健, 李爱光, 王卉, 阚映红 (108)
根据分形理论与五指标评价体系构建 NDVI 连续空间尺度转换模型
..... 栾海军, 田庆久, 余涛, 顾行发, 黄彦, 胡新礼, 杨闫君 (116)
结合多尺度几何分析和 KICA 的遥感图像变化检测 吴一全, 曹照清, 陶飞翔 (126)
尺度效应的叶面积指数产品真实性检验方法
..... 廖嫣然, 盖颖颖, 姚延娟, 范闻捷, 徐希孺, 闫彬彦 (143)

遥感应用

- 利用 AMSR-E 数据反演华北平原冬小麦单散射反照率 柴琳娜, 吴凤敏, 张立新, 施建成 (162)
基于亮温和 SVM 模型的干球温度推算方法 林奕桐, 叶骏菲, 汪嘉杨, 王永前 (172)

JOURNAL OF REMOTE SENSING

(Vol. 19 No. 1 January , 2015)

CONTENTS

Atmospheric Remote Sensing

- Overview of atmospheric CO₂ remote sensing from space
..... CHEN Liangfu, ZHANG Ying, ZOU Mingmin, XU Qian, LI Lingjun, LI Xiaoying, TAO Jinhua (11)
Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing
..... TAO Jinhua, WANG Zifeng, XU Qian, LI Lingjun, FAN Meng, TAO Minghui, SU Lin, CHEN Liangfu (24)
Dynamic model in retrieving aerosol optical depth from polarimetric measurements of PARASOL
..... CHEN Cheng, LI Zhengqiang, HOU Weizhen, LI Donghui, ZHANG Yuhuan (32)
Temporal and spatial potential applications of satellite remote sensing of atmospheric CO₂ concentration monitoring BU Ran, LEI Liping, GUO Lijie, LIU Da, ZENG Zhaocheng (45)
CO₂ retrieval and preliminary retrieval results from space-based observations in shortwave infrared band ZOU Mingmin, CHEN Liangfu, TAO Jinhua, ZHANG Ying, FAN Meng, SU Lin (53)
Sub-millimeter wave limb sounding simulation of the plume flow of a high-flying vehicle
..... LI Xiaoying, CHEN Liangfu, GUO Aiyan, SU Lin, JIA Songlin, TAO Jinhua, ZHANG Ying (61)

Review

- Review of forest above ground biomass inversion methods based on remote sensing technology
..... LIU Qian, YANG Le, LIU Qinhua, LI Jing (74)
Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters
..... WU Xiaodan, WEN Jianguang, XIAO Qing, LI Xin, LIU Qiang,
..... TANG Yong, DOU Baocheng, PENG Jingjing, YOU Dongqin, LI Xiaowen (92)

Technology and Methodology

- Wide spectrum and rapid calculation model for atmospheric radiative transfer in limb remote sensing
..... GUO Jing, YANG Chunping, ZENG Dandan, YE Yutang, RAO Changhui (93)
Optimal path algorithm enhancement based on cellular automaton
..... REN Zhiguo, GUO Jian, LI Aiguang, WANG Hui, KAN Yinghong (115)
Establishing continuous spatial scaling model of NDVI on fractal theory and five-index estimation system
..... LUAN Haijun, TIAN Qingjiu, YU Tao, GU Xingfa, HUANG Yan, HU Xinli, YANG Yanjun (125)
Change detection of remote sensing images by multi-scale geometric analysis and KICA
..... WU Yiquan, CAO Zhaoqing, TAO Feixiang (132)
Validation methods of LAI products on the basis of scaling effect
..... LIAO Yanran, GAI Yingying, YAO Yanjuan, FAN Wenjie, XU Xiru, YAN Binyan (134)

Remote Sensing Applications

- Estimating single scattering albedo of winter wheat over the North China Plain using AMSR-E data
..... CHAI Linna, WU Fengmin, ZHANG Lixin, SHI Jiancheng (153)
Calculation method for dry-bulb temperature on the basis of brightness temperature and SVM model
..... LIN Yitong, YE Junfei, WANG Jiayang, WANG Yongqian (177)

关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展

吴小丹^{1,2}, 闻建光¹, 肖青¹, 李新⁴, 刘强³, 唐勇¹, 窦宝成¹,
彭菁菁^{1,2}, 游冬琴^{1,2}, 李小文^{1,3}

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;
4. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000

摘要:遥感产品真实性检验是定量遥感基础研究的重要环节, 是客观评价遥感产品精度、稳定性和一致性的重要手段, 对于提高遥感定量化水平、推动和扩展遥感产品的深化应用具有重要的意义。本文基于当前陆表参数遥感产品真实性检验研究的相关成果, 归纳总结了陆表参数遥感产品真实性检验方法, 并就其中的 5 种真实性检验方法, 即基于地面单点测量检验、基于地面多点采样检验、基于高分辨率数据的检验、交叉检验和间接检验, 阐述了各方法的特点、局限性、适用条件。文章在最后探讨了陆表关键参数遥感产品真实性检验评价指标和验证中影响精度评价的关键因素。本文对于遥感产品真实性检验工作的开展和真实性检验系统研发具有重要的指导意义。

关键词:陆表参数, 定量遥感产品, 真实性检验方法, 异质性, 尺度转换

中图分类号:P23 **文献标志码:**A

引用格式:吴小丹, 闻建光, 肖青, 李新, 刘强, 唐勇, 窦宝成, 彭菁菁, 游冬琴, 李小文. 2015. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展. 遥感学报, 19(1): 76–92

Wu X D, Wen J G, Xiao Q, Li X, Liu Q, Tang Y, Dou B C, Peng J J, You D Q and Li X W. 2015. Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters. *Journal of Remote Sensing*, 19(1): 76–92 [10.11834/jrs.20154009]

1 引言

任何测量都需要精度检验, 遥感作为一种宏观观测手段, 其产品必然也需要真实性检验。只有对各种遥感产品精度给出客观、定量的评估, 才能进一步提高遥感产品定量化生产水平, 使其真正成为地球系统科学以及全球变化等重要科学的研究的可靠信息源, 从而提高遥感应用的精度, 扩展其应用范围。真实性检验是指通过将遥感反演产品与能够代表地面目标相对真值的参考数据(如地面实测数据, 机载数据, 高分辨率遥感数据等)进行对比分析, 评估遥感产品的精度, 而且要让应用者相信这种评估的客观性(Justice 等, 2000; 张仁华 等, 2010)。遥感产品真实性检验研究在国际上已得到

密切关注和重视。地球观测卫星国际委员会(Committee on Earth Observing Satellites, CEOS) 的真实性检验工作组(Working Group on Calibration and Validation, WGCV)早在 1984 年在全球范围开展了遥感卫星数据定标和真实性检验工作(Justice 等, 2000)。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了系统的真实性检验(Morisette 等, 2002)。欧空局(ESA)也于二十世纪初启动了欧洲陆地遥感器验证计划(Validation of Land European Remote Sensing Instruments, VALERI)开展遥感产品真实性检验, 涉及 MODIS、VEGETATION、MERIS、POLDER 和 AVHRR 等传感器生产的多种陆地遥感数据产品(Baret 等, 2005)。2000 年, CEOS 的陆地产品真实性检验 LPV

收稿日期:2014-01-23; 修订日期:2014-06-05; 优先数字出版日期:2014-06-12

基金项目:国家自然科学基金重点项目(编号:41271368, 91125003); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(编号:2012AA12A305)

第一作者简介:吴小丹(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感数据产品真实性检验研究。E-mail:upcwuxiaodan@163.com

通信作者简介:闻建光(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事遥感辐射传输建模与试验遥感研究。E-mail:wenjg@radi.ac.cn

(Land Product Validation)工作小组制定陆地遥感数据产品真实性检验的标准指南与规范 (standard guidelines and protocols), 促进了陆地遥感产品真实性检验相关数据和信息的共享和交换 (Morisette 等, 2006)。2005 年, LPV 提出了 BELMANIP (Benchmark Land Multisite Analysis and Intercomparison of Products) 计划, 强调在利用地面测量进行直接真实性检验之外, 还可开展多传感器数据产品间的交叉检验。2011 年, 中国科技部设立了 863 重大项目“星机地综合定量遥感系统与应用示范”, 明确提出将定量遥感产品真实性检验作为重要组成部分, 并基于现有成果研制定量遥感产品真实性检验系统。

在陆表参数遥感产品真实性检验过程中, 需要地面实测数据的支持, 通过测量获取地面像元尺度相对真值作为验证数据。地面观测并不能直接得到像元尺度的真实值, 只能是最佳的逼近。通常我们把这个最佳逼近值视作像元尺度的相对真值。本文对现有的真实性检验方法进行分类总结, 重点阐述各类方法的优缺点、适用性及其对应的代表性地表参数, 并探讨陆表关键参数遥感产品真实性检验评价指标和验证中影响精度评价的关键因素。论文可为定量遥感产品的真实性检验提供方法, 为真实性检验系统研发提供理论支持。

2 真实性检验方法概述

地球表面空间作为一个复杂性很高的巨系统, 在某一尺度上人们观测到的性质、总结出的规律, 在另一尺度上可能有效、可能相似, 而更多需要修正。加之遥感观测信息多空间分辨率的特点, 从定量遥感出发的地学描述必然存在多尺度的问题 (李小文等, 2002)。由于地表空间异质性普遍存在, 因此获得像元尺度的地面观测相对真值是真实性检验的核心。根据地表异质性情况和验证数据的特点, 真实性检验方法可归纳为 5 大类: 基于地面单点测量值的验证; 基于地面多点采样值的验证; 借助高分辨率数据的验证; 交叉验证; 间接验证。5 种检验方法的不同主要体现在地面实测数据的获取方式以及升尺度至待检验产品像元尺度方法的差异。

基于单点检验的方法适合于两种情况: (1) 针对弱尺度效应的陆表参数。弱尺度效应是指大气下行辐射等, 数值大小与下垫面类别差异关系较弱, 尺度效应不明显。(2) 针对存在强尺度效应的陆表参数, 当我们选择进行真实性检验的下垫面是

均质时, 或者地面观测尺度跟待检验产品间不存在尺度差异时, 可不考虑尺度效应的影响, 利用单点测量值直接验证是可行的。

基于地面多点采样数据的检验方法适合于地面实测数据的尺度跟遥感产品之间存在尺度差异的情况, 通过数学方法空间聚合实现空间升尺度, 升尺度后的地面观测值可认为是相对真值。基于高分辨率数据的检验方法适合于地面实测数据与待检验产品尺度差异过大的情况, 这时候地面多点采样难以实现地面——待检验产品之间的尺度匹配, 引入高分辨率数据进行多尺度逐级验证能够在一定程度上减小尺度效应的影响。交叉检验和间接检验适合于没有地面实测数据支持的情况, 评价待检验产品相对于参考产品的精度。

Wen 等人 (2014) 将改进的山地 AB 算法生产的反照率与 MCD43B3 反照率产品进行对比发现, 两者的差异很大, 原因是 MODIS 反照率反演算法忽略了地形的影响, 并不能反映山地真实的反照率; 由于目前还没有获取山地粗分辨率像元尺度地面实测值的方法, 因此定量评估山地反照率产品的精度较困难, 而地形对反照率的影响很明显。考虑到目前的验证工作大都避开复杂地形, 因此本文不考虑复杂地形的遥感产品验证。

综上所述, 这 5 种方法各有特色, 在一定的条件下可以单独作为验证方法。但在实际过程中, 我们更多的是强调多种方法的综合达到陆表参数遥感产品真实性检验的目的。关键陆表参数遥感产品真实性检验主要方法和技术如图 1 所示。

3 真实性检验方法分析

3.1 基于地面单点测量的真实性检验

单点检验是通过在像元内布设地面实测点同步获取地表参数的相对真值, 并将观测值与待检验产品像元值进行对比分析。单点检验的数据一般来源于已有的观测网, 这种验证方法一般适用于弱尺度效应的地表参数, 例如大气类产品, 观测的点数据可以代表一定空间区域, 因此可直接利用观测的点数据进行中低分辨率遥感产品的验证。只有在两种情况下才可以利用地面单点测量值对强尺度效应地表参数产品进行检验: (1) 选择均质地表, 这种情况下陆表参数存在尺度不变性, 其产品可以采用单点检验的方法。(2) 地表不均一, 但地面实测数据的观测尺度跟待检验产品像元尺度接近。

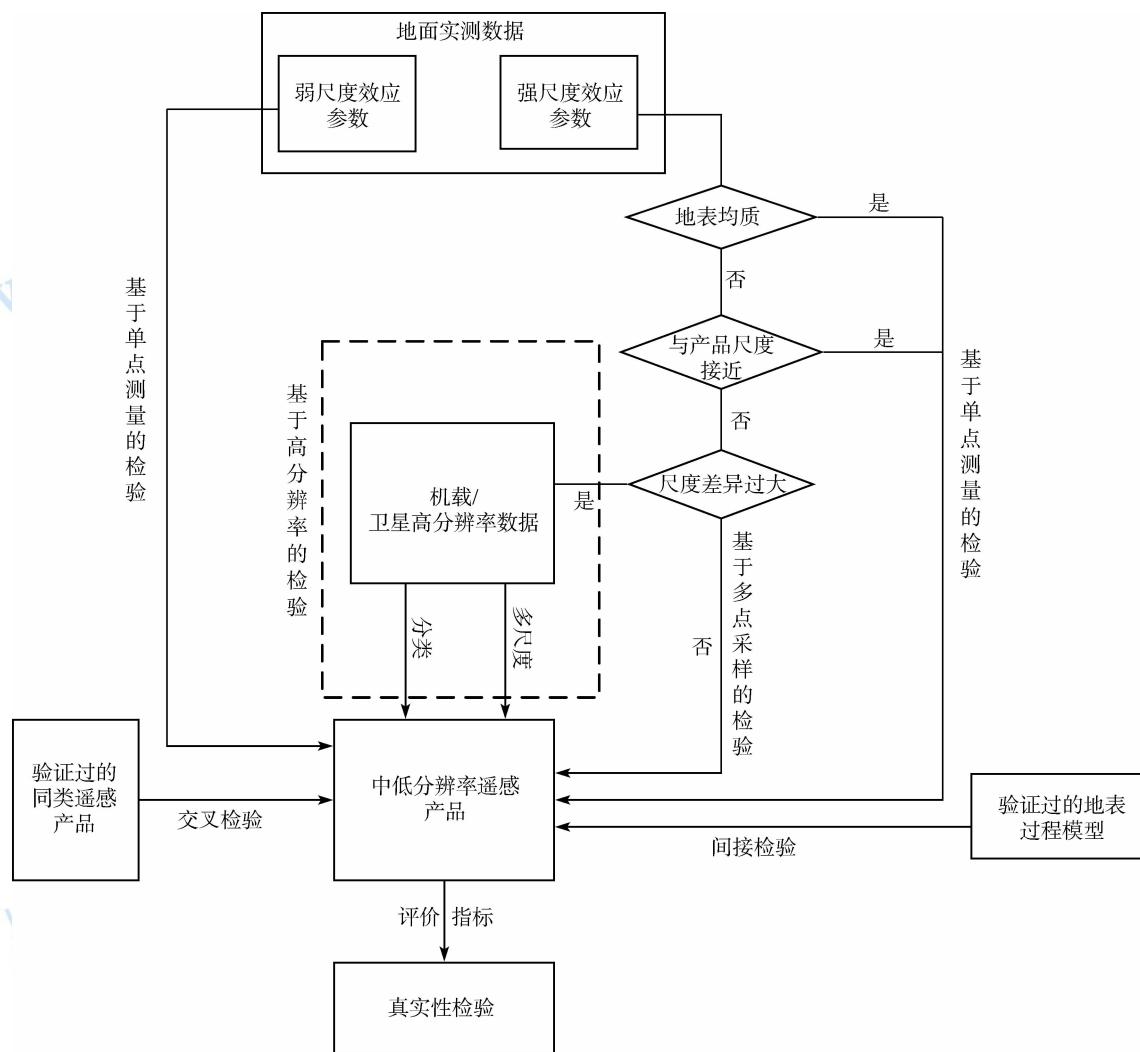


图1 真实性检验主要方法和技术流程

Fig. 1 Flowchart of validation methodology and technology

全球通量观测网或者气象网等网络观测的数据可用于单点测量检验方法,这种检验方法的地面数据具有稳定性和时间连续性,能够有效反映覆盖区域地表变量随时间的变化,便于对陆表参数遥感产品进行时间序列乃至年际变化验证分析。但目前常用的站点观测网络,限于建设与维护成本,在同一中低分辨率像元尺度范围内一般只包含一个站点,很难满足具有足够的代表性用于遥感产品的验证。同时由于观测的位置固定,当周边地表类型发生改变时,站点的空间代表性会改变,造成数据的质量无法保证。基于地面上单点测量值进行真实性检验的代表性陆表参数及其评价指标如表1。

3.1.1 弱尺度效应地表参数遥感产品真实性检验

弱尺度效应参数除在山区由于多次反射效应会表现较大的尺度效应外,在平坦地表没有明显的

尺度差异,可将地面实测值与待检验产品像元估算值进行直接比较。对于长时间尺度的大气产品可以直接用对应时间分辨率内的地表观测来验证,但在时间匹配上要求观测时间和传感器过境时间差不超过一个小时;在位置匹配时要考虑到产品的空间配准精度和临近像元效应。空间配准误差会引起地表观测位置和最佳对应像元之间的位置偏移,进而引起遥感产品验证的误差。目前的地表辐射观测数据稳定且精度较高的是全球分布的BSRN (Baseline Surface Radiation Network), GEBA (The Global Energy Balance Archive), 以及美国的SURFRAD (Surface Radiation network)。当前全球气溶胶光学厚度观测数据较好的是气溶胶自动观测网AERONET (Aerosol Robotic Network) 和世界气象组织WMO (Word Meteorological Organization) 的全球大气观测计划GAW (Global Atmosphere Watch)。

表 1 利用单点测量进行检验的代表性地表参数
Table 1 Validation method based on a single point measurement and typical parameters

分类	适用条件	代表性陆表参数	文献中常用的评价指标	参考文献
弱尺度效应参数	适用于所有条件	向下短波辐射	R^2 、Bias、MBE、MRE 和 RMSE、散点图、误差百分位图、误差直方图和误差概率分布图	(Gautier 等,1980;Pereira 等,1996)
		向下长波辐射		(Izquierdo 等, 2003; Marty 等, 2003)
		净辐射		(Bisht 等, 2005; Bisht 和 Bras, 2010)
		光合有效辐射 PAR	Bias 和 RMSE	(陈良富 等, 2007; Gueymard, 2008)
		气溶胶	Bias、MRE 和相关性	(Remer 等, 2005; Kahn 等, 2005)
单点检验	均质地表	归一化植被指数	Bias 和 RMSE	(Huete 等, 2002)
		增强型植被指数	Bias 和 RMSE	
		抗大气植被指数	Bias 和 RMSE	
		反照率	Bias、RMSE 和绝对差值图	(Jin 等, 2003; Stroeve 等, 2005)
		BRDF	Bias、RMSE 和绝对差值图	(Salomon 等, 2006)
		叶面积指数	RMSE 和 MAPE	(Fensholt 等, 2004)
	强尺度效应参数	蒸散发	Bias、RMSE、MRE 和 MAPE	(Jia 等, 2012; Fisher 等, 2011)
		潜热通量	Bias、RMSE、MRE 和 MAPE	(Jia 等, 2012; Fisher 等, 2011)
		感热通量	Bias、RMSE、MRE 和 MAPE	(Jia 等, 2012; Fisher 等, 2011)
		NPP	Bias、MRE、RMSE、判定系数和相关系数	(陈良富 等, 2008)
		积雪二值产品	误差矩阵、总体精度、用户精度、生产者精度和 Kappa 系数	(Parajka 和 Blöschl, 2006; Parajka 等, 2012; Che 等, 2008; Simic 等, 2004)
		反照率	Bias、RMSE 和绝对差值图	(Wang 等, 2010; Wang 等, 2008b)
		地表温度	Bias 和 RMSE	(Wang 和 Liang, 2009; Wang 等, 2008)
		发射率	Bias 和 RMSE	(Wang 和 Liang, 2009; Wang 等, 2007)
		土壤水分	时间序列相关性	

3.1.2 强尺度效应地表参数遥感产品真实性检验

地表空间异质性使相对真值受尺度效应的影响。Li 和 Reynolds(1995)提出一个定量的、便于描述和应用的空间异质性的概念,将空间异质性定义为系统或者系统属性在空间上的复杂性和变异性。空间异质性是生态学,尤其是景观生态学的一个重要的概念,可采用地统计学的理论和方法如变异函数(Román 等,2009;Román 等,2013;Wang 等,2014;Cescatti 等,2012)进行分析。衡量变异程度的指标有基台值、块金值、各项异性比和分维数。在景观中,地形、水分等因子导致的空间异质性常常是各向异性的,自然过程在不同方向上控制着不同的变异,明显影响景观的结构,各向异性如果较高,意味着空间异质性程度也较高(李哈滨 等,1998)。Román 等人(2009)提供了评价空间代表性和空间异质性的指标,并认为观测的景观可根据组分的空间分布和结构上的一致性分为空间代表性和空间异质性两种情况:具有空间代表性的地表指的是相

对均质的地表,存在空间异质性的地表即为非均质地表。

(1) 均质地表检验方法。针对强尺度效应的地表参数遥感产品,基于地面单点测量值进行检验要考虑点观测与遥感像元的尺度差异。可选相对均质的地表,虽然是点观测,但由于像元覆盖区域内地物类型比较单一,空间分布相对均匀,单点观测可以代表像元尺度测量值。Cescatti 等人(2012)借助 ETM 数据评价 FLUXNET 站点的代表性,在相对均质的地表,站点的空间代表性好,基于单点验证的方法对 MODIS 反照率产品进行评价,结果显示 MODIS 与地面实测数据保持一致,相关系数为 0.828;但在地面异质性较强的站点,站点代表性很差,MODIS 与地面站点值差异很大,主要是因为地面实测数据所能代表的范围跟待检验产品像元之间存在尺度不匹配的问题。因此,单点观测区域的代表性决定了是否可以直接用该点进行验证(Fensholt 等,2004; Jin 等,2003)。通常高分辨率遥感数据的引入,可以对点观测数据的代表性进行评价

(Fensholt 等, 2004; Jin 等, 2003), 只有当点数据对遥感像元具有代表性的情况下, 才可以直接将地面台站数据和待检验产品像元值进行对比。

(2) 非均质地表检验方法。当地表非均质的情况下, 基于地面单点测量值进行验证的前提是地面实测数据的尺度跟待检验产品像元尺度接近, 尺度误差可以忽略。Wang 等人(2014)用 Landsat ETM+ 数据和半方差函数评价站点的代表性, 并将地面实测值与 MODIS 反照率产品进行对比, 结果显示, 在空间代表性比较好的站点, 地面实测值跟 MODIS 值匹配得很好: 处于休眠季节, 农作物和森林的产品精度 RMSE 分别小于 0.03 和 0.02; 处于积雪覆盖时期, 农作物、森林的产品精度 RMSE 分别小于 0.05 和 0.025; 但在异质性较强的站点, 地面实测值与 MODIS 反照率产品值差异很大。在异质性站点, 作者分别将地面实测值(覆盖范围为 126 m)与聚合到不同空间分辨率(120 m、510 m 和 990 m)的 ETM 数据进行对比, 结果证明地面实测值与 120 m 分辨率的聚合值很接近, 随着聚合值的空间分辨率依次降低时, 两者的差异越来越大; 而 MODIS 产品值与聚合到不同空间分辨率(120 m、510 m 和 990 m)的 ETM 数据值都很接近, 但与地面实测的值差异很大。从验证结果可以看出, 在空间代表性好的站点, 地面实测的值可以代表像元尺度上的相对“真值”; 在空间异质性强的站点, 地面实测的值仅能代表站点所能覆盖范围内的值, 只有当站点覆盖范围跟待检验产品像元尺度接近时, 才可以用地面实测值对待检验产品进行验证, 否则地面实测值不能对待检验产品值直接进行对比。

目前, 在非均质地表进行单点检验的地面数据通常来源于两类, 一类是塔架观测数据, 另一类是基于足迹观测的仪器数据。塔架观测的高度, 使其覆盖地面的范围跟待检验产品像元大小接近, 避免尺度差异。如利用某类型辐射表进行反照率观测, 安装高度为 1 m 时, 观测的半径为 8 m, 安装于高度为 4 m 的塔上, 其观测范围半径为 32 m, 可以对空间分辨率为 30 m 的反照率产品直接对比验证。与塔上观测类似, 基于足迹(footprint)观测仪器观测的范围可达数十米甚至是百米, 当该覆盖范围与待检验产品像元覆盖范围相当时, 不存在尺度效应的影响, 例如 COSMOS 宇宙射线土壤水分观测仪, 可观测 600 m 直径范围内的总体水分含量。因此, 在非均质区域, 无论是基于塔架的观测还是基于足迹的观测仪器, 采用单点检验都是因为他们观测的范围

可以与待检验产品像元尺度匹配。

3.2 基于地面多点采样数据的检验

基于地面多点采样数据进行真实性检验, 数据获取方式是在一定的区域(通常需要满足验证产品像元的 3×3 倍大小)按照某种规则布设多个样点分别观测, 以捕捉样区内的异质性, 然后通过数学或物理的方法将多点观测的值转换到遥感产品的像元尺度上, 得到像元尺度的相对真值从而对待检验产品进行验证。Susaki 等人(2007)采用基于地面多点采样数据的算术平均值验证 MODIS 反照率产品在日本水稻田的精度, 并且随着地面异质性程度的增加, 采样点的数量也随着增加以捕捉反照率的空间变化, 验证结果表明 MODIS 反照率产品在日本水稻田的精度近似为 0.026, 相对误差为 15.1%。

这种验证方法需要大量的地面采样点, 因此会消耗较多的人力和物力。地面样区内如何布点, 点观测的数据通过何种方式聚合到像元尺度都是目前需要解决的难点。近年来, 随着通信技术的发展, 无线传感器网络观测也被用在地面多点采样的试验中, 实现长时间稳定的多点同步观测, 为真实性检验提供比较可靠的像元尺度的相对真值。基于地面多点采样进行真实性检验的代表性陆表参数及其评价指标如表 2 所示。

在均一地表很难满足的情况下, 通过在样区内多点观测获取像元尺度相对真值。这种验证方法强调尺度不匹配问题的初步解决。样区内采样点的分布一般根据地表的异质性和空间结构特征进行优化, 并利用数学关系进行尺度上推。对于均质地表, 利用地面多个点测量的算术平均值作为像元尺度相对真值与待检验产品估算值进行对比(李新等, 2008)。对于异质性存在但空间结构较为规则的地表(如荒漠), 则将植被覆盖度作为尺度上推的一个核心因子, 按不同类型(如植被和裸露地表)的面积比例加权平均获得像元尺度上相对真值(Hufkens 等, 2008)。对于异质性强且没有明显结构特征的地表, 则采用地统计方法将点观测优化插值为可与遥感观测相互比较的格网化数据(Govaerts, 1997)。

限制地面多点采样进行遥感产品真实性检验的另一问题是如何保证多点采样的一致性。除了多点采样的仪器相互比对和定标外, 需要考虑观测时间上的同步和准同步问题。对于数天内相对稳定

表 2 利用多点采样数据进行检验的代表性地表参数

Table 2 Validation method based on multipoint measurement and typical parameters

适用条件	代表性陆表参数	文献中常用的评价指标	参考文献
对于均质地表，多个点简单算术平均；对于非均质地表，可引入先验知识，用数学方法将多点升尺度到像元尺度	地表冻融	Kappa 系数、冻土分类精度、融土分类精度和整体分类精度	(Zhang 等, 2003; 晋锐 等, 2008)
	土壤水分	Bias、MRE、RMSE、Kappa 系数和时间序列相关性	(Gruhier 等, 2010; Crow 等, 2012; Jackson 等, 2010; Rüdiger 等, 2009)
	归一化植被指数	Bias、RMSE 和 MAPE	(Huete 等, 2002)
	增强型植被指数	Bias、RMSE 和 MAPE	(Huete 等, 2002)
	叶面积指数	RMSE 和 MAPE	(Cheng, 2008; Huskens 等, 2008; 杨飞 等, 2010; Qu 等, 2014)
	土地覆盖利用	分类产品：总体精度、使用者精度、生产者精度和 Kappa 系数	(Stehman 等, 2012)
		比例产品：RMSE、相关系数	(Mayaux 等, 2006)
	植被覆盖度	Bias、RMSE、绝对误差的数值分布、绝对误差的空间分布和绝对误差的时间分布	(Gitelson 等, 2002)
	地表温度	Bias 和 RMSE	(Coll 等, 2007; Wan 等, 2004, 2002)
	地表发射率	Bias 和 RMSE	(Coll 等, 2007)
	反照率	Bias、RMSE 和绝对差值图	(Susaki 等, 2007)
	NPP	Bias、MRE、RMSE、判定系数和相关系数	(Turner 等, 2006)
	雪水当量	Bias、RMSE 和 MRE	(Dai 等, 2012)
	积雪比例产品	Bias、RMSE 和 MRE	(Hall 和 Riggs, 2007)

的地表参数，如 LAI、植被覆盖度等，可采用卫星过境前后几天的地面观测数据（李新 等, 2008）。对于随时间变化比较快的地表参数，比如气溶胶、蒸散发等，应采用与卫星过境时刻同步的地面观测数据，一般要求观测时间与传感器过境时间差应不超过半个小时。而对于瞬时变化的物理量，如地表温度，测量时间要与卫星或飞机过境时间严格同步，一般要求在过境前后 5 min 内完成测量，这时人工观测显然较难实现，因此无线传感器网络提供的自动连续观测数据就显得尤为重要。通常做法是在传感器过境时刻，利用无线传感器在布设的点上同时采集数据，结合利用便携式野外发射率测定仪测量的发射率数据和无线电探空仪获得的探空数据，获取像元尺度地表温度的相对真值。

3.3 基于高分辨率数据的检验

无论是基于地面单点测量检验还是基于多点测量检验，由于自然界地表普遍存在异质性，当像元尺度过大时，地面观测的数据始终还是点观测数据。即使利用多点观测，在观测点数不够充分的情况下，仍较难获得像元尺度的相对真值，这种情况

下，不能直接将地面测得的结果与卫星产品像元值进行对比。为了能较好地验证中低分辨率遥感产品，引入高分辨率遥感数据作为桥梁，由地面观测数据验证高分辨率遥感产品，进而由高分辨率遥感产品验证低分辨率遥感产品是目前遥感产品真实性检验的一种主流方法，即多尺度逐级验证。借助高分辨率数据进行真实性检验有两种形式：(1) 将高分辨率数据作为地面实测数据到待检验产品像元之间的尺度转换桥梁，进行多尺度的逐级验证；(2) 基于高分辨率数据分类基础上，通过空间聚合得到中低分辨率像元尺度的相对真值，对待检验产品进行验证。基于高分辨率数据进行真实性检验的代表性陆表参数及评价指标见表 3。

3.3.1 基于高分辨率数据的多尺度检验

针对异质性地表，在进行遥感产品真实性检验时，引入高分辨率数据建立地面—中低分辨率像元的尺度转换桥梁，形成了地面—高分辨—低分辨率多尺度的逐级验证策略（Liang 等, 2002; 焦子锑 等, 2005; Huang 等, 2006; 张仁华 等, 2010）。Lucht 等人（2000）指出，当地表存在空间异质性时，地面需

表 3 引入高分辨率数据进行检验的代表性地表参数

Table 3 Validation method based on a high resolution remote sensing data and typical parameters

分类	适用条件	代表性陆表参数	文献中常用的评价指标	参考文献
引入高分辨率数据的检验 引入高分辨率进行多尺度逐级检验	异质性地表;像元尺度过大,像元尺度内多点采样有困难	蒸散发	Bias、RMSE、MRE、MAPE 和相关系数	(钱志奇等,2011)
		感热通量	Bias、RMSE、MRE、MAPE 和相关系数	(钱志奇等,2011)
		潜热通量	Bias、RMSE、MRE、MAPE 和相关系数	(钱志奇等,2011)
		归一化植被指数	Bias 和 RMSE	
		增强植被指数	Bias 和 RMSE	
		叶面积指数	AE、RMSE 和相关系数	(Tan 等,2005;Baret 等,2005;Qu 等,2014)
		植被覆盖度	Bias、RMSE、绝对误差的数值分布、绝对误差的空间分布和绝对误差的时间分布	(Baret 等,2005)
		反照率	Bias、RMSE 和 MRE	(Liang 等,2002;焦子锐等,2005)
		BRDF	Bias、RMSE 和 MRE	(Liang 等,2002)
		地表反射率	Bias、RMSE 和 MRE	(Liang 等,2002)
利用高分辨率分类数据进行检验	像元尺度过大,多点采样有困难	雪水当量	Bias、RMSE 和 MRE	
		土壤水分	Bias、MRE 和 RMSE	(Pellarin 等,2006)
		积雪比例产品	RMSE、Bias 和 MRE	(Hall 和 Riggs,2007)
		积雪二值产品	误差矩阵、总体精度、用户精度、生产者精度和 Kappa 系数	(Klein 和 Barnett,2003)
		植被精细分类	总体精度、使用者精度、生产者精度和 Kappa 系数	
		土地覆盖利用	分类产品:总体精度、使用者精度、生产者精度和 Kappa 系数	(Cohen 等,2009)
		比例产品:RMSE 和相关系数		

要大量的样方捕捉反照率的空间变异,才能代表像元范围内的反照率的均值。但当地面大量采样难以实现时,需要借助高分辨率数据进行多尺度验证。多尺度验证的技术流程一般如图 2 所示。Liang 等人(2002)最早引入高分辨率数据信息,作为地面数据与卫星数据之间尺度转换的桥梁,具体做法是利用地面实测数据标定 ETM 反照率;然后用经过标定的 ETM 产品聚合到 MODIS 像元尺度对 MODIS 产品进行验证,验证结果表明 MODIS 产品是准确的,满足绝对精度小于 0.05 的要求。基于高分辨率数据进行多尺度逐级检验的优点是:通过相近的尺度转换,在一定程度上解决了地面点—中低分辨率像元之间的尺度不匹配问题。但由于检验过程中引入高分辨率数据,考虑到传感器之间存在不一致性、高分辨率数据反演陆表参数自身的精度评估问题、以及尺度转换方法与评价方法客观性等因素的影响,遥感产品多尺度真实性检验的科学问题还需要进一步解决。

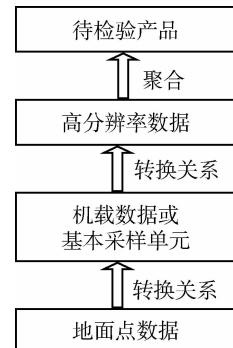


图 2 借助高分辨率的多尺度验证技术流程

Fig. 2 Technology flowchart of multiscale validation based on high resolution remote sensing data

3.3.2 基于高分辨率数据分类的检验

基于高分辨率遥感数据分类进行真实性检验的技术流程如图 3 所示。利用重采样的方法将高空间分辨率的分类图聚合到待检验产品像元尺度上,并与待检验产品像元值进行对比。如积雪比例产

品的检验可利用高空间分辨率的遥感数据获取二值积雪图,然后利用重采样的方法将高空间分辨率的二值积雪图转换为与待检验产品像元尺度一致的积雪比例图,获得与待检验产品空间分辨率一致的积雪比例图,进行真实性检验。积雪二值产品的检验是通过高分辨率影像获取二值积雪图,并将其作为相对真值,通过重采样方法将其转换为与待检验产品相同空间分辨率的二值积雪图,并与待检验产品值进行对比。而土地利用/覆盖产品的真实性检验则是将高分辨率数据结合野外调查数据进行监督分类,得到高分辨率土地利用/覆盖产品。利用重采样的方法将高分辨率土地利用/覆盖产品聚合到待检验产品像元尺度上。对于分类产品,以面积最大的类型(大于60%,小于该60%的像元不参与检验)为粗分辨率栅格单元的类型。对于比例产品,直接计算粗分辨率栅格单元内相应类型的比例,实现空间聚合。用聚合后的高分辨率土地利用/覆盖产品与待检验产品进行比较,进行精度评价。

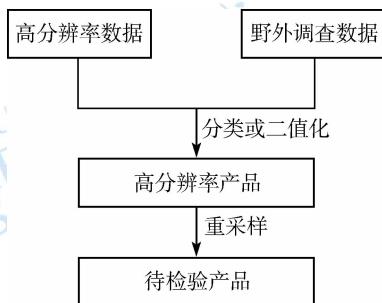


图3 借助高分辨率的分类检验技术流程

Fig. 3 Technology flowchart of validation based on a high resolution imagery land surface type

综合利用地面测量数据和高分辨率遥感数据的真实性检验方法的优点是可以较精确获得低分辨率像元内地表类型的详细信息,便于准确理解低分辨率像元的相对真值。但真实性检验结果依靠高分辨率遥感数据的分类结果,分类结果的不精确以及聚合精度会严重影响真实性检验的可靠性。

3.4 交叉检验

利用地面实测数据进行真实性检验是以像元为基本单元的直接检验方法,直接验证受到时间和资源的限制,现有的验证数据集并不能很好地代表陆表参数的空间和季节性变化(Baret等,2006)。因此,在陆表参数遥感产品快速发展的今天,现有地面观测数据不能满足陆表参数遥感产品验证的

需求。引用已知精度的遥感产品作为参考数据进行中低分辨率遥感产品的验证是一种替代方法。所谓交叉验证是在没有地面测量数据的支持下,将时相接近的不同产品统一到相同的投影坐标系和空间分辨率下,通过不同产品之间的相互比较来评估产品的精度(Weiss等,2007),验证的精度是相对于参考产品的相对精度。例如,Jin等人(2003)将MODIS数据与AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)及ERBE(Earth Radiation Budget Experiment)的反照率历史数据进行了比较,偏差分别为0.016和0.034。Chen等人(2008)用MODIS反照率对MISR反照率进行了验证,并对MISR本身的黑空和白空反照率互相比较,除了在一些冰雪站点外,MISR黑空反照率与MODIS黑空反照率均很接近。交叉验证需要获取时间、地理位置、空间分辨率一致的参考产品,时间上应选择时间一致或者接近的遥感产品;空间上要考虑两种产品的空间分辨率是否一致,若不一致,则将高分辨率产品聚合到待检验产品的像元尺度上;此外,还要注意波段上是否一致,若不一致,则需要利用波段响应函数做波段转换。

交叉检验的优点在于成本较低,在没有地面实测数据时,可以对产品精度和准确性做出评价。但只能获取产品的相对精度,真实性检验的结果取决于参照产品的准确性。验证数据主要来源于同类且精度已得到认可的遥感产品。验证过程中需要考虑不同传感器之间波段差异、波谱响应差异、时空分辨率等因素的影响。利用交叉检验的代表性陆表参数有:向下短波辐射(Thornton和Running,1999)、向下长波辐射(Marty等,2003)、光学有效辐射PAR(林忠辉等,2002)、净辐射(Kaminsky和Dubayah,1997)、气溶胶(Knapp等,2002;Myhre等,2004;Wang和Christopher,2003)、土壤水分(Rüdiger等,2009;Gruhier等,2010;Dirmeyer等,2004)、净初级生产力NPP(Turner等,2006;陈良富等,2007;Cohen等,2009)、蒸散发(French等,2005;Tang等,2011;Gao和Long,2008)、植被指数(于惠等,2011;Huete等,2002)、叶面积指数(Garrigues等,2008;Cohen等,2009)、植被覆盖度(李晓松等,2010)、地表温度(周婷婷和陈文惠,2011)、地表发射率和反照率(Salomon等,2006;Schaaf等,2008)、土地覆盖利用(Cohen等,2009)、积雪二值产品(Klein和Barnett,2003)、积雪比例产品(Frei等,2012;Hall和Riggs,2007)、雪水当量(Dai等,2012)、南极冰盖厚

度(崔祥斌等,2009)、南极接地线(王清华等,2002; Yamanokuchi 等,2005)以及南极边缘线(Boccippio 等,2000)等。

3.5 间接检验

间接检验是在直接检验和交叉检验都无法满足的情况下采取的一种相对精度的评价方法。通常需要借助已知精度的模型,待检验的遥感产品作为模型的输入,模型输出作为可以验证的参量,通过输出参量的精度间接评价输入遥感产品的精度。其优点是在缺乏地面数据或者相对应的已知精度的遥感产品时,可以对产品精度和准确性做出评价。但由于检验过程中借助了已有模型作为中间桥梁,因此模型的精度和稳定性直接决定了遥感产品的相对精度,检验过程相对复杂,因此很少在实际的验证工作中使用。基于间接检验的代表性地表参数有气溶胶、光合有效辐射 PAR 和雪水当量等。

如气溶胶的间接验证是利用估计的光学厚度数据对遥感数据进行大气订正得到地表反射率,将该数据与地面实测的反射率数据进行比较,误差最小时的气溶胶光学厚度就是相对真值,从而间接验证气溶胶光学厚度产品。雪水当量的间接检验是以遥感雪水当量或者雪深产品作为输入变量,模拟得到卫星观测的亮度温度,调整遥感产品输入值,计算卫星观测和模型模拟的多个波段的亮度温度之间的误差,认为该误差最小时的遥感产品输入值为像元相对真值,从而达到检验的目的。

4 评价方法

4.1 评价指标

评价指标是准确量化遥感产品精度的重要手段,为了能表现不同陆表参数遥感产品的精度,发展了不同的评价指标,常见的有平均偏差 Bias、平均绝对误差 AE、均方根误差 RMSE、平均相对误差 MRE、平均绝对百分比误差 MAPE 和相关系数 Corr,这些指标在不同类陆表参数遥感产品评价中体现了重要的作用。Bias 通常用来描述观测值与估算值之间的平均差异;AE 由于将观测值与估算值的差值绝对值化,不会出现正负相抵消的情况,因此能更好地反映估算值与观测值偏离的实际情况;RMSE 表示遥感估算值相对于观测值的偏离程度,可反映遥感估算结果的离散程度;MRE 和 MAPE 都

描述了估算值偏离观测值的相对程度;相关系数 Corr 可以表示观测值与估算值之间的一致性状况或接近程度(Jia 等,2012)。

$$\text{Bias} = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / n \quad (1)$$

$$\text{AE} = \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| / n \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad (3)$$

$$\text{MRE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \quad (4)$$

$$\text{MAPE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{\bar{O}} \quad (5)$$

$$\text{Corr} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

式中, P_i 为遥感估算值, O_i 为地面观测值, \bar{P} 、 \bar{O} 分别为遥感估算值和地面观测值的均值, n 为样本数。

以上几个评价指标主要用来评价有精确数值的陆表参数遥感产品,如反照率、叶面积指数、地表温度和土壤水分等,而对于陆地表层类别型遥感产品,精度主要体现在分类的准确性,这类遥感产品的评价指标主要有误差矩阵、总体精度、用户精度、生产者精度和 Kappa 系数等。

4.2 评价方式

要全面反映一个陆表参数遥感产品的精度、稳定性和适用性,在真实性检验的过程中,不能忽略陆表参数遥感产品精度在时间和空间变化上的差异,因此,空间上代表性和时间上周期性是评价陆表参数遥感产品质量的最小单元。

空间上,在遥感产品的覆盖范围内,考虑不同的下垫面特征(农田、森林、草地、裸土和冰雪等)和地形条件分别评价。时间上,选择一个完整的时间周期,以表现遥感产品的稳定性和植被不同生长季节条件下的精度。很多最基本的陆表参数如叶面积指数、反照率和地表温度的反演算法精度都与地表类型相关,因此对于遥感产品真实性检验而言,空间上要求覆盖典型地表,时间上要求有一定的周期,以精确体现遥感产品精度、时空尺度上的适用性和稳定性。

5 验证方法对比及实例分析

陆表参数的真实性检验方法与参数的尺度效

应和地表的异质性有关,本文以反照率产品真实性检验方法为例选择两种不同异质性地表情况说明不同验证方法的特点。在陆表反照率产品验证方法中常见的是基于单点测量的验证、基于多点采样的验证和基于高分辨率的多尺度验证。交叉验证和间接验证由于只能评价遥感产品相对于参考产品的精度,因此不详细介绍。分别以2011年和2012年黑河流域地面反照率观测试验为例介绍基于单点测量的验证、基于多点采样数据验证和基于高分辨率的多尺度验证的特点,分别用地面多点采样数据和地面自动气象站AWS观测的反照率数据验证MCD43B3反照率产品。

黑河流域(37.7°N — 42.7°N , 97.1°E — 102.0°E)地表景观以山地、森林、草原、绿洲和戈壁为主(图4)。2011年的实验是选择异质性较弱的10种以沙漠、绿洲、草地、戈壁和盐碱地覆盖为主的代表性样区,每个样区覆盖 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的面积。在每个样区内选9个样方(受环境限制,个别站点选5个样方),样方大小大约为 $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 。利用2011年的反照率实测数据进行单点验证时是选样区中心样

方的值作为像元尺度反照率的相对真值;进行多点验证时是取所有样方的均值作为像元尺度相对真值。2012年的试验是选异质性较强的地表,覆盖地面 $5.5\text{ km} \times 5.5\text{ km}$ 的范围,地表类型为玉米地、防护林和人工建筑;地面观测数据是16个站点的AWS观测的短波辐射,仪器架设高度为3 m(观测视场直径约26 m),对应与低分辨率像元内,覆盖一个站点。实验区及其反照率观测技术等可参考(Li等,2013; You等,2014)。

图5和图6分别是黑河流域中游绿洲核心实验区异质性较强地表的反照率验证和黑河流域荒漠、沙漠等异质性较弱地表的MODIS反照率产品验证。在异质性较强地表条件下,以单点观测的反照率作为MODIS像元尺度反照率的相对真值进行验证,发现MODIS反照率与地面实测反照率值相差很大,平均绝对百分比误差为19.04%,其主要原因是MODIS像元尺度内地表异质性较大,单点观测的反照率代表性不够,两者尺度不匹配。因此,在这种异质性地表情况下,利用单点观测的反照率验证MODIS产品存在较大的误差。

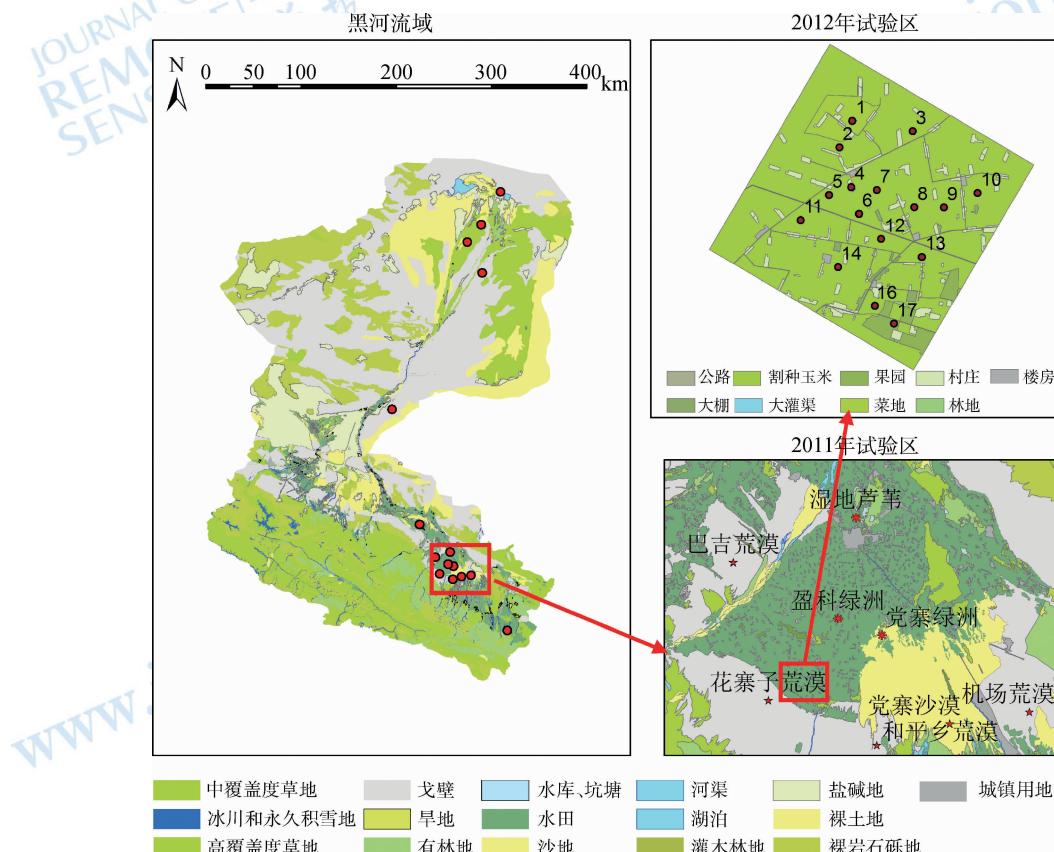


图4 黑河流域试验区分布

Fig. 4 Experimental sites in the Heihe River Basin, China

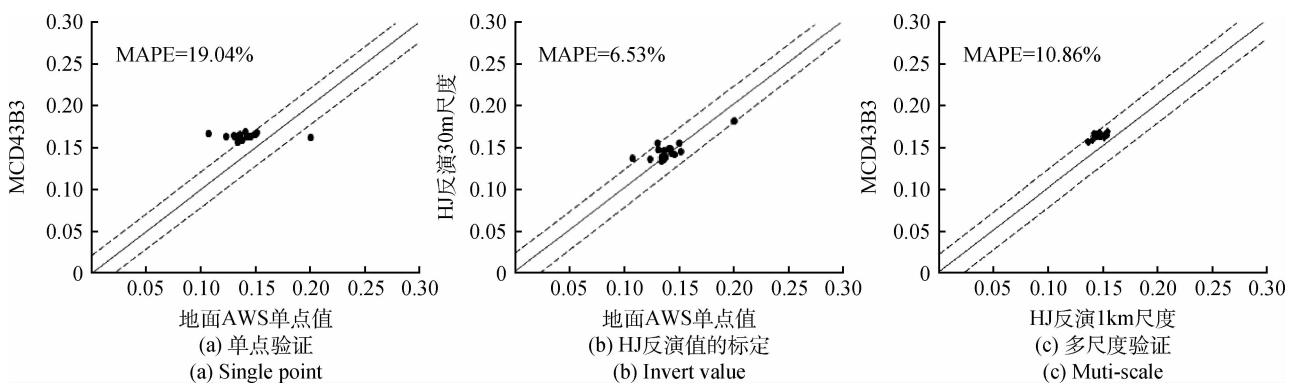


图5 异质性较强地表条件下的验证

Fig. 5 Validation results over heterogeneous land surface

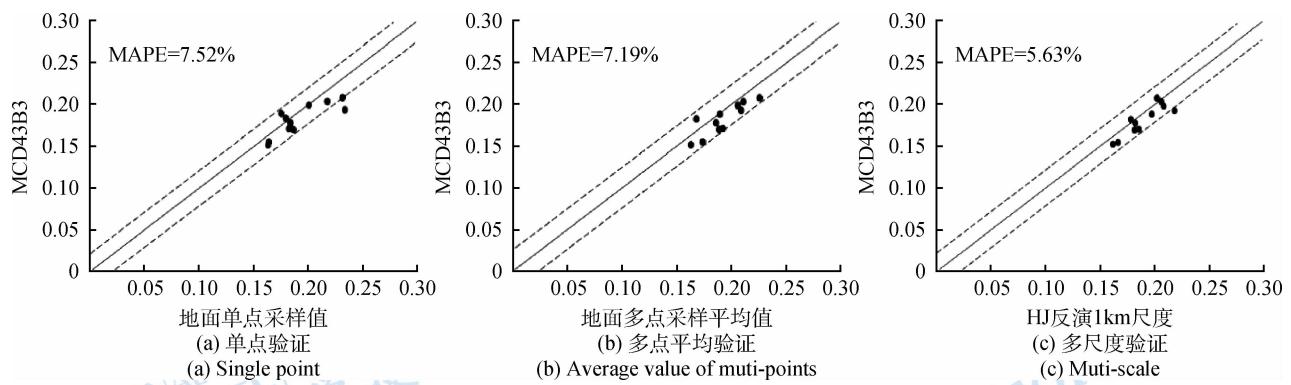


图6 异质性较弱地表条件下的验证

Fig. 6 Validation results over homogeneous land surface

在这种情况下,需要利用像元内符合最佳采样方案的多点观测进行反照率验证,或者借助较高空间分辨率的反照率产品作为中间的桥梁进行多尺度验证。由于地面反照率观测的视场角跟 HJ 卫星 CCD 传感器像元的视场角接近,因此地面实测反照率能够代表 HJ 卫星覆盖区域反照率的相对真值,MAPE 是 6.53%。图 5 显示了用地面数据标定后的 HJ 反照率并升尺度至 MODIS 像元尺度,获得像元尺度反照率相对真值,进行反照率产品验证,MAPE 是 10.86%。与单点直接验证相比,精度更可信。

图 6 显示了在异质性较弱的地表条件下,大部分像元由于单点观测反照率有较高的空间代表性,因此单点观测的反照率可以直接进行 MODIS 像元反照率产品的验证。从图 6 也可以看出,在异质性较弱的地表,多点平均、多尺度验证和单点验证对于 MODIS 像元尺度反照率真值的获取精度接近,MAPE 分别是 7.19%、5.63% 和 7.52%。因此,在异质性较弱的地表,通过选择空间代表性较大的点单点观测反照率,表示 MODIS 像元尺度相对真值的误差较小,可以用于 MODIS 反照率产品的的真实性检

验。否则,需要考虑地表的异质性,利用像元内多点观测或借助高分辨率反照率抓住 MODIS 像元内反照率的异质性变化特征,获取 MODIS 像元尺度反照率相对真值来验证反照率产品的精度。

6 真实性检验的挑战与展望

尺度效应是影响真实性检验中像元尺度相对真值获取的关键问题,但目前尺度效应的解决办法仍局限于用遥感观测反推尺度效应。未来可以尝试将遥感产品真实性检验上升为地理学尺度效应的分析。对地理学研究来说,首要的任务是选择与自然现象(格局与过程)发生规模相当的观测尺度,如果观测尺度与实际尺度相差甚远,研究结果的可信度就会很差,这是因为尺度选择不当,不能正确揭示研究对象的科学本质:研究尺度过大,大量细节被忽略;研究尺度过小,陷入局部而不能窥其全貌。从科学发展的角度来看,目前还没有一个普适性的尺度转换方法。王祎婷和李小文(2014)进行了尺度转换普适性方法的探讨,并提出基于构造先

验知识趋势面的尺度转换方法:通过利用已知地学环境要素的先验知识构造趋势面,才有可能知道观测点、像元值在空间上的代表性,才有可能完成多尺度间的自洽的尺度转换。只有发展从传统站点观测到多尺度遥感像元间自洽的尺度转换方法,才有望解决遥感产品真实性检验中尺度效应的影响问题。

虽然遥感产品的验证工作已有很大进展,但山区参数遥感产品的验证却十分困难。目前,关于山地陆表参数产品验证方法的探索才刚刚开始。如何考虑地形的影响获取山地粗分辨率像元尺度地面实测值将是未来真实性检验工作的重点。

遥感产品具有种类多、多尺度和大数据量等特点,其直接应用或者作为产品输入都需要进行精度评价,但目前国内缺乏相应的验证系统,未来我们应开发能够兼顾不同传感器、不同分辨率、不同参数遥感产品的真实性检验系统,为产品的质量分析与控制提供定量化的科学依据。目前,中国科学院等研究单位和部门正在推动中国的真实性检验工作,以怀来遥感试验站、黑河遥感试验站等为代表的一批遥感真实性检验场网的建设,将促进中国遥感卫星产品的真实性检验工作。

7 总 结

真实性检验是定量遥感产品从生产到应用之间的重要步骤,是深化定量遥感产品应用的深度和广度的重要技术手段。换言之,遥感真实性检验能够提升数据产品的可信度,增强使用者的信心。之

所以我们很强调真实性检验,对于遥感学家,因为地表下垫面的多样性,和由此带来的辐射传输的复杂性,使得遥感数据产品的生产过程引入较多的假设和先验知识,计算结果充满了不确定性(吴小丹等,2014),数据产品生产者需要通过真实性检验来不断修正整个数据产品的生产流程算法,进行更严格的质量控制。尤其是进行大区域甚至全球产品生产时,这一过程尤为重要(梁顺林,2013)。

对于非遥感专业的遥感数据使用者,大部分对遥感数据产品的生产过程不甚明晰,经常习惯性利用传统点观测到的数据与遥感面状观测数据进行直接对比,而忽略了尺度效应带来的差异性,由此对遥感数据产品带来众多质疑。客观上需要一些独立的方法和手段评价遥感数据产品的可信度。随着遥感技术的发展,遥感提供数据产品的能力愈来愈强,其能够服务的领域也愈来愈宽。而遥感数据产品的真实性检验,为其在各个领域的应用核定了基准。在某种程度上可以认为,传感器技术的发展促进了数据产品的生产,而真实性检验技术推动了遥感的应用。

遥感数据产品生产过程中,会根据不同数据产品的特点引入诸多的假设和近似,尤其使得遥感数据产品的真实性检验需要根据待检验产品的不同制定相应的策略。我们通过分析,考虑验证的数据来源以及地表的异质性情况不同,将真实性检验可归纳为5类方法:基于地面单点测量数据检验、基于地面多点采样数据检验、基于高分辨率数据的检验、交叉检验和间接检验,具体适用条件、优缺点等分析结果如表4所示。

表4 真实性检验方法特点与适用性总结

Table 4 Characteristics and applicability of different validation methods

检验方法	适用条件		优点	缺点
单点检验	弱尺度效应		稳定性和时间连续性; 便于进行时间序列分析; 能反映年际变化	像元尺度范围内一般只包含一个站点; 观测位置固定,不够灵活
	强尺度效应	地表均一		
		地表不均一,但地面观测 尺度跟待检验产品尺度 相当		
多点采样检验	均质地表		可靠性和灵活性	需要大量人力; 地面多点升尺度是难点; 地面样点的空间异质性
	非均质地表的不规则采样点			
引入高分辨率	异质地表		解决了地面点—中低分辨率像 元之间的尺度不匹配问题; 面—面的升尺度	传感器不一致等因素带来了不确定性; 转换函数存在很大不确定性; 升尺度是难点
	像元尺度过大,像元尺度内多点采样有 困难			

续表

检验方法	适用条件	优点	缺点
交叉检验	没有地面测量数据	真实性检验成本很低; 几乎适用于所有参数	只能获取产品的相对精度; 结果取决于参照产品的精度; 需要考虑不同传感器之间波段差异、波谱响应差异和时空分辨率等
	具有同类且精度以得到认可的遥感产品		
间接检验	没有地面测量数据的支持	真实性检验成本很低	只能获取产品的相对精度; 真实性检验的结果取决于模型的精度; 检验过程比较复杂,实际检验工作中很少用
	具有验证过的地表过程模型		

总而言之,遥感产品的真实性检验,相对真值的获取是关键核心问题。其中涉及采样方法、尺度转换、不确定性分析和检验评价方法等多个遥感基础科学问题,因此遥感产品的真实性检验不是孤立的,是与遥感的正反演、产品生产相伴而生的,需要得到足够的重视,使遥感数据产品能够真正成为人类理解所处的自然环境,以及应对各种生态环境挑战的重要信息源。

志 谢 本文参考了国家863计划项目“遥感产品真实性检验关键技术系统及其试验验证”中关于关键陆表参数真实性检验规范草案,在此表示衷心地感谢。

参考文献(References)

- Baret F, Morissette J T, Fernandes R A, Champeaux J L, Myneni R B, Chen J, Plummer S, Weiss M, Bacour C, Garrigues S and Nickeson J E. 2006. Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and intercomparison of land biophysical products: proposition of the CEOS-BELMANIP. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1794–1803 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.876030]
- Baret F, Weiss M, Allard D, Garrigues S, Leroy M, Jeanjean H, Fernandes R, Myneni R B, Privette J, Morissette J, Bohbot H, Bossono R, Dedieu G, Di Bella C, Duchemin B, Espana M, Gond V, Gu X F, Guyon D, Lelong C, Maisongrande P, Mougin E, Nilson T, Veroustraete E and Vintilla R. 2005. VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products. *Remote Sensing of Environment*. [2013-08-12] <http://www.journals.elsevier.com/remote-sensing-of-environment>
- Bisht G and Bras R L. 2010. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: southern Great Plains case study. *Remote Sensing of Environment*, 114(7): 1522–1534 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.007]
- Bisht G, Venturini V, Islam S and Jiang L. 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 97(1): 52–67 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.014]
- Boccippio D J, Koshak W, Blakeslee R, Driscoll K, Mach D, Buechler D, Boeck W, Christian H J and Goodman S J. 2000. The Optical Transient Detector (OTD): instrument characteristics and cross-sensor validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(4): 441–458 [DOI: 10.1175/1520-0426(2000)017<0441:TOTDOI>2.0.CO;2]
- Cescatti A, Marcolla B, Santhana Vannan S K, Pan J Y, Román M O, Yang X Y, Ciais P, Cook R B, Law B E, Matteucci G, Migliavacca M, Moors E, Richardson A D, Seufert G and Schaaf C B. 2012. Intercomparison of MODIS albedo retrievals and in situ measurements across the global FLUXNET network. *Remote Sensing of Environment*, 121: 323–334 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.019]
- Che T, Li X, Jin R, Armstrong R and Zhang T J. 2008. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. *Annals of Glaciology*, 49(1): 145–154 [DOI: 10.3189/172756408787814690]
- Chen L F, Gao Y H, Li L, Liu Q H and Gu X F. 2007. Forest NPP estimation based on MODIS data under cloudless condition. *Science China: D-Earth Sciences*, 51(3): 331–338 (陈良富, 高彦华, 李丽, 柳钦火, 顾行发. 2007. 基于MODIS晴空数据的森林日净第一性生产力估算. 中国科学: D辑, 37(11): 1515–1521)
- Chen Y M, Liang S, Wang J, Kim H Y and Martonchik J V. 2008. Validation of MISR land surface broadband albedo. *International Journal of Remote Sensing*, 29(23): 6971–6983 [DOI: 10.1080/01431160802199876]
- Cheng Q. 2008. Validation and correction of MOD15-LAI using in situ rice LAI in southern China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(11–12): 1658–1669 [DOI: 10.1080/00103620802071887]
- Cohen W B, Gower S T, Turner D P and Running S W. 2009. Linking *in situ* measurements, remote sensing, and models to validate MODIS products related to the terrestrial carbon cycle. [2013-11-12] <http://www.fs.fed.us/larse/bigfoot/>
- Coll C, Caselles V, Valor E, Niclòs R, Sánchez J M, Galve J M and Mirra M. 2007. Temperature and emissivity separation from ASTER data for low spectral contrast surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 110(2): 162–175 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.02.008]
- Crow W T, Berg A A, Cosh M H, Loew A, Mohanty B P, Panciera R, Rosnay P, Ryu D and Walker J P. 2012. Upscaling sparse ground-

- based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. *Reviews of Geophysics*, 50(2) [DOI: 10.1029/2011RG000372]
- Cui X B, Sun B, Tian G, Jiang Y Y, Zhang X P, Guo J X and Tang X Y. 2009. Progress and prospect of ice radar in investigating and researching Antarctic ice sheet. *Advances in Earth Science*, 24(4): 392–402 (崔祥斌, 孙波, 田钢, 蒋芸芸, 张向培, 郭井学, 唐学远. 2009. 冰雷达探测研究南极冰盖的进展与展望. 地球科学进展, 24(4): 392–402)
- Dai L Y, Che T, Wang J and Zhang P. 2012. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on *a priori* snow characteristics in Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*, 127: 14–29 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.029]
- Dirmeyer P A, Guo Z C and Gao X. 2004. Comparison, validation, and transferability of eight multiyear global soil wetness products. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6): 1011–1033 [DOI: 10.1175/JHM-388.1]
- Fensholt R, Sandholt I and Rasmussen M S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91(3–4): 490–507 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.04.009]
- Fisher J B, Whittaker R J and Malhi Y. 2011. ET come home: potential evapotranspiration in geographical ecology. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1): 1–18 [DOI: 10.1111/j.1466–8238.2010.00578.x]
- Frei A, Tedesco M, Lee S, Foster J, Hall D K, Kelly R and Robinson D A. 2012. A review of global satellite-derived snow products. *Advances in Space Research*, 50(8): 1007–1029 [DOI: 10.1016/j.asr.2011.12.021]
- French A N, Jacob F, Anderson M C, Kustas W P, Timmermans W, Gieske A, Su Z, Su H, McCabe M F, Li F, Prueger J and Brunsell N. 2005. Surface energy fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA). *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2): 55–65 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.015]
- Gao Y C and Long D. 2008. Intercomparison of remote sensing-based models for estimation of evapotranspiration and accuracy assessment based on SWAT. *Hydrological Processes*, 22(25): 4850–4869 [DOI: 10.1002/hyp.7104]
- Garrigues S, Lacaze R, Baret F, Morisette J T, Weiss M, Nickeson J E, Fernandes R, Plummer S, Shabanov N V, Myneni R B, Knyazikhin Y and Yang W. 2008. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012), 113(C2) [DOI: 10.1029/2007JG000635]
- Gautier C, Diak G and Masse S. 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 19(8): 1005–1012 [DOI: 10.1175/1520–0450(1980)019<1005:ASPMTE>2.0.CO;2]
- Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R and Rundquist D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 76–87 [DOI: 10.1016/S0034–4257(01)00289–9]
- Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York, Oxford: Oxford University Press
- Gruhier C, De Rosnay P, Hasenauer S, Holmes T R H, De Jeu R A M, Kerr Y H, Mougin E, Njoku E G, Timouk F and Wagner W. 2010. Soil moisture active and passive microwave products: intercomparison and evaluation over a Sahelian site. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(1): 141–156
- Gueymard C A. 2008. REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation—Validation with a benchmark dataset. *Solar Energy*, 82(3): 272–285 [DOI: 10.1016/j.solener.2007.04.008]
- Hall D K and Riggs G A. 2007. Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes*, 21(12): 1534–1547 [DOI: 10.1002/hyp.6715]
- Huang D, Yang W Z, Tan B, Rautiainen M, Zhang P, Hu J N, Shabanov N V, Linder S, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2006. The importance of measurement errors for deriving accurate reference leaf area index maps for validation of moderate-resolution satellite LAI products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1866–1871 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.876025]
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X and Ferreira L G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2): 195–213 [DOI: 10.1016/S0034–4257(02)00096–2]
- Hufkens K, Bogaert J, Dong Q H, Lu L, Huang C L, Ma M G, Che T, Li X, Veroustraete F and Ceulemans R. 2008. Impacts and uncertainties of upscaling of remote-sensing data validation for a semi-arid woodland. *Journal of Arid Environments*, 72(8): 1490–1505 [DOI: 10.1016/j.jaridenv.2008.02.012]
- Izquierdo M G, Mayer H and Matzarakis A. 2003. Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(10): 1107–1116 [DOI: 10.1016/j.jastp.2003.07.007]
- Jackson T J, Cosh M H, Bindlish R, Starks P J, Bosch D D, Seyfried M, Goodrich D C, Moran M S and Du J Y. 2010. Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12): 4256–4272 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2051035]
- Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, Chen Y J and Zhu M J. 2012. Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 117(D13) [DOI: 10.1029/2011JD017037]
- Jiao Z T, Wang J D, Xie L O, Zhang H, Yan G J, He L M and Li X W. 2005. Initial Validation of MODIS Albedo Product by Using Field Measurements and Airborne Multiangular Remote Sensing Observations. *Journal of Remote Sensing*, 9(1): 64–72 (焦子悌, 王锦地, 谢里欧, 张颢, 阎广建, 何立明, 李小文. 2005. 地面和机载多角度观测数据的反照率反演及对MODIS反照率产品的初步验证. 遥感学报, 9(1): 64–72)
- Jin R, Li X and Che T. 2008. A decision tree algorithm for surface

- freeze/thaw classification using SSM/I. *Journal of Remote Sensing*, 12(1): 152–161 (晋锐, 李新, 车涛. 2008. SSM/I 监测地表冻融状态的决策树算法. 遥感学报, 12(1): 152–161)
- Jin Y F, Schaaf C B, Woodcock C E, Gao F, Li X W, Strahler A H, Lucht W and Liang S L. 2003. Consistency of MODIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals: 2. Validation. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D5): 4159 [DOI: 10.1029/2002JD002804]
- Justice C, Belward A, Morisette J, Lewis P, Privette J and Baret F. 2000. Developments in the ‘validation’ of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 21(17): 3383–3390 [DOI: 10.1080/014311600750020000]
- Kahn R A, Gaitley B J, Martonchik J V, Diner D J, Crean K A and Holben B. 2005. Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR) global aerosol optical depth validation based on 2 years of coincident Aerosol Robotic Network (AERONET) observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 110 (D10) [DOI: 10.1029/2004JD004706]
- Kaminsky K Z and Dubayah R. 1997. Estimation of surface net radiation in the boreal forest and northern prairie from shortwave flux measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D24): 29707–29716 [DOI: 10.1029/97JD02314]
- Klein A G and Barnett A C. 2003. Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000–2001 snow year. *Remote Sensing of Environment*, 86(2): 162–176 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00097-X]
- Knapp K R, Vonder Haar T H and Kaufman Y J. 2002. Aerosol optical depth retrieval from GOES-8: Uncertainty study and retrieval validation over South America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 107 (D7): AAC 2–1 – AAC 2–12 [DOI: 10.1029/2001JD000505]
- Li H and Reynolds J F. 1995. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 73: 280–284
- Li H B, Wang Z Q and Wang Q C. 1998. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 9(6): 651–657 (李海滨, 王政权, 王庆成. 1998. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 9(6): 651–657)
- Liang S L. 2013. Generation and application of global surface energy budget and ecosystem variables. *China Science and Technology Achievements*, (13): 78–79 (梁顺林. 2013. 全球陆表特征参量产品生成与应用研究. 中国科技成果, (13): 78–79) [DOI: 10.3772/j.issn.1009–5659.2013.13.030]
- Liang S L, Fang H L, Chen M Z, Shuey C J, Walther C, Daughtry C, Morisette J, Schaaf C and Strahler A. 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: Methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2): 149–162 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00092-5]
- Li X, Cheng G D, Liu S M, Xiao Q, Ma M G, Jin R, Che T, Liu Q H, Wang W Z, Qi Y, Wen J G, Li H Y, Zhu G F, Guo J W, Ran Y H, Wang S G, Zhu Z L, Zhou J, Hu X L and Xu Z W. 2013. Heihe watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): scientific objectives and experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8): 1145–1160 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00154.1]
- Li X, Ma M G, Wang J, Liu Q, Che T, Hu Z Y, Xiao Q, Liu Q H, Su P X and Chu R Z. 2008. Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe river basin: scientific objectives and experiment design. *Advances in Earth Science*, 23(9): 897–914 (李新, 马明国, 王建, 刘强, 车涛, 胡泽勇, 肖青, 柳钦火, 苏培玺, 楚荣忠. 2008. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案. 地球科学进展, 23(9): 897–914)
- Li X S, Li Z Y, Gao Z H, Bai L N, Wang B Y and Li S M. 2010. Estimation of sparse vegetation cover in arid regions based on vegetation indices derived from Hyperion data. *Journal of Beijing Forestry University*, 32(3): 95–100 (李晓松, 李增元, 高志海, 白黎娜, 王臻瑜, 李世明. 2010. 基于 Hyperion 植被指数的干旱地区稀疏植被覆盖度估测. 北京林业大学学报, 32(3): 95–100)
- Li X W, Zhao H R, Zhang H and Wang J D. 2002. Global change study and quantitative remote sensing for land surface parameters. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 365–370 (李小文, 赵红蕊, 张颖, 王锦地. 2002. 全球变化与地表参数的定量遥感. 地学前缘, 9(2): 365–370)
- Lin Z H, Mo X G, Li H X and Li H B. 2002. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China. *Acta Geographica Sinica*, 57(1): 47–56 (林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 李海滨. 2002. 中国陆地区域气象要素的空间插值. 地理学报, 57(1): 47–56)
- Lucht W, Hyman A H, Strahler A H, Barnsley M J, Hobson P and Muller J P. 2000. A comparison of satellite-derived spectral albedos to ground-based broadband albedo measurements modeled to satellite spatial scale for a semidesert landscape [J]. *Remote Sensing of Environment*, 74(1): 85–98
- Marty C, Philipona R, Delamere J, Dutton E G, Michalsky J, Starnes K, Storvold R, Stoffel T, Clough S A and Mlawer E J. 2003. Downward longwave irradiance uncertainty under arctic atmospheres: measurements and modeling. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D12): 4358 [DOI: 10.1029/2002JD002937]
- Mayaux P, Eva H, Gallego J, Strahler A H, Herold M, Agrawal S, Naumov S, De Miranda E E, Di Bella C M, Ordoyne C, Kopin Y and Roy P S. 2006. Validation of the global land cover 2000 map. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1728–1739 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.864370]
- Morisette J T, Baret F, Privette J L, Myneni R B, Nickeson J E, Garrigues S, Shabanov N V, Weiss M, Fernandes R A, Leblanc S G, Kalacska M, Sanchez-Azofeifa G A, Chubey M, Rivard B, Stenberg P, Rautiainen M, Voipio P, Manninen T, Pilant A N, Lewis T E, Iiames J S, Colombo R, Meroni M, Busetto L, Cohen W B, Turner D P, Warner E D, Petersen G W, Seufert G and Cook R. 2006. Validation of global moderate-resolution LAI products: A framework proposed within the CEOS land product validation subgroup. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1804–1817 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872529]
- 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]
- Myhre G, Stordal F, Johnsrud M, Ignatov A, Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Tanré D, Deuzé J-L, Goloub P, Nakajima T, Higurashi A, Torres O and Holben B. 2004. Intercomparison of satellite retrieved aerosol optical depth over the ocean. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61(5) : 499 – 513 [DOI: 10.1175/1520 – 0469 (2004)061<0499:IOSRAO>2.0.CO;2]
- Parajka J and Blöschl G. 2006. Validation of MODIS snow cover images over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3 (4) : 1569 – 1601 [DOI: 10.5194/hessd – 3 – 1569 – 2006]
- Parajka J, Holko L, Kostka Z and Blöschl G. 2012. MODIS snow cover mapping accuracy in small mountain catchment-comparison between open and forest sites. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9 (3) : 4073 – 4100 [DOI: 10.5194/hessd – 9 – 4073 – 2012]
- Pellarin T, Calvet J-C and Wagner W. 2006. Evaluation of ERS scatterometer soil moisture products over a half-degree region in southwestern France. *Geophysical Research Letters*, 33 (17) : L17401 [DOI: 10.1029/2006GL027231]
- Pereira E B, Abreu S L, Stuhlmann R, Rieland M and Colle S. 1996. Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of Meteosat satellite data. *Solar Energy*, 57 (2) : 125 – 132 [DOI: 10.1016/S0038 – 092X(96)00059 – X]
- Qian Z Q, Zhang Y J, Deng S Z, Fang Y Y and Chen C. 2011. Developing land-surface evapotranspiration remote sensing monitoring system using the component technology. *Journal of Geo-information Science*, 13(5) : 679 – 686 (钱志奇, 张友静, 邓世赞, 房莹莹, 陈晨. 2011. 基于组件技术的地表蒸散发遥感监测系统设计与应用. 地球信息科学学报, 13(5) : 679 – 686) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00679]
- Qu Y H, Zhu Y Q, Han W C, Wang J D and Ma M G. 2014. Crop leaf area index observations with a wireless sensor network and its potential for validating remote sensing products. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7 (2) : 431 – 444 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2289931]
- Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, Mattoe S, Chu D A, Martins J V, Li R R, Ichoku C, Levy R C, Kleidman R G, Eck T F, Vermote E and Holben B N. 2005. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4) : 947 – 973 [DOI: 10.1175/JAS3385.1]
- Román M O, Schaaf C B, Woodcock C E, Strahler A H, Yang X Y, Braswell R H, Curtis P S, Davis K J, Dragoni D, Goulden M L, Gu L H, Hollinger D Y, Kolb T E, Meyers T P, Munger J W, Privette J L, Richardson A D, Wilson T B and Wofsy S C. 2009. The MODIS (Collection V005) BRDF/albedo product: assessment of spatial representativeness over forested landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 113 (11) : 2476 – 2498 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.009]
- Román M O, Gatebe C K, Shuai Y M, Wang Z S, Gao F, Masek J G, He T, Liang S L and Schaaf C B. 2013. Use of In Situ and Airborne Multiangle Data to Assess MODIS- and Landsat-Based Estimates of Directional Reflectance and Albedo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51 (1) : 1393 – 1404
- Rüdiger C, Calvet J-C, Gruhier C, Holmes T R H, De Jeu R A M and Wagner W. 2009. An intercomparison of ERS-Scat and AMSR-E soil moisture observations with model simulations over France. *Journal of Hydrometeorology*, 10 (2) : 431 – 447 [DOI: 10.1175/2008JHM997.1]
- Salomon J G, Schaaf C B, Strahler A H, Gao F and Jin Y F. 2006. Validation of the MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals using combined observations from the Aqua and Terra platforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44 (6) : 1555 – 1565 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.871564]
- Schaaf C, Martonchik J, Pinty B, Govaerts Y, Gao F, Lattanzio A, Liu J C, Strahler A and Taberner M. 2008. Retrieval of surface albedo from satellite sensors//Advances in Land Remote Sensing. Netherlands: Springer: 219 – 243 [DOI: 10.1007/978 – 1 – 4020 – 6450 – 0_9]
- Simic A, Fernandes R, Brown R, Romanov P and Park W. 2004. Validation of VEGETATION, MODIS, and GOES + SSM/I snow-cover products over Canada based on surface snow depth observations. *Hydrological Processes*, 18 (6) : 1089 – 1104 [DOI: 10.1002/hyp.5509]
- Stehman S V, Olofsson P, Woodcock C E, Herold M and Friedl M A. 2012. A global land-cover validation data set, II: augmenting a stratified sampling design to estimate accuracy by region and land-cover class. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (22) : 6975 – 6993 [DOI: 10.1080/01431161.2012.695092]
- Stroeve J, Box J E, Gao F, Liang S L, Nolin A and Schaaf C. 2005. Accuracy assessment of the MODIS 16-day albedo product for snow: Comparisons with Greenland in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 94 (1) : 46 – 60 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.001]
- Susaki J, Yasuoka Y, Kajiwara K, Honda Y and Hara K. 2007. Validation of MODIS albedo products of paddy fields in Japan. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45 (1) : 206 – 217 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.882266]
- Tan B, Hu J N, Zhang P, Huang D, Shabanov N, Weiss M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2005. Validation of moderate resolution imaging spectroradiometer leaf area index product in croplands of Alpilles, France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 110 (D1) [DOI: 10.1029/2004JD004860]
- Tang R L, Li Z-L, Jia Y Y, Li C R, Sun X M, Kustas W P and Anderson M C. 2011. An intercomparison of three remote sensing-based energy balance models using Large Aperture Scintillometer measurements over a wheat-corn production region. *Remote Sensing of Environment*, 115 (12) : 3187 – 3202 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.07.004]
- Thornton P E and Running S W. 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93 (4) : 211 – 228 [DOI: 10.1016/S0168 – 1923(98)00126 – 9]
- Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R and Ahl D

- E. 2006. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102 (3–4) : 282 – 292 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.017]
- Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q C and Li Z L. 2002. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1–2) : 163 – 180 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00093-7]
- Wan Z, Zhang Y, Zhang Q and Li Z L. 2004. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (1) : 261 – 274 [DOI: 10.1080/0143116031000116417]
- Wang J and Christopher S A. 2003. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 30 (21) : 2095 [DOI: 10.1029/2003GL018174]
- Wang K C and Liang S L. 2009. Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term surface longwave radiation observations at SURFRAD sites. *Remote Sensing of Environment*, 113 (7) : 1556 – 1565 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.03.009]
- Wang K C, Liang S L, Schaaf C L and Strahler A H. 2010. Evaluation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer land surface visible and shortwave albedo products at FLUXNET sites. *Journal of Geophysical Research*, 115 (D17) : D17107 [DOI: 10.1029/2009JD013101]
- Wang W H, Liang S L and Meyers T. 2008a. Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112 (3) : 623 – 635 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.024]
- Wang K C, Liang S L, Wang D D and Zheng T. 2008b. Simultaneous estimation of surface photosynthetically active radiation and albedo from GOES//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, MA: IEEE: II – 311 – II – 314 [DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4778990]
- Wang K, Wan Z, Wang P, Sparrow M, Liu J and Haginoya S. 2007. Evaluation and improvement of the MODIS land surface temperature/emissivity products using ground-based measurements at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (11) : 2549 – 2565 [DOI: 10.1080/01431160600702665]
- Wang Q H, Ning J S, Ren J W and Wen J H. 2002. Re-definition and validation of the grounding line of Amery ice shelf, East Antarctica. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 27 (6) : 591 – 597 (王清华, 宁津生, 任贾文, 温家洪. 2002. 东南极 Amery 冰架与陆地冰分界线的重新划定及验证. 武汉大学学报(信息科学版), 27(6) : 591 – 597)
- Wang Y T and Li X W. 2014. Toward a universal scaling method by constructing prior-knowledge trend surface. Scale effect in quantitative remote sensing. Beijing. http://www.jors.cn/jrs/ch/reader/view_news.aspx? id = 20140717050026001 (王袆婷, 李小文. 2014. 构造先验知识趋势面的尺度转换普适性方法探讨.“遥感尺度效应和尺度转换”论坛简报. http://www.jors.cn/jrs/ch/reader/view_news.aspx? id = 20140717050026001)
- Wang Z S, Schaaf C B, Strahler A H, Chopping M J, Román M O, Shuai Y M, Woodcock C E, Hollinger D Y and Fitzjarrald D R. 2014. Evaluation of MODIS albedo product (MCD43A) over grassland, agriculture and forest surface types during dormant and snow-covered periods. *Remote Sensing of Environment*, 140 : 60 – 77 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.025]
- Weiss M, Baret F, Garrigues S and Lacaze R. 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment*, 110 (3) : 317 – 331 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.001]
- Wen J G, Zhao X J, Liu Q, Tang Y and Dou B C. 2014. An improved land-surface albedo algorithm with DEM in rugged terrain. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (4) : 883 – 887 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2280696]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G, Liu Q, Peng J J and Li X W. 2014. Advances in uncertainty analysis for the validation of remote sensing products: take leaf area index for example. *Journal of Remote Sensing*, 18 (5) : 1011 – 1023 (吴小丹, 肖青, 闻建光, 刘强, 彭菁菁, 李小文. 2014. 遥感数据产品真实性检验不确定性分析研究进展——以叶面积指数产品为例. 遥感学报, 18(5) : 1011 – 1023)
- Yamanokuchi T, Doi K and Shibuya K. 2005. Validation of grounding line of the East Antarctic Ice Sheet derived by ERS-1/2 interferometric SAR data. *Polar Geoscience*, 18 : 1 – 14
- Yang F, Sun J L, Zhang B, Yao Z F, Wang Z M, Wang J L and Le X F. 2010. Assessment of MODIS LAI product accuracy based on the PROSAIL model, TM and field measurement. *Transactions of the CSAE*, 26 (4) : 192 – 197 (杨飞, 孙九林, 张柏, 姚作芳, 王宗明, 王卷乐, 乐夏芳. 2010. 基于 PROSAIL 模型及 TM 与实测数据的 MODIS LAI 精度评价. 农业工程学报, 26(4) : 192 – 197)
- You D Q, Wen J, Liu Q and Tang Y. 2014. The angular and spectral kernel-driven model: assessment and application. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7 (4) 1331 – 1345 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2271502]
- Yu H, Feng Q S, Chen S Y, Han L Y, Huang X D and Liang T G. 2011. Grassland biomass dynamic monitoring in Gannan prefecture based on the microwave vegetation indices. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 47 (4) : 69 – 74 (于惠, 冯琦胜, 陈思宇, 韩兰英, 黄晓东, 梁天刚. 2011. 基于微波植被指数的甘肃草地生物量动态监测. 兰州大学学报: 自然科学版, 47(4) : 69 – 74)
- 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 T, Armstrong R L and Smith J. 2003. Investigation of the near-surface soil freeze-thaw cycle in the contiguous United States: Algorithm development and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 108 (D22) [DOI: 10.1029/

2003JD003530]

Zhou T T and Chen W H. 2011. Comparison of the temperature spatial interpolation methods based on MODIS data and meteorological ob-

servation data. Progress in Geography, 30(9) : 1143 – 1151 (周婷婷, 陈文惠. 2011. 基于 MODIS 数据和气象观测数据的气温空间插值方法比较. 地理科学进展, 30(9) : 1143 – 1151)

Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters

WU Xiaodan^{1,2}, WEN Jianguang¹, XIAO Qing¹, LI Xin⁴, LIU Qiang³, TANG Yong¹, DOU Baocheng¹, PENG Jingjing^{1,2}, YOU Dongqin^{1,2}, LI Xiaowen^{1,3}

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The important function of land surface remote sensing products in scientific research and quantitative application lies in their capability to record spatial-temporal earth surface features at a relatively enhanced performance. Validating quantitative remote sensing products involves evaluating their accuracy, stability, and consistency to show the performance of these products. This study investigates the validation method at a global scale according to the features of land surface parameters. The validation method is categorized into five main types: validation based on a single-point ground measurement, validation based on multipoint ground measurement, validation based on high-resolution remote sensing data, cross validation, and indirect validation. The characteristics and applicability of these methods are expected to support developments in validation techniques and widen the application of remote sensing products.

In situ data, as the basis of validation data sets, have been shown to influence validation method development. Given the differences in spatial resolution between ground measurement and satellite measurement, validation is adjusted according to land surface features and the parameter scale effect. For parameters that do not show obvious scale effects, a direct point-pixel comparison can be performed. However, most of the land surface parameters show scale effects when the land surface is heterogeneous. Therefore, multiple-point measurements within a pixel are necessary, with the average value of these points used to compare with satellite pixel values. If the land surface is heterogeneous and even the multiple points cannot capture the intra-pixel variation in the parameter features, a multi-scale validation strategy based on high-resolution imagery should be used to obtain unbiased pixel scale values.

The satellite value matches well with the in situ value when land surface is homogeneous. However, a scale mismatch is observed between the ground-based measurement and coarse-scale satellite measurement in land surface heterogeneity. Using multiple-point measurement is necessary to capture the variance within a larger region or use a fine-scale map as a bridge between the ground-based value and coarse-scale remote sensing value. The average value of multiple points within a pixel scale can represent the pixel scale “ground truth” when the land surface is not considerably heterogeneous. Otherwise, the aggregate value of high-resolution imagery is closer to the pixel scale “ground truth” relative to multi-point measurement.

This study has demonstrated that remote sensing product validation, including in situ sampling, scale effect, and precision assessment, is a significant and necessary step before remote sensing products are applied. The five main validation methods are validation based on a single-point ground measurement, validation based on multi-point ground measurement, validation based on high-resolution remote sensing data, cross validation, and indirect validation. These methods could be used according to the heterogeneity of the land surface and the scale effects of parameters. For relatively homogeneous land surfaces, ground-based measurements are representative enough for the sample plot, and the scale effects can be ignored. For heterogeneous land surfaces, multi-point measurement observation, or multi-scale validation strategy based on high-resolution imagery are recommended to represent the pixel scale as “relative truth”.

Key words: land surface parameters, validation, quantitative remote sensing products, heterogeneity, scale effect



封面说明

About the Cover

盐城东台中巴地球资源卫星04星影像

CBERS-04 satellite image of Dongtai, Yancheng

中巴地球资源系列卫星(CBERS)由中国航天科技集团公司和巴西空间研究院联合研制,是中巴两国在航天科技领域合作的重要体现,被誉为“南南合作的典范”,主要应用于国土、林业、水利、农情、环境保护等领域的监测、规划和管理。CBERS-04卫星配备有分辨率为5 m的全色、10 m的多光谱相机(PAN),20 m的多光谱相机(MUX),40 m/80 m的红外相机(IRS)以及分辨率为67 m的宽视场相机(WFI),满足了获取持续稳定的中分辨率普查数据的迫切需求。封面图片由中国资源卫星应用中心提供,为2014年12月8日获取的盐城东台5 m全色与10 m多光谱融合影像,图中可清晰辨识出池塘、河流、道路以及不同作物类型的农田。

The China-Brazil Earth Resources Satellite program (CBERS) is a technological cooperation program between China and Brazil which develops and operates earth observation satellites. CBERS-04 satellite will mainly be used in land use monitoring, forestry resource survey, water conservancy planning, crop yield estimation, environmental protection and many other fields. The CBERS-04 satellite carries four instruments: panchromatic imager (PAN) with 5 m spatial resolution for the panchromatic band and 10 m spatial resolution in the other bands; multispectral camera (MUX) with 20m spatial resolution; the infrared medium resolution scanner (IRS) with 40 m and 80 m spatial resolution, and a wide-field imaging camera (WFI) with 67 m spatial resolution. The cover image is the fusion of panchromatic and multispectral images captured by CBERS-04 satellite, which shows Dongtai, Yancheng on December 8, 2014. In the image, ponds, rivers, roads and fields with different crops can be clearly identified.

遥感学报

JOURNAL OF REMOTE SENSING

YAOGAN XUEBAO (双月刊 1997年创刊)

第19卷 第1期 2015年1月25日

(Bimonthly, Started in 1997)

Vol.19 No.1 January 25, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院遥感与数字地球研究所 中国地理学会环境遥感分会	Sponsored	by	Institute of Remote Sensing and Digital Earth,CAS The Associate on Environment Remote Sensing of China
主 编	顾行发	Editor-in-Chief		GU Xing-fa
编 辑	《遥感学报》编委会 北京市朝阳区大屯路中国科学院遥感与数字地球研究所 邮编:100101 电话:86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail:jrs@radi.ac.cn	Edited	by	Editorial Board of Journal of Remote Sensing Add: P.O.Box 9718, Beijing 100101, China Tel: 86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail: jrs@radi.ac.cn
出 版 部	科学出版社	Published	by	Science Press
印 刷 装 订	北京科信印刷有限公司	Printed	by	Beijing Kexin Printing Co. Ltd.
总 发 行 部	科学出版社 北京东黄城根北街16号 国内邮发代号:82-324 邮政编码:100717 电话:86-10-64017032 E-mail:sales_journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: 86-10-64017032 E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com
国 外 发 行	中国国际图书贸易总公司 北京399信箱 邮政编码:100044 国外发行代号:BM 1002	Overseas distributed	by	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399, Beijing 100044, China

中国标准连续出版物号: ISSN 1007-4619
CN 11-3841/TP

CODEN YXAUAB

定价: 70.00元



官网



微站

ISSN 1007-4619



9 771007 461156