

# 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展

张圆<sup>1</sup>, 贾贞贞<sup>2</sup>, 刘绍民<sup>1</sup>, 徐自为<sup>1</sup>, 徐同仁<sup>1</sup>, 姚云军<sup>3</sup>, 马燕飞<sup>4</sup>,  
宋立生<sup>5</sup>, 李相<sup>1</sup>, 胡晓<sup>1</sup>, 王泽宇<sup>1</sup>, 郭枝虾<sup>1</sup>, 周纪<sup>6</sup>

1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 重庆市勘测院, 重庆 400020;

3. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

4. 邯郸学院 经济管理学院地理系, 邯郸 056005;

5. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;

6. 电子科技大学 资源与环境学院, 成都 611731

**摘要:** 地表蒸散发是连接土壤—植被—大气连续体的纽带, 结合遥感技术估算地表蒸散发已成为获取区域乃至全球尺度时空连续地表蒸散发量的有效手段。由于遥感估算地表蒸散发容易受到地表空间异质性和近地层气象条件复杂性的影响, 在模型机理与变量参数化方案、输入数据和时间尺度扩展等方面存在不确定性, 影响了其准确度的提高和应用范围的拓展, 因此需要开展真实性检验。本文综述了当前遥感估算地表蒸散发(包括植被蒸腾和土壤蒸发)真实性检验研究的相关成果, 重点归纳并总结了应用于遥感估算地表蒸散发真实性检验的直接检验法和间接检法的主要原理、适用性和优缺点, 在此基础上阐述了当前遥感估算地表蒸散发真实性检验研究所面临的挑战。分析表明: 由于地表空间异质性的普遍存在, 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究在理论和方法方面还受到诸多挑战, 今后应打破地表蒸散发遥感产品真实性检验局限在均匀地表的传统思路, 发展非均匀地表遥感估算地表蒸散发真实性检验的理论框架, 包括地表水热状况空间异质性的度量、非均匀地表验证场的优化布设、非均匀下垫面地表蒸散发的多尺度观测试验、卫星像元/区域尺度地表蒸散发相对真值的获取、验证过程中的不确定性分析以及遥感估算地表蒸散发的实证研究等, 并构建一个多源、多尺度、多方法、多层次的真实性检验技术流程, 以期把遥感估算地表蒸散发真实性检验作为突破口, 提升相应遥感产品的应用水平, 推动定量遥感科学的发展。

**关键词:** 遥感估算地表蒸散发, 非均匀地表, 真实性检验, 直接检验, 间接检验

**引用格式:** 张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 徐自为, 徐同仁, 姚云军, 马燕飞, 宋立生, 李相, 胡晓, 王泽宇, 郭枝虾, 周纪. 2020. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展. 遥感学报, 24(8): 975-999

Zhang Y, Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, Xu T R, Yao Y J, Ma Y F, Song L S, Li X, Hu X, Wang Z Y, Guo Z X and Zhou J. 2020. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration. Journal of Remote Sensing (Chinese), 24(8): 975-999 [DOI: 10.11834/jrs.20200909]

## 1 引言

地表蒸散发包括植被蒸腾、土壤和水体蒸发(包括冰雪升华)以及植被冠层截留降水的蒸发等, 是液态水/固态水通过陆地表层的植被、土壤、水体、冰雪等界面变为水汽进入大气的重要过程, 也是整个生物圈、岩石圈、水圈、冰雪圈与大气

圈中水分循环和能量传输的重要控制因素。多时相、多波段、多角度的遥感信息能够综合反映地表的几何结构和水、热状况, 因此利用遥感技术估算地表蒸散发对全球气候变化、流域水资源管理、作物估产与干旱监测等研究具有重要意义(Kalma等, 2008; Li等, 2009b; Wang和Dickinson, 2012; Zhang等, 2016; Fisher等, 2017)。

收稿日期: 2019-04-02; 预印本: 2020-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41531174); 国家重大科学研究计划(编号: 2015CB953702)

第一作者简介: 张圆, 1990年生, 女, 博士研究生, 研究方向为非均匀地表遥感蒸散发产品真实性检验。E-mail: yuanzhang123@mail.bnu.edu.cn

通信作者简介: 刘绍民, 1967年生, 男, 教授, 研究方向为水文气象与遥感。E-mail: smliu@bnu.edu.cn

目前基于各种地表蒸散发遥感估算模型的特点和用户的不同需求发布了众多地表蒸散发遥感产品 (Kalma 等, 2008; Wang 和 Dickinson, 2012; Zhang 等, 2016), 如全球尺度地表蒸散发遥感产品 MOD16 (MODIS Global Evapotranspiration Project) (Mu 等, 2011)、GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model) (Miralles 等, 2011)、EB-ET (Energy Balance-Evapotranspiration) (Chen 等, 2014)、GLASS (Global Land Surface Satellite) (Yao 等, 2014)、ETMonitor (Hu 和 Jia, 2015)、BESS (Breathing Earth System Simulator) (Jiang 和 Ryu, 2016)、PML\_V2 (Penman-Monteith-Leuning) (Zhang 等, 2019) 和欧洲/非洲/南美/北美/中国的 LSA-SAF (Satellite Application Facility on Land Surface Analysis) (Ghilain 等, 2012)、SSEBop (Operational Simplified Surface Energy Balance) (Senay 等, 2013)、CR-ET (Complementary Relationship Evapotranspiration) (Ma 等, 2019) 以及中国海河流域/黑河流域的 ETWatch (Wu 等, 2012) 和 DTD (Dual Temperature Difference) (Song 等, 2018) 等区域/流域尺度的地表蒸散发遥感产品。但由于地表空间异质性和近地层气象条件的复杂性, 利用遥感技术估算地表蒸散发仍存在模型机理与变量参数化方案、输入数据以及时间尺度扩展等多方面的制约因子 (Jia 等, 2012), 且地表蒸散发遥感产品在生产过程中还需引入较多假设和先验知识, 计算结果不可避免地存在不确定性。以中国西北地区的黑河流域为例, 2013 年生长季的 8 种地表蒸散发遥感产品 (MOD16/GLEAM/EB-ET/BESS/GLASS/ETMonitor /ETWatch / DTD) 在该流域蒸散发的大小和空间分布特征各不相同 (图 1), 判断哪种产品与真实情况最为接近是一个难题。而真实性检验就是给出遥感产品客观、定量评价的重要手段, 通过评估遥感产品的准确度和时空分布合理性, 探讨遥感产品的误差来源和验证过程的不确定性, 既可为用户提供客观、可靠的检验结果, 又可帮助产品生产者提高产品的准确度, 扩展其应用范围。

真实性检验工作从 1984 年国际地球观测卫星委员会 CEOS (Committee on Earth Observation

Satellites) 成立定标和真实性检验工作组以来 (Justice 等, 2000), 就已得到国际遥感界的重视 (吴小丹等, 2015)。以往的真实性检验研究大多针对传感器的场外定标和载荷特性, 近年来才逐步扩展到遥感产品的真实性检验 (姜小光等, 2008; 晋锐等, 2017)。自从 1999 年中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 成功发射之后, 美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 开始了大足迹计划 (Big foot)。针对 MODIS 产品, 例如叶面积指数、光合有效辐射、地表温度等产品进行验证和算法改进 (Running 等, 1999; 晋锐等, 2017)。2000 年前后, 欧洲空间局 ESA (European Space Agency) 启动了 VALERI (Validation of Land European Remote Sensing Instruments) 计划 (Baret 等, 2005), 对 MODIS、中等分辨率成像光谱仪 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument)、甚高分辨率扫描辐射计 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 等传感器制备的多种陆地遥感数据产品进行全球范围真实性检验 (吴小丹等, 2015; 晋锐等, 2017)。2000 年, 陆地遥感数据产品真实性检验的标准指南与规范的制定促进了陆地遥感产品真实性检验相关数据和信息的共享与交换 (Morisette 等, 2006)。2005 年, 真实性检验工作小组 LPV (Land Product Validation) 强调: 在利用地面测量进行直接验证外, 还可开展多传感器的交叉检验。这些研究都为遥感产品的算法预研和改进、遥感产品质量评价和不确定性分析等发挥了重要的、基础性理论指导 (晋锐等, 2017)。中国遥感界也在 20 世纪 90 年代开展了针对国产卫星 (如风云气象卫星系列、中巴资源卫星等) 数据的场外定标试验和验证。2001 年在北京顺义地区开展了由 MODIS 数据反演陆表参数的验证试验 (Liu 等, 2002)。但相比于国际上的研究, 中国在遥感产品真实性检验的理论体系与方法、技术流程、标准化与业务化运行手段等方面相对落后, 使得目前遥感在国民经济和资源环境监测中的应用及其发挥的效益还不充分 (晋锐等, 2017)。

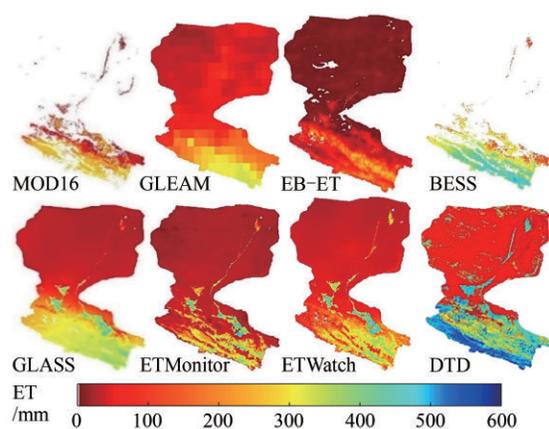


图1 2013年生长季(6—9月)黑河流域8种地表蒸散发遥感产品空间分布(MOD16与BESS产品不包含城镇、水体、裸地等非植被地表)

Fig.1 Spatial distribution of eight remotely sensed land surface evapotranspiration products (MOD16 and BESS have no data of non-vegetative surfaces such as towns, water and bare land)

地表蒸散发被认为是陆地表层系统水循环过程中最难准确估算的分量,为提高其遥感估算的可靠性,国内外持续开展着相关真实性检验工作。1992年开始的全球能量与水循环项目成立的LandFlux-EVAL计划和由欧空局于2009年成立的WACMOS-ET项目(Water Cycle Multi-mission Observation Strategy Evapotranspiration)都先后在全球范围内对多种地表蒸散发遥感模型与产品进行检验和相互评价(Vinukollu等, 2011a, 2011b; Ershadi等, 2015; McCabe等, 2015; Michel等, 2016; Miralles等, 2016; Jiménez等, 2018)。2004年—2010年在中国海河流域,针对地表蒸散发遥感产品ETWatch的真实性检验报告引起了世界银行、水利部海河水利委员会与北京市水务局等有关部门的高度关注,并初步制定了针对不同空间分辨率地表蒸散发遥感产品真实性检验的相对完善、系统的验证方法(Jia等, 2012)。2007年起陆续开展的“黑河综合遥感联合试验”WATER(Watershed Allied Telemetry Experimental Research)(Li等, 2009a)、“黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验”HiWATER(Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research)(Liu等, 2011, 2018; Li等, 2013)是星—机—地同步的多尺度观测试验,包括通量观测矩阵、传感器网络和水文气象观测网等,为遥感估算地表蒸散发真实性检验研究提供了丰富的多尺度验证数据。2012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”(一期)课题“遥感产品真实性检验关键技术系统及其试验验证”,开展了遥感产品真实性检验标准规范和关键技术研究,并将“地表蒸散发遥感产品真实性检验”纳入国家标准编制计划中(晋锐等, 2017)。2016年国家基金委资助的重点基金项目“陆表遥感产品真实性检验中关键理论与方法研究”也将地表蒸散发遥感产品作为3种实证研究的遥感产品之一。这些不仅说明地表蒸散发遥感产品对天气与气候、水文以及生态环境等研究领域的重要意义,也表明地表蒸散发遥感产品真实性检验是一项富有挑战的科学研究。

在开展真实性检验过程中需要地面观测试验提供数据支持(吴小丹等, 2014)。尽管国内外已经组织了诸多包含验证遥感估算地表蒸散发在内的观测试验,但并非所有的试验设计初衷都是专门针对真实性检验。因此,不可避免地存在观测尺度与遥感像元不匹配的问题,而且传统的真实性检验主要局限在均匀地表,未考虑地表空间异质性,以点代面的验证结果并不能完全代表遥感产品的真实准确度(吴小丹等, 2019)。因此,遥感像元尺度/区域尺度相对真值的获取是异质地表真实性检验工作的核心问题(Zhang等, 2010b)。这一问题涉及到地表空间异质性度量、地面优化采样、尺度转换、不确定性分析等一系列理论与方法的难点,是当今遥感科学研究的国际前沿(Wu等, 2019a)。

本文拟对现有的遥感估算地表蒸散发(包括植被蒸腾和土壤蒸发)真实性检验方法进行归纳与总结,在此基础上展望今后的发展方向,并提出非均匀地表遥感估算地表蒸散发真实性检验的理论框架以及多源、多尺度、多方法、多层次的真实性检验技术流程,为遥感估算地表蒸散发真实性检验研究提供理论与方法的支持。

## 2 遥感估算地表蒸散发的真实性检验方法分析

遥感产品的真实性检验是推动遥感科学与技术发展的动力,也是促进遥感数据产品应用的关键过程(Wu等, 2019b)。真实性检验是通过独立方法评价遥感产品准确度并分析其不确定性的过程(Justice等, 2000),这是评价遥感产品准确度

的砝码,也是生产者与用户之间的纽带。地表蒸散发遥感模型可根据模型机理和建模方式的不同分为(Jia等,2012):经验统计模型(Wang等,2010;Jung等,2011)、地表能量平衡模型(包括单源模型和双源模型)(Norman等,1995;Kustas和Norman,1996;Bastiaanssen等,1998;Su,2002;Allen等,2007;Anderson等,2010;Chen等,2014;Ma等,2018;Song等,2018)、与传统方法相结合的地表蒸散发遥感模型(包括基于Penman-Monteith公式的地表蒸散发遥感模型(Mu等,2007,2011;Yuan等,2010)、基于Priestley-Taylor公式的地表蒸散发遥感模型(Fisher等,2008;Miralles等,2011;Yao等,2013)和基于互补相关原理的地表蒸散发遥感模型(Liu等,2006,2010;Venturini等,2008;Ma等,2019)、

陆面过程模型与数据同化方法(Tian等,2015;Gao等,2016;Xu等,2016,2019a)、集成模型(Yao等,2014;Chen等,2015)。每种模型都有各自的优势与不足,如前所述,基于不同遥感模型已生产了众多地表蒸散发遥感产品,表1总结了当前主要的地表蒸散发遥感产品、所用模型以及相应的真实性检验情况。综合表1及Kalma等(2008)、Wang和Dickinson(2012)等研究可知:地表蒸散发遥感估算值与地面观测值相比,在瞬时、日、月、年等时间尺度上的平均相对百分比误差分别为15%—30%、14%—44%、10%—36%、5%—21%。所以,目前地表蒸散发遥感产品仍需要不断优化与改进,借助真实性检验完善地表蒸散发遥感模型,提高产品的实用价值,推动其应用范围和水平(吴小丹等,2015)。

表1 主要地表蒸散发遥感产品与真实性检验情况

Table 1 Commonly-used remotely-sensed land surface evapotranspiration products and their validations

| 产品名称      | 模型类别                        | 空间范围              | 时空分辨率                    | 产品获取链接  | 检验仪器与下垫面类型                                | 检验结果   | 参考文献   |
|-----------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|---|---|--|--|
| ETWatch   | 地表能量平衡模型中的单源模型 SEBS & SEBAL | 中国海河流域/黑河流域       | 30 m/<br>1 km,<br>日/月/年  | <a href="http://www.heihedata.org/">http://www.heihedata.org/</a>   | 涡动相关仪和大孔径闪烁仪/果园、玉米、裸地、居民地、瓜果、蔬菜、冬小麦和棉花等地表 | 相关系数:0.84—0.98<br>相对误差:日/月/年:<br>20%/10%/9%                            | Wu等(2012);<br>Jia等(2012)                             |
| LSA-SAF   | 地表能量平衡模型中的单源模型 SVAT         | 欧洲/非洲/南美          | 3 km,<br>30 min          | <a href="http://landsaf.meteo.pt/">http://landsaf.meteo.pt/</a>   | 涡动相关仪/草地、落叶阔叶林、常绿针叶林、混交林等地表               | 相关系数:0.56—0.90<br>均方差:0.06—0.1mm/h                                     | Chilain等(2012);<br>Hu等(2015)                         |
| DTD       | 地表能量平衡模型中的双源模型 DTD          | 中国黑河流域            | 1 km,<br>瞬时/日            | —   | 大孔径闪烁仪/草地、玉米、菜园、防护林、果园、村庄、胡杨、怪柳、裸地、农田等地表  | 相对误差:16%—28%,<br>均方差:77—107 W/m <sup>2</sup>                           | Norman等(2000);<br>Song等(2018)                        |
| ALEXI     | 地表能量平衡模型中的双源模型 TSEB         | 北美                | 10 km,<br>瞬时/日           | —   | 涡动相关仪/玉米、大豆、牧场、灌丛等地表                      | 相对误差:15%—20%   | Anderson等(1997);<br>Anderson等(2004);<br>Zhang等(2020) |
| SSEBop    | 地表能量平衡模型中的单源模型 SSEB         | 北美                | 1 km,<br>日/月/年           | <a href="https://earlywarning.usgs.gov/ssebop/modis">https://earlywarning.usgs.gov/ssebop/modis</a>   | 涡动相关仪/草地、森林、农田、灌丛、稀树草原、城市等地表              | 相关系数(月):0.72—0.95<br>均方差(月):8.5—62 mm/month<br>相对误差(日/月/年):44%/36%/21% | Velpuri等(2013);<br>Senay等(2013)                      |
| EB-ET     | 地表能量平衡模型中的单源模型 SEBS         | 中国/全球             | 0.1°/<br>0.05°,<br>日/月   | <a href="http://en.tpedatabase.cn/portal/">http://en.tpedatabase.cn/portal/</a>   | 涡动相关仪/草地、农田、裸地、湿地、果园等地表                   | 均方差:<br>1.56(±0.25) mm/d   | Chen等(2014)  |
| ETMonitor | 地表能量平衡模型的中双源模型 S-W          | 中国<br>黑河流域/<br>全球 | 250 m/<br>1 km,<br>日/8 d | <a href="http://www.heihedata.org/">http://www.heihedata.org/</a><br><a href="https://data.tpdac.ac.cn/">https://data.tpdac.ac.cn/</a><br><a href="http://www.geodoi.ac.cn/">http://www.geodoi.ac.cn/</a> | 涡动相关仪/草地、青海云杉、农田、稀疏灌丛、混交林等地表              | 相关系数:0.70—0.87<br>均方差:17.9—24.8 W/m <sup>2</sup>                       | Hu和Jia(2015);<br>Zheng等(2016)                        |

续表

| 产品名称     | 模型类别  | 空间范围 | 时空分辨率           | 产品获取链接  | 检验仪器与下垫面类型   | 检验结果   | 参考文献   |
|----------|---|------|-----------------|---|--|--|--|
| MOD16    | 基于 Penman-Monteith 公式的地表蒸散发遥感模型 Penman-Monteith-Mu      | 全球   | 1 km, 8 d       | <a href="https://search.earthdata.nasa.gov/">https://search.earthdata.nasa.gov/</a>           | 涡动相关仪/草地、常绿针叶林、落叶针叶林、常绿阔叶林、混交林、落叶阔叶林、农田、灌丛、裸地等地表         | 相对误差: 24.1%<br>均方差: 7.33—8.59 mm/8 d<br>纳什效率系数: 0.45     | Mu 等 (2011); McCabe 等 (2015); Khan 等 (2018)      |
| BESS-ET  | 基于 Penman-Monteith 公式的地表蒸散发遥感模型 Penman-Monteith         | 全球   | 1 km, 8 d       | <a href="http://environment.snu.ac.kr/bess_flux/">http://environment.snu.ac.kr/bess_flux/</a> | 涡动相关仪/常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、灌丛、草地、湿地、稀疏草原等地表                 | 相关系数: 0.62, 均方差: 0.8 mm/d<br>相关系数: 0.90<br>均方差: 118 mm/a | Ryu 等 (2011); Jiang 和 Ryu (2016)                 |
| PML_V2   | 基于 Penman-Monteith 公式的地表蒸散发遥感模型 Penman-Monteith-Leuning | 全球   | 500 m, 8 d      | <a href="https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/">https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/</a>     | 涡动相关仪/农田、落叶阔叶林、常绿阔叶林、常绿针叶林、草地、混交林、灌丛、稀树草原、湿地、稀树草原(乔木)等地表 | 均方差: 0.73 mm/d<br>平均偏差(日): 3%                            | Zhang 等 (2019)                                   |
| GLEAM    | 基于 Priestley-Taylor 公式的地表蒸散发遥感模型 Priestley-Taylor       | 全球   | 0.25°, 日/月/年    | <a href="https://www.gleam.eu/">https://www.gleam.eu/</a>                                     | 涡动相关仪/森林、农田、稀树草原、灌丛、荒漠、积雪等地表                             | 决定系数: 0.68—0.9<br>相对误差: 17%<br>纳什效率系数: 0.62              | Miralles 等 (2011); McCabe 等 (2015); Xu 等 (2019b) |
| CR-ET    | 基于互补相关原理的地表蒸散发遥感模型                                      | 中国   | 0.1°, 月         | <a href="http://www.tpdatabase.cn/">http://www.tpdatabase.cn/</a>                             | 涡动相关仪/草地、常绿针叶林、落叶针叶林、常绿阔叶林、混交林、落叶阔叶林、农田、灌丛、裸地等地表         | 纳什效率系数: 0.72—0.94  | Ma 等 (2019)                                      |
| GLASS-ET | 集成模型  | 全球   | 0.05°/1 km, 8 d | <a href="http://www.geodata.cn/">http://www.geodata.cn/</a>                                   | 涡动相关仪/草地、落叶阔叶林、落叶针叶林、常绿针叶林、稀树草原、混交林、农田等地表                | 相关系数: 0.75—0.80<br>均方差: 32.8—35.3 W/m <sup>2</sup>       | Yao 等 (2014)                                     |

注: SEBS: Surface Energy Balance System, SEBAL: Surface Energy Balance Algorithm for Land, SVAT: Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer, DTD: Dual Temperature Difference, TSEB: Two Source Energy Balance, SSEB: Simplified Surface Energy Balance, S-W: Shuttleworth-Wallace。

当前开展的遥感估算地表蒸散发真实性检验方式可依据规范性国家标准《遥感产品真实性检验导则 GB/T 36296-2018》结合验证数据的特点分为: 直接检验法和间接检验法。直接检验法是基于像元尺度或区域尺度的地表蒸散发相对真值来检验地表蒸散发遥感产品。其相对真值基于观测数据得到, 可作为首选验证方法。在无像元或区域尺度相对真值时可采用间接检验法, 又可细分为交叉检验法、基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法和时空变化趋势分析检验法。交叉检

验法可适用于检验区域无地面观测地表蒸散发数据, 但有已检地表蒸散发产品或3种及以上地表蒸散发产品的情况; 基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法需要结合不同空间分辨率的卫星遥感信息以及地表蒸散发观测数据等, 并且涉及不同分辨率地表蒸散发遥感估算值的尺度效应等问题; 时空变化趋势分析检验法可适用于上述检验方法都无法实施的情况。该方法检验地表蒸散发遥感产品时空变化趋势与地表蒸散发影响因子(如植被状况、气象条件、土壤水分等)的时空变

化趋势是否一致,但无法定量给出待检产品的准确度。

## 2.1 直接检验法

直接检验法利用地表蒸散发的相对真值进行检验,相对真值可基于地面观测数据得到,因而可以认为直接检验能提供最可靠的验证结论(包括准确度和时空合理性)。根据相对真值空间尺度的不同,直接检验可分为像元尺度和区域尺度两种方式。像元尺度的直接检验法是指基于站点观测地表蒸散发获取像元尺度相对真值来检验地表蒸散发遥感产品;区域尺度的直接检验是指将基于水量平衡方法估算的蒸散发或基于区域内多个站点地表蒸散发观测值经过尺度转换得到区域地表蒸散发作为区域尺度相对真值来检验地表蒸散发遥感产品。

### 2.1.1 像元尺度检验

常用的地表蒸散发观测仪器主要有:蒸渗仪、涡动相关仪、波文比—能量平衡测量系统和闪烁仪(如近红外闪烁仪、双波段闪烁仪)等,此外植物液流仪(探针式和包裹式)和小型蒸渗仪还可分别观测植被蒸腾和土壤蒸发(Allen等,2011;Liu等,2013;Xu等,2013;Liu和Xu,2018),这些仪器的测量原理以及用于遥感估算地表蒸散发(植被蒸腾、土壤蒸发)验证时的优势和不足见表2。其中涡动相关仪能够较准确地直接测量地表—大气间的湍流交换量,在长时间连续观测中能最小限度地减少环境及生态系统的干扰,在世界范围内得到广泛应用(Liu和Xu,2018)。以涡动相关仪为主要观测仪器的全球通量观测网络(FLUXNET)自20世纪90年代末成立以来,截止到2017-02,在全球已有来自5大洲约30个区域、约914个站点(7479站年)在进行长期观测,并应用于全球或区域尺度地表蒸散发遥感产品/模型的真实性的检验(Vinukollu等,2011b;Velpuri等,2013;Ershadi等,2014;McCabe等,2016;Michel等,2016;Martens等,2017;Zhang等,2019)。闪烁仪可测量非均匀地表1—5 km光径路线上的平均水热通量,能较好地与遥感像元尺度相匹配,因此在地表蒸散发遥感产品/模型的真实性的检验中也得到广泛应用(Hemakumara等,2003;Jia等,2003;Marx等,2008;Jia等,

2012;Ward等,2013;Song等,2018)。在地表蒸散发观测试验中,涡动相关仪或闪烁仪等仪器的观测方法可分为单站观测或矩阵式观测(Liu等,2016a)。由于地表空间异质性的普遍存在,利用地面观测值对地表蒸散发遥感产品与模型进行直接检验时,地面观测值与遥感估算值之间会存在空间尺度不匹配的问题(Ge等,2019)。因此,在评价地表空间异质性的前提下研究如何获取像元尺度地表蒸散发的相对真值是真实性检验的核心。目前可采用空间自相关性分析或空间方差分析等方法来判断地表水热状况的空间异质性(Li等,2018;Song等,2018;Ge等,2019)。根据地表水热状况空间异质性的不同,像元尺度相对真值的获取可分为均匀地表和非均匀地表两种情况。

(1) 均匀地表。如果是相对均匀的地表,可将站点观测(如蒸渗仪、涡动相关仪、闪烁仪等)地表蒸散发作为像元尺度地表蒸散发相对真值,用于检验观测仪器所在位置的遥感像元值或周围多个遥感像元的算术平均值。如Velpuri等(2013)将全球60个通量观测网的涡动相关仪观测值作为像元尺度相对真值,验证站点所在位置MOD16和SSEBop产品的像元值(1个1 km×1 km的MODIS像元)。Su等(2005)验证基于Landsat数据的SEBS(Surface Energy Balance System)模型估算结果时,将玉米田和大豆田的涡动相关仪观测值作为像元尺度相对真值,验证以站点为中心3×3个30 m分辨率Landsat像元的平均值。

这种验证方法对产品准确度评价的可靠程度主要依赖于地面观测值对所选遥感像元的空间代表性。因此根据仪器所在位置选择验证像元的方法仅在均匀、平坦的地表适用。

(2) 非均匀地表。当观测站通量源区(对通量观测值有主要贡献的上风向区域,是足迹函数在特定区域上的积分)大小与待检地表蒸散发遥感产品像元相同或相近时,地面观测的地表蒸散发值可作为像元尺度相对真值,用于检验相应的遥感像元值,否则非均匀地表又可进一步细分为中度非均匀地表和高度非均匀地表两种情况(Li等,2018)。

1) 中度非均匀地表。如果地表是中度非均匀的,验证观测仪器周围多个像元平均值比验证观

测仪器所在像元值更合理一些,但仍会导致较大不确定性。随着通量足迹(描述地表源或汇的空间分布与仪器观测通量值之间关系的函数,反映了对观测通量值相对影响的空间权重分布)和源区概念的引入,有助于解决地面观测值与遥感估算值之间的空间代表范围不匹配问题(Chávez等, 2005; Brunsell等, 2011; Jia等, 2012)。Chávez等(2005)利用足迹模型分别对机载遥感数据估算的通量进行加权平均与算术平均,并将结果与涡度相关仪的观测通量相比较,发现:在不稳定大气层结条件下,基于足迹值的加权结果要优于简单的算术平均结果。Jia等(2012)基于涡动相关仪或闪烁仪的足迹来选取验证像元(即选取观测通量源区范围内的遥感像元),利用归一化的足迹权重进行加权平均,得到与观测通量具有相同空间代表性的遥感估算值,再与观测值进行比较,并用此方法验证了2002年—2009年海河流域ETWatch系统估算30 m和1 km空间分辨率的地表蒸散发。Bai等(2015)进行了多种验证像元选取方法的比较,结果表明:基于足迹选取验证像元的方法比仅用仪器所在位置一个像元值或多个像元平均值与观测值进行验证更为合理。

基于足迹选择验证像元的方法通常在观测通量源区范围能够覆盖一个或多个像元的情况下适用,因此需要考虑通量观测仪器的空间代表范围和遥感像元的空间分辨率是否匹配。涡动相关仪的空间代表范围从几十米到几百米不等,主要用于检验基于中高分辨率遥感数据(如Landsat TM/ETM+(Landsat Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper Plus)、ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)、航空遥感数据等估算的地表蒸散发(Su等, 2005; Allen等, 2007)。例如, French等(2005)使用涡动相关仪的观测值验证其通量源区内4个ASTER像元的足迹权重平均值检验了TSEB(Two Source Energy Balance)模型和SEBS模型估算的潜热通量。闪烁仪观测尺度能够与一个或多个中低分辨率的遥感像元相匹配,可用于检验基于中低分辨率遥感数据(如MODIS、AVHRR、GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite))等估算的蒸散发量(Jia等, 2003; Song等, 2018)。如, Jia等(2003)检验基于ATSR(Along Track Scanning

Radiometer)遥感数据的SEBS模型估算感热通量时,以架设在葡萄园、农田、苜蓿地等混合地表的3组大孔径闪烁仪观测数据为相对真值,验证其源区范围内多个(分别为2个、5个和6个)遥感像元的平均值。

由于遥感图像按像元排列,而观测通量的源区大小、形状和位置并不固定,会随着架高、风速/风向、大气稳定性和地表粗糙度等变化(Jia等, 2012),所以涡动相关仪、闪烁仪的源区无法一直完全覆盖一个或几个像元,将会给验证结果带来一定的不确定性。上述方法实质上是以近似像元尺度相对真值来验证遥感产品,但在高度非均匀地表,源区与验证像元的重叠度、亚像元的非均匀性均会影响真实性检验的结果。

2) 高度非均匀地表。在高度非均匀地表,为了全面客观地评价遥感产品,需要与遥感像元空间代表范围相匹配的像元尺度相对真值,即基于地面观测值,结合辅助信息,根据观测站点在像元内的个数和分布情况,利用合适的尺度转换(升尺度)方法获取像元尺度地表蒸散发相对真值,用于检验相应的遥感像元值。

尺度转换(升尺度)是获取像元尺度地表蒸散发的关键,而多尺度观测数据是开展这一研究的前提。近年来,包括黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验(HiWATER)在内的一系列多尺度试验的开展(Liu等, 2011, 2018),为验证和发展尺度转换(升尺度)方法提供了前所未有的数据基础(李新等, 2016)。目前常用的尺度转换方法(升尺度)包括平均方法、地统计方法、模式模拟方法和机器学习方法等(郝大磊等, 2018; Li等, 2018; Xu等, 2018a; Xu等, 2019c)。

Ge等(2015)基于HiWATER试验中黑河中游通量观测矩阵的观测数据,利用面到面回归克里格法进行尺度转换(升尺度)研究。先进行趋势建模,即建立与基于遥感反演地表温度、归一化植被指数、植被覆盖度等的线性回归模型;再应用地统计学中的克里格插值理论实现尺度转换(升尺度),成功地将感热通量从涡动相关仪的足迹尺度转换到与中低分辨率遥感像元尺度相匹配的大孔径闪烁仪足迹尺度,为后续获取像元尺度相对真值的研究奠定基础。随后,有些学者针对不同异质性程度地表,对比分析了多种尺度转换

(升尺度)方法的适用性,从而优选最合适方法获取像元尺度相对真值。如, Liu等(2016a)在黑河中游矩阵区域,比较了3种平均方法,包括算术平均法(通过像元内多台涡动相关仪观测值的算术平均获取像元尺度相对真值)、面积比平均法(根据像元内每台涡动相关仪观测值代表的土地利用/覆盖类型所占面积比例进行加权平均得到像元尺度相对真值)和足迹权重平均法(在面积比平均法的基础上,结合足迹模型,将面积权重换为足迹权重得到像元尺度相对真值),发现:在相对均匀地表,采用平均方法即可;而在非均匀地表,需引入能反映地表水热状况的辅助信息以减小尺度转换(升尺度)误差。进而在相对均匀地表,采用面积比平均法;在非均匀地表,则采用结合 Priestley-Taylor公式的尺度转换(升尺度)方法(先构建 Priestley-Taylor系数与地气温差的关系式,再依据 Priestley-Taylor公式,结合遥感和气象数据进行尺度转换获得像元尺度相对真值),得到较高准确度的 MODIS 过境时刻、日的像元尺度地表蒸散发相对真值,并且依据大孔径闪烁仪的观测值,给出了像元尺度地表蒸散发相对真值的不确定性,为验证修正的 SEBS 模型估算的潜热通量提供了像元尺度相对真值(Ma等, 2015b)。在此基础上, Li等(2018)结合黑河中、下游通量矩阵观测数据,通过直接检验和交叉检验比较6种尺度转换(升尺度)方法(面积比平均法、基于 Priestley-Taylor公式的方法、不等权重面到面回归克里格法以及人工神经网络、随机森林和深度信念网络方法),并根据地表异质性程度优选合适的尺度转换方法,即:在均匀地表和中度非均匀地表分别使用面积比平均法和不等权重面到面回归克里格法,而在高度非均匀地表则采用随机森林方法(使用站点观测值、遥感数据和气象数据,随机选取样本子集生成多个回归树模型,对多个回归树预测结果加权平均得到训练好的模型,据此进行尺度转换获取像元尺度相对真值),生产了黑河流域 MODIS 卫星过境日 2012 年植被生长季中游矩阵区域、2014 年—2015 年植被生长季下游矩阵区域像元尺度相对真值,并且用于验证空间分辨率为 1 km 的逐日 DTD 和 ETMonitor 遥感产品,较好地解决了遥感估算值与观测值空间尺度不匹配的问题。

然而,像黑河流域这样具备地表蒸散发密集观测系统,如通量观测矩阵的区域较少,为了能

够最大限度地获取多种地表类型、时间连续且空间代表性较好的像元尺度验证数据,就需要结合地表空间异质性评价结果,发展单站点到像元尺度的地表蒸散发尺度转换(升尺度)方法。

### 2.1.2 区域/流域尺度检验

区域(流域)尺度直接检验主要可分为以下两种:一种是结合降水量、径流量和陆地储水量变化数据(可由重力反演与气候实验卫星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 观测得到,也可假设多年平均值为零),依据水量平衡方程推算出区域尺度地表蒸散发相对真值,用于检验相应的地表蒸散发遥感产品(Vinukollu等, 2011b; Jia等, 2012; Xiong等, 2015; Miralles等, 2016; Li等, 2019; Xu等, 2019b);另一种是结合辅助信息,利用尺度转换方法将区域内多个站点的观测值进行尺度扩展(升尺度),获取区域尺度地表蒸散发的相对真值(Jung等, 2009, 2011; Bodesheim等, 2018; Xu等, 2018a),用于检验相应的地表蒸散发遥感产品。Vinukollu等(2011a)以水量平衡方法计算的区域尺度地表蒸散发量作为相对真值,检验了2003年—2006年全球26个流域地表蒸散发遥感模型 PM-Mu (Penman-Monteith) (Mu等, 2007)、PT-JPL (Priestly-Taylor Jet Propulsion Laboratory) (Fisher等, 2008)、SEBS (Su, 2002) 估算和再分析 ET 产品 VIC (Variable Infiltration Capacity) 和 ERA-Interim (European Centre for Medium Range Weather Forecasts Reanalysis- Interim) 的年蒸散发量。地表蒸散发遥感模型的估算结果在流域尺度与水量平衡方法结果的相关系数为 0.72—0.80, 均方根误差是 118—194 mm/a, 偏差为 -132—53 mm/a, 表现均好于再分析 ET 产品。由于水文观测、航拍、光学遥感以及人工调查等手段无法准确描述陆地储水量的变化,因此在长时间尺度上(年/多年平均),一般忽略土壤储水量变化量来验证地表蒸散发遥感产品。但这样的假设不适用于月尺度地表蒸散发遥感产品的检验,在 GRACE 卫星发射之后,这一情况有了改善。姜艳阳等(2017)利用 GRACE 重力卫星数据,用基于流域水量平衡方程计算的地表蒸散发检验了 MOD16 产品在中国的准确度。结果表明: MOD16 产品在月尺度与水量平衡计算结果的平均相关系数在 0.74 左右,均方根误差为 27.46 mm/month 左

右。此外, Li等(2019)结合GRACE重力卫星观测数据、大气水汽含量等, 基于陆地—大气水量平衡联合确定的实际蒸散发量作为流域尺度相对真值, 检验了2003年—2012年多种地表蒸散发遥感产品 AVHRR (Zhang等, 2010a)、GLEAM、MOD16和再分析数据GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 在青藏高原江河源区的准确度。研究表明: GLEAM遥感蒸散发产品在澜沧江及长江源区表现最优, GLDAS结果在怒江和黄河源区表现最优。基于水量平衡方程计算的地表蒸散发量在一个流域或水文单元是一个值, 在地表异质性程度较大的区域难以逐一像元来验证遥感产品时空分布的合理性和准确度。因此, 基于流域内多个站点的观测数据, 利用尺度转换方法获取以遥感像元/模型网格分布的区域尺度地表蒸散发相对真值应运而生。基于模型树MTE (Model Tree Ensembles), 结合全球通量观测网的地表通量、气象观测数据和遥感信息训练模型, 然后将模型应用到区域, 生产了1982年—2008年全球 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率、月尺度的水热通量和碳通量产品MPI-BGC (The Max Planck Institute for Biogeochemistry) (Jung等, 2011)。在此基础上, 发布了1980年—2016年全球半小时/逐月、 $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}/0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 空间分辨率的水热通量和碳通量产品 (Bodesheim等, 2018; Jung等, 2019), 这些数据都可被应用于区域乃至全球尺度遥感估算地表蒸散发的验证当中。如Velpuri等(2013)利用MPI-BGC产品检验了MOD16和SSEBop产品的准确度, 结果表明: 两种基于MODIS的ET遥感产品均具有相对较高的准确度。但上述这些以遥感像元/模型网格分布的区域地表蒸散发相对真值的空间分辨率相对较粗, 且在一些干旱、半干旱区域, 由于缺乏有代表性的观测数据造成空间覆盖不完整的问题, 因此, 在区域/流域尺度上, 急需更高空间分辨率、以遥感像元/模型网格分布的区域地表蒸散发的相对真值, 用于验证中高分辨率地表蒸散发遥感产品。Xu等(2018a)基于黑河流域36个通量观测站点数据, 结合直接检验和交叉检验比较了5种基于机器学习的尺度转换方法(回归树、随机森林、人工神经网络、支持向量机和深度信念网络), 优选出随机森林方法, 生产了黑河流域2012年—2016年植被生长季、空间分辨率为1 km的逐日地表蒸散发的相对真值数据

(ETMap)。经过黑河流域上、中、下游大孔径闪烁仪观测值的验证, 认为其具有相对可靠的准确度(均方根误差平均为0.92 mm/d), 能够作为区域尺度相对真值来验证地表蒸散发遥感产品。

虽然直接检验能够提供最为直观的验证依据, 但仍存在一定的不确定性。例如, 直接采用站点观测数据的验证会受到仪器观测误差、空间代表性误差, 图像空间配准误差等影响 (Jia等, 2012), 而基于像元或区域尺度相对真值的验证也会受到仪器观测误差、辅助数据误差、尺度转换误差以及图像空间配准误差等影响。基于水量平衡方法的验证大多忽略陆地储水量变化, 这也会给验证结果带来诸多不确定性。即便采用GRACE观测的陆地储水量, 但因其空间分辨率较粗(约50 km), 且降水量和径流存在观测误差等, 也会影响到验证结果。

评价验证过程中的不确定性一直是真实性检验的难点。随着不确定性理论的发展, 方差分解、概率图模型、蒙特卡洛、多项式混沌、信息论、机器学习和数据同化等方法已逐渐应用到不确定性分析中 (Li等, 2010; 龚伟和杨大文, 2013; Chen和Zabaras, 2014; Qi等, 2015; Deman等, 2016; Minh等, 2018; Xu等, 2018b), 这将有助于量化检验过程中的不确定性。

## 2.2 间接检验法

间接检验法又可分为交叉检验法、基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法和时空变化趋势分析检验法。

### 2.2.1 交叉检验法

交叉检验法是将已通过检验的、相对可靠的地表蒸散发产品(不仅是地表蒸散发遥感产品, 也可以是水文模型、陆面过程模型、再分析数据等得到的地表蒸散发)作为相对真值, 检验其他地表蒸散发遥感产品 (Jiménez等, 2011; Trambauer等, 2014); 也可以将3种及以上地表蒸散发遥感产品进行相互比较 (Jiang和Ryu, 2016; Miralles等, 2016; Xu等, 2019b)。交叉检验法侧重于评价不同地表蒸散发产品的相对准确度和时空变化趋势的一致性程度。

由于地表蒸散发遥感产品的生产往往依据其特定的环境, 很难评价它们在这些特定环境以外

的准确度。当研发的许多地表蒸散发遥感产品在特定观测站点有过较好的检验结果,但由于观测站点无法涵盖所有的地表类型,无法明确它们能否适用于其他地表类型(Timmermans等,2007)。因此,交叉检验可在真实性检验中发挥重要作用。

由于参与检验的地表蒸散发产品在时间和空间尺度的匹配是进行交叉检验的前提,因此在进行交叉检验前,应对多种地表蒸散发产品进行预处理,以保证参与检验的地表蒸散发产品在数据格式、投影方式、时空分辨率等方面的一致。

表2 地表蒸散发(土壤蒸发、植被蒸腾)的主要观测仪器

Table 2 Specific instruments for evapotranspiration measurements (including soil evaporation and vegetation transpiration)

| 观测仪器           | 观测原理   | 空间代表性范围                                  | 主要优势   | 不足   | 参考文献   |
|----------------|--|--|--|--|--|
| 蒸渗仪            | 基于水量平衡原理估算蒸散发  | 单点尺度(<10 m)                              | 可测量真实状态下的水分在水循环过程中的消耗情况  | 价格昂贵,对环境因素非常敏感,易受到风、沙影响,维护困难;空间代表性有限,仅能应用在单点尺度   | Allen等(2011); Wang和Dickinson(2012)                 |
| 植物液流仪(探针式和包裹式) | 利用能量平衡原理和热电转换技术结合生物学参数,计算植被蒸腾                          | 单点尺度(<10 m)                              | 操作简单、成本低、不破坏树木结构,不受地形和气候条件的限制  | 易受到树干液流估算公式中经验系数、树木液流径向变异等影响;空间代表性有限,只能测定植被单株或局部的蒸腾速率,扩展到大尺度时容易产生误差                          | Wullschlegler等(1998)                               |
| 小型蒸渗仪          | 通过小型蒸渗仪内原状土两次称重的差值,得到棵间土壤蒸发                            | 单点尺度(<10 m)                              | 价格便宜、操作简单  | 容易受到灌溉和降水的影响;安装期间会对土壤结构造成一定的破坏;空间代表性有限,仅能应用在单点尺度   | Granier等(1996); Allen等(2011)                       |
| 波文比能量平衡观测系统    | 基于地表能量平衡方程与近地层梯度扩散理论测量地表蒸散发                            | 百米尺度(10—10 <sup>2</sup> m)               | 物理概念明确<br>计算方法简单   | 在非均匀地表以及日出、日落或发生降水时刻误差较大;空间代表性有限,仅能应用在百米尺度   | Allen等(2011); Liu和Xu(2018)                         |
| 涡动相关仪          | 基于雷诺分解和泰勒假设,测量地表蒸散发                                    | 百米尺度(10—10 <sup>2</sup> m)               | 原理较为完备,能在长时间连续观测中最小限度地减少环境及生态系统的干扰   | 观测结果受能量平衡不闭合、不同数据处理方法等影响;空间代表性有限,仅能应用在百米尺度   | Allen等(2011); Xu等(2013); Liu等(2016a); Liu和Xu(2018) |
| 闪烁仪            | 基于电磁波传播理论和莫宁-奥布霍夫相似理论测量地表蒸散发。近红外闪烁仪需结合能量平衡方程余项法得到地表蒸散发 | 公里尺度(10 <sup>2</sup> —10 <sup>3</sup> m) | 不易受下垫面条件影响,稳定性与可靠性相对较好,可测量1—5 km非均匀地表光径路线上平均水热通量,能较好地与遥感像元尺度相匹配;微波闪烁仪可以直接测量地表蒸散发 | 容易受到光饱和效应、信号强度的内尺度效应、塔的晃动以及不利气象条件(如降水、能见度较差、弱湍流等)等限制;近红外闪烁仪仅能直接测量感热通量,而目前双波段闪烁仪算法不完备,运行维护较困难 | Allen等(2011); Liu等(2013); Xu等(2013); Liu和Xu(2018)  |

不少研究利用交叉检验法检验不同地表蒸散发产品的时空分布合理性和在典型地表类型上的适用性。如:Mueller等(2011)检验了基于遥感估算、陆面过程模型模拟、再分析数据集

和基于联合国政府间气候变化委员会IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)的气候模式模拟的蒸散发等共4类41种全球地表蒸散发产品的全球空间分布格局,以所有产品的均值作

为相对真值进行分析。研究结果认为: 各类产品的ET空间格局基本一致(高值ET分布在赤道附近, 低值ET在高纬度地区附近); 年均蒸散发的相对差异在不同区域都大于20%, 尤其在亚马逊河流域的差异最大。Trambauer等(2014)结合气候类型和干旱指数将非洲大陆分为5个类别21个区域, 以5种水文模型、2种遥感产品(GLEAM和MOD16)和1种再分析数据ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的均值作为相对真值, 检验2000年—2010年地表蒸散发在不同区域的相对准确度, 并选取典型地表类型绘制泰勒图以评价各产品的适用性。结果表明: 水文模型模拟的地表蒸散发在干旱和半干旱区域趋于低估, 再分析产品几乎在所有区域都出现高估现象; MOD16产品趋于低估, 并且与其他产品在地中海干旱半干旱地区和非洲南部区域的一致性较低; 而GLEAM产品则在撒哈拉沙漠出现高估现象。

如果无法确定哪一种产品是相对可靠的, 也可通过产品间的相互比较得出相对准确度。通过假设3种地表蒸散发遥感产品误差独立并计算各产品相对准确度的三重检验法TC(Triple Collocation)已成为表征地表蒸散发遥感产品相对准确度的主要方法(Loew等, 2017; Khan等, 2018)。该方法将3种误差独立的地表蒸散发遥感产品表示为真值项的线性关系式, 通过联立这些线性方程计算出每种产品误差的方差, 进而得到各产品的相对准确度。如, Khan等(2018)使用TC方法检验了GLEAM、MOD16和ET再分析数据GLDAS在亚洲地区的蒸散发量, 认为: GLEAM与GLDAS在森林区域的相对准确度较高, 而MOD16在大部分区域相对准确度较低。当待检地表蒸散发遥感产品多于3种时, 各产品之间误差相互独立的假设可能会导致方差为负的情况, 这时可使用三角帽法TCH(Three Cornered Hat)计算3种及以上地表蒸散发遥感产品的相对准确度。如Long等(2014)利用TCH方法分析了4种陆面过程模型(Noah、Mosaic、VIC、SAC-SMA)、2种地表蒸散发遥感产品(Zhang等, 2010a; Mu等, 2011)和利用GRACE数据基于水量平衡方程估算的蒸散发量在美国中南部区域3个主要流域的相对准确度。结果表明: 陆面过程模型在该区域的相对准确度高于遥感估算地表蒸散发产品和利用GRACE数据基

于水量平衡方程估算的蒸散发量。

不同产品时空变化趋势的分析也是交叉检验的重要内容。时间变化趋势可通过比较多种产品的蒸散发随时间变化的特征(如振幅、频率和周期等)来分析。Miralles等(2016)比较GLEAM、PT-JPL、MOD16、MTE、ERA-Interim这5种地表蒸散发产品在不同地表类型上的时间变化趋势, 认为: MOD16普遍偏低, 而ERA-Interim普遍偏高; 除了在北半球赤道附近植被密集区域和北极、南极荒漠地区以外, 5种产品都能够表现出相似的季节变化特征。空间变化趋势则可使用ET频率直方图、纬向廓线图、空间分布差值和Pearson相关系数等方法来分析。如Yang等(2015)对比TSEB(Two-Source Energy Balance)(Norman等, 1995; Kustas和Norman, 1996)、HTEM(Hybrid dual-source scheme and Trapezoid framework-based ET Model)(Yang和Shang, 2013)和MOD16在黑河中游的地表蒸散发频率直方图认为: TSEB、HTEM估算地表蒸散发的频率直方图较为类似, 而MOD16与前2种地表蒸散发的频率直方图所表现出的特征并不一致, 说明该模型对地表蒸散发的空间变化捕捉能力较低。Miralles等(2016)分析GLEAM、MOD16、PT-JPL、MTE、ERA-Interim年平均地表蒸散发的纬向廓线图时发现: 各模型估算值变化范围在最低的MOD16和最高的ERA-Interim之间。依据Pearson相关系数可知: 在高纬度和热带地区各产品间的一致性较高, 而在干旱区相关系数低于0.5, 在有些区域甚至低于0.2。

交叉检验法也适用于多种地表蒸散发遥感模型间的比较, 还包括模型关键变量的不同参数化方案、不同输入数据对估算结果的影响分析等(Vinukollu等, 2011a; Ershadi等, 2014; McCabe等, 2015; Michel等, 2016)。如, Vinukollu等(2011b)基于SEBS、PM-MU和PT-JPL模型结合国际卫星云气候学计划ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)和表面辐射收支计划SRB(Surface Radiation Budget)中的辐射数据, 探讨了不同模型估算全球蒸散发的不确定性, 认为SEBS和PM-Mu相比于PT-JPL更容易受到辐射数据差异的影响, 因此在澳大利亚中部地区出现了相对较高的不确定性。Ershadi等(2014)比较单源/双源P-M类模型和S-W模型

(Shuttleworth-Wallace) (Shuttleworth 和 Wallace, 1985) 的不同空气动力学阻抗和表面阻抗参数化方案对估算结果的影响, 认为: 在草地和灌木站点上单源 P-M 模型效果最优, 在农田站点上双源 P-M 模型表现最好, 而在常绿针叶林和落叶阔叶林站点上 S-W 模型优于上述 2 种。

交叉检验在没有地面观测数据的情况下也能够得出待检验地表蒸散发遥感产品与遥感模型的相对准确度。在检验时需要确保各产品间时空分辨率的一致性, 如果不一致则需要考虑尺度转换。因此尺度转换以及相对真值的不确定性会直接影响到检验结果 (吴小丹等, 2015), 而使用 TC 或 TCH 的方法计算相对误差的大小与所选择的产品有一定关系。此外有研究表明: 基于 TC/TCH 方法结果与基于直接检验得到的产品准确度相比, 可能存在高估产品的相关系数, 低估产品的均方根误差的问题 (Wu 等, 2019b)。

### 2.2.2 基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法

基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法是指利用高分辨率遥感信息作为地表蒸散发遥感模型的输入, 将模型输出结果与地面观测数据进行一致性检验, 然后把通过一致性检验的模型输出结果尺度转换至中低分辨率, 最终实现对中低分辨率地表蒸散发遥感产品的检验, 其实质是一种逐级检验的方法。

Anderson 等 (2004) 基于 Landsat TM/ETM+ (30 m) 和 GOES 遥感数据 (5 km), 利用 ALEXI (Atmosphere Land Exchange Inverse model) (Anderson 等, 1997) 模型和 DisALEXI (Disaggregated ALEXI) (Norman 等, 2003) 模型, 实现了地表蒸散发的尺度转换。然后结合涡动相关仪观测值和观测通量足迹验证了空间分辨率由高到低的模型估算潜热通量的一致性。其中 Landsat TM/ETM+ 和 GOES 数据估算的地表蒸散发与地面观测值的偏差分别为 10% 和 17%。Wang 和 Currit (2011) 基于 SEBAL 模型, 将 30 m 分辨率的 Landsat TM 数据分别聚合到 60 m、120 m、240 m、480 m 和 960 m 尺度上, 并以 30 m 分辨率的估算结果作为相对真值, 检验利用参数聚合方法估算的不同空间分辨率潜热通量。总体上, 不同空间分辨率 SEBAL 模型估算潜热通量与 30 m 估算结果差异达  $\pm 25\%$ , 且在植被覆盖率较小或不同土地利用类型的过渡区域的

差异会较大。

Zhang 等 (2010b) 提出了一种基于高分辨率遥感数据的多尺度检验法, 称为“一检两恰”, 即: 首先采用地面观测值直接检验基于地基遥感数据的模型反演结果 (一检); 然后用检验过的模型对相同区域的机载遥感数据反演的结果进行一致性比对 (一恰); 再将前一步骤中通过一致性比对的结果对相同区域的卫星遥感数据反演的结果进行一致性比对 (二恰), 以实现逐级检验的目的。在此基础上, 张仁华 (2016) 又提出了一种“相对真值传递法”, 即在小尺度得到相对真值, 逐步向大尺度传递。具体为: 利用研究区内站点观测的高、低值建立与高分辨率遥感估算值的纠正方程, 进而校正整幅图像中每个像元估算值, 以相同方式使相对真值从高空空间分辨率像元传递到中低空间分辨率像元, 从而实现中低分辨率遥感产品的检验。

高空空间分辨率的遥感信息能够尽可能地表征地表真实情况, 且与地面观测值的空间尺度比较接近, 有助于解决地面观测值空间尺度有限的问题, 对中低分辨率遥感产品的真实性检验起着十分重要的作用。然而, 尺度转换严重依赖高分辨率影像的质量和重返周期, 航空遥感、高分辨率卫星遥感数据与观测通量源区的匹配程度、不同分辨率遥感估算地表蒸散发量的尺度效应与校正、亚像元非均匀性等都会影响基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法结果。且与其他检验方法相比, 基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法操作相对复杂, 目前在遥感估算地表蒸散发真实性检验中应用不多。

### 2.2.3 时空变化趋势分析检验法

时空变化趋势分析检验法是检验地表蒸散发遥感产品与地表蒸散发影响因子, 如植被指数、叶面积指数等植被因子, 辐射、空气温度、湿度和风速等气象因子以及土壤水分等土壤因子的时空变化趋势是否一致, 包括时间变化趋势分析和空间变化趋势分析。

针对时间变化趋势, 可结合先验知识分析地表蒸散发与影响因子时间变化 (如振幅、周期和频率等) 是否一致。Xu 等 (2019b) 结合降雨数据分析 12 种地表蒸散发产品 (包括 4 种地表蒸散发遥感产品 GLEAM、SSEBop、MOD16、GFET; 8 种基于陆面过程模型模拟的地表蒸散发产品:

Mosaic、Noah28、SAC、VIC403、CLSM25、Noah36、NoahMP36、VIC412) 在美国的时间变化趋势合理性。由于德克萨斯州2011年出现了严重干旱, 降水量在这一年有明显下降, 这12种ET产品都在同年出现了下降趋势, 较好地捕捉到了这次干旱事件的发生, 说明了这些产品的变化趋势是比较合理的。

针对空间变化趋势, 也可结合先验知识分析地表蒸散发与影响因子差值、Pearson相关系数等的空间分布来判断两者变化趋势是否一致。如, Mu等(2011)根据全球降水量数据的空间分布, 分析MOD16产品的合理性。认为: 在相对较长时间内, 如果年降水量与蒸散发量相减结果小于或等于0, 则说明地表蒸散发估算较为合理。结果表明: 在全球大部分地区, 产品表现都比较合理。但在北半球高纬度区域等, 地表蒸散发高于降水量。除此之外, M-K方法(Mann-Kendall)、经验正交分解EOF(Empirical Orthogonal Function)等可以被用于定量分析地表蒸散发与影响因子变化趋势的一致性(Wang等, 2012; Zhang和Chen, 2017; Yan等, 2018)。如, Zhang和Chen(2017)利用M-K方法分析了MOD16产品在珠江流域的蒸散发年际变化趋势, 认为: 珠江流域蒸散发量从2000年—2014年呈轻微增长, 而在这期间珠江流域的风速与蒸散发量之间存在着较为一致的变化,

这一结论与以往的研究结果一致, 间接反映了MOD16产品在这一区域的时空变化趋势是比较合理的。Yan等(2018)利用M-K方法和Pearson相关系数法分析了2000年—2014年期间海河流域ETWatch产品与风速、气压和NDVI的时空变化趋势, 认为: NDVI在海河流域的多个区域与ET保持着较高的一致性, 都存在显著的上升趋势。这与近年来当地政府在海河流域开展的一系列水土保持项目, 扩大了植被覆盖范围的实际情况相符合, 也说明NDVI与蒸散发在这一区域的变化趋势有着密切联系, 反映了ETWatch产品时空变化趋势的合理性。

时空变化趋势分析法能够判断地表蒸散发时空变化的合理性, 但无法给出明确的准确度评价结果, 并且时空变化趋势的分析法需要依赖影响因子。因此, 各种影响因子时空变化的稳定性和不确定性会直接影响到评价结果。

表3总结了上述各类遥感估算地表蒸散发真实性检验方法。从表3中可知, 尽管每一种验证方法都可以作为一种独立方法进行遥感估算地表蒸散发的真实性检验, 但在地表水热状况空间异质性较高情况下推荐综合多种方法, 既提高验证结论的可靠性, 又可为遥感估算地表蒸散发误差来源的分析和验证过程不确定性的评价提供更多的支持。

表3 遥感估算地表蒸散发真实性检验方法

Table 3 Validation methods for remotely-sensed land surface evapotranspiration

| 检验方法 | 评价指标/方法  | 适用条件                                     | 优点                               | 不足                              |
|------|--|--|----------------------------------|---------------------------------|
| 直接检验 | 以站点观测值作为像元尺度相对真值来检验仪器所在遥感像元值/周围多个遥感像元的算术平均值  | 地表均匀/像元尺度                                | 操作简单, 能表征像元尺度遥感产品的准确度和时间变化趋势的合理性 | 验证结果的不确定性依赖于观测数据的空间代表性          |
|      | 当观测站通量源区大小与待检地表蒸散发遥感产品像元相同或相近时, 以站点观测值作为像元尺度相对真值用于检验仪器观测源区内的遥感像元值, 否则以站点观测值作为像元尺度相对真值用于检验仪器观测源区内遥感像元的足迹权重平均值 | Bias、RMSE、MRE、MAPE、R/R <sup>2</sup> 、NSE | 地表中度非均匀/像元尺度                     | 在一定程度上解决非均匀地表地面观测与遥感像元空间尺度不匹配问题 |

续表

| 检验方法             | 评价指标/方法             | 适用条件  | 优点                   | 不足   |   |
|------------------|---------------------|---|----------------------|--|---|
|                  |                     | 当观测站通量源区大小与待检地表蒸散发遥感产品像元相同或相近时,以站点观测值作为像元尺度相对真值用于检验仪器观测源区内的遥感像元值,否则基于地面观测值,结合辅助信息,利用尺度转换方法获取像元尺度相对真值检验相应遥感像元值 | 地表高度非均匀/像元尺度         | 解决非均匀地表地面观测与遥感像元空间尺度不匹配问题                          | 仪器观测误差、尺度转换误差和图像空间配准误差会影响验证结果的不确定性  |
| 基于区域(流域)地表蒸散发的检验 |                     | 以水量平衡方程计算结果作为流域尺度相对真值来检验地表蒸散发遥感产品   | 流域尺度                 | 操作简单,能表征流域尺度遥感产品的准确度和时间变化趋势的合理性                    | 仅得到流域尺度的平均准确度,遥感产品的空间分布合理性难以检验  |
|                  |                     | 基于区域内多个站点观测值,通过尺度转换得到的地表蒸散发空间分布作为区域尺度相对真值,来检验地表蒸散发遥感产品  | 区域/流域尺度              | 能够逐像元检验区域/流域遥感产品准确度与时空分布趋势的合理性                     | 仪器观测误差、辅助数据误差和尺度转换误差会造成验证结果的不确定性  |
| 间接检验             | 交叉检验法               | 以已检的、相对可靠的地表蒸散发产品检验其他地表蒸散发遥感产品;或3种及以上地表蒸散发遥感产品的相互比较   | TC或TCH方法             | 操作简单,能表征多种遥感产品的相对准确度和时空变化趋势的一致性                    | 只能获取遥感产品的相对准确度;验证结果依赖于参考遥感产品和交叉检验方法   |
|                  | 基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法 | 利用高分辨率遥感信息作为地表蒸散发遥感模型的输入,将模型输出结果与地面观测数据进行一致性检验,然后把通过一致性检验的模型输出结果逐级转换至中低分辨率,检验中低分辨率地表蒸散发遥感产品                   | Bias、MRE、R           | 有助于解决地面观测空间尺度有限的问题,能表征遥感产品的相对准确度和时空变化趋势的合理性        | 只能获取产品的相对准确度;尺度转换严重依赖高分辨率影像的质量和重返周期;验证结果取决于高分辨率遥感数据与观测通量源区的匹配程度、模型的准确度、尺度效应校正等;检验过程比较复杂,实际检验工作中较少应用 |
|                  | 时空变化趋势分析检验法         | 检验地表蒸散发遥感产品与地表蒸散发影响因子的时空变化趋势是否一致  | 皮尔森相关系数法、EOF方法、M-K方法 | 既无地面相对真值,也无其他地表蒸散发产品和不同空间分辨率的卫星遥感信息,但有地表蒸散发的影响因子数据 | 无法定量评价遥感产品准确度;验证结果依赖于影响因子的准确度   |

注: 偏差 Bias, 均方根误差 RMSE(Root Mean Squared Error), 平均相对误差 MRE(Mean Relative Error), 平均绝对百分比误差 MAPE(Mean Absolute Percent Error), 相关系数/决定系数  $R/R^2$  (correlation coefficient/ coefficient of determination), 纳什效率系数 NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient), 皮尔森相关系数(Pearson correlation coefficient), 三重检验法 TC (Triple Collocation), 三角帽法 TCH(Three Cornered Hat), 经验正交分解法 EOF(Empirical Orthogonal Function), M-K法(Mann-Kendall)。

目前也有一些研究结合直接检验法和间接检验法来验证地表蒸散发遥感产品 (Jiang 和 Ryu, 2016; Miralles 等, 2016; Khan 等, 2018; Xu 等, 2019b), 例如, Jiang 和 Ryu (2016) 在站点和区域尺度分别使用全球 113 个 FLUXNET 观测数据和 MPI-BGC 产品对时间分辨率为 8 d, 空间分辨率为 1 km 的 BESS-ET 产品进行了直接检验, 分析产品在站点和区域尺度的准确度。此外还结合 MOD16 产品进行间接检验 (交叉检验), 比较 BESS-ET 与 MOD16 产品在全球范围内的空间分布格局与时间变化趋势的一致性。研究表明: 与 FLUXNET 观测数据相比, BESS-ET 的相关系数和 RMSE 分别是 0.62 mm/d 和 0.78 mm/d; 与区域尺度 MPI-BGC 数据的相关系数和 RMSE 分别为 0.90 mm/a 和 118 mm/a。BESS-ET 与 MODIS 产品所表现的全球空间分布格局与时间变化趋势基本一致, 其中在美国、加拿大和欧洲等区域差异相对较小, 但在几乎没有地面观测数据的 30°N 和 30°S 区域, 两者差异较大。Xu 等 (2019b) 结合直接检验法和间接检验法对包括地表蒸散发遥感产品 (GLEAM、SSEBop、MOD16、GFET)、基于陆面过程模型模拟的地表蒸散发产品 (NLDAS-2: Mosaic、Noah28、SAC、VIC403; NLDAS-3: CLSM25、Noah36、NoahMP36、VIC412) 等在内的 12 种地表蒸散发产品进行检验, 分别基于美国通量网的 15 个观测站观测数据和水量平衡方程计算的结果作为相对真值在站点和流域尺度验证各产品, 然后利用 TCH 方法交叉验证产品间的相对准确度, 并分析产品的误差来源和验证过程当中存在的不确定性。直接检验结果表明: 各产品在美国站点和流域尺度的 RMSE 分别在 18.52—29.01 mm/month 和 27.32—42.78 mm/a 之间, 所有产品都可以捕捉到地表蒸散发的季节变化趋势。不同产品基于 TCH 检验的结果为: NLDAS-3 的相对准确度最高, 其次是 NLDAS-2, GLEAM 的相对准确度高于其他地表蒸散发遥感产品。研究结果也认为: 产品的误差来源与模型结构、参数化方案以及输入数据的准确度有关。验证过程中存在的不确定性与站点数据和产品像元/网格的空间尺度不匹配、涡动相关仪观测数据的能量不闭合、观测站点数量、降水量和径流数据的不确定性, 以及 TCH 方法自身的不确定性有关。

尽管上述研究结合了 1—2 种直接或间接检验方法验证了遥感估算地表蒸散发, 但目前采用不同尺度地表蒸散发相对真值, 综合直接检验和间

接检验的多种方法, 在提供较为可信验证结论的同时又能够分析遥感产品误差来源和验证过程中不确定性的验证实例仍较少。

### 2.3 遥感估算土壤蒸发与植被蒸腾的真实性检验方法

对遥感估算土壤蒸发和植被蒸腾进行真实性检验也是国内外学者一直关注的问题。常用的地表蒸散发观测仪器, 如涡动相关仪、闪烁仪等无法区分土壤蒸发和植被蒸腾 (Song 等, 2020), 对植被蒸腾和土壤蒸发的直接观测主要依赖于植物液流仪 (探针式和包裹式) 和小型蒸渗仪 (表 2), 或分别与涡动相关仪、大型蒸渗仪相结合等 (Colaizzi 等, 2012; Yang 等, 2015; Song 等, 2016a, 2016b)。Colaizzi 等 (2012) 利用小型蒸渗仪和植物液流仪观测数据验证了地表能量平衡双源模型 (TSEB) 估算的土壤蒸发和植被蒸腾, 结果表明: 模型估算土壤蒸发的 RMSE 约在 0.7 mm/d 左右, 植被蒸腾的 RMSE 约在 0.9—1.9 mm/d。此外, 也可以利用稳定同位素技术获得土壤蒸发和植被蒸腾对生态系统蒸散发的贡献比例, 再结合涡动相关仪数据拆分土壤蒸发和植被蒸腾用于验证模型估算结果 (Yang 等, 2015; Song 等, 2016a, 2016b)。Yang 等 (2015) 利用 2012 年 HIWATER 试验中大满超级站基于稳定同位素技术拆分的土壤蒸发和植被蒸腾数据验证 3 种双源模型 (TSEB、HTEM 和 MOD16) 的准确度, 结果表明: HTEM 模型估算结果与稳定同位素拆分法得到的结果最为接近, TSEB 模型略有高估, 而 MOD16 存在明显的低估。

然而, 由于地面观测技术的滞后, 针对遥感估算土壤蒸发和植被蒸腾的直接验证大多局限于站点尺度 (宋立生等, 2017)。而土壤蒸发和植被蒸腾的间接检验可在站点或区域尺度展开, 主要体现在多模型/产品之间的比较 (Yang 等, 2015; Miralles 等, 2016), 例如: Miralles 等 (2016) 比较了 GLEAM、MOD16 和 PT-JPL 估算的土壤蒸发、植被蒸腾在全球尺度上的空间分布和所占比例。结果表明: 不同产品间土壤蒸发和植被蒸腾在空间分布存在较大差异。MOD16 产品在热带雨林的土壤蒸发明显高于 GLEAM 和 PT-JPL, 其估算的土壤蒸发占到蒸散发量的 52%, 而 GLEAM 和 PT-JPL 分别占 14% 和 26%。

现有的观测仪器, 如小型蒸渗仪和植物液流仪的观测空间代表范围有限, 与大型称重式蒸渗

仪、涡动相关仪等结合进行拆分时,通常存在空间尺度不匹配问题。基于稳定同位素稳态假设一般只能获取中午时刻的土壤蒸发和植被蒸腾。目前遥感估算土壤蒸发和植被蒸腾真实性检验由于缺乏验证数据仍然存在较大不确定性,因此发展像元/区域尺度土壤蒸发和植被蒸腾相对真值的获取方法是今后遥感估算土壤蒸发与植被蒸腾真实性检验的关键所在(宋立生等,2017)。

### 3 结 语

随着“国家高分辨率对地观测系统重大专项”等对地观测计划相继实施,气象、资源、环境、海洋等系列遥感卫星陆续升空,中国现已成为了当之无愧的遥感大国。通过遥感产品的真实性检验可为不同遥感产品在各个领域应用核定基准,从而推动遥感科学与技术的发展,促进遥感产品的应用,使中国真正从遥感大国转变为遥感强国(吴小丹等,2015;晋锐等,2017),因此可以说真实性检验是一项具有重要科学意义和战略价值的研究。

目前,为实现中国遥感产品真实性检验的业务化运行(晋锐等,2017),由中国科学院与高等院校等科研团队共同推动了遥感产品真实性检验网的建设(Ma等,2015a;Wang等,2016),首先将黑河流域地表过程综合观测网、怀来遥感试验站、长春净月潭遥感试验站、呼伦贝尔草原生态系统观测与研究站作为试点,之后真实性检验网将在全国范围内逐步完善。为了提供遥感产品真实性检验标准化的验证技术流程和执行标准,包括“遥感产品真实性检验导则”(已发布)、“陆地定量遥感产品真实性检验通用方法”、叶面积指数、土壤水分和地表蒸散发等24项定量遥感产品的真实性检验国家标准正在制定和审核中,都将对中国遥感产品真实性检验工作起到实质性推动作用(晋锐等,2017)。

从遥感估算地表蒸散发真实性检验进展来看,尽管目前已取得了较大进展,但在非均匀地表仍面临挑战,主要存在以下问题:研究者们基于不同验证数据和方法给出的验证结论存在差异,且这些验证结果在多大程度上代表了遥感产品的真实准确度依然存在疑问;在检验当中使用单一方法检验比较多,综合多种方法的检验比较少,而获得可靠的验证结果需要通过综合不同验证方法,并从不同角度来验证遥感产品;目前许多验证都

没有重视遥感产品误差来源与验证过程中不确定性的分析,但是对于产品生产者和用户而言,产品在什么情况下容易产生误差,以及在应用中会存在多大的不确定性才是他们真正关心的问题;对于遥感估算地表蒸散发真实性检验还缺少一个相对完善的理论框架和技术流程以及对多种遥感估算地表蒸散发产品的实证研究。这些问题都影响到了遥感估算地表蒸散发准确度的提高和其产品应用范围的扩大。

针对以上问题,本文提出了一套非均匀地表蒸散发遥感产品真实性检验的理论框架(图2),包括地表水热状况空间异质性的度量、非均匀地表验证场的优化布设、非均匀下垫面地表蒸散发的多尺度观测试验、卫星像元/区域尺度地表蒸散发相对真值的获取,遥感估算地表蒸散发产品真实性检验的实证研究以及真实性检验过程中不确定性分析等(Liu等,2016b)。具体来说,首先应根据地表蒸散发遥感产品在时间、空间分辨率上不同,结合地表水热状况的影响因子和多种空间异质性评价指标,发展地表水热状况空间异质性的评价方法,并对不同地表类型下通量观测站点的地表水热状况进行度量;构建不同异质性类型/程度地表下,以地表蒸散发像元尺度相对真值获取的无偏最优估算为目标的验证场优化布设和评价方案;开展非均匀地表蒸散发的多尺度观测试验,生成多尺度、多源的蒸散发观测数据集;进行尺度转换(升尺度)方法研究,获取卫星像元/区域尺度地表蒸散发相对真值;在此基础上,系统地实证多种地表蒸散发遥感产品,分析检验方法与评价指标体系的合理性,定量评价真实性检验过程中的不确定性。

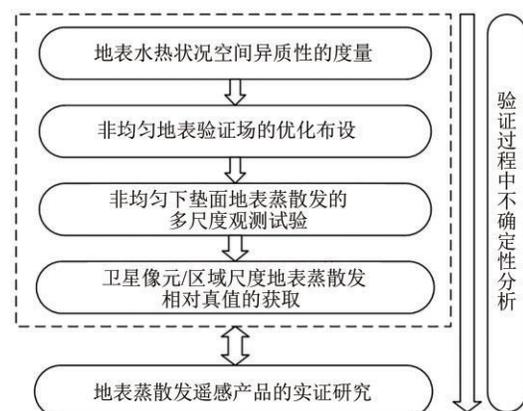


图2 非均匀地表遥感估算地表蒸散发真实性检验的理论框架  
Fig.2 Theoretical framework of validation for remotely sensed land surface evapotranspiration over heterogeneous surfaces

在上述理论框架的基础上，本文也构建了一个多源、多尺度、多方法、多层次的非均匀地表蒸散发遥感产品真实性检验的技术流程（图3），即以非均匀地表遥感产品真实性检验理论框架为基础，充分利用多源、多尺度验证数据，例如像元尺度与区域/流域尺度相对真值、水量平衡方程估算结果、地表蒸散发再分析数据、模型模拟值、其他蒸散发遥感产品以及蒸散发影响因子等，分别在像元尺度和区域/流域尺度两个尺度上开展检验；综合多种检验方法，一般以直接检验法为主、

间接检验法为辅（交叉检验法、基于高分辨率遥感数据的多尺度逐级检验法、时空变化趋势分析检验法）对地表蒸散发遥感产品进行多层次的检验，涉及地表蒸散发遥感产品准确度评价与时空变化趋势分析、误差来源探讨以及验证过程不确定性分析等。上述理论框架和技术流程的构建将进一步提高非均匀地表遥感估算地表蒸散发真实性检验的客观性和可靠性，使地表蒸散发遥感产品更好地服务于全球气候变化研究、流域水资源管理、作物估产与干旱监测等领域。

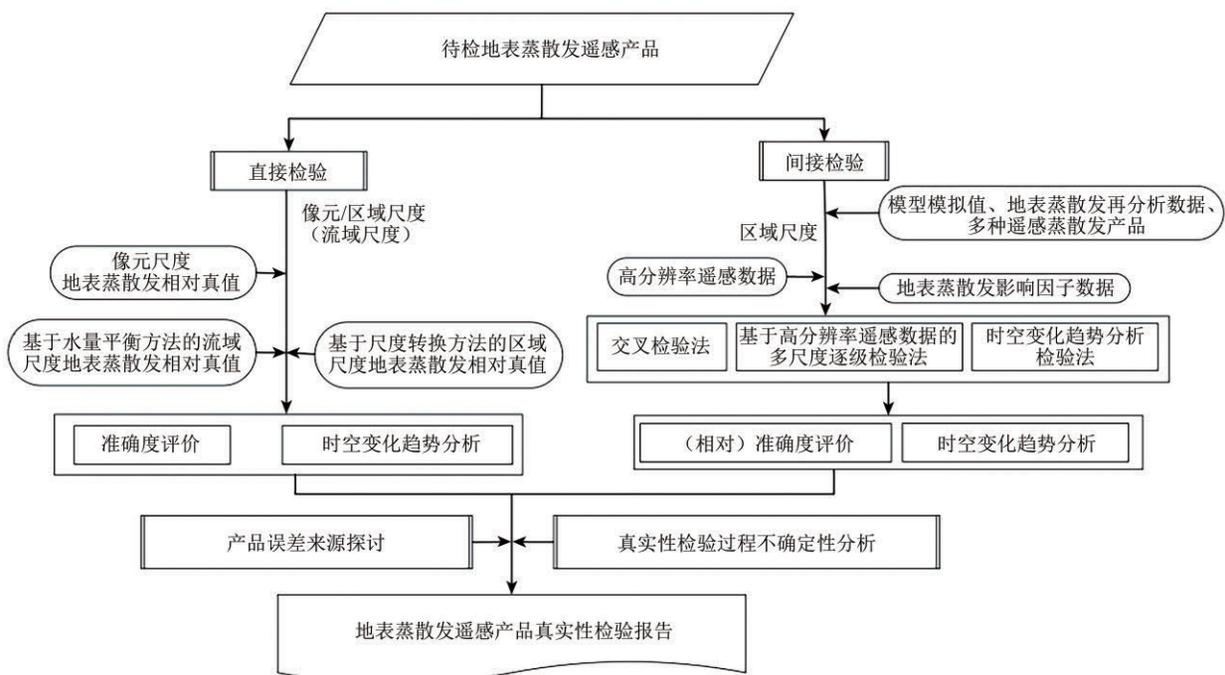


图3 非均匀地表遥感估算地表蒸散发真实性检验的技术流程

Fig.3 Technical flowchart of validation for remotely sensed land surface evapotranspiration over heterogeneous surfaces

**志 谢** 本文参考了国标 GB/T 36296-2018 “遥感产品真实性检验导则”以及“陆地定量遥感产品真实性检验通用方法”和“地表蒸散发遥感产品真实性检验”标准草案、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”相关材料，在此一并感谢！

## 参考文献 (References)

Allen R G, Tasumi M, Morse A, Trezza R, Wright J L, Bastiaanssen W, Kramber W, Lorite I and Robison C W. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-applications. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4): 395-406 [DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395)]

Allen R G, Pereira L S, Howell T A and Jensen M E. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6): 899-920 [DOI: 10.1016/j.agwat.2010.12.015]

Anderson M C, Norman J M, Diak G R, Kustas W P and Mecikalski J R. 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 60(2): 195-216 [DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00215-5]

Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, Torn R D, Kustas W P and Basara J B. 2004. A multiscale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales. *Journal of Hydrometeorology*, 5(2): 343-363 [DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0343:AMRSMF>2.0.CO;2]

Anderson M C, Kustas W P, Norman J M, Hain C R, Mecikalski J R, Schultz L, González-Dugo M P, Cammalleri C, d'Urso G, Pim-

- stein A and Gao F. 2010. Mapping daily evapotranspiration at field to global scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7 (4): 5957-5990 [DOI: 10.5194/hessd-7-5957-2010]
- Bai J, Jia L, Liu S M, Xu Z W, Hu G C, Zhu M J and Song L S. 2015. Characterizing the footprint of eddy covariance system and large aperture scintillometer measurements to validate satellite-based surface fluxes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12 (5): 943-947 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2368580]
- Baret F, Weiss M, Allard D, Garrigues S, Leroy M, Jeanjean H, Fernandes R, Myneni R B, Privette J, Morisette J, Bohbot H, Bosse-no R, Dedieu G, Di Bella C, Duchemin B, Espana M, Gond V, Gu X F, Guyon D, Lelong C, Maisongrande P, Mougín 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>.
- Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A and Holtslag A A M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213: 198-212 [DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4]
- Bodesheim P, Jung M, Gans F, Mahecha M D and Reichstein M. 2018. Upscaled diurnal cycles of land-atmosphere fluxes: a new global half-hourly data product. *Earth System Science Data*, 10(3): 1327-1365 [DOI: 10.5194/essd-10-1327-2018]
- Brunsell N A, Ham J M and Arnold K A. 2011. Validating remotely sensed land surface fluxes in heterogeneous terrain with large aperture scintillometry. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (21): 6295-6314 [DOI: 10.1080/01431161.2010.508058]
- Chávez J L, Neale C M U, Hipps L E, Prueger J H and Kustas W P. 2005. Comparing aircraft-based remotely sensed energy balance fluxes with eddy covariance tower data using heat flux source area functions. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6): 923-940 [DOI: 10.1175/JHM467.1]
- Chen P and Zabarás N. 2014. Uncertainty quantification for multiscale disk forging of polycrystal materials using probabilistic graphical model techniques. *Computational Materials Science*, 84: 278-292 [DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.12.004]
- Chen X, Su Z, Ma Y, Liu S, Yu Q and Xu Z. 2014. Development of a 10-year (2001-2010) 0.1° data set of land-surface energy balance for mainland China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23): 13097-13117 [DOI: 10.5194/acp-14-13097-2014]
- Chen Y, Yuan W P, Xia J Z, Fisher J B, Dong W J, Zhang X T, Liang S L, Ye A Z, Cai W W and Feng J M. 2015. Using Bayesian model averaging to estimate terrestrial evapotranspiration in China. *Journal of Hydrology*, 528: 537-549 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.06.059]
- Colaizzi P D, Kustas W P, Anderson M C, Agam N, Tolch J A, Evett S R, Howell T A, Gowda P H and O'Shaughnessy S A. 2012. Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures. *Advances in Water Resources*, 50: 134-151 [DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.06.004]
- Demam G, Konakli K, Sudret B, Kerrou J, Perrochet P and Benabderahmane H. 2016. Using sparse polynomial chaos expansions for the global sensitivity analysis of groundwater lifetime expectancy in a multi-layered hydrogeological model. *Reliability Engineering and System Safety*, 147: 156-169 [DOI: 10.1016/j.res.2015.11.005]
- Ershadi A, McCabe M F, Evans J P, Chaney N W and Wood E F. 2014. Multi-site evaluation of terrestrial evaporation models using FLUXNET data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 187: 46-61 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.11.008]
- Ershadi A, McCabe M F, Evans J P and Wood E F. 2015. Impact of model structure and parameterization on Penman - Monteith type evaporation models. *Journal of Hydrology*, 525: 521-535 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.008]
- Fisher J B, Tu K P and Baldocchi D D. 2008. Global estimates of the land - atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment*, 112(3): 901-919 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.025]
- Fisher J B, Melton F, Middleton E, Hain C, Anderson M, Allen R, McCabe M F, Hook S, Baldocchi D, Townsend P A, Kilic A, Tu K, Miralles D D, Perret J, Lagouarde J P, Waliser D, Purdy A J, French A, Schimel D, Famiglietti J S, Stephens G and Wood E F. 2017. The future of evapotranspiration: global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research*, 53 (4): 2618-2626 [DOI: 10.1002/2016WR020175]
- 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 Brunzell 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 B, Qin Y, Wang Y H, Yang D W and Zheng Y R. 2016. Modeling ecohydrological processes and spatial patterns in the upper Heihe Basin in China. *Forests*, 7(1): 10 [DOI: 10.3390/f7010010]
- Ge Y, Liang Y Z, Wang J H, Zhao Q Y and Liu S M. 2015. Upscaling sensible heat fluxes with area-to-area regression kriging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3): 656-660 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2355871]
- Ge Y, Jin Y, Stein A, Chen Y H, Wang J H, Wang J F, Cheng Q M, Bai H X, Liu M X and Atkinson P M. 2019. Principles and methods of scaling geospatial Earth science data. *Earth-Science Reviews*, 197: 102897 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102897]
- Ghilain N, Arboleda A, Sepulcre-Cantò G, Batelaan O, Ardö J and Gellens-Meulenberghs F. 2012. Improving evapotranspiration in a

- land surface model using biophysical variables derived from MSG/SEVIRI satellite. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8): 2567-2583 [DOI: 10.5194/hess-16-2567-2012]
- Gong W and Yang D W. 2013. High-dimensional nonlinear correlation analysis of hydrological variables and model structure uncertainty qualification. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 32(5): 13-20 (龚伟, 杨大文. 2013. 水文变量高维非线性相关分析与水文模型结构不确定性评估. *水力发电学报*, 32(5): 13-20)
- Granier A, Biron P, Köstner B, Gay L W and Najjar G. 1996. Comparisons of xylem sap flow and water vapour flux at the stand level and derivation of canopy conductance for Scots pine. *Theoretical and Applied Climatology*, 53(1/3): 115-122 [DOI: 10.1007/BF00866416]
- Hao D L, Xiao Q, Wen J G, You D Q, Wu X D, Lin X Y and Wu S B. 2018. Advances in upscaling methods of quantitative remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 22(3): 408-423 (郝大磊, 肖青, 闻建光, 游冬琴, 吴小丹, 林兴稳, 吴胜标. 2018. 定量遥感升尺度转换方法研究进展. *遥感学报*, 22(3): 408-423) [DOI: 10.11834/jrs.20187070]
- Hemakumara H M, Chandrapala L and Moene A F. 2003. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agricultural Water Management*, 58(2): 109-122 [DOI: 10.1016/S0378-3774(02)00131-2]
- Hu G C and Jia L. 2015. Monitoring of evapotranspiration in a semi-arid inland river basin by combining microwave and optical remote sensing observations. *Remote Sensing*, 7(3): 3056-3087 [DOI: 10.3390/rs70303056]
- Hu G C, Jia L and Menenti M. 2015. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Remote Sensing of Environment*, 156: 510-526 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.10.017]
- Jia L, Su Z B, van den Hurk B, Menenti M, Moene A, De Bruin H A R, Yrisarry J J B, Ibanez M and Cuesta A. 2003. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(1/3): 75-88 [DOI: 10.1016/s1474-7065(03)00009-3]
- 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*, 117(D13): D13113 [DOI: 10.1029/2011jd017037]
- Jiang C Y and Ryu Y. 2016. Multi-scale evaluation of global gross primary productivity and evapotranspiration products derived from Breathing Earth System Simulator (BESS). *Remote Sensing of Environment*, 186: 528-547 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.030]
- Jiang X G, Li Z L, Li X B and Li Z Y. 2008. Basic frame of remote sensing validation system. *Arid Land Geography*, 31(4): 567-571 (姜小光, 李召良, 李显彬, 李子扬. 2008. 遥感真实性检验系统框架初步构想. *干旱区地理*, 31(4): 567-571) [DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2008.04.023]
- Jiang Y Y, Wang W and Zhou Z H. 2017. Evaluation of MODIS MOD16 evapotranspiration product in Chinese river basins. *Journal of Natural Resources*, 32(3): 517-528 (姜艳阳, 王文, 周正昊. 2017. MODIS MOD16 蒸散发产品在中国流域的质量评估. *自然资源学报*, 32(3): 517-528) [DOI: 10.11849/zrzyxb.20160440]
- Jiménez C, Prigent C, Mueller B, Seneviratne S I, McCabe M F, Wood E F, Rossow W B, Balsamo G, Betts A K, Dirmeyer P A, Fisher J B, Jung M, Kanamitsu M, Reichle R H, Reichstein M, Rodell M, Sheffield J, Tu K and Wang K. 2011. Global intercomparison of 12 land surface heat flux estimates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D2): D02102 [DOI: 10.1029/2010jd014545]
- Jiménez C, Martens B, Miralles D M, Fisher J B, Beck H E and Fernández-Prieto D. 2018. Exploring the merging of the global land evaporation WACMOS-ET products based on local tower measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8): 4513-4533 [DOI: 10.5194/hess-22-4513-2018]
- Jin R, Li X, Ma M G, Ge Y, Liu S M, Xiao Q, Wen J G, Zhao K, Xin X P, Ran Y H, Liu Q H and Zhang R H. 2017. Key methods and experiment verification for the validation of quantitative remote sensing products. *Advances in Earth Science*, 32(6): 630-642 (晋锐, 李新, 马明国, 葛咏, 刘绍民, 肖青, 闻建光, 赵凯, 辛晓平, 冉有华, 柳钦火, 张仁华. 2017. 陆地定量遥感产品的真实性检验关键技术与试验验证. *地球科学进展*, 32(6): 630-642) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.06.0630]
- Jung M, Reichstein M and Bondeau A. 2009. Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model. *Biogeosciences*, 6(10): 2001-2013 [DOI: 10.5194/bg-6-2001-2009]
- Jung M, Reichstein M, Margolis H A, Cescatti A, Richardson A D, Arain M A, Arneth A, Bernhofer C, Bonal D, Chen J Q, Gianelle D, Gobron N, Kiely G, Kutsch W, Lasslop G, Law B E, Lindroth A, Merbold L, Montagnani L, Moors E J, Papale D, Sottocornola M, Vaccari F and Williams C. 2011. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G3): G00J07 [DOI: 10.1029/2010jg001566]
- Jung M, Koirala S, Weber U, Ichii K, Gans F, Camps-Valls G, Papale D, Schwalm C, Tramontana G and Reichstein M. 2019. The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes. *Scientific Data*, 6: 74 [DOI: 10.1038/s41597-019-0076-8]
- 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]
- Kalma J D, McVicar T R and McCabe M F. 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29(4/5): 421-469

- [DOI: 10.1007/s10712-008-9037-z]
- Khan M S, Liaquat U W, Baik J and Choi M. 2018. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252: 256-268 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.01.022]
- Kustas W P and Norman J M. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4): 495-516 [DOI: 10.1080/02626669609491522]
- Li X, Li X W, Li Z Y, Ma M G, Wang J, Xiao Q, Liu Q, Che T, Chen E X, Yan G J, Hu Z Y, Zhang L X, Chu R Z, Su P X, Liu Q H, Liu S M, Wang J D, Niu Z, Chen Y, Jin R, Wang W Z, Ran Y H, Xin X Z and Ren H Z. 2009a. Watershed allied telemetry experimental research. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114 (D22): D22103 [DOI: 10.1029/2008JD011590]
- 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, Jin R, Liu S M, Ge Y, Xiao Q, Liu Q H, Ma M G and Ran Y H. 2016. Upscaling research in HiWATER: progress and prospects. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 921-932 (李新, 晋锐, 刘绍民, 葛咏, 肖青, 柳钦火, 马明国, 冉有华. 2016. 黑河遥感试验中尺度上推研究的进展与前瞻. *遥感学报*, 20(5): 921-932) [DOI: 10.11834/jrs.20166241]
- Li X, Liu S M, Li H X, Ma Y F, Wang J H, Zhang Y, Xu Z W, Xu T R, Song L S, Yang X F, Lu Z, Wang Z Y and Guo Z X. 2018. Inter-comparison of six upscaling evapotranspiration methods: from site to the satellite pixel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(13): 6777-6803 [DOI: 10.1029/2018JD028422]
- Li X Y, Long D, Han Z Y, Scanlon B R, Sun Z L, Han P F and Hou A Z. 2019. Evapotranspiration estimation for Tibetan Plateau headwaters using conjoint terrestrial and atmospheric water balances and multisource remote sensing. *Water Resources Research*, 55 (11): 8608-8630 [DOI: 10.1029/2019WR025196]
- Li Z L, Shao Q X, Xu Z X and Cai X T. 2010. Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: a case study of SWAT model applied to Yingluoxia watershed in northwest China. *Journal of Hydrology*, 385(1/4): 76-83 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.01.025]
- Li Z L, Tang R L, Wan Z M, Bi Y Y, Zhou C H, Tang B H, Yan G J and Zhang X Y. 2009b. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9(5): 3801-3853 [DOI: 10.3390/s90503801]
- Liu Q H, Li X W and Chen L F. 2002. Field campaign for quantitative remote sensing in Beijing//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Ontario, Canada: IEEE, 6: 3133-3135 [DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1027109]
- Liu S M, Sun R, Sun Z P, Li X W and Liu C M. 2006. Evaluation of three complementary relationship approaches for evapotranspiration over the Yellow River basin. *Hydrological Processes*, 20(11): 2347-2361 [DOI: 10.1002/hyp.6048]
- Liu S M, Bai J, Jia Z Z, Jia L, Zhou H and Lu L. 2010. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(3): 573-584 [DOI: 10.5194/hess-14-573-2010]
- Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, Jia Z Z, Zhu M J, Bai J and Wang J M. 2011. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4): 1291-1306 [DOI: 10.5194/hess-15-1291-2011]
- Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, Jia Z Z and Zhu M J. 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 487: 24-38 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.025]
- 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. 2016a. 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 S M, Xu Z W, Song L S, Zhang Y and Zhu Z L. 2016b. A framework for validating remotely sensed evapotranspiration//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing: IEEE: 3485-3488 [DOI: 10.1109/IGARSS. 2016. 7729901]
- 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 and Xu Z W. 2018. Micrometeorological methods to determine evapotranspiration//Li X and Vereecken H, eds. *Observation and Measurement of Ecohydrological Processes*. Berlin, Heidelberg: Springer: 1-39 [DOI: 10.1007/978-3-662-48297-1\_7-3]
- Loew A, Bell W, Brocca L, Bulgin C E, Burdanowitz J, Calbet X, Donner R V, Ghent D, Gruber A, Kaminski T, Kinzel J, Klepp C, Lambert J C, Schaepman-Strub G, Schröder M and Verhoelst T. 2017. Validation practices for satellite-based earth observation data across communities. *Reviews of Geophysics*, 55(3): 779-817 [DOI: 10.1002/2017rg000562]
- Long D, Longuevergne L and Scanlon B R. 2014. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 50(2): 1131-1151 [DOI: 10.1002/2013wr014581]
- Ma M G, Che T, Li X, Xiao Q, Zhao K and Xin X P. 2015a. A prototype network for remote sensing validation in China. *Remote*

- Sensing, 7(5): 5187-5202 [DOI: 10.3390/rs70505187]
- Ma N, Szilagyi J, Zhang Y S and Liu W B. 2019. Complementary-relationship-based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982-2012: validations and spatiotemporal analyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(8): 4326-4351 [DOI: 10.1029/2018JD029850]
- Ma Y F, Liu S M, Song L S, Xu Z W, Liu Y L, Xu T R and Zhu Z J. 2018. Estimation of daily evapotranspiration and irrigation water efficiency at a Landsat-like scale for an arid irrigation area using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 216: 715-734 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.019]
- Ma Y F, Liu S M, Zhang F, Zhou J, Jia Z Z and Song L S. 2015b. Estimations of regional surface energy fluxes over heterogeneous oasis - desert surfaces in the middle reaches of the Heihe River during HiWATER-MUSOEXE. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3): 671-675 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2356652]
- Martens B, Miralles D G, Lievens H, van der Schalie R, de Jeu R A M, Fernández-Prieto D, Beck H E, Dorigo W A and Verhoest N E C. 2017. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 10(5): 1903-1925 [DOI: 10.5194/gmd-10-1903-2017]
- Marx A, Kunstmann H, Schüttemeyer D and Moene A F. 2008. Uncertainty analysis for satellite derived sensible heat fluxes and scintillometer measurements over Savannah environment and comparison to mesoscale meteorological simulation results. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(4): 656-667 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.11.009]
- McCabe M F, Ershadi A, Jimenez C, Miralles D G, Michel D and Wood E F. 2015. The GEWEX LandFlux project: evaluation of model evaporation using tower-based and globally-gridded forcing data. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(8): 6809-6866 [DOI: 10.5194/gmdd-8-6809-2015]
- McCabe M F, Ershadi A, Jimenez C, Miralles D G, Michel D and Wood E F. 2016. The GEWEX LandFlux project: evaluation of model evaporation using tower-based and globally gridded forcing data. *Geoscientific Model Development*, 9(1): 283-305 [DOI: 10.5194/gmd-9-283-2016]
- Michel D, Jiménez C, Miralles D G, Jung M, Hirschi M, Ershadi A, Martens B, McCabe M F, Fisher J B, Mu Q, Seneviratne S I, Wood E F, Fernández-Prieto D. 2016. The WACMOS-ET project - Part 1: tower-scale evaluation of four remote-sensing-based evapotranspiration algorithms. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2): 803-822 [DOI: 10.5194/hess-20-803-2016]
- Minh L Q, Duong P L T and Lee M. 2018. Global sensitivity analysis and uncertainty quantification of crude distillation unit using surrogate model based on gaussian process regression. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 57(14): 5035-5044 [DOI: 10.1021/acs.iecr.7b05173]
- Miralles D G, Holmes T R H, De Jeu R A M, Gash J H, Meesters A G C A and Dolman A J. 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2): 453-469 [DOI: 10.5194/hess-15-453-2011]
- Miralles D G, Jiménez C, Jung M, Michel D, Ershadi A, McCabe M F, Hirschi M, Martens B, Dolman A J, Fisher J B, Mu Q, Seneviratne S I, Wood E F and Fernández-Prieto D. 2016. The WACMOS-ET project-Part 2: evaluation of global terrestrial evaporation data sets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2): 823-842 [DOI: 10.5194/hess-20-823-2016]
- Morissette 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, Iames 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]
- Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S and Running S W. 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 111(4): 519-536 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.04.015]
- Mu Q Z, Zhao M S and Running S W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1781-1800 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.019]
- Mueller B, Seneviratne S I, Jimenez C, Corti T, Hirschi M, Balsamo G, Ciais P, Dirmeyer P, Fisher J B, Guo Z, Jung M, Maignan F, McCabe M F, Reichle R, Reichstein M, Rodell M, Sheffield J, Teuling A J, Wang K, Wood E F and Zhang Y. 2011. Evaluation of global observations-based evapotranspiration datasets and IPCC AR4 simulations. *Geophysical Research Letters*, 38(6): L06402 [DOI: 10.1029/2010gl046230]
- Norman J M, Kustas W P and Humes K S. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3/4): 263-293 [DOI: 10.1016/0168-1923(95)02265-Y]
- Norman J M, Kustas W P, Prueger J H and Diak G R. 2000. Surface flux estimation using radiometric temperature: a dual-temperature-difference method to minimize measurement errors. *Water Resources Research*, 36(8): 2263-2274 [DOI: 10.1029/2000wr900033]
- Norman J M, Anderson M C, Kustas W P, French A N, Mecikalski J, Torn R, Diak G R, Schmugge T J and Tanner B C W. 2003. Remote sensing of surface energy fluxes at 10<sup>1</sup>-m pixel resolutions. *Water Resources Research*, 39(8): 1221 [DOI: 10.1029/2002wr001775]
- Qi W, Zhang C, Fu G T, Sweetapple C and Zhou H C. 2015. Evalua-

- tion of global fine-resolution precipitation products and their uncertainty quantification in ensemble discharge simulations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(9): 9337-9391 [DOI: 10.5194/hessd-12-9337-2015]
- Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, Gower S T, Bakwin P S and Hibbard K A. 1999. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 70(1): 108-127 [DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00061-9]
- Ryu Y, Baldocchi D D, Kobayashi H, van Ingen C, Li J, Black T A, Beringer J, van Gorsel E, Knohl A, Law B E and Rouspard O. 2011. Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(4): (GB4017 [DOI: 10.1029/2011gb004053])
- Senay G B, Bohms S, Singh R K, Gowda P H, Velpuri N M, Alemu H and Verdin J P. 2013. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: a new parameterization for the SSEB approach. *Journal of the American Water Resources Association*, 49(3): 577-591 [DOI: 10.1111/jawr.12057]
- Shuttleworth W J and Wallace J S. 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(469): 839-855 [DOI: 10.1002/qj.49711146910]
- Song L S, Kustas W P, Liu S M, Colaizzi P D, Nieto H, Xu Z W, Ma Y F, Li M S, Xu T R, Agam N, Tolk J A and Evett S R. 2016a. Applications of a thermal-based two-source energy balance model using Priestley-Taylor approach for surface temperature partitioning under advective conditions. *Journal of Hydrology*, 540: 574-587 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.06.034]
- Song L S, Liu S M, Kustas W P, Zhou J, Xu Z W, Xia T and Li M S. 2016b. Application of remote sensing-based two-source energy balance model for mapping field surface fluxes with composite and component surface temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230-231: 8-19 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.01.005]
- Song L S, Liu S M, Xu T R, Xu Z W and Ma Y F. 2017. Soil evaporation and vegetation transpiration: remotely sensed estimation and validation. *Journal of Remote Sensing*, 21(6): 966-981 (宋立生, 刘绍民, 徐同仁, 徐自为, 马燕飞. 2017. 土壤蒸发和植被蒸腾遥感估算与验证. *遥感学报*, 21(6): 966-981) [DOI: 10.11834/jrs.20176391]
- Song L S, Liu S M, Kustas W P, Nieto H, Sun L, Xu Z W, Skaggs T H, Yang Y, Ma M G, Xu T R, Tang X G and Li Q P. 2018. Monitoring and validating spatially and temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale. *Remote Sensing of Environment*, 219: 72-88 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.002]
- Song L S, Bian Z J, Kustas W P, Liu S M, Xiao Q, Nieto H, Xu Z W, Yang Y, Xu T R and Han X J. 2020. Estimation of surface heat fluxes using multi-angular observations of radiative surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 239: 111674 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111674]
- Su H, McCabe M F, Wood E F, Su Z and Prueger J H. 2005. Modeling evapotranspiration during SMACEX: comparing two approaches for local-and regional-scale prediction. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6): 910-922 [DOI: 10.1175/JHM466.1]
- Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 85-100 [DOI: 10.5194/hess-6-85-2002]
- Tian Y, Zheng Y, Zheng C M, Xiao H L, Fan W J, Zou S B, Wu B, Yao Y Y, Zhang A J and Liu J. 2015. Exploring scale-dependent ecohydrological responses in a large endorheic river basin through integrated surface water-groundwater modeling. *Water Resources Research*, 51(6): 4065-4085 [DOI: 10.1002/2015WR016881]
- Timmermans W J, Kustas W P, Anderson M C and French A N. 2007. An intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment*, 108(4): 369-384 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.028]
- Trambauer P, Dutra E, Maskey S, Werner M, Pappenberger F, van Beek L P H and Uhlenbrook S. 2014. Comparison of different evaporation estimates over the African continent. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1): 193-212 [DOI: 10.5194/hess-18-193-2014]
- Velpuri N M, Senay G B, Singh R K, Bohms S and Verdin J P. 2013. A comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States: using point and gridded FLUXNET and water balance ET. *Remote Sensing of Environment*, 139: 35-49 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.013]
- Venturini V, Islam S and Rodriguez L. 2008. Estimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 132-141 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.04.014]
- Vinukollu R K, Wood E F, Ferguson C R and Fisher J B. 2011a. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: evaluation of three process-based approaches. *Remote Sensing of Environment*, 115(3): 801-823 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.11.006]
- Vinukollu R K, Meynadier R, Sheffield J and Wood E F. 2011b. Multi-model, multi-sensor estimates of global evapotranspiration: climatology, uncertainties and trends. *Hydrological Processes*, 25(26): 3993-4010 [DOI: 10.1002/hyp.8393]
- Wang J and Currit N. 2011. Uncertainty with the scaling-up of remotely sensed evapotranspiration estimation//Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Querying and Mining Uncertain Spatio-Temporal Data. Chicago: ACM: 3-7 [DOI: 10.1145/2064969.2064970]
- Wang K C, Dickinson R E, Wild M and Liang S L. 2010. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 1. model development. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D20): D20112 [DOI: 10.1029/

- 2009jd013671]
- Wang K C and Dickinson R E. 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50(2): (RG2005 [DOI: 10.1029/2011rg000373])
- Wang S G, Li X, Ge Y, Jin R, Ma M G, Liu Q H, Wen J G and Liu S M. 2016. Validation of regional-scale remote sensing products in China: from site to network. *Remote Sensing*, 8(12): 980 [DOI: 10.3390/rs8120980]
- Wang W G, Shao Q X, Peng S Z, Xing W Q, Yang T, Luo Y F, Yong B and Xu J Z. 2012. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957-2008 and their spatial and seasonal differences. *Water Resources Research*, 48(5): W05530 [DOI: 10.1029/2011WR010724]
- Ward H C, Evans J G, Hartogensis O K, Moene A F, De Bruin H A R and Grimmond C S B. 2013. A critical revision of the estimation of the latent heat flux from two-wavelength scintillometry. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(676): 1912-1922 [DOI: 10.1002/qj.2076]
- Wu B F, Yan N N, Xiong J, Bastiaanssen W G M, Zhu W W and Stein A. 2012. Validation of ETWatch using field measurements at diverse landscapes: a case study in Hai Basin of China. *Journal of Hydrology*, 436-437: 67-80 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.02.043]
- 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. *遥感学报*, 18(5): 1011-1023) [DOI: 10.11834/jrs.20143332]
- 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): 75-92 (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) [DOI: 10.11834/jrs.20154009]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G and You D Q. 2019. Advances and challenges in the validation of remote sensing albedo products. *Journal of Remote Sensing*, 23(1): 11-23 (吴小丹, 肖青, 闻建光, 游冬琴. 2019. 异质地表反照率遥感产品真实性检验研究现状及挑战. *遥感学报*, 23(1): 11-23) [DOI: 10.11834/jrs.20198057]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G, You D Q and Hueni A. 2019a. Advances in quantitative remote sensing product validation: overview and current status. *Earth-Science Reviews*, 196: 102875 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102875]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G and You D Q. 2019b. Direct comparison and triple collocation: which is more reliable in the validation of coarse-scale satellite surface albedo products. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(10): 5198-5213 [DOI: 10.1029/2018JD029937]
- Wullschlegel S D, Meinzer F C and Vertessy R A. 1998. A review of whole-plant water use studies in tree. *Tree Physiology*, 18(8/9): 499-512 [DOI: 10.1093/treephys/18.8-9.499]
- Xiong Y J, Zhao S H, Tian F and Qiu G Y. 2015. An evapotranspiration product for arid regions based on the three-temperature model and thermal remote sensing. *Journal of Hydrology*, 530: 392-404 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.050]
- Xu F N, Wang W Z, Wang J M, Huang C L, Qi Y, Li Y and Ren Z G. 2019c. Aggregation of area-averaged evapotranspiration over the Ejina Oasis based on a flux matrix and footprint analysis. *Journal of Hydrology*, 575: 17-30 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.011]
- Xu T R, Bateni S M, Margulis S A, Song L S, Liu S M and Xu Z W. 2016. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and canopy transpiration via a two-source variational data assimilation system. *Journal of Hydrometeorology*, 17(9): 2353-2370 [DOI: 10.1175/jhm-d-15-0178.1]
- 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. 2018a. 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]
- Xu T R, Bateni S M, Neale C M U, Auligne T, and Liu S M. 2018b. Estimation of turbulent heat fluxes by assimilation of land surface temperature observations from geostationary satellites into an ensemble Kalman smoother framework. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(5): 2409-2423 [DOI: 10.1002/2017JD027732]
- Xu T R, He X L, Bateni S M, Auligne T, Liu S M, Xu Z W, Zhou J, Mao K B. 2019a. Mapping regional turbulent heat fluxes via variational assimilation of land surface temperature data from polar orbiting satellites. *Remote Sensing of Environment*, 221: 444-461 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.023]
- Xu T R, Guo Z X, Xia Y L, Ferreira V G, Liu S M, Wang K C, Yao Y J, Zhang X J and Zhao C S. 2019b. Evaluation of twelve evapotranspiration products from machine learning, remote sensing and land surface models over conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 578: 124105 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124105]
- Xu Z W, Liu S M, Li X, Shi S J, Wang J M, Zhu Z L, Xu T R, Wang W Z and Ma M G. 2013. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(23): 13140-13157 [DOI: 10.1002/2013jd020260]
- Yan N N, Tian F Y, Wu B F, Zhu W W and Yu M Z. 2018. Spatiotemporal analysis of actual evapotranspiration and its causes in the Hai Basin. *Remote Sensing*, 10(2): 332 [DOI: 10.3390/rs10020332]
- Yang Y T and Shang S H. 2013. A hybrid dual-source scheme and trapzoid framework-based evapotranspiration model (HTEM) using satellite images: algorithm and model test. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5): 2284-2300 [DOI: 10.1002/jgrd.

- 50259]
- Yang Y T, Long D, Guan H D, Liang W, Simmons C and Batelaan O. 2015. Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE-12 campaign: revisit of model physics. *Water Resources Research*, 51(5): 3145-3165 [DOI: 10.1002/2014WR015619]
- Yao Y J, Liang S L, Cheng J, Liu S M, Fisher J B, Zhang X D, Jia K, Zhao X, Qin Q M, Zhao B, Han S J, Zhou G S, Zhou G Y, Li Y L and Zhao S H. 2013. MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley - Taylor algorithm. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171-172: 187-202 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.11.016]
- Yao Y J, Liang S L, Li X L, Hong Y, Fisher J B, Zhang N N, Chen J Q, Cheng J, Zhao S H, Zhang X T, Jiang B, Sun L, Jia K, Wang K C, Chen Y, Mu Q Z and Feng F. 2014. Bayesian multimodel estimation of global terrestrial latent heat flux from eddy covariance, meteorological, and satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(8): 4521-4545 [DOI: 10.1002/2013jd020864]
- Yuan W P, Liu S G, Yu G R, Bonnefond J M, Chen J Q, Davis K, Desai A R, Goldstein A H, Gianelle D, Rossi F, Suyker A E and Verma S B. 2010. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 114(7): 1416-1431 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.022]
- Zhang B Q, Xia Y L, Long B, Hobbins M, Zhao X N, Hain C, Li Y H and Anderson M C. 2020. Evaluation and comparison of multiple evapotranspiration data models over the contiguous United States: implications for the next phase of NLDAS (NLDAS-Testbed) development. *Agricultural Forest Meteorology*, 280: 107810 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107810]
- Zhang K, Kimball J S, Nemani R R and Running S W. 2010a. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resources Research*, 46(9): W09522 [DOI: 10.1029/2009wr008800]
- Zhang K, Kimball J S and Running S W. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *WIREs: Water*, 3(6): 834-853 [DOI: 10.1002/wat2.1168]
- Zhang R H, Tian J, Li Z L, Su H B, Chen S H and Tang X Z. 2010b. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products. *Science China Earth Sciences*, 53(5): 741-751 [DOI: 10.1007/s11430-010-0021-3]
- Zhang R H. 2016. Key Scientific Issues of Quantitative Remote Sensing. Beijing: Higher Education Press: 16-23 (张仁华. 2016. 定量遥感若干关键科学问题研究. 北京: 高等教育出版社: 16-23)
- Zhang T and Chen Y B. 2017. Analysis of dynamic spatiotemporal changes in actual evapotranspiration and its associated factors in the Pearl River basin based on MOD16. *Water*, 9(11): 832 [DOI: 10.3390/w9110832]
- Zhang Y Q, Kong D D, Gan R, Chiew F H, McVicar T R, Zhang Q and Yang Y T. 2019. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017. *Remote sensing of environment*, 222: 165-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.031]
- Zheng C L, Jia L, Hu G C, Lu J, Wang K and Li Z S. 2016. Global evapotranspiration derived by ETMonitor model based on earth observations//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729049]

## Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration

ZHANG Yuan<sup>1</sup>, JIA Zhenzhen<sup>2</sup>, LIU Shaomin<sup>1</sup>, XU Ziwei<sup>1</sup>, XU Tongren<sup>1</sup>, YAO Yunjun<sup>3</sup>, MA Yanfei<sup>4</sup>, SONG Lisheng<sup>5</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, HU Xiao<sup>1</sup>, WANG Zeyu<sup>1</sup>, GUO Zhixia<sup>1</sup>, ZHOU Ji<sup>6</sup>

1. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Chongqing Survey Institute, Chongqing 400020, China;

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

4. School of Economics and Management, Department of Geography, Handan University, Handan 056005, China;

5. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

6. School of Resource and Environment, University of Electronic and Technology of China, Chengdu 611731, China

**Abstract:** Evapotranspiration (ET) is an important component in the soil-vegetation-atmosphere continuum. Remotely Sensed ET (RS-ET) provides multi-scale and spatiotemporally continuous information over the land surface, and has become an effective approach to obtain ET.

Due to the heterogeneity of land surface and complexity of meteorological conditions at the near-surface layer, there exist various uncertainties derived from the model mechanism, parameterization scheme, input data and time scale conversion, which hindered correct estimations of ET, and further effect on its application. Therefore, it is essential to validate RS-ET to optimize the models and improve the associated products. This paper evaluated a group of validation methods for RS-ET (including evaporation and transpiration), which usually consists of direct validation and indirect validation. An overview of the principles, applicability, advantages, and disadvantages for all the

validation methods were summarized. Direct validation is based on in situ measurements (including (micro-) lysimeter, stem sap flow, Bowen ratio energy balance system, eddy covariance, and scintillator) to get the ground truth value, which can be used as the primary and reliable method to validate RS-ET and usually employed at the pixel and regional (or basin) scales. In the absence of ground truth ET, indirect validation becomes feasible, which can be classified into (1) cross-validation, (2) Multi-scale validation based on high spatial resolution remote sensing data, and (3) spatiotemporal variation analysis that combines multiple ET impact factors. Nevertheless, there are still a series of theoretical and methodological challenges in the validation of RS-ET, such as the scale mismatch between in situ measurement and remote sensing pixels due to the land surface heterogeneity. It is well-acknowledged that how to get the ground truth value at pixel and regional scales is the core issue of validation.

This study demonstrated that validations of RS-ET products can be not only applied over homogeneous land surface but also heterogeneous surface with further development, which may at least but not limited to quantification of the spatial heterogeneity of land surface hydrothermal conditions, optimization of the experimental sites for validation over heterogeneous land surface, multi-scale measurements of ET on heterogeneous surface, acquisition of ground truth ET at pixel and regional scales, validation demonstration and uncertainty analyses of the validation process. Moreover, this study also proposed a generalized validation framework to validate RS\_ET products at different scales (pixel scale and regional scale), which included direct validation (as the priority method) and indirect validation methods (as the auxiliary method), multiple validation data (i.e., ground truth ET at the pixel and regional scale, ET reanalysis data, various ET products, estimated ET from models and ET impact factors). The current framework focused on evaluating the accuracy and the spatiotemporal variations, identifying the error sources of the RS-ET products and analyzing the uncertainties during the validation process. This work is expected to improve the land surface remote sensing products and promote the development of quantitative remote sensing science.

**Key words:** remotely sensed evapotranspiration, heterogeneous surface, validation, direct validation, indirect validation

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41531174); National Major Scientific Research Plan (No. 2015CB953702)