

青藏高原降水水汽来源模拟数据集 (1998–2018) 研发

张 弛

中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

摘 要: 青藏高原降水的水汽来源及输送机制一直是国际水文气候学界关注的热点问题。由于高原地面观测站数量有限, 且分布极不均匀, 导致整体降水误差很大, 从而造成降水溯源存在很大不确定性。本文通过引入卫星降水数据来弥补站点观测降水的不足, 从而可对高原整体降水的水汽来源进行更准确的评估。作者通过水汽追踪数值模型模拟约 20 年高原整体降水的水汽来源, 模型使用 ERA-Interim 再分析资料、TRMM 卫星降水和 GLDAS-OAFlux 蒸发作为数据驱动, 并设置对比实验进行验证, 生成高原整体降水的水汽来源月尺度数据。数据集内容包括: (1) 青藏高原范围; (2) 高原 1998–2018 年逐月降水水汽来源数据, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 单位: mm/month; (3) 高原逐年逐月降水量。数据集存储为 .nc、.shp 和 .xlsx 格式, 由 8 个数据文件组成, 数据量为 55 MB (压缩为 1 个文件, 40.9 MB)。

关键词: 青藏高原; 气候; 降水; 水汽来源

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.01.04>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2025.01.04>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.09.02.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.09.02.V1>.

1 前言

青藏高原是众多亚洲主要河流的发源地, 其降水构成了径流的主要来源^[1]。高原降水的水汽来源及输送机制长期以来一直是国际水文气候学界关注的焦点^[2,3]。然而, 由于高原地面观测站数量有限且分布极不均匀, 导致高原降水总量估算存在较大误差^[4]。这种不确定性不仅影响了降水量的准确评估, 更为水汽来源的追溯带来了挑战。

为解决高原降水观测站点稀少且分布不均的问题, 本研究引入了卫星降水数据产品 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 来弥补地表观测的不足。TRMM 降水数据在高原东部有密集地面观测站点的区域显示出与实测数据高度吻合的特性, 这一发现有力证实了其在整个高原地区的适用性^[4]。卫星降水产品的成功引入使得对高原整体降水进行全

收稿日期: 2024-09-14; 修订日期: 2024-11-17; 出版日期: 2025-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (U2243226); 中国科学院 (XDA2006040202)

*通讯作者: 张弛, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhangchi@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 张弛. 青藏高原降水水汽来源模拟数据集 (1998–2018) 研发[J]. 全球变化数据学报, 2025, 9(1): 30–35. <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.01.04>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.01.04>.

[2] 张弛, 汤秋鸿, 黄金川等. 青藏高原降水水汽来源模拟数据集 (1998–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.09.02.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.09.02.V1>.

面准确的溯源追踪成为可能。研究采用 ERA-Interim（ECMWF Re-Analysis-Interim）再分析资料、TRMM 卫星降水数据以及 GLDAS/OAFlux 蒸发数据作为输入数据，驱动水汽追踪数值模型模拟高原 1998–2018 年总降水的水汽来源，最终生成了高原降水水汽来源月尺度数据集。这一成果为准确评估高原总降水的水汽来源、季节变化和水汽输送机制提供了坚实的数据基础。

2 数据集元数据简介

《青藏高原降水水汽来源模拟数据集（1998–2018）》^[5]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《青藏高原降水水汽来源模拟数据集（1998–2018）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	青藏高原降水水汽来源模拟数据集（1998–2018）
数据集短名	MoistureSourceQZP_1998–2018
作者信息	张弛，中国科学院地理科学与资源研究所，zhangchi@igsnrr.ac.cn 汤秋鸿，中国科学院地理科学与资源研究所，tangqh@igsnrr.ac.cn 黄金川，中国科学院地理科学与资源研究所，huangjc@igsnrr.ac.cn 周园园，中国科学院地理科学与资源研究所，zhouyy@igsnrr.ac.cn Gaffney, Paul P. J., 中国科学院地理科学与资源研究所，gafppj@igsnrr.ac.cn 徐锡蒙，中国科学院地理科学与资源研究所，xuxm@igsnrr.ac.cn
地理区域	青藏高原
数据年代	1998–2018 年
时间分辨率	月
空间分辨率	1°×1°
数据格式	.nc、.xlsx、.shp
数据量	40.9 MB（压缩后）
数据集组成	青藏高原范围、高原逐年月尺度降水、高原逐月降水水汽来源数据
基金项目	中国科学院（XDA2006040202）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[6]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

3 数据研发方法

3.1 模型

本研究选择新一代欧拉式数值模型 WAM2Layers（Water Accounting Model-2layers）作

为主要工具,来追踪高原总降水的水汽来源。这一模型在原有 WAM 模型的基础上进行了显著优化,特别是引入了双层结构来细化垂直方向的模拟,这一设计有效克服了之前模型在风向垂直变化情况下的追踪误差,大幅提升了水汽动态追踪的准确性^[7,8]。模型主要方程为:

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} + \frac{\partial(W_l u)}{\partial x} + \frac{\partial(W_l v)}{\partial y} = E_l - P_l \pm F_v + \alpha_l \quad (1)$$

式中, W 表示大气可降水量 (mm), l 表示上或下气层, u, v 为水平风速 (m/s), E 为地表蒸发 (mm), P 为降水 (mm), F_v 表示层间垂直水分输送 (mm), α 为残差项。来自特定源区的水汽同样遵循类似大气水平平衡方程:

$$\frac{\partial W_{l,\Omega}}{\partial t} + \frac{\partial(W_{l,\Omega} u)}{\partial x} + \frac{\partial(W_{l,\Omega} v)}{\partial y} = E_{l,\Omega} - P_{l,\Omega} \pm F_{v,\Omega} + \alpha_{l,\Omega} \quad (2)$$

式中, Ω 表示来自特定源区的水汽 (mm)。

3.2 驱动数据

研究使用的大气数据为欧洲气象中心再分析资料 ERA-Interim^[9], 空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$, 包括 6 小时间隔的模式层纬向风、经向风和比湿, 6 小时间隔的地表大气压, 以及一系列垂直积分的水汽和通量变量。

降水选择经过地表观测站校准的 TRMM 研究产品 3B43 (V7)^[10], 该产品覆盖范围为全球 50°N – 50°S , 在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格上提供 1998 年至 2018 年的月度数据。对于陆表蒸发, 选择了全球陆面数据同化系统 (Global Land Data Assimilation System, GLDAS) 通用陆面模式 (Community Land Model, CLM) 提供的 3 小时 1° 网格蒸发产品^[11]。CLM 是一个经过严格评估的物理基础模型。其强迫数据, 包括降水、温度、辐射等, 都是观测数据。在海洋上, 采用了基于客观分析的海气通量产品 OAFlux (Objectively Analyzed Air-sea Fluxes)^[12], 时空分辨率为: 月度 $1^\circ \times 1^\circ$ 。OAFlux 产品自 1985 年以来已经同化了卫星数据。此外, ERA-Interim 中 3 小时一次的降水和蒸发数据也纳入进来, 以提供日内变化信息。

3.3 数据处理

除陆表 GLDAS 蒸发数据之外, 地表通量主要是月度数据。ERA-Interim 中的降水和蒸发因数值过大而不能直接使用^[13], 但它们包含了 3 小时尺度的日变化信息。为了保留 ERA-Interim 中的降水和蒸发这种日变化信息, 同时又符合观测数据, 我们使用月度观测降水和蒸发数据来重新校准 ERA-Interim 数据。具体步骤如下:

首先, 将 TRMM 降水数据转换为与 ERA-Interim 相同的空间分辨率, 方法是将落入 1° 网格的 0.25° 网格值进行积分。同时计算 ERA-Interim 的月度降水。以月度 TRMM 数据为基准, 计算每个网格和每个月份 TRMM 降水与 ERA-Interim 降水的比率。然后, 通过将每个月的比率乘以该月的 3 小时 ERA-Interim 降水数据, 对每个网格的 ERA-Interim 降水进行重新校准。

对于海洋上的蒸发, 首先将 1° 的 OAFlux 值线性转换到 ERA-Interim 的 1° 网格上。然后, 采用与 TRMM 类似的程序, 将 3 小时 ERA-Interim 蒸发场重新校准为 OAFlux 数据。在 OAFlux 数据缺失的网格上, 保留 ERA-Interim 的值; 在陆地上, 将 GLDAS 蒸发数据线

性插值到 ERA-Interim 的 1° 网格上。由于 GLDAS 蒸发数据已经是 3 小时分辨率，因此直接使用插值后的数据。

为了保证水汽追踪的数值稳定性，每组输入数据都被离散化为 15 分钟的时间步长。使用线性插值（状态变量）或等分方法（累积变量）将 6 小时或 3 小时数据转换为 15 分钟间隔。随着模型运转完毕，15 分钟时间尺度水汽贡献数据根据需要积分到指定时间尺度。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集共 8 个数据文件，包括青藏高原区位（.shp 格式），青藏高原 1998–2018 年逐月降水（mm/mon, .xlsx 格式），以及地表蒸发源对高原降水逐月水汽贡献（ $1^\circ \times 1^\circ$, mm/mon, .nc 格式）。

4.2 数据结果

青藏高原降水的水汽来源呈现显著的季节性变化（图 1）。冬季 1 月份，蒸发源的水汽贡献达到全年最低点，与之形成鲜明对比的是夏季 7 月份，此时蒸发源的水汽贡献攀升至年度峰值。值得注意的是，西风带在全年各个季节中都扮演着关键角色。即便在南亚季风主导的 7 月，西风带仍然是高原降水的重要水汽来源，凸显了其持续性影响。

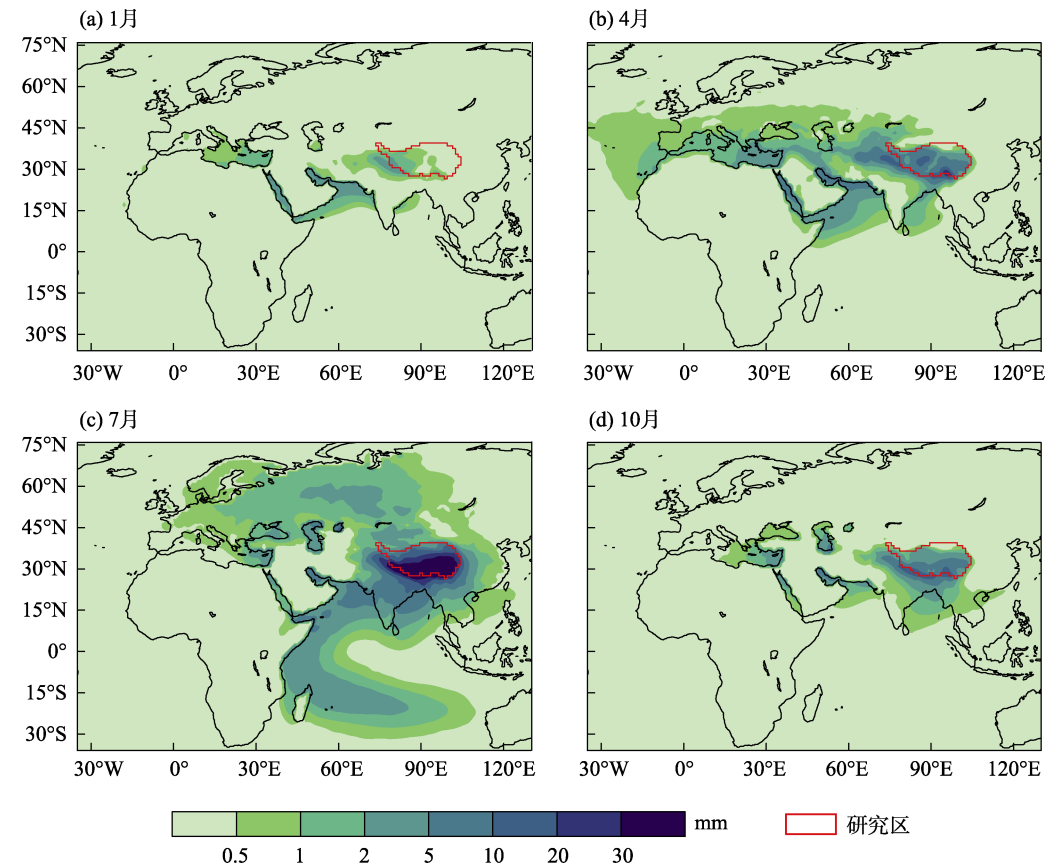


图 1 青藏高原降水水汽来源的平均季节变化图

春季 4 月份，高原降水的水汽贡献主要来自西风带，同时阿拉伯海和孟加拉湾也提供了可观的贡献。相比之下，秋季 10 月份的情况有所不同，高原降水的水汽主要源自南部孟加拉湾方向，其贡献甚至超过了阿拉伯海，这一现象反映了秋季高原以南环流模式的微妙变化。

7 月是高原总降水量最丰沛的月份，这是多重环流系统共同作用的结果。南亚季风的盛行将大量印度洋水汽输送至高原，同时，由于欧亚大陆地表湿润，西风也为青藏高原带来了可观的水汽贡献。此外，高原内部夏季对流活跃，内循环增强，本地蒸发对降水的贡献也是重要一环，在高原南部形成了一个显著的强贡献中心。

4.3 数据结果验证

作者使用气象局基于台站的降水产品 CMA (China Meteorological Administration) 和 TRMM 卫星降水数据进行对比 (图 2)，发现 1998–2017 年 CMA 所估算的高原整体平均年降水比 TRMM 估算的低约 12%，两者相关系数为 0.40。尽管其通过了 0.10 显著性检验 (未通过 0.05)，可以看出两者变化差异较大。为验证 TRMM 降水数据在青藏高原地区的适用性，作者选择了高原东部一个地表观测站密集的区域作为验证区，对比分析了地表观测降水与卫星反演降水数据之间的关系^[4]。结果发现，在 1998–2017 年，TRMM 数据显示高原东部年均降水量为 $676.6\pm40.4\text{ mm}$ ，这一数值约占实测降水量的 93%。更重要的是，TRMM 数据与实测数据在年际变化趋势上表现出高度一致性，两者之间的相关系数高达 0.92。这一结果有力地证实了 TRMM 数据在青藏高原复杂地形条件下的可用性，能在整个高原地区进行推广；而 CMA 降水产品则因观测站问题在高原上存在更多不确定性，需要谨慎使用。

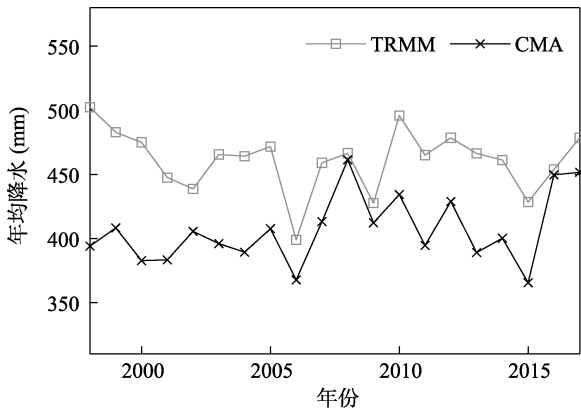


图 2 青藏高原遥感观测 (TRMM) 和地面观测站观测 (CMA) 降水数据对比图 (1998–2017)

5 讨论和总结

青藏高原降水的总量及其水汽来源长期以来是全球水文气候学界的研究焦点。然而，由于高原地面观测站稀疏且分布极不均匀，导致降水总量估算存在较大误差，进而为降水来源追溯带来更多不确定性。本研究通过引入卫星降水数据，充分利用其广覆盖的优势，在高原观测密集区进行验证，并将其推广至整个高原范围。这一方法有效解决了高原地表观测数据不足的问题，为降水水汽来源研究提供了更为可靠的数据来源。模型使用多源观

测数据作为驱动输入，包括 TRMM 降水、GLDAS/OAFlux 模型/遥感蒸散发数据和 ERA-Interim 再分析资料等，基于严格的物理过程和水量平衡方程，在 15 分钟时间尺度上进行计算，最终提供 $1^\circ \times 1^\circ$ 空间分辨率全球网格月尺度水汽贡献数据。年降水追踪比率高达 96.5%，可信度高。

对该数据集进行的季节变化分析表明，青藏高原降水的水汽来源呈现出显著的季节性变化特征。西风带的影响贯穿全年，而 7 月降水丰沛则是南亚季风、高原内部环流和西风带等多重环流系统共同作用的结果。这种复杂的水汽输送格局凸显了青藏高原独特的地理位置和地形特征在调节区域水循环中的关键作用，同时也突出了多尺度大气环流系统在塑造高原降水特征方面的协同效应。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Wang, T., Zhao, Y. T., Xu, C. Y., *et al.* Atmospheric dynamic constraints on Tibetan Plateau freshwater under Paris climate targets [J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(3): 219–225.
- [2] 周天军, 高晶, 赵寅等. 影响“亚洲水塔”的水汽输送过程[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1210–1219.
- [3] Yao, T. D., Masson-Delmotte, V., Gao, J., *et al.* A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(4): 525–548. <https://doi.org/10.1002/rog.20023>.
- [4] Zhang, C. Moisture source assessment and the varying characteristics for the Tibetan Plateau precipitation using TRMM [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104003.
- [5] 张弛, 汤秋鸿, 黄金川等. 青藏高原降水水汽来源模拟数据集(1998–2018)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.09.02.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.09.02.V1>.
- [6] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [7] van der Ent, R. J., Tuinenburg, O. A., Knoche, H. R., *et al.* Should we use a simple or complex model for moisture recycling and atmospheric moisture tracking? [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17: 4869–4884.
- [8] van der Ent, R. J., Wang-Erlandsson, L., Keys, P. W., *et al.* Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle—part 2: moisture recycling [J]. *Earth System Dynamics*, 2014, 5(2): 471–489.
- [9] Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137: 553–597.
- [10] Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., *et al.* The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(1): 38–55.
- [11] Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., *et al.* The global land data assimilation system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85: 381–394.
- [12] Yu, L., Weller, R. A. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(4): 527–540.
- [13] Zhang, C., Tang, Q. H., Chen, D. L. Recent changes in the moisture source of precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 1807–1819.