

# 青藏高原南北降水水汽来源模拟数据集 (1979–2016) 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:** 青藏高原巨大的地形地貌不仅影响着亚洲甚至全球气候, 同时自身也产生了显著的气候分异: 高原南部主要受季风影响, 形成温暖湿润的高原季风气候; 高原北部则主要受西风带影响, 形成寒冷干旱的高原大陆性气候。为了量化高原南北降水的水源差异并揭示其在气候变暖背景下的不同变化特征, 作者利用数值模型分别追踪了高原南部(30°N以南)和北部(35°N以北)约40年雨季(5–9月)和年降水水汽来源。本研究使用ERA-Interim再分析资料、CMA降水和GLDAS蒸发作为模型驱动, 并设置对比实验进行验证, 最终生成高原南北年降水和雨季降水来源数据。数据集内容包括:(1)高原南北区范围;(2)高原南北区1979–2016年逐年和雨季降水来源数据, 空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ (单位: mm);(3)高原南北1979–2016年区域平均年和雨季降水量数据。数据集存储为.nc、.shp和.xlsx格式, 由17个数据文件组成, 数据量为66.4 MB(压缩为1个文件, 53.7 MB)。

**关键词:** 青藏高原; 气候变化; 降水; 水汽来源

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.03.08>

**CSTR:** <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2024.03.08>

**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.2024.08.03.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.03.V1>.

## 1 前言

青藏高原在全球气候系统中的位置和作用举足轻重, 长期以来, 其环境变化引起了国际气候学界的广泛关注<sup>[1–3]</sup>。研究发现, 尽管青藏高原整体呈现湿润化趋势, 但降水变化呈现出显著区域性特征<sup>[4,5]</sup>。青藏高原北部和南部降水变化存在明显差异, 北部降水增加而南部降水减少<sup>[1,6]</sup>。姚檀栋等(2013)指出, 青藏高原北部(Northern Tibetan Plateau, 简称NTP, 北纬35°以北)主要受西风带影响, 而高原南部(Southern Tibetan Plateau, 简称STP, 北纬

收稿日期: 2024-05-20; 修订日期: 2024-08-26; 出版日期: 2024-09-25

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

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](mailto:zhangchi@igsnrr.ac.cn)

数据引用方式: [1] 张弛. 青藏高原南北降水水汽来源模拟数据集(1979–2016)研发[J]. 全球变化数据学报, 2024, 8(3): 311–317. <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.03.08>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2024.03.08>.

[2] 张弛, 汤秋鸿, 黄金川等. 青藏高原南北降水水汽来源模拟数据集(1979–2016)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.08.03.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.03.V1>.

30°以南)则主要受亚洲季风控制<sup>[7]</sup>。不同的环流系统为青藏高原各区带来不同来源的水汽,从而造成了降水的空间差异。

STP 和 NTP 降水趋势的差异可能意味着影响环流和水汽来源都发生了变化,为了揭示高原南北降水产生相反变化的原因,作者设置降水水汽追踪实验,利用数值模型分别追踪高原南部和北部 1979–2016 年雨季(5–9 月)和年降水水汽来源,生成高原南北年度和雨季近 40 年降水水汽来源数据,为量化高原环流的降水贡献,评估环流影响力的南北差异、年际波动和气候变化提供数据基础。

2 数据集元数据简介

《青藏高原南北降水水汽来源模拟数据集(1979–2016)》<sup>[8]</sup>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 《青藏高原南北降水水汽来源模拟数据集(1979–2016)》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	青藏高原南北降水水汽来源模拟数据集(1979–2016)
数据集短名	MoistureSourceNSPlateau
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 徐锡蒙, 中国科学院地理科学与资源研究所, xuxm@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 周园园, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhouyy@igsnrr.ac.cn
地理区域	青藏高原南北部
数据年代	1979–2016 年
时间分辨率	年、雨季(5–9 月)
空间分辨率	1°×1°
数据格式	.nc、.xlsx、.shp
数据量	53.7 MB(压缩后)
数据集组成	青藏高原南北区范围、高原南北区 1979–2016 年逐年和雨季降水来源数据、高原南北 1979–2016 年区域平均年和雨季降水量数据
基金项目	中国科学院(XDA2006040202); 国家自然科学基金(U2243226)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
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)摘自“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 <sup>[9]</sup>
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 数据来源

本研究降水数据采用中国气象局提供的基于地面观测的  $0.5^\circ$  网格月降水数据<sup>[10]</sup>。该网格数据产品源自 1961 年以来中国约 2,400 个国家级台站经过质量控制的实测数据, 采用薄板平滑样条法, 并考虑了地形效应进行格点插值。研究使用其中 1979–2016 年数据。

蒸发数据选自全球陆面数据同化系统 (GLDAS) 中通用陆面模式 (CLM) 所提供的 3 小时一次  $1^\circ$  格点大小蒸发数据<sup>[11]</sup>。1996 年的数据因错误降水存在一个可疑异常<sup>[12]</sup>, 建议排除 1996 年的蒸发和相关模拟结果数据。

大气数据选用了欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 再分析数据 ERA-Interim<sup>[13]</sup>, 其空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。ERA-Interim 提供了一系列数据, 包括 6 小时一次的模式层纬向风、经向风和比湿; 6 小时一次的地表气压和一组垂直积分的水分和通量变量 (垂直积分水、垂直积分的北向/东向水汽通量, 包括水汽、液态水和冰态水); 以及 3 小时频次的降水和蒸发数据。

#### 3.2 模型与实验设计

本研究采用 WAM2Layers (Water Accounting Model-2layers) 模型来追踪高原南北降水的水汽来源。WAM2Layers 是准三维欧拉式水汽追踪数值模型, 它在第一代二维模型 WAM 的基础上进行了重要改进。该模型在垂直方向上引入了分层 (两层) 结构, 有效解决了由风向垂直切变引起的追踪偏差问题。这一设计显著提高了水汽追踪的精确度和可靠性, 使得模型能够更加准确地模拟复杂大气环境中的水汽运动和分布<sup>[14,15]</sup>。模型主方程基于大气水平衡方程, 如式(1):

$$\frac{\partial W_{l,\Omega}}{\partial t} = -\frac{\partial(W_{l,\Omega}u)}{\partial x} - \frac{\partial(W_{l,\Omega}v)}{\partial y} + E_{l,\Omega} - P_{l,\Omega} \pm F_{V,\Omega} + \alpha_{l,\Omega} \quad (1)$$

式中,  $l$  表示上或下层气块,  $\Omega$  表示来自特定源区的水汽, 方程左侧表示大气可降水量( $W$ ) 随时间的变化, 右侧是由水平风( $u, v$ )引起的水汽辐合、地表蒸发( $E$ )提供的水分、降水( $P$ )造成的水分损失、层间垂直水分输送( $F_V$ )以及残差项( $\alpha$ )。模型水汽追踪算法在前期文献<sup>[16]</sup>中已有介绍, 此处从略。

本研究着重比较不同地表蒸发 ( $E$ ) 和降水 ( $P$ ) 通量对水汽追踪的影响。因此, 我们进行了两组使用不同  $E$  和  $P$  通量的实验。一组使用基于观测的数据, 即 CMA 降水和 GLDAS 蒸发。另一组使用 ERA-Interim 的  $E$  和  $P$ , 加上 ERA-Interim 大气数据, 形成了基于 ERA 的全套数据, 简称 ERA-Suite, 该套数据中水循环更加自洽。使用 ERA-Suite 的实验作为补充, 用于对比主实验, 确定结果的可靠性。

#### 3.3 数据预处理

在使用观测降水数据时, 研究采用 CMA 月降水数据来校准 3 小时频次的 ERA-Interim 降水数据, 以保留降水日变化信息, 同时确保其月值与 CMA 数据一致。具体步骤如下: 先将 CMA 降水数据转换为与 ERA-Interim 相同的空间分辨率, 方法是取落入  $1^\circ$  网格内的  $0.5^\circ$  网格的平均值。计算 ERA-Interim 的月降水量。以 CMA 月降水量为基准, 得出 ERA-Interim 的缩放比例。随后, 对月内所有 3 小时频次的 ERA-Interim 降水数据按同比例进行缩放。

由于 GLDAS 蒸发数据仅覆盖陆地，因此海洋区域的蒸发数据仍采用 ERA-Interim 数据。为了确保水分追溯过程中的数值稳定，模型所有输入数据都被离散化至 15 分钟时间步长。通过采用线性插值或等分方法，将 6 小时或 3 小时间隔的数据转换至 15 分钟间隔。

3.4 数据后处理

模拟结果为 15 分钟步长来自特定源区的水汽含量（即标记水汽）时空场数据，使用低层大气的标记水汽含量变量  $W_{\Omega,down}$ ，任一时间步长中的蒸发  $e$  中必有  $e \times r_{\Omega}$  的水汽最终会形成目标区的直接降水，通过公式表达如式(2)：

$$E_{con}(t,x,y)=E(t,x,y)\times\frac{W_{\Omega,down}(t,x,y)}{W_{down}(t,x,y)} \tag{2}$$

月尺度和区域尺度的水汽贡献量则分别通过时间积分和面积积分得到。

3.5 技术路线

综上，本数据集研发技术路线如图 1 所示。

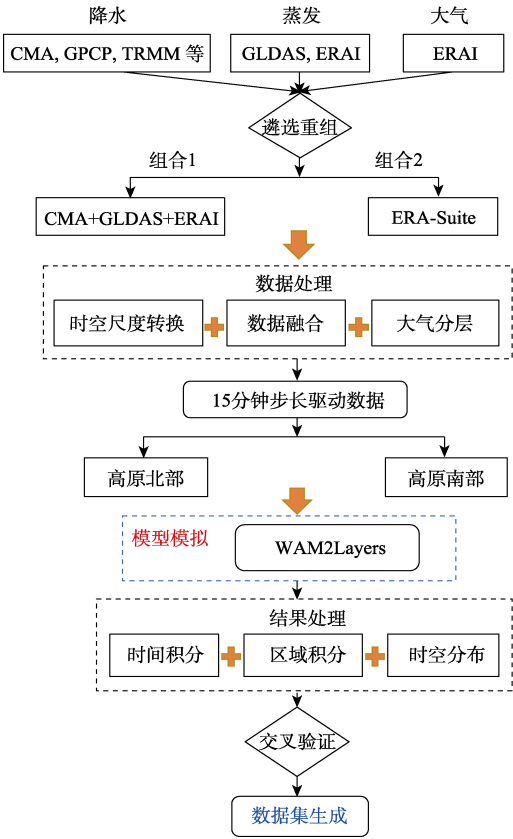


图 1 数据研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集共 17 个数据文件，包括青藏高原南北区域（.shp 格式），高原南北 1979–2016

年雨季和年降水(.xlsx 格式),以及高原南北每年雨季和年降水水汽来源( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,.nc 格式)。

4.2 数据结果

据统计,青藏高原雨季(5–9 月)降水占主导,高原南北雨季平均降水分别占年降水的 77.1%和 88.4%,高原南北年降水和雨季降水的水汽来源分布如图 2 所示。高原南北差异明显,北部高原降水主要来自高原西北西风带并贯穿欧亚大陆,南方水汽源的水汽贡献在相同强度下,面积偏少。南部高原的降水主要来自南方水汽源,包括中南半岛、阿拉伯海、孟加拉湾和热带印度洋中西部等;西风带区也有一定贡献,整体偏弱。高原之北的水汽对高原北部有较多贡献,却很难影响到高原南部;同理,热带印度洋的水汽也难以影响到高原北部。

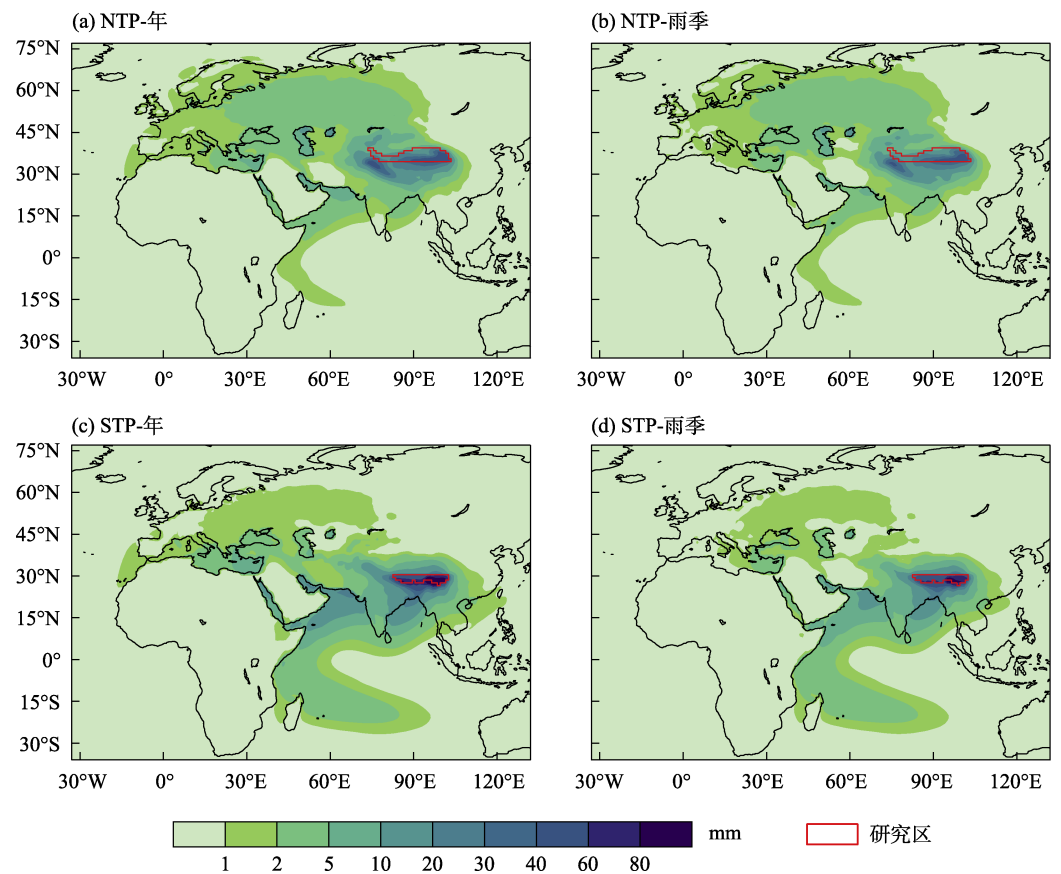


图 2 青藏高原北部(a,b)和南部(c,d)的年(a,c)和雨季(b,d)平均降水的水汽来源空间分布图

高原年降水和雨季降水水汽来源分布对比更显示出雨季降水的决定作用,以高原北部为例,年降水来源水汽分布在西印度洋上留下一条狭长的水汽贡献条带,这一条带正来自雨季水汽源对高原北部降水的贡献(图 2a 和 2b)。雨季开启,西南季风爆发,通过索马里急流将大量西印度洋的水汽输送到高原北部形成降水,从而留下显著印记。

高原南北呈现不同的降水变化趋势,从水汽来源角度看,北部降水增加主要由于高原和季风区水汽贡献增加所致;而高原南部降水水汽来源变化复杂,印度半岛和西风带对高

原南部水汽贡献的减少是高原南部降水减少的直接原因<sup>[17]</sup>。

### 4.3 数据结果验证

由于高原北部地面观测站数据稀少,北部降水数据存在较大不确定性。Zhang 等引入 TRMM 卫星降水产品 3B42 进一步对高原北部水汽来源进行追踪模拟<sup>[17]</sup>,结果显示在时间重叠区间(1998–2016年),尽管在某些局部区域的量值上存在一定差异,不同降水数据所形成的水汽来源及其变化趋势分布在空间结构上表现出高度相似性,这一发现表明基于 CMA 数据所得到的定性结论是可靠的。同时,相对于主实验,Zhang 还同步设计了对照组实验<sup>[17]</sup>,即使用全 ERA-Interim 资料进行高原南北水汽来源模拟。通过与主实验结果进行对比,量化了因输入数据不同而造成的结果不确定性,强化了主实验模拟结果和研究结论的可信度。

## 5 讨论和总结

青藏高原南北区域受不同环流系统控制,呈现出截然不同的降水变化特征:北部降水显著增加,而南部则呈现微弱下降趋势。本研究采用数值模型 WAM2Layers,以中国气象局降水产品、GLDAS 模型蒸发数据和 ERA-Interim 大气再分析资料作为驱动数据,追踪了高原南北区域降水的水汽来源,进而构建了青藏高原南北降水水汽来源模拟数据集。该数据集空间分辨率  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ,时间区间 1979–2016 年,包含年降水和雨季降水的水汽来源分布。通过对比实验和降水附加实验,该数据集的可靠性得到了充分验证。

初步分析结果显示,青藏高原降水来源呈现明显的季节特性和区域差异,雨季降水在降水量和水汽来源方面起着决定性作用。这种复杂的降水模式反映了青藏高原独特的地理和大气环流特征。基于该数据成果,未来研究方向可包括:深入分析不同环流变化对降水的影响;探讨降水极端年份的水汽来源差异;研究高原南北降水系统的协同和异步关系等。这些研究将有助于进一步揭示青藏高原降水变化机制和水汽输送过程,为理解该地区水循环提供重要科学依据。

**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] 陈德亮,徐柏青,姚檀栋等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去,现在与未来[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3025–3035.
- [2] Yao, T. D., Thompson, L., Yang, W., *et al.* Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663–667.
- [3] Klein, J. A., Hopping, K. A., Yeh, E. T., *et al.* Unexpected climate impacts on the Tibetan Plateau: local and scientific knowledge in findings of delayed summer [J]. *Global Environmental Change*, 2014(28): 141–152.
- [4] Yang, K., Ye, B., Zhou, D., *et al.* Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau [J]. *Climatic change*, 2011(109): 517–534.
- [5] Gao, Y., Cuo, L., Zhang, Y. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979–2011 and possible mechanisms [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(5): 1876–1893.

- [6] Jiang, J., Zhou, T., Qian, Y., *et al.* Precipitation regime changes in High Mountain Asia driven by cleaner air [J]. *Nature*, 2023, 623(7987): 544–549.
- [7] 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.
- [8] 张弛, 汤秋鸿, 黄金川等. 青藏高原南北降水水汽来源模拟数据集(1979–2016) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.08.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.03.V1>.
- [9] 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).
- [10] 赵煜飞, 朱江, 许艳. 近 50a 中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 414–420.
- [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] Zhou, X., Zhang, Y., Yang, Y., *et al.* Evaluation of anomalies in GLDAS–1996 dataset [J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(8): 1718–1727.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张弛. 长江中下游地区梅雨季降水水汽来源模拟数据集(26.5°N–33.5°N, 104.5°E–122.5°E, 1991–2020)研发[J]. 全球变化数据学报, 2024, 8(2): 171–177. <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.02.07>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.02.07>.
- [17] Zhang, C., Tang, Q. H., Chen, D. L., *et al.* Moisture source changes contributed to different precipitation changes over the northern and southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(2): 217–229.