

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0061

王松, 田巍, 刘小莽, 等. 不同蒸散发产品在汉江流域的比较研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 01-09. WANG S, TIAN W, LIU X M, et al. Comparisons of various evapotranspiration products in the Hanjiang River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 01-09. (in Chinese)

不同蒸散发产品在汉江流域的比较研究

王松^{1,2}, 田巍^{1,2}, 刘小莽¹, 刘昌明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: 蒸散发是流域水循环和能量循环的重要环节, 准确估算蒸散发对流域水循环研究具有重要意义, 同时也可以为流域水资源优化配置和可持续利用提供支撑。利用汉江流域观测的逐月降水数据、径流数据以及重力卫星(GRACE)反演的流域蓄水量变化数据计算水量平衡蒸散发(ET_{WB}), 以 ET_{WB} 为标准在月尺度上评估4类9种不同蒸散发产品(陆面模式产品 ET_{clm} 、 ET_{noah} 、 ET_{mos} 、 ET_{vic} ; 再分析数据产品 ET_{jra} ; 基于模型树集的通量观测产品 ET_{jung} 和基于能量平衡的诊断模型产品 ET_{modis} 、 ET_{PML} 、 $ET_{Zhangke}$) 在汉江流域的适用性。结果表明基于模型树集的通量观测产品和基于能量平衡的诊断模型产品精度较好, 再分析产品次之, 陆面模式产品(除 ET_{clm})较差。 ET_{jung} 、 ET_{modis} 和 ET_{clm} 在月尺度上与 ET_{WB} 有着较好的相关性, 结果误差相对较小; ET_{noah} 、 ET_{mos} 、 ET_{vic} 结果误差相对较大。该研究结果可以为汉江流域水循环研究和南水北调中线工程提供科学参考。

关键词: 实际蒸散发; 蒸散发产品; 流域蓄水变化; GRACE; 汉江

中图分类号: P333 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)03-0001-09

Comparisons of various evapotranspiration products in the Hanjiang River Basin

WANG Song^{1,2}, TIAN Wei^{1,2}, LIU Xiaomang¹, LIU Changming¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Evapotranspiration (ET) plays a critical role in linking the water and energy cycle. Accurately estimating ET is important for hydrologic study and supports the optimal allocation and sustainable use of water resources. In this study, monthly precipitation data, runoff data, and GRACE terrestrial water storage data were used to estimate ET with the water balance approach (ET_{WB}) as the reference. 9 ET products, including land surface model products ET_{clm} , ET_{noah} , ET_{mos} and ET_{vic} , reanalysis product ET_{jra} , model tree set based flux observation products ET_{jung} , and energy balance based diagnosis models ET_{modis} , ET_{PML} , and $ET_{Zhangke}$, were compared in the Hanjiang River Basin. The results showed that the model tree set based flux observation product and energy balance based diagnosis model products had better accuracy, followed by the reanalysis product and the land surface model products. ET_{jung} , ET_{modis} , and ET_{clm} had a good correlation with ET_{WB} on the monthly scale. ET_{noah} , ET_{mos} , and ET_{vic} had large error among the 9 products. This study can provide a scientific reference for the hydrologic study of the Han River and the management of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project.

Key words: actual evapotranspiration; evapotranspiration products; terrestrial water storage; GRACE; the Hanjiang River Basin

收稿日期: 2018-04-14 修回日期: 2018-04-28 网络出版时间: 2018-05-03
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180502.1141.002.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(41330529; 41571024)

Funds: National Natural Science Foundation of China (41330529; 41571024)

作者简介: 王松(1989-), 男, 四川人, 主要从事水文学方面的研究。E-mail: liaoxfm@163.com

通讯作者: 刘小莽(1983-), 男, 湖北人, 副研究员, 博士, 主要从事水文地理学方面的研究。E-mail: liuxm@igsrr.ac.cn

流域蒸散发是流域内土壤蒸散发、植被蒸腾、水面蒸散发、截留蒸散发等的总和,是流域水循环的基本环节和水量平衡的基本要素^[1]。从全球陆面平均来看,约 58%~65% 的降水通过蒸散发重返大气,消耗的能量约占净辐射的 51%~58%^[2]。因此蒸散发一定程度上决定了区域甚至全球的水量平衡过程,同时也影响着区域的水文-生态-大气这个复杂系统的演变^[3]。准确观测和估算流域蒸散发对全球气候变化和区域水资源综合利用具有重要意义,同时也对农作物需水管理、旱情监测等具有重要价值。

目前,蒸散发可以通过蒸渗仪^[4]、涡度相关^[5]、通量塔^[6]、大孔径闪烁仪^[7]等仪器进行观测,但仪器测量范围有限。诸如蒸发皿、茎流计、蒸渗仪仅可以测量点尺度的蒸发量,波文比和涡度相关法也只能测量较小面积(几十米)上的蒸发量。蒸散发的估算从 1802 年道尔顿根据蒸散发速率与相关因素关系提出了道尔顿定律^[8]开始,1948 年 Penman 建立了 Penman 蒸散发方程^[9],1963 年 Monteith 在 Penman 基础上考虑了植被生理特征,引入了冠层阻力和空气动力学阻力,建立了 Penman Monteith (PM) 方程^[10],这些工作为蒸散发的估算做出了巨大贡献。之后学者也相继提出 Penman 蒸发正比假设^[11]、蒸发互补原则^[12]、水热耦合方法^[13]等来计算流域蒸散发。在大尺度蒸散发的估算方面,目前有较多蒸散发产品可供利用,如基于遥感的蒸散发产品、再分析产品、陆面模式产品、基于点尺度观测的经验性放大产品等^[14],这些蒸散发产品的出现为蒸散发估算和应用提供了方便。然而,不同产品的精度和适用性都存在区域差异,在特定研究区应用时前需要进行精度验证^[15]。

在我国使用较多的蒸散发产品有 MODIS 产品、陆面模式产品、基于模型树集的通量观测产品和基于能量平衡的诊断方法等。郝龙飞^[16]等利用陆面模式 Noah 产品中近 30 年中国陆地蒸散量和土壤含水量数据,研究了不同类型蒸散和土壤含水量的关系。陈浩^[17]等利用陆面模式 CLM 研究了植被覆盖度和叶面积指数年际变化对蒸散发的影响。姜艳阳^[14]等基于流域水量平衡原理,利用地面观测降水、径流量以及重力卫星 (GRACE) 蓄水变化数据,在年与月尺度上分析了 MODIS 全球蒸散发产品在中国不同流域的一致性及其时空特征。张静^[18]等基于 MODIS 全球蒸散发产品,利用 GIS 统计法和线性趋势法等研究了 2000-2014 年汉江流域蒸散发的年际和年内变化规律及不同土地覆被类型下的蒸散发特征。贺添^[19]等基于 MODIS 全球蒸散发产

品分析了 2001-2010 年我国陆地蒸散发的时空格局变化。钟昊哲^[20]等基于 MODIS 的叶面积指数和 Penman Monteith-Leuning (PML) 模型估算了西南喀斯特区域蒸散发。王飞宇^[21]等基于全球通量观测网络的地表蒸散发估算产品 (MTE) 检验了模型计算的蒸散发,分析了典型山区蒸散发的时空变化。苏涛^[22]比较了 5 套再分析蒸散发产品在中国的时空变化特征,发现不同产品在不同地区存在显著差异。Xue^[23]等评估了 4 种蒸散发产品在黄河上游和长江上游的表现,发现 MODIS 蒸散发产品表现较好;Li^[24]等评估了 9 种蒸散发产品在黄河中游地区的表现,发现陆面模式 (LSM) 产品更好地捕捉了蒸散发的变化。以上研究表明,不同蒸散发产品在特定区域的适用性存在显著差异,需要根据流域实际来选择合适的蒸散发产品。

汉江是长江的最大支流,流域内有南水北调中线工程水源地——丹江口水库。在全球变化的背景下,近几十年来流域内干旱频发,伴随着中线调水的实施,流域水资源配置和生态环境保护等面临巨大挑战。因而,有必要对汉江流域蒸散发等水循环要素进行准确估计。本文以流域降水、径流、重力卫星 (GRACE) 反演的流域蓄水量变化等数据计算的水量平衡蒸散发作为基准值,评估 9 种蒸散发产品在汉江流域的精度,探究不同蒸散发产品在汉江流域的适用性,为汉江流域水循环研究和水资源管理提供支撑。

1 研究区概况及数据资料

汉江为长江最大的支流,干流发源于秦岭,全长 1 570 km,流域面积约 15.9 万 km²^[25],横跨鄂、陕、豫、川、渝、甘 6 省市。汉江流域为北亚热带边缘湿润季风气候,气候温和湿润,四季分明,年平均气温在 15~17 °C 之间,多年平均降水量约 873 mm,水量相对充足,但年内分配不均,5 月-10 月降水约占全年降水的 75%。

本文使用的降水数据来自于汉江流域及其周边的 18 个气象站点 2002-2012 年的逐月数据 (<http://data.cma.cn/>)。基于反距离权重插值法,将站点降水插值为流域尺度降水量。径流数据为皇庄水文站 2002-2012 年逐月观测数据。具体气象站和水文站点分布见图 1。流域蓄水量变化数据采用基于重力卫星 (GRACE) 的反演数据。GRACE 重力卫星于 2002 年发射,其主要目标是提供高精度地球重力场的时空变化数据。本文采用美国德克萨斯大学奥斯汀分校空间研究中心提供的最新 CSR

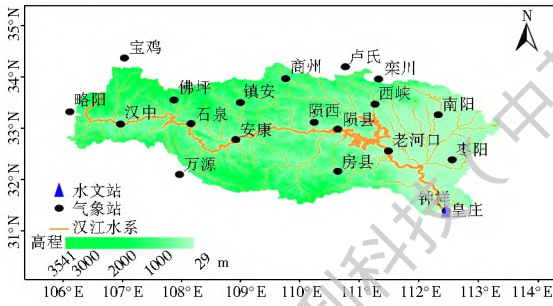


图 1 汉江流域气象站和水文站分布

Fig. 1 Distribution of meteorological and hydrological stations in the Hanjiang River

RL05 版本数据 (<http://www2.csr.utexas.edu/grace/>)。数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ，时间序列为 2002 年 4 月至 2012 年 12 月。诸多研究表明，在我国湿润地区 Noah 陆面模式数据质量较好^[16, 26]，本文采用 Noah 陆面模式数据产品中的土壤水、雪水当量、植物截留水量数据相加估算该区域流域蓄水量变化^[27]，基于此验证 GRACE 流域蓄水变化数据在本研究区的适用性。本文拟比较 4 类 9 种不同的蒸散发产品，包括：陆面模式产品^[28] ET_{clm} 、 ET_{noah} 、 ET_{mos} 、 ET_{vic} (http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/hydrology/data_holdings)；再分析数据产品^[29] ET_{jra} (<http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/>

index_en.html)；基于模型树集的通量观测产品^[30] ET_{jung} (<https://www.bgcjena.mpg.de/geodb/projects/Home.phs>) 和基于能量平衡的诊断模型产品^[31-33] ET_{modis} 、 ET_{PML} 、 $ET_{Zhangke}$ (<http://www.nts.g.umd.edu/project/et>)。陆面模式产品为 GLDAS 中不同陆面模式计算的蒸散发产品，包括 NOAH、CLM、MOS、VIC 四种陆面模式；再分析资料是利用数值天气预报资料同化系统得到的分析资料，再分析数据内容丰富、资料时间长、分辨率高，同化了大量的观测资料^[34]，本文采用的再分析数据为日本推出的第二代再分析数据产品 JRA55；基于模型树集的通量观测产品是 Jung^[30] 等根据全球 198 个通量站数据结合遥感和气象数据并利用模型树集形成的一套蒸散发数据；基于能量平衡的诊断模型是根据彭曼方法结合遥感等手段计算得到的全球尺度蒸散发产品，如本文使用的 ET_{PML} 产品。9 种蒸散发产品具体信息见表 1。由于本文使用的 GRACE 流域蓄水量变化数据时间长度为 2002–2012 年，因而蒸散发产品时间长度也取 2002–2012 年 (ET_{jung} 和 $ET_{Zhangke}$ 由于原始数据时间长度原因，本文使用长度分别为 2002–2011 年和 2002–2006 年)。

表 1 9 种蒸散发产品的信息

Tab. 1 Information of the 9 ET products

	数据集	空间分辨率	时间长度	参考文献
陆面模式产品	GLDAS_CLM	$1^\circ \times 1^\circ$	1979–2014	Rodell 等 ^[28]
	GLDAS_MOS	$1^\circ \times 1^\circ$	1979–2014	Rodell 等 ^[28]
	GLDAS_NOAH	$1^\circ \times 1^\circ$	1979–2014	Rodell 等 ^[28]
	GLDAS_VIC	$1^\circ \times 1^\circ$	1979–2014	Rodell 等 ^[28]
再分析产品	JRA55	$1.25^\circ \times 1.25^\circ$	1958–2014	Kobayashi 等 ^[29]
基于模型树集的通量观测产品	JUNG	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	1982–2011	Jung 等 ^[30]
	MODIS	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$	2000–2013	Mu 等 ^[31]
	PML	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	1981–2012	Zhang 等 ^[33]
	Zhangke	$8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$	1983–2006	Zhang 等 ^[32]

2 研究方法

2.1 GRACE 数据降尺度处理

GRACE 数据在较大的尺度上 ($> 20 \text{ 万 km}^2$) 通常能够较为可靠地反映陆地水分存储变化 (ΔS)，但当研究区域小于 20 万 km^2 时， ΔS 数据存在一定的不确定性^[35]。为减小 GRACE 数据在研究区的不确定性，本文采用尺度因子法对 GRACE 的 ΔS 数据进行了修正。因为 GRACE 卫星信号的步长约为 $4.0^\circ \times 4.0^\circ$ ，因而其在 $4.0^\circ \times 4.0^\circ$ 分辨率上准确性相对较高，而陆面模式 (LSM) 对于土壤含水量的相

对变化模拟较为准确^[36]，因而结合 GRACE 卫星数据反演的总量和 LSM 的比例因子对 ΔS 进行降尺度。按照 Wan 等^[36] 的方法，首先将 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GRACE 数据升尺度为 $4.0^\circ \times 4.0^\circ$ 的数据，进而利用 VIC 陆面模式计算的流域蓄水量变化的空间分布对 GRACE 数据进行降尺度。VIC 模式空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，因此最终得到的 ΔS 数据空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，可以用于流域面积小于 20 万 km^2 的汉江流域。

2.2 水量平衡计算蒸散发

水量平衡计算蒸散发公式为：

$$ET_WB = P - R - \Delta S \quad (1)$$

式中: ET_WB 为水量平衡计算的蒸散发量; P 为流域降水; R 为流域径流; ΔS 为流域蓄水变化量; 单位均为 mm。

2.3 评价标准

为评价不同蒸散发产品在汉江流域的适用性, 本文采用相对误差 ($Bias$)、均方根误差 ($RMSE$)、相关系数 (r)、泰勒技能评分 ($TaylorS$) 四种指标来衡量 9 种不同蒸散发产品与水量平衡蒸散发 (ET_WB) 的一致性。其中, 相对误差和均方根误差可以衡量蒸散发产品与 ET_WB 的结果误差情况, 越接近于 0 表明蒸散发产品在汉江流域适用性越好; 相关系数用于刻画蒸散发产品与 ET_WB 的相关性, 越接近 1 表明蒸散发产品在汉江流域适用性越好; 泰勒技能评分是一个综合指标, 不仅考虑蒸散发产品与 ET_WB 的相关性, 同时考虑二者之间的方差变化情况, 即波动性情况, 越接近 1 表明蒸散发产品在汉江流域适用性越好。4 种指标的计算公式如下:

$$Bias = \frac{ET_{product} - ET_WB}{ET_WB} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{ET_{product} - ET_WB}{N}} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (ET_WB_i - \overline{ET_WB})(ET_{product_i} - \overline{ET_{product}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (ET_WB_i - \overline{ET_WB})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (ET_{product_i} - \overline{ET_{product}})^2}} \quad (4)$$

$$TaylorS = \frac{4(1+r)}{(\sigma_+ / \sigma_0)(1+r_0)} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{WB}}{\sigma_{product}} \quad (5)$$

式中: $ET_{product}$ 为不同蒸散发产品的蒸散发量; ET_WB 为水量平衡蒸散发量; N 为计算时间间隔数目; r_0 为最大理论相关性, 本文取 1; σ_{WB} 为水量平衡蒸散发的标准差; $\sigma_{product}$ 为不同蒸散发产品中蒸散发的标准差。

3 结果与讨论

3.1 水量平衡蒸散发量计算结果

图 2 显示研究区 2002 年 4 月 - 2012 年 12 月 GRACE 蓄水量变化数据和 GLDAS-Noah 蓄水量变化数据的波动情况。两组数据的相关系数 r 为 0.78 ($p < 0.05$), 表明二者具有较强的一致性。GRACE 蓄水量的变化范围为 -58.20 ~ 102.20

mm/月, GLDAS-Noah 蓄水量的变化范围为 -51.48 ~ 58.79 mm/月。GRACE 蓄水量比 GLDAS-Noah 蓄水量的变化范围大, 这与诸多研究结果一致^[37-38], 主要可能是 GLDAS-Noah 蓄水量变化不包含地下水的变化, 而 GRACE 蓄水量变化包含土壤水、雪水当量、植物截留、地表水和地下水等所有水组分的变化。相比而言, GRACE 蓄水量变化数据更加完备和可靠。通过以上分析可知, GRACE 数据可以很好地描述蓄水量变化 (ΔS) 的波动, 可以用于水量平衡蒸散发的计算。

从图 2 可以看出, 基于 GRACE 数据的 ΔS 呈现明显的季节波动。通过多年平均 ΔS 数据 (图 3(a)) 可以看出, 5 月 - 9 月 ΔS 为正, 即来水大于消耗, 流域呈蓄水状态, 其中 7 月份 ΔS 最大为 53.47 mm/月; 其他月份 ΔS 为负, 表明来水小于消耗, 流域呈耗水状态, 其中 10 月份 ΔS 最小为 -28.80 mm/月。从年际变化来看, 2003 - 2012 年间汉江流域 ΔS 变化范围为 -65.13 ~ 78.27 mm/月, 且近 10 年来呈现下降趋势 (图 3(b))。

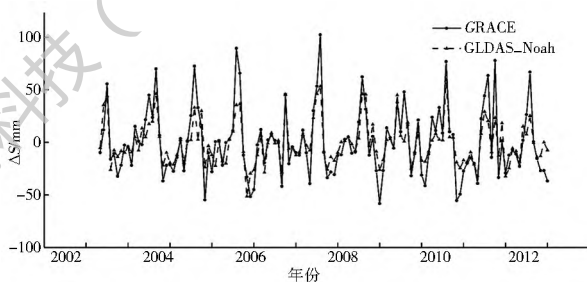


图 2 2002-2012 年研究区蓄水量变化
Fig.2 Variation of water storage change in the study basin from 2002 to 2012

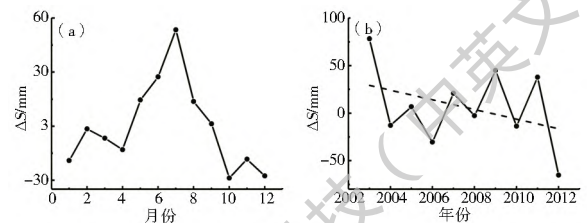


图 3 2002-2012 年研究区蓄水量的年内波动 (a) 和年际变化 (b)

Fig.3 Annual (a) and interannual (b) variation of water storage in the study basin from 2002 to 2012

图 4 显示基于水量平衡计算的汉江流域蒸散发量 (ET_WB) 波动情况。 ET_WB 在月尺度上波动范围为 1.33 ~ 115.26 mm/月, 变化幅度为 113.99 mm。统计多年平均发现, ET_WB 呈单峰分布, 其中 8 月达到最大值为 84.90 mm/月; 2 月份达到最小值为 15.77 mm/月 (图 5(a)); 2 月 - 8 月逐渐上升, 之后逐渐下降。在年尺度上, 多年平均蒸散发为

567 mm, 约占多年平均降水的 64.34%, 从 2003-2012 年间呈现略微的上升趋势(图 5(b))。

3.2 蒸散发产品比较

以水量平衡计算的流域蒸散发(ET_{WB})为标准值, 比较 9 种不同蒸散发产品在汉江流域的适用性。从图 6 中可以看出, 陆面模式中的 ET_{noah} , ET_{mos} 和 ET_{vic} 三种蒸散发产品散点拟合线显著高于 1:1 线, 表明这三种蒸散发产品高估了流域蒸散发; 诊断模式产品中的 $ET_{Zhangke}$ 产品散点拟合线显著低于 1:1 线, 表明其低估了蒸散发, 高估低估情况尤为显著; 再分析产品中的 ET_{jra} 散点拟合线与 1:1 线相交, 在低值区($ET_{WB} < 30$ mm/月) ET_{jra} 明显高估蒸散发; 其它四种蒸散发产品散点拟合线与 1:1 线相对接近, 说明它们与 ET_{WB} 有着较好的一致性。

表 2 显示 9 种蒸散发产品与 ET_{WB} 的相关系数 r 均在 0.7 以上, $ET_{Zhangke}$ 与 ET_{WB} 相关系数最高, 为 0.79。不同蒸散发产品与 ET_{WB} 的 $RMSE$ 差异较大, 变化范围为 20.84 ~ 36.72 mm/月, $ET_{Zhangke}$ 的 $RMSE$ 最小, 为 20.84 mm/月; 陆面模式产品中 ET_{mos} 的 $RMSE$ 最大, 为 36.72

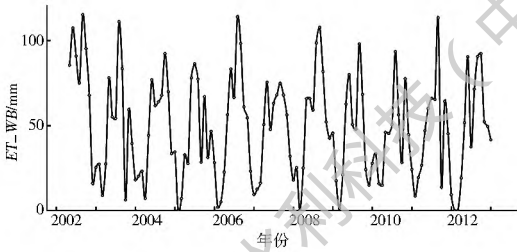


图 4 2002-2012 研究区蒸散发月变化

Fig. 4 Monthly variation of actual evapotranspiration in the study basin from 2002 to 2012

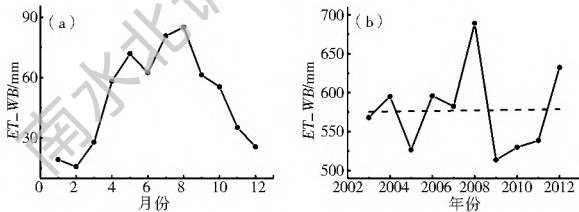


图 5 2002-2012 年研究区蒸散发的年内波动(a)和年际变化(b)

Fig. 5 Annual (a) and interannual (b) variation of ET in the study basin from 2002 to 2012

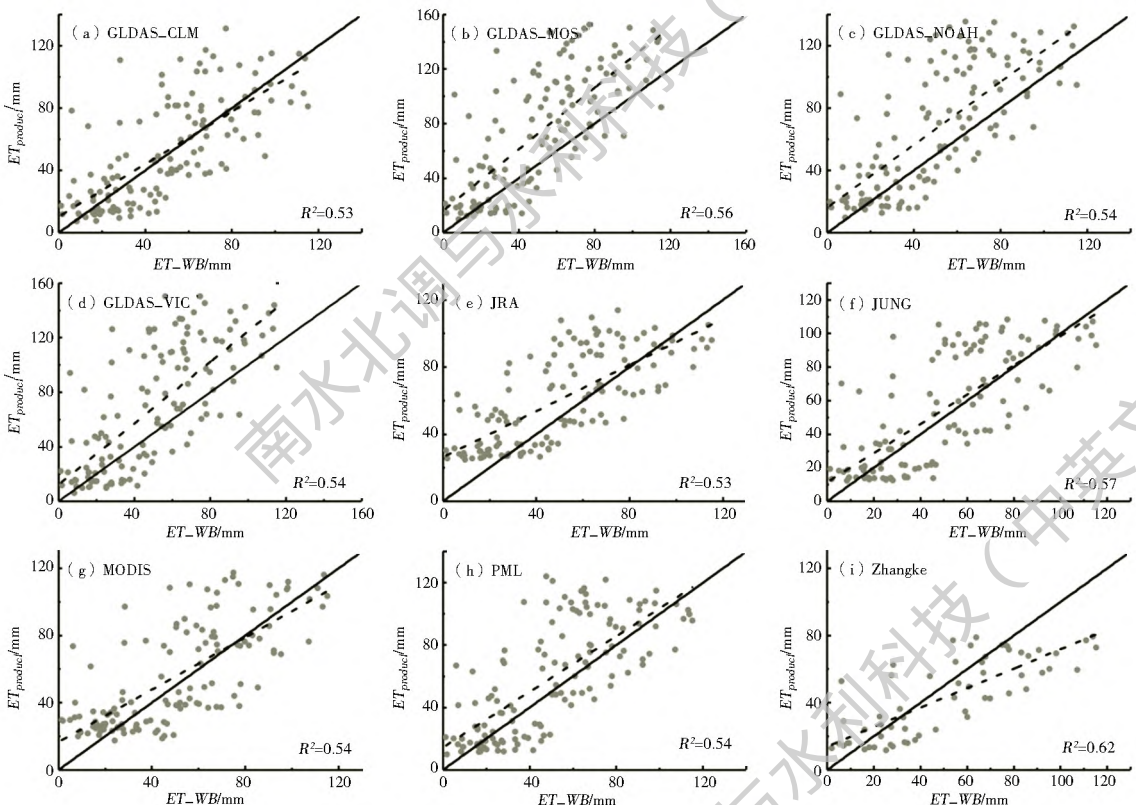


图 6 水量平衡蒸散发与蒸散发产品的比较

Fig. 6 Comparisons of ET between ET products with water balance approach (ET_{WB})

mm/月; 除了 $ET_{Zhangke}$ 的相对误差 $Bias$ 小于 0 (为 -15.05%) 之外, 其他 8 种产品的相对误差均大于 0, 变化范围为 5.01% ~ 45.26%。通过 $RMSE$ 和 $Bias$ 两个指标可以看出, 4 种陆面模式产品中只

有 ET_{clm} 表现相对较好, $RMSE$ 为 23.36 mm/月, $Bias$ 为 9 种产品中最小, 即 5.01%。其他 3 种陆面模式产品 $RMSE$ 均大于 30 mm/月, 而且相对误差 $Bias$ 也均大于 30%, 表明这三种产品明显高估实际

蒸散发。从图 6(b)– 图 6(d) 中也可以看出, 其他类型蒸散发产品的 *RMSE* 均在 23.00 mm/月附近。再分析产品 *ET_jra* 相对较差为 21.42%, 其他基本均在 20% 以内; *TaylorS* 指数变化为 0.73~0.86, 陆面模式中除 *ET_clm* 外均小于 0.8, 其他五种产品均在 0.8 以上, 其中 *ET_jra*、*ET_jung*、*ET_modis* 均达到 0.86, 表明这三种产品不仅与 *ET_WB* 具有较好的相关性, 而且还可以较好地捕捉其季节波动性。

表 2 不同产品的月蒸发表现

Tab. 2 The performance of different evapotranspiration products at monthly timescale

数据集	<i>TaylorS</i>	<i>RMSE</i>	<i>Bias</i>	<i>R</i>	
陆面模式	<i>ET_clm</i>	0.85	23.36	0.05	0.73
	<i>ET_mos</i>	0.75	36.72	0.45	0.75
	<i>ET_noah</i>	0.79	31.58	0.33	0.74
	<i>ET_vic</i>	0.73	35.57	0.37	0.73
	再分析方法	<i>ET_jra</i>	0.86	23.24	0.21
基于模型树集的 通量观测	<i>ET_jung</i>	0.86	23.09	0.10	0.75
	<i>ET_modis</i>	0.86	22.57	0.09	0.73
诊断方法	<i>ET_PML</i>	0.83	25.80	0.18	0.73
	<i>ET_Zhangke</i>	0.81	20.84	-0.15	0.79

ET_modis 表现最好, *RMSE* 中 *ET_Zhangke* 表现最好, *Bias* 中 *ET_Zhangke* 表现最好, 相关系数中 *ET_Zhangke* 表现最好, 整体衡量可以看出基于模型树集的通量观测类产品 and 诊断方法类产品在汉江流域表现较好, 再分析方法相对误差较大, 而陆面模式产品中只有 *ET_clm* 表现相对较好, 其他三种陆面模式产品均呈现较大的误差。

3.3 蒸散发产品季节性表现

图 7 显示 9 种不同蒸散发产品和 *ET_WB* 的多年平均月蒸散发量。不同蒸散发产品的季节变化特征与 *ET_WB* 基本相同。汉江流域属于亚热带季风气候, 根据我国气象部门对季节的划分, 以公历 3 月–5 月为春季, 6 月–8 月为夏季, 9 月–11 月为秋季, 12 月至来年 2 月为冬季。从图 7 可知, 陆面模式系列蒸散发产品中, *ET_clm* 在 2 月–5 月蒸散发量与 *ET_WB* 基本一致, 6 月–8 月的蒸散发量明显高于 *ET_WB*, 10 月–11 月的蒸散发量则明显低于 *ET_WB*, 表明 *ET_clm* 在春季能够更好的估计实际蒸散发量; 而陆面模式产品中, *ET_noah*、*ET_mos*、*ET_vic* 的蒸散发量在全年 12 个月均高于 *ET_WB*, *ET_jra* 的蒸散发量在 1 月–8 月高于 *ET_WB*, 9 月–12 月与 *ET_WB* 基本一致, 表明 *ET_jra* 在秋季能够更好的估计实际蒸散发量; *ET_jung* 的蒸散发量在 2 月–5 月与 *ET_WB* 基本一致,

综上所述, *TaylorS* 指数中 *ET_jra*、*ET_jung*、*ET_modis* 的蒸散发量在 2 月–5 月与 *ET_WB* 基本一致,

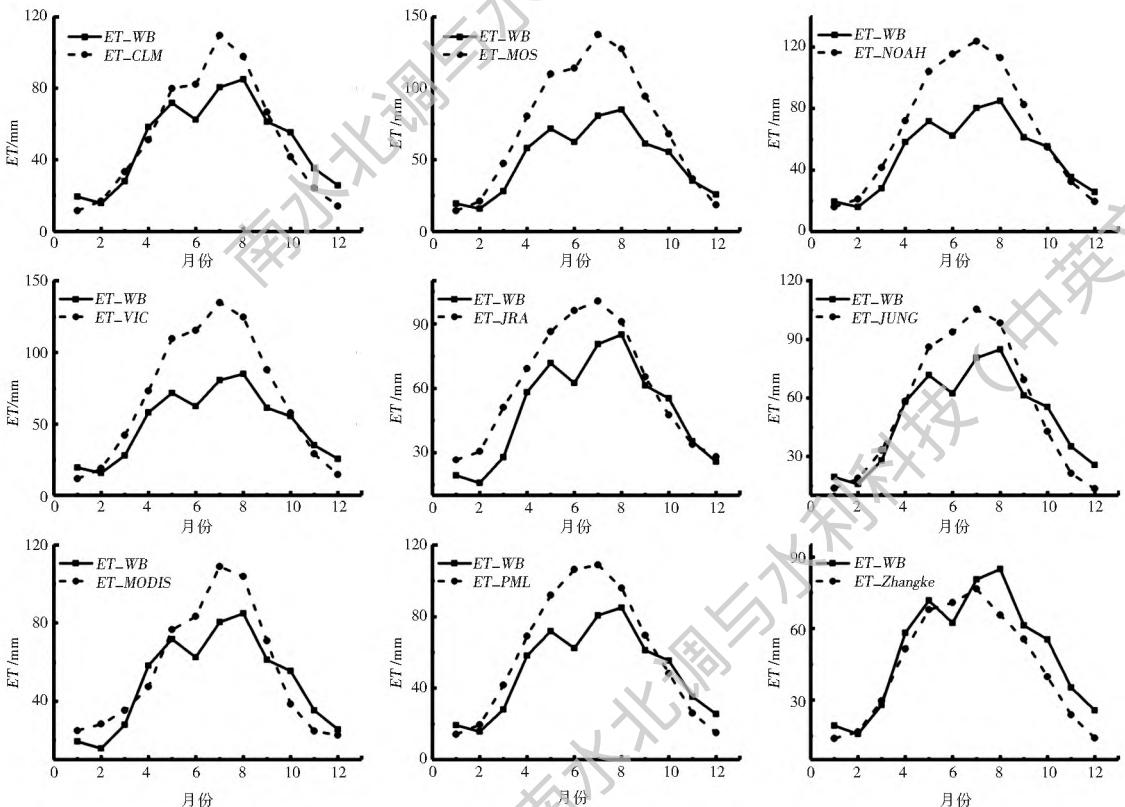


图 7 蒸散发产品与水量平衡多年平均月蒸散发的比较

Fig. 7 Comparisons of multi-year average monthly ET between different evapotranspiration products and *ET_WB*

6月-8月明显高于 ET_{WB} , 10月-1月则低于 ET_{WB} , 表明 ET_{jung} 在春季能够更好的估计实际蒸散发量; 三种诊断分析类蒸散发产品中, ET_{modis} 的蒸散发量主要在夏季、冬季明显高于 ET_{WB} , 春季、秋季明显低于 ET_{WB} ; ET_{PML} 与 ET_{WB} 的蒸散发量在春季和夏季明显高于 ET_{WB} , 秋季和冬季明显低于 ET_{WB} ; $ET_{Zhangke}$ 的蒸散发量在春季和夏季与 ET_{WB} 基本一致, 在秋季和冬季明显高于 ET_{WB} 。

从表3可知, 9种不同蒸散发产品的多年平均月蒸散发量和 ET_{WB} 的相关系数 r 均在 0.9 以上。其中, 4种陆面模式蒸散发产品相关系数均在 0.95 以上, ET_{mos} 相关系数最高, 为 0.97。不同蒸散发产品的多年平均月蒸散发量和 ET_{WB} 的 $RMSE$ 差异较大, 变化范围为 9.53~30.79 mm/月, $ET_{Zhangke}$ 的 $RMSE$ 最小为 9.53 mm/月, ET_{mos} 的 $RMSE$ 最大为 30.79 mm/月, 4种陆面模式产品中只有 ET_{clm} 表现相对较好, $RMSE$ 为 13.14 mm/月, 而其他三种陆面模式产品 $RMSE$ 均大于 24 mm/月; 9种不同蒸散发产品的多年平均月蒸散发量和 ET_{WB} 的 $TaylorS$ 指数变化为 0.67~0.97, 陆面模式中除 ET_{clm} 外均小于 0.8, 其他五种产品均在 0.8 以上, 其中 $ET_{Zhangke}$ 、 ET_{jra} 、 ET_{modis} 分别为 0.97、0.94 和 0.89, 表明这三种产品不仅与 ET_{WB} 具有较好的相关性, 而且还能较好地捕捉到其季节波动。

表3 不同产品多年平均月蒸散发的表现

Tab. 3 The performance of different evapotranspiration products at multi-year average monthly timescale

	数据集	$TaylorS$	$RMSE$	R
陆面模式	ET_{clm}	0.87	13.14	0.95
	ET_{mos}	0.69	30.79	0.97
	ET_{noah}	0.75	24.97	0.95
	ET_{vic}	0.67	29.10	0.96
再分析方法	ET_{jra}	0.94	15.28	0.91
基于模型树集的 通量观测	ET_{jung}	0.85	14.79	0.95
	ET_{modis}	0.89	14.42	0.91
	ET_{PML}	0.82	18.06	0.93
诊断方法	$ET_{Zhangke}$	0.97	9.53	0.95

4 结论

本文以汉江流域为研究区, 基于研究区及附近 18 个气象站 2002-2012 年降水数据、皇庄水文站径流数据以及 GRACE 重力卫星反演的流域蓄水变

化数据计算汉江流域蒸散发, 并以此为标准比较了目前较为常用的 4 类 9 种不同蒸散发产品在汉江流域的适用性。结果如下。

(1) 研究区流域蓄水量变化 ΔS 和水量平衡蒸散发 ET_{WB} 均有显著的季节波动特征。 ΔS 在夏季最大, 冬季最小。2003-2012 年间 ΔS 呈现显著下降趋势。 ET_{WB} 在夏季最大, 冬季最小, 2003-2012 年之间呈现略微上升趋势, 但并不显著。

(2) 9 种不同蒸散发产品在月尺度上的表现差异较大。陆面模式产品 ET_{clm} 、基于模型树集的通量观测产品和基于能量平衡的诊断模型产品表现较好。9 种蒸散发产品均与 ET_{WB} 都有着较高的相关性 ($r > 0.7$), 但在量的估计上大部分产品均高估蒸散发。陆面模式产品中除 ET_{clm} 外, 其他三种蒸散发产品相对误差均在 30% 以上; 再分析产品 ET_{jra} 虽然与 ET_{WB} 具有较好的相关性, 但相对误差达到 21.42%。3 种诊断模型产品的整体表现较好, ET_{PML} 和 $ET_{Zhangke}$ 在误差上略高于 ET_{modis} 。

(3) 9 种蒸散发产品的多年平均月蒸散发量和 ET_{WB} 有较高的相关性 ($r > 0.9$), 均可以较好地捕捉实际蒸散发的季节波动性。大部分产品除 $ET_{Zhangke}$ 外, 在夏季 (5 月-8 月) 高估实际蒸散发量; ET_{clm} 和 ET_{jung} 在春季与 ET_{WB} 基本一致; ET_{jra} 在秋季表现较好, $ET_{Zhangke}$ 在春夏两季表现优异。

参考文献 (References):

- [1] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. 水科学进展, 2004(5): 608-614. (LIU C M. Some issues on the evolution of water cycle in the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2004(5): 608-614. (in Chinese)). DOI: 10.3321/j.issn: 1001-6791. 2004. 05. 013.
- [2] BRUTSAERT W. Hydrology: An introduction. Cambridge[M]. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2005.
- [3] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤植被-大气系统水分-能量平衡研究进展[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 251-259. (LIU C M, SUN R. Ecological aspects of water cycle: advances in soil-vegetation-atmosphere of energy and water fluxes [J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 251-259. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.1999.03.006.
- [4] XU C Y, CHEN D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(18): 3717-3734. DOI: 10.1002/hyp.5853.
- [5] SWINBANK W C. The Measurement of Vertical Transfer of Heat and Water Vapor by Eddies in the Lower Atmosphere. [J]. J Meteor, 1951, 8: 135-145. DOI: 10.1175/1520-0469

- (1951)008< 0135: TMOVTO> 2. 0. CO; 2.
- [6] FISHER J B, TU K P, BALDOCCHID D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 901-919. DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.025.
- [7] HEMAKUMARA H M, CHANDRAPALA L, MOENE A F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(2): 109-122. DOI: 10.1016/S0378-3774(02)00131-2.
- [8] DALTON J. Experimental essays on the constitution of mixed gases, the force of steam, on evaporation, on expansion of fluid[J]. 1802.
- [9] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1948, 193(1032): 120. DOI: 10.1098/rspa.1948.0037.
- [10] MONTEITH J L. Analysis of the photosynthesis and respiration of field crops from vertical fluxes of carbon dioxide[J]. *Functioning of Terrestrial Ecosystems at the Primary Production Level*, 1968: 349-358.
- [11] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. *Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements* FAO Irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.
- [12] BRUTSAERT W. A generalized complementary principle with physical constraints for land surface evaporation[J]. *Water Resources Research*, 2016, 51(10): 8087-8093. DOI: 10.1002/2015WR017720.
- [13] BUDYKO M I. *Climate and life*[J]. 1971.
- [14] 姜艳阳, 王文, 周正昊. MODIS MOD16 蒸散发产品在中国流域的质量评估[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 517-528. (JIANG Y Y, WANG W, ZHOU Z B. Quality assessment of MODIS MOD16 evapotranspiration products in Chinese River Basins[J]. *JOURNAL OF NATURAL RESOURCES*, 2017, 32(3): 517-528. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.20160440.
- [15] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. *遥感学报*, 2008, 12(3): 515-528. (GAO Y C, LONG D. Development of remote sensing evapotranspiration models[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 515-528. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2008.03.019.
- [16] 邴龙飞, 苏红波, 邵全琴, 等. 近 30 年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(1): 1-13. (YAN L F, SU H B, SHAO Q Q, et al. Analysis of land evapotranspiration and soil moisture changes in China in the past 30 years[J]. *Journal of Geoinformatics*, 2012, 14(1): 1-13. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00001.
- [17] 陈浩, 曾晓东. 植被年际变化对蒸散发影响的模拟研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(14): 4343-4353. (CHEN H, ZENG X D. Simulation of the impact of interannual changes in vegetation on evapotranspiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4343-4353. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201101280145.
- [18] 张静, 任志远. 基于 MOD16 的汉江流域地表蒸散发时空特征[J]. *地理科学*, 2017, 37(2): 274-282. (ZHANG J, REN Z Y. Temporal and spatial characteristics of surface evapotranspiration based on MOD16 in the Hanjiang River Basin[J]. *Geographical Sciences*, 2017, 37(2): 274-282. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.02.014.
- [19] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001-2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(6): 979-988. (HE T, SHAO Q Q. Analysis of temporal and spatial patterns of evapotranspiration in China from 2001 to 2010 based on MOD16 products[J]. *Journal of Geoinformatics*, 2014, 16(6): 979-988. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047.2014.00979.
- [20] 钟昊哲, 徐宪立, 张荣飞, 等. 基于 Penman Monteith Leuning 遥感模型的西南喀斯特区域蒸散发估算[J/OL]. *应用生态学报*: 1-11 [2018-04-11]. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201805.014>. (ZHONG H Z, XU X L, ZHANG R X, et al. Estimation of evapotranspiration in the karst region of southwest China based on Penman Monteith Leuning remote sensing model[J/OL]. *Journal of Applied Ecology*: 1-11 [2018-04-11]. (in Chinese)) <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201805.014>.
- [21] 王飞宇, 占车生, 胡实, 等. 典型山地蒸散发时空变化模拟研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(2): 276-287. (WANG F Y, ZHANG C S, HU S, et al. Simulation study on temporal and spatial variation of typical evapotranspiration in mountainous areas[J]. *Resources Science*, 2017, 39(2): 276-287. (in Chinese)) DOI: 10.18402/resci.2017.02.10.
- [22] 苏涛. 基于多套再分析资料的全球蒸散发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 the characteristics of temporal and spatial changes of global evaporation based on multiple sets of reanalysis data and its causes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese))
- [23] XUE B L, WANG L, LI X, 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(492): 290-297. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.005.
- [24] LI Y, LIANG K, LIU C, et al. Evaluation of different evapotranspiration products in the middle Yellow River Basin, China[J]. *Hydrology Research*, 2017. DOI: 10.2166/nh.2016.120.
- [25] 李天生, 夏军, 匡洋, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在汉江流域中上游地区的适用性研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2017(6): 1-10. (LI T S, XIA J, YU Y, et al. Applicability of different potential evapotranspiration estimation methods in the upper and middle reaches of Hanjiang River Basin[J]. *South to North Water Transfers and Water Conservancy Science*, 2017(6): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.001.
- [26] 王文, 汪小菊, 王鹏. GLDAS 月降水数据在中国区的适用性评估[J]. *水科学进展*, 2014, 25(6): 769-778. (WANG W, WANG X J, WANG P. Assessing the applicability of GLDAS

- monthly precipitation data in China[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 769-778(in Chinese)
- [27] SYED T H, FAMIGLIETTI J S, RODELL M, et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(2): 339-356. DOI: 10.1029/2006WR005779.
- [28] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U E A, et al. The global land data assimilation system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394. DOI: 10.1175/BAMS-85-3-381.
- [29] KOBAYASHI S, OTA Y, HARADA Y, et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. ser. i*, 2015, 93(4): 5-48. DOI: 10.2151/jmsj.2015.001.
- [30] JUNG M, REICHSSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. [J]. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-4. DOI: 10.1038/nature09396.
- [31] MU Q, HEINSCH F A, ZHAO M, 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. DOI: 10.1016/j.rse.2007.04.015.
- [32] ZHANG K, KIMBALL J S, NEMABI R R, et al. A continuous satellite derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): 109-118. DOI: 10.1029/2009WR008800.
- [33] ZHANG Y, PENARANCIBIA J L, MCVICAR T R, et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(6). DOI: 10.1038/srep19124.
- [34] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(3): 337-347. (XU Y, DING Y H, ZHAO Z C. A preliminary analysis of the credibility of the global reanalysis data of NCEP/NCAR in the United States in the study of climate change in China[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12(3): 337-347. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2001.03.009.
- [35] LONG D, LONGUEVERGNE L, SCANLON B R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1131-1151. DOI: 10.1002/2013WR014581.
- [36] WAN Z, ZHANG K, XU EX, et al. Water balance based actual evapotranspiration reconstruction from ground and satellite observations over the conterminous United States[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6485-6499. DOI: 10.1002/2015WR017311.
- [37] 孙桂燕, 郭玲鹏, 常存, 等. 新疆天山中段南北坡水储量变化对比分析[J]. *干旱区地理 (汉文版)*, 2016, 39(2): 254-264. (SUN G Y, GUO LING P, CHANG C, et al. Comparative analysis of water storage changes in the northern and southern slopes of the middle part of the Tianshan Mountains in Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Geography (Han Dynasty Edition)*, 2016, 39(2): 254-264. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.02.004.
- [38] 李武东, 郭金运, 常晓涛, 等. 利用 GRACE 重力卫星反演 2003-2013 年新疆天山地区陆地水储量时空变化[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(7): 1021-1026. (LI W D, GUO J Y, CHANG X T et al. Retrieval of spatial-temporal changes in terrestrial water storage in the Tianshan area of Xinjiang during 2003-2013 using GRACE gravity satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(7): 1021-1026. (in Chinese)) DOI: 10.13203/j.whugis.20150079.