

廖志朗, 欧虹伶, 欧阳家萌, 等. 地表蒸散发遥感产品在不同生态系统的评估[J]. 气象研究与应用, 2024, 45(2): 57–62.

LIAO Zhilang, OU Hongling, OUYANG Jiameng, et al. Evaluation of surface evapotranspiration remote sensing products across different ecosystems[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(2): 57–62.

## 地表蒸散发遥感产品在不同生态系统的评估

廖志朗, 欧虹伶, 欧阳家萌, 柳小敏, 李芷霓

(贺州市气象局, 广西 贺州 542899)

**摘要:** 利用分属三个生态系统的6个通量站实测数据, 对UM-A、MOD16两种地表蒸散发遥感产品开展验证工作, 分析两个遥感产品的时间变化一致性, 使用相关系数、协方根误差和平均绝对误差对产品进行精度验证及评估, 探讨不同地表蒸散发遥感产品所适用的生态系统。结果表明, 整体上两个产品时间变化趋势均与通量站数据相似, 在精度上, 在森林生态系统和草地生态系统UM-A产品表现更好, 在农田生态系统MOD16产品表现更好。UM-A产品适用于森林和草地生态系统, MOD16产品适用于农田生态系统。在下垫面是常绿阔叶林或高寒矮嵩草草甸植被时, UM-A产品表现更好; 当下垫面是松树为主的针叶林时, 则是MOD16产品表现更好。

**关键词:** 地表蒸散发遥感产品; 生态系统; 通量站; MOD16

**中图分类号:** P426.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.2.09

蒸散发(evapotranspiration, ET)是水文循环中自降水到地面后由固态或液态转化为水汽返回大气的阶段, 地表蒸散发是地表水分进入大气的唯一方式。由于水资源合理利用与管理定量化的迫切要求, 蒸散发问题越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>, 大尺度的实际蒸散发不能被直接观测, 遥感技术也不能直接得到蒸散发数据, 但是可以通过对相关遥感数据的处理, 借助一定的方法和模型估算反演得到区域蒸散发量<sup>[2]</sup>。在全球变暖的背景下, 水资源分配不均匀不稳定性趋势正逐年增加<sup>[3]</sup>, 这些变化已引起全球水文学者的广泛关注。地表蒸散发是全球水循环的重要组成部分, 是全球能量守恒中重要的一环, 了解陆表蒸散发的变化规律, 对水资源合理开发利用、水土治理、水环境保护、生态环境保护具有重要的意义。传统的蒸散发多适用于点尺度或林地、农场等小尺度<sup>[4]</sup>, 本文着眼于比较地表蒸散发遥感产品对于不同生态系统的精度, 探讨不同地表蒸散发遥感产品所适用的生态系统, 为生态系统的蒸散发遥感与测量提供参考和借鉴。

地表蒸散发被认为是陆地表层系统水循环过

程中最难准确估算的分量, 为提高其遥感估算的可靠性, 国内外持续开展相关真实性检验工作<sup>[5]</sup>。我国学者对蒸散发反演模型的研究开始时间较晚, 和国外相对成熟的蒸散发模型研究现状相比, 还是有比较大的差距。值得欣慰的是, 我国学者对蒸散发模型的研究也有许多突破<sup>[6]</sup>。莫伟华、黄小燕、蒙良莉等研究表明, 随着遥感卫星技术的飞速发展, 卫星遥感在精密监测、精准预报和精细服务中不断升级进步, 在广西经济社会发展建设中发挥越来越重要的作用<sup>[7-11]</sup>。自20世纪60年代, 人们就提出了利用遥感技术来估算陆表实际蒸散<sup>[12]</sup>, 并进行了有价值的尝试: 如基于可见光-近红外的植物指数统计关系法、遥感系数法, 主要通过地表蒸散量与偶见植被指数(Vegetation Index, VI)或用于计算地表蒸散量的关键参数之间的数量关系, 进而利用这一数量关系, 反演区域地表蒸散量<sup>[13]</sup>。此外遥感技术估算蒸散发方法还有基于微波遥感的微波发射率差异性植被指数法, 基于多波段联合的光学-热红外联合法、光学-热红外-微波联合法和基于海洋蒸发遥感的热红外-微波联合法等。蒸散发遥感产品种

收稿日期: 2023-10-07

基金项目: 贺州市科技局项目(贺科技202298)

第一作者: 廖志朗(1998—), 助理工程师, 主要从事天气预报预警服务工作。E-mail: 402806949@qq.com

类繁多,各个产品反演算法、空间分辨率、理论基础等方面均存在差异,不同生态系统之间由于下垫面成分不同,且对于同一生态系统而言其所处的经纬度不同也会使得地表蒸散发存在差异。本文从对比蒸散发遥感产品基于森林、草地、农田生态系统的变化趋势和精度检验的角度出发,对遥感蒸散发产品的精度与其所适用的生态系统进行评估与分析,以期所研究结论为生态气象服务提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文选取美国蒙大拿大学陆地动态数值模拟研究组基于 AVHRR 影像数据产品(NTSG UM-A)和美国蒙大拿大学陆地动态数值模拟研究组基于中分辨率成像光谱仪影像数据产品(NTSG MODIS)的 MOD16 产品两种遥感蒸散发产品进行评估与分析。陆表蒸散发遥感产品 UM-A 全球陆表蒸散产品数据的空间分辨率是 8 km 和 1°,空间范围为全球陆地,时间分辨率是月,数据时间范围为 1983—2006 年。利用两种算法模型合成全球陆表蒸散,改进的 PM 算法利用 AVHRR NDVI 来计算植被冠层蒸发,改进的 Priestley-Taylor 模型计算开阔水域蒸发<sup>[14]</sup>。MOD16 产品是 MODIS 陆地 4 级标准数据产品,空间分辨率为 1 km,空间范围为全球陆表,时间分辨率为 8 d、月和年。数据时间范围为 2000—2016 年。该产品应用基于改进的 PM 蒸散模型,将地表蒸散分为植被蒸腾和土壤蒸发两部分进行反演估算。UM-A 与 MOD16 这两个产品最大的区别在于它们的算法对于植物冠层阻抗进行参数化的方式不一样<sup>[14]</sup>。本文以通量站实测数据为基准数据,与遥感蒸散发产品的数据进行精度比较和分析,拟对遥感蒸散发产品的精度与其所适用的生态系统进行评估与分析。

选用三个生态系统中的各一个通量站实测数据:①代表森林生态系统的西双版纳站(BNS)和长白山站(CBS),BNS 有保存完整的热带系统,气候类型为热带季风气候。CBS 的植被的垂直地带性是其植被分布的特征,植被的垂直分布十分明显。通量站区域下垫面植被为阔叶红松林。②代表草地生态系统的海北灌丛站(HBG)和青海站(QHB),HBG 气候类型为高原大陆性气候。QHB 属于高原大陆性气候;③代表农田生态系统的千烟洲站(QYZ)和禹城站(YCS),QYZ 气候类型为亚热带季风气候,植

被属中亚热带常绿阔叶林带,农业模式为混合农业类型。YCS 气候类型为暖温带半湿润季风气候。

#### 1.1.1 MOD16 产品

MOD16 产品数据集包括地表蒸散发(ET)、潜在蒸散发(PET)、潜热通量(LE)、潜在潜热通量(PLE),空间分辨率为 1 km 和 0.05°,时间分辨率为 8d、月和年。该数据具备较高的时空分辨率及免费在线获取等特点<sup>[15]</sup>。本文采用 2003—2004 年逐月的 MOD16A2ET 数据,空间分辨率为 1 km。

#### 1.1.2 UM-A 产品

UM-A 产品数据集包括潜在潜热通量(PLE)、潜热通量(LE)、地表蒸散发(ET)、潜在蒸散发(PET),空间分辨率为 8 km、0.5°和 1°,时间分辨率为月<sup>[15]</sup>。本文采用 2003—2004 年逐月全球蒸散发数据,空间分辨率为 8 km。

#### 1.1.3 通量站资料

通量站资料来自中国通量观测研究联盟(ChinaFlux)所收集的通量站实测潜热通量。为了研究两种地表蒸散发产品的适用性,选取 2003—2004 年通过每日多时段实测获得的月平均潜热通量。

### 1.2 计算方法

根据地表蒸散发产品 UM-A、MOD16 和通量站实测数据的特征,利用通量站每日多时段实测数据,累加得到每日潜热通量,去除因水汽凝华造成的潜热通量负值后,计算获得六个通量站的月平均潜热通量,按站点利用 MATLAB 软件将处理后的通量站数据(station)与 UM-A 和 MOD16 的地表蒸散发遥感数据做成逐月折线统计图。

对于数据精度评价,本文按不同通量站对地表蒸散发遥感产品(UM-A 和 MOD16)和通量站潜热通量(station)进行区域划分,本文利用相关系数( $r$ )、协方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)进行验证,计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Mi} - \overline{ET_M}) - (i - \bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{Mi} - \overline{ET_M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{wi} - \overline{ET_{Mi}})^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ET_{Mi} - \overline{ET_{wi}}| \quad (3)$$

式中: $n$  为样本个数( $n=24$ );  $ET_{Mi}$  和  $ET_{wi}$  分别为地表蒸散发遥感产品(UM-A、MOD16)和通量站潜

热通量的值;  $\bar{i} = (n+1)/2$ 。

相关系数式(1)对不同的研究对象有不同的定义方式, 皮尔逊相关系数最为常用。 $r$ 值为正(负)时, 表示在该区域地表蒸散发在所计算的 $n$ 年内有线性增(减)的趋势。查相关系数检验表得信度( $\alpha = 0.05$ )临界值 $r_{0.05}$ , 当 $|r| > r_{0.05}$ 时地表蒸散发线性变化趋势显著。 $r$ 值通过显著性检验显著波动, 反之, 则表明地表温度年最大值时间序列波动并不显著。

协方差根误差(RMSE)式(2)亦称标准误差, 协方差表示的是两个变量的总体的误差。平均绝对误差(MAE)式(3)是用来描述两条序列间各点的平均偏差程度的, 平均绝对误差可避免误差的互抵, 准确反映实际误差和预测误差的差别。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生态系统蒸散发特征

从2003—2004年多月蒸散发值折线统计图来看(图1、2、3), 在QHB(图2)MOD16遥感蒸散发产品与其他两个数据相差过大, 为保证对比数据的一致性, 在下文讨论中, QHB只讨论UM-A与通量站潜热通量(station)。总体上看, 两个遥感产品蒸散发数值时间变化趋势相似, 变化趋势随时间变化也均与通量站潜热通量变化相似。整体上随月份变化而变化, 如在夏季(6、7、8月)前后蒸散发数据处于折线图的波峰, 显然随着时间推移进入夏季, 受气温升高影响, 各通量站所在区域蒸散发数值均大于其他月份; 在冬季(12、1、2月)前后蒸散发处于折线图的波谷, 显然随着进入冬季, 受气温降低影响, 各通量站所在区域蒸散发数值均小于其他月份。

综合分析发现, 两个遥感产品蒸散发数值时间变化趋势与通量站潜热通量数值时间变化趋势相似, MOD16产品与UM-A产品的蒸散发数值的差

异, 在于两种产品的算法对于植物冠层阻抗进行参数化的方式不一样。在基于森林生态系统的时间变化检验中(图1), BNS区域下垫面植被为热带季节雨林, MOD16产品的时间变化趋势一致性在此区域表现较差。对于属于同一生态系统的CBS, 站点区域大多数植物类型为阔叶松林, 植被水平分布特征明显, 在植被为常绿阔叶松林的区域, 两个遥感产品蒸散发数值一致性显然较高。所以可以推断, 基于森林生态系统的两个地表蒸散发遥感产品MOD16和UM-A在热带季风气候低纬度地区, UM-A遥感产品时间变化的一致性要高于MOD16产品; 在温带大陆性气候高纬度地区, 两个陆表蒸散发遥感产品均表现出良好的时间变化一致性。在基于草地生态系统的时间变化检验中(图2), HBG区域植被类型为以矮嵩草为建群种的高寒矮嵩草草甸植被类型, UM-A遥感产品表现的一致性较MOD16产品更为优秀, 所以在高原大陆性气候的中高纬度地区, UM-A产品的时间变化一致性优于MOD16产品。在基于农田生态系统的时间变化检验中(图3), QYZ区域现有林区大多是1985年前后营造的人工针叶林, YCS区域下垫面植被类型主要以冬小麦-夏玉米为主要植被。UM-A遥感产品在两个通量站区域其一致性均表现良好; MOD16遥感产品在QYZ所表现的一致性要优于UM-A遥感产品, 在YCS, MOD16遥感产品表现出的一致性与UM-A遥感产品相差不大。所以可以推断, 基于农田生态系统的两个地表蒸散发遥感产品, MOD16和UM-A在亚热带季风性气候低纬度地区, MOD16遥感产品时间变化的一致性要高于UM-A产品; 在暖温带半湿润季风气候中纬度地区, 两个陆表蒸散发遥感产品均表现出良好的一致性。从下垫面植被类型方面可以发现, 在选择遥感蒸散发产品时, 在下垫面植

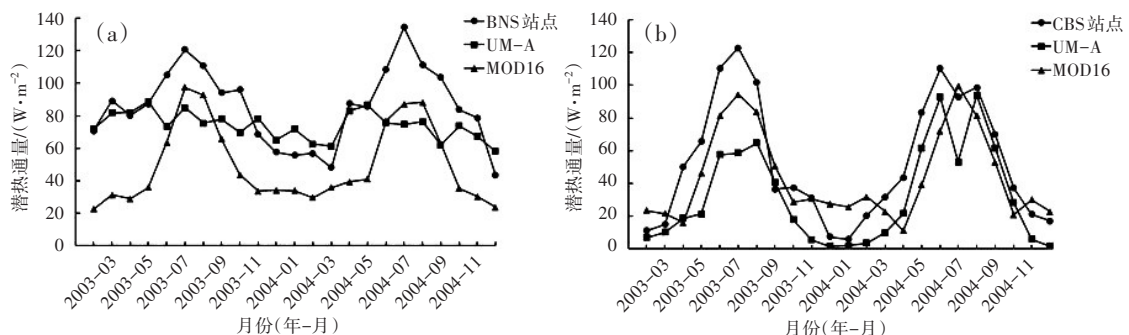


图1 基于森林生态系统的地表蒸散发遥感产品(UM-A、MOD16)的蒸散发与通量站实测潜热通量月变化  
(a)BNS;(b)CBS



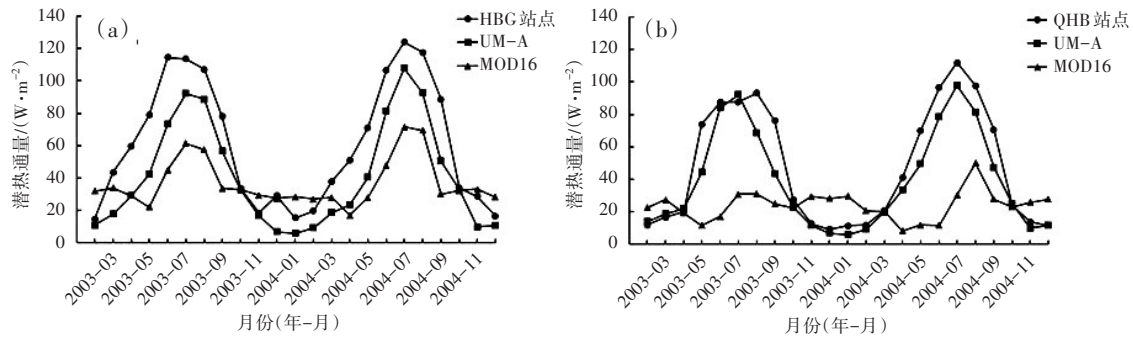


图2 基于草地生态系统的地表蒸散发遥感产品(UM-A、MOD16)的蒸散发与通量站实测潜热通量月变化图  
(a)HBG;(b)QHB

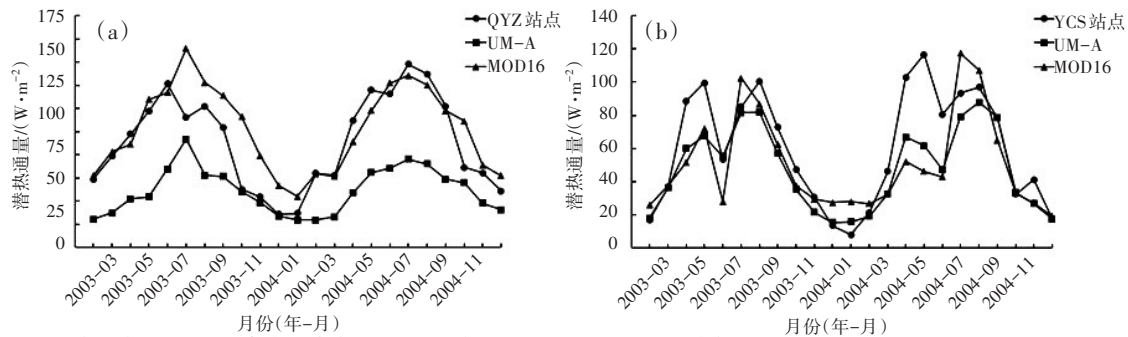


图3 基于农田生态系统的地表蒸散发遥感产品(UM-A、MOD16)的蒸散发与通量站实测潜热通量月变化图  
(a)QYZ;(b)YCS

被是常绿阔叶林或高寒矮蒿草草甸植被时,UM-A产品是更好的选择;当下垫面植被是松树为主的针叶林时,MOD16产品时更好的选择。

## 2.2 精度评价

出于保证遥感数据准确性的目的,首先需要对象遥感产品的有效性进行检验,由表1、表2、表3可以看出,MOD16产品在QHB的一致性差,参考价值较低,故在下文不再讨论MOD16产品在QHB这个通量站区域的精度评价。

在热带季风气候低纬度地区,UM-A遥感蒸散发产品的精度要高于MOD16遥感蒸散发产品,在温

表2 地表蒸散发遥感产品(UM-A、MOD16)蒸散发数值与通量站(station)潜热通量的协方根误差

站点名称	UM-A-station 协方根误差	MOD-station 协方根误差
西双版纳(BNS)	5.53	20.32
长白山(CBS)	33.09	38.94
海北(HBG)	53.29	18.63
青海(QHB)	45.76	1.45
千烟洲(QYZ)	30.80	49.12
禹城(YCS)	34.67	33.01

表3 地表蒸散发遥感产品(UM-A、MOD16)蒸散发数值与通量站(station)潜热通量的平均绝对误差

站点名称	UM-A-station 平均绝对误差	MOD-station 平均绝对误差
西双版纳(BNS)	10.24	33.59
长白山(CBS)	24.26	9.81
海北(HBG)	17.89	22.31
青海(QHB)	8.44	21.53
千烟洲(QYZ)	43.02	9.92
禹城(YCS)	11.41	4.47

表1 地表蒸散发遥感产品(UM-A、MOD16)蒸散发数值与通量站(station)潜热通量的相关系数

站点名称	UM-A-station 相关系数	MOD-station 相关系数
西双版纳(BNS)	0.88	0.64
长白山(CBS)	0.90	0.87
海北(HBG)	0.97	0.78
青海(QHB)	0.97	0.10
千烟洲(QYZ)	0.84	0.84
禹城(YCS)	0.91	0.77

带大陆性气候高纬度地区,两个遥感蒸散发产品遥感蒸散发精度均表现良好,MOD16产品精度要略高于UM-A产品,总体来说,两个遥感蒸散发产品的精度均适用于森林生态系统;在高原大陆性气候中高纬度地区,UM-A遥感蒸散发产品的精度要高于MOD16遥感蒸散发产品,即UM-A遥感蒸散发产品更适用于草地生态系统;在亚热带季风气候低纬度地区,MOD16遥感蒸散发产品的精度要高于UM-A遥感蒸散发产品,同时两个遥感蒸散发产品的精度都适用于暖温带半湿润季风气候中纬度地区,总的来说,MOD16产品更适用于农田生态系统。本文认为两个产品的空间分辨率对通量站蒸散发数值月平均值的精度比较不会产生影响,但在反演过程中两个产品输入的数据使用的是不同的空间分辨率,是引起蒸散发精度差异的原因之一。

### 3 结论和讨论

蒸散发遥感产品反演算法、空间分辨率、理论基础等方面均存在差异,对比两种蒸散发遥感产品基于森林、草地、农田生态系统的时间变化趋势和精度检验,主要结论如下:

从时间变化的一致性来看,基于生态系统的检验发现:对于森林生态系统,在热带季风气候低纬度地区,UM-A地表蒸散发遥感产品时间变化趋势相似程度高于MOD16地表蒸散发遥感产品,在温带大陆性气候高纬度地区,两个遥感产品时间变化趋势相似程度基本一致,UM-A产品更适用于森林生态系统;对于草地生态系统,UM-A地表蒸散发遥感产品时间变化趋势相似程度高于MOD16地表蒸散发遥感产品,UM-A产品更适用于森林生态系统;对于农田生态系统,在亚热带季风气候低纬度地区MOD16地表蒸散发遥感产品时间变化趋势相似程度高于UM-A地表蒸散发遥感产品,在暖温带半湿润季风气候中纬度地区,两个遥感产品时间变化趋势相似程度基本一致,MOD16产品更适用于农田生态系统。

从遥感产品的精度评价来看,基于生态系统的检验发现,对于森林生态系统,在热带季风气候低纬度地区,UM-A遥感蒸散发产品的精度要高于MOD16遥感蒸散发产品,在温带大陆性气候高纬度地区,两个遥感蒸散发产品精度均表现良好,MOD16产品精度略高于UM-A产品,总体来说,两个遥感蒸散发产品的精度均适用于森林生态系统,

UM-A遥感蒸散发产品更适用于低纬度地区,MOD16产品更适用于高纬度地区;对于草地生态系统,在高原大陆性气候中高纬度地区,UM-A遥感蒸散发产品的精度要高于MOD16遥感蒸散发产品,即UM-A遥感蒸散发产品更适用于草地生态系统;对于农田生态系统,在亚热带季风气候低纬度地区,MOD16遥感蒸散发产品的精度要高于UM-A遥感蒸散发产品,同时两个遥感蒸散发产品的精度都适用于暖温带半湿润季风气候中纬度地区,总的来说,MOD16产品更适用于农田生态系统。

由于蒸散发遥感产品数据时间范围及获取通量站实测数据时间范围的限制,本文只选用UM-A产品和MOD16产品,而实测值本身又存在误差,除来自模型的不确定性外,造成产品间差异的原因可能来自于模型的输入数据,是否具有足够多并且准确的输入数据影响着模型的表现<sup>[14]</sup>。如何精确的预测分析不同生态系统的陆表蒸散发的时间,进一步探究不同生态系统的陆表蒸散发规律,这在未来是一项颇具挑战性的任务。

#### 参考文献:

- [1] 邱姝月. 基于MOD16岷江上游实际蒸散发的时空分布特征[J]. 现代盐化工, 2021, 48(1): 92-93.
- [2] 甘容, 陶洁. 遥感技术在我国水文学中的应用研究进展[J]. 水资源开发与管理, 2020(12): 51-56.
- [3] ZHANG Y S, OHATA T, et al. Observation and estimation of evaporation from the ground surface of the cryosphere in eastern Asia[J]. Hydrological Prochydrological Processes, 2003, 17(6): 1135-1147.
- [4] 张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 等. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 975-999.
- [5] 宋鑫博. 基于MODIS数据的湖西区地表蒸散发遥感估算[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- [6] 李佳, 辛晓洲, 彭志晴, 等. 地表蒸散发遥感产品比较与分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 103-120.
- [7] 莫伟华, 陈燕丽, 莫建飞, 等. 卫星遥感在广西气象服务中应用的回顾与展望[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(4): 81-87.
- [8] 蒙莉莉, 钟仕全, 孙明, 等. 天宫二号对地观测数据与Landsat8卫星遥感影像对比分析[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(2): 42-46, 50.
- [9] 刘少军, 蔡大鑫, 赵婷, 等. 基于卫星遥感数据的南海海域真光层POC输出效率分布特征[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(1): 41-46.
- [10] 姜明, 史静, 杨妍辰, 等. 国内气象观测研究现状的文献

- 计量学分析[J].气象研究与应用,2022,43(1):118-123.
- [11] 黄小燕,韦春霞,赵华生,等.地面-雷达-卫星资料的广西降水临近预报应用效果评估[J].气象研究与应用,2022,43(4):50-58.
- [12] 张强.1985-2006年中国陆地生态系统生产力模拟研究[D].太原:山西大学,2012.
- [13] ZHANG K, KIMBALL J, NEMANI R, et al. Vegetation Greening and Climate Change Promote Multidecadal Rises of Global Land Evapotranspiration [J]. Scientific Reports, 2015(5):15956.
- [14] 熊育久,冯房观,方奕舟,等.蒸散发遥感反演产品应用关键问题浅议[J].遥感技术与应用,2021,36(1):121-131.
- [15] MU Q Z, HEINSCH F A, 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.

## Evaluation of surface evapotranspiration remote sensing products across different ecosystems

LIAO Zhilang, OU Hongling, OUYANG Jiameng, LIU Xiaomin, LI Zhini  
(Hezhou Meteorological Bureau, Guangxi Hezhou 542899, China)

**Abstract:** Based on the ground-measured data from six flux towers belonging to three distinct ecosystems a validation was carried out for two surface evapotranspiration (ET) remote sensing products: UM-A and MOD16, to analyse the temporal consistency between these remote sensing products, and to assess the accuracy of the products by using correlation coefficients, root mean square error (RMSE), and mean absolute error (MAE), as well as to explore the ecosystems where the different surface evapotranspiration remote sensing products are suitable for. Results indicate that both products have similar temporal trends to the flux station data, with UM-A exhibiting better performance in forest and grassland ecosystems, and MOD16 in farmland ecosystems. The UM-A product performs better when the vegetation cover consists of evergreen broadleaf forests or alpine Kobresia meadows. Conversely, MOD16 is preferred for ecosystems dominated by pine forests.

**Key words:** surface evapotranspiration remote sensing products; ecosystems; flux stations; MOD16