

---

# 青藏高原六套陆面蒸散发产品的评估

袁令<sup>1,4</sup>, 马耀明<sup>1,2,3,4,5</sup>, 陈学龙<sup>1,2</sup>, 王玉阳<sup>1,4</sup>

(1. 青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室地气作用与气候效应团队, 北京 100101; 2. 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 伊斯兰堡 45320, 巴基斯坦; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 兰州大学, 兰州 730000)

---

\*收稿日期: 2022 年 6 月 15 日 网络预出版日期

项目基金: 国家自然科学基金项目(编号: 91837208 和 41975009)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA20060101)。

作者简介: 袁令(1994-), 男, 四川达州人, 在读博士, 主要从事大气边界层观测与卫星遥感应用. E-mail: [yuanling@itpcas.ac.cn](mailto:yuanling@itpcas.ac.cn)

\*通信作者: 马耀明(1964-), 男, 山西夏县人, 研究员, 主要从事大气边界层观测与卫星遥感应用. E-mail: [yyma@itpcas.ac.cn](mailto:yyma@itpcas.ac.cn)

**摘要:** 鉴于基于卫星遥感和地面观测开发出的不同时空分辨率蒸散发(ET)产品在青藏高原(TP)仍存在不确定性, 从而限制了这些产品在水文气象和气候评估方面的应用。本文基于涡动观测的 ET 对六种 ET 产品 (PML、EB-ET\_V2、GLEAM、GLDAS、ERA5\_Land 和 MOD16)进行评估并比较各产品之间的差异, 对 TP 区域 ET 产品不确定性做了分析。结果表明: (1)观测值与对应像元 ET 值之间的年平均态和季节循环存在较好的相关性、一致性, GLEAM 与观测值吻合度较高并拥有适用性, MOD16 在大部分站点性能较差; (2) 在季节性变化方面, 春季 ERA5\_Land 与观测的变化较为一致, 夏季和冬季 GLEAM 产品与观测的变化更为接近而 EB-ET\_V2 在秋季表现更有优势; (3) 在空间上, GLEAM 与 EB-ET\_V2 和 GLDAS 存在更高的相关性(相关系数  $R>0.88$ )和一致性(一致性指数  $IOA>0.89$ ), 各产品季节时空分布有较大的差异, 尤其是春季, 相对其他产品, MOD16 在大部分区域夏季低估且冬季高估; (4) 除 MOD16 外的各产品年平均 ET 大小相差较大, 多年平均的高原 ET 大小排序为 ERA5\_Land( $401.46\text{mm/年}$ )>PML( $334.37\text{mm/年}$ )>GLEAM( $298.46\text{mm/年}$ )>EB-ET\_V2( $271.39\text{mm/年}$ ) >GLDAS( $249.67\text{mm/年}$ ), 六套产品估算的青藏高原的总体年蒸发量为  $330.59\text{mm/年}$ 。青藏高原不同蒸发产品的比较有助于对高原蒸发的动态变化有更深入的了解, 可以为青藏高原水资源评估和区域水管理提供参考。

**关键词:** 青藏高原; 陆面蒸散发产品; 涡动相关观测

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

---

# Evaluation of six land surface evapotranspiration products over the Tibetan Plateau

Ling Yuan<sup>1,4</sup>, Yaoming Ma<sup>1,2,3,4,5</sup>, Xuelong Chen<sup>1,2</sup>, Yuyang Wang<sup>1,4</sup>

(1. Land-Atmosphere Interaction and its Climatic Effects Group, State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Resources and Environment (TPESRE), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Resources and Environment (TPESRE), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. China-Pakistan Geoscience Research Center, Islamabad 45320, Pakistan; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China. 5. Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The uncertainties of evapotranspiration (ET) products developed based on satellite remote sensing and observations with different spatial and temporal resolutions still exist in the Tibetan Plateau (TP), limiting the application in hydrometeorological and climate assessment. Six ET (PML, EB-ET\_V2, GLEAM, GLDAS, ERA5 and MOD16) products were evaluated based on eddy observations and the differences between the products were compared, and the uncertainty of ET products in the TP region was analyzed. The results show that: (1) There is a good correlation and consistency in the mean state and seasonal cycle between the observed value and the ET value of the corresponding pixel. GLEAM has a high degree of agreement with the observed value and has applicability, and MOD16 has poor performance in most sites. (2) In terms of seasonal changes, ERA5\_Land in spring is more consistent with the observed changes, GLEAM products in summer and winter are closer to the observed changes, and EB-ET\_V2 is more dominant in autumn; (3) Spatially, GLEAM has higher correlation (the correlation coefficient,  $R > 0.88$ ) and consistency (Index of agreement,  $IOA > 0.89$ ) with EB-ET\_V2 and GLDAS. There are big

---

**\*Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (41975009, 91837208), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA20060101)

**First author:** Yuan Ling (1994-), male, Dazhou County, Sichuan Province, Doctor of philosophy. Research areas include Atmospheric boundary layer processes and satellite remote sensing applications. **E-mail:** [yuanling@itpcas.ac.cn](mailto:yuanling@itpcas.ac.cn)

**\*Corresponding author:** Ma Yaoming (1964-), male, Xiaxian City, Shanxi Province, Professor. Research areas include Atmospheric boundary layer processes and satellite remote sensing applications. **E-mail:** [yyma@itpcas.ac.cn](mailto:yyma@itpcas.ac.cn)

---

differences in the temporal and spatial distribution of various products in the seasons, especially in spring. Compared with other products, MOD16 is underestimated in summer and overestimated in winter in most regions.

(4) The annual average ET of each product except MOD16 is quite different. The ranking of the average ET for many years is ERA5 (401.46mm/year)>PML (334.37mm/year)>GLEAM (298.46mm/year)>EB-ET\_V2 (271.39mm/year)>GLDAS (249.67mm/year). The total annual evaporation in the effective area is 330.59mm/year. The assessment results table helps to have a deeper understanding of the quality and dynamics of ET products on the TP, which can provide a reference for water resources assessment and regional water management on the TP.

**Key words:** The Tibetan Plateau; Land surface evapotranspiration products; Eddy correlation observation

## 1 引言

关于气候异常和预测能力发展的研究很大程度上依赖于水热循环可用参考数据的时间序列(Michel et al., 2016)。蒸散发(ET)作为水热平衡的重要组成部分, 被描述为水从地球表面进入大气的过程, 可以直接影响区域和全球水文过程。准确、可靠的 ET 信息是许多水文气象应用(如水资源管理、灌溉计划、作物产量估算和干旱预测等)的先决条件(Li et al., 2018)。然而, 因为 ET 变化受土壤水分供应、大气反馈和异质植被条件之间复杂的相互作用控制, 对其进行准确的定量分析具有挑战性。敏感的气候反馈、地表的空间异质性和复杂的环境条件, 它们在时空上的可变性通常会在 ET 量化中引起不同程度的不确定性(Long et al., 2014)。

青藏高原(The Tibetan Plateau, TP)是世界上平均海拔最高、地形最为复杂的高原。同时拥有中低纬度地区最大、最厚的冻土区(程国栋等, 2019)。凭借其独特的地理特征和生态系统特性, 被誉为“地球第三极”(Qiu, 2009)、“亚洲水塔”(郑度和姚檀栋, 2004; 徐祥德等, 2019), 也被认为是全球气候变化的敏感器, 对全球气候系统有着极其重要的影响, 在亚洲季风系统发展中扮演着重要的角色(吴国雄等, 2016; Wu et al., 2015; Ma et al. 2017; Liu et al., 2020)。尽管 TP 地区已经呈现显著的气候变化(陈德亮等, 2015; 段安民等, 2016; Liu et al., 2012), 高原的地表水循环也出现了失态特征, 尽管先前已有通过涡动相关观测对地表通量进行评估, 却很少有对高原 ET 产品进行的综合评估研究(Yang et al., 2019), 缺乏长期的 ET 观测也是这项研究受阻的主要障碍之一。

尽管 ET 研究存在量化的不确定性方面的挑战(Zhang et al., 2010), 但是随着边界层气象学和观测技术理论的发展, 基于蒸发皿、波文比、涡动相关(EC)等的常规地面观测技术, 通常被视为站点尺度的 ET 的真实值。尽管站点 ET 存在自身的测量误差和能量闭合问题(Xu et al., 2017)。毫无疑问, 这些仪器为调查蒸发过程、相关机制和在特定地点和时期的 ET 相关问题提供了必要的支撑。然而, 由于观测点分布稀疏、时间跨度短且不连续, 基于有限的 ET 观测的结论可能缺乏普遍性, 特别是对于较长的时间间隔和较大的空间尺度(Majozi et al., 2017)。因此在过去的几十年中, 基于遥感、再分析资料、陆面模型估计和数据同化方法开发了具有不同时空尺度的全球 ET 数据集, 例如 MOD16(Mu et al., 2011)、GLDAS(Rodell et al., 2004)、GLEAM(Miralles et al., 2011)、ERA5\_Land(Muñoz-Sabater et al., 2021)、PML(Zhang et al., 2019)和 EB-ET\_V2(Chen et al., 2021)。但是, 这些模型通常会根据其理论、结构假设和输入参数而呈现不同程度的不确定性, 并且这些限制主要受下垫面、气候和水文条件变化的影响(Xu et al., 2015)。尽管这些数据集提供了用于长期和大尺度空间 ET 相关研究的机会, 但数据的验证和相互比较是必要的。通过将现有的 ET 产品像元值与对应观测值比较评估, 涉及有相关性、偏差和均方根误差等指标来评价数据集和观测之间的差异。站点通量塔观测已被用作验证各种 ET 产品像元值的典型参考数据, 准确量化数据集的不确定性并选择合理的 ET 数据集可以改善大尺度区域长期有效的水文气象监测。

因此, 本研究的主要目的是对六个独立可用的长期 ET 数据集(PML、EB-ET\_V2、GLEAM、GLDAS、ERA5\_Land 和 MOD16)的性能评估。首先通过在草地、裸土生态系统上共收集的 8 个通量塔 ET 观测与 ET 产品像元值进行独立比较来检查各 ET 产品的不确定性, 分析不同土地覆盖类型对应的 ET 产品误差结构, 为不同生态系统选择合适的 ET 产品; 然后交叉对比各产品之间的时空差异特征, 总结出 TP 年平均蒸散量。总体而言, 在 TP 不同地表类型使用条件下, 本研究的误差特征分析是对多种 ET 产品评估的重要一步, 有助于对青藏高原 ET 产品质量的选择和 ET 动态变化监测有更深入的了解, 可以为青藏高原水资源评估和区域水管理提供参考。

## 2 研究站点和研究区域

本研究 TP 的范围(海拔高于 2500m)介于 24°N 至 42°N 的纬度和 73°E 至 106°E 的经度之间, 土地覆盖类型可以划分为四大类(森林、草地、裸土、冰川或雪)(图 1a), 其中主要的草地和裸土覆被类型是分别约占 54.59%和 36.68%(图 1b)。在研究区域内包含了 8 个通量观测站, 包括草地站: 中国科学院西北生态环境资源研究院阿柔冻融观测站(Arou)、中国科学院西北生态环境资源研究院若尔盖高寒湿地生态系统研究站玛曲观测站(Maqu)、中国科学院西北生态环境资源研究院那曲高寒气候环境观测研究站(BJ)、纳木错站(NAMORS)和中国科学院藏东南高山环境综合观测研究站(SETORS); 裸土站: 中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站(QOMS)、中国科学院青藏高原研究所慕士塔格西风带环境综合观测研究站(MAWORS)和中国科学院阿里荒漠环境综合观测研究站(NADORS)。表 1 列出了 8 个通量站的详细地理特征。

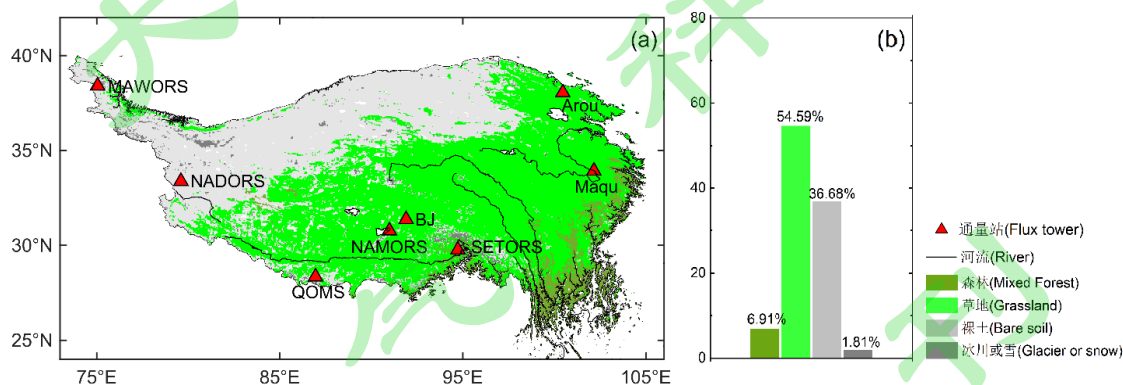


图 1 研究区域土地覆盖类型的空间分布 (a) 和频数 (b) (三角表示通量站位置)。

Fig.1 (a) Spatial map and (b) frequency histograms of land cover types in the study (triangles indicate flux site locations).

表 1 选定通量站点位置具体特征。



Table 1. The detail description of flux sites.

站点	经纬度	植被类型	海拔(m)	测量高度(m)	数据年份
草地站					
阿柔(Arou)	38.05°N, 100.46°E	草地	2995	2.96	2015-2017
玛曲(Maqu)	33.92°N, 102.16°E	草地	3500	3.50	2012-2014
BJ(BJ)	31.37°N; 91.90°E	高寒草甸	4509	3.10	2016-2018
纳木错 (NAMOR)	30.77°N, 90.99°E	高寒草甸	4730	3.06	2008-2010
林芝站 (SETORS)	29.76°N, 94.73°E	草地	3326	3.04	2015-2017
裸土站					
珠峰(QOMS)	28.21°N, 86.56°E	砾石或稀疏短草	4298	3.25	2008-2010
慕士塔格(MAWORS)	38.41°N, 75.05°E	荒或稀疏短草	3668	2.30	2015-2017
阿里(NADORS)	33.39°N, 79.70°E	荒或稀疏短草	4270	2.75	2013-2015

### 3 蒸散数据集

#### 3.1 PML

本数据是基于发展的 PML 遥感 ET 模型(Zhang et al., 2019), 结合 MODIS 卫星数据和 GLDAS 气象驱动数据模拟得到的全球陆面 ET 数据集。发展的 PML 遥感 ET 模型根据气孔导度理论耦合了植被蒸腾与 GPP, 使得总初级生产力(GPP)与植被蒸腾相互制衡, 从而提高 GPP、蒸散发和植被水分利用效率的模拟精度。模型参数通过全球 95 个通量站观测数据校正, 并按植被类型扩展至全球, 最终得到时空分辨率为 8 天和  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  的全球 ET 与 GPP 数据集。

#### 3.3 EB-ET\_V2

本数据集是基于 MODIS 卫星数据、再分析资料和地表能量平衡法模拟得到的全球陆面日尺度的蒸散发量。在最新修订的能量平衡模型算法(EB)中(Chen et al., 2021), 引入了的热力学参数化方案(Yang et al., 2002, 2008)和植被冠层的子粗糙层(sub-roughness layer)修正稳定度(Chen et al., 2019), 明显改善了地表感热通量的估计(Chen et al., 2013)。EB 模型利用白天瞬时的地表温度和相同时刻的气象数据计算了瞬时的蒸发比, 并假设日蒸发比等于瞬时蒸发比, 采用 ERA-interim 的有效地表能量计算得到日蒸发量。考虑到有云污染引起的数据缺失问题, 该产品采用了蒸发比的空缺插补方法最终得到全球无缝的 ET 产品。EB-ET\_V2 产品是本文采用的时空最高分辨率的产品, 是日尺度和  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  的全球 ET 数据集。

#### 3.3 GLEAM

GLEAM 蒸散数据集是通过一套复杂的算法生成全球 ET 产品, 这些算法基于多种卫星的驱动数据集来

估算蒸发的各种分量(Miralles et al., 2011)。截流损失是基于 Gash 分析模型并使用降水作为强迫数据集单独计算的, 其余的蒸发成分(即蒸发、升华和蒸腾作用)是使用 P-T 方法计算的, 该方法不包含 P-M 方法中的气孔阻力和气动阻力的参数化。被雪覆盖所对应地区的网格, 则可以使用过冷水和冰的特定参数调整 P-T 方程以估算升华量。在这项研究中使用了由基于卫星的数据集驱动的 GLEAM\_v3.1b 产品。

### 3.4 GLDAS

GLDAS 数据集是基于卫星和地面观测的组合, 采用先进和复杂的地表建模和数据同化方法来生成可用的地表热通量和地表状态变量。该数据集提供了各种水文气象变量(降雨和降雪率、蒸散量、土壤湿度、地表和地下径流、辐射), 可用于广泛的研究领域以评估区域和全球范围的水文状况。GLDAS 提供了各种不同的陆面模型, 例如 Noah、Mosaic、CLM 和 VIC。这些陆面模型集成了大量的观测数据集, 并以不同的空间分辨率( $0.25^\circ$  和  $1^\circ$ )和时间(3 小时和每月)分辨率提供全球数据集。在本研究中采用的是 GLDAS/Noah L4 v2.1 的 3 小时  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  产品 ET 数据集。

### 3.5 ERA5\_Land

ERA5 是使用 ECMWF 集成预报系统 CY41R2 中的 4D-Var 数据同化产生的, 相比之前的产品除了显著提高水平分辨率之外, 还提供了更多的输出参数及其不确定性估计等新的功能。目前, ERA5 和 ERA-Interim 数据库均包含 40 年的气候数据。与 ERA-Interim 相比, ERA5 同化了更多最新卫星观测(例如 IASI、ASCAT、MWHS-2、TMI、AMSR-2、GMI 等), 以及预报系统还依赖于有关辐射强迫和边界条件的信息。本研究使用的是时空分辨率为每小时和  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  的陆面 ET 产品(ERA5-Land)。

### 3.6 MOD16

MOD16 ET 数据集是一种广泛使用的 MODIS 全球陆面 ET 产品, 包含了从土壤和潮湿陆面的所有蒸发以及植被冠层的蒸腾量。免费提供的 ET 产品是根据 Mu 等(2011)改进的 PM 遥感算法(Cleugh et al., 2007)计算的。该产品已针对全球地表植被情况进行了优化和评估。NTSG 的 ET 产品统一输出的是从 2000 年到至今以时空尺度为 8 日、月和年以及 5 km 和 1 km 的实际蒸发、潜在蒸发。本文采用的是 NTSG 中 MOD16\_TP 的 8 天、 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  和 MOD16A2 的 8 天、500m 时空尺度的 ET 产品。所有数据集的模型主要驱动数据集详细列在表 3 里。



表 2 本文所用 ET 产品数据集描述

Table.2 The description of 6 terrestrial ET datasets

ET 产品	时间分辨率	空间分辨率	研究年份
PML	8 天	0.05°×0.05°	2002~2019
EB-ET_v2	逐日	0.05°×0.05°	2000~2017
GLEAM	逐日	0.25°×0.25°	1980~2018
GLDAS	3 小时	0.25°×0.25°	2000~2020
ERA5_Land	1 小时	0.1°×0.1°	1981~2020
MOD16	8 天	0.05°×0.05°	2000~2018

#### 4 研究方法和统计方法

将通量站观测值与对应 ET 产品的像元值进行比较, 使用了四个统计指标, 包括平均偏差(MB)、均方根误差(RMSE)、相关系数(R)和一致性指数(IOA)用于 ET 产品的评估, IOA 解释了 ET 产品和观测之间紧密相关的程度。其中 M 和 G 分别代表基于产品网格值和观测值。 $n$  是用于比较的总样本数,  $i$  表示第  $i$  个样本,  $\bar{M}$  和  $\bar{G}$  分别表示基于 ET 产品和观测的平均值。

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - G_i) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - G_i)^2} \quad (7)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}}, -1 \leq R \leq 1 \quad (8)$$

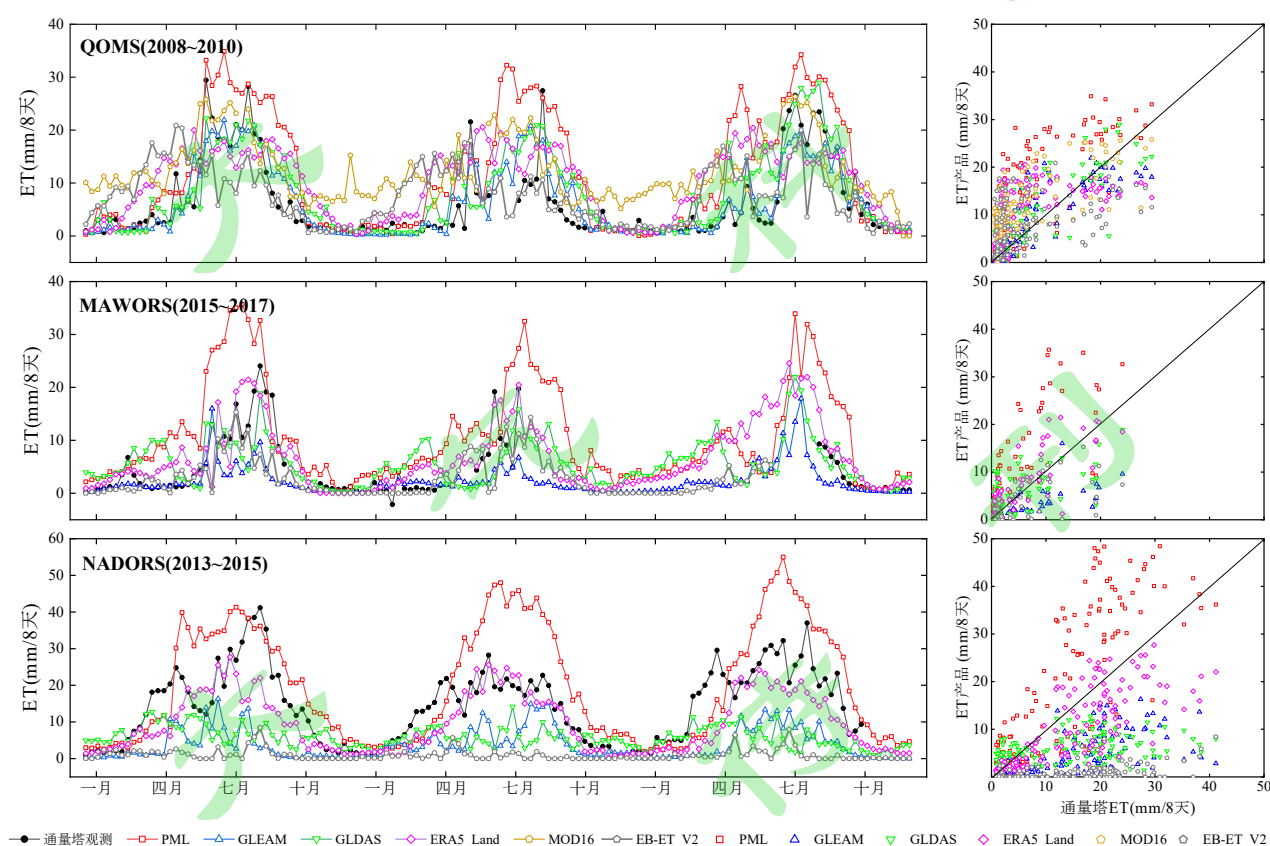
$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - G_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{G}| + |G_i - \bar{G}|)^2}, 0 \leq IOA \leq 1 \quad (9)$$

#### 5 结果分析

##### 5.1 ET 产品在 EC 站点网络的表现

在评价本研究使用的 ET 产品可信度之前, 先将六种 ET 产品与通量塔观测值进行比较, 以评估其各自的准确性是必要的。为了比较的标准统一, 我们将通量站观测的半小时 ET 值与 EB-ET\_v2、GLEAM 日时间尺度 ET 值和 GLDAS、ERA5\_Land 小时时间尺度 ET 值, 通过日平均和 8 天求和整合到 8 天时间尺度的总蒸散发量。在不同站点或覆被下, 图 2 中显示的是各 ET 产品和观测 ET 的时间序列和散点比较分析图。

时间序列揭示了各 ET 产品在 8 天的时间尺度模式模拟的季节循环特征, 散点分析图揭示了各产品与观测值的一致性。在研究期间内, 六种 ET 产品都能捕捉季节循环, 在草地站点更加显著。表 4 的统计结果揭示了 ET 产品的实际水文行为的独立准确性, 各产品的负 MB 值揭示了存在低估的现象。在草地站中, 相比 PML、EB-ET\_V2、GLDAS、ERA5\_Land 和 MOD16, GLEAM 与通量塔观测值(R、IOA、MB 和 RMSE 分别为 0.88、0.90、-0.92mm/8 天和 5.37 mm/8 天)有更好的性能表现; 并且从年平均值的结果而言, GLEAM 的年平均值(12.50mm/8 天)与观测值(13.34mm/8 天)偏差最小为 0.84 mm/8 天。在裸土站点中, GLEAM 也与通量塔观测值(R 和 IOA 分别为 0.74 和 0.71)更一致, 但 PML 与通量塔观测值偏差更小(MB 和 RMSE 分别为 0.71 mm/8 天和 7.34 mm/8 天), 正 MB 值揭示了存在高估的趋势。总体而言, 在大部分站点中 GLEAM 与通量塔观测值更为接近, MOD16 都有较低的性能表现。在季节内变化方面, 基于站点资料观测年份与对应年份的 ET 产品数据, 通过对各序列数据的去季节循环处理, 图 3 展示了各产品在所有站点不同季节的平均变化状况。揭示了各产品很难估计到季节内变化的规律, 相比观测数据的波动仍有很大的差距。表 5 的统计结果可以看出在春季 GLDAS 与观测的变化一致(R 和 IOA 分别为 0.47 和 0.72), 在夏季和冬季 GLEAM 产品与观测的变化更为接近(R 和 IOA 分别为 0.33 和 0.62、0.43 和 0.54), 但仍有很大的差距, 而 MOD16 在秋季表现更有优势(R 和 IOA 分别为 0.41 和 0.68)。



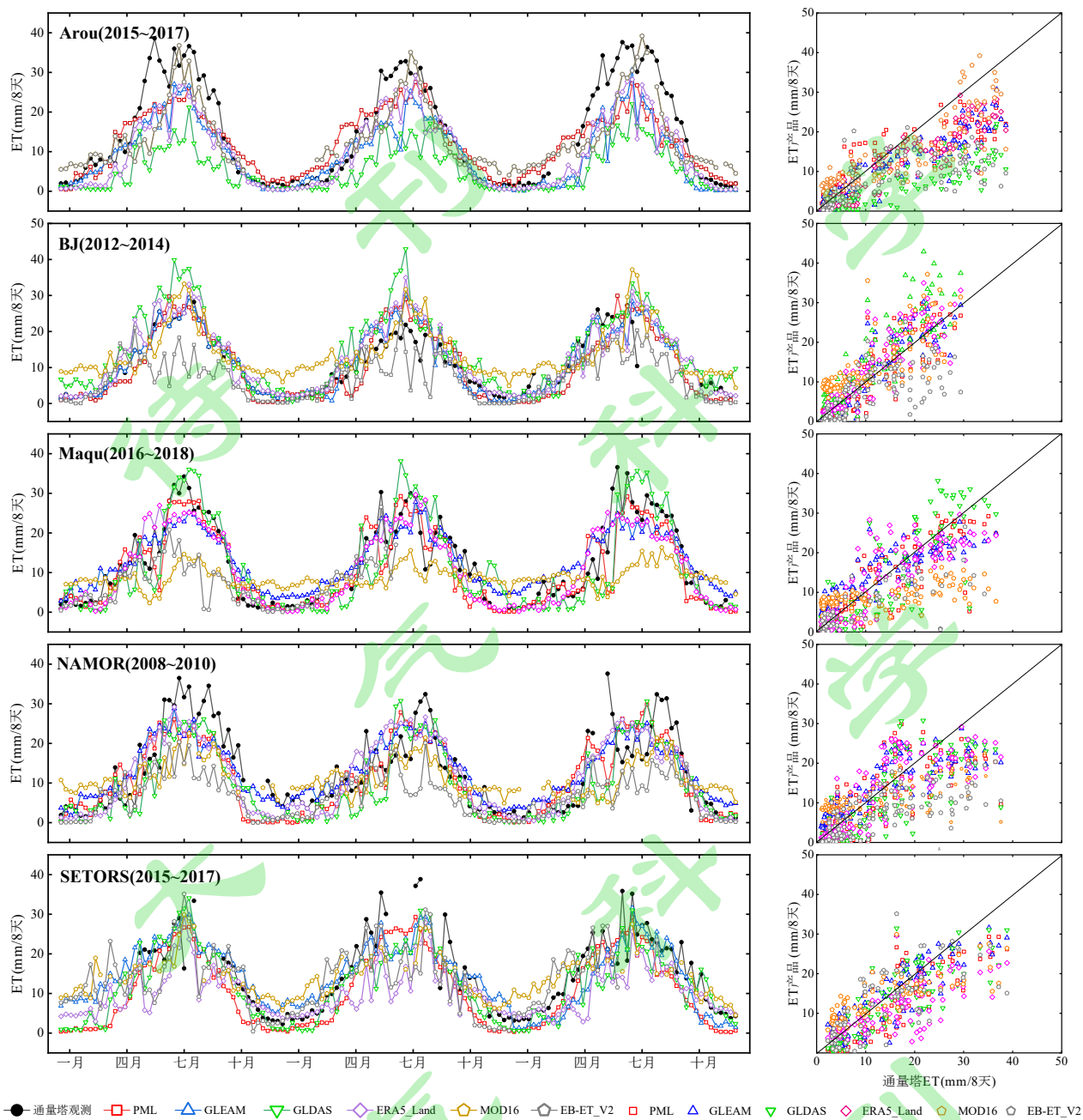


图2 六种ET产品与通量塔观测ET值在草地站(Arou, BJ, NAMOR, Maqu和SETORS)和裸土站(QOMS, MAWORS和NASDE)的时间序列和散点对比分析

Fig.2 Displays time series and scatter plot analysis of flux tower data from six products over grassland site (Arou, BJ, NAMOR, Maqu, and SETORS) and bare soil sites (QOMS, MAWORS, and NASDE)

表 3. 本文使用的六个 ET 产品的主要强迫数据

Table 3. Major forcing data of the four ET products used herein

ET 产品	降水	辐射	气象数据 (风、温度、湿度和气压)	植被指数	模型
PML	GLDAS-2.1	GLDAS-2.1	GLDAS 2.1	MODIS	PML 遥感模型
EB-ET_V2	/	ERA-Interim	ERA-Interim	MODIS	地表能量平衡法
GLEAM	MSWEP v1.0	ERA-Interim	ERA-Interim	MODIS	Gash 分析模型、Priestley-Taylor 方程等模型，融合了卫星和环境观测数据
GLDAS	UMFD	UMFD	UMFD	/	陆面模型和数据同化
ERA5_Land	/	ERA5 近地表气象数据集和通量场	/	/	ECMWF 集成预报系统 CY41R2 中的 4D-Var 数据同化
MOD16	/	MERRA	GMAO	MODIS	PM 遥感模型

表 4 两种不同生态系统的通量塔观测值与六种 ET 产品之间的平均统计指标值

Table 4. Average statistical indicator values between *EC* observations and six *ET* datasets in two different ecosystem types

站点类型	ET 数据集	通量站平均 ET (mm/8天)	产品平均ET (mm/8天)	<i>MB</i> (mm/8 天)	<i>RMSE</i> (mm/8 天)	<i>IOA</i>	<i>R</i>
草地站	PML		8.44	-2.17	5.44	<b>0.91</b>	<b>0.88**</b>
	EB-ET_V2		11.15	-4.65	8.62	0.74	0.72**
	GLEAM	13.34	<b>12.50</b>	<b>-0.92</b>	<b>5.37</b>	0.90	<b>0.88**</b>
	GLDAS		10.85	-2.45	7.26	0.85	0.86**
	ERA5_Land		8.01	-5.34	7.81	0.79	0.85**
	MOD16		12.31	-1.20	7.56	0.73	0.72**
裸土站	PML		3.81	<b>0.71</b>	<b>7.34</b>	0.70	0.58*
	EB-ET_V2		<b>9.24</b>	-4.61	9.21	0.56	0.54*
	GLEAM	8.66	4.28	-4.41	7.47	<b>0.71</b>	<b>0.74**</b>
	GLDAS		6.63	-2.12	7.58	0.70	0.57*
	ERA5_Land		3.30	-5.43	8.77	0.66	0.72**
	MOD16		/	/	/	/	/

\*\*表示各ET产品与通量塔观测的相关性通过*t*检验的 $p<0.01$ 水平下的显著性检验

\*表示各ET产品与通量塔观测的相关性通过*t*检验的 $p<0.05$ 水平下的显著性检验

表5 不同ET数据集在TP的季节内变化性能比较

Table 5 Comparison of the performance of different ET datasets on the intra-seasonal variation of TP.

ET数据集	春季 (R/IOA)	夏季 (R/IOA)	秋季 (R/IOA)	冬季 (R/IOA)
PML	0.38*/0.65	-0.22/0.27	-0.19/0.23	0.21/0.49
EB-ET_V2	0.23/0.52	0.24/0.52	0.36/0.62	0.15/0.46
GLEAM	-0.27/0.18	<b>0.33/0.62</b>	0.14/0.44	0.43*/0.54
GLDAS	0.47**/0.72	<b>0.32/0.58</b>	0.15/0.49	0.03/0.41
ERA5_Land	0.18/0.52	0.09/0.31	0.28/0.54	-0.02/0.37
MOD16	-0.04/0.39	<b>0.32/0.61</b>	0.41*/0.68	0.14/0.51

\*\*表示各ET产品与通量塔观测的相关性通过*t*检验的 $p<0.01$ 水平下的显著性检验

\*表示各ET产品与通量塔观测的相关性通过*t*检验的 $p<0.05$ 水平下的显著性检验

加粗字体表示各ET产品与通量塔观测的相关性通过*t*检验的 $p<0.1$ 水平下的显著性检验

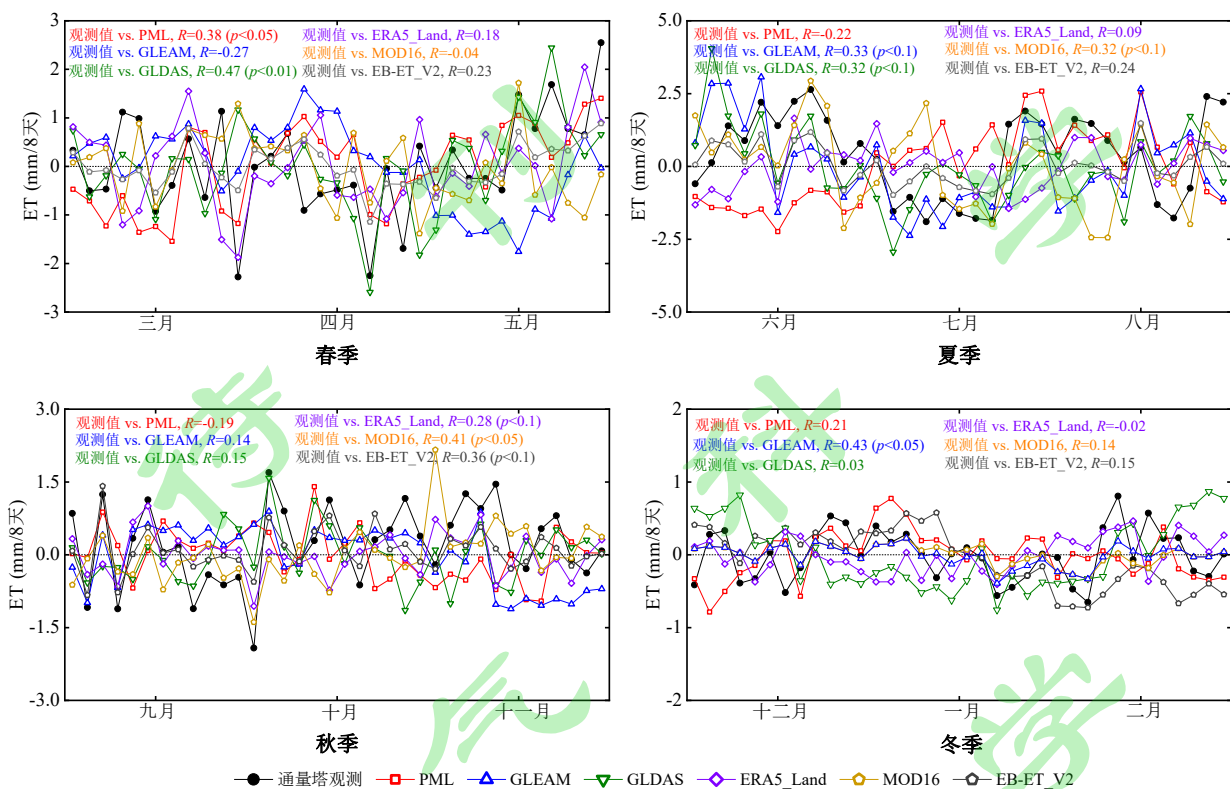


图 3 六种 ET 产品与通量塔观测 ET 值在通量站的平均季节变化时间序列

Fig.3 Average intra-seasonal variation time series of six ET products and flux tower observations of ET values at flux stations

## 5.2 青藏高原 ET 空间分布比较

前小结已经评价了 6 种 ET 产品在站点上的性能表现,但是在空间尺度上的评价也是必不可少的。采取 ET 多年平均对不同数据集进行交叉比较,来评估各产品之间的差异和一致性。除此之外,近期 Han 等(2021)基于优化 SEBS 参数后的发展的一套时空尺度为月尺度和  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  的青藏高原 ET 数据集 (Han-ET),通过了在站点观测 ET 的验证。本小节也将该结果同时段 ET 作为交叉对比数据集,验证和评价多种 ET 产品的可靠性和时空尺度的差异。从年平均 ET 的空间分布来看(图 4),青藏高原蒸发量呈现东南向西北递减趋势,和地表覆被类型从森林向草地、裸土的渐变的趋势一致。位于高原东南部的植被茂密且蒸发量最高,原因是该地区的降水和辐射充足。在极度干旱的羌塘高原中,各产品均表现出低值,原因是该地区地表可利用水不足,蒸发受水分限制。值得注意的是 MOD16 在西北区存在大面积缺省值,因此不能充分评价整个青藏高原的 ET 状况。相比之下, Han-ET 在高原中部和北部区域有明显的极高值, EB-ET\_v2 和 GLDAS 产品在高原西北部年蒸发量低于 100mm/年。图 5 的各产品相关系数揭示了各产品之间显著的相关



---

( $p>0.05$ ), GLDAS 与 PML 存在最好的相关性和一致性( $R=0.93$ ,  $IOA=0.93$ ), 其次 GLEAM 和 GLDAS、GLEAM 和 EB-ET\_v2 也有较好的相关性和一致性( $R=0.88$ ,  $IOA=0.92$  和  $R=0.88$ ,  $IOA=0.91$ )。MOD16、Han-ET 与其它产品呈现较差的相关性和一致性( $R<0.7$ ,  $IOA<0.75$ )。

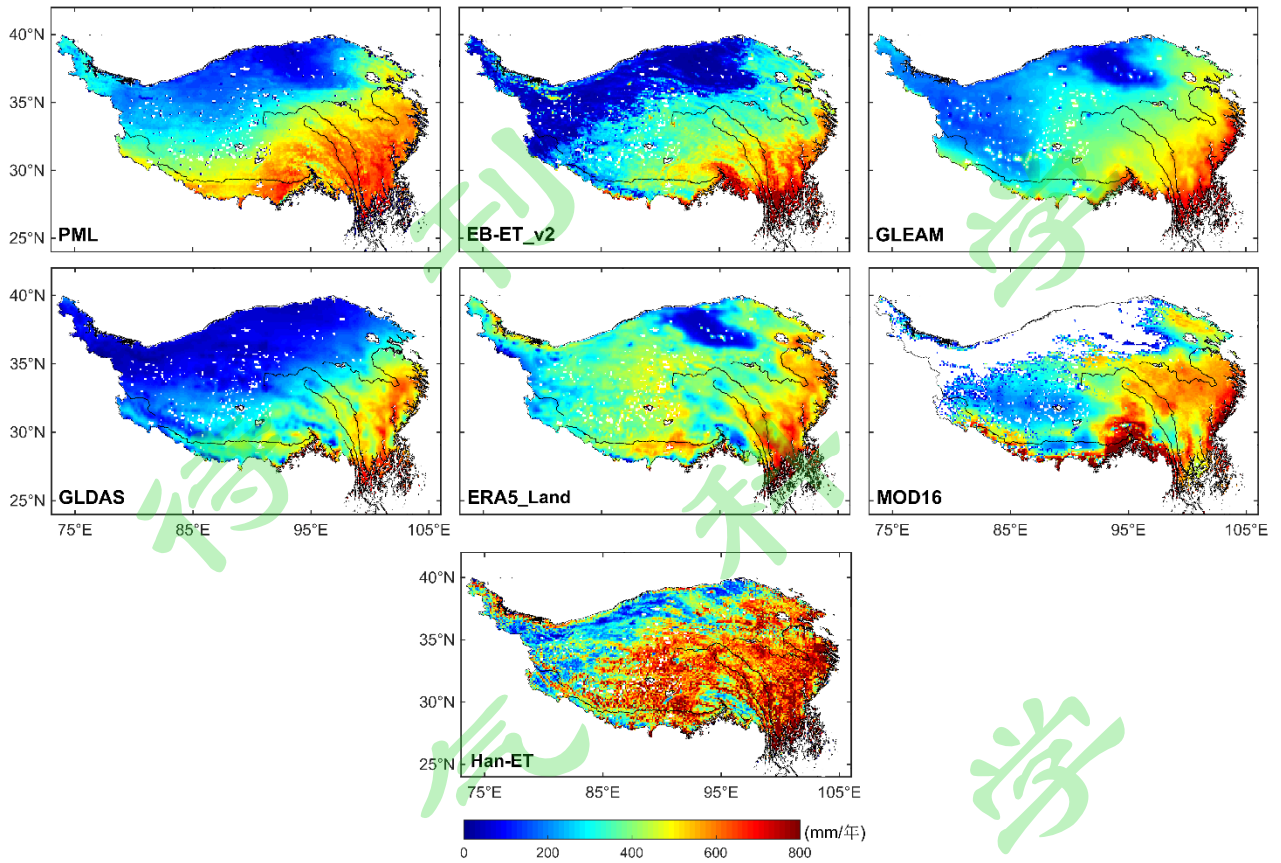


图 4 青藏高原多年平均 ET 的空间分布

Fig.4 Multi-year average *ET* spatial distribution of seven products over the TP

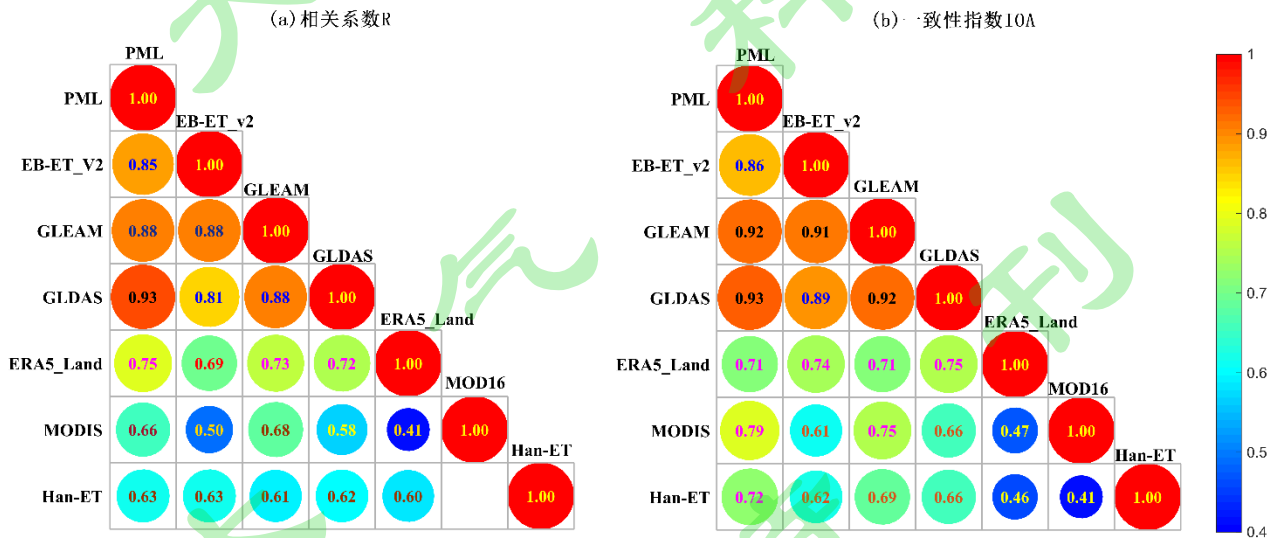


图 5 各 ET 产品在青藏高原空间分布的相关性和一致性分析

Fig.5 Correlation and consistency analysis of the spatial distribution of various *ET* products on the TP

### 5.3 各 ET 产品季节性比较

尽管在空间上 PML、GLEAM、EB-ET\_V2 和 GLDAS 之间都有很好的相关性和一致性，但是各 ET 产品之间年内季节性变化仍有不同程度的差异。图 6 和表 5 结果表明，各个产品都揭示了 ET 在空间上呈现东南向西北方向递减的趋势，春季 PML、EB-ET\_v2 和 Han-ET 产品在高原中部已经超过 100mm/季度，占比超过年蒸发量的 25%；各 ET 产品在夏季达到峰值，占比超过年蒸发量的 42%，夏季在横断山脉 ET 最高值超过了 300mm/季度，ERA5\_Land 和 Han-ET 在高原分布相对均匀，其它产品有明显的分界线；秋季各产品分布相对均匀一致，空间分布低于 150mm/季度；ET 在冬季最低，各产品占比低于 10%。除此之外，MOD16 在夏季在很大部分区域相对其他产品有较低的估值，在冬季表现明显高估于其他产品(超过 100mm/季度)。其中 PML、EB-ET\_v2 和 Han-ET 产品的春季 ET 比秋季高，可以用春季冻土消融和植被生长来解释这种现象。总体而言，几种 ET 产品在不同季节的平均占比分别为 23.27%、48.76%、19.26%和 8.59%。

表 6 青藏高原各 ET 产品不同季节 ET 量统计(mm/季度)

Table 6. Statistics of mean ET of seven datasets on the TP in different season (mm/季度)

ET 产品	春季	夏季	秋季	冬季
PML	85.78(25.65%)	167.12(49.98%)	59.53(17.8%)	22.94(6.86%)
EB-ET_V2	92.96(34.24%)	114.28(42.11%)	46.29(17.05%)	17.90(6.59%)
GLEAM	58.46(19.58%)	167.43(59.09%)	53.47(17.92%)	19.10(6.38%)
GLDAS	36.10(14.48%)	140.72(56.45%)	55.83(22.39%)	16.62(6.46%)
ERA5_Land	75.52(18.78%)	219.86(54.69%)	83.75(20.84%)	22.83(5.68%)
Han-ET	122.46(25.34%)	243.64(50.42%)	82.37(17.05%)	34.73(7.18%)
平均	80.25(23.27%)	168.12(48.76%)	66.78(19.26%)	29.62(8.59%)

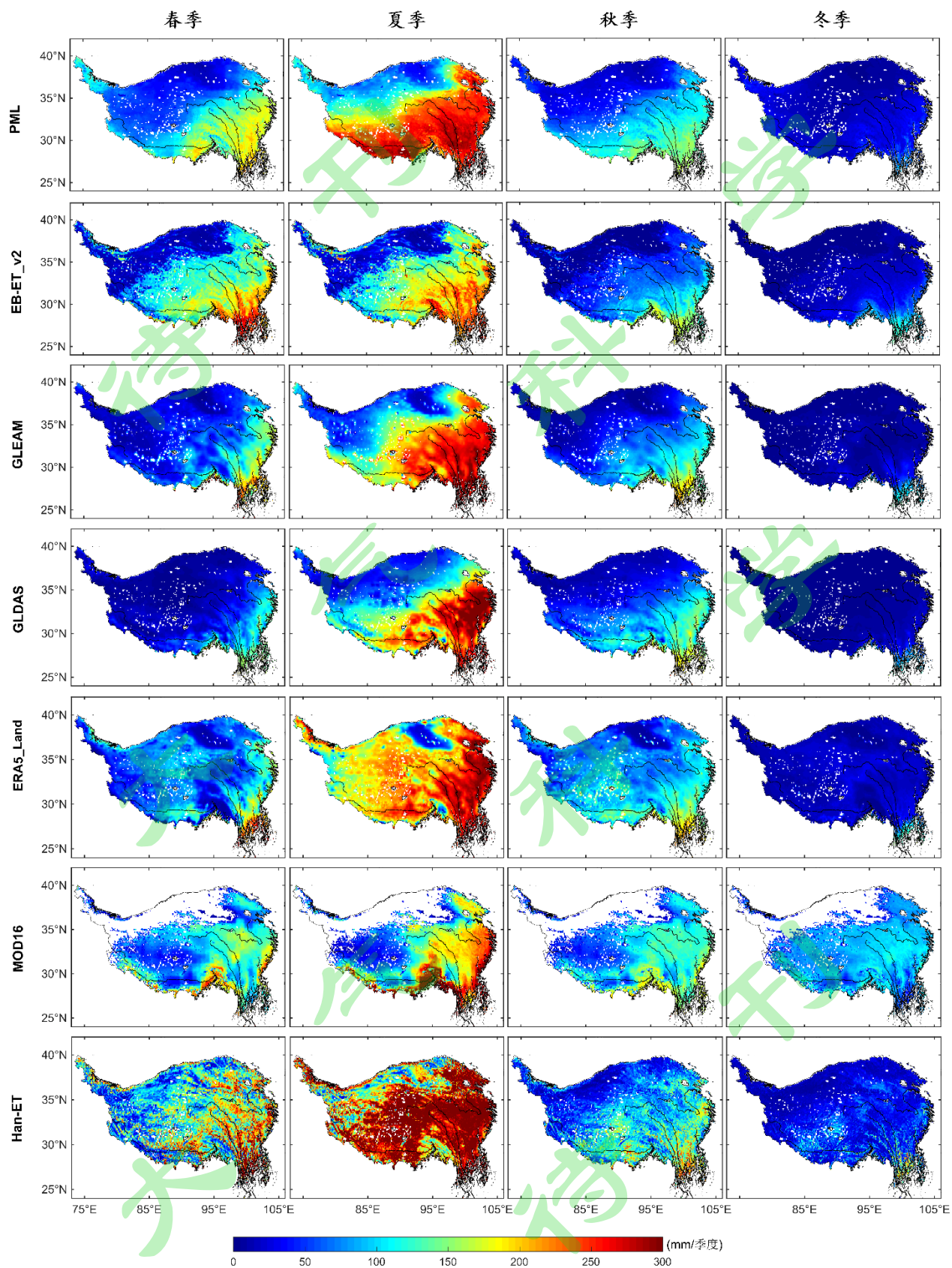


图 6 青藏高原季节平均 ET 的时空分布特征

Fig.6 Spatial and temporal distribution characteristics of seasonal average ET on the Qinghai-Tibet Plateau

#### 5.4 青藏高原年蒸发量

蒸发作为高原水热循环中至关重要的一部分，量化高原总 ET 量是非常有必要的。尽管在时空特征上各 ET 产品之间都有相关性和一致性的关系，但是各产品年蒸发量之间仍存在巨大的差异。各产品不同年份(2008 至 2018)的年 ET 蒸发量如表 7 所示。可以看出，ERA5\_Land、MOD16 和 Han-ET 的结果在整个研究区间均处较高的位置。MOD16 是因为在西北低值区呈现大面积的无效值，而 Han-ET 在高原的中部和北部有明显的较高估计值。其中 Han-ET 的年平均 ET 在 2012 年达到最高值为 519.22mm/年，多年平均 ET 也达到了 483.36mm/年。相比之下与其它五种产品年平均 ET 相差较大，其中多年平均 ET 中的 ERA5\_Land 最高(401.46mm/年)，GLDAS 最低(249.67mm/年)。ERA5\_Land 变化幅度小(标准差 9.84mm/年)，PML 变化幅度大(标准差 34.48mm/年)。在站点评估表现最好的 GLEAM 多年平均 ET 为 298.46 mm/年，最为接近的 EB-ET\_v2 为 271.39mm/年。多个 ET 产品总体平均为 339.78mm/年，其中 ERA5\_Land 和 Han-ET 高于均值，GLDAS、EB-ET\_V2 和 GLEAM 偏低，PML 较为接近均值，但变化幅度大。



表 7 青藏高原各 ET 产品不同年份陆面蒸散发总量统计(mm/年)

Table 7. Statistics of total ET of seven datasets on the TP in different years(mm/year)

	PML	EB-ET_V2	GLEAM	GLDAS	ERA5_Land	MOD16(有值区)	Han-ET
2001	/	307.08	267.98	213.61	404.77	386.48	490.51
2002	/	299.68	280.42	216.85	407.18	375.88	467.39
2003	319.16	272.67	289.65	231.60	393.17	381.92	494.98
2004	306.77	256.38	282.15	220.16	391.47	370.69	467.51
2005	313.76	278.01	294.07	238.85	387.65	392.48	510.35
2006	312.82	266.67	299.28	253.69	409.96	351.14	503.53
2007	312.51	259.89	296.96	256.58	414.62	337.98	498.11
2008	312.25	279.16	302.23	258.25	410.43	363.16	501.36
2009	290.68	261.98	283.71	243.21	384.64	353.22	476.88
2010	332.02	267.65	309.74	270.83	403.15	374.28	500.82
2011	337.21	260.14	298.79	271.71	404.77	377.98	493.35
2012	321.60	280.32	295.89	261.49	407.18	393.76	519.22
2013	338.11	259.24	307.58	271.16	393.17	371.12	450.46
2014	310.83	261.71	294.36	246.15	391.48	372.39	440.94
2015	341.84	261.60	303.38	260.97	387.65	366.77	450.64
2016	410.99	270.14	321.84	265.77	409.96	397.76	491.84
2017	407.31	/	323.61	256.42	414.62	425.31	485.74
2018	382.06	/	320.72	256.69	410.43	393.02	456.83
多年平均	334.37	271.39	298.46	249.67	401.46	376.96	483.36
标准偏差	34.48	14.15	14.5	18.11	9.84	19.45	22.15
总体平均	330.59(有效区域平均)						

## 6 不确定性分析

本研究的评估指标数据处于可接受的范围内,一方面 EC 技术能量闭合率不等于 1、脉冲波动测量不准确、传感器分离、安装结构的干扰、没有充分考虑冠层和光合作用的能量储藏、大涡流运输或者无法捕获的二次湍流、足迹的空间范围不固定等不确定因素(Majozi et al., 2017),造成了通量塔观测值验证 ET 仍存在不确定性。另外,需要注意的是青藏高原的地形比较复杂,以及 ET 产品与 EC 观测值之间的空间尺度差



异不匹配,例如慕士塔格站的通量站建立在山谷的湿地地带,可以看到 ET 产品普遍都比涡动相关观测的蒸发小,由于通量站下垫面代表性的问题,造成这里给出的评估也会有一定的局限性。对于各类蒸发产品的评估还需要从更多的角度进行分析,例如采用水量平衡法或采用青藏高原均一陆表的蒸发观测资料进行评估应是今后需要加强的方向。

另一方面,对于不同的模型结构,基于气孔导度参数发展的 PML 模型(Zhang et al., 2019),考虑了太阳辐射和大气湿度不足对气孔导度的敏感性(Zhang et al., 2016),但该模型在估计高原 ET 中仍存在一些限制,例如影响蒸发的关键因子-土壤水分对植被气孔导度影响的不包括在内。先前的研究指出 GLEAM 在草地的表现均优于其它产品,与最近研究一致(Yang et al., 2017),可能归因于该模型详细的参数化,考虑了卫星观测对土壤水分的限制,还考虑了树冠截流和降水的影响,以及广泛使用基于微波的观测数据提高了有云条件下的估计(Miralles et al., 2011)。最近 Khan et al. (2018)使用扩展的 Triple Collocation (TC) 方法对 GLEAM、GLDAS 和 MOD16 产品评估,指出在高原草地 GLEAM 产品的性能优势,与本研究的结果一致。Wang 等人 (2011)的研究结果指出 GLDAS 在农田地区也有相对较高的误差,归因于驱动数据集的不确定性为同化过程的固有部分(Baik et al., 2018)。ERA5\_Land 是模拟与观测值融合数据同化的结果,由于观测系统的变化,数据记录中存在非物理趋势,尽管可以获得更高的置信度,但是仍存在很大的不确定性(Muñoz-Sabater et al., 2021)。MOD16 模型的主要限制是算法中的水分需求由 NDVI 和 LAI 参数化,而土壤水分被相对湿度代替增加了 MOD16 的不确定性。先前的研究也指出了 MOD16 在不同下垫面的低性能表现(Jiang et al., 2013; Hu et al., 2015; Baik et al., 2018; Yuan et al., 2021)。不同模型驱动数据从卫星遥感中获得的误差,以及不同粗/细分辨率的气象观测驱动数据也是模拟结果不确定性增加的来源(Kim et al., 2012; Liaqat et al., 2017)。

## 7 结论与讨论

本论文利用青藏高原两种地表类型架设的 8 个通量塔观测站对六种 ET 产品(PML、GLEAM、EB-ET\_V2、GLDAS、ERA5\_Land 和 MOD16)进行了评估,交叉比较了各产品,对六套产品在青藏高原进行性能评估。在物理精度分析方面,从产品像元值与通量塔观测值的时间序列比较,结果显示各 ET 产品都能捕捉季节循环和平均态,GLEAM 在站点吻合度较高,但有略微低估的趋势( $MB < 0$ ),MOD16 在大部分站点性能较差。在季节性变化方面,春季 ERA5\_Land 与观测的变化较为一致,夏季和冬季 GLEAM 产品与观测的变化更为接近而 EB-ET\_V2 在秋季表现更有优势。在空间分布上,GLEAM、GLDAS 和 EB-ET\_V2 空间分布存在更高的相关性( $R > 0.8$ )和一致性( $IOA > 0.89$ ),各产品在季节时空分布有较大的差异,尤其是春季,相对其他产品,MOD16 在大部分区域夏季低估且冬季高估。各产品年平均 ET 大小相差较大,多年平均顺序为 ERA5\_Land( $401.46\text{mm/年}$ )>PML( $334.37\text{mm/年}$ )>GLEAM( $298.46\text{mm/年}$ )>EB-ET\_V2( $271.39\text{mm/年}$ )>GLDAS( $249.67\text{mm/年}$ ),且 ERA5\_Land 最稳定。基于上述 ET 产品计算得到 TP 地区多年平均的蒸发量

---

为 330.59mm/年。对六种 ET 产品在 TP 地区这种不确定性分析,可以帮助我们对这六种 ET 产品合理选择和 ET 动态变化研究有更深入的了解,也可能为青藏高原水资源管理提供参考。

**致谢:** 感谢中国科学院青藏高原研究所各野外台站、中国科学院西北生态环境资源研究院的那曲高寒气候环境观测研究站、中国科学院西北生态环境资源研究院的若尔盖高原湿地生态系统研究站和中国科学院西北生态环境资源研究院的阿柔冻融观测站为本研究提供的珍贵观测资料。

---

## 参考文献(References):

- Baik, J., Liaqat, U. W., Choi, M. 2018. Assessment of satellite- and reanalysis-based evapotranspiration products with two blending approaches over the complex landscapes and climates of Australia [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 263: 388–398. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.09.007
- 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 2015. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来 [J]. *科学通报*, 60: 3025-3035. Chen, D., Xu, B., Yao, T., et al. 2015. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau [J]. *Kexue Tongbao/Chinese Sci. Bull.*, 60: 3025-3035. doi: 10.1360/N972014-01370
- Chen, X., Su, Z., Ma, Y., et al. 2013. An improvement of roughness height parameterization of the Surface Energy Balance System (SEBS) over the Tibetan plateau [J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 52(3): 607–622. doi:10.1175/JAMC-D-12-056.1
- Chen, X., Su, Z., Ma, Y., et al. 2021. Remote Sensing of Global Daily Evapotranspiration based on a Surface Energy Balance Method and Reanalysis Data [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(16). doi: 10.1029/2020JD032873
- Chen, X., Massman, W. J., Su, Z. 2019. A Column Canopy-Air Turbulent Diffusion Method for Different Canopy Structures [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(2): 488–506. doi: 10.1029/2018JD028883
- Cleugh, H. A., Leuning, R., Mu, Q., et al. 2007. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 106(3): 285–304. doi: 10.1016/j.rse.2006.07.007
- 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 2019. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. *科学通报*, 64(27): 2783-2795. Cheng, G., Zhao, L., Li, R., et al. 2019. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Kexue Tongbao/Chinese Sci. Bull.*, 64(27): 2783–2795. doi: 10.1360/TB-2019-0191
- 段安民, 肖志祥, 吴国雄, 2016. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 12(5): 374-381. Duan, A. M., Xiao, Z. X., Wu, G. X. 2016. Characteristics of Climate Change over the Tibetan Plateau Under the Global Warming During 1979-2014 [J]. *Climate Change Research*, 12(5): 374-381. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2016.039
- Han, C., Ma, Y., Wang, B., Zhong, L., et al. 2021. Long-term variations in actual evapotranspiration over the Tibetan Plateau [J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 13(7): 3513–3524. doi: 10.5194/essd-13-3513-2021
- Hu, G., Jia, L., Menenti, M. 2015. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011 [J]. *Remote Sens. Environ.*, 156: 510–526. doi: 10.1016/j.rse.2014.10.017

- 
- Jang, K., Kang, S., Lim, Y. J., et al. 2013. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(23): 12,927–12,940. doi: 10.1002/2013JD020639
- Khan, M. S., Liaquat, U. W., Baik, J., et al. 2018. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 252: 256–268. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.01.022
- Kim, H. W., Hwang, K., Mu, Q., et al. 2012. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia [J]. *KSCE. J. Civ. Eng.*, 16(2): 229–238. doi: 0.1007/s12205-012-0006-1
- Liaquat, U. W., Choi, M. 2017. Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula [J]. *J. Clean Prod.*, 155: 93–104. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.022
- Majozi, N. P., Mannaerts, C. M., Ramoelo, A., et al. 2017. Analysing surface energy balance closure and partitioning over a semi-arid savanna FLUXNET site in Skukuza, Kruger National Park, South Africa [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(7): 3401–3415. doi: 10.5194/hess-21-3401-2017
- Ma, Y., Ma, W., Zhong, L., et al. 2017. Monitoring and Modeling the Tibetan Plateau's climate system and its impact on East Asia [J]. *Sci. Rep.*, 7: 44574–44574. doi:10.1038/srep44574
- Michel, D., Jiménez, C., Miralles, D. G., et al. 2016. The WACMOS-ET project - Part 1: Tower-scale evaluation of four remote-sensing-based evapotranspiration algorithms [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20(2): 803–822. doi: 10.5194/hess-20-803-2016
- Miralles, D. G., Holmes, T. R. H., et al. 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(2): 453–469. doi: 10.5194/hess-15-453-2011
- Mu, Q., Zhao, M., Running, S. W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sens. Environ.*, 115(8): 1781–1800. doi: 10.1016/j.rse.2011.02.019
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., et al. 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 13(9): 4349–4383. doi:10.5194/essd-13-4349-2021
- Liu, Y. M., Lu, M. M., Yang, H. J., et al. 2020. Land–atmosphere–ocean coupling associated with the Tibetan Plateau and its climate impacts [J]. *National Sci. Rev.*, 7: 534–552. doi: 10.1093/nsr/nwaa011
- Liu, Y. M., Wu, G. X., Hong, J. L., et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with

- 
- Tibetan Plateau forcing: II. Change. *Clim. Dyn.*, 39, 1183–1195. doi:10.1007/s00382-012-1335-y
- Li, S., Wang, G., Sun, S., et al. 2018. Assessment of multi-source evapotranspiration products over China using eddy covariance observations [J]. *Remote Sens.*, 10(11):1692-1692. doi:10.3390/rs10111692
- Long, D., Longuevergne, L., Scanlon, B. R. 2014. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, Remote Sensing, and GRACE satellites [J]. *Water Resour. Res.*, 50(2): 1131–1151. doi: 0.1002/2013WR014581
- Qiu, J. 2008. China: The third pole [J]. *Nature*. 454(7203):393-396. doi:10.1038/454393a
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., et al. 2004. The Global Land Data Assimilation System [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(3): 381–394. doi: 10.1175/BAMS-85-3-381
- Wang, F., Wang, L., Koike, T., et al. 2011. Evaluation and application of a fine-resolution global data set in a semiarid mesoscale river basin with a distributed biosphere hydrological model [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116(21). doi: 10.1029/2011JD015990
- Wu, G., Duan, A., Liu, Y., et al. 2015. Tibetan plateau climate dynamics: recent research progress and outlook [J]. *National Sci. Rev.*, 2(1): 100-116. doi:10.1093/nsr/nwu045
- 吴国雄, 何编, 刘屹岷, 等. 2016. 青藏高原和亚洲夏季风动力学研究的新进展[J]. *大气科学*, 40(1):22-32. Wu, G. X., Hu, B., Liu, Y. M., et al. 2016. Recent Progresses on Dynamics of the Tibetan Plateau and Asian Summer Monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (1): 22-32. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15129
- 徐祥德, 马耀明, 孙婵, 等. 2019. 青藏高原能量、水分循环影响效应[J]. *中国科学院院刊*, 034(011):1293-1305. Xu, X., Ma, Y., Sun, C., et al. 2019. Effect of Energy and Water Circulation over Tibetan Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (in Chinese)*, 2019, 034(011):1293-1305. doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.012
- Xu, S., Wu, C., Wang, L., et al. 2015. A new satellite-based monthly precipitation downscaling algorithm with non-stationary relationship between precipitation and land surface characteristics [J]. *Remote Sens. Environ.*, 162: 119–140. doi: 10.1016/j.rse.2015.02.024
- Xu, Z., Ma, Y., Liu, S., et al. 2017. Assessment of the energy balance closure under advective conditions and its impact using remote sensing data [J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 56(1): 127–140. doi:10.1175/JAMC-D-16-0096.1
- Yang, K., Koike, T., Fujii, H., et al. 2002. Improvement of surface flux parametrizations with a turbulence-related length [J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128(584), 2073–2088. doi: 10.1256/003590002320603548

- 
- Yang, K., Koike, T., Ishikawa, et al. 2008. Turbulent flux transfer over bare-soil surfaces: Characteristics and parameterization[J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47(1): 276–290. doi: 10.1175/2007JAMC1547.1
- Yang, X., Yong, B., Ren, L., et al. 2017. Multi-scale validation of GLEAM evapotranspiration products over China via China-Flux ET measurements [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 38(20): 5688–5709. doi: 10.1080/01431161.2017.1346400
- Yang, Y. X., Liu, Y. M., Li, M., et al. 2019. Assessment of reanalysis flux products based on eddy covariance observations over the Tibetan Plateau [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 138: 275-292. doi: 10.1007/s00704-019-02811-1
- Yuan, L., Ma, Y., Chen, X., et al. 2021. An Enhanced MOD16 Evapotranspiration Model for the Tibetan Plateau During the Unfrozen Season [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(7). doi: 10.1029/2020JD032787
- Zhang, K., Kimball, J. S., Running, S. W. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation [J]. *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, 3(6):834-853. doi:10.1002/wat2.1168
- Zhang, Y., Kong, D., Gan, et al. 2019. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017 [J]. *Remote Sens. Environ.*, 222: 165–182. doi: 10.1016/j.rse.2018.12.031
- Zhang, Y., Peña-Arancibia, J. L., McVicar, et al. 2016. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components [J]. *Sci. Rep.*, 6. doi: 10.1038/srep19124
- 郑度, 姚檀栋. 2004. 青藏高原形成演化及其环境资源效应研究进展[J]. *中国基础科学*, 6(002):17-23. Zheng, D., Yao, T. 2004. Progress in research on formation and evolution of Tibetan Plateau with its environment and resource effects [J]. *China Basic Science*, 2004, 6(002):17-23. <http://ir.itpcas.ac.cn/handle/131C11/936>