DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2025.05.25

遥感蒸散发数据在黑河中游荒漠绿洲区的应用评估

张庆竹[1], 李占华[1], 赵 琳[2], 孙静静[3,4,5]

(1.山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250100; 2.山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250013; 3.山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 4.河海大学, 江苏 南京 210098; 5.山东省水网调度与水资源高效利用重点实验室, 山东 济南 250013)

摘 要:黑河中游气候干旱,地表蒸散发强烈,农田灌溉耗水量大。目前针对遥感蒸散发数据的评估方法大多是与实测通量数据进行对比,而较少从耗水量监测应用这一角度进行评估。从站点实测数据、已发布的遥感蒸散发产品(SSEBop和MOD16)以及灌溉耗水量统计数据这3个方面对黑河流域中游荒漠绿洲区时空连续的遥感数据STAEDM(时间分辨率为10 d,空间分辨率为30 m)进行了对比评估。结果表明:与站点实测数据对比,STAEDM在植被下垫面的精度优于干旱下垫面;STAEDM精度最高(大满农田站$r^2=0.88$),SSEBop次之($r^2=0.83$),MOD16精度最差($r^2=0.68$),STAEDM在蒸散发的季节性变化规律和数值大小方面均有着更高的精度,且STAEDM较SSEBop和MOD16(空间分辨率为1 km)在蒸散发空间分布方面更为细致,能清晰地展示出复杂荒漠绿洲下垫面的蒸散发空间分布特征。基于STAEDM数据获取的灌溉耗水量与水资源公报中的数据对比结果显示,二者相关性较高($r^2=0.91$),相对误差为15.4%,虽然数值上略有高估,但年际变化规律呈现良好的一致性。STAEDM蒸散发数据具有高时空连续性,能够精细化监测田块尺度的灌溉耗水量,可为灌溉制度的优化提供数据支撑。

关键词:蒸散发; 遥感数据; 精度评估; STAEDM; SSEBop; MOD16; 黑河中游

中图分类号:S274; TV213.4　**文献标识码**:A　**文章编号**:1672-643X(2025)05-0214-09

Application evaluation of remote sensing evapotranspiration data in the desert-oasis region of the middle reaches of the Heihe River Basin

ZHANG Qingzhu[1], LI Zhanhua[1], ZHAO Lin[2], SUN Jingjing[3,4,5]

(1. *Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan* 250100, *China*; 2. *Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy Co., Ltd., Jinan* 250013, *China*; 3. *Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan* 250013, *China*; 4. *Hohai University, Nanjing* 210098, *China*; 5. *Shandong Key Laboratory of Water Network Dispatching and Efficient Utilization, Jinan* 250013, *China*)

Abstract: The arid climate in the middle reaches of the Heihe River Basin leads to intense surface evapotranspiration and considerable irrigation water use for farmland. Most current assessments of remote sensing evapotranspiration data focus on the comparison between the remote sensing data and the measured flux data, fewer efforts have been made from the perspective of monitoring irrigation water use. The STAEDM (with a temporal resolution of 10 days and a spatial resolution of 30 meters) data of the desert-oasis region in the middle reaches of the Heihe River Basin was compared with site observations, other evapotranspiration products (SSEBop and MOD16), and irrigation water use statistics. The results showed that compared with the observations, STAEDM had a better accuracy under the vegetated surface than under the arid surface. STAEDM was the most accurate ($r^2=0.88$ at Daman Station), followed by SSEBop ($r^2=0.83$), whereas MOD16 was the least accurate ($r^2=0.68$). STAEDM had better simulation accuracy in terms of the seasonal variation pattern and magnitude of evapotranspiration. Furthermore,

收稿日期:2025-05-20; **修回日期**:2025-09-19
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201007)
作者简介:张庆竹(1993—),女,山东高唐人,学士,工程师,主要从事水利规划、水利信息化及水文水资源相关领域的研究工作。
通讯作者:孙静静(1993—),女,山东东营人,博士,工程师,主要从事水文遥感方面的相关研究工作。

STAEDM had more detailed textures in the spatial distribution of evapotranspiration than SSEBop and MOD16 (with a spatial resolution of 1 km), which could clearly display the spatial characteristics of evapotranspiration on the complex desert oasis surface. A comparison of the irrigation water use data based on STAEDM and the Water Resources Bulletin showed a high correlation (r^2 = 0.91), with a relative error of 15.4%. Although there was a slight overestimation in the numerical value, the inter-annual variation patterns showed good consistency. The assessment results indicate that STADEM data has high spatial and temporal continuity, which can be used to refine irrigation water use monitoring at field scale, and provide data support for the optimization of irrigation schemes.

Key words: evapotranspiration; remote sensing data; accuracy assessment; STAEDM; SSEBop; MOD16; the middle reaches of the Heihe River Basin

1　研究背景

随着人口增长，淡水资源日益紧缺，传统的粗放型农业水资源利用模式已难以适应当前农业生产的需求，灌溉用水管理亟待向精细化转型。蒸散发（evapotranspiration，*ET*）作为土壤-作物-大气系统的核心变量，不仅是能量与水汽交换的关键过程，更在灌溉用水管理中扮演着重要角色。

近 20 余年来，地表变量遥感反演的理论方法不断得以优化，多源数据融合技术也日趋成熟，使得水循环关键变量（如蒸散发）的反演精度、时空分辨率及连续性均得到显著提升。目前已经发布的实时更新的遥感蒸散发数据包括 SSEBop、MOD16、GLEAM 等，虽然这些产品的应用范围广且精度较高[1-4]，但其空间分辨率往往比较粗糙（SSEBop 和 MOD16 产品的空间分辨率为 1 km，GLEAM 产品的空间分辨率为 25 km），若直接应用于农田灌区的耗水监测则效果欠佳。一种时空自适应的蒸散发降尺度方法（spatial and temporal adaptive evapotranspiration downscaling method，STAEDM）[5]基于时空融合算法，引入下垫面特征，融合了 SSEBop 及多源遥感数据，将多源蒸散发数据的空间分辨率提升至 30 m，时间分辨率提升至 10 d，STAEDM 蒸散发数据可实现对农田异质性区域蒸散发动态的高精度表征。

目前，针对遥感蒸散发产品大多采用与实测通量数据在站点尺度上进行对比的方法作出精度评估。Zheng 等[4]采用全球通量数据评估了陆表蒸散发数据集 ETMonitor 在全球不同生态系统的精度，认为 ETMonitor 的精度较高（均方根误差 *RMSE* = 0.93 mm/d）。廖志朗等[6]利用分属 3 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进行了评估，认为当下垫面为常绿阔叶林时，UM－A 产品表现更好；当下垫面为针叶林时，MOD16 产品表现更好。Chen 等[7]采用全球通量数据集 FLUXNET 对 MOD16、BESS、GLEAM 等多套数据进行了评估，结果表明 MOD16 的精度较高（均方根误差 *RMSE* = 49.1 W/m^2）。基于遥感蒸散发数据估算灌溉耗水量（irrigation water use，*IWU*）是遥感蒸散发产品的一项重要应用，*IWU* 结果可为蒸散发产品的精度评价提供参考。已有学者尝试利用 GLDAS 和 MOD16 产品对 *IWU* 进行估算，通过与实际 *IWU* 对比后发现，该类数据可以用于区域灌溉耗水量监测[8-9]。然而，现有基于 *IWU* 的蒸散发产品评估多集中于空间分辨率较低（不小于 500 m）的数据[8-10]，而对于更高空间分辨率（例如 30 m）的蒸散发数据在 *IWU* 估算中的适用性仍有待深入探究。

黑河流域中游荒漠绿洲区下垫面异质性强、地表蒸散发空间差异显著，这些特点使其成为评估遥感蒸散发产品的理想区域。本文以黑河流域中游荒漠绿洲区为研究区域，对 STAEDM 遥感蒸散发数据进行评估。首先将 STAEDM 蒸散发数据与站点实测通量作对比，再进一步与 SSEBop、MOD16 遥感蒸散发产品在站点精度和数值空间分布上进行对比分析，最后将基于 STAEDM 空间年值数据提取的耕地相应蒸散发数值换算为灌溉耗水量，分析灌溉耗水量的年际变化，并与水资源公报中的灌溉耗水数据进行对比。

2　研究区域概况

本研究区域位于黑河流域中游的张掖市甘州区内，地理坐标为 100°19′E～100°40′E、38°44′N～39°00′N，大小范围约为 35 km×30 km，其地理位置及气象通量测站分布如图 1 所示。研究区属于典型的温带大陆性干旱气候，年平均气温为 6～8 ℃，年潜在蒸发量可达 1 200 mm 以上，而年降水量仅为

100~250 mm,远小于年蒸发量[11]。研究区土地覆盖类型复杂,中部为农田、湿地等湿润下垫面,边缘为戈壁、荒漠草原和沙漠等干旱下垫面[12],其中耕地面积占比最大,约占研究区总面积的 52%。

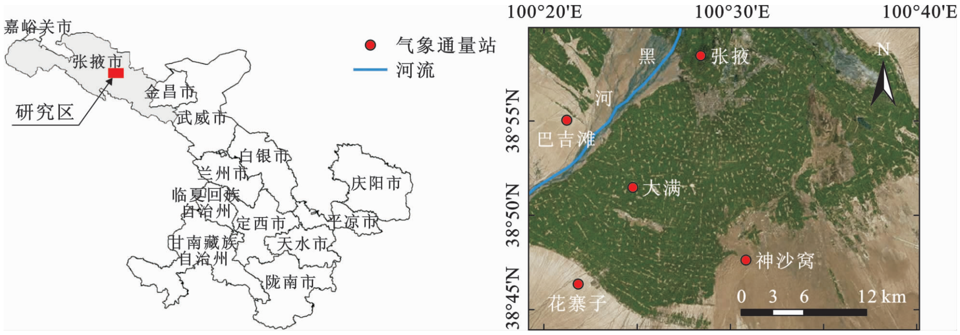

图 1 研究区地理位置及气象通量测站分布图

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源及预处理

3.1.1 STAEDM 遥感蒸散发数据 STAEDM 遥感蒸散发数据的处理流程分为 3 个阶段[5]。首先利用 Landsat 影像和不依赖风速的遥感蒸散发(wind speed avoiding Priestley-Taylor, WAPT)模型获得卫星过境时刻的瞬时蒸散发(ET)数据[13],并通过时间升尺度方法扩展到 10 d 累积 ET;基于 TVDI 统计降尺度方法将 1 km 的 SSEBop ET 降尺度至 30 m;结合降尺度后的 SSEBop ET 和 Landsat ET,通过 STARFM 模型生成连续的 30 m 分辨率的 10 d ET 产品。本文采用的 STAEDM 数据时间跨度为 2013—2018 年,且将逐 10 d 数据累加为逐月数据。

3.1.2 对比遥感蒸散发产品 选取在全球范围内得到广泛应用的 MOD16 和 SSEBop 遥感蒸散发产品,与 STAEDM 数据进行对比分析。MOD16 数据是由美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的全球 8 d 合成的蒸散发数据[14-17],数据获取网址为 https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/,数据空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d,本文将逐 8 d 数据累加为逐月数据;SSEBop 数据是由美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)提供的全球逐旬、逐月近实时蒸散发产品[18],数据获取网址为 https://earlywarning.usgs.gov/ssebop,数据空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 10 d,本文将逐 10 d 数据累加为逐月数据。

3.1.3 地面实测对比数据 采用黑河数据中心提供的通量实测数据(http://hiwater.westgis.ac.cn/)对遥感蒸散发数据进行对比验证。选择了 5 个气象通量测站的观测数据(图 1),其中张掖湿地站、大满农田站和花寨子荒漠站的数据时间为 2013—2018 年,巴吉滩戈壁站为 2014 年,神沙窝沙漠站为 2013—2014 年。本文对获取的潜热通量数据采用波文比能量平衡方法进行了处理。

3.1.4 地物类别数据 研究区地物类别数据基于 Landsat 8 影像,采用随机森林方法并结合 Google Earth 高分辨率影像的目视解译样本进行训练[19]。分类结果经验证表明,总体精度超过 85%,Kappa 系数均达到 0.80 以上。耕地为研究区最主要的土地利用类型,2013 年研究区内耕地面积为 578.08 km^2,2014 年为 581.24 km^2,2015 年为 594.50 km^2,2016 年为 597.87 km^2,2017 年为 598.04 km^2,2018 年为 605.18 km^2。

3.2 研究方法

3.2.1 遥感蒸散发精度评估 从所选的各遥感蒸散发产品中分别提取出研究区 5 个站点所在栅格的蒸散发数值,与相应的各站点实测通量数据进行对比,采用相关系数 r^2、均方根误差 $RMSE$、平均偏差误差 MBE、纳什效率系数 NSE 等参数评估对比结果的精度。

3.2.2 灌溉耗水量计算 本文基于遥感蒸散发数据计算研究区的灌溉耗水量,其计算方法如公式(1)所示。

$$IWU = (ET - P) \cdot S \tag{1}$$

式中:IWU 为灌溉耗水量,m^3;ET 为耕地遥感蒸散发,m;P 为有效降水量,m,其计算方法参见文献[20];S 为耕地面积,m^2。

4 结果与分析

4.1 各蒸散发产品数据精度评估

4.1.1 各蒸散发产品数据与站点实测通量对比 表 1 中汇总了 2013—2018 年 STAEDM、SSEBop 和

MOD16 产品数据与站点实测通量的对比精度评估结果。由表 1 可知,STAEDM 数据精度最高,SSEBop 次之,MOD16 精度最差。从不同下垫面的数据精度来看,在张掖湿地站,STAEDM 的 r^2 和 *RMSE* 分别为 0.91 和 18.89 mm/月;在大满农田站,STAEDM 的 r^2 和 *RMSE* 分别为 0.88 和 18.31 mm/月,而在其他干旱下垫面站点,STAEDM 的 r^2 均小于张掖湿地站和大满农田站,表明 STAEDM 数据在不同下垫面存在精度差异,在植被下垫面的精度高于非植被下垫面。产生上述差异的原因主要是由于STAEDM 基于 WAPT 蒸散发模型,该模型不依赖风速,因此在植被下垫面的表现优于非植被区[13]。与站点实测数据相比,MOD16 产品数据在张掖湿地和大满农田站均严重低估($MBE<0$),这与 MOD16 通过饱和水汽压差约束蒸散发,而未直接引入土壤水分控制模块有关[21]。SSEBop 产品数据在干旱下垫面的精度较植被下垫面差,这与 SSEBop 精度高度依赖 MODIS 地表温度输入有关。MODIS 地表温度对干旱下垫面低估严重,从而降低了 SSEBop 蒸散发的估算精度[3]。

表 1　STAEDM、SSEBop 和 MOD16 产品数据与站点实测通量的对比精度评估结果

遥感蒸散发产品	评估参数	张掖站	大满站	花寨子站	巴吉滩站	神沙窝站
STAEDM	r^2	0.91	0.88	0.45	0.40	0.30
	MBE/(mm·月$^{-1}$)	−0.95	−4.39	−12.40	11.90	−3.70
	RMSE/(mm·月$^{-1}$)	18.89	18.31	23.02	18.38	16.16
	NSE	0.90	0.85	0.22	−0.50	0.21
SSEBop	r^2	0.77	0.83	0.57	0.91	0.50
	MBE/(mm·月$^{-1}$)	−26.60	−14.10	−4.21	−1.38	−9.48
	RMSE/(mm·月$^{-1}$)	40.19	27.29	22.14	4.93	16.59
	NSE	0.56	0.66	0.27	0.89	0.16
MOD16	r^2	0.56	0.68	0.27	0.03	0.50
	MBE/(mm·月$^{-1}$)	−70.84	−32.73	−11.54	−2.54	−2.70
	RMSE/(mm·月$^{-1}$)	81.71	42.33	25.39	15.50	13.28
	NSE	−0.80	0.22	0.05	−0.10	0.49

4.1.2　*各蒸散发产品数据的时空特征对比*　为了比较 STAEDM、SSEBop 和 MOD16 蒸散发产品数据的时空分布特征,对各站点绘制了各产品及实测2013—2018 年的月蒸散发量变化过程线,并绘入大满站实测降水量作为参考,如图 2 所示。

由图 2 可以看出,在植被下垫面,各站点实测蒸散发量季节变化明显,生长季明显大于非生长季,如大满农田站,其蒸散发在生长季最高可达 170 mm/月,而在非生长季最低仅约为 20 mm/月。STAEDM蒸散发数据的季节变化趋势和数值大小均与实测值最为接近,季节特征表现能力最好;SSEBop 和MOD16 蒸散发数据在植被下垫面基本呈全年低估状态,MOD16 数据在夏季低估幅度尤为明显。在非植被下垫面,蒸散发也具有明显的季节特征,蒸散发量主要集中在夏季。相比较而言,STAEDM 数据能够反映出非植被下垫面蒸散发的季节变化规律,但数值精度劣于植被下垫面;MOD16 数据在干旱下垫面的季节特征不强,对季节变化的表现能力较差。

将上述月蒸散发数值进行年度累加,可得到各年份的年蒸散发量。图 3、4、5 分别为 2013—2018年研究区 STAEDM、SSEBop 和 MOD16 产品年蒸散发量空间分布云图。由于冬季蒸散发量少,本文对12 月—次年 2 月的蒸散发量忽略不计,将 3—11 月的累计蒸散发量近似作为年蒸散发量。

由图 3、4、5 可以看出,相较于 STAEDM,SSEBop和 MOD16 蒸散发数据的空间分辨率较低,导致其在反映研究区内不同地物类型的蒸散发细节上能力不足,只能大致显示农田灌区的整体轮廓和数值粗略分布。STAEDM 较 SSEBop 和 MOD16 的空间描绘能力更强,能清晰地刻画出农田区域的蒸散发分布细节,在农田区域蒸散发数值上也最接近于实测值。图 3 显示,2013—2015 年 STAEDM 的年蒸散发数值总体上呈现出逐年增大的趋势,农田区域代表高蒸散发数值的红褐色斑块面积逐渐增大且颜色逐渐加深,但 2016 年之后,年蒸散发量呈现减少的特点,红褐色高值区域面积逐年减小。总体上,STAEDM 蒸散发数据空间分辨率较高,能较为清晰地展示出复杂荒漠绿洲下垫面的蒸散发空间特征。

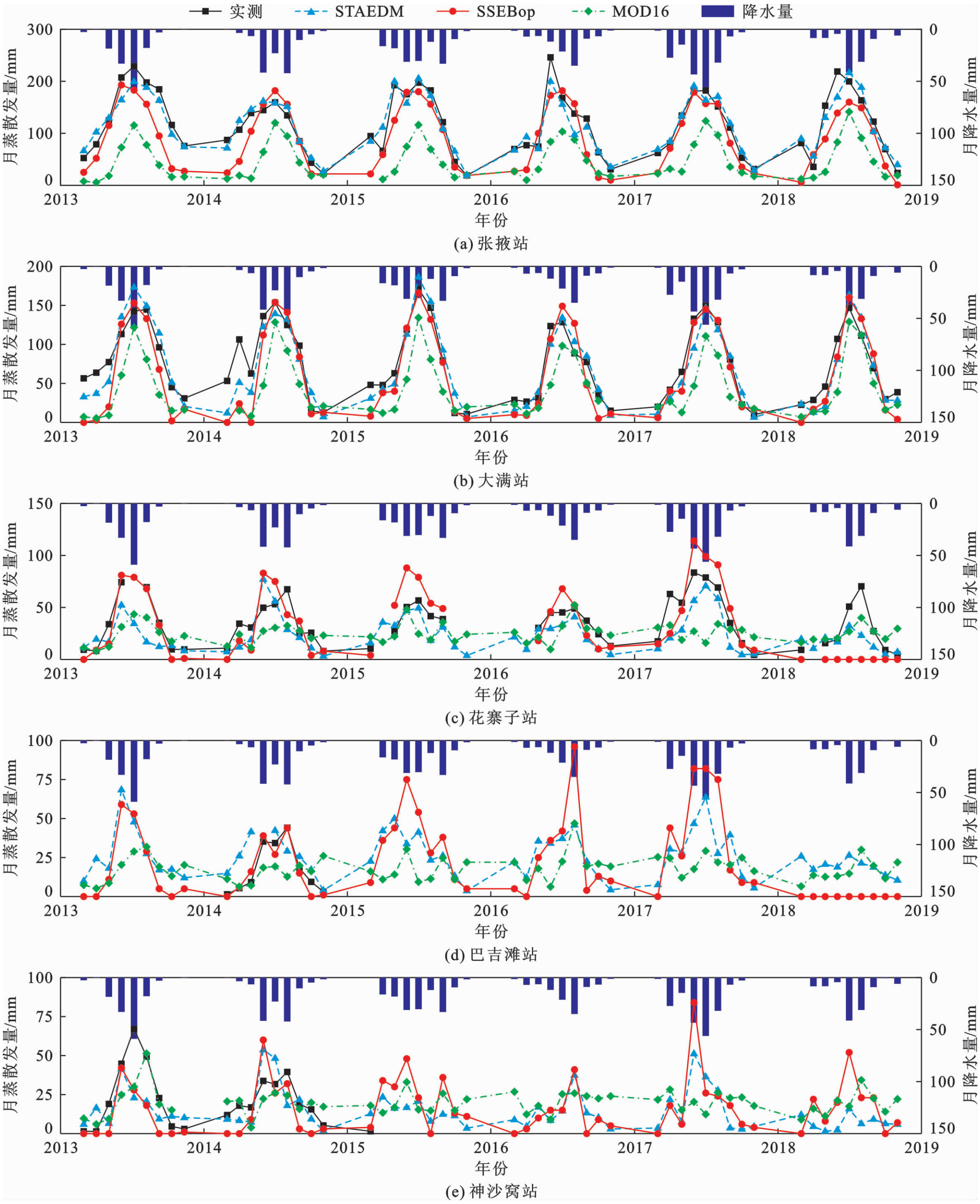

图2 2013—2018年各站点STAEDM、SSEBop和MOD16产品月蒸散发量及实测通量变化过程线

4.2 基于STAEDM遥感蒸散发的灌溉耗水特征

从耗水特征的角度来进一步评估STAEDM产品的数据精度。基于图3提取的STAEDM在研究区耕地下垫面上的年蒸散发数值,计算得到了2013—2018年的年灌溉耗水量(*IWU*),结果如表2所示。

由表2中耕地年蒸散发量的变化可知,2013—2015年耕地下垫面的农作物年蒸散发量呈增大趋势,2017—2018年则明显减少。2013—2018年研究区农田年蒸散发量介于600~780 mm之间,2017年之前年蒸散发量在700 mm以上,2017年后则迅速减少至600 mm左右。影响研究区蒸散发量的主要因素包括降水量、气温与灌溉方式等。2017—2018年研究区平均降雨量为101.20 mm/a,与2013—2016年(平均降雨量为97.64 mm/a)相比变化不大;2013—2018年研究区年均气温在6.33~7.16 ℃之间,也无明显变化,可见导致2017—2018年研究区蒸散发量减少的因素并非降雨量和气温,而主

要与灌溉方式的变化有关。2016 年前研究区农田灌溉主要以漫灌为主，2017 年则开始大面积采用滴灌灌溉方式[22]。

由表 2 中灌溉耗水量 *IWU* 的变化可知，研究区 *IWU* 从 2013 年的 3.64 亿 m^3 增大至 2015 年的 3.96 亿 m^3，2016 年开始减少，2018 年减少至 3.17 亿 m^3。*IWU* 是由耕地蒸散发与有效降雨的差值乘以耕地面积而得到（公式 1），2013—2018 年研究区的耕地面积变化不明显，因此 *IWU* 的年际变化主要与耕地蒸散发量有关。

为评估本研究反演方法的可靠性，将《甘肃省水资源公报（2013—2018）》[23] 中张掖市农田灌溉耗水量 *IWU* 的统计数据与反推计算结果进行对比，结果如表 3 所示。

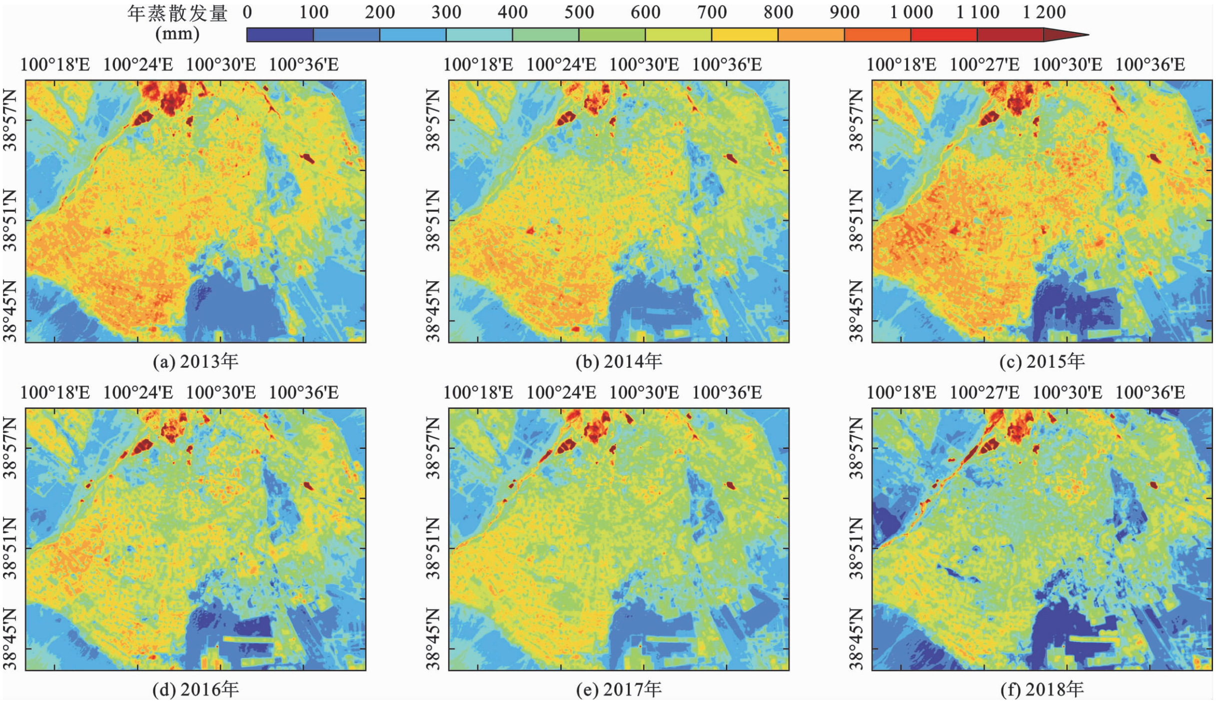

图 3　2013—2018 年研究区 STAEDM 产品年蒸散发量空间分布云图

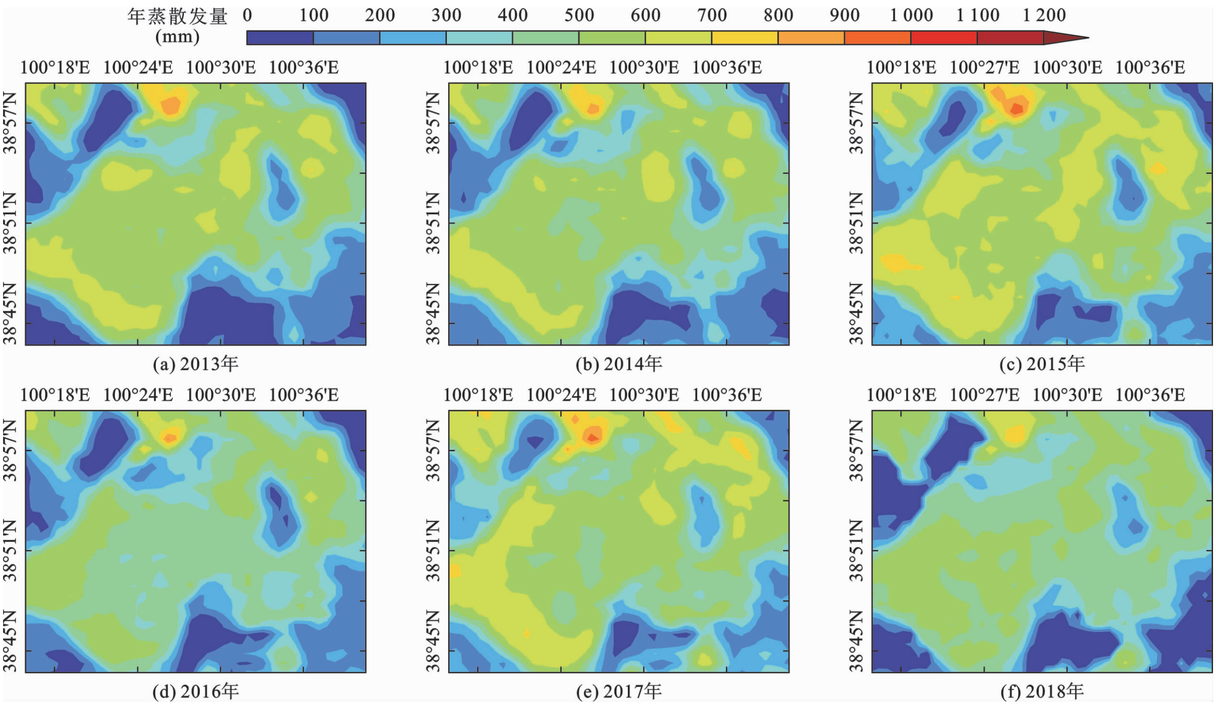

图 4　2013—2018 年研究区 SSEBop 产品年蒸散发量空间分布云图

由表 3 可以看出,2013—2018 年张掖市 *IWU* 呈先增后减趋势,统计数据从 2013 年(13.68 亿 m³)至 2015 年(14.30 亿 m³)逐年增大,2016 年(13.53 亿 m³)至 2018 年(12.16 亿 m³)逐年减少。从反推计算结果来看,2015 年 *IWU* 最大,为 17.62 亿 m³,之后逐年减少到 2018 年的 13.02 亿 m³。

本文对张掖市农田灌溉耗水量的反推计算结果与水资源公报统计值的年际变化规律一致,相关系数 r^2 达到 0.91,相对误差各年份均值为 15.4%,总体上精度可靠。

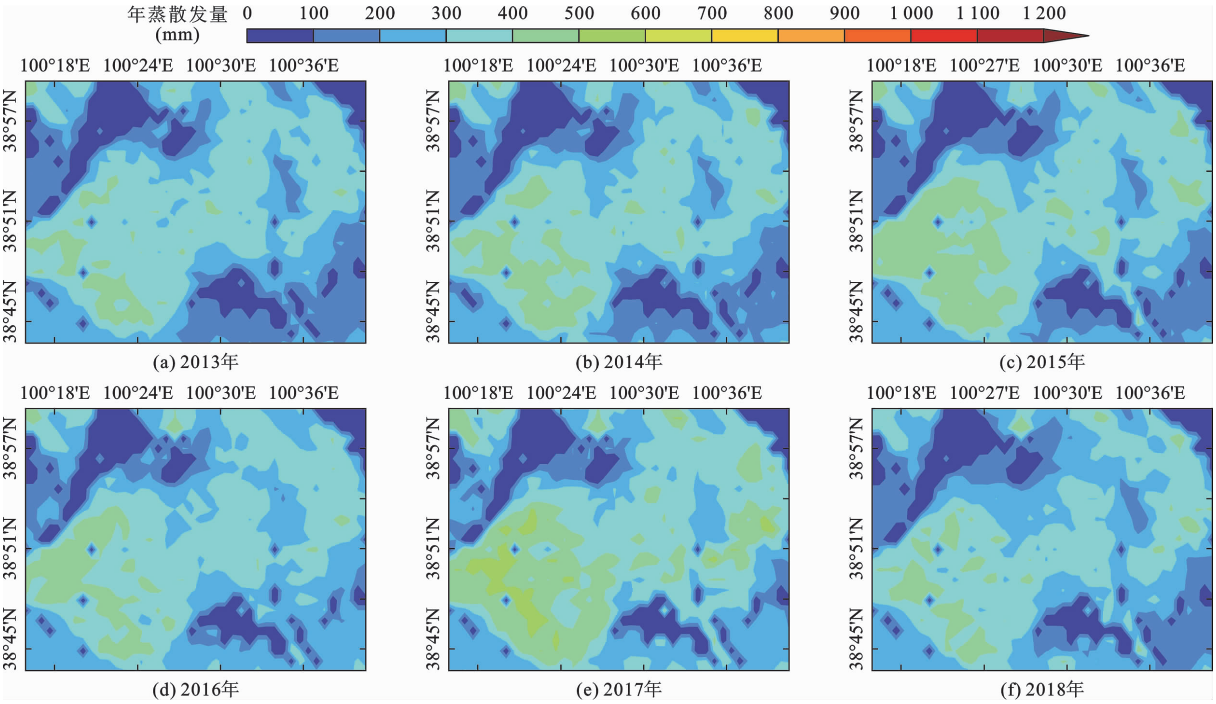

图 5 2013—2018 年研究区 MOD16 产品年蒸散发量空间分布云图

表 2 2013—2018 年研究区耕地年蒸散发量及灌溉耗水量统计表

年份	年平均气温/℃	有效降水/mm	耕地面积/km²	耕地年蒸散发量/mm	年灌溉耗水量 *IWU*/亿 m³
2013	7.12	92.81	578.08	723.25	3.64
2014	6.33	103.26	581.24	754.50	3.79
2015	7.06	110.88	594.50	777.25	3.96
2016	7.16	83.62	597.87	705.33	3.72
2017	6.98	120.85	598.04	660.00	3.22
2018	6.61	81.58	605.18	606.16	3.17

表 3 2013—2018 年张掖市农田灌溉耗水量统计数据与本研究反推计算结果对比

年份	张掖市统计数据					本研究计算结果		
	农田实灌面积/km²	农田灌溉耗水量/亿 m³				研究区耕地面积/km²	张掖市灌溉耗水量反推计算结果/亿 m³	相对误差/%
		水田	水浇地	菜田	合计			
2013	2 463	0.007 5	11.24	2.43	13.68	578.08	15.53	13.5
2014	2 648	0.007 5	11.77	2.43	14.21	581.25	17.24	21.3
2015	2 644	0.007 5	11.85	2.45	14.30	594.50	17.62	23.2
2016	2 626	0.007 5	11.20	2.32	13.53	597.87	16.33	20.7
2017	2 598	0.007 5	10.88	2.25	13.14	598.04	14.01	6.6
2018	2 482	0.005 5	10.05	2.10	12.16	605.18	13.02	7.1

注:张掖市灌溉耗水量反推计算结果是根据研究区耕地面积占张掖市总耕地面积的比值计算得出。

5 讨　论

本研究基于 STAEDM 遥感蒸散发数据计算了张掖市的 *IWU*,与水资源公报数据进行对比的平均相对误差为 15.4%。在采用遥感蒸散发产品对区域 *IWU* 估算方面,不同学者的估算精度存在较大差异[8-9,24],表 4 列出了部分同类研究文献对不同研究区域 *IWU* 的估算情况。由表4 可知,Tian 等[24]采用了30 m 空间分辨率的月蒸散发数据,其 *IWU* 平均相对误差最小;崔香蕊等[8]、卢诗卉等[9]均采用了空间分辨率为500 m、时间分辨率为8 d 的蒸散发数据,其 *IWU* 平均相对误差较大。整体而言,*IWU* 估算相对误差随着所采用蒸散发输入数据时空分辨率的提高而降低。相较于同类产品,STAEDM 具有时空连续、分辨率较高的优势,可应用于地表异质性强的农田灌区的田块尺度 *IWU* 估算。

表 4　部分同类研究文献对不同研究区域 *IWU* 的估算情况汇总

文献	平均相对误差/%	研究区域	蒸散发数据源	蒸散发数据时空分辨率
崔香蕊等[8]	18.3	宁夏回族自治区盐池县灌区	GLDAS	500 m,逐 8 d
卢诗卉等[9]	41.5	山东省济南市	MOD16	500 m,逐 8 d
Tian 等[24]	9.0	黑河张掖灌区	基于 FAO－56 方法获得的实际蒸散发	30 m,逐月
本文	15.4	黑河中游灌区	STAEDM	30 m,逐 10 d

注:表中各文献的 *IWU* 计算方法均与本文公式(1)相同。

本研究基于 STAEDM 遥感蒸散发数据对不同年份 *IWU* 估算结果的相对误差均为正,表现为系统性高估,这一高估现象在表 4 列出的其他同类研究中同样存在,其原因与 *IWU* 的计算方法有关。表 4 所列文献均采用公式(1)计算 *IWU*,该方法仅考虑灌溉和降水作为蒸散发来源,而未纳入地下水补给,导致灌溉耗水量的估算结果偏大。因此,未来可研究更为适宜的灌溉耗水量估算算法,以进一步提高 *IWU* 估算精度。

6 结　论

本研究以黑河流域中游荒漠绿洲区为研究区域,通过与研究区内站点实测通量、MOD16 和 SSEBop 遥感蒸散发产品以及甘肃省水资源公报灌溉耗水量统计数据进行对比,评估了 STAEDM 遥感蒸散发数据的精度,探究了 STAEDM 产品应用于灌溉耗水量监测的可行性,并得出以下主要结论。

(1)与 2013—2018 年的站点实测值相比,STAEDM 蒸散发产品数据在植被下垫面表现出较高的估算精度,但在干旱下垫面的精度较低,表明 STAEDM 数据更适用于植被下垫面的蒸散发监测。

(2)不同蒸散发产品相比较而言,STAEDM 精度最高,SSEBop 次之,MOD16 最低。在植被下垫面,相较于 SSEBop 与 MOD16 产品,STAEDM 蒸散发数据的季节变化趋势和数值大小均与实测值最为接近。在空间描绘方面,STAEDM 的空间分辨率较高,能够清晰地刻画出复杂绿洲下垫面的蒸散发空间分布特征。

(3)基于 STAEDM 蒸散发数据计算得出的灌溉耗水量与水资源公报统计值的年际变化规律一致,相关系数 r^2 达到 0.91,相对误差各年份均值为 15.4%,表明 STAEDM 蒸散发数据精度可靠,在灌溉耗水量监测中具有较好的适用性。

参考文献:

[1] WANG Shuai, WANG Chaozi, ZHANG Chenglong, et al. A classification-based spatiotemporal adaptive fusion model for the evaluation of remotely sensed evapotranspiration in heterogeneous irrigated agricultural area[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 273: 112962.

[2] CHEN Han, HUANG J J, MCBEAN E, et al. Evaluation of alternative two-source remote sensing models in partitioning of land evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126029.

[3] YIN Lichang, WANG Xiaofeng, FENG Xiaoming, et al. A comparison of SSEBop-model-based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2528.

[4] ZHENG Chaolei, JIA Li, HU Guangcheng. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations[J]. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128444.

[5] SUN Jingjing, WANG Wen, WANG Xiaogang, et al. Improving the STARFM fusion method for downscaling the

SSEBop evapotranspiration product from 1 km to 30 m in an arid area in China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(22): 5411.

[6] 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.

[7] CHEN Han, HUANG J J, DASH S S, et al. Development of a three-source remote sensing model for estimation of urban evapotranspiration[J]. Advances in Water Resources, 2022, 161: 104126.

[8] 崔香蕊,庞治国,段天池,等.基于遥感数据的宁夏盐池县蒸散发时空特征分析与灌溉用水估算[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2025,23(3):254-264.

[9] 卢诗卉,赵红莉,蒋云钟,等.基于多源遥感数据和水量平衡原理的灌溉用水量分析[J].水利学报,2021,52(9):1126-1135.

[10] ZHANG Caijin, LONG Di. Estimating spatially explicit irrigation water use based on remotely sensed evapotranspiration and modeled root zone soil moisture[J]. Water Resources Research, 2021, 57(12): e2021WR031382 .

[11] LI Yan, HUANG Chunlin, KUSTAS W P, et al. Evapotranspiration partitioning at field scales using TSEB and multi-satellite data fusion in the middle reaches of Heihe River Basin, northwest China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(19): 3223.

[12] XU Ziwei, LIU Shaomin, ZHU Zhongli, et al. Exploring evapotranspiration changes in a typical endorheic basin through the integrated observatory network[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 290: 108010.

[13] SUN Jingjing, WANG Wen, WANG Xiaogang, et al. Estimating regional evapotranspiration using a satellite-based wind speed avoiding Priestley-Taylor approach[J]. Water, 2021, 13(21): 3144.

[14] ZHU Wenbin, TIAN Shengrong, WEI Jiaxing, et al. Multi-scale evaluation of global evapotranspiration products derived from remote sensing images: accuracy and uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2022, 611: 127982.

[15] CASTELLI M. Evapotranspiration changes over the European Alps: consistency of trends and their drivers between the MOD16 and SSEBop algorithms[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4316.

[16] ELNASHAR A, WANG Linjiang, WU Bingfang, et al. Synthesis of global actual evapotranspiration from 1982 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(2): 447-480.

[17] YUAN Ling, MA Yaoming, CHEN Xuelong, et al. An enhanced MOD16 evapotranspiration model for the Tibetan Plateau during the unfrozen season[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(7): e2020JD032787.

[18] SENAY G B, FRIEDRICHS M, MORTON C, et al. Mapping actual evapotranspiration using Landsat for the conterminous United States: Google Earth Engine implementation and assessment of the SSEBop model[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 275: 113011.

[19] 孙静静.黑河中游荒漠绿洲区遥感蒸散发估算及耗水特征分析[D].南京:河海大学.2023.

[20] DÖLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 1-10.

[21] SALAZAR-MARTÍNEZ D, HOLWERDA F, HOLMES T R H, et al. Evaluation of remote sensing-based evapotranspiration products at low-latitude eddy covariance sites[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127786.

[22] WANG Haibo, LI Xin, TAN Junlei. Interannual variations of evapotranspiration and water use efficiency over an oasis cropland in arid regions of north-western China[J]. Water, 2020, 12(5): 1239.

[23] 甘肃省水利厅.甘肃省水资源公报(2013—2018)[R].兰州:甘肃省水利厅,2019.

[24] TIAN Xin, DONG Jianzhi, JIN Shuangyan, et al. Climate change impacts on regional agricultural irrigation water use in semi-arid environments[J]. Agricultural Water Management, 2023, 281: 108239.