

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

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: 梅雨降水对长江流域中下游的旱涝灾害、水资源管理和社会经济决策制定有重要影响, 研究长江流域梅雨降水的来源有助于未来从源头上对梅雨进行调控管理。作者通过设置大气降水水汽追踪数值模型对长江中下游地区 1991–2020 年梅雨季 (6–7 月) 降水进行溯源, 获得共 30 年长江中下游梅雨降水的水汽来源分布数据。模型物理机制严格, 驱动数据均基于实测数据, 从而保证了模拟结果的可靠性; 降水溯源模拟所追溯的地表蒸散发水汽贡献量与梅雨降水量相当。数据集内容包括: (1) 研究区范围; (2) 1991–2020 年逐年梅雨季水汽来源数据, 空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ (单位: mm); (3) 逐年梅雨季降水量 (单位: mm)。数据集存储为.nc、.shp 和.xlsx 格式, 由 9 个数据文件组成, 数据量为 13.1 MB (压缩为 1 个文件, 10.7 MB)。该数据集为探索梅雨区降水主要水汽源地、区域水文内循环、海陆水汽贡献差异以及梅雨变化归因等应用研究提供了重要的数据支持, 有望得到广泛应用。

关键词: 梅雨; 降水; 水汽来源; 长江中下游地区

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.02.07>

CSTR: <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2024.02.07>

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.2024.07.04.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.07.04.V1>.

1 前言

梅雨指每年夏初 (通常在 6–7 月) 发生在中国东部、日本、韩国等东亚地区的一段持续阴雨天气, 这种天气由于恰逢梅子成熟季节而得名^[1]。梅雨对区域生态系统和经济发展具有双重影响, 从积极方面看, 梅雨为农作物生长提供了必要的水分补给, 是多个地区重要的水资源补充期。然而, 梅雨强度的变化也带来了显著的挑战: 过量降水可能导致洪涝灾害, 而降水不足则可能引发水资源短缺, 进而导致严重干旱。这种降水量的波动对农业

收稿日期: 2024-02-20; 修订日期: 2024-05-16; 出版日期: 2024-06-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2023YFC3206603); 国家自然科学基金 (U2243226); 国家留学基金委 (202310490002)

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. 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.science.org.cn/CSTR:20146.14.2024.02.07>.

[2] 张弛, 黄金川, 汤秋鸿等. 长江中下游地区 (26.5°N–33.5°N, 104.5°E–122.5°E) 梅雨季降水水汽来源模拟数据集 (1991–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.07.04.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.07.04.V1>.

生产、水资源管理以及整体社会经济系统都产生深远影响^[2,3]。

值得注意的是，梅雨降水的波动与地表蒸发对其内部水输送的强弱直接相关^[4]。通过分析降水的蒸发源头以及相应的水汽环流变化，可以更深入地理解梅雨降水波动的机制。这种深入理解不仅能提高我们对梅雨现象的认知，还为未来可能从蒸发源头对梅雨强度进行管理 and 调控提供了理论基础。基于此，本研究利用数值模型追溯长江中下游梅雨区近 30 年梅雨季降水的水汽来源，提供了格点尺度地表蒸发源对梅雨贡献的空间分布数据集。该数据集的应用价值包括但不限于①确定梅雨降水的主要水汽源地；②分析主要边界的年际波动；③探究干旱与洪涝时期降水来源的差异等。

2 数据集元数据简介

《长江中下游地区（26.5°N–33.5°N，104.5°E–122.5°E）梅雨季降水水汽来源模拟数据集（1991–2020）》^[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 《长江中下游地区（26.5°N–33.5°N，104.5°E–122.5°E）梅雨季降水水汽来源模拟数据集（1991–2020）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	长江中下游地区（26.5°N–33.5°N，104.5°E–122.5°E）梅雨季降水水汽来源模拟数据集（1991–2020）
数据集短名	PrecSourceMLYangtzeRiver1991-2020
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 黄金川, 中国科学院地理科学与资源研究所, huangjc@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 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	长江中下游地区
数据年代	1991–2020 年
时间分辨率	年
空间分辨率	1°×1°
数据格式	.nc, .xlsx, .shp
数据量	10.7 MB（压缩后）
数据集组成	长江中下游梅雨区位置、梅雨年降水量、梅雨降水水汽来源
基金项目	国家重点研发计划（2023YFC3206603）；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 ^[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 数据来源

模型需要选择合适的驱动数据,共需要两大类数据,分别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的再分析资料 ERA5^[7],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 $1^\circ \times 1^\circ$ 。地表数据包括地表蒸散发和降水,陆地蒸散发使用 GLEAM (V3.5a) 数据集的总蒸散发量^[8];该数据基于遥感反演算法,已有多个研究证实相对其它陆表蒸散发产品更准确^[9,10]。所使用 GLEAM 数据为月尺度数据,空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。降水采用 CN05.1 产品^[11],这是中国气象局出品的一个基于站点实测资料进行插值的降水产品,在我国被广泛使用。所使用 CN05.1 数据为月尺度数据,空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。此外,使用 ERA5 逐小时的全球降水和蒸发数据,尽管这部分数据在陆表误差很大^[4],但其包含了日内变化信息,通过 GLEAM 和 CN05.1 月尺度数据进行校正,可以获得高时间分辨率,同时月值与观测数据吻合的地表通量数据。

3.2 数据预处理

WAM2layers 模型是一个两层模型,需要对原先的大气层进行分割。依据模型设置^[12],模型切割的气压层为:

$$P_{\text{div}} = 74.38803 + 0.72879 \times P_{\text{surf}} \text{ (hPa)} \quad (1)$$

式中, P_{div} 为气压随地表大气压 P_{surf} 动态变化。在 $P_{\text{surf}} = 1,013.25$ hPa 时,分层气压为 812.83 hPa。应用式(1)计算得到当前格点的分层气压,然后在选取 23 个气压层里选择离分层气压最近的标准气压层,以该层作为垂直分界,再分别积分计算该层上至大气层顶和下至地表的大气可降水量、水汽通量。

所有的数据都需要转换成模型输入所需要的时空分辨率,即 $1^\circ \times 1^\circ$, 15 分钟步长。对于逐小时的大气瞬变量数据,如大气可降水量、水汽通量,逐小时采用线性插值的方法,获得逐 15 分钟的对应该数据。对于逐小时的累积通量数据,如蒸发、降水,则采用时段平均的方法获得逐 15 分钟的数据。

CN05.1 降水和 GLEAM 蒸散发格点大小均为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,在转换时先采用空间叠加的方法,将落入 1° 格点中所有 0.25° 格点值进行加权平均,从而得到代表 1° 格点的降水/蒸发值。将其与 ERA5 的降水和蒸发月值分别进行对比,对于每个格点每月便得到放缩参数 μ ,将 ERA5 在该格点该月逐小时数据乘以参数 μ ,再平均到 15 分钟尺度,便得到校正后的月值与 CN05.1 和 GLEAM 数据相符的高时间精度数据。

3.3 模型算法原理

WAM2layers 水汽追踪模型是一种欧拉坐标体系数值模式,水汽追踪即跟踪标记水体在上下层格点中的自由流动过程,其降水溯源算法过程如下:

如同考虑降水的逆过程,目标区(即长江中下游梅雨区)某特定时间段的降水 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。 p_0 进入大气时有一个分配规则,即上下层的分配水汽量依据格点气柱上下层的大气可降水量 (W_{up} 和 W_{down}) 按比例进行分配。进入大气后,如扩散一样,标记水汽通过水平和垂直方向的水汽输送不断进入周

边格点，并与所在气层的水汽充分混合。在特定时间点，如在格点 A 处有一蒸发为 e ，此时低层大气标记水汽占低层总水汽的比例为 r ，此即意味着 A 点进入低层的蒸发水汽 e 中必然有 $e \times r$ 的水汽最终会形成目标区的直接降水，这部分水汽便被锁定为格点 A 对梅雨区的直接降水贡献，被成功溯源，而低层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^[13,14]。

3.4 数据后处理

如前文算法所述，任一时间步长中的蒸发 e 中必然有 $e \times r$ 的水汽最终会形成目标区的直接降水，算法如式(2)：

$$E_r(t,x,y)=E(t,x,y)\times \frac{W_{r_down}(t,x,y)}{W_{down}(t,x,y)}$$

(2)

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整个梅雨季对梅雨区降水的水汽贡献：

$$E_r(x,y)=\int_0^TE_r(t,x,y)dt$$

(3)

3.5 技术路线

综上，本数据集研发技术路线如图 1 所示。

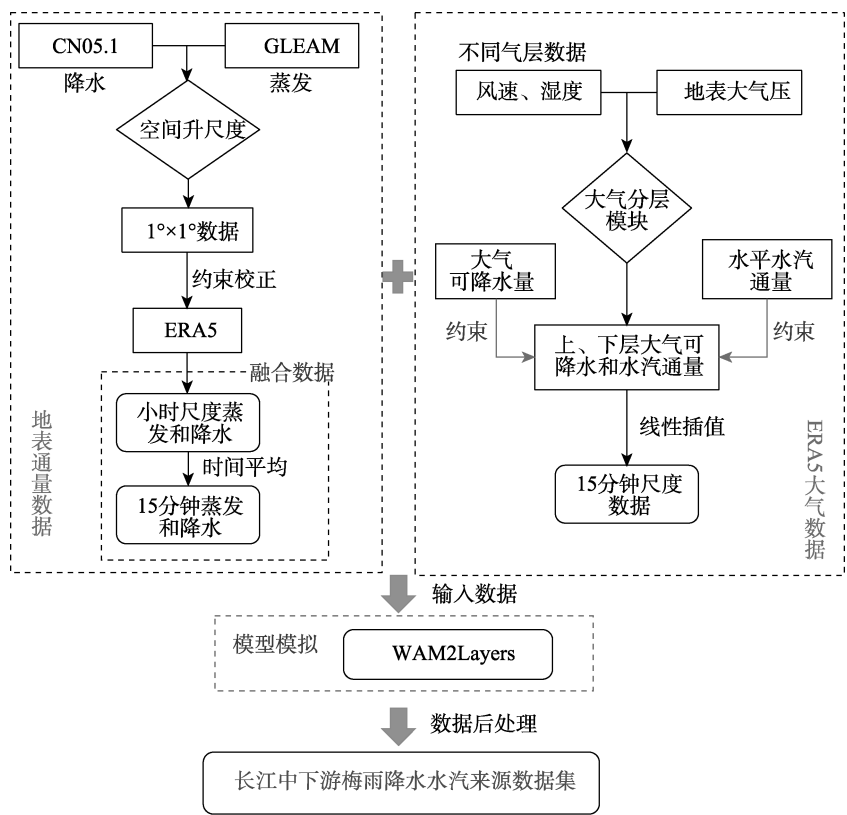


图 1 数据研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集共 9 个数据文件，包括长江中下游梅雨区的位置文件（shp 格式），该区域 1991–2020 年每年梅雨季的降水量（.xlsx 格式），以及每年梅雨降水所对应的水汽来源（空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，.nc 格式）。

4.2 数据结果

长江中下游梅雨区按 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点大小统计共 116 个格点，面积约占 $1.24 \times 10^{12} \text{ m}^2$ ，平均降水为 $413.9 \pm 70.0 \text{ mm}$ ，最低降水为 2001 年 321.2 mm，最多降水为 2020 年 636.9 mm。每隔约 10 年依次展示第 1、11、21 和 30 年梅雨降水的溯源结果如图 2 所示。简单观察可发现，梅雨区降水主要来自西南方向至印度洋源区和东南方向至热带太平洋源区，不同年份间存在较大波动。

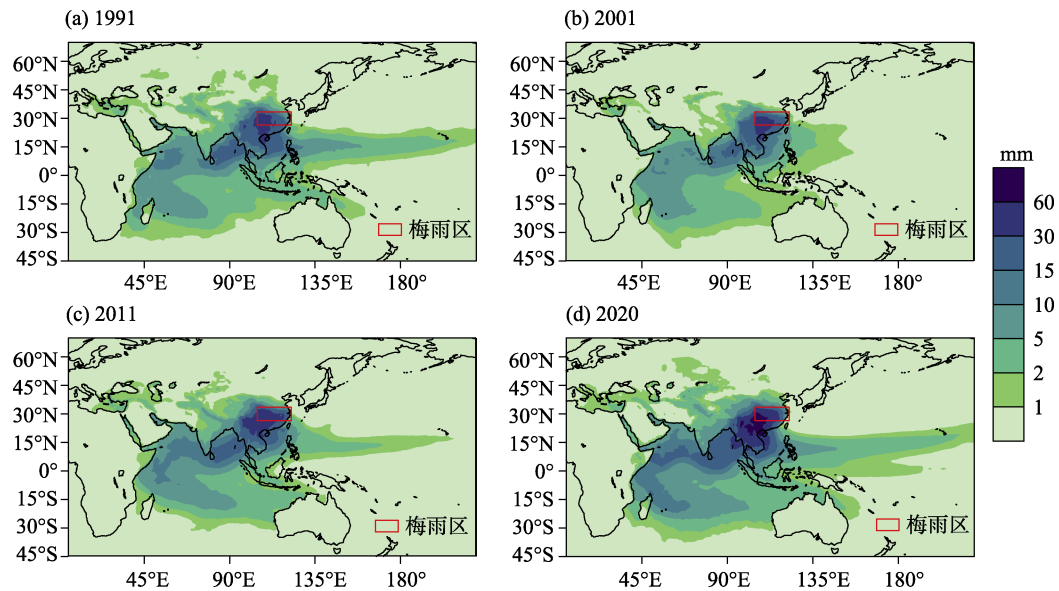


图 2 1991、2001、2011 和 2020 年梅雨降水的水汽来源分布图

4.3 数据结果验证

WAM2layers 受严格的物理过程约束，且经过模型对比验证^[15]，在水汽追踪模拟方面可信度高且应用广泛。对于特定的应用案例，一方面需要考虑选取合适的驱动数据，以降低输入数据所带来的不确定性；另一方面，需要验证模型是否运转正常，即验证研究区的降水是否已基本被追溯到地表蒸发源上。通过累积各个格点源对梅雨降水的贡献，与梅雨降水总量进行对比，结果如图 3 所示，30 年内平均追踪了约 98.9% 的梅雨降水，其中 2019 年追踪的比例最低，约为 98.5%，可见绝大部分降水都已被有效识别和归置到地表蒸发源上了。

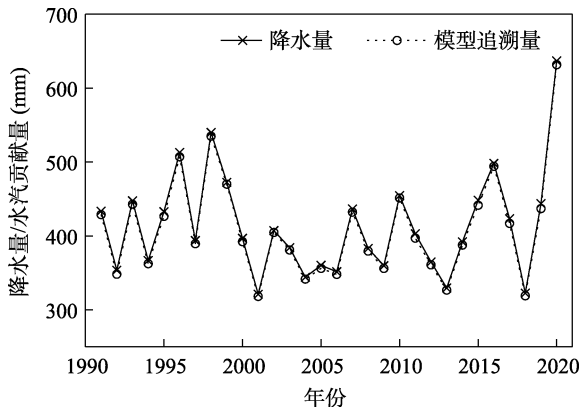


图3 1991–2020 年历年梅雨降水量和模型追溯到地表蒸发源的水汽贡献量图

5 讨论和总结

本研究通过数值模型 WAM2Layers 追溯了长江中下游地区近 30 年梅雨季降水的水汽来源, 提供了格点尺度地表蒸发源对梅雨贡献的空间分布数据集。该数据集使用多源观测数据作为模型输入, 包括 CN05.1 观测降水、GLEAM 遥感蒸散发数据和 ERA5 再分析资料等, 模拟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水汽贡献数据, 追踪降水比率高达 98.9%, 可信度高。

本质上, 该数据集实现了一种创新性的数据转换, 即将梅雨区降水转化为地表蒸发源的水汽贡献量, 为解释梅雨降水变化提供了新的视角。初步分析表明, 在 2001 年干旱年, 梅雨区降水主要来源于其西南方向的印度洋和南部我国南海区域。相比之下, 2020 年强梅雨期间, 热带太平洋地区提供了显著的水汽增量, 成为降水的一个重要来源 (图 2)。

该数据集为探索梅雨区降水的主要水汽区及源区边界波动、海陆水汽贡献差异、长江中下游地区水文内外循环差异及其变化等方面研究提供了数据支持。未来研究可进一步结合陆表水汽源区的土地利用变化等数据, 深入解析蒸发源水汽贡献的变化机制, 从而更全面地探究梅雨降水变化的内在动力学过程。这种多角度、多尺度的研究方法将有助于提高我们对区域水循环过程的理解, 为气候变化背景下的水资源管理和防灾减灾提供科学依据。

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] Ding, Y., Liu, Y., Hu, Z. Z. The record-breaking Mei-yu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(12): 1980–1993.
- [2] Zhang, L., Zhao, D., Zhou, T., et al. Moisture origins and transport processes for the 2020 Yangtze River Valley record-breaking Mei-yu rainfall [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38: 2125–2136.
- [3] 郝志新, 李明启, 郑景云等. 长江中下游地区梅雨与旱涝的关系[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(8): 877–882.
- [4] Zhang, C., Tang, Q., Zhao, Y., et al. Moisture source differences between the 2020 and 1998 super Mei-

- Meiyu-flood events in the Yangtze River Valley [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2024, 43: 100644. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100644>.
- [5] 张弛, 黄金川, 汤秋鸿等. 长江中下游地区 (26.5°N–33.5°N, 104.5°E–122.5°E) 梅雨季降水水汽来源模拟数据集 (1991–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.07.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.07.04.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] 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.
- [8] 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.
- [9] Forzieri, G., Alkama, R., Miralles, D. G., *et al.* Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth [J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1180–1184.
- [10] Li, X., Long, D., Han, Z., *et al.* Evapotranspiration estimation for Tibetan Plateau headwaters using conjoint terrestrial and atmospheric water balances and multisource remote sensing [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(11): 8608–8630.
- [11] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102–1111.
- [12] 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.
- [13] Zhang, C., Tang, Q., Chen, D. Recent changes in the moisture source of precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(5): 1807–1819. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0842.1>.
- [14] Zhang, C., Tang, Q., Chen, D., *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. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0094.1>.
- [15] 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.