

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0107

余晓雨, 涂晨雨, 韦家兴, 等. 地表通量均衡法对中国陆面蒸散发估算的适用性评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1084-1096. YU X Y, TU C Y, WEI J X, et al. Evaluation of surface flux equilibrium in land evapotranspiration estimation in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1084-1096. (in Chinese)

地表通量均衡法对中国陆面蒸散发估算的适用性评价

余晓雨^{1,2}, 涂晨雨^{1,3}, 韦家兴⁴, 朱文彬¹, 官云兰³

(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. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 东华理工大学测绘工程学院, 南昌 330013; 4. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 为验证和评估地表通量均衡法(surface flux equilibrium, SFE)在大尺度上的估算精度, 基于 SFE 方法估算中国区域 2001—2015 年日尺度陆面蒸散发量, 并开展适用性评价。结果表明: 在站点尺度上, SFE 估算值与观测值具有较好的一致性(均方根误差为 1.03 mm/d, 相关系数为 0.70), 优于 GLEAM 产品精度(均方根误差为 1.19 mm/d, 相关系数为 0.62); 在流域尺度上, SFE 方法与水量平衡蒸散发较为接近, 对多数流域的模拟效果较好, 优于 GLEAM 产品和 CR 产品; 在时空变化趋势上, SFE 产品与 CR 产品的变化趋势一致性较高, 与 GLEAM 产品一致性较差。综合 SFE 估算结果的精度验证和趋势分析, 可以发现 SFE 方法基本达到现有产品的精度, 因其输入参数少、物理机制明确、参数化方案简单, 有潜力为蒸散发的大尺度准确估算提供一套行之有效的替代方案。

关键词: 蒸散发; 中国; 时空变化; 地表通量均衡法; 蒸散发产品

中图分类号: TV125 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



蒸散发(ET)包括植被蒸腾和土壤、水体、植被冠层截留水的蒸发以及冰雪的升华, 是液态水或固态水以水汽形式进入大气的重要过程^[1]。从全球陆面平均来看, 大约 60% 的降水以蒸散发的形式返回大气^[2-3]。因此, 准确描述大尺度蒸散发的时空分布格局, 对于水循环规律研究以及水资源综合管理有重要意义^[4]。

传统站点观测方式仅能获取田块尺度或景观尺度的蒸散发, 无法充分反映大尺度蒸散发的时空分布特征^[5]。遥感技术的快速发展为区域或全球尺度的蒸散发估算提供了重要驱动数据。近几十年来, 蒸散发估算方法不断改进, 一系列蒸散发模型应运而生, 如陆面过程模型^[6]、遥感蒸散发模型^[7]、机器学习模型^[8]、数据同化模型^[9]等。这些蒸散发估算模型虽然能够有效弥补站点观测空间连续性差的缺陷, 但参数化方案相对复杂, 在大尺度应用时存

在较大不确定性, 在一定程度上影响了模型精度^[10-11]。同时, 模型所需的输入数据众多(如地表反照率、地表温度、植被覆盖度等), 不同数据获取时的误差累积效应也会进一步影响区域蒸散发估算的精度^[12-14]。因此, 如何在保证模型精度的前提下, 减少复杂的参数化过程以及对地面观测数据的依赖, 实现大尺度蒸散发的快速、简便和连续估算成为目前研究的热点之一^[15-16]。

由于地表和大气边界层存在着紧密的耦合关系, 有学者^[17-19]认为在特定时间尺度上近地表气象观测要素本身应包含足够的信息来估计蒸散发。在此基础上, Mccoll 等^[20]2020 年提出了地表通量均衡法(surface flux equilibrium, SFE), 通过建立一个理想化的大气边界层模型, 将日尺度蒸散发表示为气温、比湿和地表净辐射的函数关系, 进而与全球通量观测数据比较, 证明了该方法的可靠性。相较于传统

收稿日期: 2022-05-16 修回日期: 2022-09-24 网络出版时间: 2022-11-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20221115.1632.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071032); 青海省基础研究计划项目(2020-ZJ-715); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2020056)

作者简介: 余晓雨(1997—), 女, 河南商丘人, 主要从事遥感水文研究。E-mail: yuxy.19s@igsnr.ac.cn

通信作者: 朱文彬(1987—), 男, 山东青岛人, 副研究员, 主要从事遥感水文与水资源管理研究。E-mail: zhuwb@igsnr.ac.cn

蒸散发模型,上述方法参数化方案简单,仅需常规的气象观测资料即可实现蒸散发的估算,在大尺度、长时间序列蒸散发模拟方面具有显著优势。另外,该模型建立蒸散发与温度、湿度以及净辐射等常规气象要素之间明确的物理关系,能够为陆气耦合强度及全球气候变化研究提供重要的理论基础,具有广阔的应用前景。然而,SFE方法目前仅在站点尺度进行了应用与评估,相关的大尺度估算和验证工作^[15-16,20]还相对较少。

在此背景下,基于SFE方法对我国长时间序列陆面蒸散发进行模拟估算,以评价该方法在我国的适用性。具体而言,在站点和流域尺度分别利用通量观测数据和流域水文数据验证SFE对我国陆面蒸散发的估算精度,进而从时间和空间尺度对比分析估算结果与其他蒸散发产品的时空格局,进一步揭示我国2001—2015年陆面蒸散发的时空演变规律,为长时间、大尺度的水循环和气候变化研究提供基础。

1 数据与方法

1.1 数据介绍

使用的数据主要包括模型输入数据、模型验证数据和模型对比数据3部分。

模型输入数据包括气温、比湿和地表净辐射。气温和比湿数据来自中国区域地面气象要素驱动数据集^[21],用于估算日尺度蒸发比(F_E),该数据集由国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)发布,以国际上现有的Princeton再分析资料、GLDAS资料、GEWEX SRB辐射资料,以及TRMM遥感降水产品为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成,时间分辨率为1 d,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。日尺度地表净辐射数据则选用了GLASS全波段净辐射产品(<http://www.glass.umd.edu/NR/Land/>)。该产品基于MODIS和MERRA2等数据,利用随机森林方法拟合净辐射与短波辐射、气象要素的关系制作而成。与其他净辐射产品相比,GLASS产品具有空间分辨率高($0.05^\circ \times 0.05^\circ$)、空间连续的特点^[22]。此外,结合CERES_SYN1deg_Ed4A的日尺度辐射通量产品(<https://ceres.larc.nasa.gov>),对地表净辐射估算结果进行交叉验证,并分析地表净辐射精度对蒸散发估算结果的影响,其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。由于GLASS和CERES净辐射产品的时间跨度限制,因

此统一选取了2001—2015年的输入数据。

模型验证数据包括站点尺度和流域尺度两方面。站点尺度上,选取中国通量网ChinaFLUX 8个典型生态类型的涡度相关观测数据^[23],时间跨度为2003—2010年,具体包括4个森林站、3个草原站、1个农田站,见表1。ChinaFLUX的数据来源相同,数据处理形式统一,均经过相同的数据质量控制,已广泛应用于中国区域的ET产品精度验证^[24]。流域尺度上,利用中国水资源一级区的降水、径流和水储量数据,基于水量平衡原理计算流域尺度的年蒸散发 ET_w [式(1)],将其作为真值来评价SFE方法在流域尺度的精度。其中,各水资源分区的年降水量和年径流量数据,来源于《中国水资源公报》和各流域的水资源公报。由于水资源分区中仅辽河区、海河区、黄河区、淮河区、长江区和珠江区有入海径流量,因此仅计算上述6个水资源分区的 ET_w 。陆地水储量数据采用的是美国国家航空航天局喷气推进实验室发布的重力卫星GRACE RL06M Mascon数据(<http://grace.jpl.nasa.gov>)。该数据提供逐月的陆地水储量距平值,其空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

表1 通量观测站点基本信息

Tab. 1 General background of flux observation sites used in this study

下垫面	站名	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	年均降水量/mm
森林	长白山	128.10	42.40	761	713
	千烟洲	115.06	26.74	100	1 542
	鼎湖山	112.53	23.17	300	1 956
	西双版纳	101.20	21.96	756	1 493
草地	内蒙古	116.68	43.55	1 250	336
	海北灌丛	101.29	37.62	3 216	535
	当雄	91.07	30.85	4 250	450
农田	禹城	116.60	36.95	28	582

$$ET_w = P - R - \Delta W \quad (1)$$

式中: P 为年降水量,mm; R 为年径流量,mm; ΔW 为流域蓄水量的年变化量,可依据GRACE逐月的水储量数据计算得到。具体而言,先根据GRACE数据计算出逐月的流域平均蓄水量距平值,进而计算相邻年12月的水储量距平值的差值,即可得到逐年流域水储量的变化值^[25]。受数据时间序列的限制,选取2003—2013年6个水资源分区的径流、降水和水储量数据,基于式(1)计算逐年 ET_w ,用于评估SFE方法在流域尺度的精度。

模型对比数据主要选用以下两种常用的蒸散发

产品,对 SFE 方法在中国的估算结果进行对比验证。国家青藏高原科学数据中心发布的中国陆地实际蒸散发数据集^[26],即 CR(complementary relationship)产品,该产品以 GLASS 产品和 ERA5_Land 再分析资料为地表参量的输入数据,结合 CMFD 的辐射和气象数据,基于蒸散发互补关系模型制作而成,提供全国月尺度的蒸散发数据,空间分辨率为 0.1°×0.1°。GLEAM(Global land-surface evaporation: the amsterdam methodology)蒸散发产品(v3.3a)^[27-28],该产品基于 Priestley-Taylor 理论和 ERA5 再分析资料,综合考虑土壤蒸发、植被蒸腾及冠层截留水蒸发,提供了全球日尺度和月尺度蒸散发数据,空间分辨率为 0.25°×0.25°。为了保证上述产品与 SFE 估算结果时间序列的一致性,选择其 2001—2015 年的数据作为对比评价的对象。

1.2 研究方法

1.2.1 地表通量均衡法

基于美国通量观测网的实测数据,Salvucci 等^[29]发现在大气边界层的日变化过程中,由于陆-气系统密切的互馈关系,地表水汽导度总是趋向于降低相对湿度廓线的垂直梯度。这意味着在大多数地表参数信息缺失的情况下,仅依据常规气象要素和植被高度信息即可实现地表水汽导度的估算,进而求得陆面实际蒸散发。为了进一步在日平均尺度下简化估算过程,并从物理机制上解释上述现象,Mccoll 等^[17]提出 SFE。该模型假设在无水汽平流输送和辐合输送的地区(如内陆地区),近地表大气处于地表通量均衡状态,即在日尺度或更长的时间尺度下,地表湿润项(潜热)和增温项(显热)在相对湿度的垂直变化过程中可以近似达到均衡,此时地表的相对湿度与近地表大气的相对湿度相同。Mccoll 等^[20]进一步研究表明,SFE 方法在全球站点尺度精度较好,与涡度相关观测具有较好的一致性。基于该方法,日尺度蒸发比可表示为

$$F_E = \frac{q_a}{q_a + R_v c_p T_a^2 / \lambda^2} \quad (2)$$

式中: R_v 是水汽的气体常数,461.5 J/(kg·K); c_p 是空气的定压比热,1 005 J/(kg·K); T_a 为地面参考高度处的气温,K; q_a 为地面参考高度处的比湿,kg/kg; λ 为汽化潜热,2.500 8×10⁶ J/kg。从公式(2)可以看出,在达到均衡条件下,蒸发比与气温呈负相关关系,与比湿则呈正相关关系。较高的蒸发比值,对应较低的气温(即存在较小的感热通量)和较高的比湿

(即存在较大的潜热通量)。

根据公式(2)和地表能量平衡方程,潜热通量可进一步表示为

$$\lambda \cdot ET = F_E \cdot (R_n - G) = \frac{q_a}{q_a + R_v c_p T_a^2 / \lambda^2} (R_n - G) \quad (3)$$

式中: R_n 是日尺度地表净辐射,W/m²; G 是土壤热通量,W/m²,该值在日尺度量级较小,可忽略不计^[30]。因此,潜热通量可看作是气温、比湿和净辐射 3 个变量的函数,其中气温和比湿均可通过常规气象观测资料获得。

1.2.2 精度评价指标

研究采用 4 个统计指标来对 SFE 方法进行精度评估,分别为相关系数 r 、平均绝对误差 E_{MA} 、均方根误差 E_{RMS} 和相对偏差 B_R ,公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (5)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

$$B_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (7)$$

式中: n 表示样本数量; x_i 和 y_i 分别表示蒸散发的估算值与观测值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示蒸散发的估算值均值与观测值均值。

1.2.3 趋势显著性检验

为分析研究区内逐像元蒸散发的长时间变化特征,采用水文气象领域广泛使用的 Mann-Kendall (MK)非参数统计方法进行趋势检验^[31-32]。基于时间序列 X 的秩次和其时间顺序之间的相关性,MK 趋势检验的统计量 S 可表示为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (8)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j > x_i \\ 0, & x_j = x_i \\ -1, & x_j < x_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: n 为样本数量; x_i 和 x_j 分别为在 i 和 j 时刻对应的 X 数值。根据公式(8)可以看出, S 只依赖于样本的秩次而与 X 的实际值无关,属于无分布检验统计

量,因此 MK 趋势检验具有不受数据实际分布影响的优势。

MK 检验的原假设 H_0 认为时序 X 是独立同分布的样本,所以当 $n > 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,则 S 的均值为 0,方差为

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (10)$$

通过对比标准化统计量 Z 和显著性水平 α 下的标准正态分布表,检验原假设是否成立,从而判断 X 的趋势。统计量 Z 的计算公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

当设定显著水平 $\alpha=0.01$ 时,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则拒绝原假设,即时序 X 在 0.01 水平上具有显著的上升或下降趋势。其中: $Z > 0$,表示显著增加趋势; $Z < 0$,表示显著下降趋势。

2 模型精度验证

2.1 站点尺度

基于 2003—2010 年 8 个 ChinaFLUX 通量站点数据,在站点尺度上对 SFE 方法的蒸发比估算精度进行验证,见表 2。

表 2 通量站点观测日蒸发比与 SFE 方法估算值比较

Tab. 2 Comparison of daily EF between observation and SFE estimation at flux sites

站名	r	$E_{MA}/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	$E_{RMS}/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	$B_R/\%$
长白山	0.83	0.15	0.20	-6.44
千烟洲	0.61	0.12	0.16	-8.33
鼎湖山	0.38	0.13	0.17	-6.21
西双版纳	0.26	0.14	0.17	-14.20
内蒙古	0.32	0.17	0.22	8.61
海北灌丛	0.85	0.13	0.17	-15.26
当雄	0.84	0.12	0.14	-4.31
禹城	0.46	0.25	0.30	-25.10
森林	0.74	0.14	0.17	-8.93
草地	0.62	0.14	0.18	5.51
农田	0.46	0.25	0.30	-25.10
总体	0.71	0.15	0.19	-5.77

根据表 2 可知,蒸发比存在低估现象,总体 B_R 为-5.77%,8 个站点中仅在内蒙古站存在高估

($B_R=8.61\%$)。蒸发比的总体 r 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 分别为 0.71、0.15 mm/d 和 0.19 mm/d,其中在当雄站的估算精度最高, r 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 分别为 0.84、0.12 mm/d 和 0.14 mm/d。在森林下垫面中,站点纬度越低其相关性越低。在草原下垫面中,站点纬度越低其 E_{MA} 和 E_{RMS} 越低,其中海北灌丛和当雄站的估算精度较高, E_{RMS} 分别为 0.17 mm/d 和 0.14 mm/d。相较于农田站点,森林和草原站点的精度总体较高, E_{MA} 均为 0.14 mm/d, r 分别为 0.74 和 0.62, E_{RMS} 分别为 0.17 mm/d 和 0.18 mm/d。而在农田站蒸散发误差较大, r 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 分别 0.46、0.25 mm/d 和 0.30 mm/d。由于不同下垫面的通量站点较少,特别是农田下垫面仅有禹城一个站点,因此该结果不能充分代表 SFE 方法在各下垫面的估算精度。

为了评估基于 SFE 方法的蒸散发估算结果,基于 F_E 估算结果和 GLASS 净辐射数据实现日尺度的蒸散发估算,并利用 2003—2010 年相应通量站点的潜热通量数据,对比验证 SFE 估算结果(ET_{SFE})和 GLEAM 产品估算结果(ET_{GLEAM})的精度,结果见表 3。

表 3 站点尺度下 SFE 与 GLEAM 日蒸散发估算精度比较

Tab. 3 Comparison of daily ET estimation between SFE and GLEAM at site scale

站点	ET_{SFE}			ET_{GLEAM}		
	r	$E_{MA}/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	$E_{RMS}/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	r	$E_{MA}/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	$E_{RMS}/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$
长白山	0.89	0.41	0.57	0.81	0.71	0.98
千烟洲	0.87	0.63	0.85	0.84	0.65	0.87
鼎湖山	0.67	0.82	1.07	0.61	1.00	1.27
西双版纳	0.63	1.12	1.35	0.46	1.34	1.63
内蒙古	0.61	0.72	1.06	0.49	0.71	1.07
海北灌丛	0.85	0.68	0.94	0.82	0.73	0.98
当雄	0.80	0.63	0.92	0.74	0.79	1.09
禹城	0.69	0.82	1.20	0.65	0.87	1.31
森林	0.77	0.76	1.02	0.69	0.93	1.23
草原	0.74	0.67	0.97	0.70	0.75	1.05
农田	0.69	0.82	1.20	0.65	0.87	1.31
总体	0.70	0.74	1.03	0.62	0.87	1.19

根据表 3 结果对比可知,SFE 方法的估算精度整体高于 GLEAM 产品。具体而言, ET_{SFE} 的总体 r 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 分别为 0.70、0.74 mm/d、1.03 mm/d,其中长白山站的精度最高($r=0.89$, $E_{RMS}=0.57$ mm/d),而内蒙古站的相关性最低($r=0.61$),西双版纳站的 E_{MA} 和 E_{RMS} 最高,分别为 1.12 mm/d 和 1.35 mm/d。

ET_{GLEAM} 与观测值的总体相关系数为 0.62, E_{RMS} 为 1.19 mm/d, 其中: 千烟洲站的精度最高($r=0.84$, $E_{RMS}=0.87$ mm/d); 西双版纳站精度最低($r=0.46$, $E_{RMS}=1.63$ mm/d)。因此, SFE 方法模拟值和站点观测值具有更好的一致性, 整体精度也要优于 GLEAM 产品。由于涡动观测仅代表百米范围内水热通量的平均状况, 较低的空间分辨率 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 可能是 GLEAM 产品在站点尺度精度较低的原因之一。

根据不同下垫面类型的站点估算精度, 可以看出 SFE 方法在森林和草原站点上模拟精度较高, 在农田站的误差较大, 且不同站点蒸散发估算精度的差异较为明显。为了探究造成这种差异的原因, 进

一步分析站点观测值与 ET_{SFE} 的散点分布, 见图 1。从图 1 可以看出: 在森林下垫面的长白山和千烟洲站, 其估计值与观测值一致性较好, 而鼎湖山站和西双版纳站的蒸散发整体存在高估; 在草原站中, 内蒙古站主要在低值区存在高估, 海北灌丛和当雄站主要在高值区存在低估; 在农田下垫面的禹城站估算精度较低, 存在低值高估和高值低估现象。其中: 低值高估可能是因为受水分限制条件下, SFE 方法需要较长的时间达到通量均衡状态; 高值低估的原因可能是站点存在较强的平流作用或站点有灌溉(如农田下垫面的禹城站), 使得模型无法在短时间内有效获得均衡反馈。

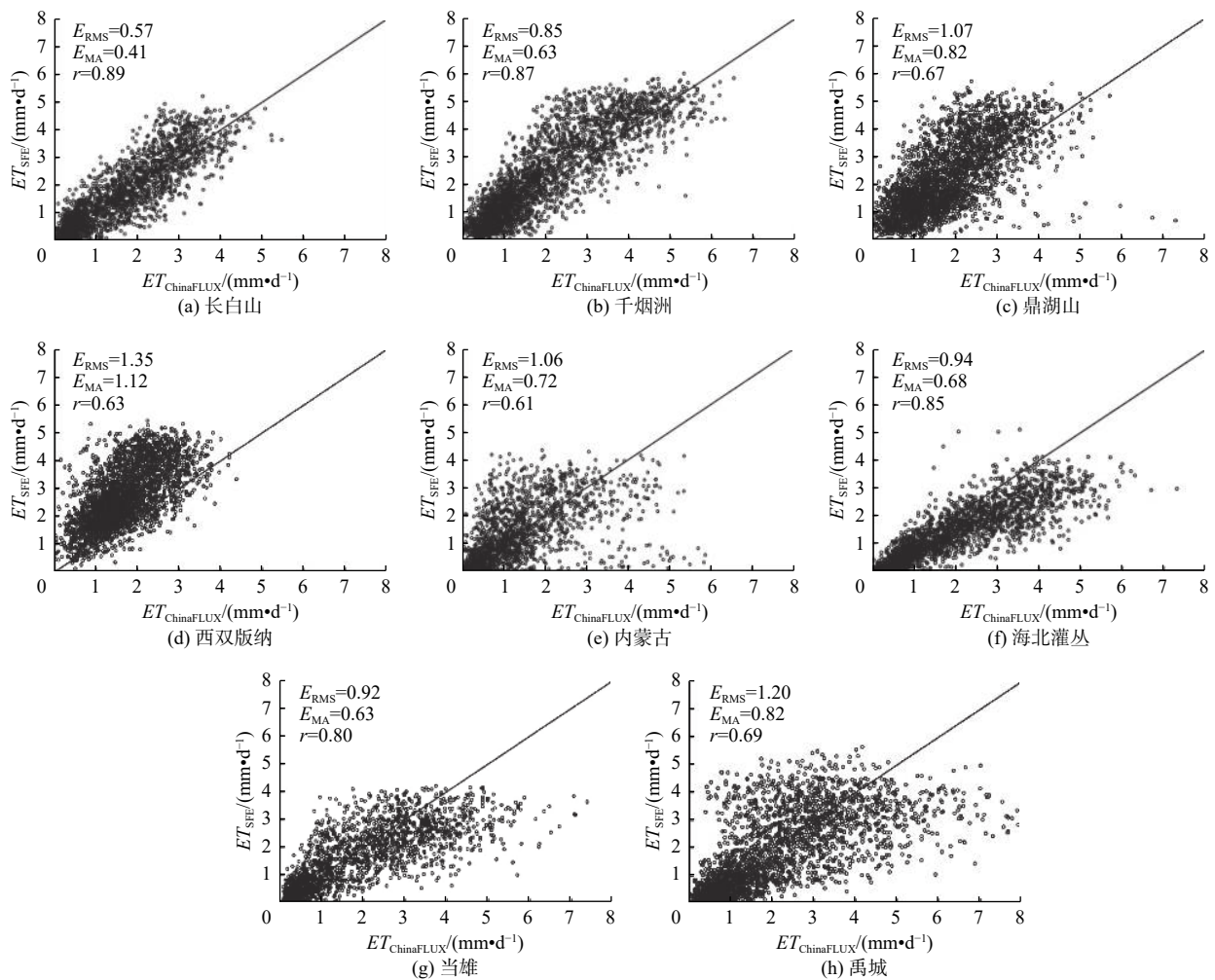


图 1 通量站点观测日蒸散发与 SFE 方法估算日蒸散发相关关系

Fig. 1 Validation results of daily ET estimated by SFE against ChinaFLUX ET data at 8 flux sites

另外, 在森林、草地和农田下垫面分别选取长白山站、当雄站和禹城站作为代表性站点, 对比分析 ET_{SFE} 和 ET_{GLEAM} 在不同下垫面 2004—2010 年的年内变化, 见图 2。从图 2 可以看出: 在长白山站和当雄站, 蒸散发年内变化均有明显的单峰趋势, 其中 ET_{SFE} 与实测值的变化趋势较为接近, ET_{GLEAM} 普

遍存在高估; 在禹城站, 实测值在年内呈明显的双峰型, 主要是因为该站下垫面为冬小麦和夏玉米轮作, 1—6 月和 7—10 月的双峰分别代表小麦和玉米的生长季, 6 月中旬到 7 月上旬冬小麦收获后蒸散发达到波谷。 ET_{SFE} 和 ET_{GLEAM} 的年内变化均呈现单峰, 存在较为明显的低值高估和高值低估现象, 无

法模拟出农田下垫面蒸散发的双峰变化趋势。两种蒸散发方法在农田下垫面的不适用性可能是受农作物轮作和灌溉等影响,农田站的下垫面和水文条件变化较为明显,而估算方法对下垫面变化和灌溉活动反应不敏感,使得蒸散发产品在农田下垫面的估算误差较大。

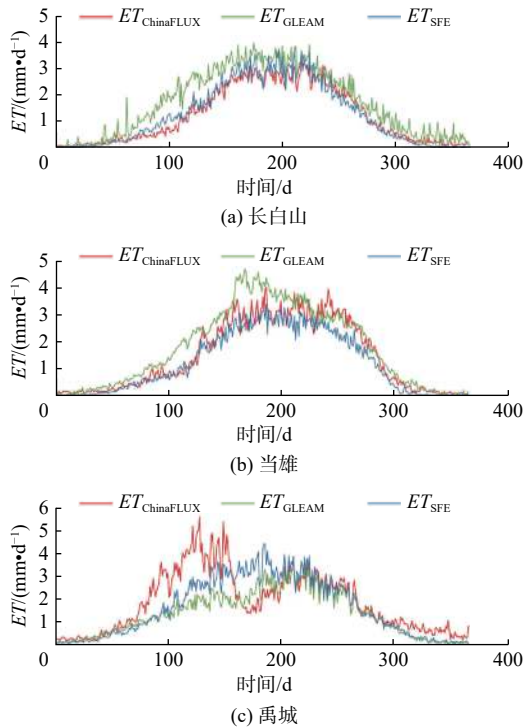


图2 站点尺度下日蒸散发的年内变化

Fig. 2 Time series of daily mean ET at sites with different land cover types

2.2 流域尺度

利用水量平衡原理计算的2003—2013年流域

多年平均蒸散发,在流域尺度对SFE方法进行精度评估,并结合GLEAM产品和CR产品(ET_{CR})进行精度对比,统计结果见表4。 ET_{SFE} 与水量平衡蒸散发(ET_w)相比总体偏低,两者相关系数为0.96, E_{MA} 为29.03 mm/a, E_{RMS} 为35.58 mm/a。具体而言, ET_{SFE} 在黄河、珠江及海河流域的估算精度较高(B_R 的绝对值小于5%),年际变化的整体趋势与 ET_w 也具有较好的一致性,见图3;而在辽河、淮河和长江流域 ET_{SFE} 的精度相对较差,其中在辽河和淮河流域 ET_{SFE} 的年际变化较为平缓,与 ET_w 变化趋势的一致性较差,未能模拟出辽河区在2009—2011年的峰值。另外, ET_{SFE} 在黄河、长江和珠江流域均存在高估,而在海河、辽河和淮河流域均存在低估。

与其他两组蒸散发产品相比,SFE方法在流域尺度的整体精度略高,与CR产品的精度较为接近。SFE方法和CR产品在大部分流域的精度均较高,比GLEAM产品更接近水量平衡结果;而CR产品在淮河流域相对偏差较大(-15.28%),相较于GLEAM产品(-10.30%)CR产品的低估更为明显。此外,在长江区SFE方法的相对偏差(8.63%)稍高于CR产品(5.30%),但SFE的变化趋势与 ET_w 更为相似,见图3(e);在辽河、海河等其他流域SFE方法的相对偏差均小于其他两组蒸散发产品,其中在珠江区相对偏差最小(1.63%)。因此,SFE方法在流域尺度上具有较好的适用性,在大部分流域的蒸散发精度均高于其他产品,且整体的年际变化趋势与 ET_w 具有较好的一致性。

表4 水资源一级区年均蒸散值与多种蒸散发产品对比

Tab. 4 Comparison of annual ET between multiple ET products and water balance calculated ET over the 6 river basins

流域	蒸散发/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)				$B_R/\%$		
	ET_w	ET_{GLEAM}	ET_{CR}	ET_{SFE}	GLEAM	CR	SFE
辽河区	471.29	417.65	425.77	447.47	-11.38	-9.66	-5.05
海河区	515.95	437.93	455.74	507.24	-15.12	-11.67	-1.69
黄河区	439.20	378.37	402.99	454.41	-13.85	-8.24	3.46
淮河区	698.01	626.14	591.33	633.61	-10.30	-15.28	-9.23
长江区	568.58	679.83	598.71	617.63	19.57	5.30	8.63
珠江区	795.39	883.05	759.81	808.38	11.02	-4.47	1.63

在地下水超采严重的海河流域,其水资源量受人为活动的影响较为显著且时空差异性较大,其蒸散发估算可能存在较大不确定性^[33-34],因此进一步分析海河流域的蒸散发估算情况。根据表4可以看出,在海河流域 ET_{GLEAM} 和 ET_{CR} 均存在较为明显的

低估,相对偏差均低于-10%,而 ET_{SFE} 的相对偏差较小(-1.69%),且优于前人在该流域的研究结果(3.4%)^[35]。从海河流域蒸散发的年际变化可以看出,相较于 ET_{CR} , ET_{SFE} 和 ET_{GLEAM} 与 ET_w 的年际变化趋势较为一致,但 ET_{SFE} 的变化较为平缓。根据图4

可以看出,海河流域蒸散发的季节变化明显,3 个产品的年内变化均为单峰型且最高值均出现在 7 月,在灌溉后的 5—8 月蒸散发明显高于其他月份,该年内变化现象与前人研究一致^[36]。其中夏季(6—8 月)的占比最大, ET_{SFE} 和 ET_{CR} 均占全年的 55% 左右,高于 ET_{GLEAM} (50%); 冬季(12 月一次年

2 月)占比最小, ET_{SFE} 和 ET_{CR} 仅占 2% 左右,低于 ET_{GLEAM} (4%)。因此 SFE 方法在海河区有较好的适用性,在流域尺度具有较好的估算精度,而且能较好地模拟出海河区 ET 的季节变化,但 ET_{SFE} 的际年变化幅度较小,未能模拟出明显的峰值。

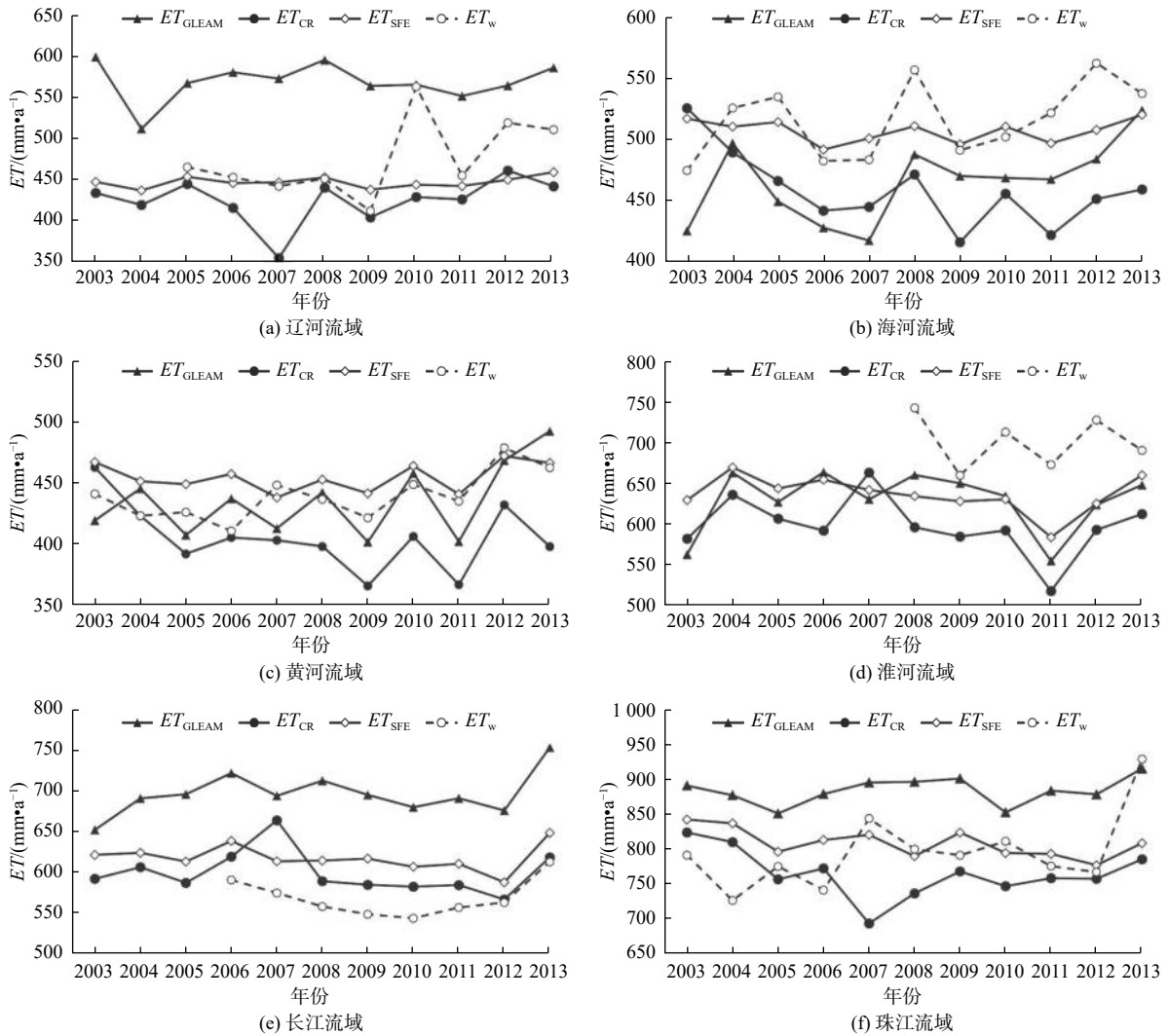


图 3 3 种蒸散发产品在不同流域的际年变化对比

Fig. 3 Interannual variation comparison of three ET datasets in six basins

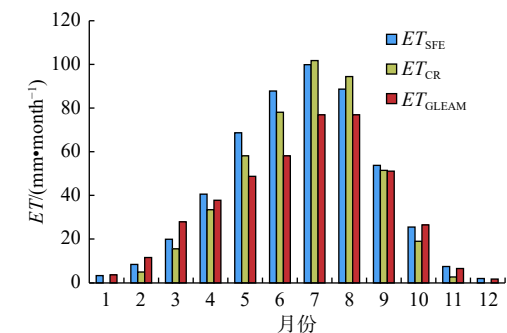


图 4 3 种蒸散发产品在 Haihe 流域的年内变化对比

Fig. 4 Monthly variation comparison of three ET datasets in Haihe basin

2.3 地表净辐射对蒸散发估算结果影响

使用的蒸散发模型参数化方案较为简单,估算结果主要受蒸发比和净辐射的精度影响。其中 SFE 方法主要用于蒸发比估算,在站点尺度其估算精度较好见表 2,在流域尺度由于缺乏蒸发比的实测数据和相关产品,无法进行流域尺度的精度验证。为了探究蒸散发估算的不确定性,基于 SFE 的蒸发比估算结果,分别选用 GLASS 净辐射产品和 CERES 净辐射产品进行日尺度蒸散发估算,从而对比基于两种净辐射产品的蒸散发精度,进一步从站点和流域尺度评估净辐射估算误差对蒸散发结果

的影响。

利用 2003—2010 年 8 个 ChinaFLUX 通量站点数据,对基于两种净辐射产品计算的蒸散发结果进行了精度对比(图 5)。总体而言,基于 GLASS 产品的蒸散发(ET_{GLASS})比基于 CERES 产品的蒸散发(ET_{CERES})估算精度略高。其中在站点尺度上,见图 5(a), ET_{CERES} 的总体 r 、 E_{MA} 和 E_{RMS} 分别为 0.67、0.75 mm/d

和 1.04 mm/d,略高于 ET_{GLASS} 的误差($r=0.70$, $E_{MA}=0.74$ mm/d, $E_{RMS}=1.03$ mm/d)。虽然在西双版纳站中, ET_{GLASS} 的 E_{MA} (1.12 mm/d)和 E_{RMS} (1.35 mm/d)均高于 ET_{CERES} ($E_{MA}=0.96$ mm/d, $E_{RMS}=1.17$ mm/d),但 ET_{GLASS} 与实测值的相关性($r=0.63$)高于 ET_{CERES} ($r=0.59$)。

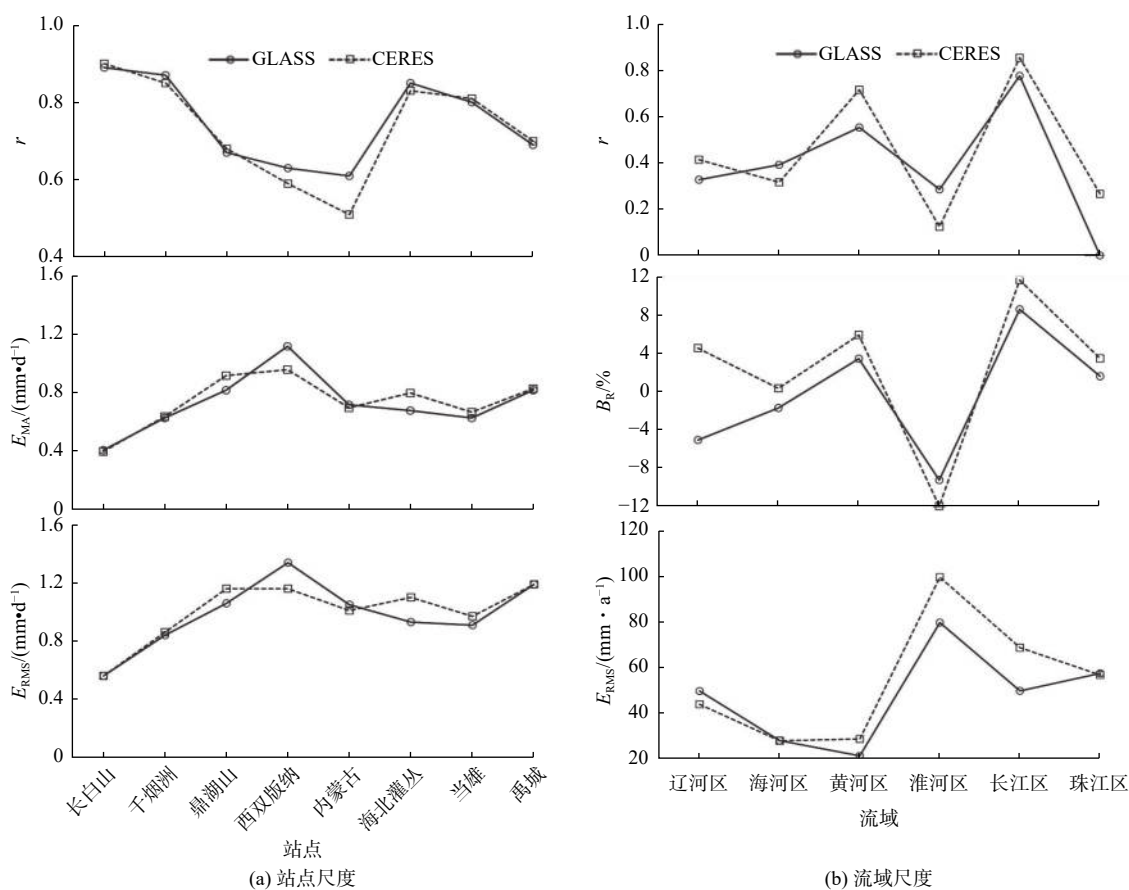


图 5 基于不同净辐射产品的蒸散发估算精度

Fig. 5 Comparison of ET estimated by CERES products and GLASS products at site and basin scale

另外,基于 6 个水资源一级区的 2003—2013 年年均 ET_W ,在流域尺度上对比了 ET_{GLASS} 和 ET_{CERES} 的估算精度 [图 5(b)]。结果表明: ET_{GLASS} 的 E_{RMS} (48.16 mm/a) 和 B_R (-0.38%) 均略低于 ET_{CERES} ($E_{RMS}=54.75$ mm/a, $B_R=2.35\%$),特别是在淮河和长江区 ET_{GLASS} 的精度显著高于 ET_{CERES} 的精度; ET_{CERES} 在流域尺度的估算结果整体偏大,除了在淮河区有明显的低估($B_R=-11.94\%$),在大部分流域均存在高估,特别是在长江区高估较为明显($B_R=11.68\%$); ET_{CERES} 在不同流域精度差别较大,其中在海河区相对偏差的绝对值最小($B_R=0.36\%$),在淮河区相对偏差的绝对值最大;在蒸发比相同的情况下, ET_{CERES} 和 ET_{GLASS} 在辽河区的 B_R 差值达到

9.62%,而在珠江区 B_R 差值仅有 1.85%,因此在不同流域中净辐射估算误差对蒸散发结果的影响程度不同。

3 蒸散发时空格局变化分析

为进一步探究基于 SFE 方法的蒸散发产品在我国适用性,分析 2001—2015 年 ET_{SFE} 的时空变化趋势,并与 CR 产品和 GLEAM 产品进行对比,掌握各蒸散发产品的年际变化和地域性变化特征,从而实现 ET_{SFE} 的间接评价。

3.1 蒸散发时间变化特征

从年际变化 [图 6(a)] 来看,2001—2015 年 ET_{SFE} 的波动范围为 490.66 ~ 522.20 mm/a,多年平均值为

503.32 mm/a, 明显高于 ET_{GLEAM} (415.36 mm/a) 和 ET_{CR} (424.30 mm/a)。3 种蒸散发产品在 2001—2015 年变化趋势均较平稳, 其中, ET_{SFE} 与 ET_{CR} 整体均呈现一定的下降趋势, ET_{CR} 的下降趋势更为明显, 平均下降速率为 0.76 mm/a; 而 ET_{GLEAM} 整体呈上升趋势, 平均上升速率为 2.19 mm/a。 ET_{SFE} 和 ET_{CR} 的

最大值均在 2002 年, 从 2001—2002 年分别增长了 31.54 mm/a 和 14.56 mm/a, 此后至 2015 年两者均呈下降趋势, 分别减少了 20.97 mm/a 和 24.69 mm/a。另外, ET_{SFE} 和 ET_{GLEAM} 的最小值均出现在 2001 年, 分别为 490.66 mm/a 和 397.42 mm/a。

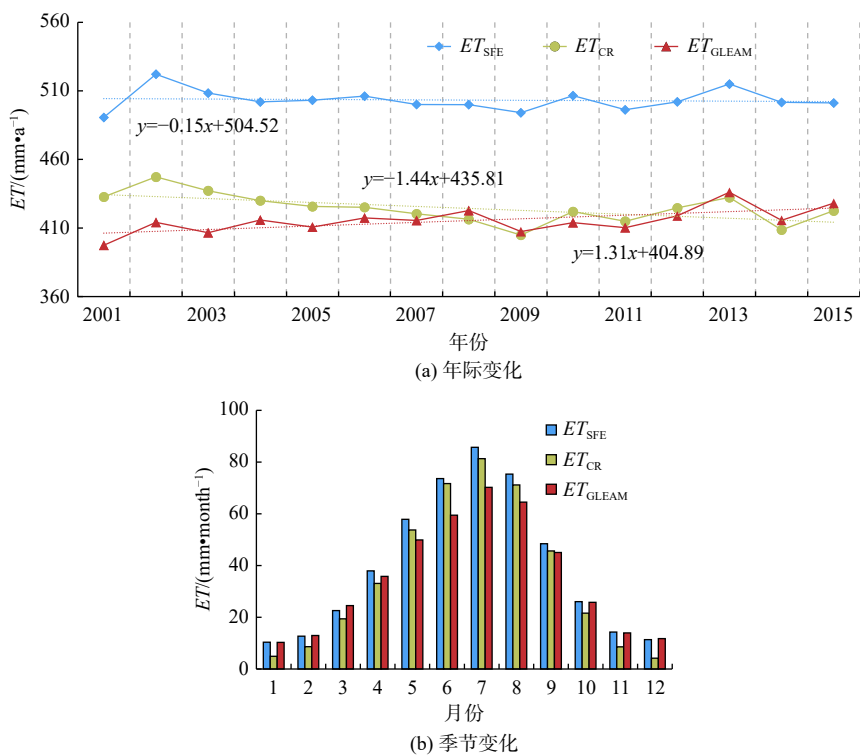


图 6 2001—2015 年中国陆面蒸散发时间变化趋势
Fig. 6 Temporal variation trend of ET in China from 2001 to 2015

从季节变化 [图 6(b)] 来看, 3 种蒸散发产品均呈单峰分布, 最高值出现在 7 月。其中, ET_{SFE} 和 ET_{GLEAM} 的最低值均出现在 1 月, 分别为 10.38 mm/month 和 10.31 mm/month, ET_{CR} 最低值则出现在 12 月 (4.21 mm/month)。由于 4—9 月气温回升、降水充足, 为地表植被的生长初期和中期, 因此土壤蒸发与植被蒸腾量较高, 分别约占 ET_{SFE} 、 ET_{CR} 和 ET_{GLEAM} 全年的 79.54%、84.12% 和 76.56%。10 月—次年 3 月, 气温较低降水较少, 为植被的生长末期和非生长期, 三者蒸散发则相对较低。此外, ET_{SFE} 的月均值总体高于其他两个产品, 其中: 在 5—9 月 ET_{SFE} 与 ET_{CR} 较为接近, 且均高于 ET_{GLEAM} ; 而在 10 月—次年 4 月 ET_{SFE} 与 ET_{GLEAM} 较为接近, 且均高于 ET_{CR} 。

3.2 蒸散发产品空间变化特征

利用 MK 趋势检验法, 得到 2001—2015 年 3 种产品在显著水平 $\alpha=0.01$ 下的多年蒸散发变化趋势,

分别为显著上升、无显著变化和显著下降, 见图 7。其中, 图 7(a) ~ (c) 分别为 SFE、CR 和 GLEAM 产品各在流域多年蒸散发的变化趋势占比, 图 7(d) 为 3 种产品蒸散发变化趋势的差异对比。整体来说, 3 种产品蒸散发无显著变化趋势的地区约占中国国土的 4/5。其中, ET_{SFE} 和 ET_{CR} 变化趋势更为接近, 两者蒸散发呈显著增长变化的占比均约为 10%, 而显著下降变化占比则分别为 5% 和 3%。对于显著增长趋势, 两种产品具有一致性, 主要集中在西北诸河区、西南诸河区、松花江区和长江区, 另外 ET_{SFE} 在辽河区也存在少量该趋势变化。对于显著下降趋势, 两种产品重心均在西北诸河区和东南诸河区, 而南方流域次之, 松花江区则相对较少。相比而言, ET_{GLEAM} 同 ET_{SFE} 和 ET_{CR} 变化趋势差异较大, 几乎不存在蒸散发显著下降的地区 (除少量像元), 显著增长趋势变化占比约 7%, 集中在松辽流域、珠江区和东南诸河区, 少量分布在海河区。此外, 根

据图 7(d)可知,3种蒸散发产品主要在东南诸河区的变化趋势不同、在松花江区存在显著增长趋势的像元,主要是由于 ET_{GLEAM} 的变化趋势与其他两种产品相比存在较大差异。综上所述, ET_{SFE} 与 ET_{CR}

在多数区域中变化趋势一致性较好,显著下降地区均在西北诸河区和东南诸河区,而 ET_{GLEAM} 几乎不存在显著下降地区。

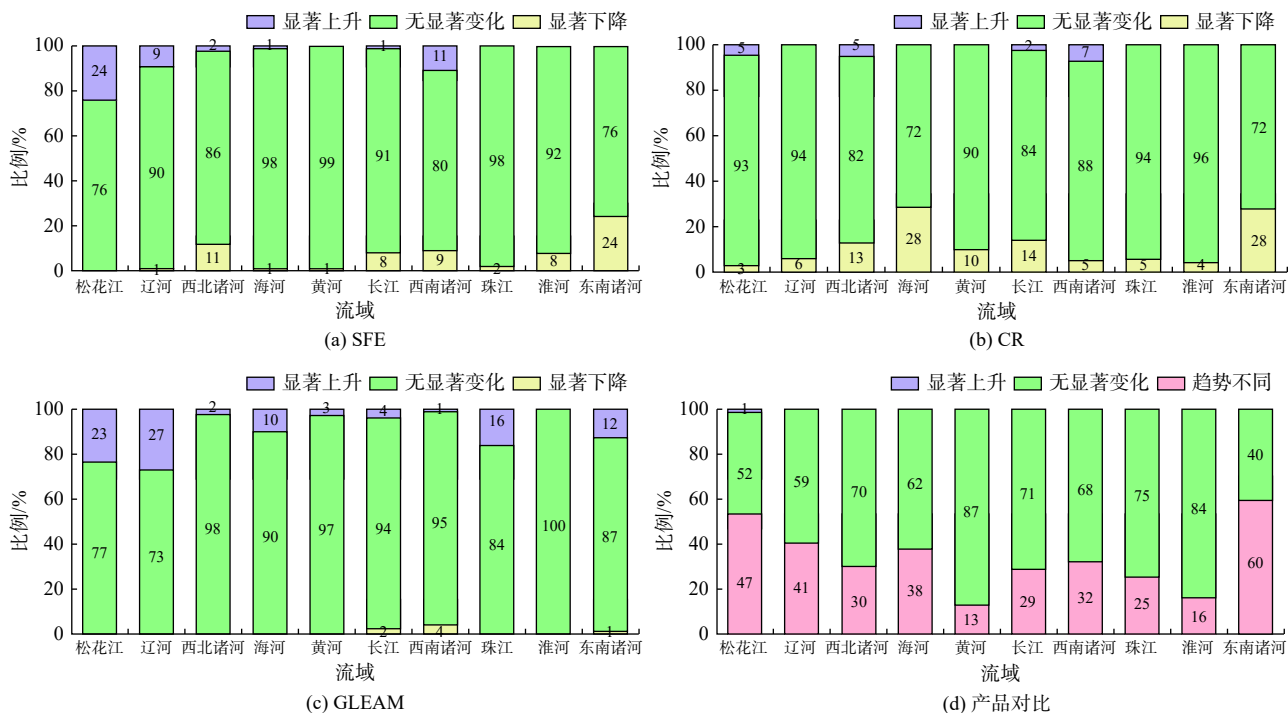


图 7 3 种中国陆面蒸散发产品各流域蒸散发变化趋势占比

Fig. 7 Area proportion of variation trend of three ET products in different basins of China

4 结论

蒸散发是连接地表水热平衡的纽带,准确估算蒸散发对于水资源合理开发利用具有重要作用。鉴于现有模型参数化方案相对复杂,在大尺度上应用存在较大的不确定性,需要构建机理简单可靠、输入参数少的模型,从而实现大尺度蒸散发的快速、简便和连续估算。为此基于近几年提出的 SFE 方法,估算了中国区域长时序的蒸发比,并结合地表净辐射产品得到 2001—2015 年的全国蒸散发量。

在站点尺度,SFE 方法估算的蒸发比总体 r 和 E_{RMS} 分别为 0.71 和 0.19,蒸散发的估算精度总体优于 GLEAM 产品,SFE 估算结果的 r 和 E_{RMS} 分别为 0.70 和 1.03 mm/d。在流域尺度,SFE 估算结果与水量平衡蒸散发具有较好的一致性,整体优于 CR 产品和 GLEAM 产品。此外,该方法估算的 2001—2015 年中国年均蒸散发为 503.32 mm/a,SFE 结果和 CR 产品的年际变化总体波动较小,均呈微弱下降趋势,而 GLEAM 产品呈上升趋势。从各流域蒸散发的多年变化趋势来看,SFE 估算结果

和 CR 产品在多数区域蒸散发变化趋势一致性较好。总体而言,SFE 方法对中国陆面蒸散发估算具有较好的适用性,基本达到现有产品精度,且其物理机制明确、参数化方案简单,因此有潜力为蒸散发的大尺度准确估算提供一套行之有效的替代方案。

此外,探究不同地表净辐射产品对蒸散发估算结果的影响,发现基于 GLASS 产品的蒸散发比基于 CERES 产品的蒸散发总体精度略高但差别不大。由于不同下垫面的通量站点数目均较少,针对不同下垫面的精度对比存在较大不确定性。因此,下一步工作重点在于选择合适可靠的净辐射产品,并利用更多的通量站点数据,在大尺度下对不同下垫面的估算精度进行评价,为后续蒸散发估算精度的改进研究作准备。

参考文献 (References):

- [1] 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. (in Chinese)) DOI: [10.11834/jrs.20209099](https://doi.org/10.11834/jrs.20209099).
- [2] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072. DOI: [10.1126/science.1128845](https://doi.org/10.1126/science.1128845).
- [3] GAN G J, GAO Y C. Estimating time series of land surface energy fluxes using optimized two source energy balance schemes: Model formulation, calibration, and validation[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015, 208: 62-75. DOI: [10.1016/j.agrformet.2015.04.007](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.007).
- [4] 张戈, 夏建新, 王树东, 等. 基于多源数据的黑河流域日尺度蒸散发量模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 33-38. (ZHANG G, XIA J X, WANG S D, et al. Simulating the daily evapotranspiration in Heihe River basin with multi-sensor remote sensing data[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(6): 33-38. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0150](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0150).
- [5] 张磊. 基于MOD16产品的海拉尔流域蒸散发时空分布特征研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(4): 32-44. (ZHANG L. MOD16 products-based study on spatio-temporal distribution characteristics of evapotranspiration in Hailarhe River watershed[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(4): 32-44. (in Chinese)) DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.04.004](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.04.004).
- [6] DAI Y, ZENG X, DICKINSON R E, et al. The common land model[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(8): 1013-1024. DOI: [10.1175/BAMS-84-8-1013](https://doi.org/10.1175/BAMS-84-8-1013).
- [7] CARLSON T. An overview of the triangle method for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery[J]. *Sensors*, 2007, 7(8): 1612-1629. DOI: [10.3390/s7081612](https://doi.org/10.3390/s7081612).
- [8] XU T R, GUO Z X, LIU S 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. DOI: [10.1029/2018JD028447](https://doi.org/10.1029/2018JD028447).
- [9] PIPONIC R C, WALKER J P, WESTERN A. Assimilation of remotely sensed data for improved latent and sensible heat flux prediction: A comparative synthetic study[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1295-1305. DOI: [10.1016/j.rse.2007.02.038](https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.038).
- [10] 尹剑, 欧照凡. 基于地表能量平衡的大尺度流域蒸散发遥感估算研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 17(3): 79-88. (YIN J, OU Z F. Remote sensing estimation of evapotranspiration in large-scale basin based on surface energy balance[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 17(3): 79-88. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0062](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0062).
- [11] 郑超磊, 胡光成, 陈琪婷, 等. 遥感土壤水分对蒸散发估算的影响[J]. *遥感学报*, 2021, 25(4): 990-999. (ZHENG C L, HU G C, CHEN Q T, et al. Impact of remote sensing soil moisture on the evapotranspiration estimation[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(4): 990-999. (in Chinese))
- [12] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(12): 295-1307. (ZHANG R H, DU J P, SUN R. Review of estimation and validation of regional evapotranspiration based on remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(12): 295-1307. (in Chinese)) DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2012.12.1295](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2012.12.1295).
- [13] 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. Progress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2008, 12(3): 515-528. (in Chinese)) DOI: [10.11834/jrs.20080369](https://doi.org/10.11834/jrs.20080369).
- [14] 李艳, 黄春林, 卢玲, 等. 蒸散发遥感估算方法的研究进展[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(6): 765-772. (LI Y, HUANG C L, LU L, et al. Progress in evapotranspiration estimation using remotely sensed data[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 50(6): 765-772. (in Chinese)) DOI: [10.13885/j.issn.0455-2059.2014.06.00](https://doi.org/10.13885/j.issn.0455-2059.2014.06.00).
- [15] KIM Y, GARCIA M, MORILLAS L, et al. Relative humidity gradients as a key constraint on terrestrial water and energy fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(9): 5175-5191. DOI: [10.5194/hess-2020-643](https://doi.org/10.5194/hess-2020-643).
- [16] RAGHAV P. Retrieving gap-free daily root zone soil moisture using surface flux equilibrium theory[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(10): 104007(11pp). DOI: [10.1088/1748-9326/ac2441](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2441).
- [17] MCCOLL K A, SALVUCCI G D, GENTINE P. Surface flux equilibrium theory explains an empirical estimate of water-limited daily evapotranspiration[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 1(7): 2036-2049. DOI: [10.1029/2019MS001685](https://doi.org/10.1029/2019MS001685).
- [18] ZHOU S, ZHANG Y, WILLIAMS, A P, et al. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events[J]. *Science Advances*, 2019, 5(1): 5740.

- DOI: [10.1126/sciadv.aau5740](https://doi.org/10.1126/sciadv.aau5740).
- [19] NOVICK K A, FICKLIN D L, STOY P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1023-1027. DOI: [10.1038/nclimate3114](https://doi.org/10.1038/nclimate3114).
- [20] MCCOLL K A, RIGDEN A J. Emergent simplicity of continental evapotranspiration[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(6): e2020GL087101. DOI: [10.1029/2020GL087101](https://doi.org/10.1029/2020GL087101).
- [21] HE J, YANG K, TANG W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 25. DOI: [10.1038/s41597-020-0369-y](https://doi.org/10.1038/s41597-020-0369-y).
- [22] LIANG S, CHENG C, JIA K, et al. The Global Land Surface Satellite (GLASS) products suite[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, 102(2): E323-E337. DOI: [10.1175/BAMS-D-18-0341.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0341.1).
- [23] YU G R, WEN X F, SUN X M, et al. Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3): 125-137. DOI: [10.1016/j.agrformet.2006.02.011](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.02.011).
- [24] CHENG M, JIAO X, LI B, et al. Long time series of daily evapotranspiration in China based on the SEBAL model and multisource images and validation[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3995-4017. DOI: [10.5194/essd-13-3995-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-3995-2021).
- [25] 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 H. Evaluation of MODIS MOD16 evapotranspiration product in Chinese river basins[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 517-528. (in Chinese)) DOI: [10.11849/zrzyxb.20160440](https://doi.org/10.11849/zrzyxb.20160440).
- [26] MA N, SZILAGYI J. The CR of evaporation: A calibration-free diagnostic and benchmarking tool for large-scale terrestrial evapotranspiration modeling[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55: 7246-7274. DOI: [10.1029/2019wr024867](https://doi.org/10.1029/2019wr024867).
- [27] MIRALLES D G, HOLMES T R H, DE J, et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 453-469. DOI: [10.5194/hess-15-453-2011](https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011).
- [28] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10: 1903-1925. DOI: [10.5194/gmd-10-1903-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017).
- [29] SALVUCCI G D, GENTINE P. Emergent relation between surface vapor conductance and relative humidity profiles yields evaporation rates from weather data[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(16): 6287-6291. DOI: [10.1073/pnas.1215844110](https://doi.org/10.1073/pnas.1215844110).
- [30] LI Z, TANG R, WAN Z, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data[J]. *Sensors* 2009, 9(5), 3801-3853. DOI: [10.3390/s90503801](https://doi.org/10.3390/s90503801).
- [31] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259. DOI: [10.2307/1907187](https://doi.org/10.2307/1907187).
- [32] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin, 1975.
- [33] FENG W, SHUM C, ZHONG M, et al. Groundwater storage changes in China from satellite gravity: An overview[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 674. DOI: [10.3390/rs10050674](https://doi.org/10.3390/rs10050674).
- [34] 姜姗姗, 占车生, 王会肖, 等. 地下水开采对海河流域水循环过程影响的模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(4): 54-59+98. (JIANG S S, ZHAN C S, WANG H X, et al. Simulation of the impacts on water cycle by groundwater exploitation in the Haihe River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(4): 54-59+98. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.04.009](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.04.009).
- [35] 刘丽芳, 刘昌明, 王中根, 等. HIMS模型蒸散发模块的改进及在海河流域的应用[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 1339-1347. (LIU L F, LIU C M, WANG Z G, et al. Improvement of HIMS evapotranspiration module and its application in Haihe River basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(10): 1339-1347. (in Chinese)) DOI: [10.13930/j.cnki.cjea.150252](https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150252).
- [36] 李建明. 海河流域250米分辨率地表蒸散发遥感估算与应用研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2021. (LI J M. Estimation and application of surface evapotranspiration with 250 meters resolution using remote sensing in Haihe River basin[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2021. (in Chinese)) DOI: [10.27110/d.cnki.ghsfu.2021.001296](https://doi.org/10.27110/d.cnki.ghsfu.2021.001296).

Evaluation of surface flux equilibrium in land evapotranspiration estimation in China

YU Xiaoyu^{1,2}, TU Chenyu^{1,3}, WEI Jiaying⁴, ZHU Wenbin¹, GUAN Yunlan³

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; ; 4. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Evapotranspiration (ET) plays a key role in the surface energy balance and water cycle, and accurate estimation of ET is crucial for agricultural irrigation, climate change prediction, and water resources management and utilization. However, it is still challenging to accurately estimate ET due to its dependence on heterogeneous land surface features, which can rise the complexity of the model parameterization scheme and substantial disagreement between models. Recently, surface flux equilibrium (SFE) method was proposed based on a strong physical mechanism to estimate ET with only standard meteorological station atmospheric observations. Therefore, it has superiority in large-scale and long-time ET estimation for requiring fewer input parameters compared with other methods. Considering the lack of related research work at present, the applicability of SFE method still needs to be validated and evaluated across a broad range of land conditions.

CMFD (China Meteorological Forcing Dataset) and GLASS (The Global Land Surface Satellite) net radiation data from 2001 to 2015 were used to estimate daily ET in China based on SFE method. The ET estimations were validated with eddy covariance measurements at 8 ChinaFLUX sites and ET data of water balance at the basin scale, respectively. Moreover, the results were also compared with two types of ET products, including GLEAM (Global Land-surface Evaporation: the Amsterdam Methodology) and CR (Complementary Relationship). Based on the validation of estimation accuracy and the analysis of temporal and spatial variation trends, the applicability evaluation of SFE method was developed for ET estimation in China.

The results showed that at a site scale, the daily ET estimated by SFE was in good agreement with the ET observations ($r=0.70$, $E_{\text{RMS}}=1.03$ mm/d), which was a little better than the accuracy of GLEAM product ($r=0.62$, $E_{\text{RMS}}=1.19$ mm/d). Moreover, SFE method had better performances at the sites covered with forest and grass than those covered with the crop. At the basin scale, the ET estimated by SFE was generally close to the ET of water balance, with a correlation coefficient of 0.96. Specifically, SFE method performed best in the Pearl River basin with a relative deviation of 1.63%. In addition, the accuracy of SFE was better than GLEAM product and CR product in most basins. Based on the spatial and temporal variation trend analysis, it could be found that the interannual variation of SFE and CR products presented a slight decreasing trend from 2001 to 2015 and their variation trend had well consistency on spatial and temporal scales. In contrast, GLEAM product showed a significant increasing trend and the spatial distribution of its variation trend was quite different from the other two ET results.

In conclusion, SFE method performed well in the estimation of daily ET in China at the site and basin scale. Based on the verification and trend analysis of SFE results, it could be found that SFE method can achieve the accuracy of existing products. However, SFE method has systematical overestimation when ET is low and underestimation when it is high, especially in the cropland. Apart from the applicability problem in extreme water conditions of SFE method, net radiation data is another source of errors in ET estimation accuracy. Although the estimation accuracy varied across different surface conditions, the prediction errors of SFE method were comparable to errors of ET products. Besides, SFE method has the potential to provide a set of effective alternatives for the accurate estimation of ET because of its few input parameters, strong physical mechanism and simple parameterization scheme.

Key words: evapotranspiration; China; temporal and spatial variation; surface flux equilibrium; evapotranspiration product