

基于涡动相关通量观测的农田蒸散发产品精度验证

刘萌¹, 彭中^{2,3}, 黄凌霄^{2,3}, 李召良¹, 段四波¹, 唐荣林^{2,3}

1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 高精度的农田蒸散发 (ET) 对于田间尺度精准的水分平衡量化和水分亏缺研究具有重要意义, 对农业精准灌溉和农田水分利用效率提高具有实用价值。本研究利用全球共计 28 个农田站点的涡动相关系统 (EC) 通量观测数据, 对 500 m 空间分辨率 8 d 时间分辨率的 MOD16 和 PML-V2 两种遥感蒸散发产品, 进行了对比分析与精度评估。评估结果表明, PML-V2 ET 产品与 EC 观测 ET 相比, 均方根误差 (RMSE) 变化范围为 3.3—22.4 mm/8 d, 平均偏差 (bias) 变化范围为 -15.98—13.27 mm/8 d; MOD16 ET 产品与 EC 观测 ET 相比, RMSE 变化范围为 3.81—21.47 mm/8 d, bias 变化范围为 -16.42—15.05 mm/8 d。整体而言, 两种产品精度相当, MOD16 产品低估 8 d ET (bias: -2.31 mm/8 d, R^2 : 0.452, RMSE: 8.82 mm/8 d), PML-V2 产品略高估 8 d ET (bias: 0.51 mm/8 d, R^2 : 0.455, RMSE: 8.81 mm/8 d); PML-V2 产品在 18 个站点 (64%) 上表现更优, 但是部分站点上 MOD16 产品对时序变化细节 (如到达波峰的季节、年中的下降/上升趋势) 的刻画优于 PML-V2 产品; PML-V2 产品未能捕捉到冬小麦和夏玉米轮种而引起的 ET 年中先下降后上升的变化趋势, 而 MOD16 产品虽然成功捕捉到 ET 时序曲线上冬小麦和夏玉米两种作物各自生长期内的波峰, 但仍较大程度上低估了冬小麦 ET (如栾城站点和禹城站点); 另外, MOD16 产品和 PML-V2 产品均严重低估了水稻 ET (如 US-Twt 站点)。本研究可为农田蒸散发算法发展及其精度验证提供参考。

关键词: 遥感, MOD16 产品, PML-V2 产品, 农田蒸散发, 产品验证

中图分类号: P2

引用格式: 刘萌, 彭中, 黄凌霄, 李召良, 段四波, 唐荣林. 2023. 基于涡动相关通量观测的农田蒸散发产品精度验证. 遥感学报, 27 (5): 1238-1253

Liu M, Peng Z, Huang L X, Li Z L, Duan S B and Tang R L. 2023. Validation of crop evapotranspiration products based on eddy-covariance flux observations. National Remote Sensing Bulletin, 27 (5): 1238-1253 [DOI: 10.11834/jrs.20222008]

1 引言

地表蒸散发 ET (Evapotranspiration) 是指从地表传输到大气中的水分, 包括土壤表面水分蒸发、植被水分蒸腾和冠层截留蒸发。水分蒸发的过程需要吸收能量来冷却地表, 这部分能量被称为潜热通量 LE (Latent heat flux), 是蒸散发的能量表达形式, 二者可以相互转化 (Wang 和 Dickinson, 2012)。蒸散发和潜热连接了水循环和能量循环, 是地表水热循环中的关键过程参量, 也是其中最

难估算的地表特征参量。遥感技术因其大范围观测能力, 为获取丰富的区域地表特征参量提供了可能, 遥感反演蒸散发是获取区域、国家和全球尺度蒸散发时空分布的有效方法 (Li 等, 2009)。目前, 国内外学者已经先后生产发布了不同时空分辨率的区域及全球蒸散发遥感反演产品, 如 MOD16 产品 (Mu 等, 2011)、LSA-SAF 产品 (Ghilain 等, 2011)、SSEBop 产品 (Senay 等, 2013)、GLASS 产品 (Yao 等, 2014)、ETMonitor 产品 (Hu 和 Jia, 2015)、BESS 产品 (Jiang 和 Ryu, 2016)、GLEAM 产品

收稿日期: 2022-01-10; 预印本: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42001310, 42271378, 42071332); 高分辨率对地观测系统国家科技重大专项 (编号: 09-Y30F01-9001-20/22); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (编号: 1610132020007, Y2021XK26)

第一作者简介: 刘萌, 研究方向为地表蒸散发遥感反演。E-mail: liumeng01@caas.cn

通信作者简介: 唐荣林, 研究方向为地表蒸散发遥感反演、遥感大数据分析。E-mail: tangrl@lreis.ac.cn

(Martens 等, 2017)、PML-V2 产品 (Zhang 等, 2019)、FLUXCOM 产品 (Jung 等, 2019) 和 CR-ET 产品 (Ma 等, 2019) 等。相关研究已经详细介绍了现有的过程驱动的蒸散发遥感产品 (李佳等, 2021) 和数据驱动的蒸散发遥感产品 (刘萌等, 2021)。由于不同产品之间存在反演方法机理差异、产品特征差异等, 在使用这些产品前, 需要对产品的精度进行验证和评估 (熊育久等, 2021)。然而, 由于近地表大气的复杂多变性、地表下垫面的异质性等特点, 蒸散发产品的验证目前仍面临诸多困难和挑战。张圆等 (2020) 详细综述了蒸散发真实性检验的发展现状和研究进展, 将蒸散发真实性检验方法分为像元尺度和区域尺度的直接检验方法以及交叉检验、多尺度逐级检验和时空变化趋势分析等间接检验方法, 并指出像元尺度地表蒸散发相对真值的获取是其核心问题。现有的蒸散发相对真值获取的通量观测方法包括蒸渗仪方法、涡动相关技术、能量平衡波文比法、大孔径闪烁仪方法和微波闪烁仪方法。其中, 涡动相关技术 (EC) 利用热通量、水汽变化和风速间的协方差来观测显热通量和潜热通量, 是目前全球使用最广泛的通量观测方法, 被广泛应用于蒸散发精度验证研究中。EC 得到的通量其观测源区与风速风向、仪器观测高度和下垫面状况等因素有关, 受大气湍流的影响而时刻变化, EC 观测源区大约在几十米到几百米之间 (Jia 等, 2012)。对于高分辨率蒸散发估算, 可以考虑通量观测源区来进行源区内多个像元的精度验证 (Jia 等, 2012; Bai 等, 2015; Liu 等, 2016); 针对中低分辨率蒸散发估算, 目前主要是站点观测作为像元相对真值来直接验证 (Jung 等, 2010; Mu 等, 2011; Tang 和 Li, 2017; Zhang 等, 2019), 或者用高分辨率蒸散发估算结果作为区域真值进行验证 (Xu 等, 2018; Li 等, 2018)。对于公里尺度的蒸散发验证, Mu 等 (2011)、Yao 等 (2014)、Jiang 和 Ryu (2016)、Zhang 等 (2019) 使用全球 FLUXNET 通量观测数据在站点尺度分别对 MOD16 算法估算 ET (1 km/8 d)、GLASS 算法估算 ET (1 km/8 d)、BESS 产品 ET (1 km/8 d) 以及 PML-V2 算法估算 ET (500 m/8 d) 进行了直接验证, 估算 ET 和观测 ET 的 RMSE 分别为: 0.9 mm/d、35.3 W/m²、0.78 mm/d、0.69 mm/d。

农田蒸散发长期以来一直是农业、气象和水文

等学科的研究焦点 (姚云军等, 2012)。在农业旱情监测和灌溉管理中, 蒸散发可以作为衡量作物缺水的指标。高精度的遥感反演农田蒸散发对于田间尺度的更精准的水分平衡量化和水分亏缺研究具有重要意义, 对于农业精准灌溉和提高农田水分利用效率具有实用价值。在已发布的蒸散发产品中, MOD16 产品和 PML-V2 产品空间分辨率 (500 m) 最接近于农田站点 EC 观测源区大小, 且 500 m 像元上农田地表相对均一, 空间代表性较好。对于均匀地表, 通量站点观测值可被当作遥感像元上的相对真值来检验观测仪器所在蒸散发产品像元值或者周围多个像元上的算术/加权平均值 (张圆等, 2020)。故本研究选取这两种蒸散发产品来进行农田蒸散发的对比验证。

2 数据介绍

2.1 ET 产品

2.1.1 MOD16 产品

NASA 发布的 MOD16 产品为用户分别提供了 ET、LE、潜在 ET 和潜在 LE。冠层截留的水分蒸发是高叶面积指数 (LAI) 生态系统重要的水分通量, MOD16 算法基于 Penman-Monteith 方程, 将 ET 划分为湿冠层表面蒸发、干冠层表面植被蒸腾和土壤表面蒸发 3 部分, 并在白天和夜晚分开估算求和。该算法将土壤表面分为饱和湿润表面和潮湿表面, 并通过 LAI 将气孔导度转化为冠层导度来计算植被蒸腾, 同时针对不同的地表覆被类型的阻抗分别参数化, 以提高特定地表下垫面 ET 的遥感反演精度 (Mu 等, 2011)。相比于 Mu 等 (2011), MOD16 V6 产品生产进行了以下改进: 如果白天净辐射为负值时, 使其为 0; 对土壤热通量进行了限制保证土壤蒸发不为负值; 针对持续严重的有云天导致的非洲西部雨林区没有有效的反照率的问题, 设定其反照率为定值 0.4; 更新了不同地表覆被类型的生物群落属性查找表参数值; 用 3 年平滑地表覆被产品 MCDLCHKM 替换年地表覆被产品 MOD12Q1。MOD16 产品生产使用的输入数据为 GMAO MERRA 气象再分析数据 (1/2°×2/3°) 和 MODIS 遥感产品 (500 m)。MOD16 产品包括 8 天、月和年 3 种时间尺度的产品, 本研究所采用的 MOD16 产品为 8 天合成的 500 m 空间分辨率的 MOD16A2 V6.1 产品 ET (Running 等, 2021)。

2.1.2 PML-V2 产品

PML-V2 产品是利用 Penman-Monteith-Leuning 模型生产的水热耦合的产品 (张永强等, 2021), 将 ET 分为土壤蒸发、植被蒸腾和冠层截留蒸发 3 部分。其中, 冠层截留蒸发通过适用性分析模型来估算, 植被蒸腾和土壤蒸发通过 LAI 来划分, PML-V1 模型结合 Penman-Monteith 公式和 Leuning 导度模型估算植被蒸腾, 在此基础上, PML-V2 模型利用气孔导度耦合植被蒸腾和光合同化速率, 采用碳水耦合冠层导度模型估算植被蒸腾和总初级生产力 (GPP), 使得 ET 和 GPP 得以相互制约, 通过在全球分布的 95 个 EC 通量观测站分 10 种植被类型分别进行参数率定, 提高 ET 和 GPP 估算精度 (Zhang 等, 2019)。PML-V2 产品生产所采用的驱动数据包括全球陆面数据同化系统 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 气象数据 (0.25°、3 h) 和 MODIS 遥感产品 (500 m), 将在通量观测站点上率定的模型参数由站点尺度扩展到全球逐网格尺度, 从而实现全球 ET 和 GPP 产品生产。不同于 MOD16 仅提供 ET, PML-V2 产品分别提供土壤蒸发、植被蒸腾和冠层截留蒸发 3 部分。

2.2 站点观测数据

本论文所采用的用于农田类型蒸散发验证的通量观测站点包括 20 个全球 FLUXNET 农田通量观测站点 (表 1) 和 8 个中国农田通量观测站点 (表 2), 所采用的通量观测数据为日通量观测数据。FLUXNET 数据提供了日观测通量质量控制数据 (QC), QC 的取值范围为 0—1, 表示每天半小时观测数据或者高质量插补数据所占的比例 (Pastorello 等, 2020)。参考 Mu 等 (2011), Yao 等 (2014)、Hu 和 Jia (2015)、Tang 等 (2015)、Zhang 等 (2019) 的研究, 本研究在将 8 天内的日尺度 ET 观测累加获取 8 天尺度 ET 观测。在求 8 天累积 ET 观测时, 对 8 天内的每天的观测质量控制数据求平均, 当 8 天内观测数据或者高质量插补数据大于 80% (即平均 QC 大于 0.8) 才认为 8 天观测数据有效。中国通量观测数据未提供 QC, 在求 8 天累积 ET 观测时, 8 天内的每天都有观测值才认为 8 天观测数据有效。表 1 中将 MOD16 算法 (Mu 等, 2011) 和 PML-V2 算法 (Zhang 等, 2019) 曾使用过的算法验证站点分别用 \triangle 和 \diamond 标识。虽然有 11 个 FLUXNET 站点

在 Zhang 等 (2019) 中使用, 但是该研究是采用留一法 (即每次使用 10 个农田站点来率定模型系数, 将率定后的系数用在剩余一个站点上, 对该站点上的算法精度进行验证) 进行算法精度的验证, 而不是对实际的 PML-V2 产品精度的验证。

2.3 其他辅助数据

本论文中使用的其他辅助数据包括土地利用/覆被数据和地面高程信息。土地利用/覆被数据使用的是 500 m 空间分辨率的 MODIS 地表覆被数据 (MCD12Q1), 采用其中的国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 分类方案, 该方案中定义了 17 种不同的土地覆被类型, 包括 11 种自然植被类别、3 种人为改变类别以及 3 种非植被类别。本论文中使用的地面高程信息来源于 ASTER GDEM 数据, 该数据是目前唯一覆盖全球陆地表面的高分辨率高程影像数据, 其空间分辨率为 30 m, 垂直分辨率为 1 m, 数据可从 NASA EARTH DATA 下载获取, 下载地址为: [https://search.earthdata.nasa.gov/search\[2022-01-10\]](https://search.earthdata.nasa.gov/search[2022-01-10])。本论文所采用的遥感卫星影像数据来源于 Google Earth, 影像重采样分辨率为 0.5 m, 所用数据影像时间已在图 1 中标注。

2.4 评价指标

本论文中使用到的评价指标包括反映了产品 8 天 ET 与 EC 观测 8 天 ET 互相关联程度的拟合度 R^2 、反映产品 8 天 ET 与 EC 观测 8 天 ET 偏离程度的平均偏差 bias 和均方根误差 RMSE。不同评价指标的计算方法如下:

$$R^2 = \frac{\left(\frac{n \sum_{i=1}^n ET_i ET_{obs,i} - \sum_{i=1}^n ET_i \sum_{i=1}^n ET_{obs,i}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n ET_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n ET_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n ET_{obs,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n ET_{obs,i} \right)^2}} \right)^2}{1} \quad (1)$$

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_i - ET_{obs,i})}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_i - ET_{obs,i})^2}{n}} \quad (3)$$

式中, n 代表观测 8 天 ET 或产品 8 天 ET 的样本数量, ET_i 是第 i 个 8 天的累积 ET 产品值, $ET_{obs,i}$ 表示第 i 个 8 天的累积 ET 观测值。

表1 20个FLUXNET农田通量观测站点信息
Table 1 Information of 20 tower sites for flux observation covered by cropland in FLUXNET2015

站点ID	数据 时长/年	纬度/°N	经度/°E	高程/ m	年平均 气温/°C	年平均 降雨/mm	作物类型	产品精度更优		时序波动一致	
								MOD16	PML-V2	MOD16	PML-V2
BE-Lon	2004—2014	50.5516	4.7462	167	10	800	甜菜/芥菜/玉米/土豆/ 冬小麦/大麦		√	P√	P√
CH-Oe2	2004—2014	47.2864	7.7337	452	9.5	1155	冬小麦/大麦/西红柿/ 油菜籽	√		P√	P√
DE-Geb◇	2001—2014	51.0997	10.9146	161.5	8.5	470	油菜籽/冬小麦/大麦/ 甜菜		√	P√	P√
DE-Kli	2004—2014	50.8931	13.5224	478	7.6	842	大麦/油菜籽/玉米/ 冬小麦		√	P√	P√
DE-RuS*	2011—2014	50.8659	6.4471	102.8	10	700	甜菜/冬季谷物/西红柿	—		—	P√
DE-Seh◇	2007—2010	50.8706	6.4497	103	9.9	693	甜菜/玉米/冬小麦	√		P√	P√
DK-Fou	2005—2005	56.4842	9.5872	51	8	—	—		√		
FI-Jok*	2000—2003	60.8986	23.5134	109	4.6	627	大麦		√	P√	P√
FR-Gri◇	2004—2014	48.8442	1.9519	125	12	650	大麦/芥菜/玉米/小麦/ 黑小麦/青菜	√		P√	P√
IT-BCi◇	2004—2014	40.5237	14.9574	20	18	600	玉米/黑麦草/茴香/苜蓿	√		P√	
IT-CA2◇	2011—2014	42.3772	12.0260	200	14	766	冬小麦	√		P√	
US-ARM◇ △	2003—2012	36.6058	-97.4888	314	14.76	843	小麦/玉米/大豆/ 油菜籽/豇豆	√		P√	
US-CRT	2011—2013	41.6285	-83.3471	180	10.1	849	大豆/冬小麦		√	√	
US-Lin	2009—2010	36.3566	-119.0922	131	—	—	果园		√		
US-Ne1◇	2001—2013	41.1651	-96.4766	361	10.07	790.37	玉米		√	P√	P
US-Ne2◇	2001—2013	41.1649	-96.4701	362	10.08	788.89	玉米/大豆		√	P√	P
US-Ne3◇	2001—2013	41.1797	-96.4397	363	10.11	783.68	玉米/大豆		√	P√	P
US-Tw2*	2012—2013	38.1047	-121.6433	-5	15.5	421	玉米		√	P√	P√
US-Tw3◇	2013—2014	38.1159	-121.6467	-9	15.6	421	苜蓿		√	P√	P
US-Twt◇	2009—2014	38.1087	-121.6531	-7	15.6	421	水稻	√		√	

注：*表示该站点所在像元在MODIS地表覆被类型上显示为非农田类型。◇表示该站点在Zhang等(2019)中用于PML-V2算法的验证，△表示该站点在Mu等(2011)中用于1 km空间分辨率上MOD16算法的验证。P表示产品ET与观测ET年度最高峰所处时间一致。

表2 8个中国农田通量观测站点信息
Table 2 Information of eight tower sites for flux observation covered by cropland in China

站点ID	数据时长/年	纬度/°N	经度/°E	高程/m	观测高度/m	作物类型	站点位置	产品精度更优		时序波动一致	
								MOD16	PML-V2	MOD16	PML-V2
LC	2007—2013	37.8894	114.6928	50	3.5	冬小麦/夏玉米	河北栾城		√	√	
YC	2003—2010	36.8290	116.5702	28	2		山东禹城		√	√	
CN-Du1*	2006—2006	42.0456	116.2797	1350	4	小麦/荞麦	内蒙古多伦	√		√	√
CW	2008—2009	35.2421	107.6822	1220	2	冬小麦	陕西长武	√		P√	√
GT	2009—2009	36.5150	115.1274	42	15.6	玉米/小麦/棉花	河北馆陶		√		P√
MY	2008—2009	40.6308	117.3233	350	26.66	果园、玉米/裸地、城镇	北京密云		√		P√
SX	2005—2005	32.5000	116.7667	23	4	冬小麦/水稻	安徽寿县	√		√	
TW-Tar*	2006—2007	24.0312	120.6880	55	—	—	台湾		√		

注：*表示该站点所在像元在MODIS地表覆被类型上显示为非农田类型。P表示产品ET与观测ET年度最高峰所处时间一致。

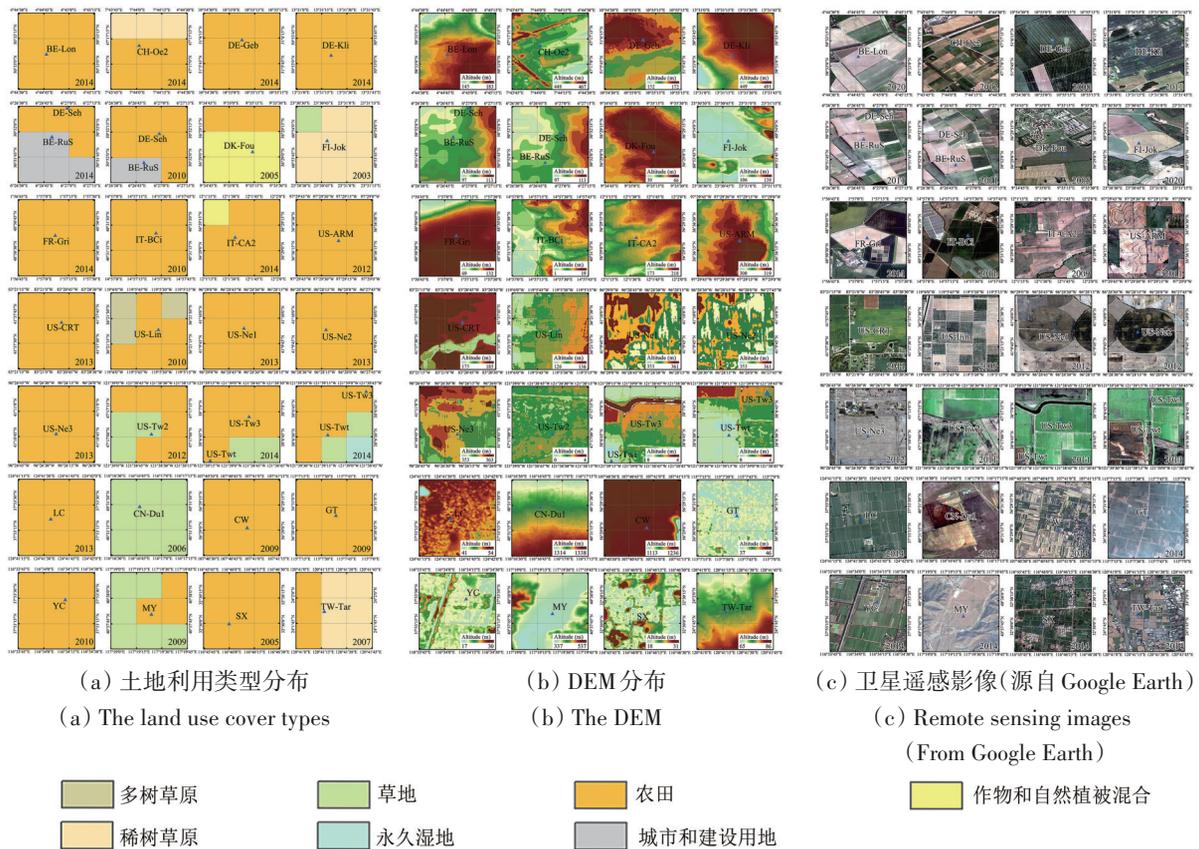


图1 28个农田通量观测站点所在MODIS像元及周围 3×3 像元(500 m)

Fig. 1 The satellite images from Google Earth of the surrounding 3×3 MODIS pixels (500 m) for the 28 flux tower sites

3 精度对比验证结果

3.1 直接验证

在开展遥感产品真实性检验前, 应先评价地表的空质异性, 对于相对均一的地表, 可将站点观测值作为像元尺度相对真值, 用于观测仪器所在像元的蒸散发产品值的验证(张圆等, 2020)。

3.1.1 地表均一性评价

为了开展ET产品精度的综合评估, 首先进行了通量观测站点的地表均一性评价。图1(a)、(b)、(c)分别展示了28个农田通量观测站点所对应的500 m分辨率的MODIS单像元及周围3像元 \times 3像元的地表类型分布、高程变化和从Google Earth上获取的卫星遥感影像(一个格子代表一个像元)。对每个站点, 图1(a)中选用已获取通量观测数据时间范围内最新一年MCD12Q1的数据; 图1(c)中尽量在Google Earth上选取已获取通量观测数据年份的卫星遥感影像, 如果观测年份没有可获取影像时, 才选择其他时间的影像作为辅助检验; 每个站点所用的地表分类数据及卫星遥感影像时间

均标注在图上。28个农田站点中, BE-Lon、DE-Geb、DE-Kli、FR-Gri、IT-Bci、US-ARM、US-CRT、US-Ne1、US-Ne2、US-Ne3、LC、CW、GT、YC和SX共15个观测站点在站点附近 3×3 个像元内MODIS地表覆被类型完全一致, 均为农田。DK-Fou站点所在像元地表覆被类型为农田/自然植被混合, 从Google Earth上可以看出该像元地表覆被类型多样化, 地表异质性较明显。虽然CH-Oe2、DE-Seh、IT-CA2、US-Lin、US-Tw3、US-Twt和MY等7个站点的所在像元MODIS地表覆被类型是农田, 但是在站点附近 3×3 个像元内含有非农田类型的像元, 农田像元所占比例依次为67%、78%、89%、67%、78%、67%、33%, 除MY站点和CH-Oe2站点(左上角像元内含有建设用地)外的其余站点上, MODIS地表覆被类型显示不是农田的像元在Google Earth影像上显示像元大面积上基本均为农田。尽管MODIS地表覆被数据显示DE-RuS、FI-Jok、US-Tw2、CN-Du1和TW-Tar等5个站点(在表1和表2中用*标识)其站点所在像元地表覆被类型不是农田, 依次为建设用地、稀树草原、草地、草地和稀树草原, 但是在Google Earth影像

上显示这些像元均为农田地类。值得注意的是，MOD16不计算城市区域，故而MOD16产品在该像元上没有数据；US-Tw2站点所在像元下垫面植被覆盖类型14年之前为农田，14年之后为湿地。对不同下垫面，MOD16产品和PML-V2产品其算法参数化方案均不同，MODIS地表覆盖类型的错分，使得对原本的农田地类像元按照非农田地类的参数化方案开展该像元ET的估算和产品的生产，使得这些像元上两种产品的ET值存在较大的不确定性。

3.1.2 验证结果

DE-Rus站点所对应的地表覆盖类型为建筑用地，MOD16产品不提供该地类的ET值，故图2展示了19个FLUXNET农田站点上MOD16产品和PML-V2产品8天累积ET的EC观测直接验证结果。本研究采用融合了核密度估计曲线、箱线图及抖动散点图的云雨图来表示两种产品8天ET的偏差分布。图3展示了19个FLUXNET农田站点上MOD16产品和PML-V2产品8天累积ET与EC观测8天ET偏差的云雨图。从整体上来看，PML-V2产品略高估8天ET (bias: 0.66 mm/8 d)，MOD16产品略低估8天ET (bias: -1.79 mm/8 d)，PML-V2产品精度 (RMSE: 8.85 mm/8 d) 与MOD16产品精度 (RMSE: 8.54 mm/8 d) 相差不多；12个站点上PML-V2产品精度优于MOD16产品精度，另外7个站点上MOD16产品精度优于PML-V2产品精度；在BE-Lon、DE-Geb、DE-Kli、DK-Fou、FI-Jok和IT-Ca2 6个站点，MOD16产品 (bias: 0.67—15.05 mm/8 d) 和PML-V2产品 (bias: 1.53—13.27 mm/8 d) 均高估8天ET；在CH-Oe2、DE-Seh、US-CRT、US-Tw2、US-Tw3和US-Twt等6个站点上，MOD16产品 (bias: -16.42—1.04 mm/8 d) 和PML-V2产品 (bias: -15.98—-2.28 mm/8 d) 均低估8天ET。

对于在站点附近3×3个像元内MODIS地表覆盖类型完全一致均为农田的10个站点：在BE-Lon、DE-Geb、DE-Kli、US-CRT、US-Ne1、US-Ne2和US-Ne3等7个站点上，PML-V2产品精度 (RMSE: 4.42—7.23 mm/8 d) 优于或略优于MOD16产品精度 (RMSE: 7.22—8.33 mm/8 d)；在FR-Gri、IT-Bci和US-ARM 3个站点上，MOD16产品精度 (RMSE: 4.24—6.07 mm/8 d) 优于或略优于

PML-V2产品精度 (RMSE: 5.22—11 mm/8 d)。对于其站点所在像元MODIS地表覆盖类型不是农田的3个站点：站点所在像元为建筑用地的DE-RuS站点，MOD16产品没有产品估算结果，故在图4和图5中未予以评价；所在像元为稀树草原的FI-Jok站点上，MOD16产品精度较差RMSE大于10 mm/8 d，PML-V2产品RMSE仍在5 mm/8 d内，两种产品根据MODIS地类分类计算，计算ET时按稀树草原的参数计算，可能是造成估算误差大的原因；所在像元为草地的US-Tw2站点，尽管所处位置非常靠近下方农田像元，但产品值应该是按草地的参数计算的草地ET而非农田ET，两种产品均低估8天ET，PML-V2产品精度 (RMSE: 4.45 mm/8 d, bias: -2.72 mm/8 d) 优于MOD16产品精度 (RMSE: 8.06 mm/8 d, bias: -5.35 mm/8 d)。对于虽然站点所在像元MODIS地表覆盖类型是农田，但是在站点附近3×3个像元内含有非农田类型像元的6个站点：在CH-Oe2、DE-Seh和IT-CA2等3个站点上，两种产品RMSE均在10 mm/8 d以内，MOD16产品精度 (RMSE: 3.81—6.38 mm/8 d, bias: -2.78—0.67 mm/8 d) 优于或略优于PML-V2产品精度 (RMSE: 5.75—9.58 mm/8 d, bias: -4.34—4.25 mm/8 d)，在IT-CA2站点上，MOD16产品大部分8天累积ET与观测8天ET偏差在-10—10 mm/8 d，高估和低估的分布相对均匀，而PML-V2产品部分8天累积ET高估可达将近30 mm/8 d；在US-Tw3和US-Lin两个站点上，PML-V2产品 (RMSE: 5.57—8.03 mm/8 d, bias: -5.39—0.66 mm/8 d) 精度略优于MOD16产品精度 (RMSE: 6.81—11.03 mm/8 d, bias: -3.44—-8.55 mm/8 d)；地表异质性较明显的US-Twt站点上，MOD16产品 (RMSE: 21.47 mm/8 d, bias: -16.42 mm/8 d) 和PML-V2产品 (RMSE: 22.4 mm/8 d, bias: -15.98 mm/8 d) 精度均较差，严重低估8天ET，该站点是唯一的水稻站点，证明了现有产品对水稻ET的严重低估。

图4和图5分别展示了中国8个农田站点的8天ET直接验证结果，以及MOD16产品和PML-V2产品8天累积ET与EC观测8天ET偏差的云雨图。在LC、YC、GT和MY这4个站点上，PML-V2产品8天ET精度 (R^2 : 0.271—0.811, RMSE: 3.3—9.2 mm/8 d) 明显优于MOD16产品8天ET精度 (R^2 : 0.018—0.600, RMSE: 9.74—13.45 mm/8 d)，PML-V2产品

在GT站点高估8天ET (bias: 3.52 mm/8 d), 在其
 余3个站点低估8天ET (bias: -1.72—-0.57 mm/8 d),
 MOD16产品在4个站点均低估8天ET (bias: -8.4—
 -6.21 mm/8 d); 在CN-Du1站点, 两种产品8天ET
 验证精度相差不大且整体精度较其他站点相对较
 高, MOD16产品略低估8天ET (bias: -2.49 mm/8 d,
 RMSE: 5.89 mm/8 d), 而PML-V2产品略高估8天
 ET (bias: 1.08 mm/8 d, RMSE: 6.76 mm/8 d); 在

CW和SX两个站点, MOD16产品8天ET精度 (R^2 :
 0.143—0.439, RMSE: 5.73—10.12 mm/8 d, bias:
 -2.29—2.37 mm/8 d) 优于PML-V2产品8天ET精度
 (R^2 : 0.014—0.282, RMSE: 10.08—11.25 mm/8 d,
 bias: 7.42—8.04 mm/8 d); TW-Tar站点有效数据
 太少, 统计意义不足, 在仅有的3个8天, PML-
 V2产品略优于MOD16产品。

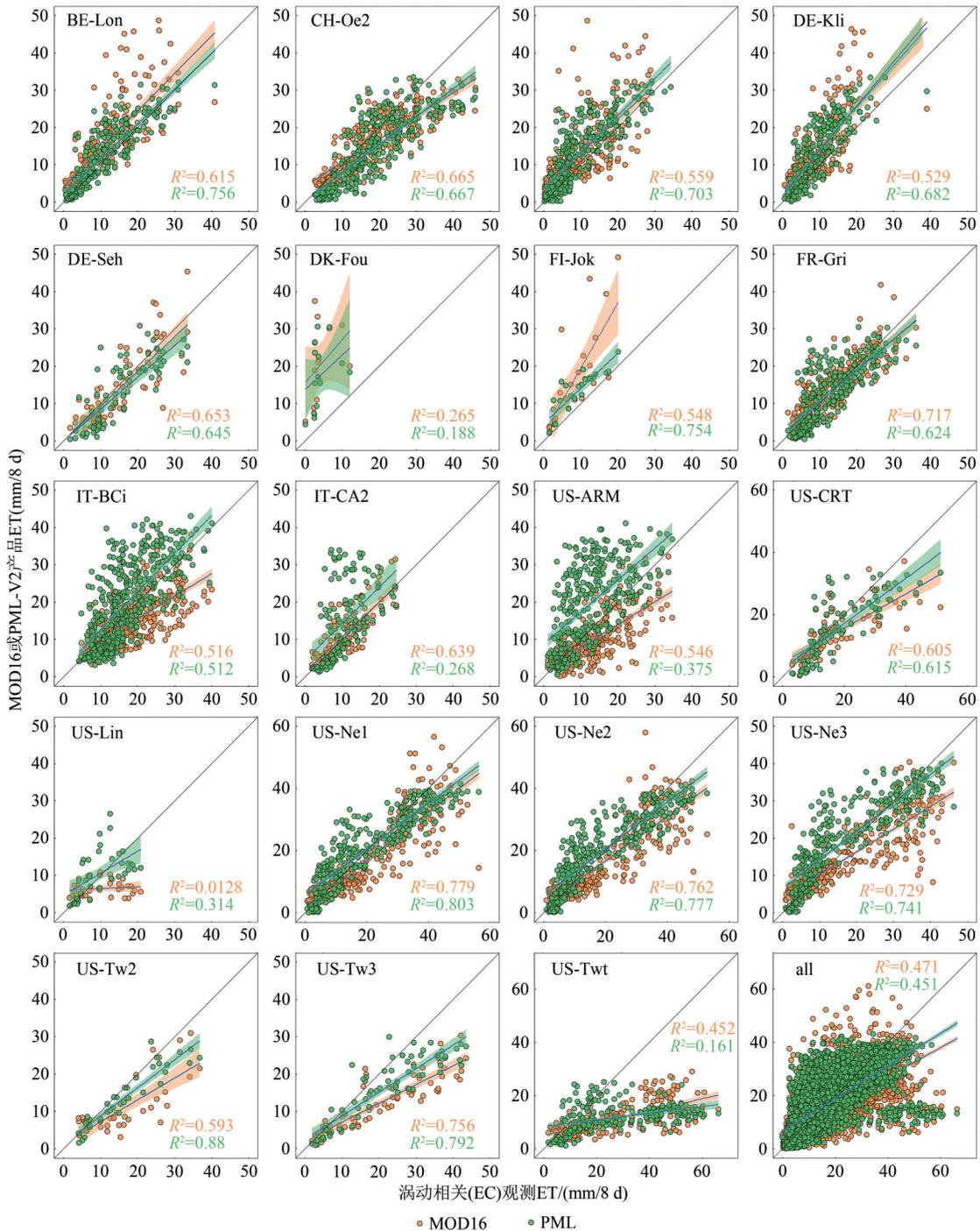


图2 19个FLUXNET农田站点MOD16产品和PML-V2产品8天ET验证散点图(95%置信区间)

Fig. 2 Observed ET versus MOD16 ET and PML-V2 ET for 8-day estimates at the 19 cropland sites in FLUXNET (95% confidence interval)

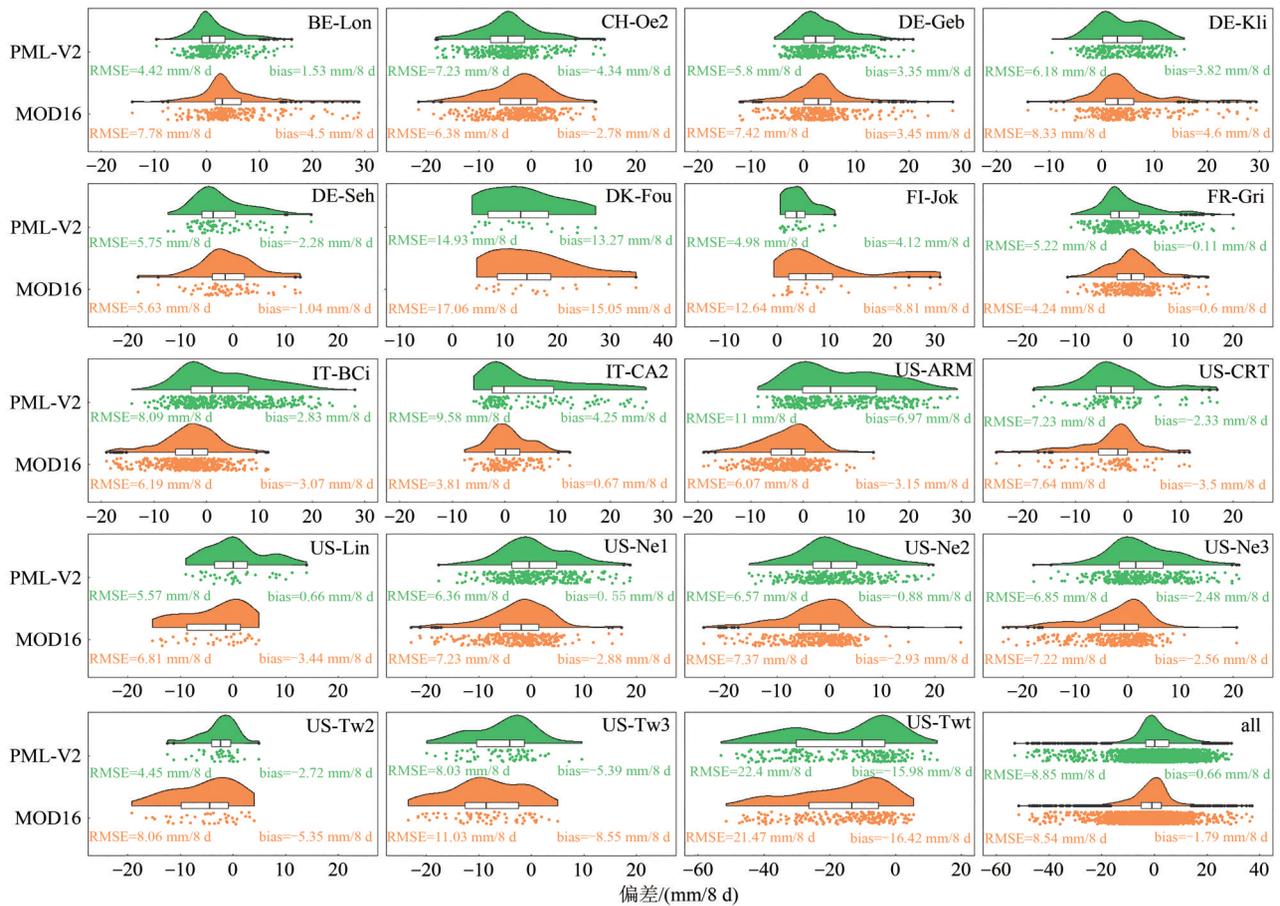


图3 19个FLUXNET农田站点MOD16产品和PML-V2产品与EC观测8天ET偏差的云雨图

Fig. 3 Raincloud plots of the biases between the 8-day ET (of the MOD16 or PML-V2 product) and the observed 8-day ET at the 19 cropland sites in FLUXNET

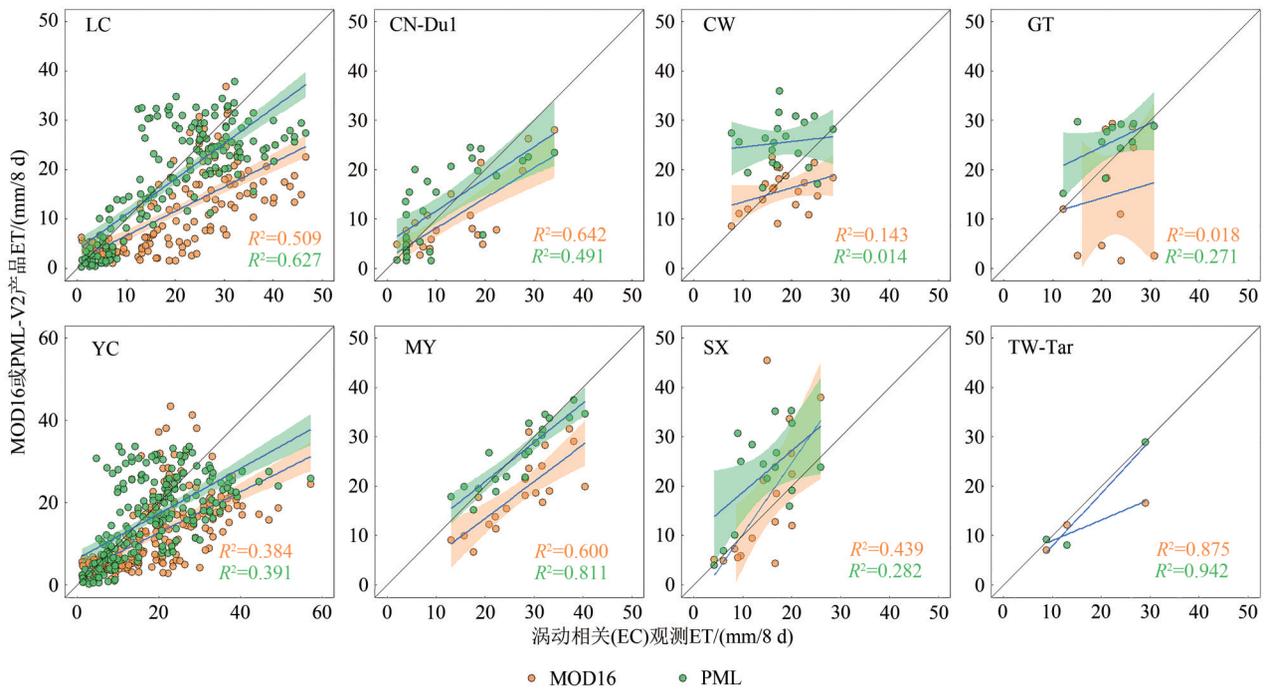


图4 中国8个农田站点MOD16产品和PML-V2产品8天ET验证(95%置信区间)

Fig. 4 Observed ET versus MOD16 ET and PML-V2 ET for 8-day estimates at the 8 cropland sites in China (95% confidence interval)

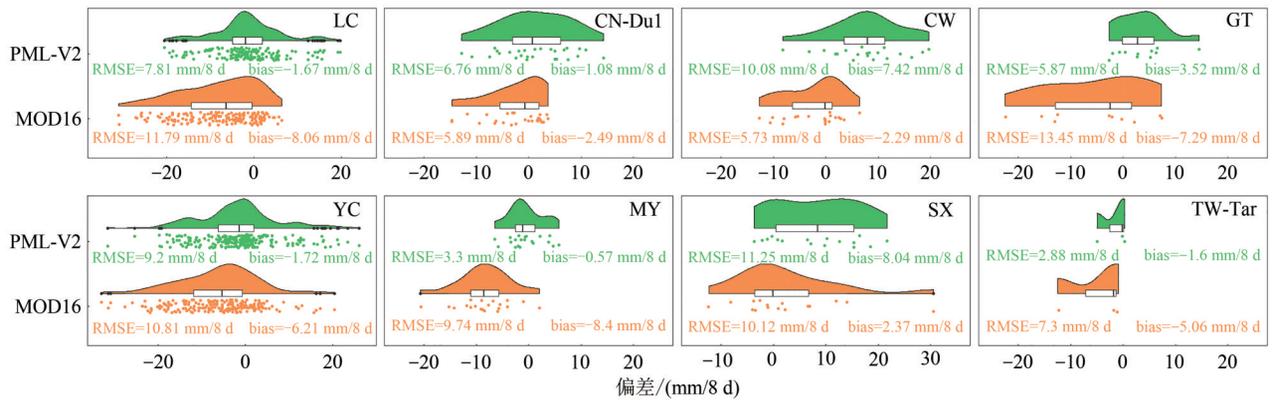
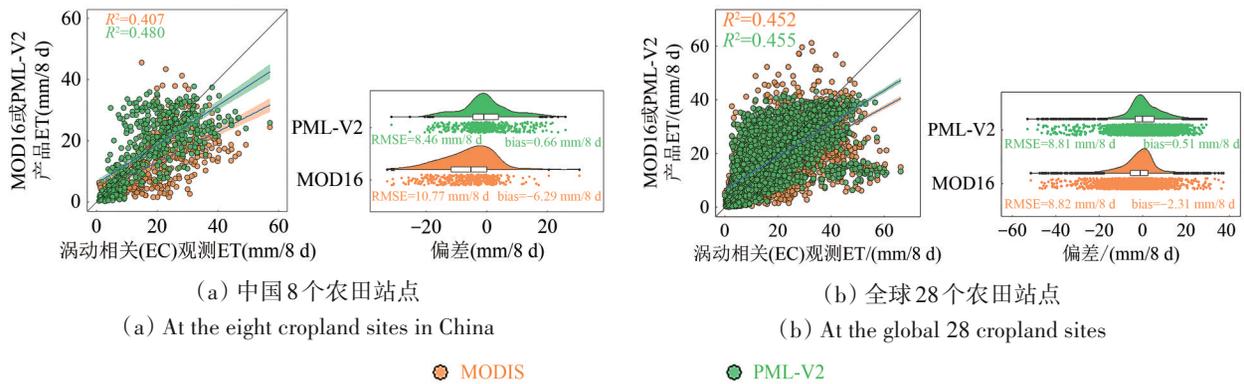


图5 中国8个农田站点MOD16产品和PML-V2产品与EC观测8天ET偏差云雨图

Fig. 5 Raincloud plots of the biases between the 8-day ET (of the MOD16 or PML-V2 product) and the observed 8-day ET at the 8 cropland sites in China

图6展示了中国8个农田站点和全球28个农田站点上MOD16产品和PML-V2产品8天ET总体验证结果。对于中国8个农田站点，PML-V2产品精度 (R^2 : 0.480, RMSE: 8.46 mm/8 d) 优于MOD16产品精度 (R^2 : 0.407, RMSE: 10.77 mm/8 d); MOD16产品在7个站点上均低估8天ET, 仅在SX站点上高估8天ET, 整体低估8天ET (bias: -6.29 mm/8 d); 而PML-V2产品在4个站点上高估

8天ET, 在另外4个站点上低估8天ET, 整体略低估8天ET (bias: -0.66 mm/8 d)。对于本研究中评估的全球共28个农田站点, MOD16产品精度 (R^2 : 0.452, RMSE: 8.82 mm/8 d) 和PML-V2产品精度 (R^2 : 0.455, RMSE: 8.81 mm/8 d) 整体精度相当, MOD16产品整体略低估8天ET (bias: -2.31 mm/8 d), 而PML-V2产品整体略高估8天ET (bias: 0.51 mm/8 d)。



(a) 中国8个农田站点

(a) At the eight cropland sites in China

(b) 全球28个农田站点

(b) At the global 28 cropland sites

● MODIS

● PML-V2

图6 MOD16产品和PML-V2产品8天ET总体验证结果

Fig. 6 The overall validation of MOD16 ET and PML-V2 ET for 8-day estimates

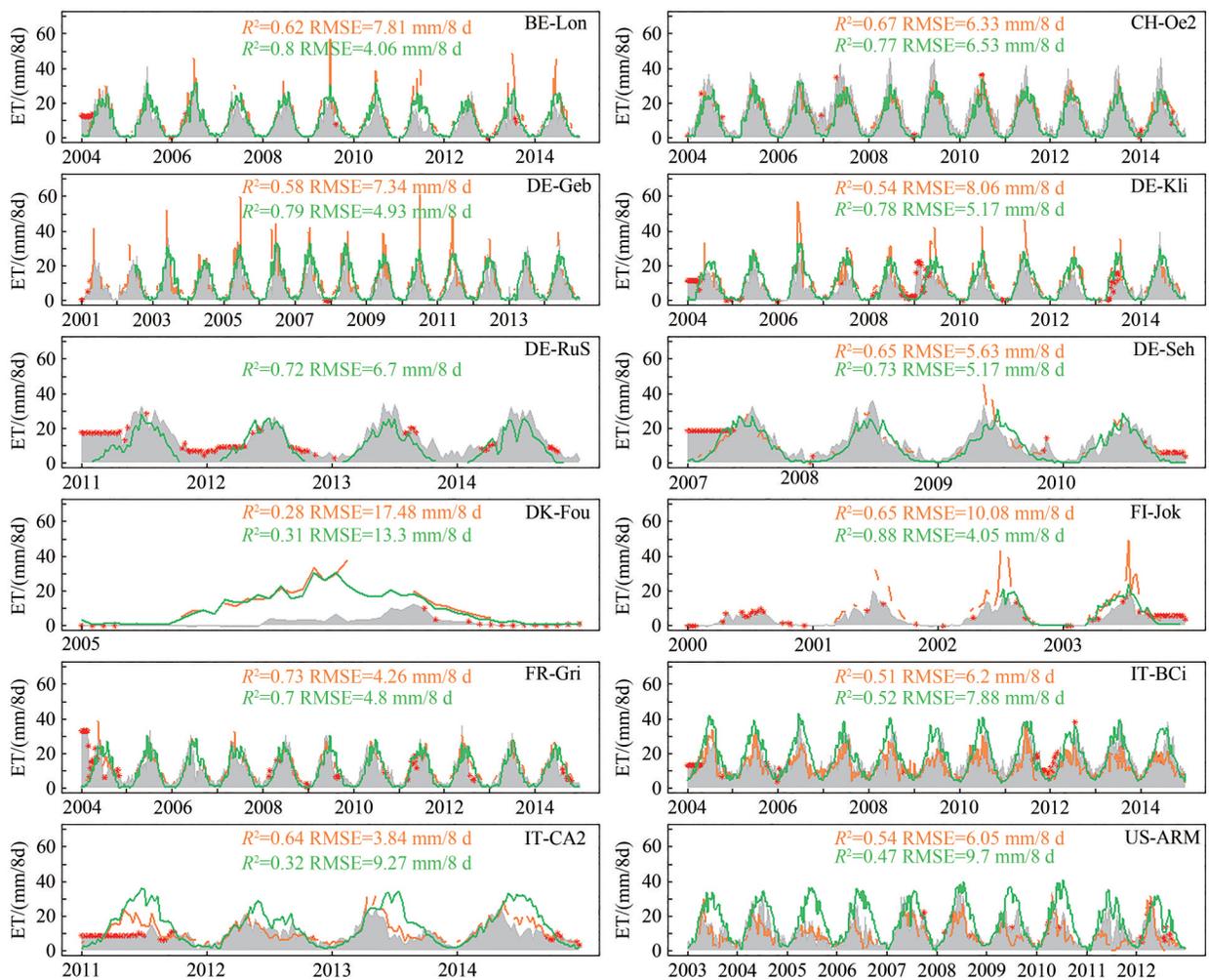
3.2 趋势分析检验

图7展示了20个FLUXNET农田站点上MOD16产品和PML-V2产品8天累积ET与EC观测8天累积ET的时序变化。在8天中EC观测ET其QC显示观测和高质量插补数据不足80%的在图中用红色*表示。该图7中 R^2 、RMSE与图2中 R^2 和图3中RMSE的差别在于, 该图7中对MOD16产品有效数据和PML-V2有效数据分别计算 R^2 和RMSE, 而图2和图3中只展示了MOD16产品和PML-V2产品数

据值均有效的8天, 其计算 R^2 和RMSE相应的8天的天数两种产品是一致的。整体而言, PML-V2产品时间连续性优于MOD16产品, 相比于考虑两种产品有效数据时间一致的情况(图2和图3), 大多数站点上PML-V2产品精度有所提升, 在15个站点上, PML-V2产品精度优于MOD16产品精度, 但是MOD16产品可以相对更好的捕捉到年中因为作物轮种而引起的ET下降和上升趋势, 而PML-V2产品普遍在年中达到当年最高峰值。对于BE-Lon、DE-

Geb和DE-Kli等3个站点，PML-V2产品与EC观测ET二者曲线的吻合度相对更好 (R^2 : 0.78—0.8)，而MOD16产品 (R^2 : 0.54—0.62) 几乎在每年的年中波峰处存在严重高估ET的现象；对于CE-Oe2站点，MOD16产品和PML-V2产品几乎在每年ET高值处存在低估ET的现象；在DK-Fou站点，MOD16和PML-V2两种产品时间变化特点相似（二者 R^2 为0.85，趋势均为先上升，在6月下旬至7月上旬达到波峰，而后下降），相比EC观测ET（二者与观测 R^2 分别为0.28和0.31，趋势先上升，在8月下旬至9月上旬达到波峰，而后下降）而言均高估ET ($\text{bias} > 10 \text{ W/m}^2$)；在US-Lin站点，两种产品均未捕捉到观测ET峰值，相比观测ET提前达到各自峰值，且PML-V2产品ET整体高于MOD16产品ET；US-Ne1、US-Ne2和US-Ne3等3个以玉米作物为主的站点，虽然相比于观测8天ET，PML-V2产品整体精度高于MOD16产品，但MOD16产品8天ET对于细节的捕捉能力略优于PML-V2产品，在上半年MOD16产品与

EC观测ET二者曲线的吻合度更好，而PML-V2产品明显高估EC观测8天ET。以US-Ne1站点为例，在3—6月，从与EC观测ET时序曲线的吻合度上来看，MOD16产品 (R^2 : 0.70, bias: -4.02 mm/8 d , RMSE: 49.02 mm/8 d) 略优于PML-V2产品 (R^2 : 0.64, bias: -4.53 mm/8 d , RMSE: 58.82 mm/8 d)；在IT-Bci、IT-CA2和US-ARM等3个站点，MOD16产品与EC观测8天ET变化趋势更为相似，PML-V2产品高估8天ET，而MOD16产品可以相对较好的捕捉到年中的下降或上升趋势，如在IT-CA2站点上，MOD16产品在年中更好地反映了ET先下降后上升的趋势；US-Tw2、US-Tw3和US-Twt等3个站点上，两种产品均低估8天ET表现不佳，但是MOD16产品仍能相对更好捕捉到年中ET的波动（下降或上升趋势），US-Twt站点上MOD16产品对最高峰值所处时间的刻画明显优于PML-V2产品，MOD16产品和观测值均在下半年达到年度最高峰值，而PML-V2产品则提前在上半年达到年度最高峰值。



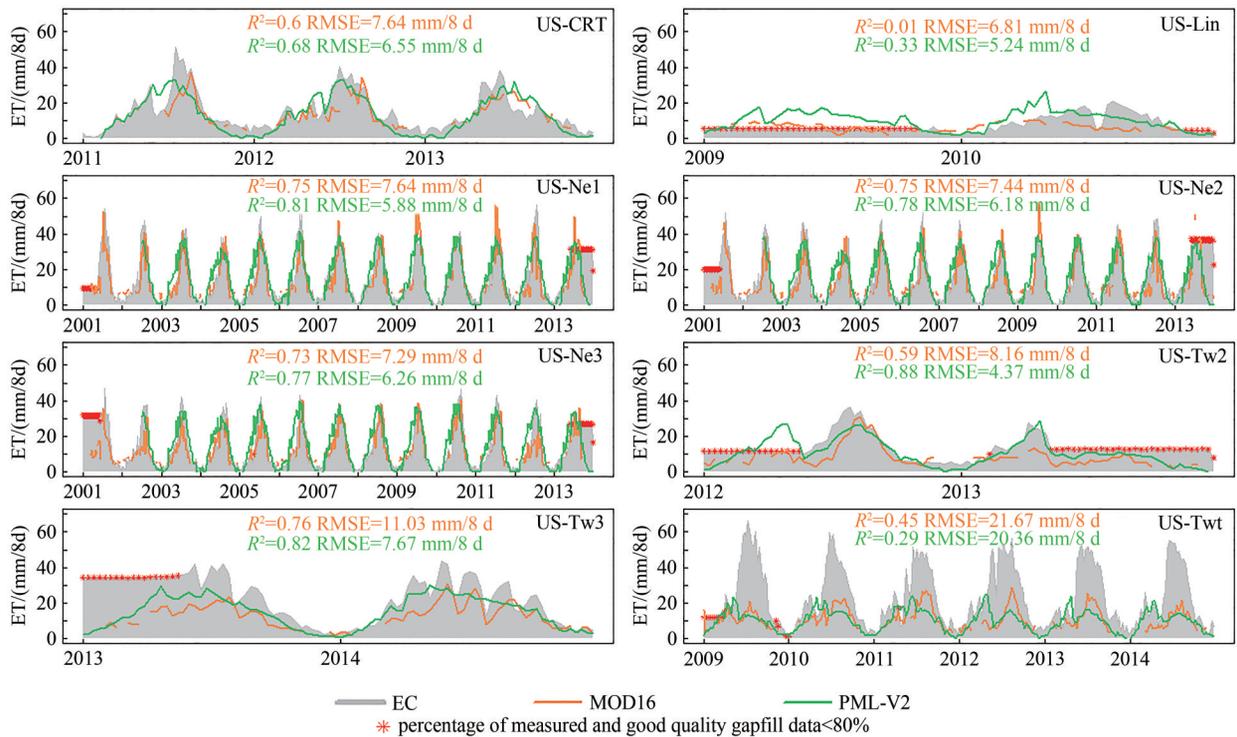


图7 20个FLUXNET农田站点MOD16产品、PML-V2产品和EC观测8天ET时序图

Fig. 7 Temporal evolution of the 8-day ET from MOD16, PML-V2 and observation at the 20 cropland sites in FLUXNET

图8展示了中国8个农田站点上MOD16产品和PML-V2产品8天累积ET与EC观测8天累积ET的时序变化。整体来看，PML-V2产品时间连续性优于MOD16产品，PML-V2产品8天ET与EC观测8天ET整体吻合性更好 (R^2 更高、RMSE更低)，而MOD16产品对部分站点时序细节的刻画优于PML-V2产品。例如MOD16产品可以捕捉到YC站点和LC站点每年度年中的低谷，刻画年中8天ET的先下降后上升趋势，而在年中EC观测8天ET处于低谷时PML-V2产品仍处于其年度峰值状态。

为了更具体展示两种产品对于时序曲线细节的刻画，本研究选取IT-CA2、US-ARM、US-NE1、US-Twt、LC和YC等6个站点，对MOD16产品和PML-V2产品8天累积ET与EC观测8天累积ET开展了时序变化分解，分析其季节变化趋势(图9)。本研究采用基于贝叶斯集成的BEAST时序分解算法(Zhao等, 2019)来对ET时序进行季节变化分解，相比于其他时序分解算法，该算法允许空缺值的存在，在MOD16产品时序不完整的情况下，不需要进行插值处理就能获得较为理想的结果。此处主要是为了对ET时序变化的波峰和波谷所处时刻进行探究，故只展示了分解后的季节

性波动信号变化。从图9中可以清晰看出，虽然MOD16产品连续性较差，但是仍能较好的反映出年中ET的下降和上升趋势。在IT-CA2和US-ARM两个站点上，MOD16产品与EC观测ET季节变化波动曲线贴合度更好(IT-CA2和US-ARM的 R^2 分别为0.83和0.76)，均在上半年(4—5月)达到波峰，而PML-V2产品(IT-CA2和US-ARM的 R^2 分别为0.43和0.69)则在年中(6—7月)达到波峰；在US-Ne1站点上，由于MOD16产品数据在年初和年末的缺失，使得其没有较好的捕捉到两年交替之际ET时序曲线的低谷，从与EC观测ET时序曲线的吻合度上来看，MOD16产品(R^2 : 0.92)整体略优于PML-V2产品(R^2 : 0.88)，在上半年3—6月，MOD16产品(R^2 : 0.91)优于PML-V2产品(R^2 : 0.82)，MOD16产品和EC观测ET约从5—6月开始急剧上升，上升曲线的坡度更陡(MOD16产品在2—6月、3—6月、4—6月、5—6月、6月的平均坡度分别为0.09、0.13、0.23、0.36、0.55，EC观测在2—6月、3—6月、4—6月、5—6月、6月的平均坡度分别为0.18、0.23、0.32、0.45、0.63)，而PML-V2产品ET约从3月开始稳步上升，上升曲线的坡度相对缓和(平均坡度一直维持在0.23—0.26范围内)；

在US-Twt站点上，MOD16产品能够捕捉到EC观测ET的两处小高峰，并且在下半年达到其最高峰，尽管PML-V2产品在2012年—2014年也能够捕捉到两个波峰，但是在上半年达到最高峰，与EC观测ET和MOD16产品相反；在LC和YC两个站点上，PML-V2产品在年中达到年度峰值，未捕捉到冬

小麦、夏玉米轮种而导致的年中ET先下降再上升的趋势，而MOD16产品成功捕捉到冬小麦和夏玉米生长期内的两个ET波峰，并在下半年达到最高峰（夏玉米生长季），与EC观测ET恰好相反，EC观测ET在上半年达到最高峰（冬小麦生长季），两个站点上MOD16产品均低估了冬小麦ET。

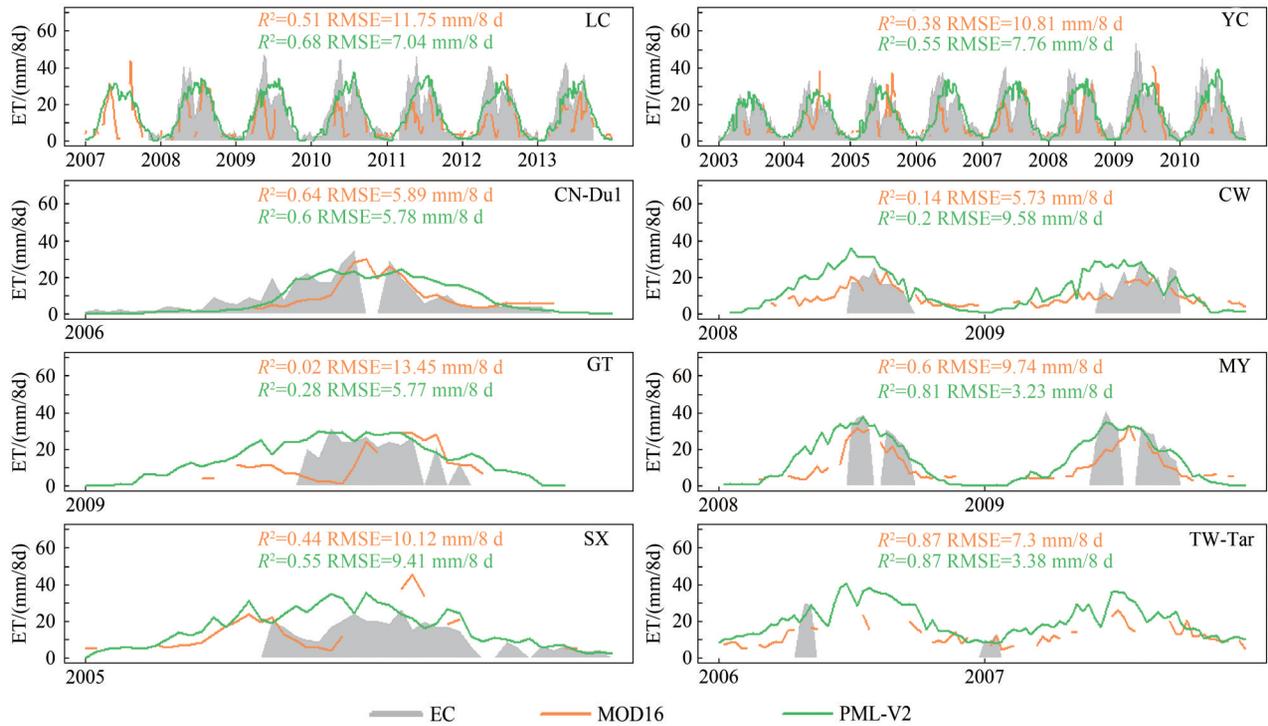
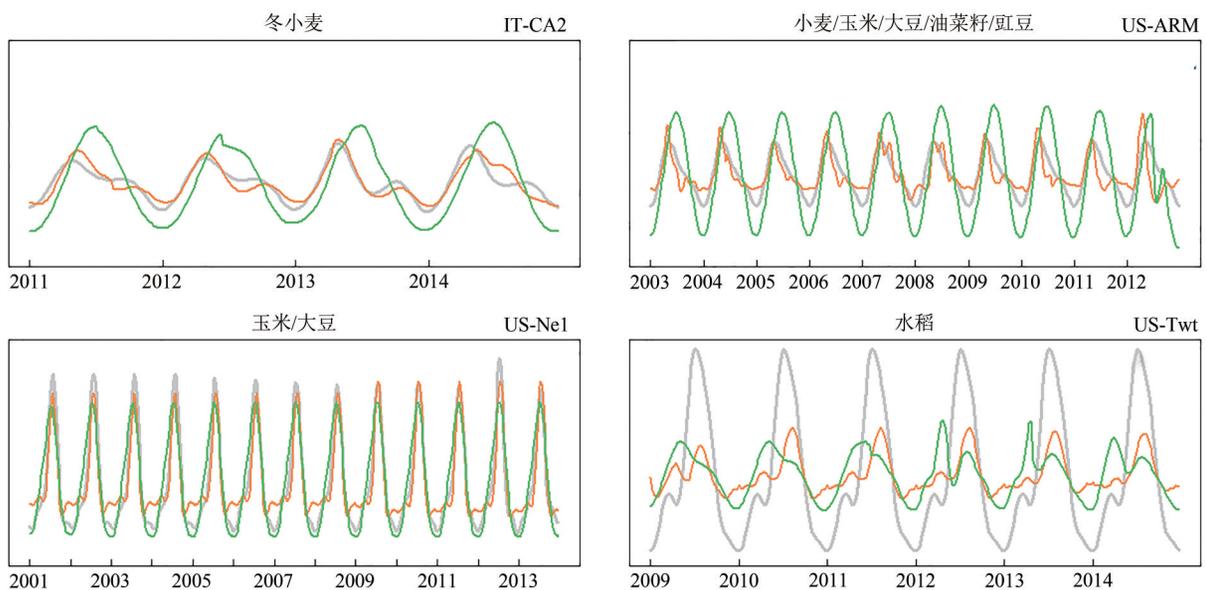


图8 中国8个农田站点MOD16产品、PML-V2产品和EC观测8天ET时序图

Fig. 8 Temporal evolution of the 8-day ET from MOD16, PML-V2 and observations at the 8 cropland sites in China



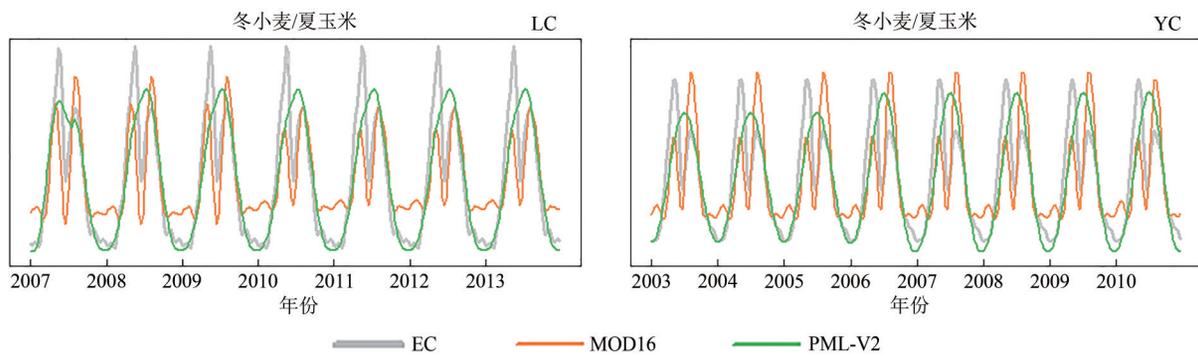


图9 选取的6个农田站点EC观测8天ET、MOD16产品和PML-V2产品8天ET时序分解季节波动信号

Fig. 9 The seasonal fluctuant signals decomposed from the 8-day time-series of MOD16 ET, PML-V2 ET and observed ET at the selected 6 cropland sites

4 结论

本文采用20个FLUXNET通量观测站点和8个中国的通量观测站点共计28个农田站点评估了当前国际上仅有的两种500 m分辨率的8天ET产品：MOD16产品和PML-V2产品。整体而言，28个农田站点的验证表明MOD16产品 (RMSE: 8.82 mm/8 d) 和PML-V2产品 (RMSE: 8.81 mm/8 d) 总体精度相当；MOD16产品低估8天ET (bias: -2.31 mm/8 d)，PML-V2产品略高估8天ET (bias: 0.51 mm/8 d)；PML-V2产品时间连续性优于MOD16产品，但是部分站点MOD16产品在时序变化细节（如到达峰值的季节、年中的下降上升趋势）的刻画上优于PML-V2产品。20个FLUXNET通量观测站点评估结果表明，两种产品精度相当，PML-V2产品 (RMSE: 4.42—22.4 mm/8 d, bias: -15.98—13.27 mm/8 d) 略低估8天ET，MOD16产品 (RMSE: 3.81—21.48 mm/8 d, bias: -16.42—15.05 mm/8 d) 略高估8天ET；PML-V2产品时间连续性较好，在不考虑两种产品验证点数一致的情况下，PML-V2产品精度 (RMSE: 4.06—20.36 mm/8 d) 有所提升。PML-V2算法利用FLUXNET站点观测通量对农田地类进行了单独参数率定，采用留一法在11个农田站点上进行了算法精度验证，结果表明对于农田地类该算法估算RMSE变化范围为0.54—2.38 mm/d， R^2 变化范围为0.42—0.86，MOD16产品RMSE变化范围为0.48—2.4 mm/d， R^2 变化范围为0.49—0.76 (Zhang等, 2019)。本研究与该研究中对农田地类的8天ET估算精度验证结果相当，均显示US-Twt站点上水稻ET的估算结果最差。本文采用的8个中国农田通量站点并未用于PML-V2算法参数率

定，但中国站点的验证结果表明两种产品均低估8天ET，PML-V2产品 (RMSE: 2.88—11.25 mm/8 d, bias: -1.72—8.04 mm/8 d) 仍具有相对可靠的精度，且精度优于MOD16产品 (RMSE: 5.73—13.45 mm/8 d, bias: -8.4—2.37 mm/8 d)，在不考虑两种产品验证点数一致的情况下，PML-V2产品精度 (R^2 : 0.28—0.87, RMSE: 3.23—9.58 mm/8 d) 有所提升，但MOD16产品对年中8天ET的下降和上升趋势刻画优于PML-V2产品。

本文的研究仍存在不足，虽然结合MODIS地表覆被产品和Google Earth卫星遥感影像对这些站点附近的地类和地表均一性进行了判断，但是仍显粗糙，未来建议结合高空间分辨率的植被指数、叶面积指数等植被生态参数来进行同时期更精细的地表均一性评价。由于地表的空异质性，地面观测和遥感估算的蒸散发之间存在着空间尺度不匹配的问题，如何从地面站点观测中获取遥感像元尺度地表蒸散发的相对真值，是目前蒸散发研究的热点和难点。对于站点像元空间异质性强的情况，需要考虑观测源区，且可能要进行空间尺度转换，但在实际操作中并不容易；站点所处500 m像元的空间代表性或均一性较好，可以直接进行验证。已有研究报道，馆陶农田站点观测空间范围大约在450—460 m (Liu等, 2011)，多伦多农田站点的观测空间范围大约在300—400 m，寿县农田站点的观测空间范围大约在200—400 m (王有恒, 2010)。出于对农田站点观测源区一般小于500 m的假设，本研究只选取了500 m空间分辨率的MOD16产品和PML-V2产品，未来应考虑结合其他时空分辨率产品进行交叉检验，如1 km空间分辨率的GLASS ET产品、BESS ET产品和

ETMonitor ET产品,并结合高时间分辨率的ET产品如GLEAM产品,进行更大尺度像元的时空趋势验证。另外,站点观测通量的30 min到日尺度、8天尺度、月尺度和年尺度的时间尺度转换方法亦是目前研究的难点。500 m尺度像元上的地表空间相对均一,可以考虑直接简单平均,而对于异质地表,可以考虑通量观测源区的时间和空间加权来获取8天地面观测ET,但是在实际操作时并非易事。这些难点需要在未来的研究中予以更好的考虑,探索更合理的空间尺度和时间尺度转化方法,以获取更可靠的蒸散发像元尺度验证结果。

志 谢 感谢FLUXNET全球通量观测研究网络、ChinaFLUX中国通量观测研究网络、中国生态系统研究网络、国家生态科学数据中心、国家青藏高原数据中心、台湾农业研究所等研究网络和机构提供宝贵的农田站点通量观测数据,感谢中国科学院地理科学与资源研究所于贵瑞研究员、北京师范大学刘绍民教授、中国科学院青藏高原研究所李新研究员等科研学者共享数据及在推动观测网络建设和数据共享上作出的贡献,同时感谢各个农田站点工作人员在数据观测整理过程中付出的辛勤劳动,在此表示衷心的感谢!

参考文献

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]

Ghilain N, Arboleda A and Gellens-Meulenberghs F. 2011. Evapotranspiration modelling at large scale using near-real time MSG SEVIRI derived data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3): 771-786 [DOI: 10.5194/hess-15-771-2011]

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]

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]

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(1): 74 [DOI: 10.1038/s41597-019-0076-8]

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]

Li J, Xin X Z, Peng Z Q and Li X J. 2021. Remote sensing products of terrestrial evapotranspiration: comparison and outlook. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(1): 103-120 (李佳, 辛晓洲, 彭志晴, 李小军. 2021. 地表蒸散发遥感产品比较与分析. *遥感技术与应用*, 36(1): 103-120) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0103]

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 Z L, Tang R L, Wan Z M, Bi Y Y, Zhou C H, Tang B H, Yan G J and Zhang X Y. 2009. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9(5): 3801-3853 [DOI: 10.3390/s90503801]

Liu M, Tang R L, Li Z L, Gao M F and Yao Y J. 2021. Progress of data-driven remotely sensed retrieval methods and products on land surface evapotranspiration. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1517-1537 (刘萌, 唐荣林, 李召良, 高懋芳, 姚云军. 2021. 数据驱动的蒸散发遥感反演方法及产品研究进展. *遥感学报*, 25(8): 1517-1537) [DOI: 10.11834/jrs.20211310]

Liu S M, Xu Z W, Song L S, Zhao Q Y, Ge Y, Xu T R, Ma Y F, Zhu Z L, Jia Z Z and Zhang F. 2016. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230-231: 97-113 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.04.008]

Liu 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]

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]

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]
- 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]
- Pastorello G, Trotta C, Canfora E, Chu H S, Christianson D, Cheah Y W, Poindexter C, Chen J Q, Elbashandy A, Humphrey M, Isaac P, Polidori D, Reichstein M, Ribeca A, Van Ingen C, Vuichard N, Zhang L M, Amiro B, Ammann C, Arain M A, Ardö J, Arkebauer T, Arndt S K, Arriga N, Aubinet M, Aurela M, Baldocchi D, Barr A, Beamesderfer E, Marchesini L B, Bergeron O, Beringer J, Bernhofer C, Berveiller D, Billesbach D, Black T A, Blanken P D, Bohrer G, Boike J, Bolstad P V, Bonal D, Bonnefond J M, Bowling D R, Bracho R, Brodeur J, Brümmer C, Buchmann N, Burban B, Burns S P, Buysse P, Cale P, Cavagna M, Cellier P, Chen S P, Chini I, Christensen T R, Cleverly J, Collalti A, Consalvo C, Cook B D, Cook D, Coursolle C, Cremonese E, Curtis P S, D'andrea E, Da Rocha H, Dai X Q, Davis K J, Cinti B D, Grandcourt A D, Ligne A D, De Oliveira R C, Delpierre N, Desai A R, Di Bella C M, Tommasi P D, Dolman H, Domingo F, Dong G, Dore S, Duce P, Dufrêne E, Dunn A, Dušek J, Eamus D, Eichelmann U, Elkhidir H A M, Eugster W, Ewenz C M, Ewers B, Famulari D, Fares S, Feigenwinter I, Feitz A, Fensholt R, Filippa G, Fischer M, Frank J, Galvagno M, Gharun M, Gianelle D, Gielen B, Gioli B, Gitelson A, Godec I, Goeckede M, Goldstein A H, Gough C M, Goulden M L, Graf A, Griebel A, Gruening C, Grünwald T, Hammerle A, Han S J, Han X G, Hansen B U, Hanson C, Hatakka J, He Y T, Hehn M, Heinesch B, Hinko-Najera N, Hörtnagl L, Hutley L, Ibrom A, Ikawa H, Jackowicz-Korczynski M, Januš D, Jans W, Jassal R, Jiang S C, Kato T, Khomik M, Klatt J, Knohl A, Knox S, Kobayashi H, Koerber G, Kolle O, Kosugi Y, Kotani A, Kowalski A, Kruijt B, Kurbatova J, Kutsch W L, Kwon H, Launiainen S, Laurila T, Law B, Leuning R, Li Y N, Liddell M, Limousin J M, Lion M, Liska A J, Lohila A, López-Ballesteros A, López-Blanco E, Loubet B, Loustau D, Lucas-Moffat A, Lüers J, Ma S Y, Macfarlane C, Magliulo V, Maier R, Mammarella I, Manca G, Marcolla B, Margolis H A, Marras S, Massman W, Mastepanov M, Matamala R, Matthes J H, Mazzenga F, McCaughey H, McHugh I, McMillan A M S, Merbold L, Meyer W, Meyers T, Miller S D, Minerbi S, Moderow U, Monson R K, Montagnani L, Moore C E, Moors E, Moreaux V, Moureaux C, Munger J W, Nakai T, Neirynek J, Nesic Z, Nicolini G, Noormets A, Northwood M, Nosetto M, Nouvellon Y, Novick K, Oechel W, Olesen J E, Ourcival J M, Papuga S A, Parmentier F J, Paul-Limoges E, Pavelka M, Peichl M, Pendall E, Phillips R P, Pilegaard K, Pirk N, Posse G, Powell T, Prasse H, Prober S M, Rambal S, Rannik Ü, Raz-Yaseef N, Rebmann C, Reed D, de Dios V R, Restrepo-Coupe N, Reverter B R, Roland M, Sabbatini S, Sachs T, Saleska S R, Sánchez-Cañete E P, Sanchez-Mejia Z M, Schmid H P, Schmidt M, Schneider K, Schrader F, Schroder I, Scott R L, Sedláč P, Serrano-Ortiz P, Shao C L, Shi P L, Shironya I, Siebicke L, Šigut L, Silberstein R, Sirca C, Spano D, Steinbrecher R, Stevens R W, Sturtevant C, Suyker A, Tagesson T, Takanashi S, Tang Y H, Tapper N, Thom J, Tomassucci M, Tuovinen J P, Urbanski S, Valentini R, van der Molen M, van Gorsel E, van Huissteden K, Varlagin A, Verfaillie J, Vesala T, Vincke C, Vitale D, Vygodskaya N, Walker J P, Walter-Shea E, Wang H M, Weber R, Westermann S, Wille C, Wofsy S, Wohlfahrt G, Wolf S, Woodgate W, Li Y L, Zampedri R, Zhang J H, Zhou G Y, Zona D, Agarwal D, Biraud S, Torn M and Papale D. 2020. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific Data*, 7: 225 [DOI: 10.1038/s41597-020-0534-3]
- Running S, Mu Q and Zhao M. 2021. MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V061 [Data set] NASA EOS-Land Processes DAAC [DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.061]
- 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]
- Tang R L and Li Z L. 2017. An end-member-based two-source approach for estimating land surface evapotranspiration from remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10): 5818-5832 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2715361]
- Tang R L, Shao K, Li Z L, Wu H, Tang B H, Zhou G Q and Zhang L. 2015. Multiscale validation of the 8-day MOD16 evapotranspiration product using flux data collected in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4): 1478-1486 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2420105]
- 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 Y H. 2010. Flux observations analysis at Shouxian National Climate Observatory. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (王有恒. 2010. 寿县国家气候观测台通量观测分析. 南京: 南京信息工程大学)
- Xiong Y J, Feng F G, Fang Y Z, Qiu G Y, Zhao S H and Yao Y J. 2021. Critical problems when applying remotely sensed evapotranspiration products. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(1): 121-131 (熊育久, 冯房观, 方奕舟, 邱国玉, 赵少华, 姚云军. 2021. 蒸散发遥感反演产品应用关键问题浅议. 遥感技术与应用, 36(1): 121-131) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0121]
- Xu T R, Guo Z X, Liu S M, He X L, Meng Y F Y, Xu Z W, Xia Y L, Xiao J F, Zhang Y, Ma Y F and Song L S. 2018. Evaluating different machine learning methods for upscaling evapotranspiration from flux towers to the regional scale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(16): 8674-8690 [DOI: 10.1029/2018JD028447]
- Yao Y J, Cheng J, Zhao S H, Jia K, Xie X H and Sun L. 2012. Estimation of farmland evapotranspiration: a review of methods using thermal infrared remote sensing data. *Advances in Earth Sciences*, 27(12): 1308-1318 (姚云军, 程洁, 赵少华, 贾坤, 谢先红, 孙亮. 2012. 基于热红外遥感的农田蒸散发估算方法研究综述. 地球科

- 学进展, 27(12): 1308-1318 [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2012.12.1308]
- 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]
- 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 (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) [DOI: 10.11834/jrs.20209099]
- 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]
- Zhang Y Q, Kong D D, Zhang X Z, Tian J and Li C C. 2021. Impacts of vegetation changes on global evapotranspiration in the period 2003-2017. *Acta Geographica Sinica*, 76(3): 584-594 (张永强, 孔冬冬, 张选泽, 田静, 李聪聪. 2021. 2003—2017年植被变化对全球陆面蒸散发的影响. *地理学报*, 76(3): 584-594) [DOI: 10.11821/dlxb202103007]
- Zhao K G, Wulder M A, Hu T X, Bright R, Wu Q S, Qin H M, Li Y, Toman E, Mallick B, Zhang X S and Brown M. 2019. Detecting change-point, trend, and seasonality in satellite time series data to track abrupt changes and nonlinear dynamics: a Bayesian ensemble algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111181 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.034]

Validation of crop evapotranspiration products based on eddy-covariance flux observations

LIU Meng¹, PENG Zhong^{2,3}, HUANG Lingxiao^{2,3}, LI Zhaoliang¹, DUAN Sibao¹, TANG Ronglin^{2,3}

1. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Crop evapotranspiration (ET) with high precision is of great significance for the accurate quantification of water balance and the study of water deficit in the field-scale, and it has practical value for the precision irrigation of farmland and the improvement of agricultural water use efficiency. It is essential to validate ET before a remotely sensed ET product being used. This study evaluated crop ETs from two remotely sensed products (MOD16 and PML-V2) with 500 m spatial resolution and 8-day temporal resolution by using Eddy-Covariance (EC) flux observations from 28 flux tower sites cover with crop globally. The results showed that, compared with the observed ET, the Root Mean Square Error (RMSE) and bias of the PML-V2 ET products varied from 3.3 to 22.4 mm/8 d and from 15.98 to 13.27 mm/8 d, respectively, while the RMSE and bias of the MOD16 ET product varied from 3.81 to 21.47 mm/8 d and from -16.42 to 15.05 mm/8 d, respectively. On the whole, the overall accuracies of these two products were similar, the MOD16 product underestimated the 8-day ET with a bias of -2.31 mm/8 d, a R^2 of 0.452 and a RMSE of 8.82 mm/8 d, while the PML-V2 product slightly overestimated the 8-day ET with a bias of 0.51 mm/8 d, a R^2 of 0.455 and a RMSE of 8.81 mm/8 d. The PML-V2 product performed better at 18 tower sites (almost 64%), but the MOD16 product performed better than the PML-V2 products at some sites in the depiction of details on time-series change (such as the season of reaching the peak during the year, the decreasing and increasing trend in the middle of year). The results showed that the PML-V2 product failed to capture the gradual decrease then increase ET trend in the middle of year which caused by the rotation of winter wheat and summer maize, while the MOD16 product successfully captured the hitting of the two peaks in ET time-series during the two growth seasons of winter wheat and summer maize (such as the Luancheng and Yucheng sites). However, the MOD16 product still underestimated the 8-day ET of winter wheat to a certain degree. Moreover, the results showed that both the MOD16 product and the PML-V2 product seriously underestimated the 8-day ET of paddy with a RMSE of 21.47—22.4 mm/8 d and a bias of -16.42—15.98 mm/8 d (such as the US-Twt site). This study could provide reference for the development and validation of ET models for cropland. In the future, more detailed evaluation of land surface heterogeneity needs to be carried out and more products should be taken into consideration. Further detailed evaluation of ET in different crop types is also required.

Key words: remote sensing, MOD16 product, PML-V2 product, crop evapotranspiration, validation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42001310, 42271378, 42071332); National Science and Technology Major Projects for High Resolution Earth Observation Systems (No. 09-Y30F01-9001-20/22); Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution (No.1610132020007, Y2021XK26)