

青藏高原边界和中心五格点降水来源模拟数据集研发

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: 青藏高原气候受西风环流、季风系统和局地环流 3 大主要环流系统影响, 然而这些环流对高原不同区域的影响程度不同, 从而形成了特定的降水分布格局。为在更精细空间上揭示环流系统对青藏高原降水的影响演变, 作者在高原布设不同研究点, 于高原四周东、西、南、北和中间分别选取一个格点, 组建分布格网, 在格点尺度上进行降水溯源模拟。模型使用 ERA5 再分析资料、GPCP 降水和 GLEAM 蒸发作为驱动数据, 通过设置对比实验进行验证, 最终生成高原东西南北中五格点的降水来源月尺度数据。数据集内容包括: (1) 研究格点位置; (2) 高原各格点 2011–2020 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/mon; (3) 高原各格点 2011–2020 年逐月降水数据, 单位: mm/mon。数据集存储为 .nc、.tif 和 .xlsx 格式, 由 7 个数据文件组成, 数据量为 131 MB (压缩为 1 个文件, 98.8 MB)。

关键词: 青藏高原; 降水; 环流影响力; 水汽来源

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.02.07>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2025.02.07>

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.2024.09.03.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.09.03.V1>.

1 前言

青藏高原的降水主要受 3 种环流系统的影响, 即西风带、季风系统和局地环流模式^[1,2]。这些系统在高原的不同区域呈现出显著的空间异质性, 不仅主导系统各异, 单一环流的影响强度也存在明显的地域差异^[3,4]。现有研究已经确立了西风带对青藏高原北部的主导作用, 以及季风系统对南部地区的控制^[4,5]。然而, 在西风、季风和局地环流系统深度交织的过渡带, 环流系统对降水的调制机制以及其空间演变特征仍是一个亟待解决的科学问题, 当前高原水汽来源的研究缺乏对青藏高原全域降水水汽来源的系统性分析。

青藏高原按 $1^\circ \times 1^\circ$ 大小填充共需 258 个格点, 若是逐个格点计算分析高原降水水汽来源, 势必消耗过于庞大的计算和存储资源, 且同一水文气候区的不同格点水汽来源和环流

收稿日期: 2024-08-24; 修订日期: 2024-11-28; 出版日期: 2025-06-25

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@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 张弛. 青藏高原边界和中心五格点降水来源模拟数据集研发[J]. 全球变化数据学报, 2025, 9(2): 196–202. <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.02.07>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2025.02.07>.

[2] 张弛, 张旭, 汤秋鸿等. 青藏高原边界和中心五格点降水来源模拟数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.09.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.09.03.V1>.

影响类似，逐格点的降水溯源计算则完全没有必要。为了简单而有效地刻画高原水汽来源的空间差异，揭示相关环流在高原上空的空间演变，作者以高原中心（33°N，92°E）为中心点，沿纬向和经向分别选取高原极东、极西、极北和极南 4 个边界格点，与中心格点共同组成一组格网，其纬向的三格点，极西-中心-极东，可以观察西风带由西到东对高原降水的影响变化；其经向的三格点，极南-中心-极北，可观察南亚季风在高原南北方向上的演进。对高原 5 个代表位置的关键格点，使用 ERA5 大气再分析资料、GPCP（Global Precipitation Climatology Project）降水和 GLEAM（Global Land Evaporation Amsterdam Model）蒸发作为驱动数据，利用数值模型追踪其降水水汽来源。同时为确保结果的可靠性和准确性，作者另外设计了对比实验进行验证^[6]，最终生成高原东西南北中五格点 2011–2020 年的降水来源月尺度数据。该数据集为揭示环流系统的空间演变规律以及勾勒不同环流系统在高原的主导影响区域提供了科学依据。

2 数据集元数据简介

《青藏高原边界和中心五格点降水来源模拟数据集》^[7]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。

3 数据研发方法

3.1 模型

本研究使用欧拉式数值模型 WAM2Layers（Water Accounting Model-2layers）来追踪高原格点降水的水汽来源。这一模型在大气垂直方向上分为上下两个高度层，这一设计有效克服了之前 WAM 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^[9,10]。研究使用 WAM2Layers 模型的扩展版本，处理 ERA5 资料的气压层数据^[11,12]。模型基本方程为：

$$\frac{\partial W_k}{\partial t} + \frac{\partial(W_k u)}{\partial x} + \frac{\partial(W_k v)}{\partial y} = E_k - P_k \pm F_V + \alpha_k \quad (1)$$

式中， W 为大气可降水量（mm）， k 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 Ω 的水汽同样遵循类似大气水平平衡方程：

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

3.2 驱动数据及处理

模型驱动数据分为大气数据和地表通量数据。大气数据使用欧洲气象中心新一代再分析资料 ERA5^[13]，其包括全球 200–1,000 hPa 共 23 个气压层逐小时风速、大气湿度，逐小时地表大气压、大气可降水、水平水汽通量；空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。这些数据被用于计算式 1 中的变量，如大气上下层的可降水量和水汽通量，以及两层之间的垂直水汽输送。所有的小时变量都通过线性插值或等分方法被转换为 15 分钟间隔，以作为模型输入。

表1 《青藏高原边界和中心五格点降水来源模拟数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	青藏高原边界和中心五格点降水来源模拟数据集
数据集短名	MoistureSource5GridCellsQZP
作者信息	张弛, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhangchi@igsnr.ac.cn 张旭, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhangxu246810@126.com 汤秋鸿, 中国科学院地理科学与资源研究所, tangqh@igsnr.ac.cn 黄金川, 中国科学院地理科学与资源研究所, huangjc@igsnr.ac.cn 周园园, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhouyy@igsnr.ac.cn Gaffney, Paul P. J., 中国科学院地理科学与资源研究所, gafppj@igsnr.ac.cn 徐锡蒙, 中国科学院地理科学与资源研究所, xuxm@igsnr.ac.cn
地理区域	青藏高原
数据年代	2011–2020
时间分辨率	月
空间分辨率	1°×1°
数据格式	.nc、.tif、.xlsx
数据量	98.8 MB (压缩后)
数据集组成	青藏高原5格点位置, 高原5格点近十年月降水, 高原5格点月度降水水汽来源
基金项目	国家自然科学基金(U2243226); 国家留学基金委(202310490002)
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 ^[8]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

由于ERA5在青藏高原地区的蒸发和降水通量完全依赖模型输出, 未同化任何观测资料^[13], 其数据存在较大不确定性。鉴于此, 本研究采用了基于遥感的全球陆地蒸发产品GLEAM(v3.5a)^[14]和全球降水产品GPCP1DD(v1.3)^[15]来改进数据质量。GLEAM提供月尺度数据, 空间分辨率为0.25°×0.25°; GPCP1DD提供日尺度数据, 空间分辨率为1°×1°。为了与ERA5空间格网保持一致, 作者通过双线性插值等方法将GLEAM和GPCP数据重新采样至ERA5空间分辨率。随后计算了2011–2020年期间每个网格点的月度比率序列, 即将GLEAM和GPCP的月值除以相应的ERA5月值。利用这些比率, 作者对ERA5的逐小时蒸发和降水数据进行了校正, 创建了一个新的高时间分辨率数据集。最后, 为满足模型输入需求, 我们将校正后的逐小时数据通过等分方法转换为15分钟间隔的时间序列。

3.3 模拟数据处理

数值实验结束后, 需对模拟数据进行处理。实验输出的是任一时间步长和格点气柱的标记水汽含量 $W_{k,\Omega}$, 对于下层大气, 该时间步长的蒸发 e 中必有 $e \times r$ 的水汽最终会形成目标区的直接降水, 通过公式表达如下:

$$E_{con}(t, x, y) = E(t, x, y) \times \frac{W_{r_down}(t, x, y)}{W_{down}(t, x, y)} \quad (3)$$

式中, W_{r_down}/W_{down} 即表示低层大气中的标记水汽含量占比 r 。通过对所有的 $e \times r$ 积分求和便得到格点尺度蒸发源在月尺度对高原研究区降水的水汽贡献:

$$E_{con}(x, y) = \int_{t_1}^{t_2} E_{con}(t, x, y) dt \quad (4)$$

式中, E_{con} 单位为 m^3/mon , 鉴于本研究是溯源格点尺度的降水水汽来源, 故数据集的降水水汽来源单位均转换为研究格点的降水通量单位, 即 mm/mon 。由于不同格点的降水量存在巨大差异, 如高原南北格点年降水量对比为 $978 \text{ mm} : 63 \text{ mm}$, 在直接展现水汽来源数值结果时会存在图例设置尺度问题, 故将其进行标准化(式 5), 转换为不同格点水汽贡献对所有格点水汽贡献的百分比, 以突出不同源区的相对作用。

$$Ratio(x, y) = \frac{E_{con}(x, y)}{\sum_{x=1}^{360} \sum_{y=-90}^{90} E_{con}(x, y)} \times 100 \quad (5)$$

4 数据结果

4.1 数据集组成

《青藏高原边界和中心五格点降水来源模拟数据集》共含 7 个数据文件, 包括青藏高原各格点位置 (.tif 格式), 高原各格点 2011–2020 年逐月降水 (mm/mon , .xlsx 格式), 以及地表蒸发源对高原各格点降水逐月的水汽贡献 ($1^\circ \times 1^\circ$, mm/mon , .nc 格式)。

4.2 数据结果

高原边界格点多年平均月降水变化(如图 1 所示)揭示了高原降水在边界位置环境下的独特特征。分析表明, 高原 4 个区域均呈现显著的季节性变化, 但各区域又具有其特殊性。南北区域最符合“雨热同季”的特征, 即夏季降水最多, 冬季降水最少。这种模式反映了季风气候的典型特征, 不仅暗示南亚季风系统对这些区域有重大影响, 同时也引发了一个值得深入探讨的问题: 南亚季风是否有可能跨越高原, 影响到如此北部的地区。

东部区域月降水呈现双峰特征, 分别出现在 7 月和 9 月, 且 9 月降水量超过 7 月。这一现象暗示了除南亚季风外, 可能还有其他天气系统在南亚季风 8 月退去后影响高原东部。这可能与东亚季风或热带气旋系统有关, 值得进一步研究。

西部区域同样呈现双峰特征, 但峰值出现在 2 月和 7 月。这一独特模式揭示了两个截然不同的系统主导该区域的降水: 冬季以西风带为主, 夏季则受南亚季风影响。横向对比可发现极西地区 2 月降水显著高于其它区域, 这一现象可能与地形因素密切相关。西风带气流在遭遇青藏高原这一巨大地形障碍时, 被迫沿迎风坡爬升, 促进了水汽的凝结过程, 从而为该区域带来丰沛的雨雪。这一机制突出了高原地形在调节区域降水分布中的关键作用。

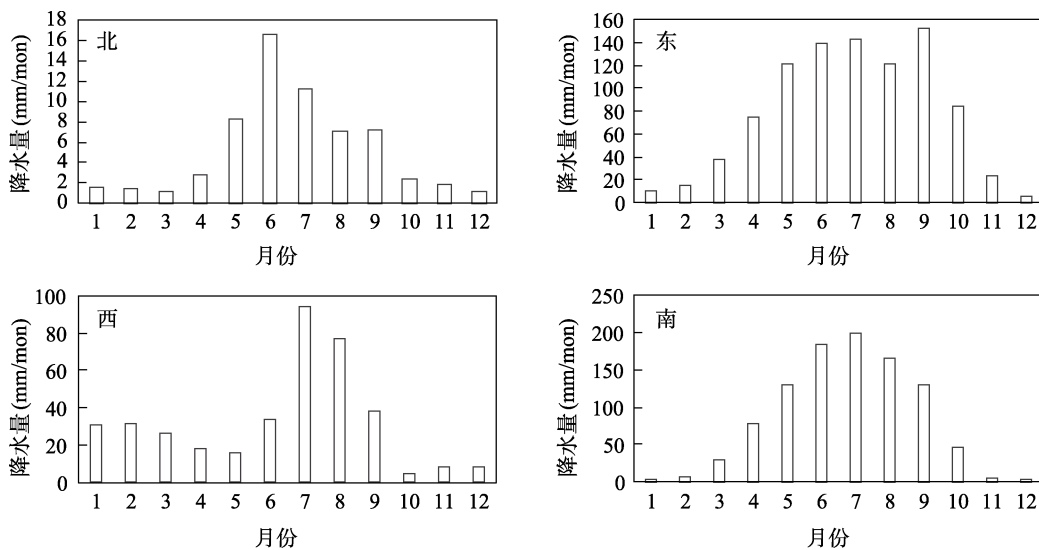


图1 青藏高原边界格点 2011–2020 年平均月降水

高原边界格点降水特征分析显示, 7 月是高原降水的显著高峰期, 为研究全球蒸发源对高原各地降水的水汽输送和水分贡献提供了理想的时间窗口。图 2 呈现了各边界格点标准化后的水汽来源分布, 揭示了高原 4 边界格点降水水汽来源的显著差异性。

(1) 高原极南格点: 南亚季风的影响在此区域最为突出。水汽来源呈现出一条从孟加拉湾经阿拉伯海延伸至印度洋西部边缘的明显带状分布, 这与之前的高原南部水汽来源分布特征表现一致^[16]。

(2) 高原极北格点: 降水水汽主要源自高原西北部和天山区域, 呈现出与极南格点截然不同的模式。高原以南季风水汽对此区域的贡献微乎其微, 表明该区域的降水机制基本受控于西风带环流, 而非季风系统。Zhang 等研究高原北部 (35°N 以北) 水汽来源时发现季风区尽管贡献较低, 但仍是一重要水汽源区^[16]。本研究则进一步表明, 高原格点越靠北, 季风系统的影响越弱, 直至到高原最北部, 影响可以忽略。

(3) 高原极东格点: 位于高原西风带的下游, 其水汽来源呈现出复杂的双重特征。一方面, 高原东部地区对该格点有显著贡献, 反映了局地水汽循环的重要性; 另一方面, 随着东亚季风的盛行, 高原东南方的蒸发水汽也通过东亚季风输送系统到达该区域, 形成另一个重要的水汽来源。这种复合模式揭示了该区域水汽输送的多元化特征。

(4) 高原极西格点: 降水水汽来源相对集中, 主要分布在高原西部区域。然而, 远端水体如阿拉伯海和里海等也对该格点的降水形成有一定贡献。这种分布模式反映了西风带输送和局地水汽循环的共同作用, 同时也暗示了远距离水汽输送在该区域降水形成中的潜在重要性。

5 讨论和总结

青藏高原降水的影响环流在广阔高原上存在着空间变异, 为揭示不同环流系统在高原影响力的空间演变, 作者在高原四周和中间分别选取代表性研究格点, 组建分布格网,

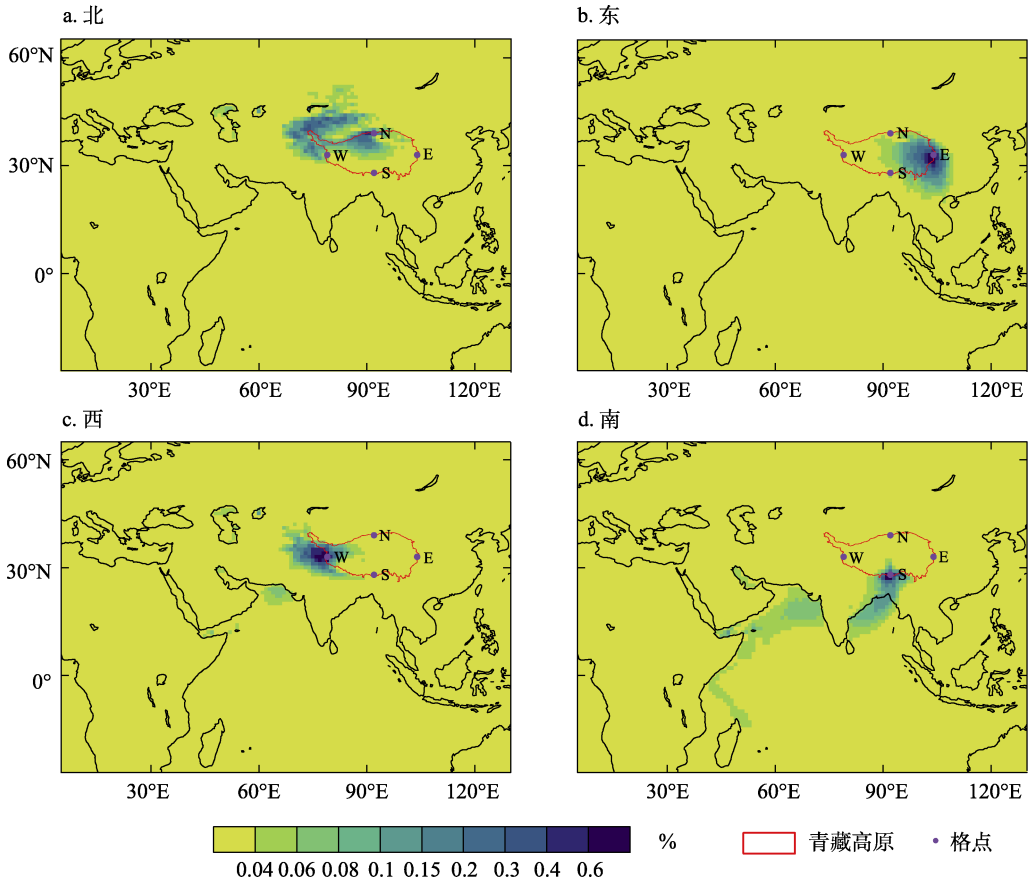


图 2 地表蒸发源 7 月份对青藏高原边界格点降水的平均水汽贡献分布图（已标准化）

在格点尺度上进行降水溯源。研究使用 ERA5 再分析资料、GPCP 降水和 GLEAM 蒸发作为模型主要驱动数据，设计并执行了系列对比实验，确保了模型结果的可靠性和准确性^[6]。研发出的青藏高原东西南北中五格点的降水水汽来源月尺度数据，为科学评估不同环流系统在青藏高原各区域的演变过程提供了坚实的基础。

通过对数据的初步分析，我们发现高原边界降水不仅反映了大尺度大气环流系统（如季风、西风带）的影响，还凸显了地形在塑造局地气候特征中的重要作用，如迎风坡在冬季会迎来更多的雨雪。高原每个区域的水汽来源分布都有其独特性，东部和南部明显受到季风系统影响，而北部和西部则更多地受西风环流影响。高原不同边界格点的水汽来源分布特征不仅反映了大尺度大气环流系统的差异化影响，还体现了地形和局地水循环在塑造区域降水特征中的复杂相互作用。这些发现为深入理解青藏高原水循环过程、评估气候变化影响以及制定区域水资源管理策略提供了重要的科学依据。未来研究可进一步探讨这些水汽输送模式的季节性变化及其对高原生态系统和水资源可持续性的长期影响。

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] Zhang, C. Moisture source assessment and the varying characteristics for the Tibetan Plateau precipitation using TRMM [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104003.
- [2] Zhao, Y., Zhou, T. Interannual variability of precipitation recycle ratio over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(2): e2020JD033733.
- [3] Chen, B., Zhang, W., Yang, S., *et al.* Identifying and contrasting the sources of the water vapor reaching the subregions of the Tibetan Plateau during the wet season [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 6891–6907.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Zhang, C., Zhang, X., Tang, Q. H., *et al.* Quantifying precipitation moisture contributed by different atmospheric circulations across the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 628: 130517.
- [7] 张弛, 张旭, 汤秋鸿等. 青藏高原边界和中心五格点降水来源模拟数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.09.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.09.03.V1>.
- [8] 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).
- [9] 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.
- [10] 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(12): 4869–4884.
- [11] Liu, Y., Garcia, M., Zhang, C., *et al.* Recent decrease in summer precipitation over the Iberian Peninsula closely links to reduction in local moisture recycling [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(8): 1925–1936.
- [12] Zhang, C., Chen, D. L., Tang, Q. H., *et al.* Fate and changes in moisture evaporated from the Tibetan Plateau (2000–2020) [J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(11): e2022WR034165.
- [13] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., *et al.* The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999–2049.
- [14] 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(5): 1903–1925.
- [15] Huffman, G. J., Adler, R. F., Morrissey, M. M., *et al.* Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations [J]. *Journal of hydrometeorology*, 2001, 2(1): 36–50.
- [16] 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.