

引用格式:何韶阳,田静,张永强.三种高分辨率地表蒸散发产品在华北地区的验证与对比[J].资源科学,2020,42(10):2035-2046. [He S Y, Tian J, Zhang Y Q. Verification and comparison of three high-resolution surface evapotranspiration products in North China[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 2035-2046.] DOI: 10.18402/resci.2020.10.19

三种高分辨率地表蒸散发产品在华北地区的验证与对比

何韶阳^{1,2}, 田静¹, 张永强¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京100101;
2. 中国科学院大学,北京100049)

摘要:华北平原是中国重要的农业主产区,同时也是世界上水资源短缺最为严峻的地区之一。地表蒸散发(ET)是水资源消耗的最大项,因此获取准确的ET数据是华北平原水资源管理的重要基础。本文对全球3种高分辨率ET产品在华北地区进行精度验证和时空对比,以期选择更适用于华北平原的高分辨率ET数据提供参考信息,更好地为水资源的研究和管理服务。通过与涡动相关测量数据对比,研究显示PML_V2产品在华北地区精度最高,其次是SSEBop_V4,最后是MOD16A2,相关系数分别为0.81、0.74和0.52;均方根误差分别为0.87、1.52和1.44 mm/d,PML_V2与站点观测值的波动趋势一致性最高。3种产品在小麦生长季的估算值与观测值的相关性均高于玉米生长季,SSEBop_V4和PML_V2估算值分别在小麦季和玉米季与观测值具有最高的相关性。通过3种产品相互之间的对比,结果发现PML_V2和SSEBop_V4在空间分布上较一致,相关系数最高,为0.76;MOD16A2的空间分布与其他2个产品差异较大;三者的最大差异出现在耕地区。从2003—2018年的变化趋势上,MOD16A2在3种土地利用类型下明显呈增加趋势,而SSEBop_V4和PML_V2无明显变化。该研究结果有助于评估每种产品的质量 and 不确定性,以改进ET算法和产品质量。

关键词:蒸散发;高分辨率;精度验证;时空变化;涡动相关;Google Earth Engine (GEE);生长季;华北平原

DOI :10.18402/resci.2020.10.19

1 引言

华北平原作为世界上水资源短缺最为严峻的地区之一,大部分降水都由地表蒸散发(evapotranspiration, ET)直接消耗返回至大气中,ET是水资源消耗的最大项^[1,2]。ET作为能量平衡和水量平衡的重要分量,受土壤、植被和气候等要素影响^[3,4]。这些要素在区域尺度上具有空间变异性,基于遥感数据时空特性,将区域尺度土壤、植被和气候信息引入ET模型,为评估下垫面较为复杂的华北平原ET提供了有效手段。因此对华北平原ET进行准确的估算是进行水资源管理的重要基础。截至目前,国

内诸多研究人员开展了华北地区ET的估算研究,例如陈鹤等^[5]基于土壤热通量改进的地表能量平衡模型估算出华北平原农田区ET量,实现了区域尺度地表蒸散发时空分布的连续模拟;Jia等^[6]基于能量平衡和Penman-Monteith(PM)公式法的ETwatch系统模拟出2002—2009年中国海河流域ET,并详细分析了ET的误差来源和验证过程中的不确定性;莫兴国等^[7]基于PM法和双源Priestley-Taylor(PT)模型模拟了华北平原2000—2009年的ET,并分析了ET的时空格局和演变特征;田静等^[8]基于地表温度和植被指数梯形空间的算法估算了2004年

收稿日期:2020-05-06;修订日期:2020-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41671354);国家重点研发计划项目(2016YFA0602501)。

作者简介:何韶阳,女,河南新乡人,硕士生,研究方向为遥感水文和水足迹。E-mail: hesy.18s@igsnr.ac.cn

通讯作者:田静,女,辽宁阜新人,博士,副研究员,主要从事遥感水文研究。E-mail: tianj.04b@igsnr.ac.cn

3—6月华北平原的土壤蒸发和植被蒸腾量,评估了梯形法在华北平原的适用性。但是,目前尚缺乏能够被广泛使用的ET数据产品。由于使用的输入数据、模型方案和算法等方面的差异,不同的ET产品在不同地区具有不同的精度和适用性^[9,10]。如Chen等^[11]基于中国及其周边的23个涡动相关仪观测站点对5种蒸散经验模型和3种过程模型进行对比,发现由于模型结构和输入数据不同,蒸散的年际变异性在不同的模型之间存在显著差异。苏涛^[12]基于9套再分析ET数据,对全球蒸发量的时空变化特征和成因进行研究,发现5套ET数据在中国西北至青藏高原西北部和东南沿海地区差别较大。Xue等^[13]采用水量平衡方法评价了4种ET产品,发现全球陆地数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)和Zhang等^[14]的ET产品分别在长江流域和黄河流域表现最好。因此,在应用ET产品时最首要的工作是在研究区对产品进行详尽的验证和对比。区域尺度的ET研究通常需要较高分辨率的数据支撑,目前国际上高空间分辨率(≤ 1 km尺度)且更新较快的ET产品主要有Penman-Monteith-Leuning Version 2 (PML_V2)、Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MOD16A2 (MODIS

MOD16A2)和Simplified Surface Energy Balance model Version 4 (SSEBop_V4),分辨率分别是500 m, 500 m和1 km。目前针对华北平原高分辨率ET产品的比较研究较少。本文的目标是对上述3种高分辨率ET产品在华北平原5个省市进行验证和比较,从而为选择更适用于华北平原的高分辨率ET产品提供参考信息,更好地为水资源的研究和管理服务。

2 研究区概况

本文的研究区为包含北京市、天津市以及河北省、河南省和山东省共5省市的华北平原地区,地处北纬 31° — 42° ,东经 110° — 122° 。地貌区划如图1a所示,可分为中部的河北平原、鲁西北平原、豫东平原,北部的坝上高原、冀北山地、北京西北山地,西部的冀西山地、豫北山地,南部的豫西山地、南阳盆地和豫南山地,以及东部的鲁中山地和鲁东丘陵。研究区土地利用以耕地为主,图1b显示了由MCD12Q1.006 IGBP产品重归类后的2017年研究区土地利用图。由国家统计局分省年度数据库^[15]计算得出2009—2018年华北平原地区年均水资源总量800亿 m^3 ,占全国水资源总量2.88%,水资源较为匮乏;该区面积52.78万 km^2 ,年均农作物播种面积

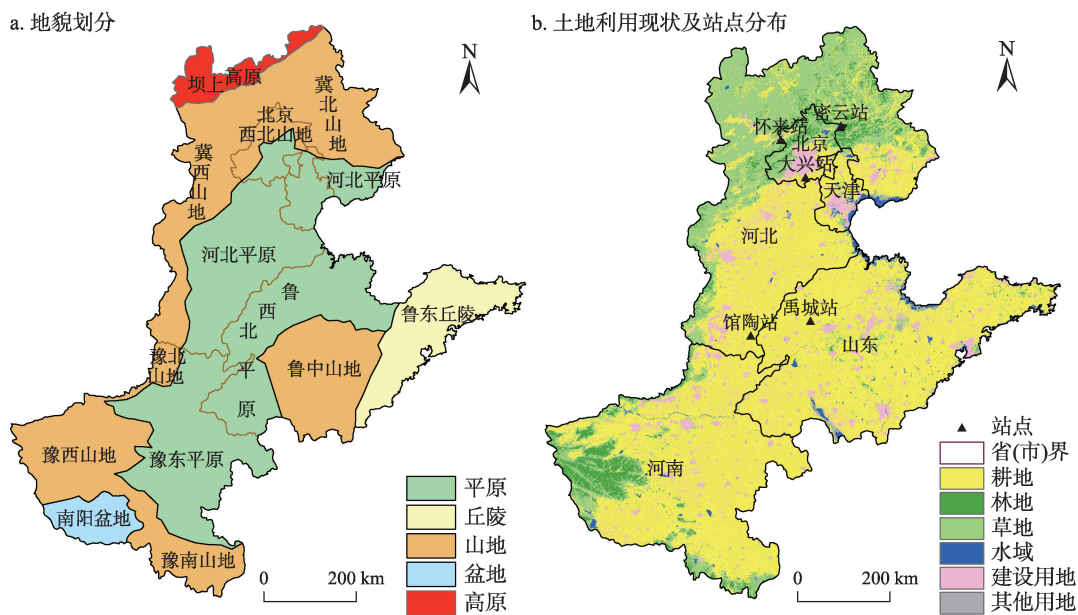


图1 华北平原地区的地貌划分(a)和土地利用现状及通量站点分布(b)

Figure 1 Geomorphological map (a) and land use type and locations of five flux stations (b) on the North China Plain

2020年10月

为 34.59 万 km², 占区域总面积的 66%; 该区是中国最重要的农业主产区之一, 其小麦和玉米的产量分别占全国总产量的 58% 和 27%。区内年降雨量不足 500 mm, 且年内分布不均。由于大量的农业灌溉需要, 每年约有 350 mm 的净耗水量需要提取地下水弥补^[16]。为缓解严重的地下水超采导致的地下漏斗问题, 近年来华北地区实行了节水压采政策^[17,18]。ET 是表征作物耗水量的关键要素, 因此在华北地区准确的 ET 数据对于农业水资源管理更显重要^[19]。

3 数据来源和研究方法

3.1 数据来源

3.1.1 蒸散发产品数据

如前所述, 本文主要针对 3 种高分辨率的 ET 产品在华北地区进行验证和比较。表 1 显示了 3 种产品的主要特征。

PML_V2 的陆地蒸散发产品以 MODIS 数据和 GLDAS 的气象强迫(降水、短波和长波辐射、水汽压、空气温度、风速)数据作为模型输入, 按照土壤蒸发、植被蒸腾和植被截留蒸发 3 个部分进行发布^[20], 产品覆盖全球范围。基于分布在 10 种植被功能类型上的全球 95 个通量站点的参数率定和验证, PML_V2 产品在全球尺度上的均方根误差(RMSE)为 0.73 mm/d^[9]。数据在 GEE(Google Earth Engine)平台免费下载获得, 网址为 [https://developers.](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS_IGSNRR_PML_V2)

[google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS_IGSNRR_PML_V2](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS_IGSNRR_PML_V2)。

MOD16A2 的蒸散发产品以 MODIS 数据和 MERRA GMAO(NASA's Global Modeling and Assimilation Office)气象数据作为输入, 核心是以 Penman-Monteith(PM)公式结合 Jarvis 气孔导度算法为基础估算蒸散发^[21,22]。该数据也可以在 GEE 平台上免费下载获得(https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_006_MOD16A2)。

SSEBop_V4 的蒸散发产品以 MODIS 数据和 GLDAS 气象数据作为模型输入, 基于简化的地表能量平衡(SSEB)方法对每个像素使用了预定义的“热”和“冷”边界条件估算蒸散发^[23-25], 产品覆盖全球范围。该数据发布于 USGS FEWS NET 网站(<https://edcintl.cr.usgs.gov/downloads/sciweb1/shared/fews/web/global/dekadal/eta/downloads/>)。

3.1.2 涡动相关通量观测数据

本文在研究区内共收集到 5 个地表通量观测站的数据(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>; <http://www.cnern.org.cn/>), 分别是北京市的大兴站、密云站, 河北省的怀来站、馆陶站以及山东省的禹城站, 地理分布见图 1b。这些站点及观测数据的简要信息见表 2。本文使用各个站点观测的潜热通量进行验证, 观测数据的输出周期 30 分钟, 单位 W/m²^[26,27]。

表 1 3 种高分辨率蒸散发产品

Table 1 Three evapotranspiration products with high resolution

产品名称	时间跨度	时间分辨率/天	空间分辨率/m	方法原理
PML_V2	2002.7—2019.9	8	500	基于 Penman-Monteith 公式和光合速率-气孔导度模型计算而得
MOD16A2	2001.1—现在	8	500	基于 Penman-Monteith 公式和 Jarvis 气孔导度模型计算而得
SSEBop_V4	2003.1—现在	10	1000	基于简化的地表能量平衡(SSEB)方法对每个像素使用了预定义的“热”和“冷”边界条件估算蒸散发

表 2 华北平原地区 5 个通量观测站情况

Table 2 Five flux stations on the North China Plain

站点名称	站点简称	所在县(区、市)	经度/°E	纬度/°N	海拔/m	观测时间
大兴站	DX	北京市大兴区	116.43	39.62	20	2008年1月1日—2010年12月27日
密云站	MY	北京市密云区	117.32	40.63	350	2008年1月1日—2010年12月29日
怀来站	HL	河北省怀来县	115.79	40.35	480	2013年1月1日—2017年12月31日
馆陶站	GT	河北省馆陶县	115.13	36.52	30	2008年1月1日—2010年12月31日
禹城站	YC	山东省禹城市	116.57	36.82	28	2008年1月1日—2010年12月31日

各个通量观测站的下垫面土地覆盖类型均为耕地,观测仪器为涡动相关系统。

3.1.3 土地覆盖数据

为了对比不同土地利用类型下不同蒸散发产品之间的差异,本文使用了MODIS全球500 m土地覆盖类型产品(MCD12Q1.006),时间跨度为2003—2018年。该产品使用Friedl的全球土地覆盖算法,根据MODIS Terra和Aqua反射率数据的监督分类结果将全球划分为16类土地利用类型^[28,29]。数据发布在GEE平台(https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_006_MCD12Q1)。

3.2 研究方法

3.2.1 通量观测数据和ET产品的时空匹配

为保证观测数据和ET产品的单位一致,本文利用公式(1)先将潜热通量观测数据的单位由W/m²转换为mm/d。

$$O = \frac{LE}{\lambda} \quad (1)$$

式中: O 表示由观测值转换得到的蒸散发值, LE 代表潜热通量, λ 为水蒸发潜热(2.45×10^6 J/kg)。

PML_V2、MOD16A2、SSEBop_V4蒸散发产品分别是8天平均日值(mm/d),8天总和(mm/8d)以及10天总和(mm/10d),因此,本文将后两者产品和台站的观测数据处理成8天平均日值和10天平均日值,保证观测数据时间尺度与ET产品对应。同时,根据5个通量观测站的经纬度信息提取每个ET产品对应像元的ET值,保证空间位置上与ET产品匹配。

3.2.2 ET产品验证和对比的指标

本文通过站点尺度上ET产品与地面观测数据的对比实现精度验证,通过3种产品在时空分布上的对比实现对它们的差异分析。

在站点尺度上,研究中使用线性相关系数(R),均方根误差($RMSE$)和偏差率($Bias$)对3种ET产品进行精度验证评价,见公式(2)–(4)。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \times \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N \times \bar{O}} \quad (4)$$

式中: P_i 为估测值, O_i 为观测值, \bar{P} 为估测平均值, \bar{O} 为观测平均值, i 表示第 i 个样本, n 为样本总数。

在产品间的时空对比上,使用 R 和 $RMSE$ 指标,逐象元比较每2个产品间的相似与差异,从而总结2003—2018年PML_V2、MOD16A2和SSEBop_V4蒸散发产品的时空差异。因为SSEBop_V4产品的时间分辨率为10天,为与其他2个产品保持一致,本文先将SSEBop_V4产品的10天总和求平均获得该10天的日均值,再根据MOD16A2和PML_V2的8天的时间,将对应时间的SSEBop_V4产品的日平均值在这8天内求和,从而整合为8天的结果与其他2个产品对比。

3.2.3 土地覆盖类型重归类和统计

为对比3种产品在不同土地覆盖类型上的差异,结合研究区2003—2018年土地利用的实际情况,本文将MCD12Q1.006 IGBP产品的16类土地覆盖类型重归类为林地、草地、耕地、水域、建设用地和其他用地共6类,重归类方法见表3。根据重新归类的土地利用类型分别计算每年不同产品在林地、草地、耕地的ET平均值,最后统计并对比每种产品在3种土地类型的多年ET平均值。

4 结果与分析

4.1 3种高分辨率蒸散发产品的精度验证

在站点尺度上,3种蒸散发产品在华北平原地区的模拟效果差异较大。总体来说,3种产品的估算值与各个站点观测值的相关系数处于0.52~0.81之间(图2)。其中,PML_V2与观测值之间具有最高的相关性,相关系数为0.81,其次是SSEBop_V4,相关系数为0.74,而MOD16A2在华北平原地区的模拟效果最差,相关系数为0.52。基于样本数据点的趋势线和1:1线比较分析,发现SSEBop_V4整体上存在高估现象,而其他2个ET产品存在低估现象,MOD16A2产品低估尤为明显。这可能是由于

表3 对MCD12Q1土地覆盖数据重归类的方法

Table 3 Reclassification method for the land cover data of MCD12Q1

重归类的土地覆盖类型	包含的IGBP土地覆盖类型	对应的IGBP编码
林地	常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、郁闭灌丛、稀疏灌丛	1、2、3、4、5、6、7
草地	木本稀树草原、稀树草原、草地	8、9、10
耕地	耕地、耕地和天然植被混合体	12、14
建设用地	城市和建成区	13
水域	水域	17
其他用地	永久湿地、永久冰雪、裸地和低植被覆盖区	11、15、16

MOD16A2算法的植被气孔在夜间关闭的假设导致了ET值低估^[16,30]。PML_V2的RMSE和Bias绝对值最小,分别为0.87 mm/d和6.27%,小于MOD16A2的1.44 mm/d和39.27%,以及SSEBop_V4的1.52 mm/d和35.69%。Bias的正负情况也很好说明了ET产品的高估或低估现象。

将3种ET产品分别与5个观测站的观测结果进行比较,统计结果如表4所示。总体上除禹城站,PML_V2与其余站点的观测值具有最高的相关性

数,处于0.80~0.95之间,其中,PML_V2在密云站的估算值效果最好,R为0.95,但是存在低估现象。关于SSEBop_V4产品,5个站点的相关系数也都分布在0.73~0.90之间,具有较强的相关性,其中馆陶站的相关性为0.90,但是存在高估现象。另外,MOD16A2在5个站点的估算值都出现不同程度的低估现象,其中Bias绝对值最大的禹城站与该ET产品的相关性最差(为0.20),而密云站与该ET产品的相关性系数最高(为0.90)。

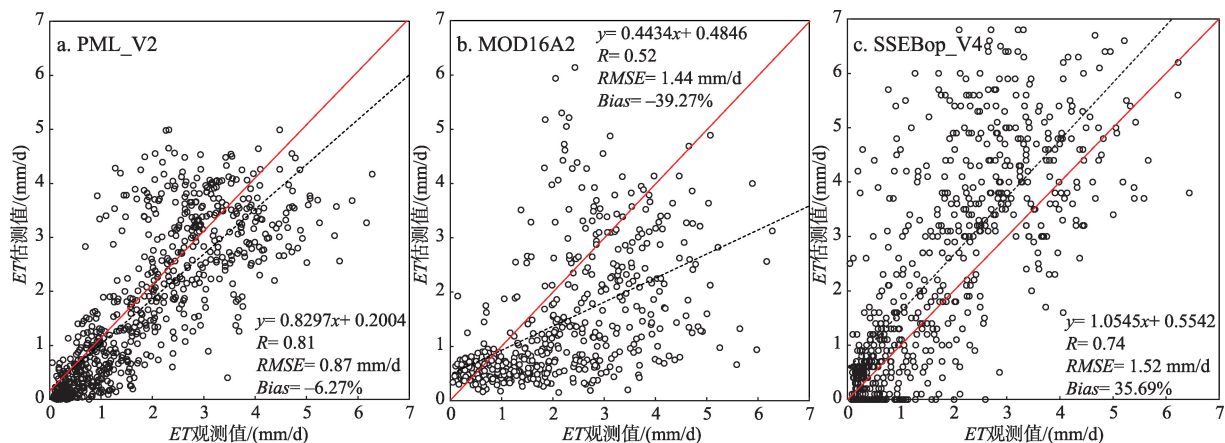


图2 日均ET估测值与5个通量塔站点的涡动相关仪测量值的比较

Figure 2 Comparison of the simulated daily evapotranspiration (ET) and eddy covariance measurements from the 5 flux stations

表4 日均ET估测值在5个通量观测站的精度验证

Table 4 Accuracy evaluation of the simulated daily evapotranspiration (ET) at the five flux stations

站点名称	PML_V2			MOD16A2			SSEBop_V4		
	R	RMSE/(mm/d)	Bias/%	R	RMSE/(mm/d)	Bias/%	R	RMSE/(mm/d)	Bias/%
大兴站	0.80	1.08	-24.22	0.51	1.92	-57.71	0.73	1.19	-8.15
馆陶站	0.91	0.61	12.08	0.56	1.24	-33.04	0.90	1.14	26.21
怀来站	0.80	0.91	0.68	0.55	1.29	-14.45	0.75	2.27	114.76
密云站	0.95	0.49	-12.32	0.90	0.81	-24.81	0.88	0.77	-0.01
禹城站	0.77	0.98	-5.50	0.20	3.40	-65.87	0.83	1.29	29.55

因为华北地区以农田用地为主,且以冬小麦和夏玉米为主要作物,为更好地衡量3种ET产品在时间尺度上以及对作物耗水估算的准确性,本文对各个站点的观测值与ET产品估算值分别从月尺度,和冬小麦、夏玉米2个生长季进行比较分析。图3显示了多年月均值的比较。结果表明,3种ET产品均表现出明显的季节性特征,均为夏季最大,冬季最小。这主要是由于夏季植被蒸腾较大所致。同时,不同产品在冬季ET的差异较小,而夏季差异较大。估算值与站点观测值的季节变化相比,PML_V2与站点观测值的波动趋势一致性最高,而SSEBop_V4的ET估算值整体上存在高估现象,明显高估时期为5—10月,MOD16A2存在低估现象,明显低估时期为3—7月。观测数据显示6月出现ET的低值,这主要由华北地区冬小麦收割引起。PML_V2产品计算时使用了平滑后的MODIS叶面积指数(leaf area index, LAI)产品,平滑后的LAI产品未能显示出6月份由于小麦收割导致的LAI低值,导致该产品未在6月出现低值。SSEBop_V4产品未显示此特征,主要是由于其输入信息缺少植被物候信息^[17]。

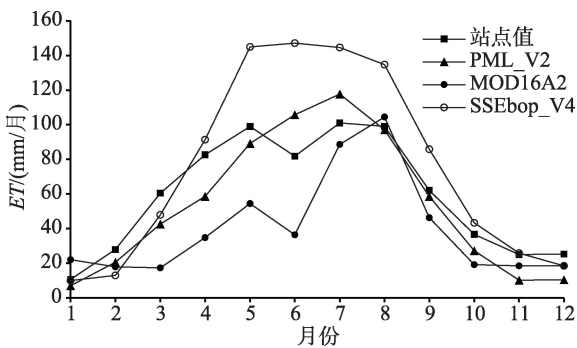


图3 ET估测值和站点观测值的季节变化

Figure 3 Seasonal variations of the simulated evapotranspiration (ET) and site observations

表5显示了3种ET产品在冬小麦和夏玉米生长季与观测值的对比,因为密云和怀来观测站为一季作物,故表5的分析中只使用了其余3个观测站的数据。由表5可见,3种产品在小麦生长季与观测值的相关性均高于玉米生长季。其中,SSEBop_V4和PML_V2的ET值与观测值在小麦季具有较高的相关性, R 分别为0.86和0.85;PML_V2的ET值与观测值在玉米季具有最高的相关性, R 为0.46。另外,3个产品在小麦生长季的Bias均为负值,尤其是MOD16A2和PML_V2,Bias分别为-51.32%和-26.16%,这与图3小麦生长季节变化出现的低估现象吻合。同时,从各ET产品在小麦季和玉米季的RMSE值分析,可以发现SSEBop_V4和PML_V2在小麦季的ET估算值与观测值误差更小,模拟效果更好,而MOD16A2相反。

4.2 3种高分辨率蒸散发产品在时空尺度上的对比

以PML_V2、MOD16A2和SSEBop_V4产品共有的2003年1月—2018年12月为研究时段,分别计算3种产品的多年平均值。2003—2018年,华北平原地区PML_V2、MOD16A2和SSEBop_V4的ET年平均值分别是601 mm/a、514 mm/a和694 mm/a,其中PML_V2的ET值与研究区年平均降水量596 mm近似持平,而MOD16A2和SSEBop_V4的ET值分别比年均降水量低82 mm和高98 mm。图4显示了3种ET产品年平均值的空间分布。3种ET产品年平均值在华北平原地区的总体趋势为南高北低,结合该区的地貌划分,具体表现在:三者共有的ET明显低值区分布在区域北部的坝上高原和东部的鲁东丘陵,ET明显高值区分布在黄河以北的豫东平原和鲁西北平原构成的中部农业生态区。每个产品的空间差异表现在,PML_V2最高值区分布于区域南部的豫东平原,最低值区在坝上高原;MOD16A2最

表5 ET估测值在生长季与观测值的对比

Table 5 Comparison between the simulated evapotranspiration (ET) and site observations in the growing season

蒸散发产品	小麦生长季(当年10月初—次年6月中旬)			玉米生长季(当年6月中旬—9月末)		
	R	RMSE/(mm/d)	Bias/%	R	RMSE/(mm/d)	Bias/%
PML_V2	0.85	0.89	-26.16	0.46	1.03	10.41
MOD16A2	0.61	1.63	-51.32	0.29	1.49	-21.50
SSEBop_V4	0.86	0.88	-3.81	0.20	1.86	41.24

2020年10月

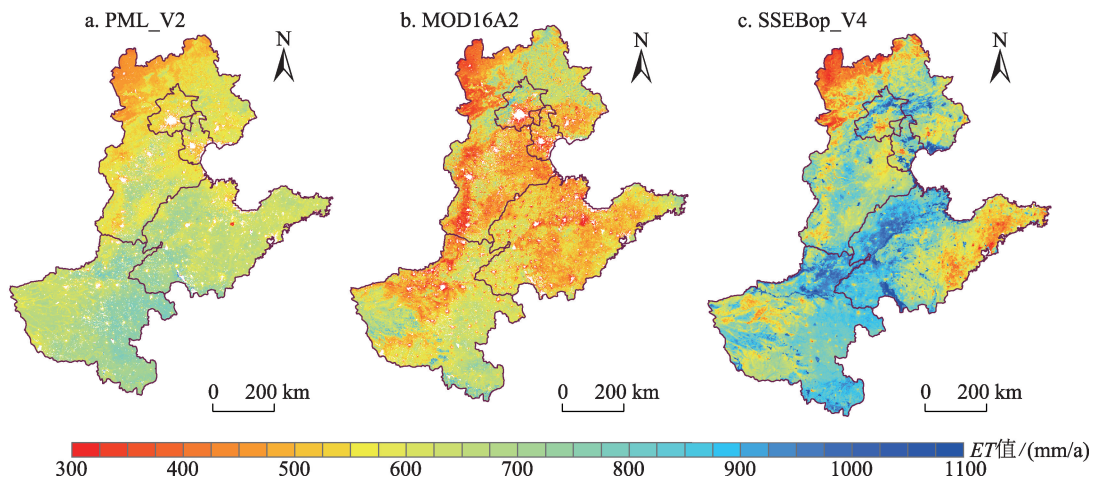


图4 2003—2018年3种产品估算的年均ET空间分布

Figure 4 Mean annual evapotranspiration (ET) spatial distribution estimated for the three products, 2003-2018

高值区位于区域南部的豫西、豫南山地以及北京西北山地,而最低值区除了坝上高原,还包括太行山脉组成的冀西山、豫北山地;SSEBop_V4的最高值区不仅包含黄河以北的豫东平原和鲁西北平原,还包括北京西北山地。显然,PML_V2和SSEBop_V4产品在空间分布上较一致,但SSEBop_V4产品具有更大的数值跨度,在高值区ET值更高,在低值区值更低。

依据表3中的土地覆盖类型,分别统计出3种ET产品2003—2018年在耕地、林地和草地每年的ET值,其时间序列变化如图5所示。结果表明:总体上,耕地和草地的3种ET产品的估计值均为SSEBop_V4>PML_V2>MOD16A2,林地显示出,SSEBop_V4>MOD16A2>PML_V2;耕地的PML_V2、

MOD16A2和SSEBop_V4的ET多年平均值分别为634 mm/a、419 mm/a和708 mm/a。林地的PML_V2、MOD16A2和SSEBop_V4的多年ET平均值分别为615 mm/a、623 mm/a和815 mm/a。草地的PML_V2、MOD16A2和SSEBop_V4的多年ET平均值分别为534 mm/a、512 mm/a和628 mm/a。三者的最大差异出现在ET估算值较高的耕地,这说明3种ET产品在人类干扰程度强的地区存在很大的差异性。

针对每个产品,SSEBop_V4表现出林地>耕地>草地;PML_V2表现出耕地>林地>草地;MOD16A2表现出林地>草地>耕地,三者完全不同。从2003—2018年的变化趋势上,MOD16A2在3种土地利用类型下明显呈增加趋势,而SSEBop_V4和PML_V2

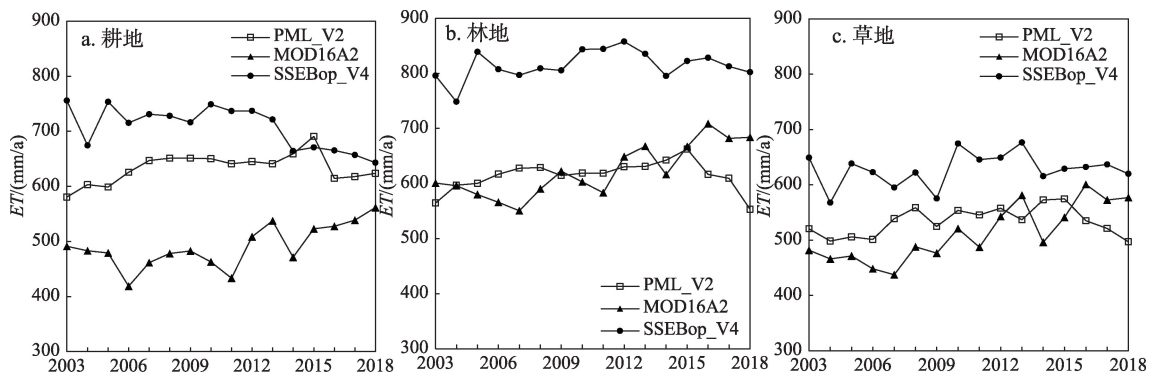


图5 2003—2018年3个产品ET估算值在耕地、林地、草地的年际变化对比

Figure 5 Annual variations of estimated evapotranspiration (ET) of cropland, forest land, and grassland of the three products, 2003-2018

变化较平稳。耕地 SSEBop_V4 在 2014 年后出现明显的下降。

为在空间尺度上更好对比 3 种 ET 产品之间的一致性,以 2003—2018 年 3 种产品在 8 天尺度上的 ET 值为样本数据,基于 GEE 平台,采用双线性插值方法重采样至 1 km 相同分辨率下,分别逐象元计算每 2 种产品的 *R* 和 *RMSE*,其空间分布如图 6 和图 7 所示。总体上,3 种 ET 估算值之间的相关系数具有相同的空间分布格局,即林地和草地的 ET 估算值相关性高,然而不同 ET 产品之间的相关程度存在差异性。其中,PML_V2 和 SSEBop_V4 之间的相关系数最高,相关系数大于 0.8 的面积占整个研究区面积的 46.04%(表 6),表明在时间序列上 2 种 ET 估算值具有相似的时间变化,尤其是在林地,平均相

关系数达到 0.86,且相关系数大于 0.8 的林地面积占研究区林地总面积的 90.11%;草地次之,平均相关系数为 0.79;而受人类影响程度较大的耕地 ET 估算值的相关性较小,平均相关系数为 0.75,相关性小于 0.6 的耕地面积占研究区总耕地面积的 10.39%。PML_V2 和 MOD16A2、SSEBop_V4 和 MOD16A2 的估算值相关性明显小于 PML_V2 和 SSEBop_V4 的结果,其中相关系数小于 0.6 的面积分别占整个研究区面积的 36.5% 和 43.66%(表 6),说明 MOD16A2 的产品与其他 2 个产品差异最大。

通过对比像元尺度上 3 种 ET 产品之间的 *RMSE* 发现(图 7),林地和草地的 ET 估算值差异小,主要分布在 6 mm/8d 以下,且不同 ET 产品之间呈现出不同的差异程度。总体上,PML_V2 和 SSEBop_V4 之

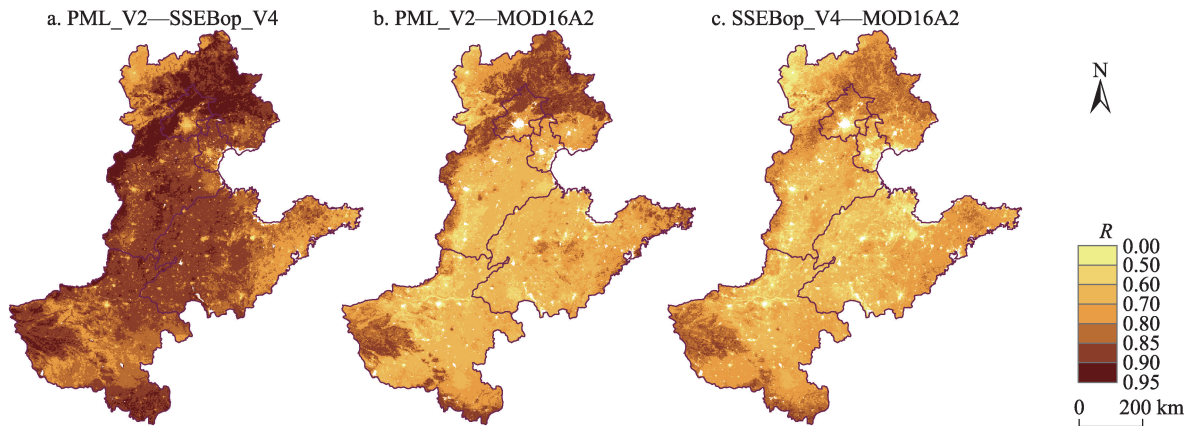


图 6 2003—2018 年 PML_V2、MOD16A2 和 SSEBop_V4 的 ET 估算值逐像元的 *R* 分布
Figure 6 Pixel level *R* distribution of the estimated evapotranspiration (*ET*) of the three products, 2003-2018

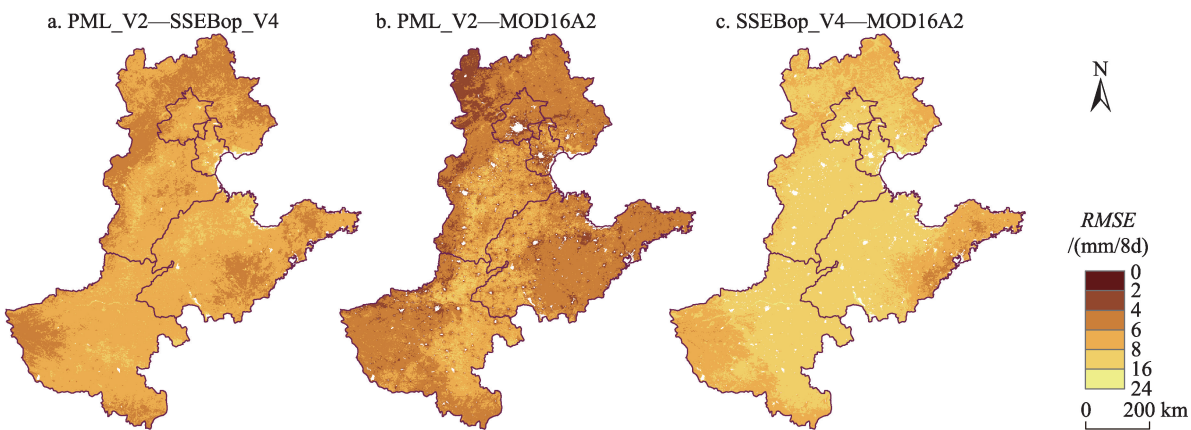


图 7 2003—2018 年 PML_V2、MOD16A2 和 SSEBop_V4 的 ET 估算值逐像元的 *RMSE* 分布
Figure 7 Root mean square error (*RMSE*) distribution of the estimated evapotranspiration (*ET*) of the three products, 2003-2018

表6 不同土地类型ET产品在R和RMSE分组下的面积比

Table 6 Areal proportion of the evapotranspiration ET products of different land types by R and root mean square error (RMSE)

蒸散发产品	土地类型	R		RMSE	
		>0.8的占比/%	<0.6的占比/%	>8 mm/8 d的占比/%	<6 mm/8 d的占比/%
PML_V2-SSEBop_V4	耕地	48.41	10.39	0.83	66.92
	林地	90.11	0.14	0.003	97.72
	草地	42.51	7.25	0.13	82.08
	研究区	46.04	10.45	1.01	69.78
SSEBop_V4-MOD16A2	耕地	14.91	42.43	78.23	1.78
	林地	14.95	4.87	44.37	0.32
	草地	5.02	52.92	50.63	0.63
	研究区	11.71	43.66	69.00	1.47
PML_V2-MOD16A2	耕地	32.63	32.37	50.25	6.49
	林地	21.42	3.89	0.03	87.37
	草地	8.69	52.15	1.34	74.93
	研究区	24.36	36.50	34.27	24.61

间差异水平小于6 mm/8d,且RMSE<6 mm/8d和>8 mm/8d的面积分别占研究区面积的69.78%和1.01%(表6)。尤其是在林地和草地(图6和图7),林地和草地RMSE<6 mm/8d的面积分别占研究区总林地和总草地面积的97.72%和82.08%,表明林地和草地的ET估算值二者较接近。SSEBop_V4和MOD16A2之间的RMSE<6 mm/8d的面积仅占研究区总面积的1.47%,而RMSE>8 mm/8d的面积占研究区总面积的69%,其中耕地的差异水平最大, RMSE>8 mm/8d和<6 mm/8d的面积分别占研究区总耕地面积的78.23%和1.78%。PML_V2和MOD16A2之间的RMSE主要分布在(0.6~0.8) mm/8d之间,这部分面积占研究区总面积的41.12%,其中耕地的差异水平也是最大, RMSE>8 mm/8d和<6 mm/8d的面积分别占研究区总耕地的50.25%和6.49%。

5 结论

目前针对地表蒸散发产品的验证与对比研究较多,但缺乏对华北平原高分辨率ET产品的比较探讨。本文针对3种高分辨率蒸散发产品(PML_V2、MOD16A2和SSEBop_V4),利用涡动相关通量站观测数据在华北地区进行了ET产品精度分析和验证,同时对比分析了2003—2018年3种ET产品时空差异。研究发现:

(1)3种蒸散发产品在本文区的模拟效果差异较大,PML_V2的ET产品在华北平原地区与涡动相关仪的观测结果最接近,其次是SSEBop_V4的ET产品,而MOD16A2的ET产品精度最低。在时间尺度上,3种ET产品均可以模拟出ET的季节性特征,即ET在夏季最大,冬季最小;SSEBop_V4的ET值整体上存在高估现象,MOD16A2存在低估现象。植被物候信息考虑不足,可能是SSEBop_V4和PML_V2未能捕捉到小麦收割季节的物候特征的原因;3种ET产品在小麦生长季的估算值与观测值的相关性均高于玉米生长季,其中SSEBop_V4和PML_V2的ET值分别在小麦季和玉米季均具有最高的相关性。

(2)3种产品相互对比,PML_V2和SSEBop_V4产品捕捉的ET空间分布较一致,相关系数最高为0.76,但SSEBop_V4产品可能受植被冠层复杂度的影响,导致ET值具有更大的数值跨度,在高值区ET值更高,在低值区值更低。MOD16A2产品的空间分布与其他2个产品差异较大,与PML_V2和SSEBop_V4的相关系数分别为0.56和0.53。从2003—2018年的变化趋势上,MOD16A2在耕地、林地和草地下明显呈增加趋势,而SSEBop_V4和PML_V2变化较平稳。三者的最大差异出现在ET估算值较高的耕地地区,这说明3种ET产品在人类干扰程度强

的地区存在很大的差异性。

由于涡动相关观测尺度与ET产品像元尺度的尺度不匹配^[31-34],加之观测站点下垫面的异质性,尤其密云站和大兴站地表异质性较大,因此直接利用涡动相关观测值对ET产品进行验证仍存在不确定性。结合通量观测足迹模型进行站点观测值的尺度扩展,从而获取像元尺度/区域尺度ET“地面真值”是需要进一步开展的工作。另外,本文没有对涡动相关观测的通量数据进行能量闭合的订正,这可能也会带来验证误差。

致谢: 感谢国家青藏高原科学数据中心和国家生态科学数据中心提供华北平原地区的涡动相关通量观测数据, Google Earth Engine 平台提供 PML_V2 和 MOD16A2 蒸散发产品以及土地覆盖数据, USGS FEWS NET 网站提供 SSEBop_V4 蒸散发产品。

参考文献(References):

- [1] 易珍言. 农田区域蒸散发和土壤含水量协同获取方法研究与应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. [Yi Z Y. Research and Application of Collaborating Acquisition of Evapotranspiration and Surface Soil Moisture over Irrigated Area[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.]
- [2] 郭梦瑶, 余敦先, 张利平, 等. 渭河流域潜在蒸散量变化的气候归因[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 907-919. [Guo M Y, She D X, Zhang L P, et al. Climate explanation of the potential evapotranspiration changes in Weihe River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 907-919.]
- [3] Wang J F, 刘元波, 张珂. 最大熵增地表蒸散模型: 原理及应用综述[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 596-605. [Wang J F, Liu Y B, Zhang K. The maximum entropy production approach for estimating evapotranspiration: Principle and applications[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 596-605.]
- [4] Li X Y, He Y, Zeng Z Z, et al. Spatiotemporal pattern of terrestrial evapotranspiration in China during the past thirty years[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259(15): 131-140.
- [5] 陈鹤, 杨大文, 刘钰, 等. 基于遥感模型的华北平原农田区蒸散发量估算[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(Z1): 21-25. [Chen H, Yang D W, Liu Y, et al. Cropland evapotranspiration estimation based on remote sensing model in the North China Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(Z1): 21-25.]
- [6] Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, et al. Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2012, DOI: 10.1029/2011JD017037.
- [7] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和GPP格局及其对气候波动的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 589-598. [Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Patterns of evapotranspiration and GPP and their responses to climate variations over the North China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 589-598.]
- [8] 田静, 苏红波, 孙晓敏, 等. 遥感反演土壤蒸发/植被蒸腾二层模型在华北地区的应用[J]. 地理研究, 2009, 28(5): 1297-1306. [Tian J, Su H B, Sun X M, et al. Application of an operational two-layer model for soil evaporation and vegetation transpiration retrievals in North China[J]. Geographical Research, 2009, 28(5): 1297-1306.]
- [9] Zhang Y Q, Kong D D, Gan R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 165-182.
- [10] 张东, 徐全芝, 张万昌. 汉江上游流域蒸散量计算方法的比较及改进[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 97-103. [Zhang D, Xu Q Z, Zhang W C. Comparison and modification of evapotranspiration estimation method in upper Hanjiang Basin[J]. Resources Science, 2005, 27(1): 97-103.]
- [11] 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.
- [12] 苏涛. 基于多套再分析资料的全球蒸散量时空变化特征及其成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [Su T. Research on Spatial-temporal Variation Characteristics and Its Causes of Global Evaporation Based on Multi-reanalyses Datasets[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]
- [13] Xue B L, Wang L, Li X P, et al. Evaluation of evapotranspiration estimates for two river basins on the Tibetan Plateau by a water balance method[J]. Journal of Hydrology, 2013, 492(7): 290-297.
- [14] Zhang K, Kimball J S, Nemani R R, et al. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006[J]. Water Resources Research, 2010, DOI: 10.1029/2009WR008800.
- [15] 中国国家统计局. 分省年度数据[EB/OL]. (2019-12) [2020-02-01]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Provincial Annual Data[EB/OL]. (2019-12) [2020-02-01]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>.]
- [16] 武夏宁, 胡铁松, 王修贵, 等. 区域蒸散发估算测定方法综述[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 257-262. [Wu X N, Hu T S, Wang

2020年10月

- X G, et al. Review of estimating and measuring regional evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 257–262.]
- [17] 胡振通, 王亚华. 华北地下水超采综合治理效果评估: 以冬小麦春灌节水政策为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5): 101–106. [Hu Z T, Wang Y H. Effectiveness assessment on comprehensive governance of groundwater over-exploitation in North China Plain: The policy of winter wheat's water-saving by reducing spring irrigation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(5): 101–106.]
- [18] 肖李俏. 华北平原地下水节水水压采条件下作物种植制度优化[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018. [Xiao L Q. Optimization of Crop Planting System under the Condition of Reducing the Exploitation of Groundwater in the North of China[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.]
- [19] 曹永强, 李维佳, 赵博雅. 气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 150–160. [Cao Y Q, Li W J, Zhao B Y. Water requirements of spring maize in Northwest Liaoning Province under climate change[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 150–160.]
- [20] Zhang Y Q, Peña-Arancibia J L, McVicar T R, et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19124–19124.
- [21] 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.
- [22] Song L S, Liu S M, Kustas W P, et al. Monitoring and validating spatially and temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 219(15): 72–88.
- [23] Chen M S, Senay G B, Singh R K, et al. Uncertainty analysis of the operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model at multiple flux tower sites[J]. Journal of Hydrology, 2016, 536: 384–399.
- [24] Senay G B, Bohms S, Singh R K, et al. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2013, 49(3): 577–591.
- [25] Senay G B, Budde M E, Verdin J P. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: Validation with the METRIC model[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98: 606–618.
- [26] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 536: 384–399.
- [27] 杨光超, 朱忠礼, 谭磊, 等. 怀来地区蒸渗仪测定玉米田蒸散发分析[J]. 高原气象, 2015, (4): 1095–1106. [Yang G C, Zhu Z L, Tan L, et al. Analysis on evapotranspiration of maize field measured by lysimeters in Huailai[J]. Plateau Meteorology, 2015, (4): 1095–1106.]
- [28] Friedl M A, McIver D K, et al. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and preliminary results[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1–2): 287–302.
- [29] Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, et al. MODIS collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 168–182.
- [30] Wang Q F, Tang J, Zeng J Y, et al. Spatial-temporal evolution of vegetation evapotranspiration in Hebei Province, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(9): 2107–2117.
- [31] Li X, Kiu S M, Li H X, et al. Intercomparison of six upscaling evapotranspiration methods: From site to the satellite pixel[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(13): 6777–6803.
- [32] Liu S M, Xu Z W, Song L S, et al. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 230–231: 97–113.
- [33] Xu T R, Guo Z X, Liu X M, et al. Evaluating different machine learning methods for upscaling evapotranspiration from flux towers to the regional scale[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(16): 8674–8690.
- [34] 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. [Zhang Y, Jia Z Z, Liu S M, et al. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(8): 975–999.]

Verification and comparison of three high-resolution surface evapotranspiration products in North China

HE Shaoyang^{1,2}, TIAN Jing¹, ZHANG Yongqiang¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The North China Plain is a critical agricultural region in China and one of the most severe water deficient areas in the world. Surface evapotranspiration (ET) is the largest component of water resource consumption, therefore obtaining accurate ET data is an important basis for water resource management on the North China Plain. In this study, accuracy verification and spatiotemporal comparison of three global high-resolution ET products were conducted in North China in order to provide a reference for the selection of a high-resolution ET data product that is more suitable for the North China Plain and can better serve the purpose of water resource research and management. Through the comparison with the eddy correlation measurement, the research showed that the PML_V2 product had the highest accuracy in North China, followed by SSEBop_V4 and MOD16A2, with correlation coefficients of 0.81, 0.74, and 0.52, respectively. The root mean square errors were 0.87, 1.52, and 1.44 (mm/d), respectively. PML_V2 showed the highest consistency with the fluctuation trend observed at the site. The correlation between the estimated and observed ET of the three products in the growing season of wheat was higher than that of maize. SSEBop_V4 ET and PML_V2 ET estimates had the highest correlation with the observed ET in wheat season and maize season, respectively. Comparatively, PML_V2 and SSEBop_V4 are more similar in spatial distribution, with the highest correlation coefficient of 0.76. The spatial distribution of MOD16A2 is very different from that of the other two products. The biggest difference of the three products appears in the cultivated land area. In 2003-2018, MOD16A2 showed a clear trend of increase for three land use types, while SSEBop_V4 and PML_V2 showed no obvious change.

Key words: evapotranspiration; high resolution; accuracy verification; spatiotemporal change; eddy covariance; Google Earth Engine (GEE); growing season; North China Plain