

doi: 10.6046/zrzyyg.2022492

引用格式: 范佳慧,姚云军,杨军明,等.基于 Ameriflux 通量观测数据的 Hi-GLASS 潜热通量产品验证[J].自然资源遥感, 2024,36(1):146-153.(Fan J H, Yao Y J, Yang J M, et al. Validation of Hi-GLASS products for latent heat flux based on Ameriflux observation data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(1):146-153.)

基于 Ameriflux 通量观测数据的 Hi-GLASS 潜热通量产品验证

范佳慧¹, 姚云军¹, 杨军明¹, 于瑞阳¹, 刘露¹, 张学艺^{1,2}, 谢紫菁¹, 宁静¹

(1.北京师范大学遥感科学国家重点实验室,地理学与遥感科学学院,北京 100875; 2.中国

气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室,银川 750002)

摘要: 潜热通量产品的验证与分析对于研究气候变化及能量循环具有重要意义。全球陆表高分辨率蒸散产品 (high resolution global land surface evapotranspiration product, Hi-GLASS ET) 融合了 5 种传统蒸散算法,能够生产出较高精度的陆表潜热通量产品,但目前没有针对此产品的验证研究。利用 Ameriflux 通量观测站点的潜热通量观测值与相应的 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品估算值进行对比,获取多组有效验证数据。验证结果显示,所选站点实际观测值与产品估算值的决定系数 (R^2) 为 0.6,均方根误差 (RMSE) 为 34.4 W/m²,平均偏差 (Bias) 为 -13.4 W/m²,克林-古普塔效率 (Kling-Gupta efficiency, KGE) 为 0.49, Hi-GLASS 潜热通量产品具有较高的精度,算法的拟合结果较好;此外,空间分布也表明 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品符合正常的自然规律。由于数据获取的局限性,仅采用了美国地区 18 个站点数据对产品进行验证,在其他地区仍需进一步验证。

关键词: 陆表潜热通量; Ameriflux 通量站点; Hi-GLASS 陆表潜热通量产品; 精度验证

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)01-0146-08

0 引言

陆表潜热通量是指陆表土壤蒸发、植被截留蒸发以及植被蒸腾过程中由于水汽相变(水从液态到气态)向大气传输的热量通量^[1-5],单位是 W/m²。作为水圈、大气圈和生物圈中水量与能量收支之间重要的组成部分,陆表潜热通量是反映碳循环、水循环以及能量循环系统等过程的最佳指标,同时也是农业、水文预报以及气候模拟过程中的关键参数。为了合理地进行水资源管理、分析作物需水、监测植被碳源碳汇收支以及监测和评价生态环境,有必要开展高精度的陆表潜热通量估算研究。

相对于点的潜热通量估算,遥感有着较突出的区域性优势,主要表现有以下 2 点:一是高度融合了地表空间异质性^[6-10];二是可以生产高空间分辨率的产品。尽管目前遥感的估算精度有待提升,但通过遥感估算陆表潜热通量已经逐渐成为主流的方法^[11]。早在 20 世纪 60 年代,科研人员已经格外关注潜热通量过程机理,并且对如何估算陆表潜热通量投入许多精力。但由于陆表潜热通量是陆地表面能量循环、水循环和碳循环中最难预测的分量,且光学遥感的地表信息容易遭受如植被覆盖率、大气水汽含量、气候条件等多方面因素的严重影响^[12]陆表潜热通量的估算始终是科学家们一直关心的课题。

过去数十年内,众多学者经过调查研究,已经生产出各种中等空间分辨率的陆表蒸散产品,例如中等分辨率成像光谱仪 (MODIS) 产品 (MOD16)^[10-11]或 EUMETSAT 陆地表面分析卫星应用设施 (LSA-SAF) 产品 (LSA-SAF MSG)^[13]。但在以往的研究中,多名学者通过验证表明这 2 个产品在 fluxnet 通量站点方面存在许多不确定因素^[14-15]。另外,其他产品,如欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) ERA-40 再分析产品,虽然具有高时间分辨率,但是空间分辨率却十分粗糙^[16]。因此研究学者将地面数据或者气象数据(再分析等材料)与遥感数据共同结合进

收稿日期: 2022-12-26; 修订日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“地表异常遥感探测与即时诊断方法”(编号: 42192580)第一课题“地表异常遥感响应特征与语义表征”(编号: 42192581)和国家自然科学基金面上项目“基于多星多尺度遥感的地表潜热通量智能化融合算法研究”(编号: 42171310)共同资助。

第一作者: 范佳慧 (2000-),女,硕士研究生,主要从事遥感蒸散估算研究。Email: fanjiahui1012@163.com。

通信作者: 姚云军 (1980-),男,博士,教授,主要从事遥感蒸散发算法研究。Email: boyunjun@163.com。

而对陆表潜热通量进行估算^[17-22],生产出了如 OaFlux 海气通量产品、GSSTF3 海气界面潜热通量产品、全球陆表高分辨率蒸散产品 (high resolution global land surface evapotranspiration product, Hi-GLASS ET) 等一系列产品^[23]。

Hi-GLASS ET 产品相对于其他产品融合了多种算法,有更高的时空分辨率和较低的不确定性,能够提供可靠的蒸散空间分布。因此,开展 Hi-GLASS ET 产品的验证研究,证明产品的精度和有效性,对研究辐射能量的分配机制机理、实现中长期气候预报与评估以及探索全球能量循环、区域水循环和水资源管理等工作具有重要的现实意义,但自从 2017 年, Yao 等^[23]生产出 Hi-GLASS ET 产品以来,目前还没有针对此产品的精度评价,因此用户在使用 Hi-GLASS ET 产品时缺少参考依据。

本文选取 Ameriflux 观测网络中 18 个数据质量较高的站点的陆表实测潜热通量数据,与 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品估算值对比,计算观测值与估算值之间的均方根误差 (*RMSE*)、偏差 (*Bias*)、决定系数 (*R*²)、克林-古普塔效率 (*Kling-Gupta efficiency*, *KGE*),对 2013—2014 年间的 Hi-GLASS 潜热通量产品进行精度评价研究,验证产品在美国地区的精度差异,从而为用户更好地使用该产品提供参考。

1 研究区与数据源

本文研究区为美国地区,位于 E70°~130°,N25°~49°之间。利用该区域部分站点的地表潜热通量数据对 Hi-GLASS ET 产品进行精度评价。本研究主要使用 2 部分数据,一部分是 Hi-GLASS 潜热通量产品,即经过融合算法计算得到的陆表潜热通量的估算值,另一部分是美国区域的通量观测站点实际观测值。

1.1 Hi-GLASS 潜热通量产品

Hi-GLASS ET 的算法使用泰勒能力权重值的方法融合了基于遥感的彭曼-蒙特斯算法 (remote sensing-based Penman-Monteith, RS-PM)、SW (shuttleworth-wallace) 算法、Priestly-Taylor 喷射推进实验室算法 (Priestly-Taylor jet propulsion laboratory, PT-JPL)、改进的基于卫星的 Priestly-Taylor 算法 (modified satellite-based Priestly-Taylor, MS-PT) 和简单混合算法 (simple hybrid, SIM) 5 种传统的具有明确物理机制的地表蒸散算法,综合得到高空间分辨率的全球 Landsat 陆表蒸散产品。相较于 5 种传统的地表蒸散算法生产的蒸散产品,Hi-GLASS ET 在拥

有高空间分辨率的同时,也降低了蒸散产品的不确定性,产品性能也得到了提升^[23]。

Hi-GLASS 算法的程序设计流程如图 1 所示,整个程序包括单个算法模块和产品融合模块 2 部分^[23]。程序在初始化后读入再分析资料和 Landsat 等遥感数据,其中输入的遥感数据空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 15 d。之后运行各个算法模块得到单一算法的 ET,并设置相应的质量控制条件 (quality control, QC),然后将 ET/QC 数据写入文件。在此基础上,程序初始化后读入单一算法的 ET 产品和融合生成的权重值,运行产品融合模块得到最终的 ET 产品,然后将 ET/QC 数据写入文件。运行过程中保留有云和有雪的数据,进行严格的质量控制。

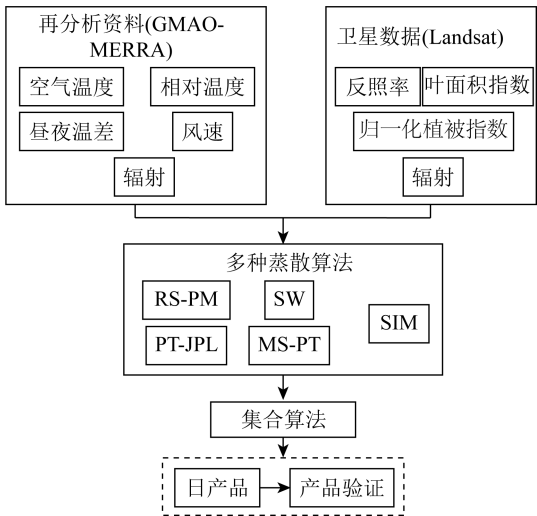


图 1 Hi-GLASS ET 产品生产流程^[23]

Fig.1 Flow chart of Hi-GLASS ET product production

Hi-GLASS ET 的输出产品数据类型均为 8 位的无符号整型,空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 15 d。在确定通量站点之后,整理出所选的 18 个站点的经纬度并进行转化,确定通量站点所在行列号后,联系数据管理人员,获取 Hi-GLASS 数据并进行后续处理。

1.2 Ameriflux 通量站点数据

陆表潜热通量的实际站点观测数据由 Ameriflux 网络提供, Ameriflux 是全球通量观测网站中的一个,用于实际观测美洲地区的生态系统 CO₂、水和能量通量等数据,地表覆盖类型包括苔原、草原、稀树草原、作物以及针叶林、落叶林和热带森林等。该网站总共包含 572 个通量站点,分布于整个美国地区,并且包含 16 种地表覆盖类型,保证观测数据更加客观、全面。AmeriFlux 目前是美国能源部生物与环境研究办公室在气候和生态研究领域最知名和最受推崇的品牌之一,许多学者利用 Ameriflux 通量站

点数据开展研究。2019 年,Zhou 等^[24]利用 Ameri-flux 站点评估中等分辨率影像光谱辐射计 Albedo 产品(Med43)的空间代表性;2020 年,Zhang 等^[25]利用此网站的通量站点数据对 Sentinel-3A OLCI 土地产品成本进行总体初级生产力估算;这也反映出 Ameriflux 网站的通量站点数据具有较高的可靠性。

根据研究需要及数据质量检查,最终筛选出 18 个站点,涵盖了 6 种植被覆盖类型,分别是农田(croplands,CRO)、常绿针叶林(evergreen needleleaf forests,ENF)、落叶阔叶林(deciduous broadleaf forests,DBF)、木本草原(woody savannas,WSA)、草原(grassland, GRA)、开阔的树丛(open shrublands, OSH)。通量站点的观测数据主要包含湍流热通量、潜热通量、生态系统净交换、下行短波辐射和昼夜温差等多个参量数据,具有不同的时间分辨率,使得数据使用更加多样化。本研究主要验证 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品的精度,因此只选取站点中潜热通量数据作为研究对象。

根据最终选取的 18 个站点的坐标,确定站点在美国地区的空间分布,站点分布情况如表 1 所示。本研究所选取的站点分布情况较为均匀,因此本研究的数据不具备特殊性,研究结果也更加客观。

表 1 通量站点空间分布信息

Tab.1 Spatial distribution information of flux sites

站点名称	纬度/(°)	经度/(°)	植被覆盖类型
US-CRT	41.628 5	-83.347 1	CRO
US-Tw2	38.096 9	-121.636 5	CRO
US-Tw3	38.115 2	-121.646 9	CRO
US-Twt	38.108 7	-121.6531	CRO
US-GLE	41.366 5	-106.239 9	ENF
US-Me2	44.452 6	-121.558 9	ENF
US-NR1	40.032 9	-105.546 4	ENF
US-Prr	65.123 7	-147.487 6	ENF
US-MMS	39.323 2	-86.413 1	DBF
US-WCr	45.805 9	-90.079 9	DBF
US-Oho	41.554 5	-83.843 8	DBF
US-SRG	31.789 4	-110.827 7	GRA
US-Var	38.413 3	-120.950 8	GRA
US-Wkg	31.736 5	-109.941 9	GRA
US-SRC	31.908 3	-110.839 5	OSH
US-Whs	31.743 8	-110.052 2	OSH
US-SRM	31.821 4	-110.866 1	WSA
US-Ton	38.430 9	-120.966 0	WSA

2 验证方法

为了更加全面、准确地评价 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品的精度及可靠性,本研究总共选取了 4 个评价指标,分别为 $RMSE$ 、 $Bias$ 、 KGE 和 R^2 。

其中, $RMSE$ 在本文中表示 Hi-GLASS 估算值与

实际蒸散观测值偏差的平方和观测次数 n 比值的平方根,用来反映数据的离散程度, $RMSE$ 越小说明 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品越准确。计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad , \quad (1)$$

式中: $i=1,2,3,\cdots,n$; n 为样本的数量; O_i 为地表蒸散实际观测值; P_i 为 Hi-GLASS 算法计算得到的估算值。

$Bias$ 一般情况下用来表示实际观测值与估算值之间的平均差异,其值越接近 0,表示观测值与估算值的差异程度越小,其表达式为:

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad . \quad (2)$$

KGE 由 Gupta 等^[26]提出,能够更好地反映相关性、偏差和多样性测量三者之间的相对重要性,用来评价模型的准确程度, KGE 的数值范围为 $(-\infty, 1)$, KGE 越接近 1,说明模型准确度越高, KGE 的计算方法为:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 - (\alpha - 1)^2 - (\beta - 1)^2} \quad , \quad (3)$$

$$r = \frac{cov(P, O)}{\sigma(P) \cdot \sigma(O)} \quad , \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\sigma(O)}{\sigma(P)} \quad , \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\mu(O)}{\mu(P)} \quad , \quad (6)$$

式中: cov 为协方差; σ 为标准差; μ 为算术平均值。

R^2 在本研究中用来表示 Hi-GLASS 算法的拟合程度, R^2 的取值范围为 $[0, 1]$, 值越接近于 1,说明产品精度越高, R^2 的表达式为:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad , \quad (7)$$

式中: $\bar{O}$ 为地表蒸散实际观测值的均值; $\bar{P}$ 为 Hi-GLASS 算法估算值的均值。

分别计算各个站点的 4 个评价指标,根据结果对产品的拟合程度以及精度进行综合评价。

3 结果与讨论

3.1 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品站点验证

为了验证 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品精度, 将其与通量站点实际观测值进行相关分析,各站点

的估算值与观测值的关系如图 2 所示。除 US-CRT (CRO),US-Twt(CRO),US-NR1(ENF)和 US-Oho (DBF)站点外,其余站点的 $RMSE$ 均小于 50 W/m^2 , 且大部分站点的 $RMSE$ 在 $10\sim30\text{ W/m}^2$ 之间。由

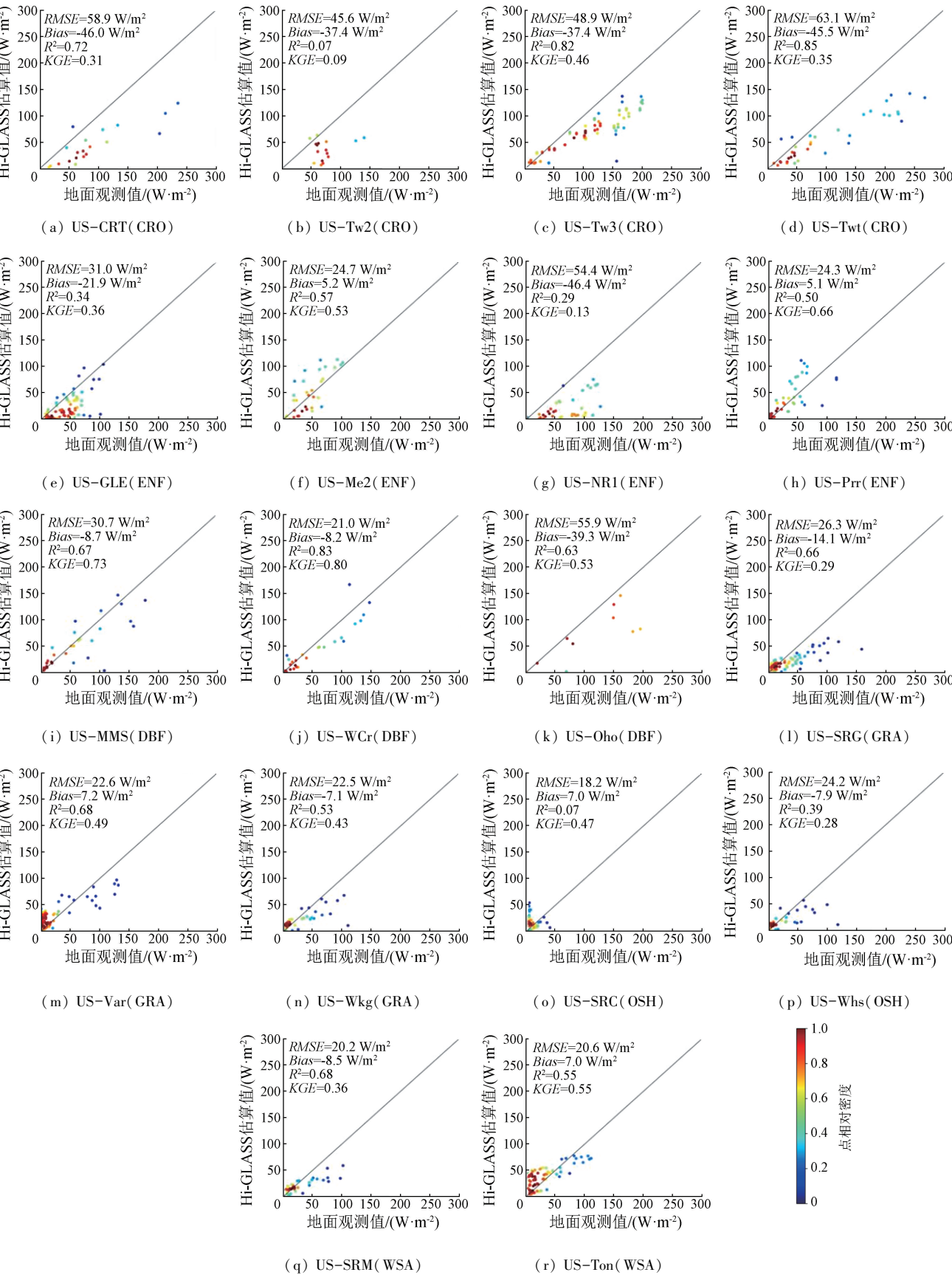


图 2 各站点精度验证散点图

Fig.2 Accuracy verification scatter plot of each site

R^2 定义可知, R^2 越接近 1 说明拟合程度越高, 除 US-Tw2(CRO), US-GLE(ENF), US-NR1(ENF), US-SRC(OSH) 和 US-Whs(OSH) 站点外, 其余观测站点的相关系数平方均超过 0.5, R^2 最高的站点 US-Twt(CRO) 可达到 0.85. $Bias$ 越接近 0, 说明 Hi-GLASS 估算值和地面观测值之间的偏离程度越小, 18 个站点中, 除少数站点 $Bias$ 绝对值大于 40 W/m^2 , 大部分站点 $Bias$ 的绝对值小于 15 W/m^2 . KGE 值反映模型的准确性, 其值越接近 1, 说明模型越准确, 大部分站点 KGE 值大于 0.35, 其中 US-WCr(DBF) 站点 KGE 值高达 0.80. 排除站点观测时天气和云层等观测因素以及数据处理过程中的累积误差, 可以认为 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品精度较高. 由于单个站点的数据量单薄, 本研究结合 18 个通量站点的所有数据, 对研究数据整体进行精度分析.

总体数据的精度如图 3 所示, 较单个站点效果更明显, 18 个站点的总体 $RMSE$ 为 34.3 W/m^2 , $Bias$ 为 -13.4 W/m^2 , R^2 为 0.6, KGE 为 0.49. 从整体的 $RMSE$ 与 $Bias$ 来看可以认定 Hi-GLASS 估算值与站点实际地面观测值的离散程度较小, 通过 R^2 与 KGE 这 2 个评价指标可以看出, Hi-GLASS 陆表潜热通量产品具有较高的精度.

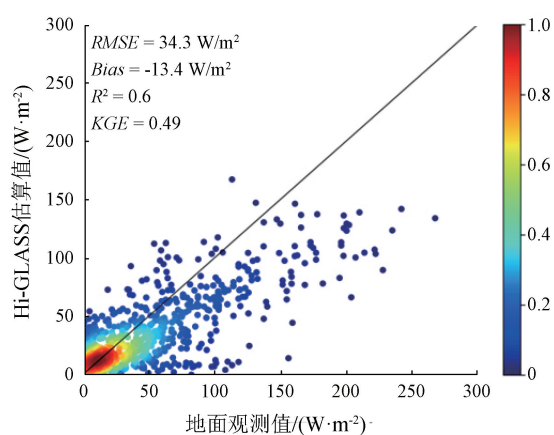


图 3 总体精度验证散点图

Fig.3 Overall accuracy validation scatter plot

为了多方面、多角度评价 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品的质量, 本研究在 18 个通量站点中, 根据 6 种地表覆盖类型, 整理出 6 个具有代表性的站点在 2014 年间完整的年度数据进行估算值与观测值的对比分析. 由图 4 对比发现, 虽然 Hi-GLASS 估算值与地表观测值无法做到完全吻合, 但是数据在完整的四季变化中具有大体一致的变化趋势, 并且部分站点在个别月份的数据接近一致, 由此可以认为, Hi-GLASS 产品的精度较高.

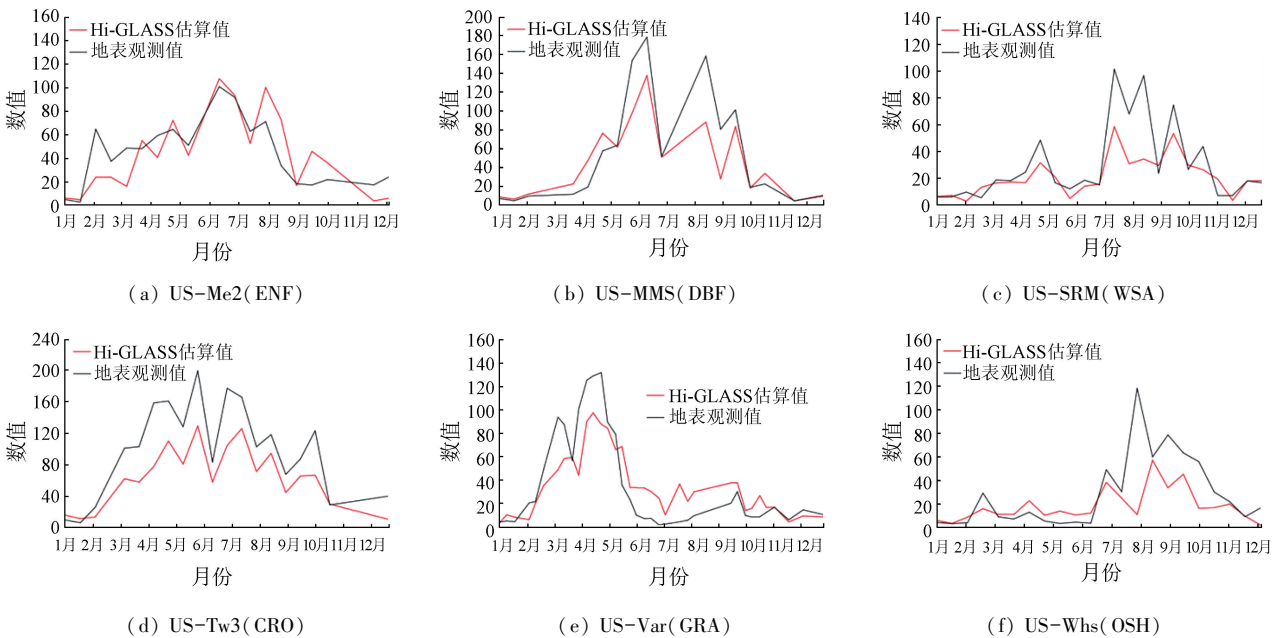


图 4 2014 年 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品对比

Fig.4 Comparison of Hi-GLASS land surface latent heat flux products in 2014

3.2 地表蒸散空间制图

选取 2014 年美国地区的 Hi-GLASS 潜热通量产品进行空间制图与分析, 并按照季节进行展示. 从图 5 中可以看出, 美国西部地区的潜热通量整体较低, 大致在 $0\sim 50\text{ W/m}^2$ 范围内, 在东南部地区的

潜热通量整体较高, 均大于 50 W/m^2 , 这种情况是由美国东西部地区的地表覆盖类型存在差异引起的, 西部大多为高大的山地和高原, 而东部则是低缓的高地和平原等, 因此东西两部的潜热通量存在较大的区别. 除此之外, 潜热通量分布的季节性也很明

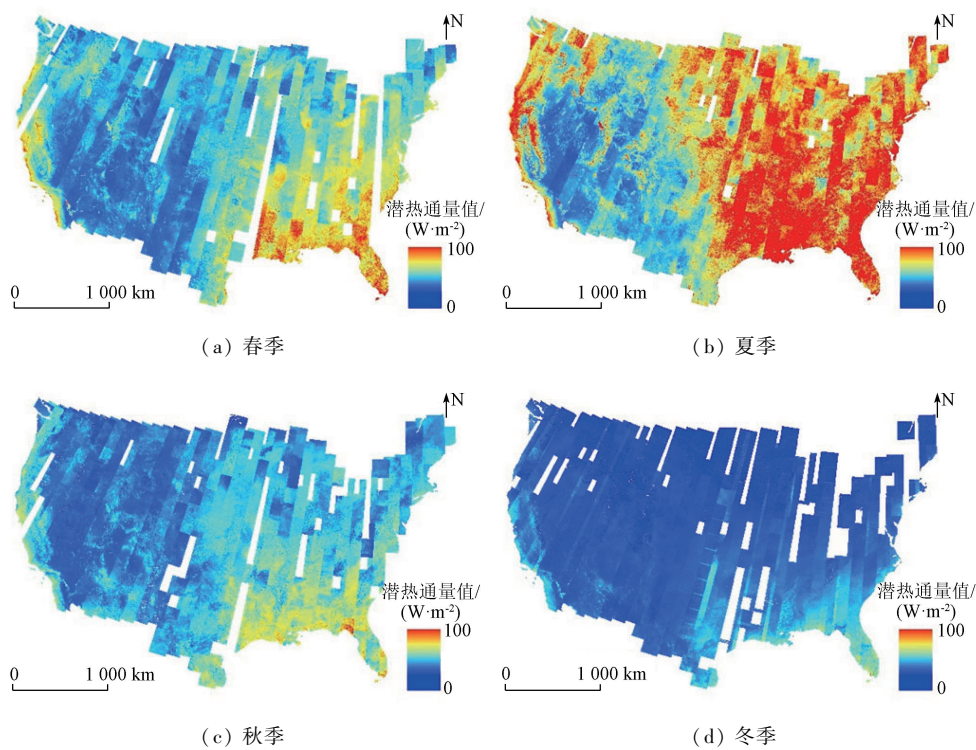


图 5 2014 年 Hi-GLASS 潜热通量产品美国地区空间分布

Fig.5 Spatial distribution map of Hi-GLASS latent heat flux products in the United States in 2014

显,在春季和夏季地表潜热通量普遍高于秋季和冬季,这也证明了 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品符合正常的自然规律。

4 结论

本文简要介绍了 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品,利用 Ameriflux 通量观测站点的潜热通量观测值与相应的 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品估算值对比,对 2013—2014 年间的 Hi-GLASS 潜热通量产品进行精度评价,研究结论如下:

- 1) Hi-GLASS 陆表潜热通量产品误差较小且与实测数据的一致性较高。总体指标计算结果为 $RMSE = 34.3 \text{ W/m}^2$, $Bias = -13.4 \text{ W/m}^2$, $R^2 = 0.6$, $KGE = 0.49$,说明 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品数据具有较高的准确性和可靠性。
- 2) Hi-GLASS 陆表潜热通量产品的在夏季高、冬季低,证明模型符合自然的自然规律。并且 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品在美国地区的分布情况也符合美国的地表覆盖条件。
- 3) Hi-GLASS 陆表潜热通量产品具有良好的拟合效果。从不同地表覆盖站点的潜热通量对比来看,Hi-GLASS 陆表潜热通量产品在完整时间序列上的趋势与实际潜热通量观测值能够达到较高度的一致,更能说明 Hi-GLASS 算法具有足够可靠的

拟合效果。
然而,由于数据获取的局限性,本文只采用了美国区域的 18 个站点通量数据进行 Hi-GLASS 陆表潜热通量产品的验证与比较,在其他区域的验证仍需进一步的研究。

志谢: 本文 Hi-GLASS 陆表潜热通量数据的下
载得到了武汉大学遥感信息学院何涛教授的大力支持,在此表示感谢!

参考文献 (References):

[1] Monteith J L.Evaporation and environment[J].Symposia of the Society for Experimental Biology,1965,19:205-234.
[2] Ppriestley C H B,Taylor R J.On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J].Monthly Weather Review,1972,100(2):81-92.
[3] Kalma J D,McVicar T R,McCabe M F.Estimating land surface e-
vaporation;A review of methods using remotely sensed surface tem-
perature data[J].Surveys in Geophysics,2008,29(4):421-469.
[4] Liang S.Review on estimation of land surface radiation and energy
budgets from ground measurement,remote sensing and model simu-
lations[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Ob-
servations and Remote Sensing,2010,3(3):225-240.
[5] Wang K C,Dickinson R E.A review of global terrestrial evapotrans-
piration:Observation,modeling,climatology,and climatic variabili-
ty[J].Reviews of Geophysics,2012,50(2):1-54
[6] 李小文,王锦地,胡宝新,等.先验知识在遥感反演中的作用
[J].中国科学(地球科学),1998,28(1):67-72.

Li X W, Wang J D, Hu B X, et al. The role of prior knowledge in remote sensing inversion [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 1998, 28 (1) : 67-72.

[7] 徐冠华. 论热红外遥感中的基础研究 [J]. *中国科学 (技术科学)*, 2000, 30 (s1) : 1-5.

Xu G H. On the basic research in thermal infrared remote sensing [J]. *Scientia Sinica Technologic*, 2000, 30 (s1) : 1-5.

[8] 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证 [J]. *中国科学 (地球科学)*, 2002, 32 (12) : 1041-1050.

Zhang R H, Sun X M, Zhu Z L, et al. Remote sensing information model of surface evaporation based on differential thermal inertia and its verification in Shapotou area of Gansu Province [J]. *Science in China*, 2002, 32 (12) : 1041-1050.

[9] 刘绍民, 孙 睿, 孙中平, 等. 基于互补相关原理的区域蒸散量估算模型比较 [J]. *地理学报*, 2004, 59 (3) : 331-340.

Liu S M, Sun R, Sun Z P, et al. Comparison of different complementary relationship models for regional evapotranspiration estimation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59 (3) : 331-340.

[10] Mu Q Z, Heinsch A F, Zhao M S, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111 (4) : 519-536.

[11] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115 (8) : 1781-1800.

[12] 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35 (3) : 304-319.

Fan D Q, Zhao X S, Zhu W Q, et al. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35 (3) : 304-319.

[13] Klaes K D, Schmets J. The EUMETSAT Polar System: Status and first results [J]. *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization III: Readiness for GEOSS*, 2007, 6684: 84-90.

[14] Chen Y, Xia J Z, Liang S L, et al. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 279-293.

[15] Hu G C, Jia L, Menenti M. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 510-526.

[16] Kumar S V, Peters-Lidard C D, Tian Y, et al. Land information system: An interoperable framework for high resolution land surface modeling [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2006, 21 (10) : 1402-1415.

[17] Anderson M C, Norman J M, Diak G R, et al. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60 (2) : 195-216.

[18] Cleugh H A, Leuning R, Mu Q, et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106 (3) : 285-304.

[19] Wang K C, Liang S L. An improved method for estimating global evapotranspiration based on satellite determination of surface net radiation, vegetation index, temperature, and soil moisture [C] // 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2008: III-875-878.

[20] Martin J, Markus R, Philippe C, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. *Nature*, 2010, 467 (7318) : 951-954.

[21] Yao Y J, Liang S L, Cheng J, et al. MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley-Taylor algorithm [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171-172: 187-202.

[22] Kim H W, Hwang K, Mu Q Z, et al. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012, 16 (2) : 229-238.

[23] Yao Y J, Liang S L, Li X L, et al. Estimation of high-resolution terrestrial evapotranspiration from Landsat data using a simple Taylor skill fusion method [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 508-526.

[24] Zhou H M, Liang S L, He Tao, et al. Evaluating the spatial representativeness of the MODerate resolution image spectroradiometer albedo product (MCD43) at AmeriFlux sites [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (5) : 547.

[25] Zhang Z J, Zhao L, Lin A W. Evaluating the performance of Sentinel-3A OLCI land products for gross primary productivity estimation using AmeriFlux data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12 (12) : 1927.

[26] Gupta H V, Kling H, Yilmaz K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377 (1) : 80-91.

Validation of Hi-GLASS products for latent heat flux based on Ameriflux observation data

FAN Jiahui¹, YAO Yunjun¹, YANG Junming¹, YU Ruiyang¹, LIU Lu¹, ZHANG Xueyi^{1,2}, XIE Zijing¹, NING Jing¹
(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The validation and analysis of latent heat flux products are critical for research on climate change and energy circulation. High-resolution global land surface satellite evapotranspiration (Hi-GLASS ET) products,

which integrate five traditional evapotranspiration algorithms, can produce high-precision products for land surface latent heat flux. However, these products are yet to be validated. This study obtained multiple sets of valid validation data by comparing the latent heat flux observed values from Ameriflux flux observation sites with the corresponding estimated values of Hi-GLASS land surface latent heat flux products. The validation results yielded a squared correlation coefficient (R^2) of 0.6, a root mean square error (RMSE) of 34.4 W/m^2 , an average bias of -13.4 W/m^2 , and Kling-Gupta efficiency (KGE) of 0.49. These suggest that Hi-GLASS latent heat flux products boast high precision and that their algorithms enjoy satisfactory fitting results. In addition, spatial distributions imply that Hi-GLASS latent heat flux products conform to normal natural laws. Due to data acquisition limitations, the validation of this study was conducted based on data from only 18 sites in the U.S., and further validation using data from other areas is required.

Keywords: land surface latent heat flux; Ameriflux sites; Hi-GLASS products; precision validation

(责任编辑: 张 仙)