

光学—微波闪烁仪通量观测验证遥感蒸散模型的时间尺度匹配研究

徐菲楠¹, 王维真¹, 黄春林^{1,2}, 王介民¹, 冯姣姣^{1,3}, 董磊磊¹,
任志国^{1,4}, 李艳⁵, 张阳¹

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室 黑河遥感试验研究站
甘肃省遥感重点实验室, 兰州 730000;
2. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 兰州 730070;
3. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070;
4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 南京信息工程大学 地理科学学院, 南京 210044

摘要: 当前基于地表温度的遥感蒸散(ET)模型, 核心通过卫星过境获取的瞬时遥感影像反演地表温度等关键参数, 进而推算感热通量(H)、潜热通量(LE)及地表蒸散量; 而模型结果的验证多采用涡动相关(EC)方法等观测手段获取的30 min平均通量数据, 二者存在显著时间尺度不匹配问题。近20年发展起来的光学—微波双波长光闪烁方法, 可测量数百米至10 km尺度的H与LE, 适用于地形起伏等复杂下垫面, 且仅需1—2 min的较短取平均时间即可获得统计稳定的通量结果。该方法与EC优势互补, 为遥感ET模型及产品的验证提供了重要契机。本文基于中国西北黑河流域上游高寒草甸与中游绿洲农田的光学—微波双波段闪烁仪(OMS)、涡动相关仪及气象梯度塔观测数据, 聚焦探究OMS通量观测与遥感ET模型结果在时间尺度匹配方面的显著优势。不同取平均时间(1 min、2 min、5 min、10 min、15 min、30 min)的OMS与EC通量数据的对比分析结果表明, OMS系统在1 min短时尺度下即可获取统计稳定的通量观测值, 其理论可行性得到有效证实。值得注意的是, 该时间尺度与Landsat等卫星过境单景影像的扫描时长基本一致。基于上游高寒草甸站点的1 min OMS通量观测数据的分析表明, 在以往常用遥感卫星影像结果验证的30 min内, EC观测的H与LE变化幅度通常可达10%—30%。若仅选取某一时刻的1 min通量观测值用于遥感ET模型验证, 其引入的不确定性将达到相似量级, 且在大气非平稳条件下, 该不确定性会进一步增大。利用中游绿洲农田站点的OMS与EC通量观测数据, 对基于双源地表能量平衡(TSEB)模型和Landsat影像估算的瞬时H与LE进行了验证。结果表明, TSEB模型的估算值与1 min OMS通量观测值具有更好的一致性。双波长光闪烁方法能够获得与卫星观测时空尺度相匹配的地面观测数据, 为基于遥感地表温度数据的ET模型及产品验证提供了一种有效途径。该技术的推广应用, 将有力推动相关ET反演算法的创新发展与产品精度提升。

关键词: 双波长光闪烁方法, 遥感蒸散模型, 黑河流域, 感热和潜热通量, 时间尺度匹配

中图分类号: P412.4/P2

引用格式: 徐菲楠, 王维真, 黄春林, 王介民, 冯姣姣, 董磊磊, 任志国, 李艳, 张阳. 2026. 光学—微波闪烁仪通量观测验证遥感蒸散模型的时间尺度匹配研究. 遥感学报, 30(3): 591–607

Xu F N, Wang W Z, Huang C L, Wang J M, Feng J J, Dong L L, Ren Z G, Li Y and Zhang Y. 2026. Temporal-scale matching of optical-microwave scintillometer flux observations for validating remote sensing evapotranspiration models. National Remote Sensing Bulletin, 30(3): 591–607 [DOI: 10.11834/jrs.20253460]

1 引言

地表能量收支中, 净辐射几乎是唯一的能量

收入项。其与土壤热通量的差值(即地表可利用能量)主要转化为驱动边界层大气湍流输送的感热通量H(Sensible heat flux)和消耗于地表蒸散的

收稿日期: 2024-11-17; 预印本: 2025-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42130113, 42471433, 42101411, 42201431); 甘肃省青年科技基金(编号: 24JRRA094)

第一作者简介: 徐菲楠, 研究方向为地表水热通量观测与遥感反演。E-mail: xufeinan@lzb.ac.cn

通信作者简介: 王维真, 研究方向为土壤水文学和水文气象遥感。E-mail: weizhen@lzb.ac.cn

潜热通量 LE (Latent heat flux)。感热通量和潜热通量影响陆气相互作用以及边界层的发展 (Xu 等, 2019)。在地表能量收支各分量中, 潜热通量通常为仅次于净辐射的关键组分 (Trenberth 等, 2009)。与之密切相关的地表蒸散 ET (Evapotranspiration), 是仅次于降水的陆地水循环第二大组分 (Rodell 等, 2015)。ET 同时链接地表的能量收支和水分收支 (Jung 等, 2010; Lian 等, 2018)。因此, ET 及地表能量平衡其他组分的定量分析对水资源管理、区域至全球尺度天气气候模拟与分析具有极其重要的意义 (Anderson 等, 2012; Mengelkamp 等, 2006; Miralles 等, 2014; 卢静等, 2025)。

目前, 涡动相关 EC (Eddy-covariance) 方法已成为观测 H、LE 等湍流通量的最基本手段, 广泛应用于全球通量观测网 (FLUXNET; Baldocchi 等, 2001) 及中国通量观测网络 (ChinaFLUX; Yu 等, 2006)。但 EC 方法也存在显著局限性 (Baldocchi, 2003): 其通过协方差直接计算通量的简化算法, 是在下垫面均匀平坦、大气状态平稳且湍流发展充分的假设条件下建立的; 同时, 该方法需捕捉湍流谱中厘米至千米量级各种尺度湍流对近地层通量的贡献, 因此要求足够高的采样频率 (10—20 Hz) 与足够长的取平均时间 (30—60 min)。此外, 常规 3—6 m 高度的 EC 观测, 其通量足迹尺度通常仅为数百米, 这一空间尺度对于验证当前主流全球 ET 遥感产品 (如 MOD16 (Mu 等, 2011)、PML_V2 (Zhang 等, 2019) 及 ETMonitor (Zheng 等, 2022; 郑超磊等, 2023)) 而言仍然偏小 (Jia 等, 2012; Kleissl 等, 2009; Liu 等, 2016)。

众所周知, 当前诸多基于地表能量平衡原理的遥感 ET 模型, 如 SEBAL (Bastiaanssen 等, 1998), SEBS (Su, 2002) 及 TSEB (Kustas 和 Norman, 1999), 直接通过卫星过境几十秒获取的瞬时遥感影像反演地表温度等关键参数, 进而计算像元尺度的 H、LE 及 ET, 其结果验证大多采用 EC 方法的 30 min 平均通量数据 (Li 等, 2017; Song 等, 2023; Tang 等, 2011; 马耀明等, 1999)。然而, 站点实际观测数据表明, 30 min 内通量变幅通常达 10%—40%, 在大气状态非平稳条件下甚至超过 50%。此时, EC 方法的 30 min 平均通量观测数据难以有效表征卫星过境瞬时的通量估算结果, 二者存在显著的时间不匹配问题 (Van Kesteren 等,

2013b; 王介民, 2021)。因此, 利用 30 min 平均通量数据验证遥感 ET 模型的瞬时结果, 其时间尺度上的差异必然会引入较大的不确定性。

近 20 年发展起来的光闪烁方法 (Scintillometry) 具有多个与 EC 方法互补的独特优势。该方法可以测量数百米至 10 km 尺度的面积平均通量, 其空间代表性尺度明显优于 EC 方法, 可与中低分辨率卫星影像的像元尺度相匹配 (Beyrich 等, 2021); 适用于 EC 方法难以适配的复杂下垫面, 包括地形起伏区域、高植被覆盖区及城市下垫面等 (Ward, 2017); 且在 1—2 min 很短取平均时间内获得统计稳定的通量结果 (Hartogensis 等, 2002; Van Kesteren 等, 2013b)。利用闪烁仪观测技术, 可获取高时间分辨率的地表通量数据, 能够捕捉天空云块漂移等引发的辐射变化, 以及相应的 H 和 LE 的变化。闪烁仪的短时观测优势为遥感 ET 模型瞬时结果的更好验证提供了重要契机 (王介民和德布莱恩 H, 2025)。

各种不同的光闪烁仪已应用于全球多个地区的地气相互作用观测研究 (Ward, 2017)。光学波段的大孔径闪烁仪 LAS (Large aperture scintillometer) 可在复杂下垫面上较准确地测量面积平均 H。由微波闪烁仪 MWS (Microwave scintillometer) 与 LAS 组成的光学—微波双波段闪烁仪 OMS (Optical-microwave scintillometer) 系统, 可同时观测 H 和 LE (Andreas, 1989; Hill 等, 1988)。2014 年, 德国 Radiometer Physics GmbH (RPG) 公司推出了微波闪烁仪 (MWSC-160) 的商业产品。该产品可与多种型号的 LAS 组成 RGP-OMS 系统。至今, 国内新建的装有 RPG-OMS 系统的台站已达 10 余个 (王介民, 2021)。新型 RPG-OMS 系统已推广应用于全球多种地表类型的野外通量观测, 如德国农田 (Stoffer, 2018)、加拿大北方森林 (Isabelle 等, 2020) 与 Romaine-2 水库 (Pierre 等, 2022)、智利灌溉式葡萄园 (Aguirre 等, 2022)、美国非灌溉式葡萄园 (Perelet 等, 2022), 以及中国华北温带落叶林 (Zhang 等, 2021) 与西北高寒草甸与绿洲 (Xu 等, 2023; Zheng 等, 2023)。上述研究以 EC 方法为基准初步评估 RPG-OMS 系统性能, 结果表明, 两套系统的水热通量观测结果一致性较好。

西北黑河流域于 2019 年新增了两个 OMS 观测台站, 分别布设于流域上游高寒草甸 (“阿柔站”) 和中游绿洲农田 (“大满站”)。基于大满

站的 EC 和 OMS 系统通量观测数据, Xu 等 (2023) 对 PML-V2 (China) ET 产品进行了对比分析; Ren 等 (2025) 针对 4 种主流的 ET 遥感产品开展了精度评价; Feng 等 (2023) 与 Wei 等 (2023) 则分别对基于 Sentinel-2 卫星及无人机获取的瞬时遥感影像推算的通量结果进行了精度验证。现有研究大多强调 OMS 通量观测与遥感卫星像元空间尺度相匹配的较大空间代表性。然而, 对于遥感模型估算结果与地面观测数据的时间尺度不匹配及其引发的不确定性, 相关研究尚未给予充分关注。为此, 本文基于该流域阿柔与大满两个站点的 OMS、EC 及气象梯度塔观测数据, 重点探究 OMS 通量观测与遥感 ET 模型结果在时间尺度匹配方面的独特优势。本研究可为相关遥感 ET 模型及

产品的真实性检验提供科学参考。

2 光学—微波双波长光闪烁方法

图 1 为微波闪烁仪与大孔径闪烁仪并行使用的 光学—微波双波段闪烁仪系统示意图。闪烁仪包括发射端和接收端。发射端发射两束波长为 λ_1 和 λ_2 , 强度恒定的光, 距离 L 以外的接收端以一定的采样频率接收经大气湍流散射的强度起伏的光。光强的起伏主要由光路上空气折射指数的起伏引起, 后者则取决于光路上不同湍涡的温度和水汽浓度的变化 (De Bruin 等, 1995)。由此, 通过闪烁仪观测的对数光强方差及协方差, 即可推算空气折射指数及大气温度、湿度的结构参数, 进而利用近地层相似理论计算感热通量和潜热通量。

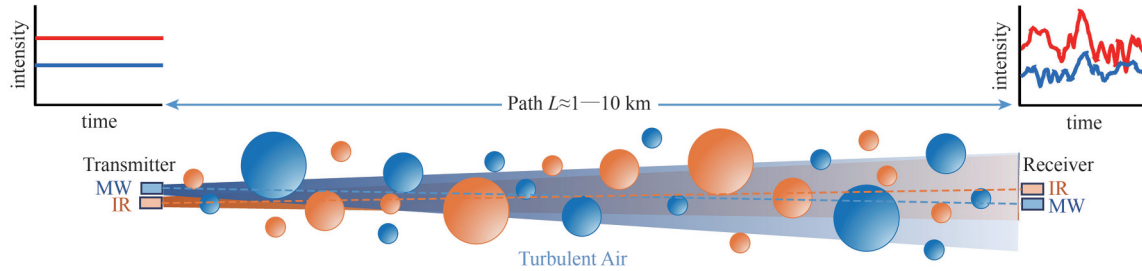


图 1 光学—微波双波段闪烁仪系统示意图 (王介民, 2021) (IR 为近红外波段闪烁仪 (波长 $\lambda_1 \approx 0.8-0.9 \mu\text{m}$), MW 为微波波段闪烁仪 (波长 $\lambda_2 \approx 1-10 \text{mm}$). L 为光程长度, 左端发射, 右端接收)

Fig. 1 Schematic representation of a combined optical-microwave scintillometer (OMS) system (Wang, 2021) (IR denotes the large aperture scintillometer (With a near-infrared wavelength $\lambda_1 \approx 0.8-0.9 \mu\text{m}$); MW microwave scintillometer (With a millimeter wavelength $\lambda_2 \approx 1-10 \text{mm}$); L the light path length)

2.1 闪烁仪的基本公式

(1) 由 LAS 与 MWS 观测所得对数光强方差与两波段对数光强的协方差计算折射指数 (交叉) 结构参数, 参照 Ward 等 (2015)

$$C_{n1n1} = G_1 D^{7/3} L^{-3} \sigma_{ln1}^2 \quad (1)$$

$$C_{n2n2} = G_2 k_{\lambda_2}^{-7/6} L^{-11/6} \sigma_{ln2}^2 \quad (2)$$

$$C_{n1n2} = G_{12} k_{\lambda_2}^{-7/6} L^{-11/6} Cov_{ln1ln2} \quad (3)$$

式中, C_{n1n1} , C_{n2n2} 与 C_{n1n2} 分别为近红外波段, 微波波段及二波段交叉的折射指数结构参数 (下标 1 和 2 分别代表近红外波段 λ_1 和微波波段 λ_2 , 下同); σ_{ln1}^2 , σ_{ln2}^2 与 Cov_{ln1ln2} 分别为 LAS 与 MWS 观测到的对数光强的方差和二波段对数光强的协方差; D 为大孔径闪烁仪孔径; L 为闪烁仪光程长度; $k_{\lambda_2} (= 2\pi/\lambda_2)$ 为微波闪烁仪波数, λ_2 为其工作波长; 3 个关键系数 G_1 , G_2 , G_{12} 可分别通过闪烁仪基本公式的二重积分运算求解 (参照王介民, 2021, 式 (15)、(28))。

对黑河流域的阿柔站分别有: $G_1 = 1.12$, $G_2 = 2.28$, $G_{12} = 2.46$; 大满站分别有: $G_1 = 1.12$, $G_2 = 2.33$, $G_{12} = 2.55$ 。

(2) 由以上所得折射指数结构参数计算温度、湿度 (比湿) 和温湿度交叉结构参数。折射指数结构参数与温度结构参数 (C_{TT})、湿度结构参数 (C_{qq}) 以及温湿度交叉结构参数 (C_{Tq}) 的关系如下式 (Hill 等, 1980)

$$C_{nn} = \frac{A_T^2}{\bar{T}^2} C_{TT} + 2 \frac{A_T A_q}{\bar{T} \bar{q}} C_{Tq} + \frac{A_q^2}{\bar{q}^2} C_{qq} \quad (4)$$

式中, \bar{T} 与 \bar{q} 分别为观测高度的平均温度和比湿; A_T 与 A_q 分别为与波长及大气温湿度有关的常数 (Ward 等, 2013)。 C_{n1n1} 与 C_{n2n2} 分别由近红外与微波两个波段测量, 但仅通过两个形式类同于式 (4) 的方程式, 仍无法求解 C_{TT} , C_{qq} 和 C_{Tq} 这 3 个未知量。依据 Lüdi 等 (2005) 提出的“双波长相关法”, 通过式 (3) 计算得到的 C_{n1n2} , 建立第 3 个形

式类同于式(4)的方程,联立三元一次线性方程组求解,即可获得3个气象结构参数。

(3) 利用近地层相似理论由温度与湿度结构参数计算感热通量和潜热通量。

基于莫宁—奥布霍夫相似理论 MOST (Monin-Obukhov Similarity Theory),无量纲化的 C_{TT} 与 C_{qq} 符合如下相似关系

$$\frac{C_{TT} z^{2/3}}{T_*^2} = f_T(\zeta) \quad (5)$$

$$\frac{C_{qq} z^{2/3}}{q_*^2} = f_q(\zeta) \quad (6)$$

式中, $\zeta = z/L_{ob}$ 为稳定度参数(其中 $z = z_{eff} - d_0$, z_{eff} 为光程有效高度, d_0 为零平面位移, L_{ob} 为奥布霍夫长度); T_* 与 q_* 分别为温度尺度参数与湿度尺度参数; $f_T(\zeta)$ 与 $f_q(\zeta)$ 分别为温度相似函数与湿度相似函数,其基本形式为(Wyngaard等, 1971):

$$f_x(\zeta) = \begin{cases} c_{x1}(1 - c_{x2}\zeta)^{-2/3}, & \zeta < 0 \\ c_{x3}(1 + c_{x4}\zeta^{2/3}), & \zeta > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $x = (T, q)$, $c_{x1} - c_{x4}$ 各系数均已通过较好实验数据拟合得到,参照 Xu 等(2023)的表1。例如, Kooijmans 和 Hartogensis (2016) 通过整合更多的实验观测数据,并开展更仔细的统计分析,提出了当前公认的一组较可信的温度与湿度相似函数系数(Ward, 2017; 王介民, 2021)。

由式(5)与(6)求得 T_* 与 q_* 后,即可由以下二式分别计算 H 与 LE :

$$H = -\rho c_p u_* T_* \quad (8)$$

$$LE = -\rho L_v u_* q_* \quad (9)$$

式中, ρ 为空气密度; c_p 为空气定压比热容; L_v 为汽化潜热; u_* 为摩擦速度。摩擦速度需借助风速(u)、观测高度(z_u)与下垫面粗糙度(z_0),依托相似关系,采用循环迭代法与 T_* 、 q_* 及 L_{ob} 同步计算。

2.2 闪烁仪工作的主导湍涡尺度

LAS与MWS都主要工作在大气湍流谱惯性区,主导湍涡尺度较小且范围很窄(王介民, 2021)。图2以阿柔观测站的设备配置为例,展示了LAS与MWS系统的空间谱权重函数分别随空间波数、湍涡尺度的变化(具体数值详见图题说明)。对于LAS,其主导湍涡尺度与闪烁仪孔径(D , ~ 0.15 m)接近;对于MWS,该主导湍涡尺度则与第一菲涅尔区尺度($F = \sqrt{\lambda L}$, ~ 2 m)接近。这表明, D 与 F 的数值大小分别决定了影响测量的主导湍涡尺度。 D 与 F 的尺度均比较小。在 10^3 Hz 高采样频率下,闪烁仪数千米长的光程尺度上,存在大量对光闪烁敏感的湍涡,故而在很短的取平均时间内即可获得统计稳定的通量观测结果(王介民和德布莱恩H, 2025)。

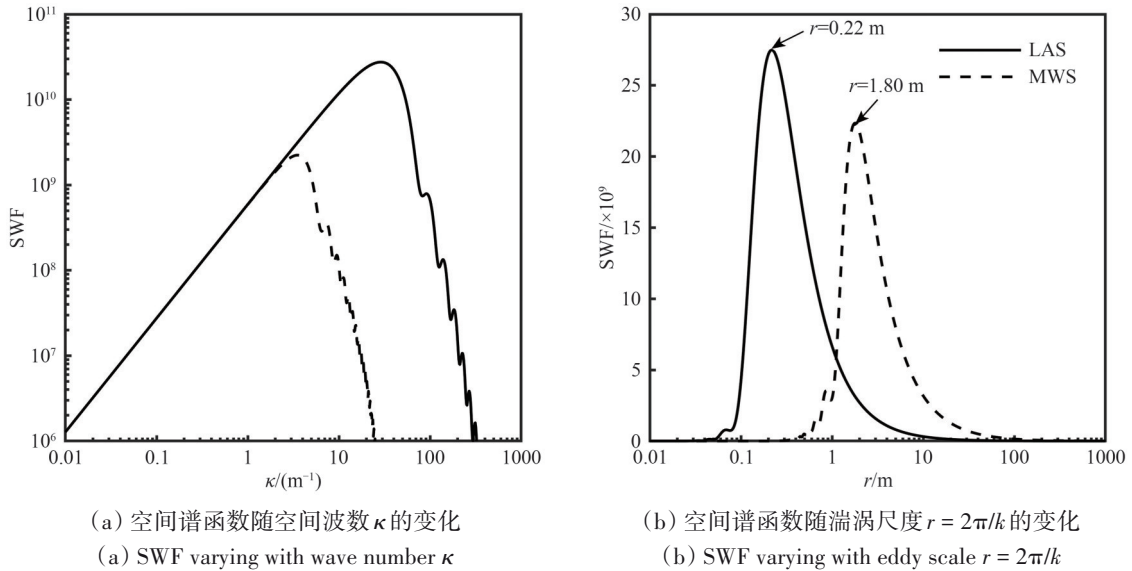


图2 LAS与MWS系统的空间谱权重函数(SWF)(以阿柔站配置为例: $L=2390$ m;对LAS, $\lambda_1=880$ nm, $D=0.145$ m,峰值波数 $\kappa \approx 29$ m^{-1} ,相应的湍涡尺度 $r \approx 0.22$ m;对MWS, $\lambda_2=1.86$ mm, $D=0.3$ m, $F=2.11$ m,峰值波数 $\kappa \approx 3.5$ m^{-1} ,相应的湍涡尺度 $r \approx 1.8$ m)

Fig. 2 Spatial spectral weighting function (SWF) for LAS and MWS system (The configuration of Arou site as an example, $L = 2390$ m; for LAS, $\lambda_1 = 880$ nm, $D = 0.145$ m, the peak of SWF at $\kappa \approx 29$ m^{-1} , and the corresponding eddy size $r \approx 0.22$ m; for MWS, $\lambda_2 = 1.86$ mm, $D = 0.3$ m, $F = 2.11$ m, the peak at $\kappa \approx 3.5$ m^{-1} , the eddy size $r \approx 1.8$ m)

3 研究区与数据

3.1 研究区观测体系

黑河流域 (37.7°N—42.7°N, 97.1°E—102.0°E) 从上游到下游, 以水为纽带形成“冰川—森林—草原—河流—湖泊—绿洲—沙漠—戈壁”的多元自然景观 (图3 (a))。当前, 该流域上游的阿柔站与中游的大满站已配备OMS、EC及气象梯度观测系统。

阿柔站 (38.0473°N, 100.4643°E; 3033 m) 的下垫面类型以高寒草甸为主, 夏季植株高度约0.2—0.5 m。2019年, 该站点安装了RPG-OMS系统 (MWSC-160与BLS900联用), 光程长度为2390 m, 有效高度约13.5 m; 一套EC系统 (CSAT3&LI-7500) 安装高度为3.5 m, 大致位于闪烁仪光程的中部位置 (图3 (c))。

大满站 (38.8555°N, 100.3722°E; 1556 m) 的下垫面为玉米农田, 夏季植株高度约2 m。2019年, 该站安装了全新的RPG-OMS系统, 光程长度1854 m, 有效高度23 m。光程沿线涵盖玉米田、果园、防护林及村庄等多种地表类型 (图3 (b))。一套EC系统 (CSAT3&LI-7500A) 安装高度为4.5 m, 靠近闪烁仪光程的中部。

阿柔与大满站的EC及OMS系统采样频率分别为10 Hz与10³ Hz。两个站40 m气象梯度塔同步观测风温湿廓线、辐射、气压、降雨、土壤温湿度廓线及土壤热通量等, 采样间隔为10 min, 仪器配置详见Che等 (2019) 与Liu等 (2018)。此外, 在微波闪烁仪接收端旁部署了一套WXT-536标准气象站, 主要观测降水、风温湿及气压等要素, 数据采样频率为1 Hz。

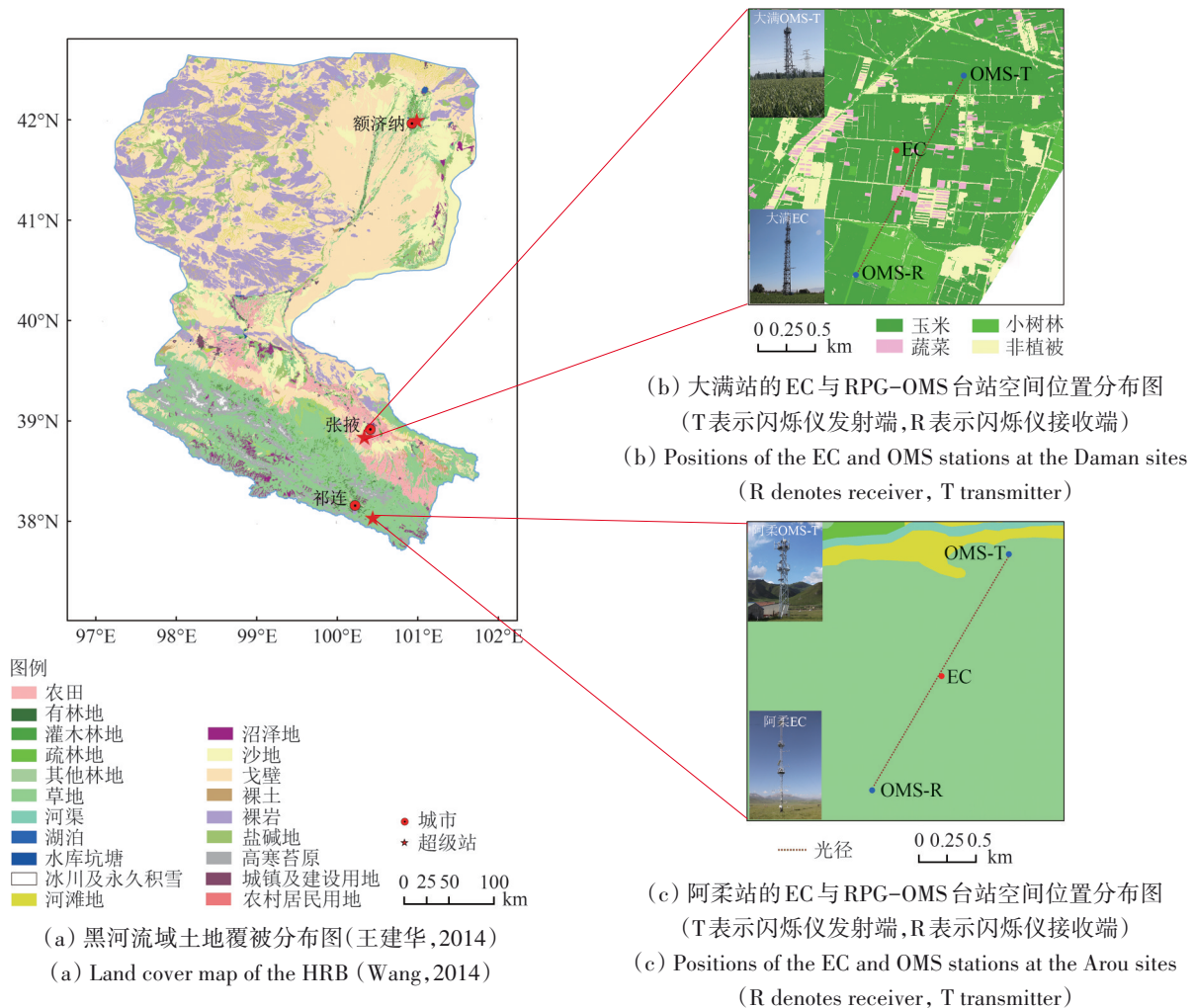


图3 研究区观测体系

Fig. 3 Locations of the observation sites in the study area

3.2 数据收集

收集阿柔站 2019 年 5—6 月以及大满站 2020 年 5—9 月的 OMS、EC 及气象梯度塔观测资料。在数据观测期间，Landsat 卫星过境阿柔站测区的开始时间大约在北京时间 BST (Beijing Standard Time) 11:30—12:00，单景影像的扫描时长（即过境观测时长）约 26—27 s；Terra 卫星与 Aqua 卫星搭载的 MODIS 传感器获取该测区影像的时间窗口分别为北京时间 11:00—13:30 与 13:30—15:20，单景影像的扫描时长约为 5 min ([https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/\[2023-7-20\]](https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/[2023-7-20]))。2020 年 5—9 月作物生长季，Landsat 7 与 Landsat 8 卫星共获取 8 景覆盖大满站测区且云量较少的有效影像 ([https://landsat.usgs.gov/\[2021-5-13\]](https://landsat.usgs.gov/[2021-5-13]))，其过境日期、时间等详细信息见表 1。同步收集该测区 2020 年 5—9 月玉米生长季的地面观测数据集，包括植被覆盖度、叶面积指数及株高等关键参数 (耿丽英和车涛, 2021)。根据实地物候观测，大满站制种玉米的出苗期为 5 月 20 日—5 月 31 日，收获期为 9 月 25 日—10 月 1 日。

表 1 2020 年 5—9 月大满站测区 Landsat 7 与 Landsat 8 卫星过境日期及时间信息

Table 1 Date and time of the Landsat 7 and Landsat 8 satellite overpasses over the Daman observation area (May–September in 2020)

遥感卫星	过境日期	过境时间(BST)	单景影像扫描时长/s
Landsat 7	2020-08-01	11:24:32	26—27
	2020-08-17	11:23:31	
	2020-09-18	11:21:25	
Landsat 8	2020-05-21	11:55:09	31—32
	2020-08-09	11:55:41	
	2020-08-25	11:55:49	
	2020-09-10	11:55:56	
	2020-09-26	11:56:01	

3.3 观测数据处理与质量控制

3.3.1 涡动相关仪

采用 EddyPro 软件 (v7.0.6; LI-COR Bioscience Inc., Lincoln, Nebraska USA) 对 10 Hz EC 原始数据进行预处理与通量计算，具体包括野点剔除、延迟时间校正、倾斜修正 (二次坐标旋转)、频率响应损失修正、超声虚温修正及空气密度修正 (WPL 修正) (Wang 等, 2015)。结合湍流平稳性与湍流发展充分性检验 (Mauder 和 Foken, 2015)，对处理后的通量数据进行质量评级 (0, 1, 2)，最

终获得带质量标注的 H 与 LE 数据。通量计算的取平均时间设为 30 min，以充分捕捉较大尺度湍流的贡献。数据质量控制过程中，剔除质量等级为 2 级的低质量数据、摩擦风速小于 0.1 m/s 的弱湍流数据 (Xu 等, 2013)，以及降雨后超出物理合理阈值范围的异常数据 (Ward 等, 2015)。经上述严格质量控制后，半小时通量数据的可用率超过 80%。

3.3.2 光学—微波双波段闪烁仪

依据改进的 OMS 通量计算流程 (图 4)，对 10^3 Hz LAS 与 MWS 原始光强脉动数据进行处理与通量计算。本研究特别加强了数据预处理，具体包括“掉包”、“野点”等异常值识别与剔除及高通滤波等。利用中位数绝对偏差 (MAD) 方法，对 LAS 与 MWS 的原始光强脉动时间序列进行离群值检测，剔除“掉包”及“野点”等异常值。基于时序谱分析，对 LAS 与 MWS 光强信号分别采用 12 s (截断频率 0.08 Hz) 与 67 s (截断频率 0.01 Hz) 的滑动平均光强 (I_0) 进行高通滤波，以削弱观测光程上水汽、气溶胶吸收等低频干扰。基于预处理后的光强脉动数据，首先计算对数光强方差及协方差；再采用 Lüdi 等 (2005) 方法，由 C_{n1n1} 、 C_{n2n2} 及 C_{n1n2} 推算得到 C_{TT} 与 C_{qq} ；最后，结合 Kooijmans 和 Hartogensis (2016) 相似函数系数计算 H 与 LE。有关数据预处理与通量计算的详细流程可参考 Xu 等 (2023)。

本文从 5 个方面开展数据质量控制：(1) 原始数据预处理：对光强脉动时间序列进行检查，舍弃电源中断、仪器故障等导致的缺失数据。(2) 结构参数及通量计算过程中相关参数的确定：准确计算 L 、 z_{eff} 、 z_0 及 d_0 ，采用 $Cov_{lnl,lnl}$ 观测作为稳定度判断参数，并合理选择 MOST 函数及系数。(3) 结构参数饱和检查：当大气湍流较强时， C_{nn} 与 σ_{lnl}^2 的正比关系不再成立 (Kleissl 等, 2010)，故需对计算得到的 C_{n1n1} 与 C_{n2n2} 进行饱和检查，剔除超出饱和阈值的异常数据。(4) 通量结果检查：剔除超出物理阈值的通量数据，例如 H 与 LE 之和显著超出地表可利用能量的情况。(5) 气象与环境条件筛选：强降雨时段数据直接剔除，小雨时段数据需进一步仔细检查；风速大于 6 m/s 时，重点注意塔震动对数据的干扰 (Aguirre 等, 2022)；夜间及稳定层结条件下，需检查 MOST 函数的适用性。经上述严格质量控制后，OMS 通量数据的可用率超过 95%。

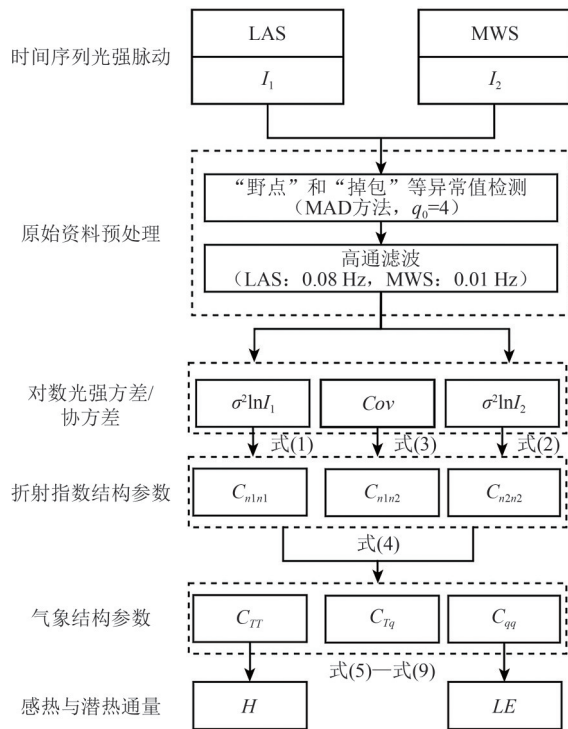


图4 OMS的通量计算流程 I_1 :接收到的光强脉动;MAD:中位数绝对偏差; q_0 :MAD方法中阈值

Fig. 4 Schematic representation of the improved data processing procedure for an OMS system MAD denotes the median absolute deviation; q_0 is a threshold in MAD

3.3.3 通量足迹(footprint)分析

采用 Kljun 等 (2015) 提出的 FFP (Footprint Flux Prediction) 模型, 计算单站点 EC 系统观测通量的贡献源区空间位置与范围, 并定量确定源区内不同地表位置对观测通量的相对贡献比例 (即足迹值)。FFP 模型基于后向拉格朗日随机粒子扩散理论构建, 不仅简单易用, 且适用于广泛的边界层条件与复杂粗糙下垫面。针对 OMS 系统的通量足迹分析, 结合单站点 FFP 足迹模型与光程权重函数, 发展了一种闪烁仪足迹计算模型。首先将 OMS 观测光程视为连续线状路径, 按采样间隔 Δx 离散化为 n 个单点测量单元 (其中 $n = L/\Delta x$, L 为光程总长度); 闪烁仪的足迹值通过沿光程方向, 对各相应位置单点的 FFP 足迹结果经光程权重函数加权平均累加得到 (Isabelle 等, 2020; Xu 等, 2023)。足迹计算所需的输入参数主要包括风速、风向、摩擦风速、奥布霍夫长度及侧向风速标准差等, 上述参数直接从 EC 的观测数据中获得。

3.4 卫星遥感数据处理

2003年5月, Landsat 7搭载的ETM+扫描行校正器 SCL (Scan Lines Correction) 发生故障, 导致后

续获取的影像出现约 22% 的条带式数据缺失 (段四波等, 2021)。针对该问题, 首先利用局部线性直方图匹配法对影像中缺失的像素进行插补修复; 其次, 对大满站测区 Landsat 7/8 卫星开展预处理, 可见光—近红外波段影像经辐射定标、FLAASH 大气校正等, 生成各波段地表反射率数据; 热红外波段通过辐射定标转换为大气层顶辐亮度数据。

采用基于辐射传输方程的算法, 分别利用 Landsat 7 ETM+ 的第 6 波段与 Landsat 8 TIRS 的第 10 波段辐亮度数据进行地表温度反演。该算法的核心原理是通过热红外辐射传输方程, 去除辐射传输过程中大气对热辐射的影响, 从而较为精确地获得地表温度 (段四波等, 2021)。通过大满站四分量辐射计同步实测的地表温度数据, 对基于辐射传输方程反演得到的地表温度 (T_R) 进行精度评估。结果显示, 平均偏差 (MB) 为 0.9 K, 均方根误差 (RMSE) 为 1.3 K, 表明该反演算法具有较高的精度, 能够满足研究需求。

基于预处理后 Landsat 影像的红光波段与近红外波段反射率数据, 计算得到归一化植被指数 (NDVI)。对于研究所需的关键地表参量, 包括叶面积指数 (LAI)、植被覆盖度 (f_c) 和植被冠层高度 (h_c), 均通过大满站典型样地实测数据与 NDVI 的拟合关系式推算获取。对于 LAI, 采用对数拟合关系式计算, $LAI = 2.1769 \times \ln(NDVI) + 1.1378$ (可决定系数 $R^2 = 0.97$); 对于 f_c , 通过指数拟合关系式估算, $f_c = 0.0472 \times e^{3.5815 \times NDVI}$ ($R^2 = 0.78$); h_c 则采用对数拟合关系式计算, $h_c = 1.3138 \times \ln(NDVI) + 2.4865$ ($R^2 = 0.97$)。验证结果表明, 基于遥感影像结合上述拟合模型推算得到的 LAI, f_c 及 h_c , 与大满站同步地面观测数据的一致性较高。

3.5 地表水热通量遥感估算

采用双源地表能量平衡 TSEB (Two-Source Energy Balance) 模型, 结合气象梯度塔观测数据 (包括辐射、气温, 风速, 实际水汽压及气压等) 与 Landsat 7/8 影像反演的关键地表参量 (T_R , f_c , LAI, h_c , 详细计算见 3.4 节), 定量估算大满站 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 测区的 30 m 空间分辨率的 H 与 LE 。

TSEB 模型将植被和土壤视为不同的能量源, 分别建立土壤和植被的能量平衡方程, 表达式分别为 (Kustas 和 Norman, 1999; Norman 等, 1995)

$$Rn_s = H_s + LE_s + G_o \quad (10)$$

$$Rn_c = H_c + LE_c \quad (11)$$

式中, Rn 表示净辐射; H 与 LE 分别为感热通量与潜热通量; 下标符号 s 和 c 分别表示土壤表面与植被冠层 (下同); G_0 为地表土壤热通量。

$$Rn_s = \tau_{\text{longwave}} L_{\downarrow} + (1 - \tau_{\text{longwave}}) \varepsilon_c \sigma T_c^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \tau_{\text{solar}} (1 - \alpha_s) S_{\downarrow} \quad (12)$$

$$Rn_c = (1 - \tau_{\text{longwave}}) (L_{\downarrow} + \varepsilon_s \sigma T_s^4 - 2\varepsilon_c \sigma T_c^4) + (1 - \tau_{\text{solar}}) (1 - \alpha_c) S_{\downarrow} \quad (13)$$

式中, σ 是斯蒂芬—玻尔兹曼常数; S_{\downarrow} 与 L_{\downarrow} 分别为太阳下行短波辐射与大气下行长波辐射; τ_{longwave} 与 τ_{solar} 分别为植被冠层长波辐射透过率与太阳下行短波辐射直接透过率; ε_c 与 ε_s 分别为植被比辐射率与土壤比辐射率; α_c 与 α_s 分别为植被反照率与土壤反照率; T_c 与 T_s 分别为植被冠层温度与土壤温度。

假设植被冠层和土壤表面彼此之间有能量和水汽交换, H 的表达式

$$H = H_s + H_c = \rho c_p \frac{T_{ac} - T_a}{R_a} \quad (14)$$

$$H_s = \rho c_p \frac{T_s - T_{ac}}{R_s} \quad (15)$$

$$H_c = \rho c_p \frac{T_c - T_{ac}}{R_x} \quad (16)$$

式中, ρ 与 c_p 分别为空气密度与定压比热容; T_{ac} 为植被冠层与大气界面空气温度; T_a 为空气温度; R_a 为植被热量传输到参考位置的空气动力学阻抗; R_x 为冠层内植被表面阻抗; R_s 为土壤表面上方边界层热流阻抗。有关阻抗的表达式和系数详见 Feng 等 (2023)。

当 T_s 与 T_c 均有地面观测时, 据式 (10) — (16), 结合 $G_0 (= 0.3 Rn_s)$ 可推算得到 H 与 LE 。

利用 Stefan-Boltzmann 定律, 结合特定视场角内 (θ) 植被覆盖度 (f_c), 可将地表混合温度 T_R 分解为 T_s 与 T_c 。 $T_R(\theta)$ 的线性表达式为 (Kustas 和 Norman, 1999; Norman 等, 1995)

$$T_R(\theta) = (f_c(\theta) T_c^4 + (1 - f_c(\theta)) T_s^4)^{1/4} \quad (17)$$

该模型引入简化的 Priestley-Taylor 公式 (Priestley 和 Taylor, 1972) 初始化 T_c

$$T_{ci} = T_a + \frac{Rn_c R_a}{\rho c_p} \left(1 - \alpha_{PT} f_g \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \quad (18)$$

式中, T_{ci} 为植被温度 T_c 的初始值; α_{PT} 为植被冠层的 Priestley-Taylor 系数, 初始值一般取 1.26; f_g 为绿色植被的比例; Δ 为温度—饱和水汽压曲线斜率; γ 为干湿表常数。

采用循环迭代法分别估算得到 T_s 和 T_c , 进而

计算 H_s , H_c 和 LE_s 和 LE_c 。

4 结果与分析

4.1 不同取平均时间的 OMS 与 EC 通量结果比较

选取阿柔站 2019 年 6 月 12 日的 OMS 与 EC 同步观测数据, 设定 1 min、2 min、5 min、10 min、15 min、30 min 共 6 组不同通量取平均时间, 分别计算 H 与 LE , 结果如图 5 和图 6 所示。分析表明, 当通量取平均时间较短时 (如 1—2 min), OMS 观测的 H 和 LE 日变化曲线较为平滑, 而 EC 通量结果波动剧烈且毛刺特征显著。这一现象主要源于短平均时间下, 大尺度涡旋对湍流通量的贡献未被充分捕获, 进而引发噪声干扰 (Hartogensis 等, 2002)。作为单点采样观测技术, EC 的观测范围仅代表极小区域, 故而需通过足够长的取平均时间以充分捕捉大尺度湍流的贡献 (Van Kesteren 等, 2013a)。湍流谱分析结果证实, EC 方法通常需设置 15—30 min 甚至 60 min 的更长取平均时间, 才能捕捉各种大小不同尺度涡旋对湍流通量的贡献 (Beyrich 等, 2021; 王介民, 2021)。因此, 当取平均时间较长时 (如 30 min), EC 观测的 H 和 LE 日变化曲线呈现出显著的平滑特征。

图 7 呈现了 OMS 与 EC 系统观测的 H 和 LE 标准差 (σ_H , σ_{LE}) 随通量取平均时间的变化特征。根据 Hartogensis 等 (2002) 提出的核心判据: 若闪烁仪观测通量的标准差在两个连续不等长取平均时间内保持恒定, 则表明在两个间隔中时长较短的取平均时间内已获得统计稳定的通量数据。对图 7 的分析表明, OMS 系统在 1—5 min 取平均时间内即可实现 σ_H 与 σ_{LE} 的稳定, 该结果与 Hartogensis 等 (2002) 在草地下垫面的研究结论一致。相比之下, EC 系统需 15—30 min 甚至更长取平均时间才能获取统计可靠的通量结果, 这一特征与 Sun 等 (2005) 的研究结论吻合。与 EC 等单点观测需较长取平均时间的特性不同, 光闪烁仪的观测同时进行空间与时间平均, 其较大的空间观测尺度决定了所需的取平均时间可以更短 (王介民和德布莱恩 H, 2025)。综上, OMS 系统在 1 min 很短的取平均时间内即可获得统计稳定的通量观测结果, 证实了相关理论的合理性 (见 2.2 节)。该时间尺度与 Landsat 等卫星单景影像的过境扫描时长高度匹配, 这使得 OMS 通量观测在验证 ET 模型估算的卫星过境瞬时结果时, 具备显著的时间尺度匹配优势。

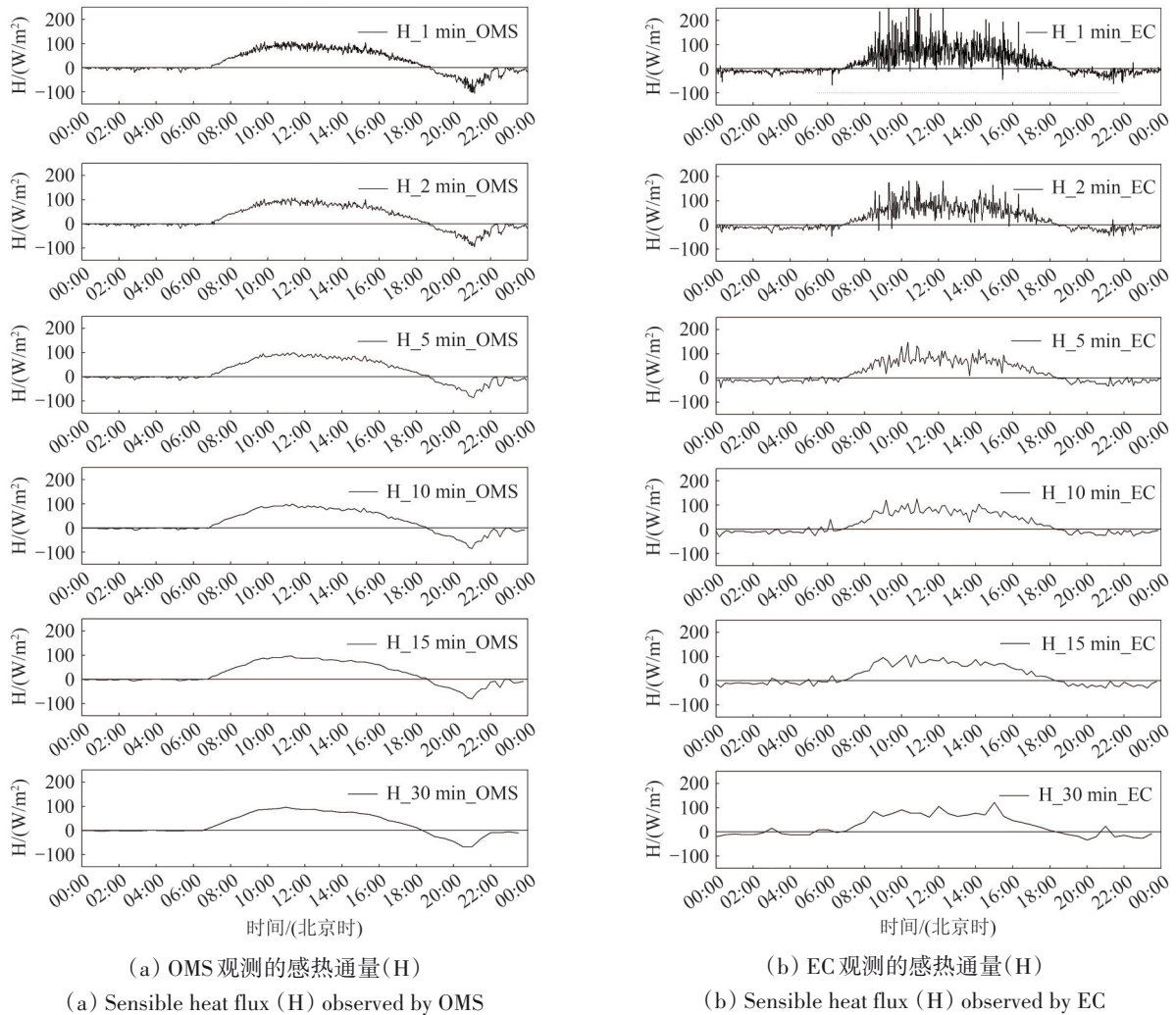


图5 阿柔站2019年6月12日 OMS和EC观测的感热通量, 通量取平均时间分别为1 min、2 min、5 min、10 min、15 min、30 min
 Fig. 5 Sensible heat flux on 12 June 2019 of the OMS and EC systems at the Arou site using flux-averaging periods of 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, and 30 min

4.2 30 min 平均通量观测验证遥感瞬时结果的不确定性

以阿柔站2019年5月23日—6月16日的通量观测数据为例, 探究以30 min平均通量观测值验证遥感卫星过境瞬时通量估算结果时, 二者时间尺度不匹配所引发的不确定性。在阿柔站平坦均匀的高寒草甸下垫面上, OMS与EC观测的30 min平均通量结果一致性较好, 其中H与LE的平均偏差分别为 2 W/m^2 和 8 W/m^2 (参见Xu等 (2023), 图13)。

基于OMS观测的1 min通量数据, 图8呈现了以往常用Landsat卫星影像估算结果验证的30 min内(11:30—12:00 BST), H与LE的变化幅度(采用标准差及标准差与平均值的比值表征)。结果表明, 该30 min时段内H的标准差(σ_H)为10—30 W/m^2 , σ_H 均值为16 W/m^2 ; LE的标准差(σ_{LE})约为 σ_H 的两倍, σ_{LE} 介于20—60 W/m^2 之间, 均值为38 W/m^2 。

这一差异主要成因在于, 地表源强异质性对近地层空气湿度的影响显著大于对空气温度的影响。在以往常用Landsat影像瞬时通量估算结果验证的30 min内, EC观测通量的变化幅度(标准差与平均值的比值)通常为10%—30%, H与LE平均分别为15%和17%。若直接选取Landsat卫星过境时刻1 min的通量观测值验证遥感ET模型的瞬时估算结果, 其引入的验证不确定性也会有相似量级。

同理, 图9呈现了阿柔站MODIS影像瞬时通量估算结果验证常用的30 min时段内, H与LE的变化幅度。结果显示, 该时段内 σ_H 多数情况下介于10—40 W/m^2 , σ_H 均值为20 W/m^2 ; σ_{LE} 为20—80 W/m^2 , 均值达49 W/m^2 。该30 min时段内H与LE的变化幅度通常为10%—30%, 均值为19%。值得关注的是, 部分30 min时段内 σ_H 与 σ_{LE} 超过100 W/m^2 , 对应的通量变化幅度亦显著增大(超过40%)。

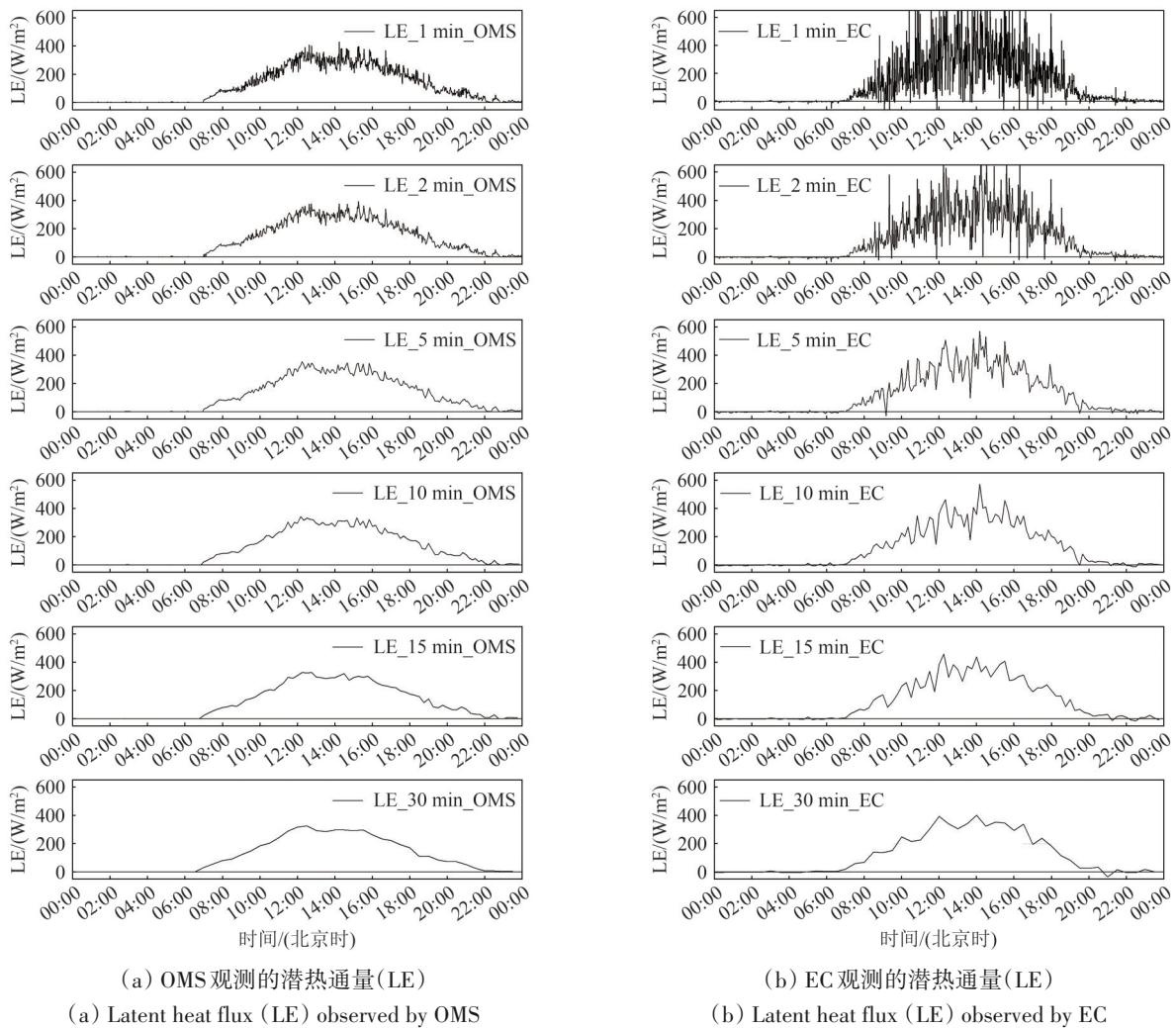


图6 阿柔站2019年6月12日 OMS与EC观测的潜热通量, 通量取平均时间分别为1 min、2 min、5 min、10 min、15 min、30 min
 Fig. 6 Latent heat flux on 12 June 2019 observed by the OMS and EC systems at the Arou site using flux-averaging periods of 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, and 30 min

结合阿柔站气象梯度塔观测的净辐射 (R_n) 数据, 选取2019年5月25日、6月2日作为典型案例, 对H与LE变化幅度显著的时段开展深入分析, 结果如图10所示。5月25日14:00—14:30, 受天气系统演变影响, 净辐射急剧衰减, 导致 σ_H 与 σ_{LE} 分别增至 100 W/m^2 和 85 W/m^2 , 此时OMS观测的1 min瞬时通量与EC 30 min平均通量偏差显著 ($\Delta H=158 \text{ W/m}^2$, $\Delta LE=229 \text{ W/m}^2$), 进而使遥感ET模型瞬时结果的验证不确定性可达50%。6月2日14:30—15:00, 天空云块快速漂移引发净辐射显著波动, 且大气稳定性发生改变, 使得 σ_H 与 σ_{LE} 值逐渐升至 50 W/m^2 和 100 W/m^2 ; 该情形下, 若采用30 min平均通量观测数据验证遥感ET模型瞬时估算结果, 其验证不确定性甚至达到50%—60%。

4.3 卫星遥感瞬时通量估算结果的验证

基于大满站 OMS 1 min 通量与 EC 30 min 平均通量观测数据, 对TSEB模型结合Landsat 7/8卫星影像估算的30 m空间分辨率瞬时H与LE进行验证。考虑到2020年8月25日因仪器维护导致OMS观测数据缺失, 且9月26日观测区农田玉米已收获, 故选取6景覆盖玉米生长初期—旺盛期—成熟期的遥感影像 (5月21日、8月1日、8月9日、8月17日、9月10日、9月18日), 对其估算的湍流通量结果开展验证。卫星遥感瞬时通量估算结果表明, 5月中下旬, 中游绿洲主要作物玉米处于出苗期, 农田以裸露为主, 地表能量输送以H为主导, LE介于 $100\text{--}200 \text{ W/m}^2$; 6月下旬至8月, 玉米进入生长旺盛期, 平均株高约2 m, 叶面积指数达 $3\text{--}4 \text{ m}^2/\text{m}^2$, 土壤水分充足, LE峰值超 500 W/m^2 ,

H 则低于 100 W/m^2 ；9 月中旬，玉米逐步进入成熟收获期，农田 LE 逐步降至 $300\text{--}400 \text{ W/m}^2$ ，而 H 呈回升趋势。

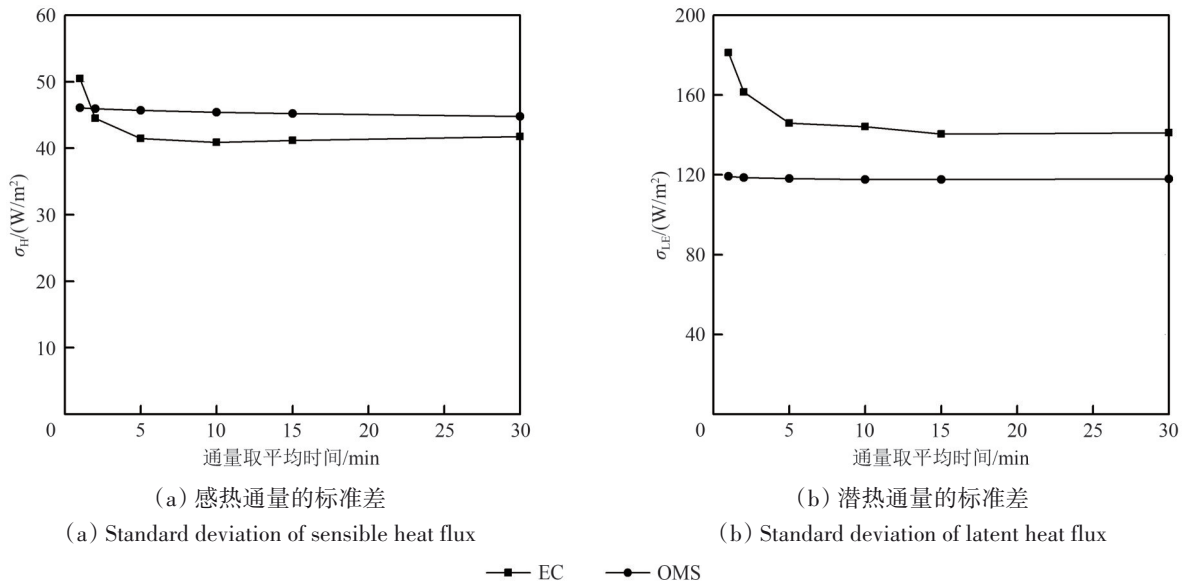


图7 阿柔站2019年6月12日OMS和EC系统所测H和LE的标准差随通量取平均时间(1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min)的变化

Fig. 7 Standard deviation of H (σ_H) and LE (σ_{LE}) measured by the OMS and EC systems at the Arou site on June 12, 2019, as a function of the flux-averaging time (1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, and 30 min)

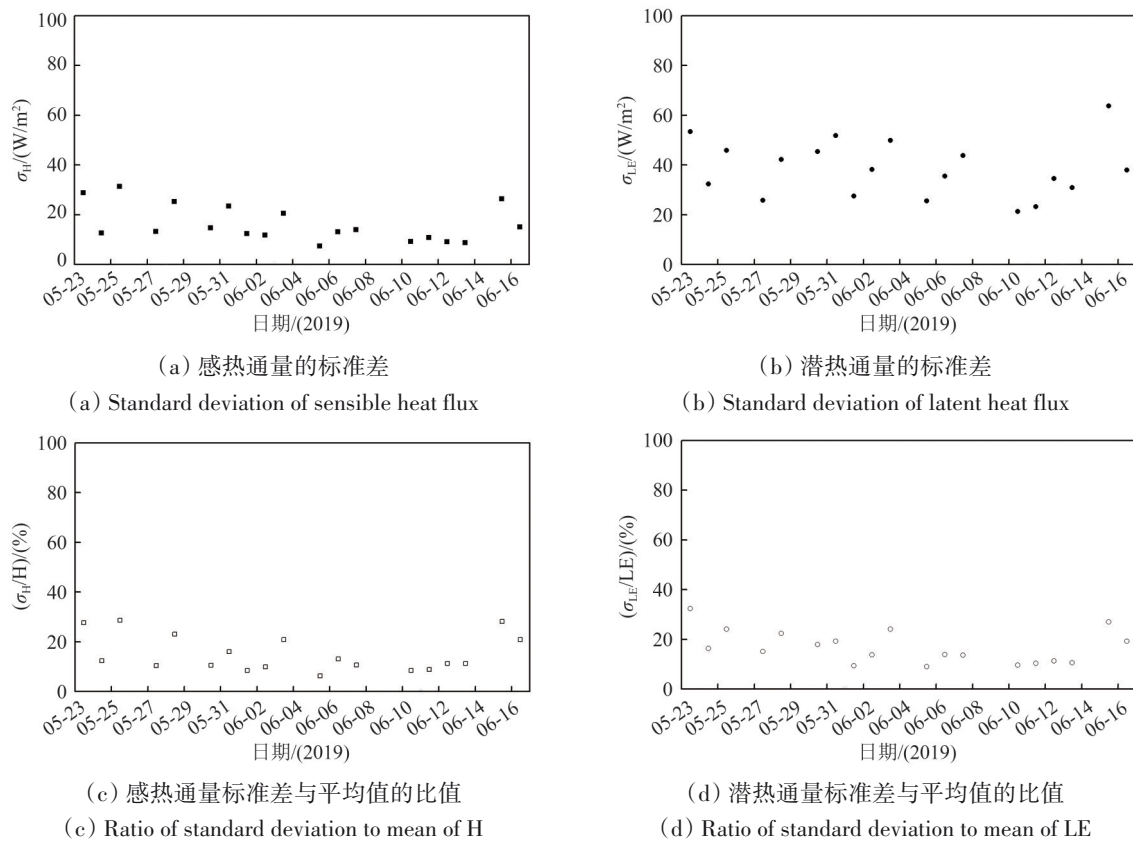


图8 阿柔站2019年5月23日—6月16日晴天条件下Landsat卫星过境30 min内(11:30—12:00 BST)H与LE的变化幅度
Fig. 8 Magnitudes of variations in H and LE over 30-min periods at the Arou site during Landsat overpasses (11:30–12:00 BST) on clear days (May 23 to June 16, 2019)

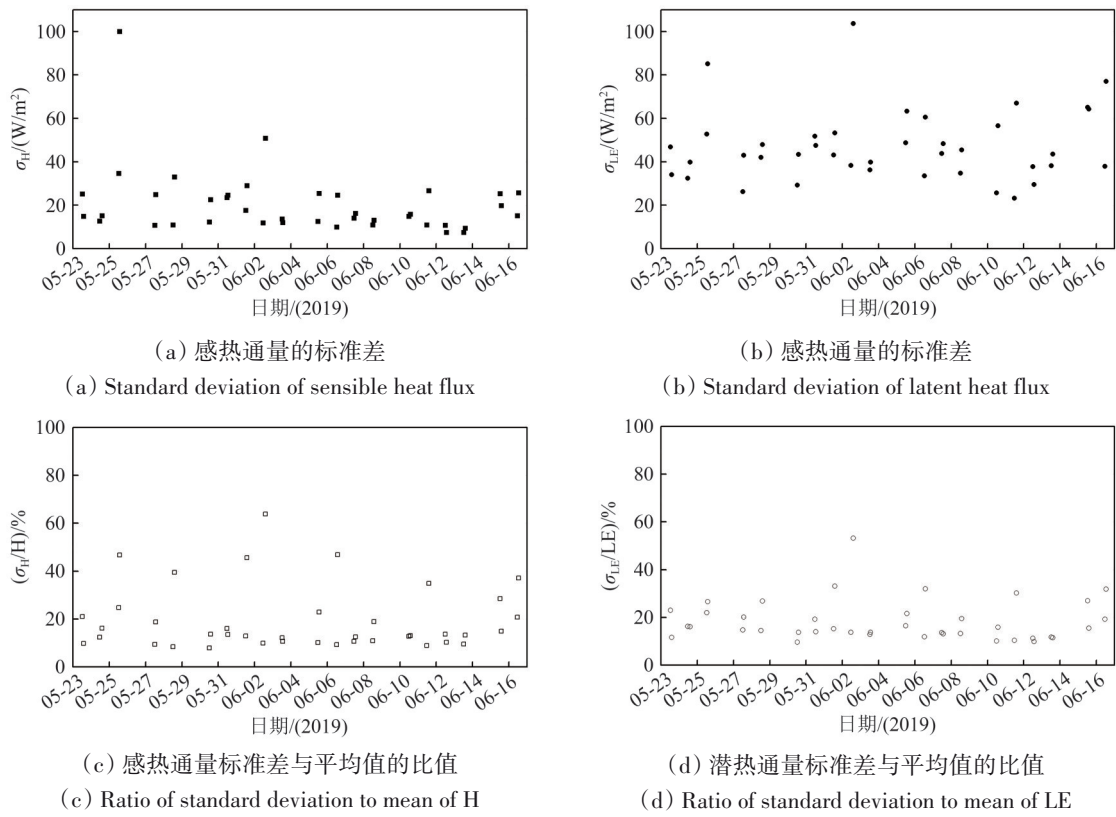


图9 阿柔站2019年5月23日—6月16日晴天条件下MODIS数据获取(11:30—14:30 BST)30 min内H与LE的变化幅度
 Fig. 9 Magnitudes of variations in H and LE over 30-min periods during MODIS data acquisition (11:30—14:30 BST) at the Arou site on clear days (May 23 to June 16, 2019)

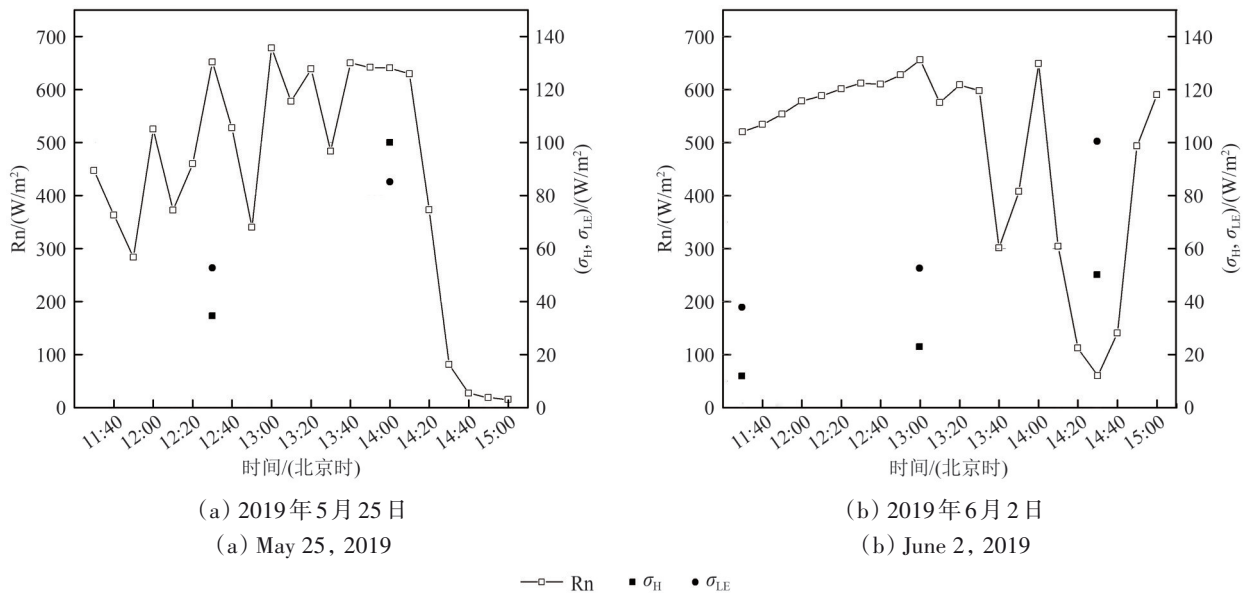


图10 阿柔站MODIS数据获取时段(11:30—14:30 BST)净辐射(Rn)的时间变化及30 min内H和LE的标准差
 Fig. 10 Temporal variation of net radiation (Rn) and the standard deviations of H and LE over 30 min periods during MODIS data acquisition (11:30—14:30 BST) at the Arou site

首先, 基于足迹分析结果, 选取EC站点中心周边9×9个像元的平均通量作为模型估算值, 该范围可有效代表EC观测的通量源区; 其次, 结合

OMS的光程尺度面积平均通量观测数据及足迹分析结果, 确定与EC观测源区空间尺度相匹配的OMS通量数据。最后, 利用空间尺度匹配后的

OMS 1 min 通量与 EC 30 min 平均通量观测数据, 分别对 Landsat 7/8 卫星遥感估算的湍流通量进行验证, 统计结果如表 2 所示。结果表明, 相较于 EC 30 min 平均通量, TSEB 模型估算值与 OMS 1 min 通量观测数据的一致性更优, 其平均偏差 (MB) 与均方根误差 (RMSE) 均更小, 尤其对时

空变幅较大的 LE 而言。这主要归因于, OMS 1 min 通量观测的时间尺度与 Landsat 卫星过境单景影像的扫描时长 (约 26—32 s) 基本一致, 更好地实现了地面验证数据与卫星瞬时观测结果的时间尺度匹配。

表 2 TSEB 模型估算的 Landsat 7/8 卫星过境瞬时 H 与 LE 同大满站 OMS 及 EC 系统观测通量的误差统计结果

Table 2 Different statistics between the TSEB estimated instantaneous H and LE at the time of Landsat 7/8 overpasses and the flux measurements of OMS and EC systems at Daman site

湍流 通量	站点通量观测的平均值		模型估算的平均值	模型估算值与 OMS 比较		模型估算值与 EC 比较	
	OMS 1 min/(W·m ⁻²)	EC 30 min/(W·m ⁻²)	瞬时/(W/m ²)	MB/(W m ⁻²)	RMSE/(W m ⁻²)	MB/(W m ⁻²)	RMSE/(W m ⁻²)
H	90	104	110	20	37	7	39
LE	410	241	401	-8	74	160	180

5 结 论

当前, 基于地表温度的遥感 ET 模型核心依赖卫星过境瞬时遥感影像反演的关键地表参量, 实现像元尺度湍流通量与地表蒸散量的定量估算。光闪烁仪的短时观测优势为遥感 ET 模型的更好验证提供了重要契机。本研究基于黑河流域上游高寒草甸和 中游绿洲农田的 OMS 与 EC 系统的观测数据, 开展了 OMS 通量观测与遥感 ET 模型瞬时结果的时间尺度匹配研究。研究结果表明, OMS 系统在 1 min 很短时间内即可获得统计稳定通量, 验证了相关理论的合理性; 在常用验证卫星瞬时估算结果的 30 min 内, H 与 LE 的变化幅度通常为 10%—30%, 而在大气非平稳条件下, 该变幅可高达 50%—60%; 基于中游绿洲观测数据的验证结果表明, 遥感 ET 模型瞬时通量估算值与 OMS 1 min 通量观测数据的一致性更优, 其主要原因在于 OMS 观测的时间尺度与卫星过境扫描时长高度匹配。OMS 通量观测在遥感 ET 模型验证中展现出显著的时间尺度匹配优势, 对推动相关模型算法改进及遥感 ET 产品精度提升具有重要意义。未来研究将重点聚焦于结合 OMS 通量观测, 进一步提升遥感 ET 模型在复杂下垫面上的应用性能。

参考文献 (References)

Aguirre F, Hartogensis O, Meza F and Suárez F. 2022. Refinements and analysis of the optical-microwave scintillometry method applied to measurements over a vineyard in Chile. *Water*, 14(3): 474 [DOI: 10.3390/w14030474]

Anderson M C, Allen R G, Morse A and Kustas W P. 2012. Use of landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122: 50-65 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.025]

Andreas E L. 1989. Two-wavelength method of measuring path-averaged turbulent surface heat fluxes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 6(2): 280-292 [DOI: 10.1175/1520-0426(1989)006<0280:twmomp>2.0.co;2]

Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, U K T P, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K and Wofsy S. 2001. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11): 2415-2434 [DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2]

Baldocchi D D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9(4): 479-492 [DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x]

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]

Beyrich F, Hartogensis O K, De Bruin H A R and Ward H C. 2021. *Scintillometers*//Foken T, ed. *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Cham: Springer: 969-997 [DOI: 10.1007/978-3-030-52171-4_34]

Che T, Li X, Liu S M, Li H Y, Xu Z W, Tan J L, Zhang Y, Ren Z G, Xiao L, Deng J, Jin R, Ma M G, Wang J and Yang X F. 2019. Integrated hydrometeorological, snow and frozen-ground observations in the alpine region of the Heihe River Basin, China. *Earth System Science Data*, 11(3): 1483-1499 [DOI: 10.5194/essd-2019-11]

De Bruin H A R, Van Den Hurk B J J M and Kobsiek W. 1995. The scintillation method tested over a dry vineyard area. *Boundary-*

- Layer Meteorology, 76(1): 25-40 [DOI: 10.1007/BF00710889]
- Duan S B, Ru C, Li Z L, Wang M M, Xu H Q, Li H, Wu P H, Zhan W F, Zhou J, Zhao W, Ren H Z, Wu H, Tang B H, Zhang X, Shang G F and Qin Z H. 2021. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1591-1617 (段四波, 茹晨, 李召良, 王猛猛, 徐涵秋, 历华, 吴鹏海, 占文凤, 周纪, 赵伟, 任华忠, 吴骅, 唐伯惠, 张霞, 尚国珩, 覃志豪. 2021. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展. *遥感学报*, 25(8): 1591-1617) [DOI: 10.11834/jrs.20211296]
- Feng J J, Wang W Z, Che T, Xu F N and Dong L L. 2023. The effect of pixel heterogeneity on surface heat and water vapor flux estimated by the remote sensing-based model coupled with deep learning. *Journal of Hydrology*, 625: 130036 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130036]
- Geng L Y and Che T. 2021. Ground observation dataset of corn biomass, vegetation coverage, leaf area index and plant height at Daman station in the middle reaches of Heihe River growth period in 2020 [EB/OL]. <https://doi.org/10.11888/Ecolo.tpd.271797> (耿丽英, 车涛. 2021. 黑河中游大满站玉米生物量、植被覆盖度、叶面积指数及株高地面观测数据集(2020年生长期)[EB/OL]. <https://doi.org/10.11888/Ecolo.tpd.271797>) [DOI: 10.11888/Ecolo.tpd.271797]
- Hartogensis O K, De Bruin H A R and Van De Wiel B J H. 2002. Displaced-beam small aperture scintillometer test. Part II: cases-99 stable boundary-layer experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, 105(1): 149-176 [DOI: 10.1023/A:1019620515781]
- Hill R J, Bohlander R A, Clifford S F, McMillan R W, Priestly J T and Schoenfeld W P. 1988. Turbulence-induced millimeter-wave scintillation compared with micrometeorological measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(3): 330-342 [DOI: 10.1109/36.3035]
- Hill R J, Clifford S F and Lawrence R S. 1980. Refractive-index and absorption fluctuations in the infrared caused by temperature, humidity, and pressure fluctuations. *Journal of the Optical Society of America*, 70(10): 1192-1205 [DOI: 10.1364/JOSA.70.001192]
- Isabelle P E, Nadeau D F, Perelet A O, Pardyjak E R, Rousseau A N and Anctil F. 2020. Application and evaluation of a two-wavelength scintillometry system for operation in a complex shallow boreal-forested valley. *Boundary-Layer Meteorology*, 174(3): 341-370 [DOI: 10.1007/s10546-019-00488-7]
- 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]
- Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, De Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Rouspard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S and Zhang K. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 467(7318): 951-954 [DOI: 10.1038/nature09396]
- Kleissl J, Hartogensis O K and Gomez J D. 2010. Test of scintillometer saturation correction methods using field experimental data. *Boundary-Layer Meteorology*, 137(3): 493-507 [DOI: 10.1007/s10546-010-9540-x]
- Kleissl J, Hong S H and Hendrickx J M H. 2009. New Mexico scintillometer network: supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(2): 207-218 [DOI: 10.1175/2008BAMS2480.1]
- Kljun N, Calanca P, Rotach M W and Schmid H P. 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 8(11): 3695-3713 [DOI: 10.5194/gmd-8-3695-2015]
- Kooijmans L M J and Hartogensis O K. 2016. Surface-layer similarity functions for dissipation rate and structure parameters of temperature and humidity based on eleven field experiments. *Boundary-Layer Meteorology*, 160(3): 501-527 [DOI: 10.1007/s10546-016-0152-y]
- Kustas W P and Norman J M. 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(1): 13-29 [DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00005-2]
- Li Y, Huang C L, Hou J L, Gu J, Zhu G F and Li X. 2017. Mapping daily evapotranspiration based on spatiotemporal fusion of ASTER and MODIS images over irrigated agricultural areas in the Heihe River Basin, Northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244-245: 82-97 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.05.023]
- Lian X, Piao S L, Huntingford C, Li Y, Zeng Z Z, Wang X H, Ciais P, McVicar T R, Peng S S, Otlé C, Yang H, Yang Y T, Zhang Y Q and Wang T. 2018. Partitioning global land evapotranspiration using CMIP5 models constrained by observations. *Nature Climate Change*, 8(7): 640-646 [DOI: 10.1038/s41558-018-0207-9]
- Liu S M, Li X, Xu Z W, Che T, Xiao Q, Ma M G, Liu Q H, Jin R, Guo J W, Wang L X, Wang W Z, Qi Y, Li H Y, Xu T R, Ran Y H, Hu X L, Shi S J, Zhu Z L, Tan J L, Zhang Y and Ren Z G. 2018. The heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China. *Vadose Zone Journal*, 17(1): 1-21 [DOI: 10.2136/vzj2018.04.0072]
- Liu S M, Xu Z W, Song L S, Zhao Q Y, Ge Y, Xu T R, Ma Y F, Zhu Z L, Jia Z Z and Zhang F. 2016. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230-231: 97-113 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.04.008]
- Lu J, Jiang M, Zheng C L and Jia L. 2025. Spatial and temporal variability of evapotranspiration water consumption of three staple crops in China from remote sensing estimation. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(5): 1123-1139 (卢静, 蒋敏, 郑超磊, 贾立. 2025. 遥感估算中国三大粮食作物蒸散耗水时空变异特征. *遥感学报*, 29(5): 1123-1139) [DOI: 10.11834/jrs.20243504]
- Lüdi A, Beyrich F and Mätzler C. 2005. Determination of the turbulent temperature-humidity correlation from scintillometric measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 117(3): 525-550 [DOI: 10.1007/s10546-005-1751-1]

- Ma Y M, Wang J M, Menenti M and Bastiaanssen W. 1999. Estimation of flux densities over the heterogeneous land surface with the aid of satellite remote sensing and field observation. *Acta Meteorologica Sinica*, 57(2): 53-62, 130 (马耀明, 王介民, Menenti M, Bastiaanssen W. 1999. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量. *气象学报*, 57(2): 53-62, 130) [DOI: 10.11676/qxb1999.016]
- Mauder M and Foken T. 2015. Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3 (update). Bayreuth: Universität Bayreuth [DOI: 10.5281/zenodo.20349]
- Mengelkamp H T, Beyrich F, Heinemann G, Ament F, Bange J, Berger F, Bösenberg J, Foken T, Hennemuth B, Heret C, Huneke C, Johnsen K P, Kerschgens M, Kohsiek W, Leps J P, Liebethal C, Lohse H, Mauder M, Meijninger W and Raasch S. 2006. Evaporation over a heterogeneous land surface: the EVA-GRIPS project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(6): 775-786 [DOI: 10.1175/BAMS-87-6-775]
- Miralles D G, Van Den Berg M J, Gash J H, Parinussa R M, De Jeu R A M, Beck H E, Holmes T R H, Jiménez C, Verhoest N E C, Dorigo W A, Teuling A J and Dolman A J. 2014. El Niño-La Niña cycle and recent trends in continental evaporation. *Nature Climate Change*, 4(2): 122-126 [DOI: 10.1038/nclimate2068]
- 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]
- 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]
- Perelet A O, Ward H C, Stoll R, Mahaffee W F and Pardyjak E R. 2022. Quantifying turbulence heterogeneity in a vineyard using eddy-covariance and scintillometer measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 184(3): 479-504 [DOI: 10.1007/s10546-022-00714-9]
- Pierre A, Isabelle P E, Nadeau D F, Thibault A, Perelet A, Rousseau A N, Anctil F and Deschamps J. 2022. Estimating sensible and latent heat fluxes over an inland water body using optical and microwave scintillometers. *Boundary-Layer Meteorology*, 185(2): 277-308 [DOI: 10.1007/s10546-022-00732-7]
- Priestley C H B and Taylor R J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2): 81-92 [DOI: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2]
- Ren Z G, Che T, Xu F N, Zhang Y, Tan J L, Wang J M and Wang W Z. 2025. Validation of remotely sensed evapotranspiration products using optical-microwave scintillometer flux measurements over the heterogeneous surfaces. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 5687-5703 [DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3539224]
- Rodell M, Beaudoin H K, L'Ecuyer T S, Olson W S, Famiglietti J S, Houser P R, Adler R, Bosilovich M G, Clayson C A, Chambers D, Clark E, Fetzer E J, Gao X, Gu G, Hilburn K, Huffman G J, Lettenmaier D P, Liu W T, Robertson F R, Schlosser C A, Sheffield J and Wood E F. 2015. The observed state of the water cycle in the early twenty-first century. *Journal of Climate*, 28(21): 8289-8318 [DOI: 10.1175/jcli-d-14-00555.1]
- Song L S, Xu Y H, Liddell M, Cui Y K, Liu S M and Xu P P. 2023. Application of a two source energy balance model coupled with satellite based soil moisture and thermal infrared data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 204: 15-26 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.08.009]
- Stoffer R. 2018. Revisiting raw data processing of combined optical-microwave scintillometers. Wageningen: Wageningen University & Research: 68.
- 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]
- Sun X M, Zhu Z L, Xu J P, Yuan G F, Zhou Y L and Zhang R H. 2005. Determination of averaging period parameter and its effects analysis for eddy covariance measurements. *Science in China Series D Earth Sciences*, 48(S1): 33-41 [DOI: 10.1360/05zd0003]
- 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]
- Trenberth K E, Fasullo J T and Kiehl J. 2009. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3): 311-324 [DOI: 10.1175/2008bams2634.1]
- Van Kesteren B, Hartogensis O K, Van Dinter D, Moene A F and De Bruin H A R. 2013a. Measuring H₂O and CO₂ fluxes at field scales with scintillometry: part I - introduction and validation of four methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 178-179: 75-87 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.09.013]
- Van Kesteren B, Hartogensis O K, Van Dinter D, Moene A F, De Bruin H A R and Holtslag A A M. 2013b. Measuring H₂O and CO₂ fluxes at field scales with scintillometry: part II - validation and application of 1-min flux estimates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 178-179: 88-105 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.01.010]
- Wang J H. 2014. Landuse/landcover data of the Heihe River Basin (2011). Beijing: National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. <https://doi.org/10.3972/heihe.093.2014.db> (王建华. 2014. 黑河流域土地利用/土地覆被数据集(2011). 北京: 国家青藏高原科学数据中心. <https://doi.org/10.3972/heihe.093.2014.db>) [DOI: 10.3972/heihe.093.2014.db]
- Wang J M. 2021. Area averaged fluxes and scintillometry. *Plateau Meteorology*, 40(6): 1377-1393 (王介民. 2021. 面积平均通量与光闪烁方法. *高原气象*, 40(6): 1377-1393) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk017]
- Wang J M and De Bruin H. 2025. Scintillometry: Theory and Applications. Beijing: Science Press: 1-7 (王介民, 德布莱恩 H. 2025. 光闪烁方法: 理论与应用. 北京: 科学出版社: 1-7)
- Wang J M, Zhuang J X, Wang W Z, Liu S M and Xu Z W. 2015. Assessment of uncertainties in eddy covariance flux measurement based on intensive flux matrix of HiWATER-MUSOEXE. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(2): 259-263 [DOI:

- 10.1109/LGRS.2014.2334703]
- Ward H C. 2017. Scintillometry in urban and complex environments: a review. *Measurement Science and Technology*, 28(6): 064005 [DOI: 10.1088/1361-6501/aa5e85]
- Ward H C, Evans J G, Grimmond C S B and Bradford J. 2015. Infrared and millimetre-wave scintillometry in the suburban environment - part 1: structure parameters. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3): 1385-1405 [DOI: 10.5194/amt-8-1385-2015]
- 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]
- Wei J X, Dong W C, Liu S M, Song L S, Zhou J, Xu Z W, Wang Z W, Xu T R, He X L and Sun J W. 2023. Mapping super high resolution evapotranspiration in oasis-desert areas using UAV multi-sensor data. *Agricultural Water Management*, 287: 108466 [DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108466]
- Wyngaard J C, Izumi Y and Collins S A. 1971. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground. *Journal of the Optical Society of America*, 61(12): 1646-1650 [DOI: 10.1364/JOSA.61.001646]
- Xu F N, Wang W Z, Huang C L, Wang J M, Ren Z G, Feng J J, Dong L L, Zhang Y and Kang J. 2023. Turbulent fluxes at kilometer scale determined by optical-microwave scintillometry in a heterogeneous oasis cropland of the Heihe River Basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339: 109544 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109544]
- Xu T R, He X L, Bateni S M, Auligne T, Liu S M, Xu Z W, Zhou J and Mao K B. 2019. 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 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]
- Yu G R, Fu Y L, Sun X M, Wen X F and Zhang L M. 2006. Recent progress and future directions of ChinaFLUX. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(2): 1-23 [DOI: 10.1007/s11430-006-8001-3]
- Zhang G, Zhang J S and Meng P. 2021. Estimation of kilometer-scale heat fluxes over a hilly area in Northern China using an optical-microwave scintillometer. *Agricultural Water Management*, 244: 106582 [DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106582]
- Zhang Y Q, Kong D D, Gan R, Chiew F H S, 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, Liu S M, Song L S, Xu Z W, Guo J X, Ma Y F, Ju Q and Wang J M. 2023. Comparison of sensible and latent heat fluxes from optical-microwave scintillometers and eddy covariance systems with respect to surface energy balance closure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 331: 109345 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109345]
- Zheng C L, Jia L and Hu G C. 2022. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations. *Journal of Hydrology*, 613: 128444 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128444]
- Zheng C L, Jia L and Hu G C. 2023. Evapotranspiration estimation and validation at 16 m resolution based on ETMonitor model driven by GF-1 satellite remote sensing datasets. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 758-768 (郑超磊, 贾立, 胡光成. 2023. 高分一号卫星遥感数据驱动ETMonitor模型估算16m分辨率蒸散发及验证. *遥感学报*, 27(3): 758-768) [DOI: 10.11834/jrs.20232477]

Temporal-scale matching of optical-microwave scintillometer flux observations for validating remote sensing evapotranspiration models

XU Feinan¹, WANG Weizhen¹, HUANG Chunlin^{1,2}, WANG Jiemin¹, FENG Jiaojiao^{1,3},
DONG Leilei¹, REN Zhiguo^{1,4}, LI Yan⁵, ZHANG Yang¹

1. State Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
5. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Most current thermal-based remote sensing evapotranspiration (ET) models estimate sensible heat flux (H), latent heat flux (LE),

and ET using surface temperature and other parameters derived from multispectral and thermal imagery acquired within tens of seconds during satellite overpasses. However, their instantaneous flux estimates are commonly validated against 30 min averaged flux data from the Eddy Covariance (EC) method, leading to a significant temporal scale mismatch. Developed over the past two decades, optical-microwave two-wavelength scintillometry measures H and LE at scales ranging from hundreds of meters to 10 km, is suitable for complex environments including mountainous terrain, and yields statistically stable flux results with a shorter averaging time of 1–2 min. As a complement to EC, this method provides a critical opportunity for validating remote sensing ET models and products. On the basis of observations from Optical-Microwave Scintillometer (OMS) and EC systems as well as meteorological profile towers in the alpine grasslands of the upper reaches and oasis croplands of the middle reaches of the Heihe River Basin, northwest China, this study highlights the outstanding advantages of OMS flux observations in temporal-scale matching with ET model estimates. Comparative analysis of OMS and EC flux across different averaging times (1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min) confirms the theoretical feasibility that OMS can generate statistically stable fluxes with averaging periods as short as 1 min. This time scale is highly consistent with the scanning duration of single-satellite images (e.g., Landsat). On the basis of this finding, analysis of 1 min OMS data in alpine grassland shows that H and LE over the 30 min periods typically used for model validation often vary by 10%–30%. Using the 1 min flux data at the time of satellite overpass to validate ET model results introduces uncertainties of similar magnitude, which are exacerbated under atmospheric nonstationary conditions. Validation of instantaneous H and LE estimated by the two-source surface energy balance (TSEB) model and Landsat images using OMS and EC flux data from oasis croplands demonstrates better agreement between TSEB outputs and 1 min OMS flux observations. Optical-microwave scintillometry enables ground observations to match the spatiotemporal scales of satellites, providing an effective method for validating thermal-based ET models and products. Widespread application of this method will promote the optimization of ET retrieval algorithms and improve the accuracy of related products.

Key words: two-wavelength scintillometry, remote sensing evapotranspiration model, Heihe river basin, sensible and latent heat fluxes, temporal-scale matching

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42130113, 42471433, 42101411, 42201431); Youth Science and Technology Foundation of Gansu Province, China (No. 24JRRA094)