

# 青藏高原降水增加区水汽来源模拟数据集 (1979–2013) 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:** 青藏高原的气候变化吸引着全球科学家的兴趣, 1979–2013 年高原降水呈现逐渐增加的趋势, 尤其在高原中西部。尽管在该区域降水台站数据稀少, 但模拟数据、卫星数据和间接观测资料 (如湖泊面积、森林变绿等) 均表明降水增加是客观存在的, 那高原不断增加的降水来自哪儿? 作者通过降水趋势分析首先确定降水显著增加的区域 (面积约  $84.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ), 通过数值模型追踪该区域降水的水汽来源。模型使用 ERA-Interim 再分析资料、中国气象局降水产品和 GLDAS (Global Land Data Assimilation Systems) 蒸发作为数据驱动, 并设置对比实验进行验证, 最终生成高原降水增加区域年和雨季月尺度水汽来源数据。该数据集内容包括: (1) 研究区地理范围; (2) 逐年和雨季月尺度水汽来源数据, 空间分辨率为  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ ; (3) 1979–2013 年降水量和雨季月降水量数据。数据集存储为.shp、.nc 和.xlsx 格式, 由 13 个数据文件组成, 数据量为 46.5 MB (压缩为 1 个文件, 16.9 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.2024.04.07>

**CSTR:** <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2024.04.07>

**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.2024.08.02.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.02.V1>.

## 1 前言

青藏高原被誉为世界“第三极”, 对东亚和北半球气候都有重要影响。青藏高原的环境变化也引起了许多科学家的关注<sup>[1–3]</sup>。现有研究表明, 在过去几十年里, 青藏高原经历了快速升温 and 整体变湿<sup>[3]</sup>。尽管青藏高原的降水变化在空间和时间上表现出较大的变异性, 但各种来源的地表观测资料 (台站降水, 湖泊扩张、森林变绿等) 和卫星数据均支持高原降水整体呈增加趋势的结论<sup>[1,4,5]</sup>。

收稿日期: 2024-08-30; 修订日期: 2024-10-24; 出版日期: 2024-12-24

基金项目: 国家自然科学基金 (U2243226)

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

数据引用方式: [1] 张弛. 青藏高原降水增加区水汽来源模拟数据集 (1979–2013) 研发[J]. 全球变化数据学报, 2024, 8(4): 407–413. <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.04.07>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2024.04.07>.

[2] 张弛, 汤秋鸿, 黄金川等. 青藏高原降水增加区水汽来源模拟数据集 (1979–2013) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.08.02.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.02.V1>.

一般而言,降水包含三个不可或缺的条件:水汽来源(地表蒸发)、输送路径和大气抬升运动<sup>[6]</sup>。其中,最令人困惑的是产生降水的水汽来源<sup>[7]</sup>。青藏高原降水的增加表明有更多的蒸发水汽参与降水形成,从而导致了降水量的增加。这些水汽可能来自青藏高原内部(如冰川消融,蒸发增强,导致水文内循环增强)<sup>[8]</sup>,也可能来自高原外部(如南亚季风增强,从而将湿润的印度洋水汽输送到高原)<sup>[9]</sup>,或者两者兼有。从降水水汽来源的角度分析高原降水的变化,可以进一步揭示高原水文内部循环和大尺度环流系统变化的影响机理。基于此,本研究利用欧拉式水汽追踪数值模型 WAM2Layers 追溯 1979–2013 年青藏高原降水水汽来源,生成高原降水显著增加区域年和雨季月尺度水汽来源数据,为研究高原降水变化机制提供数据基础。

## 2 数据集元数据简介

《青藏高原降水增加区水汽来源模拟数据集(1979–2013)》<sup>[10]</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。

## 3 数据研发方法

### 3.1 模型及算法

本研究使用 WAM (Water Accounting Model)<sup>[12,13]</sup>来追踪高原降水的水汽来源。WAM 是一种基于欧拉坐标系的水汽追踪数值模型,不仅能前向追踪水汽去向,而且能后向追踪水汽来源,其基本方程为大气水平平衡方程:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial(Wu)}{\partial x} + \frac{\partial(Wv)}{\partial y} = E - P + \alpha \quad (1)$$

式中,  $W$  代表垂直气柱中的可降水量;  $u$  和  $v$  分别代表水汽质量加权的纬向( $x$ )和经向( $y$ )风速;  $E$  是蒸发量;  $P$  是降水量;  $\alpha$  是残差项,因为在使用同化数据或多源数据时水量平衡方程通常不能完全闭合,需要该项来平衡方程。同理,来自特定源区的水汽满足同样的大气水平平衡方程:

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

式中,下标  $\Omega$  表示来自特定源区的水汽。

由方程可以看出 WAM 是单层二维模型,其水汽追踪算法如下:考虑降水的逆过程,即目标区(高原中西部)在特定时间段的降水  $P_0$  作为标记水汽重新返回大气,并逆着时间轴和水汽输送方向回流至最初地表蒸发源的过程。 $P_0$  进入大气时遵循充分混合假设,即标记水汽与当时的气柱总水汽量充分混合。然后标记水汽通过水平水汽输送不断进入周边格点,并再次与所在气柱的水汽充分混合。在特定时间点,如在格点 A 处有一蒸发为  $e$ ,此时该气柱标记水汽占总水汽的比例为  $r$ ,此即意味着 A 点进入大气的蒸发水汽  $e$  中必然有  $e \times r$  的水汽最终会形成目标区的直接降水,这部分水汽便被识别为格点 A 对目标区的直接

表 1 《青藏高原降水增加区水汽来源模拟数据集（1979–2013）数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	青藏高原降水增加区水汽来源模拟数据集（1979–2013）
数据集短名	MoistureSource_IPTP
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.09b@igsnrr.ac.cn
地理区域	青藏高原中西部
数据年代	1979–2013 年
时间分辨率	年、月
空间分辨率	1.5°×1.5°
数据格式	.nc、.xlsx、.shp
数据量	16.9 MB（压缩后）
数据集组成	研究区地理范围及逐年降水量和雨季月降水量、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 <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 <sup>[11]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

降水贡献，被成功溯源，而 A 点气柱标记水汽则需要减去这部分水汽，继续其“再循环”过程，直至所有标记水汽接近全部被溯源为止。

3.2 模型驱动数据

模型驱动数据分两大类，分别为大气数据和地表通量数据。大气数据采用欧洲气象中心再分析资料 ERA-Interim<sup>[14]</sup>，空间分辨率 1.5°×1.5°，其包括全球 200–1,000 hPa 共 23 个气压层每隔 6 小时经纬向风速和大气湿度，地表大气压。大气可降水  $W$  和水平水汽通量  $Q$  数据，通过如下公式计算得到：

$$W = -\frac{1}{g} \int_{p_{surf}}^{200hPa} q dp \tag{3}$$

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{p_{surf}}^{200hPa} q \bar{v} dp \tag{4}$$

式中， $g$  是重力加速度， $q$  是比湿， $\bar{v}$  是水平风向量， $p$  是大气压。

地表数据包括地表蒸散发和降水, 陆地蒸散发使用 GLDAS 陆面模式 CLM (Community Land Model) 的输出数据, 该数据时间尺度为 3 小时, 空间分辨率  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 在高原经过严格评估<sup>[15]</sup>。海洋蒸发使用 ERA-Interim 模型数据, 时空分辨率为 3 小时,  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 。

高原降水采用中国气象局国家气象信息中心降水产品——中国地面降水日值  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  格点数据集 (V2.0)<sup>[16]</sup>。该数据集源自 1961 年以来我国 2,472 个国家级地面气象站经过质量控制的日降水量站点记录, 采用薄板平滑样条法进行格点插值, 考虑了海拔高度的影响, 在我国被广泛使用。研究以气象局降水数据为基准, 先将其进行空间升尺度至  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  格点, 然后在月尺度上与 ERA-Interim 降水进行对比, 得到校正参数后对 ERA-Interim3h 降水数据进行放缩。所有驱动数据均需通过时间平均和时空线性插值等方法统一到半小时、 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  的时空分辨率。

### 3.3 模拟实验说明

研究分别追踪了青藏高原降水显著增加区 1979–2013 年年降水和雨季月降水的水汽来源。年尺度水汽追踪实验从每年最后一日 12 月 31 日起, 一直追踪到年初 1 月 1 日止, 依次追踪 35 年。雨季定义为每年的 5–9 月, 逐月追踪; 因为月尺度的降水可能来源于前一个月的地表蒸发, 实验由此向前多追溯了一个月, 以确保绝大多数的降水水汽能被追踪到。年降水水汽追踪同样面临 1 月份的降水来自上一年 12 月地表蒸发的问题, 然而因为 1 月份的降水量很小, 对年尺度的降水影响微弱, 故而无需进行额外追踪<sup>[9]</sup>。

## 4 数据结果与验证

### 4.1 数据集组成

数据集由 13 个数据文件组成, 内容包括: (1) 研究区地理范围 (.shp 格式); (2) 研究区 1979–2013 年降水量和雨季月降水量数据 (.xlsx 格式); (3) 1979–2013 年逐年和雨季月尺度水汽来源模拟数据, 空间分辨率为  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  (.nc 格式)。

### 4.2 数据结果

作者团队 (2017) 通过对气象局降水数据进行线性趋势分析, 确定了高原中西部区域在 1979–2013 年期间降水上升幅度最为显著 (图 1 红框)<sup>[9]</sup>。对高原降水增加区域进行降水溯源, 能有效代表高原整体变湿的水汽来源状况, 进而从水汽来源变化的视角, 对高原变湿趋势进行剖析与归因。高原中西部雨季 (5–9 月) 降水约占年降水的 90.6%, 雨季降水基本代表了年降水。年降水和雨季降水的水汽来源平均分布如图 1 所示, 两者空间格局类似, 西北部水汽源主要来自欧亚大陆, 西部水汽源主要来自地中海-黑海-里海和两湾海域, 南部则主要来自印度洋方向, 通过印度季风输送到高原。同时也可以观察到高原中西部及其临近区域是水汽贡献强度很大的水汽源, 是降水的一个重要源区。

从 1979–2013 年中选择最干旱和最湿润年份为典型年 (分别是 1984 年 219 mm 和 2008 年 420 mm) 的降水水汽来源进行展示 (图 2), 比较可见, 最湿年和最干旱水汽贡献在欧亚大陆源区主要体现在分布格局的差异, 但在该区并没有明显的强度差异; 水汽贡献的量级差异主要体现在高原研究区及其以南至西印度洋区, 这两区域水汽贡献的显著差异造成了目

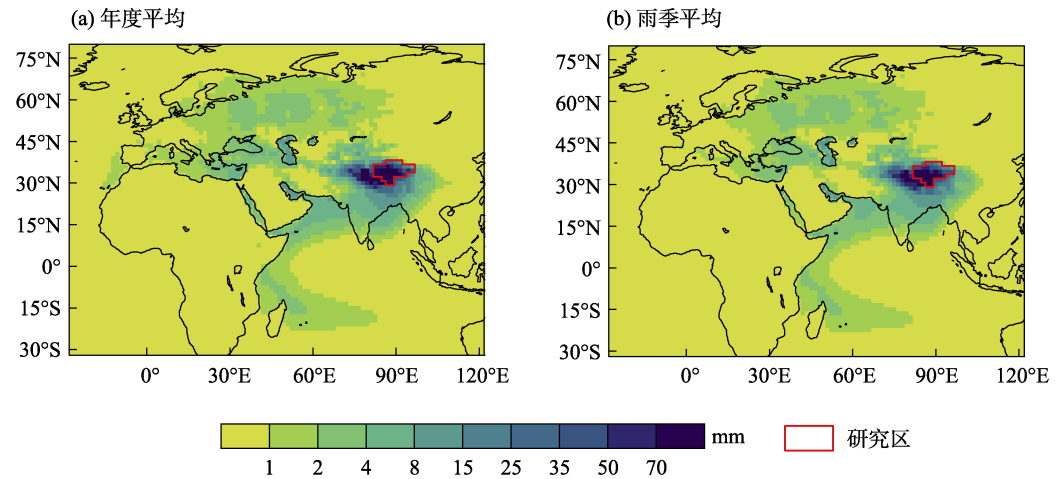


图 1 年度平均和雨季平均水汽来源分布图

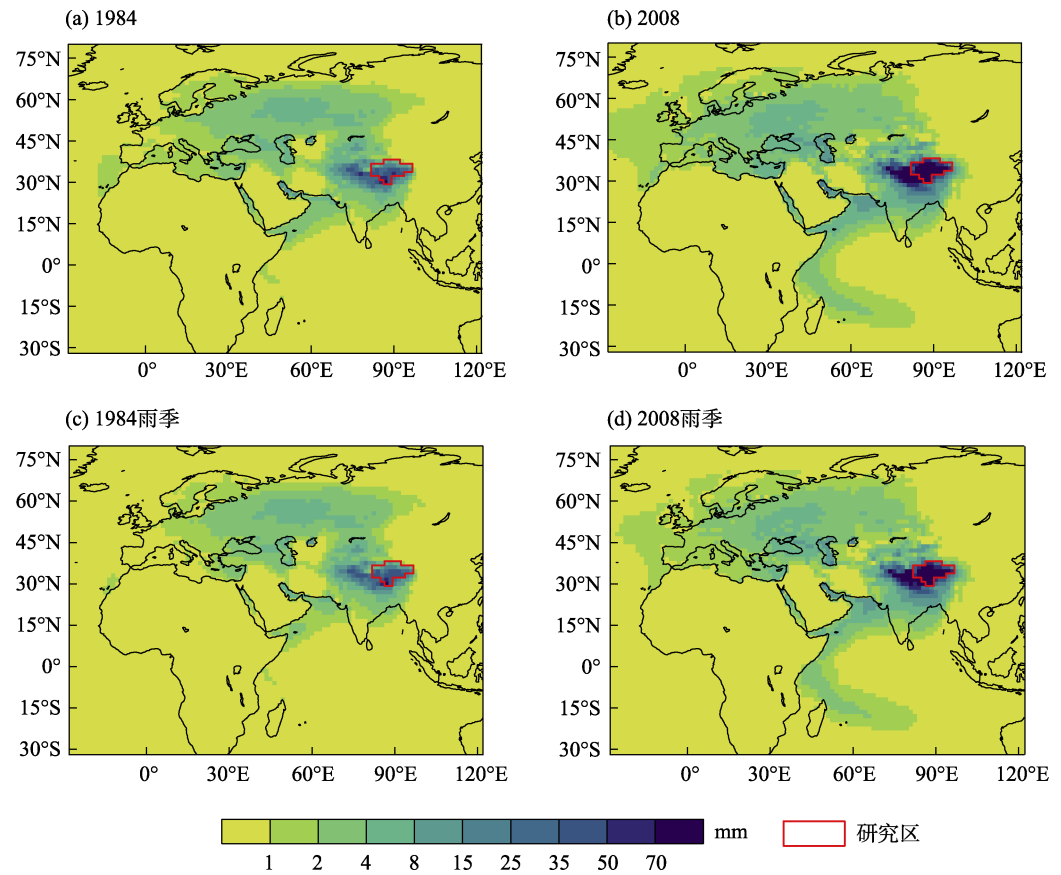


图 2 典型干年（1984）和典型湿年（2008）的年降水与雨季降水水汽来源分布图

标研究区降水的显著差异。同样分析典型干年和典型湿年雨季水汽来源分布差异（图 2），湿润年雨季水汽源区的水汽贡献强度除在欧亚大陆区外，其余均强于干旱年；尤其显著的

是研究区本地及其西南毗邻区, 以及西印度洋区。

### 4.3 数据结果验证

实验结果显示, 在年尺度水汽追踪实验中, 35 年平均追踪率高达 97.6%, 即追踪了 97.6% 的降水水分; 在月尺度实验中, 平均追踪率约为 97%。这表明实验成功地将研究区绝大部分降水追溯到其地表蒸发源。为验证结果的可靠性, Zhang 等 (2017) 进行了对比实验<sup>[9]</sup>, 他们采用了另一套大气再分析资料, 即国家环境预报中心 (NCEP) 与能源部 (DOE) 合作开发的再分析数据集 NCEP2 (National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy Reanalysis-II)。NCEP2 的空间分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ , 低于 ERA-Interim; 其对流层垂直气层仅有 10 层, 同样远少于 ERA-Interim。研究团队使用 NCEP2 数据驱动模型, 作为辅助验证用途。辅助实验与原主实验呈现出一致的结论, 这些结论包括<sup>[9]</sup>: (1) 在气候态上, 西风带和印度夏季风是高原主要的水汽输送来源, 对研究区降水贡献了最多的水分; (2) 青藏高原降水的持续增加主要归因于两个因素: 高原本地水汽循环的增强, 以及来自印度季风的水汽输送增加。这两个关键结论不受输入数据不确定性的影响, 进一步证实了研究结果的稳健性。

## 5 讨论和总结

青藏高原降水在近几十年来呈现整体增加的趋势已是学界共识<sup>[1,3]</sup>。本研究利用中国气象局降水产品和数值模型 WAM 追踪了青藏高原降水显著增加区域的水汽来源, 最终构建了青藏高原降水增加区水汽来源模拟数据集, 展示了全球各地表蒸发源对高原降水增加区降水的贡献及其时空分布。数据集模拟使用多源数据作为模型输入, 整合了 ERA-Interim 再分析资料、中国气象局降水产品和 GLDAS 模型蒸发, 模型基于严格的物理过程和水量平衡方程, 在 0.5 小时和  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  的时空分辨率上进行计算, 最终追踪降水比率: 年降水平均约 97.6%, 月降水平均约 97.0%。这表明模型成功地将绝大部分降水追溯到了地表蒸发源, 从而确保了数据的可用性。此外, 通过设置对比实验进行验证, 数据的准确度得到了有力保障。

该数据集为青藏高原降水研究提供了重要数据佐证, 为深入理解该地区复杂的水循环过程及其变化机制奠定了坚实基础。它具有多方面的研究价值, 例如精确量化高原降水的海陆源贡献比例, 系统研究局地水文循环变化, 揭示水汽输送和贡献的月际、年际和趋势变化规律等。通过深入分析干湿年降水特征差异, 该数据集有助于预测和应对极端气候事件。这些应用对推动青藏高原气候与水文研究, 促进区域可持续发展具有重要的科学和实践意义。

**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., 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] 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.
- [4] Lei, Y., Yang, K. The cause of rapid lake expansion in the Tibetan Plateau: climate wetting or warming? [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2017, 4(6): e1236.
- [5] Zhang, G., Zhang, Y., Dong, J., *et al.* Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(11): 4309–4314.
- [6] Gustafsson, M., Rayner, D., Chen, D. Extreme rainfall events in southern Sweden: where does the moisture come from? [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2010, 62(5): 605–616.
- [7] Stohl, A., James, P. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. part I: method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in central Europe [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(4): 656–678.
- [8] An, W. L., Hou, S. G., Zhang, Q., *et al.* Enhanced recent local moisture recycling on the northwestern Tibetan Plateau deduced from ice core deuterium excess records [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(23): 12541–12556.
- [9] 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.
- [10] 张弛, 汤秋鸿, 黄金川等. 青藏高原降水增加区水汽来源模拟数据集(1979–2013) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.08.02.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.02.V1>.
- [11] 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).
- [12] van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G. Length and time scales of atmospheric moisture recycling [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(5): 1853–1863.
- [13] van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B., *et al.* Origin and fate of atmospheric moisture over continents [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): W09525.
- [14] 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.
- [15] Gao, Y. H., Leung, L. R., Zhang, Y. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979–2011 and possible mechanisms [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(10): 4185–4197.
- [16] 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.