

葛诗阳, 关铁生, 刘艳丽, 等. 多源潜在蒸散发产品在雅鲁藏布江流域的适用性评估与融合[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 491-501. GE S Y, GUAN T S, LIU Y L, et al. Applicability evaluation and fusion on multi-source potential evapotranspiration products in the Yarlung Zangbo River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 491-501. (in Chinese)

多源潜在蒸散发产品在雅鲁藏布江流域的 适用性评估与融合

葛诗阳^{1,2}, 关铁生^{2,3,4}, 刘艳丽^{2,3,4,5}, 金君良^{2,3,4}, 王国庆^{2,3,4}, 刘翠善^{2,3,4}, 鞠琴^{1,5}

(1. 河海大学中国气象局水文气象重点开放实验室, 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098; 4. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029; 5. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 南京 210024)

摘要: 基于 2001—2018 年监测站点观测的蒸发皿数据, 分别在站点尺度和流域尺度上对 GLEAM、MOD16A2、GLDAS_Noah 和 ERA5 共 4 种遥感潜在蒸散发产品进行评估, 选出适应性较好的 3 种遥感产品, 运用 Triple Collocation 方法进行融合, 并分析其时空变化特征。结果表明: 在站点尺度上, ERA5 遥感产品相关性较为显著(相关系数 $CC=0.72$), 精确度最高(相对偏差 $Bias=-22.48\%$, 均方根误差 $RMSE=39.24$ mm/月), 更适用于雅鲁藏布江流域, MOD16A2 和 GLDAS_Noah 次之; MOD16A2、GLDAS_Noah 和 ERA5 分别占融合数据 PET_{TC} 的 31.12%、30.64% 和 38.24%, 对比 PET_{TC} 与 3 种遥感产品, PET_{TC} 融合数据在流域内精度有所提高; 融合数据 PET_{TC} 的潜在蒸散发峰值出现在 2009 年, 雅鲁藏布江流域多年平均潜在蒸散发呈现从中部向上、下游逐渐减小的趋势, 在流域东南角出现潜在蒸散发量最大值。在雅鲁藏布江流域内获得更精准的潜在蒸散发并揭示其变化规律, 可为研究流域水资源的供需平衡和生态系统的稳定性提供数据支撑。

关键词: 遥感产品; 潜在蒸散发; 数据融合; 时空变化; 雅鲁藏布江流域

中图分类号: P42 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0051

潜在蒸散发(potential evapotranspiration, PET)是监测能量平衡和湿度传输的有效工具, 可作为指示极端气象事件是否发生的重要指标。探讨潜在蒸散发的时空分布, 可为制定气候变化和人类活动影响下的水资源规划管理方案提供依据, 对区域生态环境保护具有重要意义和实际应用价值^[1]。基于站点尺度采用蒸发皿观测和 Penman-Monteith 公式计算等方法获取的潜在蒸散发常被作为实测潜在蒸散发进行研究^[2-3], 但这种方法存在监测成本高、采样时间长、监测空间范围有限的不足。

随着遥感技术的发展, 遥感数据产品由于其强时效性和高空间覆盖性被广泛使用, 常用的遥感蒸散发产品可分为 2 种类型^[4]: 第一种是根据模型模

拟生成的数据, 如 GLDAS_Noah、ERA5 和 GDAS 等; 第二种是由遥感数据反演得到的数据, 如 GLEAM、MOD16A2 和 SSEBop/ET 产品等。由于遥感潜在蒸散发产品在传感器观测、数据处理和反演等过程中存在不可避免的误差^[5], 现有的遥感潜在蒸散发产品存在模拟精度不高、数据时间序列不连续等问题。不同的遥感蒸散发产品在不同的区域适用性不同^[6], 黄瑾等^[7]发现在贵州地区遥感潜在蒸散发产品 MOD16 和 GLDAS_Noah 与实测数据相关性较好, 但在云南地区其一致性需要分区讨论, 因此在使用遥感蒸散发产品前需要进行适应性检验。此外, 为获得到更高精度的潜在蒸散发数据, 国内外学者开展了数据融合方法的研究, 例如: Gao 等^[8]

收稿日期: 2023-12-22 修回日期: 2024-04-02 网络出版时间: 2024-05-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240520.1345.008>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52325902; 52079079; 52121006; U2240203); 中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题项目(23SWQXM048)

作者简介: 葛诗阳(1999—), 女, 安徽宣城人, 主要从事水文水资源及气候变化方面的研究。E-mail: gsy_apg@163.com

通信作者: 关铁生(1974—), 男, 内蒙古包头人, 正高级工程师, 主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。E-mail: tsguan@nhri.cn

和董文全等^[9]构建了时空自适应性反射率融合模型 (spatio-temporal adaptive reflectance fusion modeling, STARFM) 来提高融合数据的时间和空间尺度,但在复杂地区融合精度较差; Yao 等^[10]基于通量塔数据,利用贝叶斯模型平均法 (Bayesian model averaging, BMA) 量化误差值进行蒸散发产品融合,发现更适合在小区域、低分辨率的情况下使用^[11]。Li 等^[12]在北欧地区采用三重组合法 (triple collocation, TC) 对实际蒸散发进行不确定性估计,基于估计结果通过最小二乘法对误差进行加权,结果表明通过这种方法融合得到的数据精度更高、更具有区域普适性。以上研究表明,数据融合方法可以进一步提高遥感产品对区域的时空分布特征的刻画能力,有助于更准确地研究潜在蒸散发的时空变化规律。目前,关于潜在蒸散发的研究多以潜在蒸散发公式或模型计算为主,采用气象站的气象观测数据进行计算容易受到研究区站点分布位置和数量的限制,但采用遥感气象数据作为数据输入,也需要考虑遥感数据集的精确度。因此,寻找适用性较好的遥感潜在蒸散发产品并进行数据融合,能快速获得大范围且贴近实测数据的遥感潜在蒸散发数据。

雅鲁藏布江流域对气候变化极其敏感和脆弱,地形条件复杂,地理跨度较大,流域内的观测站点稀疏,地面观测难度大,资料短缺,难以获得高精度、大范围的潜在蒸散发数据,对潜在蒸散发的估算多以 Penman-Monteith 公式为主,而关于潜在蒸散发遥感产品的评估和融合的研究相对较少。因此,本文以雅鲁藏布江流域为研究区域,基于气象站观测的蒸发皿数据,分析评估常用的 4 种遥感 PET 产品 GLEAM、MOD16A2、GLDAS_Noah 和 ERA5 的精度,并基于 TC 法和最小二乘法生成一套适应性更好的 PET 融合数据,以期揭示雅鲁藏布江流域潜在蒸散发变化规律,为全球气候变化下流域水热循环及生态水文过程研究提供科学基础。

1 研究区概况

雅鲁藏布江地处青藏高原南部,发源于西藏南部喜马拉雅山脉北部的杰玛央宗冰川,是世界上海拔最高的河流,也是西藏最大的河流,流域面积约 24.6 万 km²,全长 2 057 km。雅鲁藏布江流域的海拔在 143~7 261 m,平均海拔在 4 600 m 以上,具体地理位置在 28°N~31°N、82°E~97°E。雅鲁藏布江流域的主导气候为温带半干旱季风气候^[13-14],近

年来有明显增暖现象,年平均气温在 5.3~7.6 °C。在南亚热带季风气候和高原地理环境的影响下,流域内降水分布非常不均匀,呈现从西北向东南方向递增的趋势,多年平均降水量为 458 mm^[15-16]。此外,雅鲁藏布江水能资源极其丰富,天然水能蕴藏量约占中国水能蕴藏总量的 1/6,仅次于长江^[17]。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

2.1.1 蒸发皿数据

考虑到数据的连续性和完整性,选取 2001—2018 年雅鲁藏布江流域内及其附近 25 个气象站蒸发皿日观测数据整理形成月尺度数据,并将其作为评估依据。气象站采用口径为 20 cm 的小型蒸发器和 E601 大型蒸发桶进行蒸散发观测,但一般情况下认为 20 m² 蒸发池观测数据最能表现蒸散发能力^[18],即潜在蒸散发量。因此,在进行精度评估之前,根据施成熙等^[18]和付新峰等^[19]研究中的转换系数,将现有蒸发皿观测数据统一转换成 20 m² 蒸发池数据。转换公式为

$$E_{E601} = \lambda_1 E_{\phi 20} \quad (1)$$

$$E_{20 \text{ m}^2} = \lambda_2 E_{E601} \quad (2)$$

式中: $E_{\phi 20}$ 、 E_{E601} 和 $E_{20 \text{ m}^2}$ 分别代表口径为 20 cm 的小型蒸发器、E601 大型蒸发桶和 20 m² 蒸发池观测的蒸散发量, mm; λ_1 代表 20 cm 的小型蒸发器与 E601 大型蒸发桶的转换系数,取 0.68; λ_2 代表 E601 大型蒸发桶与 20 m² 蒸发池的转换系数,取 0.90。

2.1.2 蒸散发遥感产品

选用 GLEAM、MOD16A2、GLDAS_Noah 和 ERA5 共 4 种遥感潜在蒸散发产品,以及数字高程数据^[20],见表 1。各遥感潜在蒸散发产品具体特征为: GLEAM^[21-22] 是运用 Priestley-Taylor 方程对卫星观测数据和多源天气 (multi-source weather, MSWX) 地表净辐射、近地表气温数据计算得到的蒸散发数据; MOD16A2 是基于 MODIS 卫星遥感数据反演获得的蒸散发数据; GLDAS_Noah 是整合卫星和地面数据产品通过 Noah 模型模拟得到的蒸散发数据; ERA5 是基于观测数据通过 ECMWF 再分析陆面模型生产的蒸散发数据^[23]。为与气象站点观测数据的时间序列统一,选用的研究时段为 2001—2018 年,将时间分辨率统一为月尺度,空间分辨率插值为 0.1°×0.1°。

表 1 遥感产品特征
Tab. 1 Features of remote sensing products

数据名称	空间分辨率	时间分辨率	时间序列	数据来源
GLEAM	0.25°×0.25°	1 d	1980—2020年	https://www.gleam.eu/
MOD16A2	500 m	8 d	2001—2021年	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/
GLDAS_Noah	0.25°×0.25°	月	2000—2020年	https://daac.gsfc.nasa.gov/
ERA5	0.1°×0.1°	月	2000—2020年	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home

2.2 研究方法

2.2.1 数据精度评估方法

选择皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, CC)、相对偏差 (Bias) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE) [24] 对 4 种遥感潜在蒸散发产品在雅鲁藏布江流域进行站点尺度和流域尺度的精度评估。站点尺度的评估以气象站蒸发皿观测数据为依据, 通过气象站的经纬度坐标提取对应的遥感潜在蒸散发网格数据, 在站点尺度上检验遥感潜在蒸散发产品的精度。流域尺度的评估是将蒸发皿观测数据通过反距离插值法将数据范围扩大到整个流域, 以插值后的面平均数据为依据。

2.2.2 TC 法

TC 融合方法是 Stoffelen [25] 在 1998 年提出的一种不考虑下垫面条件、不需要实测数据参与计算的统计方法, 常被用于缺少高质量观测数据集的研究区或研究领域 (如土壤水 [26]、雪深 [27]、降水 [28] 等) 的不确定性估计与数据融合研究。近年来, TC 融合方法也开始被用于蒸散发领域, 该方法假设遥感蒸

散发数据与未知真值之间存在线性相关关系:

$$i = \alpha_i + \beta_i \theta + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中: $i \in [X, Y, Z]$ 为 3 种遥感蒸散发数据, θ 为对应的未知蒸散发观测值; α_i 、 β_i ($i=X, Y, Z$) 分别为遥感数据与未知蒸散发观测值之间系统加性和乘性偏差; ε_i ($i=X, Y, Z$) 为相应的加性零均值随机误差 [$E(\varepsilon_i)=0$], 并且与未知蒸散发观测值相互独立 (误差正交性), 两两误差之间互不相关 (零误差相关)。

在 TC 分析中, 需要选择 1 个数据集作为参考数据集 (假设选择数据集 X), 其他 2 个数据集以线性方式重新缩放得到 Y^X 和 Z^X :

$$\begin{aligned} Y^X &= \beta_Y^* (Y - \bar{Y}) + \bar{X} \\ Z^X &= \beta_Z^* (Z - \bar{Z}) + \bar{X} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Y^X 和 Z^X 是遥感数据集 Y、Z 以 X 为参考坐标转换得到的遥感数据集; \bar{i} ($i \in [X, Y, Z]$) 为遥感数据均值; β_Y^* 和 β_Z^* 为遥感数据 Y^X 和 Z^X 与未知蒸散发观测值之间的乘性偏差, $\beta_Y^* = \beta_X / \beta_Y$ 和 $\beta_Z^* = \beta_X / \beta_Z$, 可通过将 3 个数据集以以下方式组合:

$$\begin{aligned} \frac{\langle (X - \bar{X})(Z - \bar{Z}) \rangle}{\langle (Y - \bar{Y})(Z - \bar{Z}) \rangle} &= \frac{\beta_X \beta_Z \langle (\theta - \bar{\theta})^2 \rangle + \beta_X \langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_Z \rangle + \beta_Z \langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_X \rangle + \langle \varepsilon_X \varepsilon_Z \rangle}{\beta_Y \beta_Z \langle (\theta - \bar{\theta})^2 \rangle + \beta_Y \langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_Z \rangle + \beta_Z \langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_Y \rangle + \langle \varepsilon_Y \varepsilon_Z \rangle} \\ \frac{\langle (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) \rangle}{\langle (Z - \bar{Z})(Y - \bar{Y}) \rangle} &= \frac{\beta_X \beta_Y \langle (\theta - \bar{\theta})^2 \rangle + \beta_X \langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_Y \rangle + \beta_Y \langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_X \rangle + \langle \varepsilon_X \varepsilon_Y \rangle}{\beta_Z \beta_Y \langle (\theta - \bar{\theta})^2 \rangle + \beta_Z \langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_Y \rangle + \beta_Y \langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_Z \rangle + \langle \varepsilon_Z \varepsilon_Y \rangle} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\langle \varepsilon_i \varepsilon_j \rangle = \sigma_{\varepsilon_i \varepsilon_j}$ ($i=X, Y, Z$) 表示两两数据集之间的误差协方差, $\langle (\theta - \bar{\theta}) \varepsilon_i \rangle = \sigma_{\theta \varepsilon_i}$ ($i=X, Y, Z$) 表示蒸散发观测值与蒸散发数据 i 误差之间的协方差, $\langle \cdot \rangle$ 为时间平均值, $\bar{\theta}$ 为未知蒸散发观测值均值。因此, 式 (5) 可简化为

$$\begin{aligned} \beta_Y^* &= \frac{\beta_X}{\beta_Y} = \frac{\langle (X - \bar{X})(Z - \bar{Z}) \rangle}{\langle (Y - \bar{Y})(Z - \bar{Z}) \rangle} = \frac{\sigma_{XZ}}{\sigma_{YZ}} \\ \beta_Z^* &= \frac{\beta_X}{\beta_Z} = \frac{\langle (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) \rangle}{\langle (Z - \bar{Z})(Y - \bar{Y}) \rangle} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_{ZY}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: σ_{ij} ($i, j=X, Y, Z$) 是遥感产品两两之间的协方差。

重新缩放的数据集为

$$\begin{aligned} X &= \alpha_X + \beta_X \theta + \varepsilon_X \\ Y^X &= \alpha_X + \beta_X \theta + \beta_Y^* \varepsilon_Y \\ Z^X &= \alpha_X + \beta_X \theta + \beta_Z^* \varepsilon_Z \end{aligned} \quad (7)$$

对 X、 Y^X 和 Z^X 这 3 种数据集交叉乘差得到 3 个数据集的误差方差 $\sigma_{\varepsilon_i}^2 = \langle \varepsilon_i^2 \rangle$:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varepsilon_X}^2 &= \langle (X - Y^X)(X - Z^X) \rangle \\ \beta_Y^* \sigma_{\varepsilon_Y}^2 &= \sigma_{\varepsilon_Y^*}^2 = \langle (Y^X - X)(Y^X - Z^X) \rangle \\ \beta_Z^* \sigma_{\varepsilon_Z}^2 &= \sigma_{\varepsilon_Z^*}^2 = \langle (Z^X - X)(Z^X - Y^X) \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

基于误差加权的最小二乘法得到融合数据 PET (PET_{TC}):

$$PET_{TC} = \omega_X X + \omega_Y Y + \omega_Z Z \quad (9)$$

3 种数据所占权重可由误差方差和协方差决定:

$$\begin{aligned} \sigma_X^2 &= \sigma_{\varepsilon_X}^2 + \frac{\sigma_{XY}\sigma_{XZ}}{\sigma_{YZ}} \\ \sigma_Y^2 &= \sigma_{\varepsilon_Y}^2 + \frac{\sigma_{YX}\sigma_{YZ}}{\sigma_{XZ}} \\ \sigma_Z^2 &= \sigma_{\varepsilon_Z}^2 + \frac{\sigma_{ZX}\sigma_{ZY}}{\sigma_{XY}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \omega_X &= \frac{\sigma_Y^2\sigma_Z^2}{\sigma_X^2\sigma_Y^2 + \sigma_X^2\sigma_Z^2 + \sigma_Y^2\sigma_Z^2} \\ \omega_Y &= \frac{\sigma_X^2\sigma_Z^2}{\sigma_X^2\sigma_Y^2 + \sigma_X^2\sigma_Z^2 + \sigma_Y^2\sigma_Z^2} \\ \omega_Z &= \frac{\sigma_X^2\sigma_Y^2}{\sigma_X^2\sigma_Y^2 + \sigma_X^2\sigma_Z^2 + \sigma_Y^2\sigma_Z^2} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: ω_X 、 ω_Y 、 ω_Z 分别表示 X、Y、Z 的相对权重。相对权重之和应为 1, 以获得无偏 PET_{TC} [12,29]。

3 结果分析与讨论

3.1 多源遥感蒸散发产品精度评估

3.1.1 站点尺度

在站点尺度上, 基于雅鲁藏布江流域内及其周围 25 个站点蒸发皿实测数据, 以皮尔逊相关系数

(CC)、相对偏差 (Bias) 和均方根误差 (RMSE) 为评估指标评估了 GLEAM、MOD16A2、GLDAS_Noah 和 ERA5 共 4 种遥感潜在蒸散发产品, 评估结果见表 2。基于站点观测数据对应的 4 种遥感产品评估结果在空间上的分布情况见图 1 至图 3。可以看出: GLEAM 在雅鲁藏布江流域内除个别站点 (错那、拉萨、隆子、帕里) 以外, 其余大部分站点均通过了 0.01 的显著性检验, 且相关性均不明显, CC 仅有 0.27; MOD16A2 与实测值较为一致, CC 最高 (CC=0.79), 且 CC 空间分布与 GLDAS_Noah 和 ERA5 类似, 呈现雅鲁藏布江中部较为显著、上下游较弱, 在中游地区由北至南减弱的趋势。

表 2 流域站点尺度精度评估

Tab. 2 Scale accuracy assessment of watershed stations

遥感数据	CC	Bias/ %	RMSE/ (mm·月 ⁻¹)
GLEAM	0.27	-59.25	72.11
MOD16A2	0.79	32.09	38.11
GLDAS_Noah	0.67	53.44	69.74
ERA5	0.72	-22.48	39.24

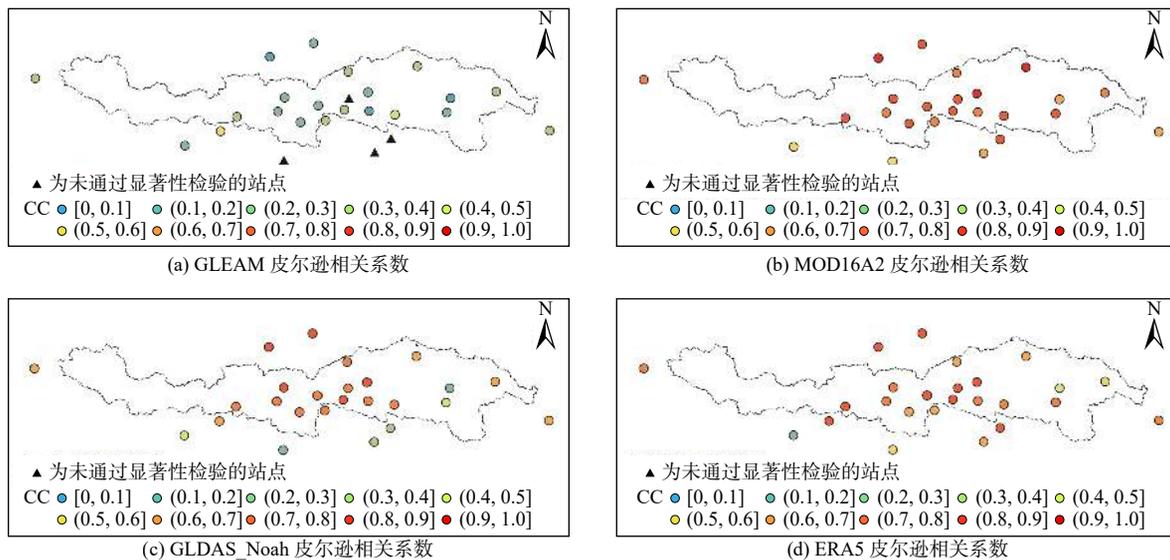


图 1 多源遥感数据皮尔逊相关系数 CC 空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of Pearson correlation coefficients (CC) of multi-source remote sensing data

从相对偏差 (Bias) 来看: GLEAM 在全流域中普遍呈现明显低估现象, Bias 为 -59.25%; MOD16A2 对实测数据存在一定程度的高估, 且从南到北逐渐减小, Bias 为 32.09%; GLDAS_Noah 和 ERA5 的 Bias 趋势略有不同, GLDAS_Noah 在全流域明显高估, Bias 为 53.44%, 而 ERA5 在上游和下游存在明显低估, Bias 为 -22.48%。

从均方根误差 (RMSE) 的角度来看, ERA5 和

MOD16A2 均略有误差, RMSE 分别为 39.24 mm/月 和 38.11 mm/月。其中, ERA5 的 RMSE 呈现从上下游至中游逐渐减小的趋势, 而 MOD16A2 的 RMSE 呈现从中游向南北方向逐渐减小的趋势。相对而言, GLEAM 和 GLDAS_Noah 的 RMSE 较大, 分别为 72.11 mm/月 和 69.74 mm/月。两者的 RMSE 呈现上中游较大、下游较小且从北至南逐渐减小的趋势。综合以上分析, 在站点尺度上, MOD16A2 和 ERA5 的表现较好, GLDAS_Noah 次之。

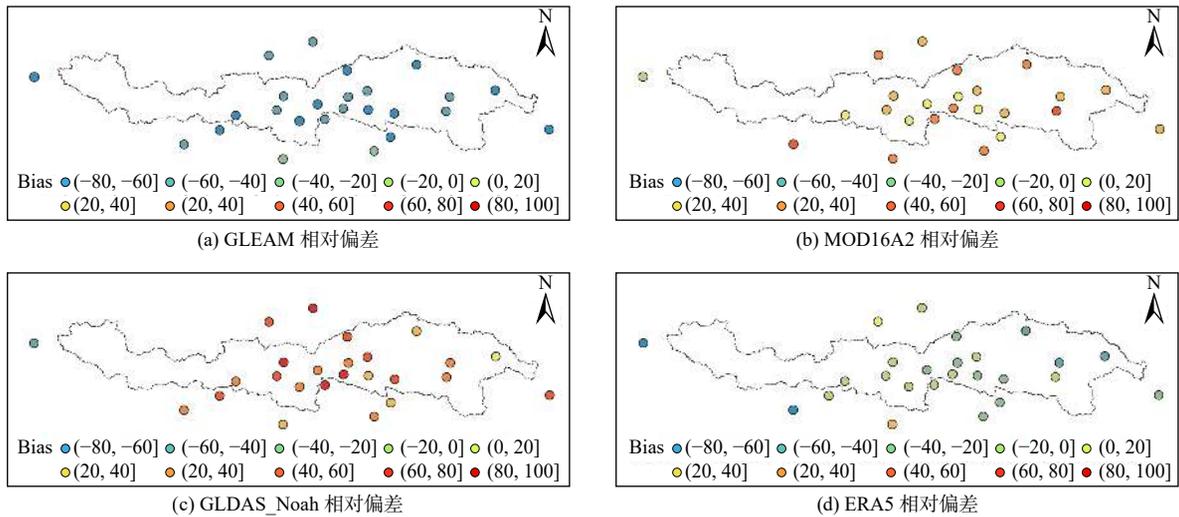


图2 多源遥感数据相对偏差 Bias 空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of relative deviation(Bias) of multi-source remote sensing data

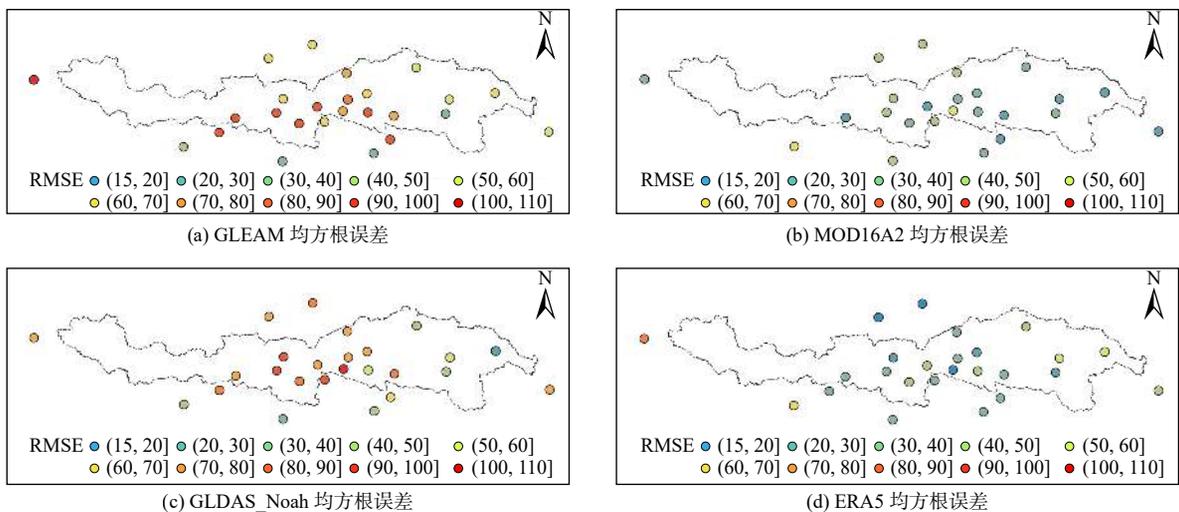


图3 多源遥感数据均方根误差 RMSE 空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of root mean square error(RMSE) of multi-source remote sensing data

3.1.2 流域尺度

在流域尺度上, 4种蒸散发产品的评估结果见表3。由表3可知, MOD16A2、GLDAS_Noah和ERA5的相关性都比较好, CC均在0.80以上, 而GLEAM的相关性最低, CC为0.79。从Bias和RMSE来看: ERA5表现最佳, 其Bias为-22.83%, 对实测数据存在低估现象, RMSE最低, 为29.05 mm/月; GLEAM则明显低估, Bias高达-63.93%, RMSE为67.79 mm/月; MOD16A2和GLDAS_Noah都出现明显高估现象, Bias分别为34.45%和39.81%, 两者的RMSE也都较大, 分别为39.55 mm/月和45.22 mm/月。这与黄瑾等^[7]的研究评估结果基本一致。MOD16A2的CC虽然略高于GLDAS_Noah和ERA5, 但存在较多的缺失值, 其精度评估结果的准确性受到影响。综合3个评估指标来看, ERA5潜在

蒸散发产品在雅鲁藏布江流域适用性更好, MOD16A2和GLDAS_Noah次之。

表3 流域面平均精度评估

Tab. 3 The average accuracy evaluation of basin surface

遥感数据	CC	Bias/ %	RMSE/ (mm·月 ⁻¹)
GLEAM	0.79**	-63.93%	67.79
MOD16A2	0.88**	34.45%	39.55
GLDAS_Noah	0.87**	39.81%	45.22
ERA5	0.83**	-22.83%	29.05

注: *代表通过0.05的显著性检验, **代表通过0.01的显著性检验。

3.2 基于TC法的潜在蒸散发融合分析

基于4种遥感潜在蒸散发产品的精度评估, 优选了精度评估较好的ERA5、MOD16A2和GLDAS_

Noah 3 种遥感数据采用 TC 方法进行不确定性分析, 分析结果见图 4(a)、(c)、(e)。可以看出, 在雅鲁藏布江流域上游顶端, 3 种遥感产品都存在较大不确定性, 且误差空间分布规律相似, 即从北至南逐渐减小。然而, 在流域内其他部分, 它们的误差空间分布特征存在明显差异。MOD16A2 的误差呈现由北至南逐渐增大的趋势。GLDAS_Noah 在流域中

上游的误差较大, 在下游则呈现由西向东逐渐减小的趋势。ERA5 的误差在上游段呈现由西至东逐渐减小的趋势, 在中游段由四周向中间增大, 在下游段由北至南逐渐减小。总体来看, ERA5 的不确定性最低, 3 种产品的流域平均误差大小排序为 ERA5(1.34) < GLDAS_Noah(1.49) < MOD16A2(1.56)。

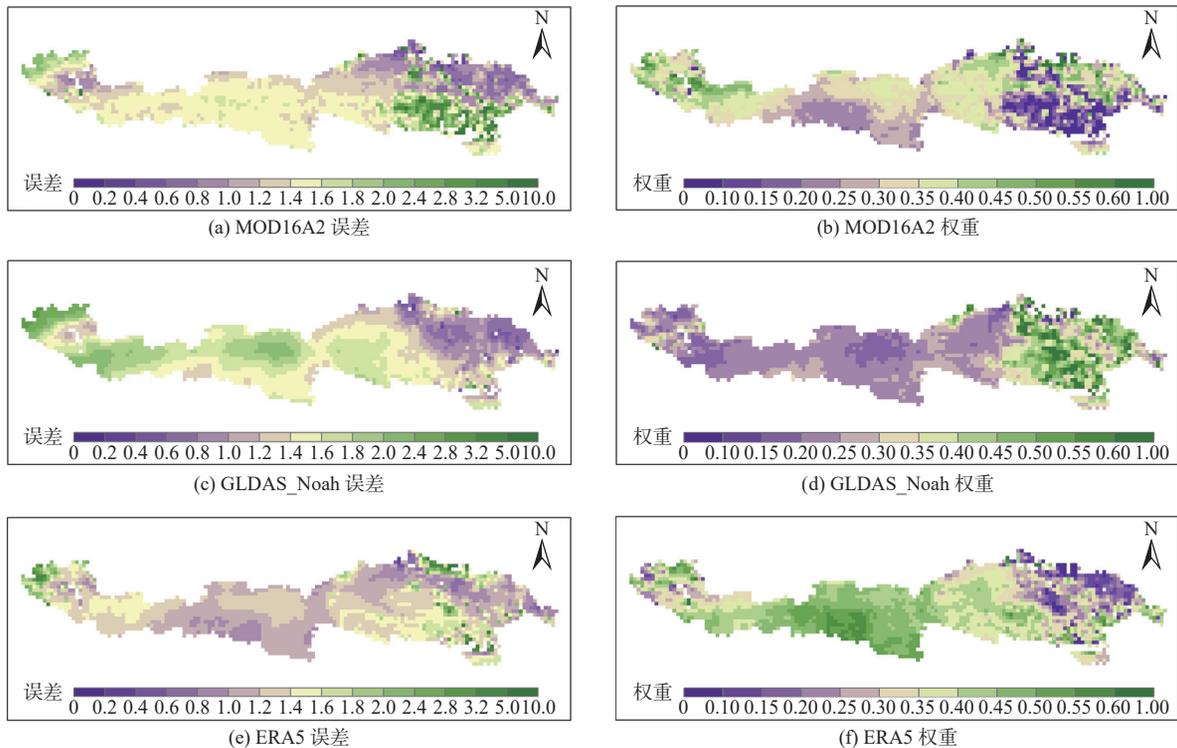


图 4 多源遥感数据误差及权重空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of the multi-source remote sensing data error and weight

基于 TC 的不确定性评估结果采用公式(7)、(8)进行数据融合, 融合结果 PET_{TC} 中 MOD16A2、GLDAS_linebreak/>Noah 和 ERA5 所占权重分别为 31.12%、30.64% 和 38.24%, 权重空间分布见图 4(b)、(d)、(f)。与误差分布图对比可以看出, 3 种遥感数据在融合数据中的权重分布基本与误差分布相反, 即误差小(大)的地方, 分布的权重值较大(小)。其中, 下游北部是 3 种遥感数据误差较小的区域, 而 ERA5 相对于其他 2 种数据误差较大。因此, ERA5 在该区域的权重分布较小。

对融合数据 PET_{TC} 进行站点尺度和流域尺度的精度评估, 验证其在雅鲁藏布江流域的适应性。从相关性方面来看, PET_{TC} 在流域尺度上相关系数 CC 为 0.88, 站点尺度上 CC 为 0.76, 较 GLDAS_Noah 和 ERA5 得到提升(表 3、图 5), 而站点尺度上 PET_{TC} 相关系数与 MOD16A2 相比略有下降, 但 CC 变化范围也更小, 说明 PET_{TC} 与大部分气象站点蒸

发皿数据的相关性较好。从相对偏差和均方根误差来看, PET_{TC} 在流域尺度上的相对偏差和均方根误差均显著降低(Bias=5.90%, RMSE=16.80 mm/月)。站点尺度上的相对偏差 Bias 有明显减小, 为 13.42%, 对实测数据仍存在略有高估的现象; 均方根误差 RMSE 降低至 33.40 mm/月, 与 MOD16A2 和 ERA5 相比略有减小, 相对于 GLDAS_Noah 来说优化效果明显。这与王树果^[30]等采用 TC 法对遥感数据进行融合得到的结果相似。尽管基于 TC 法融合数据相关系数没有明确提升, 但相对偏差和均方根误差的明显下降表明融合值与实测值之间误差更小、准确度更高, 这对极端气候事件影响下的潜在蒸散发极值估算具有重要意义。

3.3 雅鲁藏布江流域潜在蒸散发时空分布

通过对比 2001—2018 年雅鲁藏布江流域融合潜在蒸散发 PET_{TC} 、遥感潜在蒸散发产品 MOD16A2、GLDAS_Noah、ERA5 与实测潜在蒸散发数据的变

化趋势(图6)可知,3种原始蒸散发产品在雅鲁藏布江流域内的年蒸散发量具有明显差异,其中:ERA5平均年蒸散发量最低,年蒸散发量在884~999 mm;MOD16A2比ERA5整体约高100 mm,年蒸散发量在977~1 203 mm变化;GLDAS_Noah的平均年蒸散发量最高,在1 550~1 825 mm。将实测站点数据通过反距离插值,得到实测年蒸散发序列,数值在

1 104~1 371 mm变化,这4种数据在2007—2011年间蒸散发量变化趋势完全一致,且年最高值都在2009年出现。融合得到的PET_{TC}蒸散发量在1 219~1 375 mm波动;在2001—2018年随时间变化的趋势与GLDAS_Noah的趋势相似性最高,但数值变化相比低得多;在2005—2012年PET_{TC}的蒸散发量与实测数据最为相似。

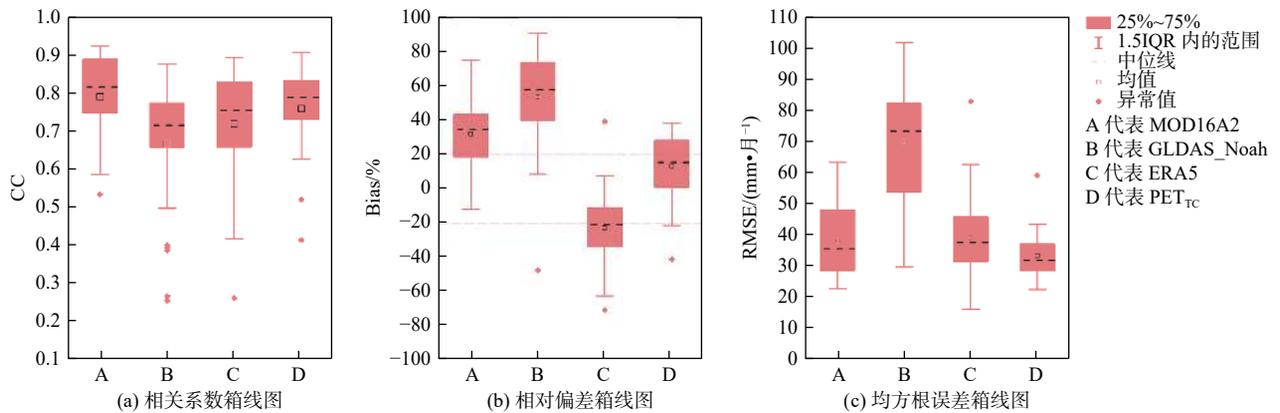


图5 多源潜在蒸散发数据站点 CC、Bias、RMSE 分布情况箱线图

Fig. 5 The box-plot of CC, Bias and RMSE of multi-source potential evapotranspiration data sites

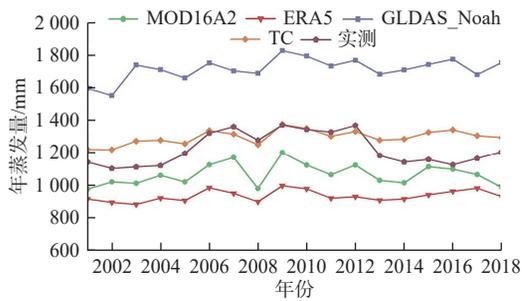


图6 多源潜在蒸散发产品年蒸散发序列

Fig. 6 The annual evapotranspiration sequence of multi-source potential evapotranspiration products

图7展示了不同数据在雅鲁藏布江流域多年平均蒸散发量的空间分布特征:MOD16A2的多年平均蒸散发空间分布呈现从中部向上、下游逐渐减小的趋势,蒸散发最大值出现在流域中部;ERA5和PET_{TC}的多年平均蒸散发在雅鲁藏布江流域也呈现从中部向上、下游逐渐减小的趋势,但蒸散发最大值在流域东南角出现;GLDAS_Noah的多年平均蒸散发空间分布与ERA5类似,但蒸散发最大值出现在雅鲁藏布江流域中部。

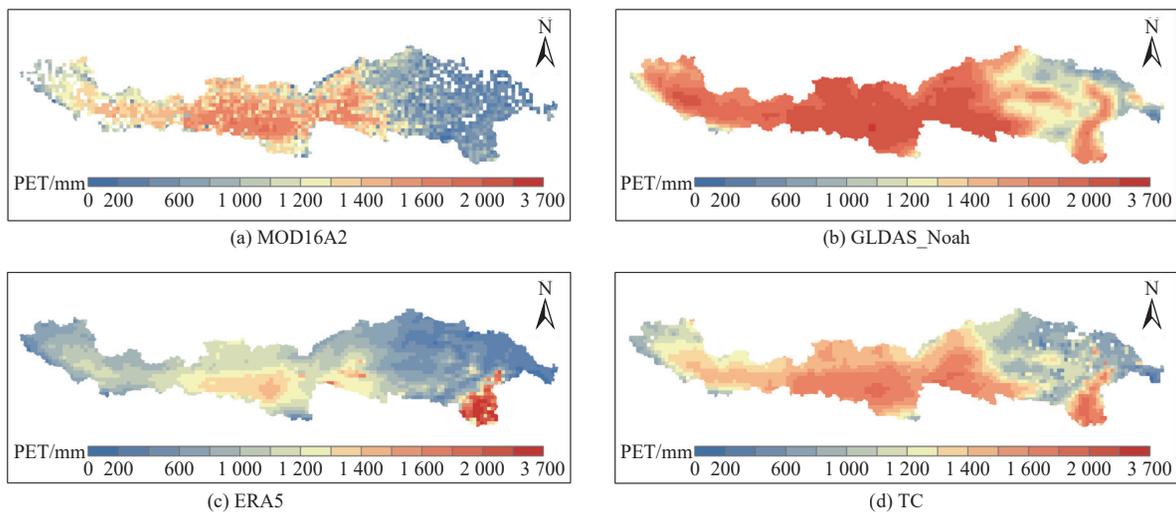


图7 多源数据在雅鲁藏布江流域内多年平均潜在蒸散发空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of multi-year average potential evapotranspiration in the Yarlung Zangbo River basin with multi-source data

综上所述, PET_{TC} 能够中和 3 种遥感数据的蒸散发量值特点和空间分布特征, 填补了 MOD16A2 大部分缺失值, 使融合数值更贴近观测值, 多年平均 PET 大小排序为 ERA5(936 mm) < MOD16A2(1 064 mm) < PET_{TC} (1 297 mm) < GLDAS_Noah(1 712 mm)。雅鲁藏布江流域上游顶端和流域东北部的 PET 较小, 可能是因为地处积雪覆盖区^[31], 地表吸收太阳辐射能力减弱, PET 受到抑制; 而流域东南角部处于低海拔地区, 植被覆盖度高^[32], 降水丰富^[14], 导致 PET 较高。但其他影响因素, 如气温、风速、日照时数等也会对 PET 产生影响, 因此还需进一步探究, 而融合潜在蒸散发数据可为其提供数据基础。

4 讨论

遥感技术可以提供高空间分辨率和广域覆盖的数据, 在获取潜在蒸散发数据方面具有很大的优势。然而, 由于遥感技术存在观测误差和处理不确定性等问题, 需要使用与遥感数据尺度相匹配的实地观测数据来进行验证^[33]。由于气象站观测数据是最常用的验证数据, 本文使用了 25 个气象站点的蒸发皿观测数据进行站点尺度的验证, 但因为研究区面积较广, 在进行面尺度精度验证时, 已有的插值方法往往受到流域站点空间分布和海拔等的影响^[34], 增加面尺度验证的不确定性, 因此, 仍需进一步研究数据精度评估的方法, 同时地面站点数据的增加也是提高遥感数据评估精度的关键。

此外, 气候变化和人类活动也可能影响潜在蒸散发结果, 在进行空间分布规律分析时, 要考虑这些因素的影响。气候变化可能导致植被覆盖和土壤水分等因素发生变化, 从而影响潜在蒸散发的空间分布。人类活动如水电站建设、农业灌溉和城市化等也可能改变潜在蒸散发过程中的水文循环, 进而对潜在蒸散发产生影响。本研究针对高寒高原区地面观测站点匮乏、潜在蒸散发难以准确估算的问题, 在分析多源潜在蒸散发产品在雅鲁藏布江流域适用性的基础上, 基于 TC 方法建立了一套时空精度更高的融合潜在蒸散发数据产品, 对提高水文、生态过程模拟精度具有重要意义, 未来可在更多潜在蒸散发产品对比评估的基础上, 进一步结合流域下垫面信息, 对提出的潜在蒸散发数据做进一步的融合分析以提高模拟精度。

5 结论

基于流域内实测站点的蒸散发数据对遥感蒸散发数据产品 GLEAM、MOD16A2、GLDAS_Noah 和 ERA5 进行站点尺度和流域尺度的适应性评估, 选出适应性较好的 3 种遥感数据产品, 采用 TC 法进行不确定性分析和数据融合, 并分析其时空变化特征。主要研究结论如下:

在站点尺度和流域尺度上, ERA5 潜在蒸散发产品在雅鲁藏布江内适应性较好, 其评估精度明显优于 GLEAM、MOD16A2、GLDAS_Noah 潜在蒸散发产品。在站点精度空间分布上, 除 GLEAM 潜在蒸散发产品以外, 其他 3 种遥感数据都在流域中游具有较高的相关性, MOD16A2 和 ERA5 的相对偏差较小, 二者的均方根误差的空间分布与相对偏差相反。

优选的 MOD16A2、GLDAS_Noah 和 ERA5 遥感数据在 PET_{TC} 融合数据中所占权重分别为 31.12%、30.64% 和 38.24%。3 种遥感产品的不确定性分析表明, 在雅鲁藏布江流域上游顶端的误差空间分布都呈现从北至南逐渐减小的规律, 但在其他部分的误差空间分布各不相同。MOD16A2 在流域东北部误差较小, GLDAS_Noah 在流域下游东北部的误差较小, ERA5 则在流域中部和下游北部有较小的误差。权重空间分布与误差空间分布规律基本相反。

4 种数据在雅鲁藏布江流域中部都存在较大的多年平均 PET, 区别在于流域东南角是否存在更大的潜在蒸散发, 多年平均 PET 大小顺序为 ERA5 < MOD16A2 < PET_{TC} < GLDAS_Noah。融合数据 PET_{TC} 在相关系数方面精度提升较小, 而相对偏差和均方根误差的精度提升显著, 且融合数据中和了 3 种遥感数据的蒸散发量和空间分布特点, 有效填补了遥感数据的部分缺失值。

参考文献:

- [1] SU Q C, DAI C L, ZHANG Q S, et al. Analysis of potential evapotranspiration in Heilongjiang Province [J]. *Sustainability*, 2023, 15: 15374. DOI: 10.3390/su152115374.
- [2] 赵宾华, 马方铭, 李占斌, 等. 嘉陵江流域潜在蒸散发时空演变特征及其影响因素 [J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(5): 43-51. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2023.0505.
- [3] 刘文辉, 张宝忠, 魏征, 等. 不同气候区潜在蒸散量变

- 化趋势及归因分析[J]. *中国农业气象*, 2023, 44(7): 545-559. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6362.2023.07.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6362.2023.07.001).
- [4] 袁令, 马耀明, 陈学龙, 等. 青藏高原六套陆面蒸散发产品的评估[J]. *大气科学*, 2023, 47(3): 893-906. DOI: [10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21208](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21208).
- [5] 柳钦火, 闻建光, 周翔, 等. 高分遥感共性产品生成和真实性检验技术体系[J]. *遥感学报*, 2023, 27(3): 544-562. DOI: [10.11834/jrs.20232531](https://doi.org/10.11834/jrs.20232531).
- [6] 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. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0107](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0107).
- [7] 黄瑾, 王文, 崔巍, 等. 云贵地区几种潜在蒸散发产品质量评估[J]. *人民长江*, 2019, 50(12): 73-79. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.12.014](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.12.014).
- [8] GAO F, MASEK J, SCHWALLER M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44: 2207-2218. DOI: [10.1109/TGRS.2006.872081](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872081).
- [9] 董文全, 蒙继华. 遥感数据时空融合研究进展及展望[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(2): 1-11. DOI: [10.6046/gtzyyg.2018.02.01](https://doi.org/10.6046/gtzyyg.2018.02.01).
- [10] YAO Y Y, LIANG S L, LI X L, et al. Improving global terrestrial evapotranspiration estimation using support vector machine by integrating three process-based algorithms[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 242: 55-74. DOI: [10.1016/j.agrformet.2017.04.011](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.011).
- [11] 张婷, 李怡, 李建柱, 等. 多源降雨数据融合及其水文应用研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(1): 15-28. DOI: [10.13577/j.jnd.2022.0102](https://doi.org/10.13577/j.jnd.2022.0102).
- [12] LI X Y, ZHANG W X, VERMEULEN A, et al. Triple collocation-based merging of multi-source gridded evapotranspiration data in the Nordic region[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 335: 109451. DOI: [10.1016/j.agrformet.2023.109451](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109451).
- [13] PAN S L, XU Y P, XUAN W D, et al. Appropriateness of potential evapotranspiration models for climate change impact analysis in Yarlung Zangbo River basin, China[J]. *Atmosphere*, 2019, 10: 453. DOI: [10.3390/atmos10080453](https://doi.org/10.3390/atmos10080453).
- [14] 张仪辉, 刘昌明, 梁康, 等. 雅鲁藏布江流域降水时空变化特征[J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 603-618. DOI: [10.11821/dlxb202203008](https://doi.org/10.11821/dlxb202203008).
- [15] LI C Y, HAO J S, ZHANG G T, et al. Runoff variations affected by climate change and human activities in Yarlung Zangbo River, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2023, 230: 107184. DOI: [10.1016/j.catena.2023.107184](https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107184).
- [16] 胡博亭, 柳江, 王文玲, 等. 基于洪旱灾害的雅鲁藏布江流域水资源脆弱性时空差异分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1092-1101. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj201905009](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj201905009).
- [17] 段娅楠, 季漩, 郭若愚, 等. 雅鲁藏布江流域潜在蒸散发的气候敏感性及其变化的主导因子分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 261-268. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2020.02.037](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2020.02.037).
- [18] 施成熙, 牛克源, 陈天珠, 等. 水面蒸发器折算系数研究[J]. *地理科学*, 1986(4): 305-313. DOI: [10.13249/j.cnki.sgs.1986.04.005](https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.1986.04.005).
- [19] 付新峰, 杨胜天, 刘昌明. 雅鲁藏布江流域潜在蒸散发量计算方法[J]. *水利水电技术*, 2006(8): 5-8.
- [20] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The shuttle radar topography mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2). DOI: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183).
- [21] 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).
- [22] MIRALLES D G, HOLMES T R H, JEU R A M D, 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).
- [23] PARK J, BAIK J, CHOI M. Triple collocation-based multi-source evaporation and transpiration merging [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 331: 109353. DOI: [10.1016/j.agrformet.2023.109353](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109353).
- [24] 孟庆博, 刘艳丽, 鞠琴, 等. 基于多源数据同化融合的尼洋河降水时空分布特征[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2020, 18(3): 110-118. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0055](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0055).
- [25] STOFFELEN A. Toward the true near - surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation[J]. *Journal of Geophysical Research*:

- Oceans, 1998, 103: 7755-7766. DOI: [10.1029/97JC03180](https://doi.org/10.1029/97JC03180).
- [26] ZHOU J H, CROW W T, WU Z Y, et al. A triple collocation-based 2D soil moisture merging methodology considering spatial and temporal non-stationary errors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 263: 112509. DOI: [10.1016/j.rse.2021.112509](https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112509).
- [27] QIAO D J, LI Z, ZENG J Y, et al. Uncertainty characterization of ground - based, satellite, and reanalysis snow depth products using extended triple collocation[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(4): e2021WR030895. DOI: [10.1029/2021WR030895](https://doi.org/10.1029/2021WR030895).
- [28] CHEN C, HE M N, CHEN Q W, et al. Triple collocation-based error estimation and data fusion of global gridded precipitation products over the Yangtze River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127307. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.127307](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127307).
- [29] GRUBER A, SU C H, ZWIEBACK S, et al. Recent advances in (soil moisture) triple collocation analysis[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 45: 200-211. DOI: [10.1016/j.jag.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.09.002).
- [30] 王树果, 刘伟, 梁亮. 基于Triple-Collocation方法的微波遥感土壤水分产品不确定性分析及数据融合[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(6): 1227-1234. DOI: [10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1227](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1227).
- [31] 刘小妮, 莫李娟, 辛昱昊, 等. 青藏高原地区积雪与雪线高度时空变化研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(2): 48-58. DOI: [10.19760/j.ncwu.zk.2024017](https://doi.org/10.19760/j.ncwu.zk.2024017).
- [32] 韩先明, 左德鹏, 李佩君, 等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(1): 16-23. DOI: [10.3880/j.issn.1006-7647.2021.01.003](https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2021.01.003).
- [33] 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. DOI: [10.11834/jrs.20209099](https://doi.org/10.11834/jrs.20209099).
- [34] 董晓华, 张庆玉, 张特, 等. 三种长期定量降水产品在淮河流域干旱监测中的潜力[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11): 93-103. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.011](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.011).

Applicability evaluation and fusion on multi-source potential evapotranspiration products in the Yarlung Zangbo River basin

GE Shiyang^{1,2}, GUAN Tiesheng^{2,3,4}, LIU Yanli^{2,3,4,5}, JIN Junliang^{2,3,4},
WANG Guoqing^{2,3,4}, LIU Cuishan^{2,3,4}, JU Qin^{1,5}

(1. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 5. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Potential evapotranspiration is an effective tool for monitoring energy balance and humidity transfer, and can serve as an important indicator of whether extreme meteorological events occur. The Yarlung Zangbo River basin is extremely sensitive and vulnerable to climate change, with complex terrain conditions, large geographical span, sparse observation stations in the basin, great difficulty in ground observation, and shortage of data, making it difficult to obtain high-precision and large-scale potential evapotranspiration data. At present, Penman Monteith formula is mainly used to estimate the potential evapotranspiration in the the Yarlung Zangbo River basin, and there are relatively few studies on the evaluation and fusion of potential evapotranspiration remote sensing products. Therefore, with the Yarlung Zangbo River basin as the research area, the multi-source remote sensing datas are used to fuse a set of potential evapotranspiration fusion data with better adaptability, in order to reveal the potential evapotranspiration changes in the Yarlung Zangbo River basin, and provide a scientific basis for the study of water and heat cycle and ecological hydrological processes of the basin under global climate change.

Based on the evaporation pan datas observed by the the Yarlung Zangbo River basin meteorological station from 2001 to 2018, Pearson correlation coefficient, bias and root mean square error were selected to analyze and evaluate four commonly used remote sensing potential evapotranspiration products GLEAM, MOD16A2, GLDAS_Noah and

ERA5. Then, a better adaptive potential evapotranspiration fusion data was generated by Triple Collocation (TC) method and least square method, and the spatiotemporal distribution of potential evapotranspiration in the study area was discussed.

At site scale and basin scale, ERA5 potential evapotranspiration products had good adaptability in the Yarlung Zangbo River, and its assessment accuracy was significantly better than GLEAM, MOD16A2 and GLDAS_Noah potential evapotranspiration products. In terms of spatial distribution of station accuracy, except GLEAM, the correlation of the other three remote sensing data was most significant in the middle reaches of the basin. The relative deviation of MOD16A2 and ERA5 was small, and the spatial distribution of their root mean square error of the two was opposite to the relative deviation. The weights of MOD16A2, GLDAS_Noah and ERA5 remote sensing datas in the fused data were 31.12%, 30.64% and 38.24%, respectively. The uncertainty analysis of the three remote sensing products showed that the spatial distribution of errors in the upper reaches of the Yarlung Zangbo River basin was gradually decreasing from north to south, but the spatial distribution of errors in other parts was different. The spatial distribution of weights was basically opposite to the spatial distribution of errors. The four types of data had large multi-year mean potential evapotranspiration in the middle of the Yarlung Zangbo River basin, and the difference was whether there was a greater potential evapotranspiration in the southeast corner of the basin. The multi-year average potential evapotranspiration was in the order: ERA5<MOD16A2<PET_{TC}<GLDAS_Noah. The accuracy improvement of fusion data in terms of correlation coefficient was relatively small, while the bias and root mean square error improved more significantly. Moreover, the fusion data neutralized the evapotranspiration and spatial distribution characteristics of the three types of remote sensing data, effectively filling in some missing values of the remote sensing data.

At the site scale, ERA5 remote sensing products had a significant correlation and the highest accuracy, which was more suitable for the Yarlung Zangbo River basin, followed by MOD16A2 and GLDAS_Noah. Compared with MOD16A2, GLDAS_Noah and ERA5, the accuracy of the fused data was improved in the basin. The peak value of potential evapotranspiration in the fusion data appeared in 2009, and the annual average potential evapotranspiration in the Yarlung Zangbo River basin gradually decreased from the middle to the upper and lower reaches, with the maximum potential evapotranspiration appeared in the southeast corner of the basin.

Key words: remote sensing product; potential evapotranspiration; data fusion; spatiotemporal variation; Yarlung Zangbo River basin