

利用陆面模式和遥感经验模型估算半干旱区陆面蒸散量

杨 扬, 王丽娟, 岳 平, 孙旭映, 杜昊霖

(中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省(中国气象局)干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

摘 要:陆面蒸散发是地表水循环和能量循环的重要组成部分,准确的估算蒸散发对区域气候研究和干旱监测有重要意义。利用公用陆面过程模式 CLM 4.0 模式输出的高时间分辨率的净辐射、地表温度作为遥感经验模型的输入,结合 SACOL 站观测资料估算了西北半干旱区的陆面蒸散发,并将估算值与观测值进行了对比分析。结果表明:CLM 模式对净辐射、地表温度的模拟性能较理想,与观测值的 RMSE、MAPE 相对较小,相关性更高。遥感经验模型估算的 SACOL 站陆面蒸散发与实测值的偏差较小,CLM 模式模拟的蒸散发与观测值的一致性较好,但模式较观测值偏大。基于 CLM 模式模拟得到更为准确的净辐射、地表温度和 NDVI 估算得到的蒸散发与观测值的变化趋势较为一致,两者的误差较小,相关性更好,对半干旱区蒸散发的估算精度有显著提高,且能够得到更高时间分辨率的陆面蒸散发。

关键词:陆面蒸散发; 遥感经验模型; 陆面过程模式; 归一化植被指数; 半干旱区

中图分类号:P404; P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0147-07

Terrestrial Evapotranspiration Estimated Based on Remote Sensing Empirical Model and Land Surface Model Over Semi-Arid Regions

YANG Yang, WANG Lijuan, YUE Ping, SUN Xuying, DU Haolin

(Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu (CMA),

Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Land surface evapotranspiration is an important component of surface water and energy cycle. Accurate estimation of land surface evapotranspiration is of great significance to regional climate research and drought monitoring. We used the high temporal resolution net radiation and surface temperature simulated by CLM as the input of the remote sensing empirical statistical model (EMP) to estimate terrestrial evapotranspiration in the semi-arid region of Northwest China based on the observation data of Semi-Arid Climate Observatory and Laboratory of Lanzhou University (SACOL). Compared with the observed values, the results showed that the simulation performance of CLM for net radiation and surface temperature was ideal, the RMSE, MAPE of the net radiation and surface temperature simulated by CLM were relatively small, and the correlation was closer; the deviation between evapotranspiration estimated by EMP and measured values was small; the evapotranspiration simulated by CLM model was in good agreement with the observed values, but the values were larger than the observed values; the trend of evapotranspiration obtained by EMP_CLM which proposed by more accurate net radiation and surface temperature simulated by CLM and NDVI was more consistent with the observed values; the deviation between the two was smaller and the correlation was better. The estimation accuracy of evapotranspiration in semi-arid region was significantly improved, and higher temporal resolution evapotranspiration can be obtained. Generally speaking, the new method can improve the estimation performance of evapotranspiration in semi-arid area.

Keywords: terrestrial evapotranspiration; remote sensing empirical model; land surface model; normalized vegetation index; semi-arid region

收稿日期:2019-09-26

修回日期:2019-12-25

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41775105,41975111);国家自然科学基金重大培育项目(91637106);甘肃省气象局气象科研项目 GS-MAMs2018-12)

第一作者:杨扬(1988—),女,甘肃民乐人,硕士,助理研究员,主要从事陆气相互作用研究。E-mail:yangmeng07.happy@163.com

陆地蒸散发是地表能量和水分平衡的重要组成部分,同时与植物的光合作用紧密相关,影响碳循环过程,因而对区域乃至全球气候产生重要影响^[1-2]。不仅如此,陆面蒸散发对水资源管理、农业种植规划等均具有重要的指导意义^[3]。研究还表明,蒸散发的变化趋势在干旱监测预警方面扮演着至关重要的角色^[4],尤其是当前经常发生的骤发性干旱主要是由区域蒸散量剧增造成的^[5]。在不同的气候背景下,各种气象要素和陆面特性对蒸散发的影响并不相同,因而不同区域的陆面蒸散发存在显著差异,其对陆气相互作用、气候变化及干旱等的影响并不相同^[6-7]。因此,陆面蒸散发的研究一直以来都是国际国内研究的热点科学问题。

一般而言,陆面蒸散发可通过观测和数值模拟获得。目前,陆面蒸散量的测定方法可归纳为水文学法、微气象法、植物生理学法和遥感法。但仪器测量值的空间代表范围有限,如涡动相关法大约为 200~400 m,大孔径闪烁仪大约为 500~5 000 m^[8]。现有的陆面蒸散发观测站点十分稀少,且测量仪器昂贵,维护成本高,难以获取区域非均匀下垫面的陆面实际蒸散发。真正能实现区域蒸散发观测的是卫星遥感方法^[9-10]。但遥感法并不是直接观测蒸散发,而是通过反演出地表温度、净辐射、植被指数等间接计算蒸散发,其精度与反演算法及选取的参数有关^[3]。另外,卫星遥感中通常使用的极轨卫星如 MODIS, TERRA 等对某一地区仅能获取有限的 1 个或 2 个时次的观测数据,无法合理表征日变化或日平均值误差很大,且在陆气相互作用、干旱监测等研究中并不能满足其高时间分辨率的需要。因此,获取高时空分辨率、高精度的陆面蒸散发仍是研究中的一大难点,是当前研究的迫切需要。

针对蒸散发的估算模型可以分为两大类。一类是经验统计模型,这类方法主要采用观测的陆面蒸散量与遥感参数(如地表温度、植被参数)的回归关系估算区域尺度上的陆面蒸散量。例如, Wang 等^[11]、Anderson 等^[12]、Jung 等^[13] 利用蒸散量与辐射、气温、地表温度、土壤热通量、降水及植被参数等的拟合关系建立了估算蒸散发的经验统计模型。这类方法简单易行,可以充分利用遥感资料,但缺点是经验统计模型不考虑蒸散发的具体物理过程,仅仅利用相关关系,计算精度依赖于参数的选取及其反演精度,具有较大的经验性,难以推广到不同地区^[14]。另外,虽然统计模型可以使用遥感资料方便的获得区域尺度的蒸散发量,但受制于遥感资料的时间分辨率,经验统计模型估算的时间分辨率较低。

第 2 类估算模型是基于物理过程的模型,如 Penman 公式、以地表能量平衡为基础的 SEBS 和

SEBAL 等模型、陆面过程模式等。这类模型优点是具有明确的物理结构,可以根据下垫面类型,动态的调整参数等,而且模型的大气驱动变量如气温、相对湿度和风速等的观测均有较高的分辨率,因此能输出高时间分辨率的蒸散发。如全球土壤湿度计划(GSWP)、全球陆面数据同化系统(GLDAS)、中国陆面数据同化系统(CLDAS)等均是利用陆面过程模式模拟得到全球格点、高时间分辨率的地表通量。Haddeland 等^[15] 比较了 11 个模式模拟的陆面蒸散发,发现全球陆面蒸散量在 415~586 mm/a 间变化。Xia 等^[16-17] 表明 NLDAS-2 在区域和流域尺度上, SAC-SMA 模式高估了蒸散量,而 Noah 和 VIC 模式则低估了蒸散量。由于陆面过程模式中的参数化方案、参数选取等均存在较大的不确定性^[18],因而其模拟的蒸散发与观测值也存在较大的偏差。

综上所述,目前遥感观测和经验统计模型能获得陆面蒸散发,但是时间分辨率较低;而陆面过程模式能获得高时间分辨率的蒸散发量,但其偏差较大。为了获得高时间分辨率的陆面蒸散发量,一种可行的方法是结合遥感统计模型和陆面过程模式,利用陆面过程模式输出的高分辨率变量,作为遥感统计模型的输入,最终获得高时间分辨率的蒸散发量。本研究正是基于这种想法,结合公用陆面过程模式 CLM 和遥感经验模型估算了黄土高原半干旱区的蒸散发,并通过与兰州大学半干旱气候与环境监测站 SACOL 的观测资料对比分析,检验该方法的可行性,以期的高时间分辨率的陆面蒸散发估算提供参考。

1 站点概况及所用资料

1.1 站点及观测数据介绍

兰州大学半干旱气候与环境监测站(Semi-Arid Climate Observatory and Laboratory of Lanzhou University, SACOL)位于甘肃省榆中县兰州大学萃英山顶(35.946°N, 104.137°E, 海拔 1 961 m),观测场占地约 8.0 hm²,下垫面较为平坦,为天然荒漠草地,优生植被为多年生草本长芒草,伴生植被为赖草和冷蒿等^[19]。SACOL 站位于中国黄土高原地区,地处温带半干旱气候区,年平均降水量为 381.8 mm,年平均气温 6.7℃,代表了方圆几百公里的半干旱区气候状况^[20]。SACOL 站土壤以黄壤为主,土层深厚、质地疏松、通气透水性强^[21]。Yue 等^[22] 分析了 SACOL 站与其周边 16 个气象观测站日平均地气温差的空间相关关系发现 16 个观测站与 SACOL 站之间的地气温差高度相关,表明该站具有良好的空间代表性,能够代表黄土高原半干旱地区的陆面基本特征。

本文主要使用 SACOL 站 2006—2008 年的近地层观测资料,包括空气温度,相对湿度,风速,大气压

强;向下和向上的短波和长波辐射,感热通量和潜热通量,及土壤温度和含水量。文章使用的蒸散发观测数据来自于涡动相关系统测量,为保证观测数据的可靠性,对 30 min 的原始资料进行二次坐标旋转、超声虚温的侧向风校正和 WPL 修正。然后剔除由于降水、露水等天气导致涡动相关系统观测的异常。

1.2 卫星资料

本文所使用的卫星资料为 2006—2008 年每天的地表温度产品 MOD11A1 和通道反射率产品 MOD09GA,MOD11A1 空间分辨率为 1 km×1 km,MOD09GA 空间分辨率为 500 m×500 m。首先通过 MRT 对 MODIS 产品进行投影转换等处理,再利用最邻近插值法得到 SACOL 站的单站数据,并在数据中剔除有降水的时段,最后得到 SACOL 站的卫星资料总数为 89 组。

2 模型介绍

2.1 遥感经验统计模型

遥感经验统计模型(Remote Sensing Empirical Statistical Model)众多,最常用的为 Wang 等^[11]根据

表 1 遥感经验模型中的系数

系数	0	1	2	3	4
<i>c</i>	0.2838	2.5245 e—05	—0.5190 e—03	0.6903	0.000
<i>d</i>	1.2117	0.05666	—0002531	—0.01341	

2.2 陆面过程模式介绍

CLM 模式(Community Land Surface Model, Version 4.0)是 NCAR 发布的陆面过程模式,是公用地球系统模式 CESM(Community Earth System Model)的一个子模块,包括地球物理化学、生物地球物理、水循环和动态植被过程 4 个部分,广泛应用于气候研究的各个方面^[24]。CLM 模式所需的地表参数主要包括植被功能类型、茎、叶面积指数,植株高度,土壤颜色、质地、有机质含量等,与植被功能类型有关的数据来自于 MODIS 的数据,而土壤质地来自于 IGBP 数据^[24],土壤有机质含量来自于 Lawrence^[25]。CLM 模式地表温度及各层土壤温度的初始值取为 274 K,土壤含水量初始化为 0.3,而最下面的 5 层初始化为 0.0。

2.3 结合陆面过程模式改进遥感经验模型

遥感经验模型中输入的变量是净辐射、地表温度、归一化植被指数和相对湿度,其中净辐射和地表温度、相对湿度均具有非常明显的日变化,而植被指数的日变化较小。Oudin 等^[26]研究表明地表净辐射和温度是估算潜在蒸散发必不可少的因子。为了估算高时间分辨率的蒸散发,需要使用时间分辨率较高的净辐射、地表温度等,利用较易获取的高时

美国 22 个观测站和中国青藏高原 2 个观测站的资料,利用短波辐射 R_{sn} 、气温 T 、相对湿度 RH 及植被指数 VI 建立的经验统计模型估算相应时段净辐射和陆面蒸散发。其后,王丽娟等^[23]提出利用 MODIS 的白天/夜间地表温度来代替 Wang 经验统计模型中的气温来计算蒸散发。改进后的模型不仅表征了下垫面类型对辐射和蒸散发的影响,而且还表征了土壤湿度对辐射和蒸散的影响。然后,利用半干旱区 SACOL 站实测资料重新修正了回归系数,得到了如下修正的经验统计模型:

$$Rn_{es}=R_{sn}(c_0+c_1\cdot st_n+c_2\cdot st_d+c_3\cdot NDVI+c_4\cdot RH) \tag{1}$$

$$ET_{es}=Rn_{es}(d_0+d_1\cdot NDVI+d_2\cdot st_m+d_3\cdot st_d) \tag{2}$$

式中: $c_0\sim c_4$, $d_0\sim d_3$ 为回归系数,分别表示 NDVI 等各项对净辐射、蒸散的贡献比重,各系数的具体值见表 1。 R_{sn} 为短波辐射; st_n 为 MOD11A1 中的夜间地表温度; st_m 和 st_d 分别为 MOD11A1 中的白天和夜间的地表温度均值和差值。

间分辨率大气强迫驱动陆面过程模式,进而模拟得到高时间分辨率的净辐射和地表温度。为此,结合陆面过程模式和经验统计模型后,区域蒸散发的估算方法如下式所示

$$ET_{es}=Rn_m(e_0+e_1\cdot NDVI+e_2\cdot TG_m+e_3\cdot TG_d) \tag{3}$$

式中: Rn_m , TG_m 和 TG_d 分别为 CLM 模式模拟的地表温度均值、地表温度差值, $e_0\sim e_3$ 为新的回归系数,根据 2006 年 SACOL 站的观测数据和 CLM 模式的模拟值进行回归分析,得出(3)式中的系数分别为 $e_0=0.669$, $e_1=0.565$, $e_2=-0.032$, $e_3=0.008$ 。

为了方便起见,经验统计模型简记为“EMP”,陆面过程模式简记为“CLM”,结合经验统计和陆面过程模式的模型简记为“EMP_CLM”。为评估模式模拟性能,给出模拟值与观测值的均方根偏差(Root Mean Bias Error, RMBE)、平均相对误差(Mean Absolute Percent Error, MAPE)和相关系数(Correlation Coefficient, R)定量评估模拟值与观测值的偏差。

3 结果与分析

为了验证模式的计算效果,首先分别给出了利用 EMP 估算和 CLM 模式模拟的 SACOL 站净辐射

与实测值之间的比较。如图 1A 所示,EMP 估算的净辐射与实测值的相关系数为 0.67,均方根误差为 25.93 W/m²,平均相对误差为 16.97%。从图中也可以看出,在净辐射值较大的部分,估算结果与实测值之间较为吻合,不存在偏差特别大的点;而在净辐射值较小的部分,两者之间的偏差较大,这可能与卫星资料受云影响有关。图 1B 中,CLM 模式模拟的净辐射与观测值的相关系数达到了 0.93,相关性较好,均方根误差为 17.74 W/m²,平均相对误差为 12.38%。图 2 给出了 CLM 模式模拟的 2007—2008 年净辐射与观测值日均值的比较。如图 2 所示,

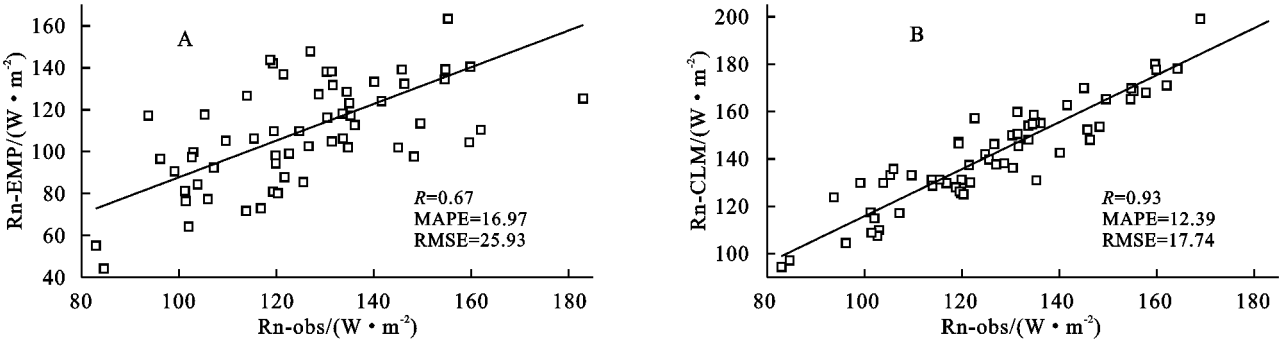


图 1 遥感经验模型估算和 CLM 模式模拟的 SACOL 站净辐射与实测值的比较

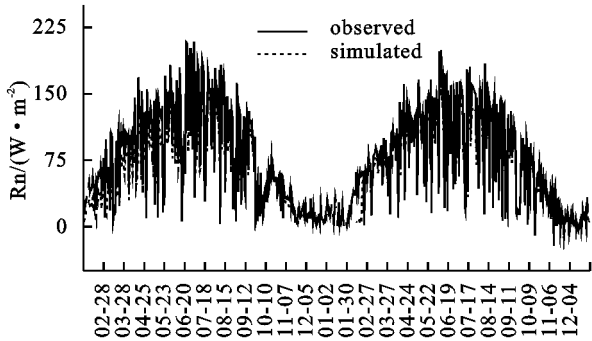


图 2 CLM 模式模拟的 SACOL 站净辐射与观测值的日均值比较(2007—2008 年)

图 3 分别给出了 EMP 中使用的 MODIS 观测的和 CLM 模式模拟的 SACOL 站地表温度与实测值之间的比较。如图 3A 所示,EMP 中地表温度与实测值的相关系数为 0.89,均方根误差为 3.03℃,平均相对误差为

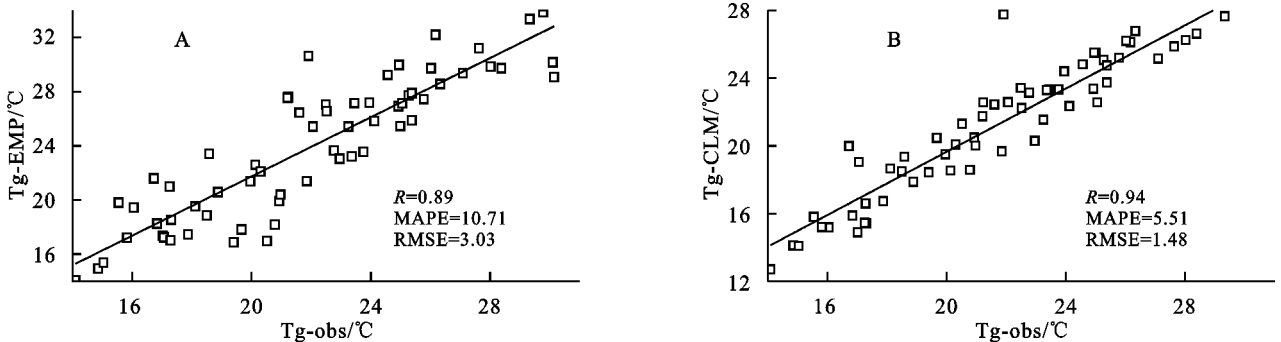


图 3 遥感经验模型估算和 CLM 模式模拟的 SACOL 站地表温度与实测值的比较

图 5 给出了利用 EMP,CLM 模式及 EMP_CLM 计算的 SACOL 站蒸散发(潜热通量)与观测值的散

CLM 模式能较好地模拟出净辐射的变化趋势,但模拟值较观测值偏大。夏季净辐射的模拟值与观测值基本吻合,只在个别峰谷值处稍有偏差;冬季模拟值与观测值的偏差相对较大。综上可见,陆面过程模式不仅能模拟出高时间分辨率的净辐射,且偏差也较 EMP 的小。在陆面过程模式离线模拟中,太阳辐射和大气长波辐射作为强迫场输入,因此净辐射由反射辐射和地表长波辐射决定,CLM 模式对反射辐射和地表长波辐射的模拟较好从而使净辐射的模拟较好,这也从另一个方面表明 CLM 模式对土壤温度和感热通量的模拟较好。

10.71%。从图中也可以看出,在地表温度较高的部分,估算结果与实测值之间较为吻合,不存在偏差特别大的点;而在地表温度偏低的部分,两者之间的偏差较大,总体上 MODIS 地表温度较观测值偏高。如图 3B 所示,CLM 模式模拟的地表温度与观测值的相关系数达到了 0.94,相关性较好,均方根误差为 1.48℃,平均相对误差为 5.15%,模拟值与观测值的散点均匀的分布在拟合线两侧。图 4 给出了 CLM 模式模拟的 2007—2008 年地表温度与观测值日均值的比较。如图 4 所示,CLM 模式模拟的地表温度能较好地体现其季节变化特征,其变化趋势、峰谷值都与观测值基本一致。总体来看 CLM 模式对地表温度的模拟效果比 EMP 中使用的 MODIS 地表温度精度更高,所以利用 CLM 模式地表温度代替 EMP 中的温度计算蒸散发是可行的。

点图。如图 5A 所示,EMP 的估算值与模拟值的散点分布较分散,拟合线离 1 : 1 线较远,相关系数为 0.72,均方根误差为 22.88 W/m²,平均相对误差为 36.26%。Wang and Dickinson^[3]研究表明陆面蒸散发的估算存在 15%~30%的不确定性,虽然 EMP 提高了蒸散发的模拟精度^[23],但是其对半干旱区蒸散量的估算精度仍不够理想。图 5B 给出的 CLM 模拟的蒸散发与观测值的相关系数为 0.71,均方根误差为 26.17 W/m²,平均相对误差为 36.86%。在蒸散发较小时,CLM 模式模拟的蒸散发与实测值较为吻合,两者的散点均匀地分布在 1 : 1 线两侧;而在蒸散发较强时,模拟值与观测值的偏差较大,模拟值较观测值偏大。从总体上看,EMP 估算的蒸散发与实测值的相关性较好,均方根误差及相对误差较小,但 CLM 模式模拟的蒸散发与观测值的散点更加接近于 1 : 1 线,两者各有优劣。如图 5C 所示,EMP_CLM 估算的蒸散发与观测值的拟合效果更好,散点均匀地分布

在 1 : 1 线附近,相关系数更高,估算值与观测值的一致性较好。从偏差的统计结果来看,估算值与观测值的 RMSE 由 EMP 的 22.88 减小到 14.59 W/m²,MAPE 由 36.26%减小到 20.75%,相关系数增加到 0.84,EMP_CLM 方法提高了半干旱区陆面蒸散发的估算精度。

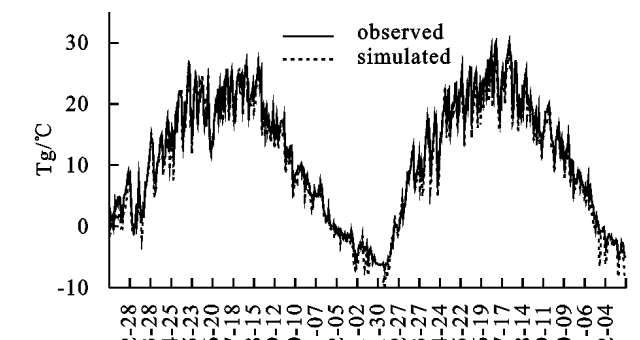


图 4 CLM 模式模拟的 SACOL 站地表温度与观测值的日均值比较(2007—2008 年)

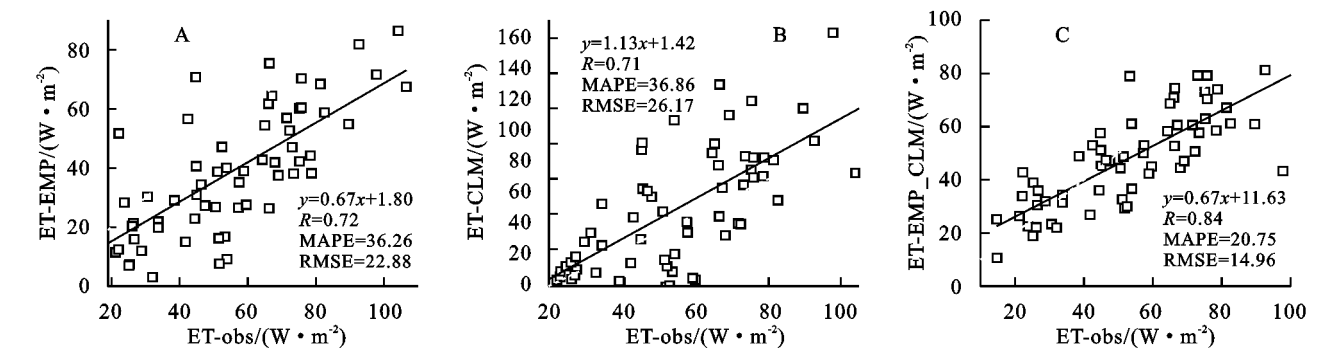


图 5 EMP、CLM 和 EMP_CLM 估算的 SACOL 站蒸散发与实测值的比较

图 6 给出了 CLM 模式、EMP_CLM 模拟的 2007—2008 年蒸散发与观测值日均值的比较。如图所示,CLM 模式能较好的模拟出蒸散发的变化趋势,但模拟值较观测值偏大。在非生长季,模式的模拟值较观测值的偏差较大;在生长季,模拟的蒸散发与观测值的偏差相对较小。

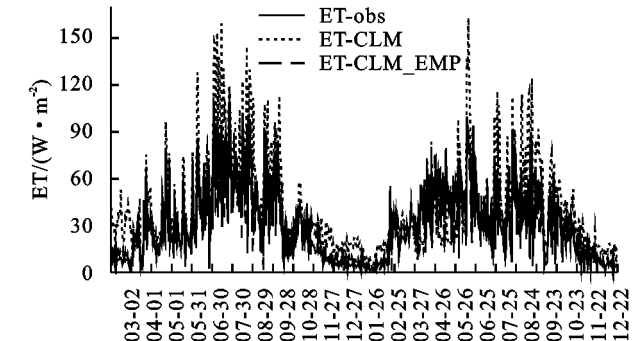


图 6 CLM 模式模拟、(5) 式计算及观测的 SACOL 站 2007—2008 年的蒸散发比较

从图中还可以看出,EMP_CLM 模拟的蒸散发与观测值更为接近,偏差较小。从偏差的统计结果来看,新方法估算的蒸散发的 RMSE 由 CLM 模式的

19.45 减小到 8.90 W/m²,MAPE 由 36.23%减小到 20.77%,R 由 0.83 增加到 0.93,估算精度有显著的改进。Kustas^[27]利用单源能量平衡模型(SEB),结合 Mast 卫星和飞机、涡动相关法(EC)和能量平衡方法(BR)观测的净辐射和地表热通量等估算了干旱区犁沟棉的蒸散发,其中 RMSE 为 24~85 W/m²,相对误差为 10%~25%。Anderson 等^[28-29]利用 ALEXI 和 disALEXI 方法,结合 GEOS,MODIS 卫星观测资料反演了可利用能量及其他参数,计算了水域、森林、灌丛、草地、作物、裸土及密集建筑物等不同下垫面的小时蒸散发,通过与 EC 观测值相比较,模型的 RMSE 为 58 W/m²,相对误差为 25%。Wang 等^[30]基于 EVI 的经验模型,利用 MODIS 卫星资料和 EC 数据,分析了森岭、草地和作物下垫面的 16 d 蒸散发,其 RMSE 为 58 W/m²,相对误差为 36%。从表 2 给出的不同方法对蒸散发的计算结果来看,目前计算蒸散发的不确定性为 10%~36%。因此,利用陆面过程模式模拟的较为精确的净辐射及地表温度和 NDVI 估算得到的蒸散发与观测值的变化趋势较为一致,两者的误差较小,相关性更好,对半

干旱区蒸散发的估算精度有显著提高,且能够得到更高时间分辨率的陆面蒸散发。

表 2 各模型计算结果(均方根误差和相对误差)的比较

方法	下垫面类型	数据来源	时间步长	RMSE/(W·m ⁻²)	相对误差/%	参考文献
单源 SEB	犁沟棉草地、作物及(雨)	Mast、飞机;BR,EC	30 min	24~85	10~25	Kustas ^[27]
单源 SEB		MODIS;EC	Daily	44	25	Su 等 ^[31]
双源 SEB	林灌丛、牧场玉米和大豆	Masts;BR,EC	30 min	105	27	Norman 等 ^[32]
双源 SEB	水域、森林、灌丛、草地、	ASTER;EC	30 min	94	26	French 等 ^[33]
ALEXI 或 disALEXI	作物、裸土及密集建筑物		Hourly	58	25	Anderson 等 ^[28-29]
Trad 和 α		AVHRR;EC	30 min	35	24	Verstraeten 等 ^[34]
Trad 和 VIs	森林混耕、森林及高矮草	AVHRR;EC	过境期间	85	30	Jiang 等 ^[35]
经验模型	森林、草地、作物作物	MODIS;BR,EC	16d 平均值	32	36	Wang 等 ^[30]
Trad 及气候数据		Mast,TRF;BR	AVHRR,TM 过境	72~88	27~30	Mc Vicar 等 ^[36]

4 结论

CLM 模式对净辐射、地表温度的模拟性能较好。与遥感经验模型相比,净辐射的 RMSE 从 25.93 W/m²降低到 17.74 W/m²,MAPE 则从 16.97%减小到 12.38%,相关性更高;地表温度的 RMSE 从 3.03℃减小到 1.48℃,MAPE 则从 10.71%减小到 5.15%,模拟值与观测值的相关性更好,散点均匀的分布在拟合线两侧。从整体上来看,遥感经验模型估算的 SACOL 站陆面蒸散发与实测值的偏差较小,模型相对改进了蒸散发的估算效果;CLM 模式模拟的蒸散发与观测值的一致性较好,但模式较观测值偏大;遥感经验模型和 CLM 模式对蒸散发的计算各有优劣。基于 CLM 模式模拟得到更为准确的净辐射、地表温度和 NDVI 提出的新估算方法得到的蒸散发与观测值的变化趋势较为一致,两者的误差较小,相关性更好,对半干旱区蒸散发的估算精度有显著提高,且能够得到更高时间分辨率的陆面蒸散发。

基于遥感产品的经验模型对蒸散发的估算依赖于遥感产品的精度及经验参数,在缺乏地面观测资料的区域,改进的遥感经验模型能够给出陆面蒸散发的粗略分布。但受技术所限,目前只能获取较为准确的晴天遥感产品,基于遥感产品的经验模型并不能用于获取连续完整的陆面蒸散发数据。随着对陆面过程研究的深入,陆面过程模式取得了长远发展,其对净辐射和地表温度的模拟更为准确。因此,利用陆面过程模式更为准确的净辐射和地表温度来替代遥感经验模型中的估算值,同时综合 NDVI 来弥补陆面过程模式在半干旱区植被生理生态过程参数化的不确定性,是提高西北半干旱区陆面蒸散发的估算精度的可行方法。随着陆面同化数据集(如 GLDAS,ERA-Interim 和 CLDAS 等)的建立及进一步发展,在缺少观测资料的地区利用陆面同化数据集和遥感植被指

数是获取较为准确蒸散发行之有效的方法。但新估算方法仅针对黄土高原半干旱区特殊的环境条件建立,其在西北更多区域的适用性还有待更多测站的资料来验证。

致谢:感谢兰州大学干旱气候与环境观测站(SACOL 站)为本文提供数据支持。

参考文献:

[1] SCHÄR C, Lüthi D, Beyerle U, et al. The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model [J]. Journal of Climate, 1999,12(3):722-741.

[2] Yuan W, Liu S, Yu G, et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114(7):1416-1431.

[3] Wang K C, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. Reviews of Geophysics, 2012,50(2):RG2005.

[4] Mu Q, Zhao M, Running S W, et al. Using MODIS weekly evapotranspiration to monitor drought [C]//Gao W, Chang N B. Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XIII, Washington, Usa;SPIE-Int Soc Optical Engineering, 2016.

[5] Wang L, Yuan X, Xie Z, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. Scientific Reports, 2016,6:30571.

[6] Yang Z, Zhang Q, Hao X. Evapotranspiration trend and its relationship with precipitation over the Loess Plateau during the last three decades [J]. Advances in Meteorology, <https://doi.org/10.1155/2016/6809749>, 2016.

[7] Brutsaert W. Global land surface evaporation trend during the past half century: Corroboration by Clausius-Clapeyron scaling [J]. Advances in Water Resources, 2017,106(8):3-5.

[8] Lu J, Sun G, McNulty S G, et al. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the

- southeastern United States [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2005,41(3):621-633.
- [9] Verstraeten W W, Veroustraete F, Feyen J. Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation [J]. *Sensors*, 2008,8(1):70-117.
- [10] Anderson M C, Kustas W P, Norman J M, et al. Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2011,15(1):223-239.
- [11] Wang K C, Liang S L. An improved method for estimating global evapotranspiration based on satellite estimation of surface net radiation, vegetation index, temperature, and soil moisture [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008,9(4):712-727.
- [12] Anderson R G, Goulder M L. A mobile platform to constrain regional estimates of evapotranspiration [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009,149(5):0-782.
- [13] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. *Nature*, 2010,467(7318):951-954.
- [14] Lu X, Zhuang Q. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and Ameri-Flux data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010,114(9):1924-1939.
- [15] Haddeland I, Clark D B, Franssen W, et al. Multimodel estimate of the global terrestrial water balance: Setup and first results [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2011,12(5):869-884.
- [16] Xia Y, Cosgrove B A, Mitchell K E, et al. Basin-scale assessment of the land surface energy budget in the National Centers for Environmental Prediction operational and research NLDAS-2 systems[J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2016,121(1):196-220.
- [17] Xia Y, Peters-Lidard C D, Luo L. Basin-scale assessment of the land surface water budget in the national centers for environmental prediction operational and research NLDAS-2 systems[J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2016,121(6):2750-2779.
- [18] Zhang H, Pak B, Wang Y P, et al. Evaluating surface water cycle simulated by the Australian community land surface model(CABLE)across different spatial and temporal domains[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013,14(4):1119-1138.
- [19] Yue P, Zhang Q, Yang Y, et al. Seasonal and inter-annual variability of the Bowen Smith ratio over a semi-arid grassland in the Chinese loess plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018,252:99-108.
- [20] Huang J, Zhang W, Zuo J, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the loess plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008,25(6):906-921.
- [21] 张强,曾剑,张立阳.夏季风盛行期中国北方典型区域陆面水、热过程特征研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2012,42(9):1385-1393.
- [22] Yue P, Zhang Q, Niu S J, et al. Effects of the soil heat flux estimates on surface energy balance closure over a semi-arid grassland [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011,25(6):774-782.
- [23] 王丽娟,郭锐,杨启东,等.基于 MODIS 遥感产品估算西北半干旱区的陆面蒸散量[J]. *高原气象*, 2016,35(2):375-384.
- [24] Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model(CLM)[Z]. Boulder, USA:National Center for Atmospheric Research, 2010.
- [25] Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. The CCSM4 land simulation, 1850-2005: Assessment of surface climate and new capabilities [J]. *Journal of Climate*, 2012,25(7):2240-2260.
- [26] Oudin L, Hervieu F, Michel C, et al. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model: Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 2005,303(1):290-306.
- [27] Kustas W P. Estimates of evapotranspiration with a one-and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990,29(8):704-715.
- [28] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation [J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2007,112:D10117.
- [29] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 2. Surface moisture climatology [J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2007,112:D11112.
- [30] Wang K C, Wang P C, Li Z Q, et al. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007,112:D15107.

参考文献:

[1] 肖晶晶,李正泉,郭芬芬,等.浙江省 1901—2017 年降水序列构建及变化特征分析[J].气候变化研究进展,2018,14(6):553-561.

[2] 吕俊梅,祝从文,琚建华,等.近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因[J].大气科学,2014,38(4):782-794.

[3] 王丹,王爱慧.1901—2013 年 GPCC 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估[J].气候与环境研究,2017,22(4):446-462.

[4] 段丽瑶,丁一汇,任雨.1921—2010 年天津气温和降水量序列的多尺度分析[R].第三届区域气候变化监测与检测学术研讨会,2014.

[5] 李正泉,宋丽莉,梁卓然,等.杭州市降水特征及极端降水趋势预估[J].气象,2018,44(6):781-789.

[6] Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al., Updated high-resolutions grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 dataset[J]. International Journal of Climatology, 2014,34(3):623-642.

[7] Becker A, Finger P, Meyer-Christoffer A, et al. A description of the global land-surface precipitation data products of the global precipitation climatology centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901-present[J]. Earth System Science Data, 2013,5(1):71-99.

[8] 张宏芳,潘留杰,卢珊,等.1901—2012 年陕西降水,气温变化特征[J].中国沙漠,2015,35(6):1674-1682.

[9] 凡炳文,牟燕红,邱文俊.洮河流域径流时间序列一致性及变异研究[J].水文,2008,28(3):70-73.

[10] 原立峰,张增信,刘星飞,等.鄱阳湖流域近 49 年降雨序列一致性检验与分析[J].安徽农业科学,2013(2):732-735.

[11] Wu Z, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004,460(2046):1597-1611.

[12] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition:a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1(1):1-41.

[13] Qian C, Zhou T. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900-2010 [J]. Journal of Climate, 2014,27(3):1210-1222.

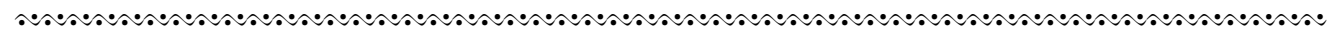
[14] Qian C. On trend estimation and significance testing for non-Gaussian and serially dependent data:quantifying the urbanization effect on trends in hot extremes in the megacity of Shanghai [J]. Climate Dynamics, 2016,47(1/2):329-344.

[15] 王敏,李英,徐祥德.西北太平洋热带气旋路径异常偏折的分类特征[J].热带气象学报,2019,35(2):177-186.

[16] Zhu N, Xu J, Li K, et al. Spatiotemporal Change of Plum Rains in the Yangtze River Delta and Its Relation with EASM, ENSO, and PDO During the Period of 1960—2012[J]. Atmosphere, 2019,10(5):258-275.

[17] 刘增进,张静.1988—2017 年河北省干旱时空变化特征分析[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2019,40(3):27-31.

[18] 胡顺起,曹张弛,刘婷婷.华北地区极端干旱事件的变化特征[J].气象与环境科学,2017,40(4):121-125.



(上接第 153 页)

[31] Su H, Wood E F, McCabe M F, et al. Evaluation of remotely sensed evapotranspiration over the CEOP EOP-1 reference sites[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II, 2007,85:439-459.

[32] Norman J M, Kustas W P, Prueger J H, et al. Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual-temperature-difference method to minimize measurement errors[J]. Water Resources Research, 2000,36(8):2263-2274.

[33] French A N, Jacob F, Anderson M C, et al. Surface energy fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA) [J]. Remote Sensing of Environment, 2005,99(1/2):55-65.

[34] Verstraeten W W, Veroustraete F, Feyen J. Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA imagery at satellite overpass time: Towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products [J]. Remote Sensing of Environment, 2005,96(2):256-276.

[35] Jiang L, Islam S. Estimation of surface evaporation map over Southern Great Plains using remote sensing data [J]. Water Resources Research, 2001,37(2):329-340.

[36] Mcvicar T R, Jupp D. Estimating one-time-of-day meteorological data from standard daily data as inputs to thermal remote sensing-based energy balance models [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1999,96(4):219-238.