暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

沙尘气溶胶对青藏高原不同等级降水影响的个例模拟研究

季鸿语 张镭 梁捷宁 张志达 田鹏飞

Impact of dust aerosol on different grades of precipitation over the Tibetan Plateau: a case simulation study

JI Hongyu，ZHANG Lei，LIANG Jiening，ZHANG Zhida，TIAN Pengfei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-034

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

CMIP6 HighResMIP高分辨率气候模式对青藏高原降水模拟的评估
Evaluation of CMIP6 HighResMIP models in Simulating Precipitation over Tibetan Plateau
暴雨灾害. 2022, 41(2): 215-223 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.012

青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展
A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau
暴雨灾害. 2024, 43(3): 255-265 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-216

青藏高原夏季FY-4A卫星对流初生产品的分类识别
Classification and identification of FY-4A convective initiation products in summer on the Qinghai-Tibet Plateau
暴雨灾害. 2024, 43(2): 214-223 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-193

青藏高原东南缘攀枝花市降水特征及其成因初探
Characteristics and genesis of precipitation in Panzhihua on the southeast margin of Qinghai-Tibet Plateau
暴雨灾害. 2024, 43(1): 101-109 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-246

基于TRMM PR探测资料的青藏高原东坡降水结构特征分析
Analysis on the characteristic of precipitation structure on the eastern slope of the Qinghai-Tibet Plateau based on TRMM PR data
暴雨灾害. 2022, 41(4): 384-395 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.003

青藏高原东侧甘孜云雷达观测的非降水云垂直结构特征分析
Vertical structure of non-precipitation cloud obtained from cloud radar observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau
暴雨灾害. 2020, 39(5): 442-450 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.002

关注微信公众号，获得更多资讯信息

季鸿语,张镭,梁捷宁,等.2026.沙尘气溶胶对青藏高原不同等级降水影响的个例模拟研究[J].暴雨灾害,45(2):239−251. JI Hongyu, ZHANG Lei, LIANG Jiening, et al. 2026. Impact of dust aerosol on different grades of precipitation over the Tibetan Plateau: a case simulation study [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):239−251 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−034

沙尘气溶胶对青藏高原不同等级降水影响的个例模拟研究

季鸿语[1, 5], 张镭[5, 6], 梁捷宁[5], 张志达[5], 田鹏飞[2, 3, 4, 5]

(1. 云南省人工影响天气中心, 昆明 650034; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室, 乌鲁木齐 830002; 4. 新疆云降水物理与云水资源开发实验室, 乌鲁木齐 830002; 5. 兰州大学大气科学学院 教育部半干旱气候变化重点实验室, 兰州 730000; 6. 兰州大学 西部生态安全省部共建协同创新中心, 兰州 730000)

摘　要: 青藏高原被称为“亚洲水塔”, 内部沙漠化较严重, 沙尘气溶胶是影响降水的重要因子, 厘清其对云和降水的作用具有重要意义。利用区域气象-化学耦合模式 (WRF-Chem) 模式对 2008 年 6 月 27—30 日发生在青藏高原的降水过程进行模拟, 从垂直运动、云微物理特性等方面研究该地区沙尘气溶胶对不同等级降水的影响。结果表明: 青藏高原沙尘气溶胶通过改变云的宏观条件和微物理特性对不同等级降水产生不同影响。沙尘气溶胶对大雨有显著的促进作用, 使其 24 h 累计降水量增加 20.5%, 沙尘气溶胶抑制小雨的生成, 使其降水量平均减少 13.0%, 总体降水量增加 4.96%。其中的影响机理是, 沙尘气溶胶使大雨发生时的垂直速度增加, 增值最大超过 0.06 m·s^{-1}, 使小雨发生时的垂直速度减小, 抑制其上升运动; 沙尘气溶胶使云水混合比和雨水混合比增加, 大雨时混合比增长约为小雨的 8 倍; 沙尘气溶胶使不同等级降水下的冰晶数浓度均有所增加, 云顶温度降低, 延长云的寿命。

关键词: 青藏高原; 沙尘气溶胶; 不同等级降水; 混合比

中图法分类号: P426　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−034

Impact of dust aerosol on different grades of precipitation over the Tibetan Plateau: a case simulation study

JI Hongyu[1, 5], ZHANG Lei[5, 6], LIANG Jiening[5], ZHANG Zhida[5], TIAN Pengfei[2, 3, 4, 5]

(1. *Yunnan Weather Modification Center*, *Kunming*, 650034; 2. *Institute of Desert Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Urumqi* 830002; 3. *Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm*, *Urumqi* 830002; 4. *Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory*, *Urumqi* 830002; 5. *Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education*, *College of Atmospheric Sciences*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000; 6. *Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000)

Abstract: The Tibetan Plateau (TP), known as the "Asian water tower," suffered severe desertification internally, with dust aerosol being an important factor affecting precipitation. Clarifying the role of dust aerosol in precipitation is essential. The Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry (WRF-Chem) was employed to simulate a precipitation event occurring over the Tibetan Plateau from June 27 to June 30, 2008, and examined the effects of dust aerosols on different grades of precipitation in the region, with a focus on vertical motion and cloud microphysical properties. The results indicate that TP dust aerosol has different effects on different grades of precipitation by altering the macroscopic conditions and microphysical properties of the cloud. The dust aerosol facilitated heavy rainfall, increasing the 24-hour accumulated precipitation by 20.5%, while it exhibited an inhibitory effect on light rainfall, decreasing precipitation by an average of 13.0%. Overall, dust aerosol led to a 4.96% increase in total precipitation. The mechanism for this effect is that the dust aerosol increased the vertical velocity during heavy rainfall, with the maximum increment exceeding 0.06 m·s^{-1}. Additionally,

收稿日期: 2024−02−27; **定稿日期**: 2024−11−16

资助项目: 中国沙漠气象科学研究基金项目 (Sqj2023019)

第一作者: 季鸿语, 主要从事沙尘气溶胶数值模拟研究。E-mail: jihy21@lzu.edu.cn

通信作者: 张镭, 主要从事大气气溶胶和边界层气象研究。E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

dust aerosol reduced the vertical velocity during light rainfall, inhibiting its upward motion. Dust aerosol increased both cloud water mixing ratio and rainwater mixing ratio, with the growth in mixing ratio under heavy rainfall approximately eight times greater than that under light rainfall. Furthermore, dust aerosol increased the number concentration of ice particles under different grades of precipitation and lowered the cloud-top temperature and prolonged cloud lifespan.

Key words: Tibetan Plateau; dust aerosol; different-grade precipitation; mixing ratio

引　言

青藏高原平均海拔超过 4 000 m, 是世界上海拔最高、地形最复杂的内陆高原。高原内部存在许多冰川积雪和河流湖泊, 水资源条件丰富, 又被称为“亚洲水塔”。研究表明, 青藏高原是众多河流的发源地, 黄河、长江、湄公河、萨尔温江、伊洛瓦底江、雅鲁藏布江、印度河、塔里木河和恒河这 9 条主要河流均起源于青藏高原 (Cuo and Zhang, 2017)。此外, 青藏高原内部约有 1 400 个大于 1 km^2 的湖泊, 总面积达 50 000 km^2 (Jia et al., 2023), 总面积占全国湖泊面积的 50% 以上, 并且其现代冰川数量占我国冰川总数的 80% 以上, 冰川面积占我国冰川总面积的 84% (苏珍等, 1999)。青藏高原作为全球气候变化最敏感的地区之一, 在 1961—2007 年间年平均气温以每年 0.36 ℃ 的速度增长 (Wang et al., 2008)。除此之外, 高原在夏季常常作为一个热源, 驱动着南亚夏季风的形成 (陈权亮等, 2024; 华维等, 2024), 并且季风带来的大量暖湿水汽在随地形抬升过程中会逐渐冷凝成为降水。在暖湿化背景下, 下游的水源主要依靠冰川融水和高原降水提供 (Davis et al., 2005), 这些水资源为全球 20% 以上人口提供淡水资源 (Immerzeel et al., 2010), 为维持当地的生态系统平衡发挥着重要作用 (Wang et al., 2018)。因此, 青藏高原水资源深刻影响着我国的气候系统稳定、水资源储备以及生态安全 (汪庆丽和范广洲, 2024)。

青藏高原降水是高原水资源的根本来源 (Sun et al., 2022), 同时也是东部和南部河流流量的主要贡献者 (Cuo et al., 2014)。青藏高原降水的时空分布与变率直接影响着当地的生态和下游地区水资源的供给。作为大气水分循环中最重要的成分之一, 青藏高原的降水不仅会直接影响到局地的气候, 还会对下游乃至全球的水分循环、气候变化和能量循环产生重要影响。因此, 研究导致青藏高原降水量变化的因子十分迫切。其中, 大气气溶胶作为云凝结核通过气溶胶-云相互作用显著影响着地气系统水能平衡 (彭杰, 2015; 张艳晴等, 2024), 并且这种影响十分复杂, 被认为是气候预测的主要不确定因素 (Fan et al., 2016)。其中, 沙尘气溶胶作为大气中最重要的成分之一, 一方面能参与降水的形成 (Parajuli et al., 2022), 另一方面可以通过调节降水过程从而影响青藏高原的水资源分布。已有研究表明, 青藏高原内部沙漠化较为严重, 分布着众多沙丘, 高原本身也是一个重要的沙尘气溶胶源地 (Fang et al., 2004)。此外, 其周边分布着三大沙漠, 分别为北部的塔克拉玛干沙漠、西北部的古尔班通古特沙漠以及西南部来自印度的塔尔沙漠 (Liu et al., 2015)。青藏高原因其复杂地形, 常常通过“热力泵效应”引发辐合上升气流, 来自周边沙漠的大量沙尘气溶胶可以通过地形抬升和热泵作用传输到高原 (Jia et al., 2015)。这些沙尘气溶胶一方面通过直接效应改变地气系统能量收支, 另一方面通过半直接效应和间接效应改变降水和云微物理过程 (Creamean et al., 2013; Tsarpalis et al., 2020)。然而, 目前关于沙尘气溶胶对降水影响的研究有许多不同的结论。一些研究认为沙尘气溶胶会抑制降水, 特别是当它作为云凝结核和冰核粒子参与云的形成时, 增加的沙尘气溶胶就会抑制降水的发生 (陈丽等, 2007)。而一些研究却认为沙尘气溶胶能促进降水 (Zhang et al., 2021), 特别是对于极端降水 (Choobari, 2018), 且沙尘气溶胶还可通过加热对流层上部增强降水 (Jin et al., 2015)。

沙尘气溶胶对降水的影响是受水汽条件、垂直运动条件以及各种微观物理相互作用控制。目前已有很多研究证明了沙尘气溶胶能够促进或者抑制降水, 但是大量的研究主要集中在中国的华北地区和东部等地区 (Zhang et al., 2015; Luo et al., 2023)。此外, 很多研究主要关注沙尘气溶胶对降水的总体效应, 很少分析不同等级降水下沙尘气溶胶的作用。青藏高原作为全球气候变化的敏感区 (Zhang et al., 2022), 降水的变化深刻影响着高原和下游地区的生态平衡和淡水资源。基于 IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) 卫星遥感观测发现, 2008 年 6 月 27—30 日在青藏高原发生了一次降水过程, 且 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Path nder Satellite Observation) 卫星探测到该降水伴随着沙尘气溶胶天气过程发生。因此, 本文以这次降水过程为例, 使用 WRF-Chem 模式进行模拟, 通过与多源数据对比检验, 量化青藏高原地区的沙尘气溶胶在不同等级降水下对降水的影响, 从垂直运动、

云微物理特性等方面深入分析沙尘气溶胶对青藏高原地区降水的影响, 以期为提高青藏高原地区降水预报的准确性、为区域和全球气候变化研究提供科学参考。

1 个例介绍与试验设置

1.1 个例与模式介绍及试验设置

IMERG 卫星遥感探测发现, 2008 年 6 月 27—30 日, 青藏高原发生了一次降水过程, 最大累计降水量超过 100 mm, 具有较强的对流性和局地性特征。与此同时, CALIPSO 卫星探测到该降水过程伴随有明显的沙尘气溶胶天气, 沙尘气溶胶被抬升至超过 10 km 的海拔高度, 表明沙尘气溶胶可能通过远程输送或局地起沙参与云降水过程。

为量化沙尘气溶胶对降水的影响, 利用区域气象-化学耦合模式 (Weather Research and Forecasting model coupled with chemistry Version 3.9.1, WRF-Chem V3.9.1) 模拟分析 2008 年 6 月 27—30 日在青藏高原发生的一次降水过程。WRF-Chem V3.9.1 是基于气象研究与预报模式 (Weather Research and Forecasting model, WRF) 开发的, 在线耦合了化学 (CHEM) 模块, 已被广泛用于模拟区域尺度上微量气体的排放、传输、干湿沉降、气象化学、气溶胶的相互作用以及辐射和光解等过程 (Grell et al., 2005)。模拟区域如图 1 所示, 中心位置位于 (88.0°E, 32.5°N), 水平分辨率为 9 km, 时间积分步长为 36 s, 共 307×492 个网格和低层加密的 39 个垂直层, 模式顶层气压为 50 hPa, 模拟区域为 (68°—110°E, 20°—45°N), 覆盖整个青藏高原地区。模拟时间为 2008 年 6 月 25 日 00:00 (世界时, 下同)—2008 年 7 月 1 日 00:00, 前 48 h 为模式的"自旋"时间, 气象场的边界和初始条件为美国国家环境预测中心 (National Centers for Environmental Prediction, NECP) 和美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 提供的再分析资料 FNL, 时间分辨率为 6 h, 空间分辨率为 1°×1°。人为排放清单来自 2010 年全球大气研究排放数据库-半球空气污染传输全球清单 (EDGAR-Hemispheric Global Inventory of Air Pollution Transport, EDGAR-HTAP), 水平分辨率为 0.1°×0.1°, EDGAR-HTAP 排放清单包括黑碳、有机质、颗粒物、氨、硫酸盐、氮氧化物和一氧化碳等物质 (Janssens-Maenhout and Crippa, 2015)。生物气溶胶排放清单来自自然的气体和气溶胶排放模型 (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature, MEGAN) 的生物排放, 该模型以 1 km 的水平分辨率量化了陆地生物圈

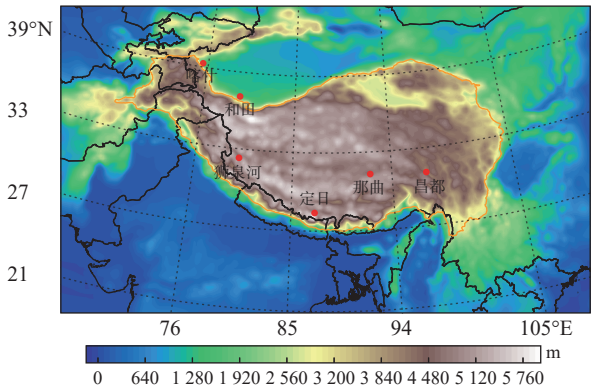


图 1 模拟区域及其地形高度 (红点为中国国家地面气象站, 橙线为青藏高原边界线)

Fig. 1 Simulation domain and terrain heights (Red dots represent the national ground meteorological stations of China. The orange line indicates the boundary of the Tibetan Plateau)

的净排放 (Guenther et al., 2006)。生物质燃烧排放数据来自卫星火点排放清单 (Fire INventory from NCAR, FINN), 水平分辨率为 1 km, 提供了全球不同火灾的生物质燃烧排放估计 (Wiedinmyer et al., 2011)。化学物质的初边界条件由 CAM-Chem (Community Atmosphere Model with Chemistry) 提供, 空间分辨率 0.90°×1.25°, 56 个垂直层, 时间分辨率 6 h。

模式采用 CBMZ_MOSAIC4bin (The Carbon Bond Mechanism chemical mechanism and MOSAIC using 4 sectional aerosol bins including some aqueous reactions) 气象化学机制和气溶胶方案, CBM-Z 包括 67 种化学物质和 164 种反应, 广泛应用于气溶胶的模拟 (Zaveri et al., 2008)。此外, 模式所使用的微物理方案、长波辐射方案、短波辐射方案、陆面过程方案、边界层方案和积云参数化等方案如表 1 所示。模拟沙尘气溶胶排放的方案是GOCART (Georgia Tech Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport), 其计算公式

$$F = CS\,s_p u_{10}^2 (u_{10} - u^*), \quad u_{10} > u^* \tag{1}$$

式 (1) 中, C 为经验比例常数, 值为 1 μg^2·m^{-5}; S 为源函数, 表示潜在沙尘气溶胶源的分布; s_p 为不同粒径沙尘气溶胶颗粒大小的质量分数, p 为粒径分组; u_{10} 为离地面 10 m 处的水平风速; u^*为临界摩擦速度, 与沙尘气溶胶颗粒大小和土壤湿度有关。

针对青藏高原发生的这次降水过程, 设计了 2 组敏感性试验。其中 1 次模拟包含了生物质、生物质燃烧、人为以及沙尘气溶胶在内的所有排放, 模拟接近真实大气, 称为沙尘试验 (Dust experiment, 以下简称 Dust 试验)。另 1 次模拟仅关闭了沙尘气溶胶排放的开关, 其余设置与 Dust 试验设置完全相同, 称为

表 1 WRF-Chem 中使用的物理和化学参数化方案

Table 1 Physical and chemical parameterized configuration of WRF-Chem

方案名称	WRF-Chem参数化方案
微物理方案	Mrrison double moment (Morrison et al., 2009)
长波辐射方案	Rapid radiation transfer model (RRTMG) (Iacono et al., 2008)
短波辐射方案	Rapid radiation transfer model (RRTMG) (Iacono et al., 2008)
陆面过程方案	Unified Noah land surface model (Chen and Dudhia, 2001)
边界层方案	Yonsei University scheme (Hong et al., 2006)
积云参数化方案	Grell 3D Ensemble scheme (Grell and Dévényi, 2002)
气溶胶化学模块	CBMZ_MOSAIC4bin (Zaveri and Peters, 1999)
沙尘气溶胶排放方案	GOCART (Gillette and Passi, 1988)

控制试验 (Control experiment, 以下简称 CTL 试验)。日降水的分级标准为: 大雨 (≥25 mm·d^{-1})、中雨 (9.9~24.9 mm·d^{-1})、小雨 (≤9.9 mm·d^{-1})。研究区域为图 1 橙线区域, 边界线地图来自 2021 年版青藏高原范围界线数据集 (张镱锂等, 2021)。通过 Dust 试验筛选出研究区域内不同等级降水网格点上的各变量, 减去对应网格点上 CTL 试验的模拟结果, 计算出各变量差异在不同等级降水下的区域平均值, 由此获得不同等级降水下沙尘气溶胶对降水量、水成物混合比、数浓度以及云特性等的影响。

1.2 其他资料

使用中分辨率成像光谱辐射仪 (MODIS) 的气溶胶光学厚度 (AOD) 数据评估 AOD 和沙尘气溶胶的空间分布。MODIS 卫星主要有“暗黑”和“深蓝”两种算法, “暗黑”算法主要用于反演植被覆盖的区域和海洋, “深蓝”算法主要用于沙漠和其他高反照率的表面 (Hsu et al., 2006)。因此, 这里使用 3 级“深蓝”大气产品 (MYD08), 水平分辨率为 1°×1°。由于卫星观测易受到云和观测技术的制约, 在高原地区存在部分缺测数据, 结合 MERRA-2 再分析数据评估模式对气溶胶的模拟效果。MERRA-2 数据集是由第五代戈达德地球观测系统模型 (GEOS-5) 生成的, 该模型同化了各种卫星和地面观测。本文采用 tavg1_2d_aer_Nx 产品的 AOD 数据, 水平分辨率为 0.5°×0.625°, 垂直方向 72 层 (Randles et al., 2017)。此外, 全球降水观测计划多星集成 (GPM-IMERG) 的降水产品用于评估模式的降水结果 (Huffman et al., 2019)。3 级 GPM-IMERG 数据时间分辨率为 0.5 h, 空间分辨率为 0.1°×0.1°。地面气象观测资料来自国家气象科学数据中心提供的《中国气象日值资料值》, 共 699 个中国国家地面气象站, 记录了自 1951 年以来站点基本气象要素的日变化情况。本文选取了在青藏高原及周边地区的喀什、和田、定日、那曲、狮泉河、昌都 6 个站点, 将模拟结果与地面观测结果进行比较, 评估模式的气象场模拟效果。

2 模拟效果验证

为了评估模式对沙尘气溶胶、气象场和降水的模拟效果, 利用多种卫星资料、再分析资料和地面观测资料对模拟结果进行检验。表 2 提供了 WRF-Chem 模拟的气溶胶光学厚度 (AOD)、地面 2 m 气温 (T_2) 和降水量 (P) 与观测资料的相关系数 (R)、平均误差 (ME) 以及均方根误差 (RMSE)。由于 MODIS AOD 在青藏高原地区存在大量缺测值, 使用 MERRA-2 AOD 的逐小时区域平均值验证 AOD, 使用 IMERG 的逐小时区域平均值验证 P。可见不同参数的模拟值与观测值的相关系数均在 0.61 以上, 且均通过 0.05 显著性水平检验。除和田站的 T_2 以外, 其余参数均表现为略微的正偏差, 这是由于 WRF 模型在复杂地形中难以呈现对应的参数化过程 (Hanna et al., 2000)。但整体来看模式能够抓住沙尘气溶胶和降水的总体变化。

表 2 WRF-Chem 模拟的气溶胶光学厚度 (AOD)、地面 2 m 气温 (T_2, 单位: ℃)、降水量 (P, 单位: mm) 与观测结果的相关系数和误差

Table 2 Correlation coefficient and error of aerosol optical depth (AOD), ground 2 m air temperature (T_2, unit: ℃), and precipitation (P, unit: mm) of simulation by WRF-Chem compared with observations

物理量	站点	相关系数	平均误差	均方根误差
AOD	站点平均	0.698*	0.144	0.163
T_2	喀什	0.646*	2.231	3.186
	和田	0.623*	−2.230	3.486
	定日	0.816*	6.177	6.279
	那曲	0.617*	7.371	7.787
	狮泉河	0.714*	8.423	8.688
	昌都	0.612*	5.143	6.007
P	站点平均	0.670*	5.620	9.824

注: *代表相关性通过0.05显著性水平检验。

2.1 气溶胶光学厚度

卫星可以提供多年的全球气溶胶三维观测数据, 在很大程度上弥补了青藏高原地区观测数据的不足。AOD 常作为评估模拟性能的重要参数, 它可以反映沙尘气溶胶事件的时空分布特征。因此, 使用 MODIS“深蓝”产品和 MERRA-2 的 AOD 产品来评估模拟结果。图 2 为 WRF-Chem 模拟和 MERRA-2、MODIS 观测的 2008 年 6 月 27—30 日青藏高原地区逐日平均 AOD 的空间分布。可见该模式捕捉到了 AOD 的空间分布和变化特征, MODIS 和 MERRA-2 的 AOD 分布高度相似, WRF-Chem 模拟与 MERRA-2 的 AOD 的相关系数可达 0.698, 均方根误差为 0.163。模拟再现了两个 AOD 高值区, 一个位于青藏高原北部的塔克拉玛干沙漠, 沙尘气溶胶向南传输到青藏高原北坡。另一个位于青藏高原西南部的塔尔沙漠, 沙尘气溶胶向喜马拉雅山南麓传输。从 6 月 27 日开始, WRF-Chem 模拟、MERRA-2 和 MODIS 的 AOD 值均超过 2, 表明沙尘气溶胶活动非常剧烈。虽然模拟的 AOD 变化趋势与卫星观测结果十分一致, 但 6 月 30 日高原以东地区的 AOD 值略有偏低。Yuan 等 (2019) 也发现了这种低估现象, 并将其归因于排放清单的不确定性。此外, Hu 等 (2020) 使用 WRF-Chem 模拟也发现, 由于地表反照率的不确定性, 人为污染区域的模拟值低于卫星检索值。

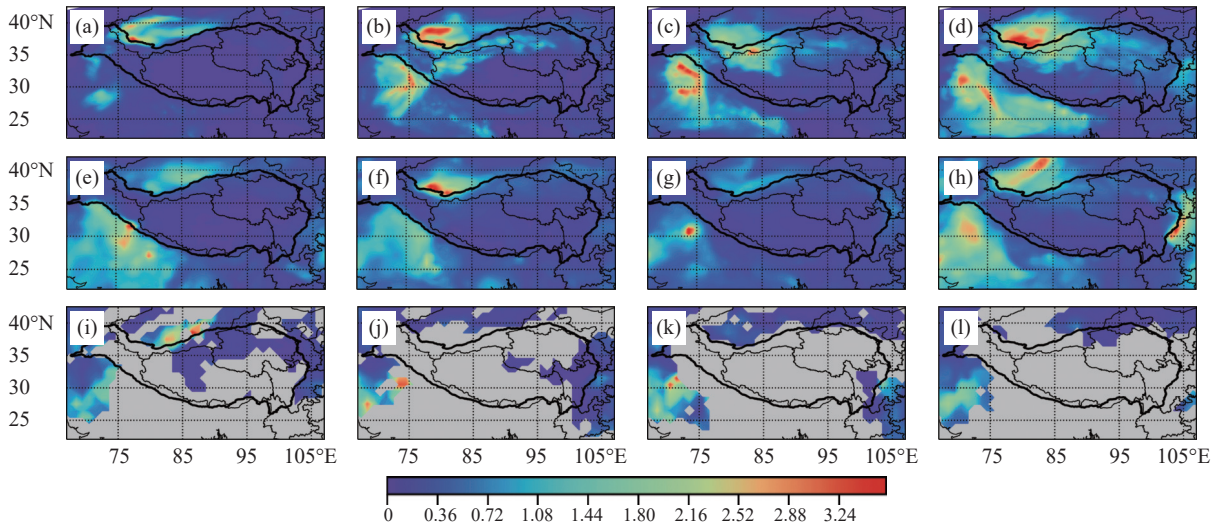


图 2 WRF-Chem (a, b, c, d) 模拟和 MERRA-2 (e, f, g, h)、MODIS (i, j, k, l) 观测的 2008 年 6 月 27 日 (a, e, i)、28 日 (b, f, j)、29 日 (c, g, k)、30 日 (d, h, l) 青藏高原地区日平均 AOD 的空间分布 (灰色空白区域为卫星检索的缺测值)

Fig. 2 Spatial distribution of daily mean AOD in the Tibetan Plateau region on (a, e, i) June 27, (b, f, j) June 28, (c, g, k) June 29, and (d, h, l) June 30, 2008, as simulated by (a, b, c, d) WRF-Chem and observed by (e, f, g, h) MERRA-2 and (i, j, k, l) MODIS (The gray blank areas are missing values from satellite retrieval)

2.2 地面气温

沙尘气溶胶排放与气象因子高度相关。为了进一步评估模拟效果, 在青藏高原上选择喀什、和田、定日、那曲、狮泉河、昌都 6 个站点的 2 m 气温与模拟结果进行比较。图 3 给出模拟气温与观测气温之间的相关性, 分析可知, WRF-Chem 能够有效地捕捉 2 m 温度的变化特征。除了和田站以外, 其余站点的相关系数均在 0.6 以上, 特别是定日站 (图 3c), 拟合优度为 0.91, 相关系数为 0.82, 模拟效果最好。其次在喀什站 (图 3a), 模拟气温略高于观测温度, 相关系数为 0.65, 均方根误差为 3.186。与此同时, 和田站的评估结果相对较差 (图 3b), 这是由于模拟期间该站点的有效数据较少, 受到样本量的影响评估效果相对较差。可见, WRF-Chem 能够有效模拟青藏高原及其周边地区的温度变化, 而且具有可接受的不确定性。

2.3 降水量

图 4 为 IMERG 观测和 WRF-Chem 模拟的 2008 年 6 月 27—30 日青藏高原地区逐 24 h 累计降水量的空间分布。从中可见, 本次降水主要集中发生在喜马拉雅山脉南麓地区, 日降水达 180 mm 以上, 站点降水量统计也表明藏北地区发生持续降水过程 (图 4a—d)。除南坡的降水以外, 高原中部地区也有明显的降水发生。这是因为青藏高原降水大多集中发生在夏季, 受“热力泵效应”的影响 (Wu et al., 2007; Wu et al., 2015; Liu et al., 2020), 大量来自印度洋和孟加拉湾的水汽被抽吸聚集在青藏高原南坡地区, 极易诱发地形降水 (徐祥德等, 2019)。此外, 雅鲁藏布江、藏东南、川西以及高原东北地区也是相对湿润的地区。模式能够较好地捕获降水的发生和变化过程 (图 4e—h), 与卫星观测结果较为一致。降水从

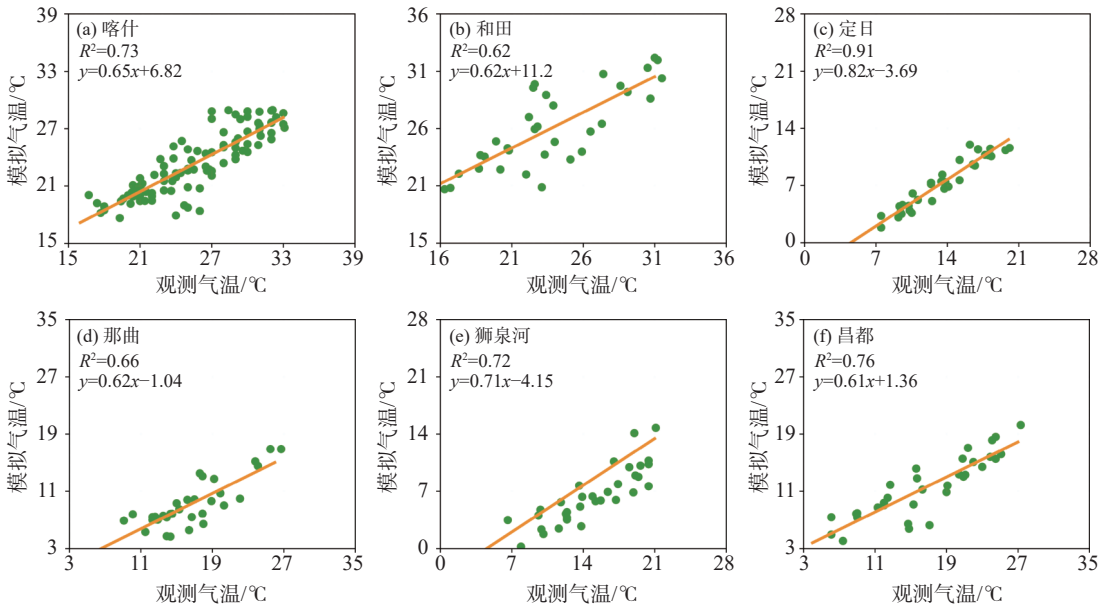


图 3 喀什 (a)、和田 (b)、定日 (c)、那曲 (d)、狮泉河 (e) 和昌都 (f) 站观测和 WRF-Chem 模拟的 2008 年 6 月 27—30 日 2 m 气温拟合 (绿色圆点代表观测结果和模拟结果之间的拟合点, 橙色实线为拟合点的线性回归趋势线)

Fig. 3 Fits of observed and WRF-Chem simulated 2 m temperatures at six stations for (a) Kashgar, (b) Hotan, (c) Tingri, (d) Nagqu, (e) Shiquanhe, and (f) Qamdo during June 27-30, 2008 (Green dots denote the fitted points representing the fit between the observations and the modelled results, and the solid orange line is the linear regression trend line of the fitted points)

6 月 27 日爆发, 至 30 日减弱。WRF-Chem 较好地模拟出了青藏高原中部和东部地区的降水过程, 但在 6 月 28 日模拟略有高估, 且总体模拟结果相比于 IMERG 数据平均误差为正值 (图 4e—h), 这种高估可能与物理参数化方案的不确定性有关 (Barman and Gokhale, 2022)。在其他研究中也发现 WRF-Chem 对高大地形的降水模拟存在略微高估, 且 Sharma 等 (2020) 研究发现 IMERG 观测降水相比地面观测站的降水偏低。由于卫星的分辨率相较模式更粗, 总体来看, 模式很好地抓住了降水过程的空间分布特征。

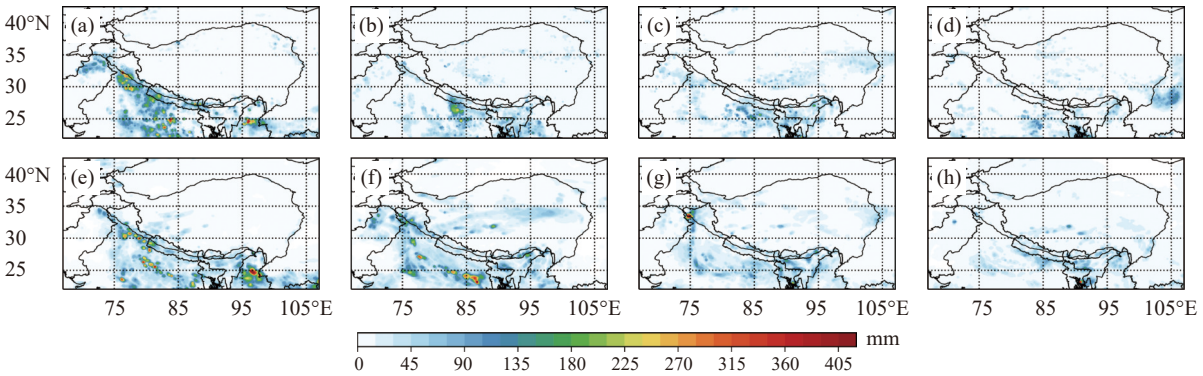


图 4 IMERG (a, b, c, d) 观测和 WRF-Chem (e, f, g, h) 模拟的 2008 年 6 月 27 日 (a, e)、28 日 (b, f)、29 日 (c, g)、30 日 (d, h) 青藏高原地区 24 h 累计降水量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of 24 h precipitation by (a, b, c, d) IMERG observation and (e, f, g, h) WRF-Chem simulation on (a, e) June 27, (b, f) June 28, (c, g) June 29, and (d, h) June 30, 2008

3 沙尘气溶胶对降水和云物理过程的影响

3.1 沙尘气溶胶对不同等级降水量的影响

沙尘气溶胶充当云凝结核和冰核能显著影响降水过程, 通过计算 Dust 试验与 CTL 试验的差异能够分析沙尘气溶胶对不同等级降水量的影响。图 5 给出 2008 年 6 月 27—30 日沙尘气溶胶对不同等级降水的逐 24 h 累计降水量的影响。可见沙尘气溶胶对大雨有显著的促进作用, 使 24 h 累计降水量平均增加 7.17 mm, 约合 20.5% (图 5b)。沙尘气溶胶对中雨的促进作用相对减弱, 使 24 h 累计降水量平均增加 1.25% (0.26 mm) (图 5c)。而对于小雨, 沙尘气溶胶对其有明显的抑制作用, 使 24 h 累计降水量平均减少 13.0% (1.44 mm) (图 5d)。沙尘气溶胶对此次降水

大雨的促进作用明显强于对小雨的抑制作用, 沙尘气溶胶使总降水量平均增加 0.37 mm (4.96%) (图 5a)。在全球其他区域也有类似情形, Adhikari 等 (2022) 对喜马拉雅山脉的一次强对流模拟研究发现, 沙尘气溶胶使 500~3 000 m 山区的降水平均增长 9.6%; Parajuli 等 (2022) 在红海地区模拟分析表明, 沙尘气溶胶对强降水有显著促进作用, 使 10 a 的 8 月日平均降水量增加 6.05%; Luo 等 (2023) 等发现沙尘气溶胶能使华北地区日平均降水增加 9.8%。

考虑沙尘气溶胶对不同等级降水有不同的影响, 只对连续 4 d 降水等级不变的区域进行降水差异的 *t* 检验, 在高原中部、青藏高原北坡、高原西部大部分地区均通过 0.1 显著性水平检验 (图 6b)。这三个区域分别是青藏高原本地源沙尘气溶胶 (Zhang et al., 2024)、塔克拉玛干沙尘气溶胶 (Liu et al., 2015) 和中亚沙尘气溶胶 (Mao et al., 2019) 的主要影响区; 高原南坡的强降水主要受地形抬升影响, 沙尘气溶胶对降水的作用较小, 未通过显著性检验。沙尘气溶胶对降水的影响有明显的区域差异, 在沙尘气溶胶活动较强的区域, 沙尘气溶胶对降水的影响是显著的; 而在沙尘气溶胶活动较弱的区域, 沙尘气溶胶对降水的影响小。对比研究期间平均日累计降水量 (图 6a) 和日累计降水差异 (图 6b) 的空间分布图可知, 沙尘气溶胶对大雨区的降水有明显的促进作用, 对小雨带的降水有抑制作用。平均日累计降水量的高值中心对应降水量增长区域, 降水量最大增长超过 18 mm; 而周围的小雨区则对应着降水差异为负值的地区。

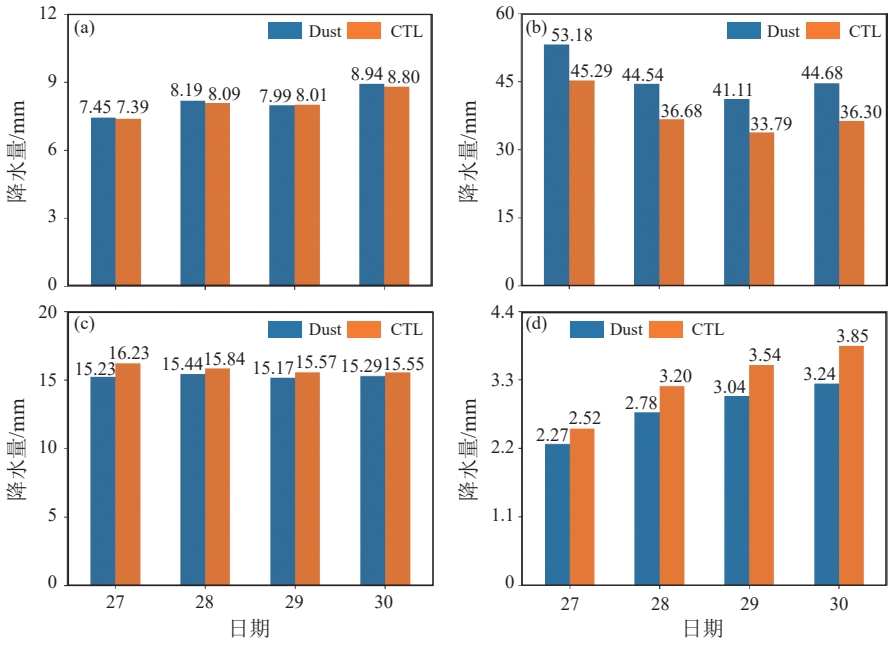


图 5 Dust 试验与 CTL 试验模拟的 2008 年 6 月 27—30 日总降水 (a)、大雨 (b)、中雨 (c)、小雨 (d) 逐 24 h 累计降水量

Fig. 5 The 24 h cumulative precipitation for (a) total, (b) heavy, (c) moderate, and (d) light precipitation simulated by Dust experiment and CTL experiment during June 27-30, 2008

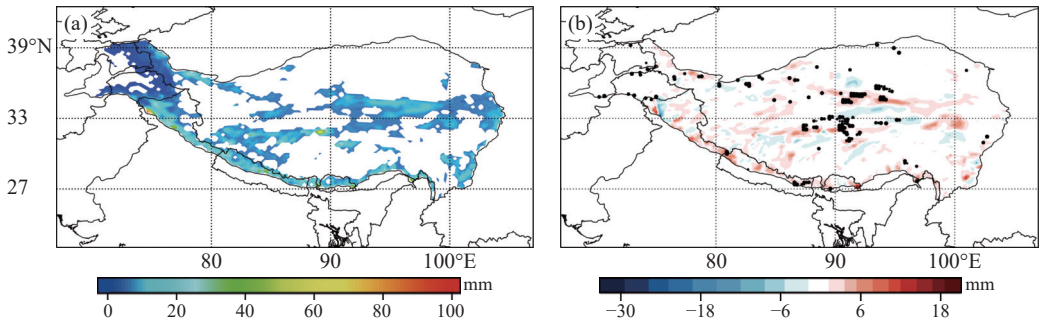


图 6 Dust 试验模拟的 2008 年 6 月 27—30 日平均日累计降水量 (a) 和沙尘气溶胶引起的平均日累计降水差异 (b) 的空间分布 (图 b 圆点区域代表该地区通过 0.1 显著性水平 *t* 检验)

Fig. 6 Spatial distribution of (a) mean daily accumulated precipitation simulated by the Dust experiment and (b) dust aerosol-induced differences in mean daily accumulated precipitation from June 27-30, 2008 (The dotted area represented the area passing the t-test at 0.1 confidence level)

造成沙尘气溶胶对分级降水的影响不同的原因可能与水汽条件有关。在少量的水汽条件下，沙尘气溶胶的存在促进更多的云凝结核生成，云粒子有效半径减小，云滴碰并增长效率降低，相互竞争水汽不利于降水的发生。水汽充足时，云系充分发展，降水效率明显提高。Feng 等 (2023) 对北京一次极端降水的模拟也发现了这一现象，沙尘气溶胶在主要降水阶段促进降水，在结束阶段抑制降水。因此，在不同季节沙尘气溶胶对总降水的影响可能存在差异。

3.2 沙尘气溶胶对垂直速度的影响

为了厘清沙尘气溶胶对不同等级降水影响不同的机理，进一步分析沙尘气溶胶对垂直运动的影响。图 7 展示了沙尘气溶胶对不同等级降水垂直速度的影响，为能更直观体现它们的差异，垂直速度在计算中均乘以 100，当它大于 0 代表上升运动，小于 0 代表下沉运动。对于大雨 (图 7b)，对流层内的大气被上升运动主导，整层大气均呈现上升趋势，沙尘气溶胶显著地促进气流上升，在 6 km 处，沙尘气溶胶使垂直速度增加超过 0.06 m·s^{-1}，促进对流发生，有利于降水生成。这种现象在中雨条件下也同样存在，但其变化相对大雨而言较小，垂直速度最大增加 0.01 m·s^{-1} (图 7c)。然而，对于小雨，2 km 附近是下沉气流主导，沙尘气溶胶的存在轻微促进了 2 km 高度处的下沉运动，抑制了 5 km 以上的大气上升，不利于对流发展，抑制降水的发生 (图 7d)。此外，小雨条件下垂直速度的改变约为大雨和中雨中变化的 1/10。总体而言，沙尘气溶胶对大雨和中雨中上升气流的促进强于小雨中的抑制作用，沙尘气溶胶对总降水中垂直速度的影响被上升运动主导 (图 7a)。模拟计算表明，沙尘气溶胶使小雨条件下的气温升高显著，这也是沙尘气溶胶促进强降水、抑制弱降水的原因之一。以往在其他区域的研究表明沙尘气溶胶的直接辐射效应会加热大气层 (Saidou et al., 2020; Su et al., 2022)，大雨的质量大下降速度快，雨滴不会被完全有效蒸发，而小雨的质量小下落缓慢，在加热过程中能有效蒸发。

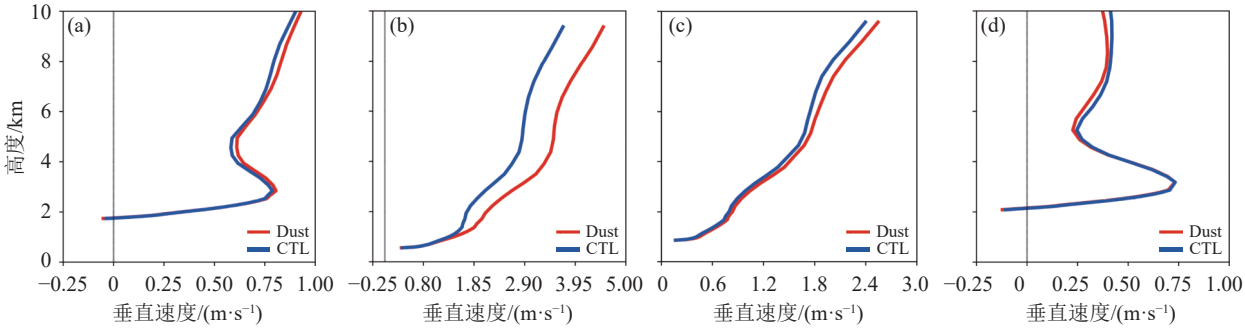


图 7 Dust 试验与 CTL 试验模拟的 2008 年 6 月 27—30 日总降水 (a)、大雨 (b)、中雨 (c)、小雨 (d) 平均垂直速度的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of mean vertical velocities of (a) total precipitation, (b) heavy precipitation, (c) moderate precipitation, and (d) light precipitation simulated by the Dust experiment and the CTL experiment during June 27-30, 2008

3.3 沙尘气溶胶对云物理过程的影响

3.3.1 沙尘气溶胶对水成物混合比的影响

沙尘气溶胶引起的降水改变不仅受到垂直速度等宏观条件的影响，还与云微物理特性的变化有关。图 8 给出 Dust 试验与 CTL 试验模拟期间不同等级降水的平均云水混合比、雨水混合比、云冰混合比、雪混合比和霰混合比的垂直廓线，以进一步分析沙尘气溶胶对不同等级降水的作用机制。可见沙尘气溶胶使不同等级降水下的云水混合比均呈现增加现象，大雨条件下的增长最为显著，增加量的最小值出现在小雨中，大雨条件下的云水混合比的增长约为小雨条件下的 8 倍 (图 8a)。同样，雨水混合比在每个等级的降水中均有所增加，变化趋势与云水混合比一致，沙尘气溶胶在大雨中能使雨水混合比最大增加 0.02 g·kg^{-1} (图 8a、b)，这可能是由于垂直运动的改变造成的。云雨的变化主要发生在对流层的低层，对于云冰混合比，由于高原地区上升运动的增强使更多水汽抬升到高空形成云冰，因此云冰混合比的变化高度主要集中在高空 (图 8c)。而对于雪混合比和霰混合比，大雨条件下，沙尘气溶胶使 5 km 以上的混合比显著增加，但在小雨情况下，雪混合比和霰混合比出现轻微减小 (图 8d、e)。Zhang 等 (2021) 对台湾一次极端降水的研究发现，沙尘气溶胶的存在使雪混合比增长约 60%~70%，Luo 等 (2023) 研究表明沙尘气溶胶能够促进水凝物混合比来影响降水效率，这与本文得出的沙尘气溶胶导致水成物混合比增加的研究结果一致。

3.3.2 沙尘气溶胶对水成物数浓度的影响

冰相水成物的粒子数浓度能够直观反映云中不同粒子的变化。图 9 给出 Dust 试验与 CTL 试验模

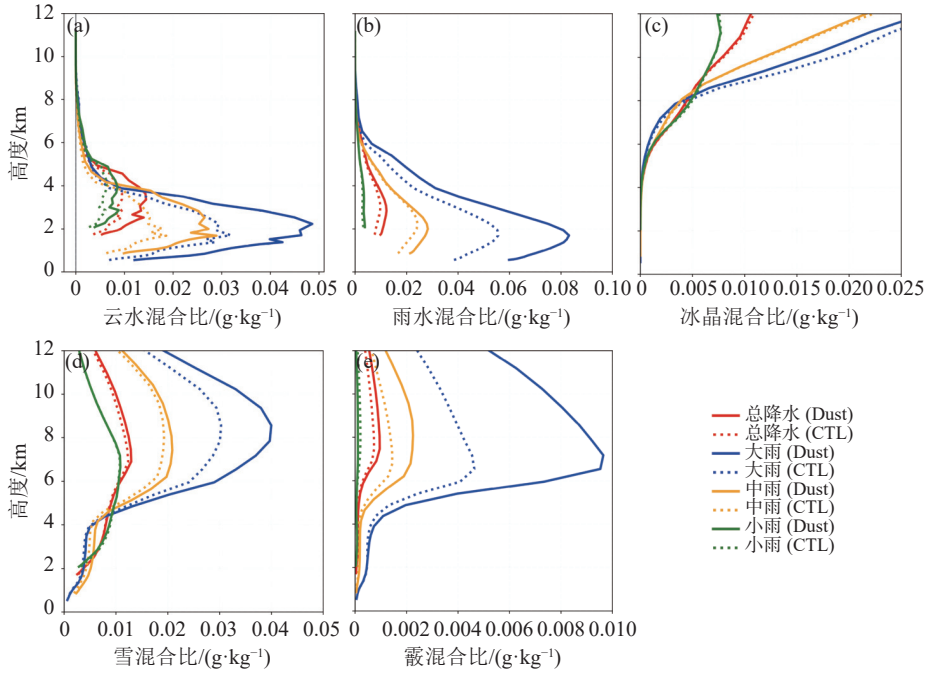


图 8 Dust 试验与 CTL 试验模拟的 2008 年 6 月 27—30 日不同降水等级的云水混合比 (a)、雨水混合比 (b)、冰晶混合比 (c)、雪混合比 (d) 和霰混合比 (e) 的垂直分布

Fig. 8 Vertical distribution of (a) cloud water mixing ratio, (b) rain mixing ratio, (c) ice mixing ratio, (d) snow mixing ratio, and (e) graupel mixing ratio at different-grade precipitation simulated by the Dust experiment and the CTL experiment during June 27-30, 2008

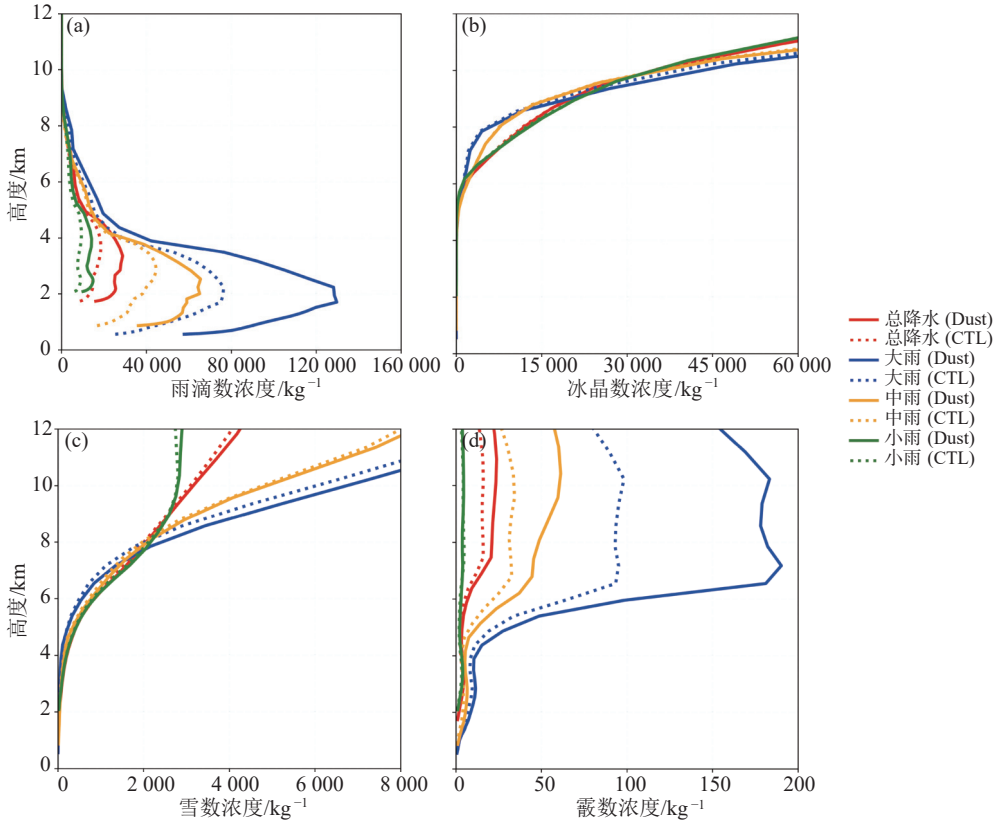


图 9 Dust 试验与 CTL 试验模拟的 2008 年 6 月 27—30 日不同降水等级的雨滴数浓度 (a)、冰晶数浓度 (b)、雪数浓度 (c)、霰数浓度 (d) 的垂直分布

Fig. 9 Vertical distribution of (a) rain number concentration, (b) ice number concentration, (c) snow number concentration, (d) graupel number concentration at different-grade precipitation simulated by the Dust experiment and CTL experiment during June 27-30, 2008

拟的不同等级降水下雨滴、冰晶、雪和霰的粒子数浓度的垂直分布。可见沙尘气溶胶的增加显著促进了雨滴数浓度的增长，大雨中的雨滴数浓度的增长最剧烈，在 2 km 附近，Dust 试验相较 CTL 试验雨滴数浓度增加 45 567 kg^{-1} (图 9a)，这也是沙尘气溶胶对大雨的影响最为剧烈的原因。冰晶数浓度的增长主要出现在对流层高层 (图 9b)，表明沙尘气溶胶在云中充当冰核，在水汽充足的情况下，冰核不断碰并增长，最终下落形成降水。在小雨条件下，增加的沙尘气溶胶竞争有限的水汽，尽管冰晶数浓度增加，但是难以达到下落的尺寸。雪和霰的数浓度变化同混合比分布一致 (图 9c、d)，王雨等 (2017)在阿克苏地区的模拟同样表明沙尘气溶胶充当冰核粒子时冰核浓度增加会使冰晶和雪的质量混合比和数浓度有大幅度的增加。因此，从云微物理特性来看，沙尘气溶胶促进了冰晶和雨滴的生成，特别是在水汽充足的大雨条件下，使粒子达到一定尺寸最终发生降水过程。

3.3.3 沙尘气溶胶对云特性的影响

沙尘气溶胶在云的形成过程中起到关键作用。图 10 给出沙尘气溶胶在不同等级降水下引起的云顶温度和云分数的差异。可见沙尘气溶胶在不同等级降水条件下均会使云顶温度降低，这与朱平等 (2014)利用风云二号卫星资料分析的青藏高原暴雨发生时云顶温度变化趋势基本一致。其次，小雨的云顶温度变化最小，平均降低约为−0.83 ℃。云顶温度的降低代表着云在不断发展，其变化趋势同降水量的变化一致，其中 6 月 28 日和 29 日的降水差异更显著。除此之外，沙尘气溶胶引起对流层低层和高层的云分数增加，10 km 以内的大气层中，大雨条件下的云分数平均增加 2.18%。不同类型降水过程中云的内

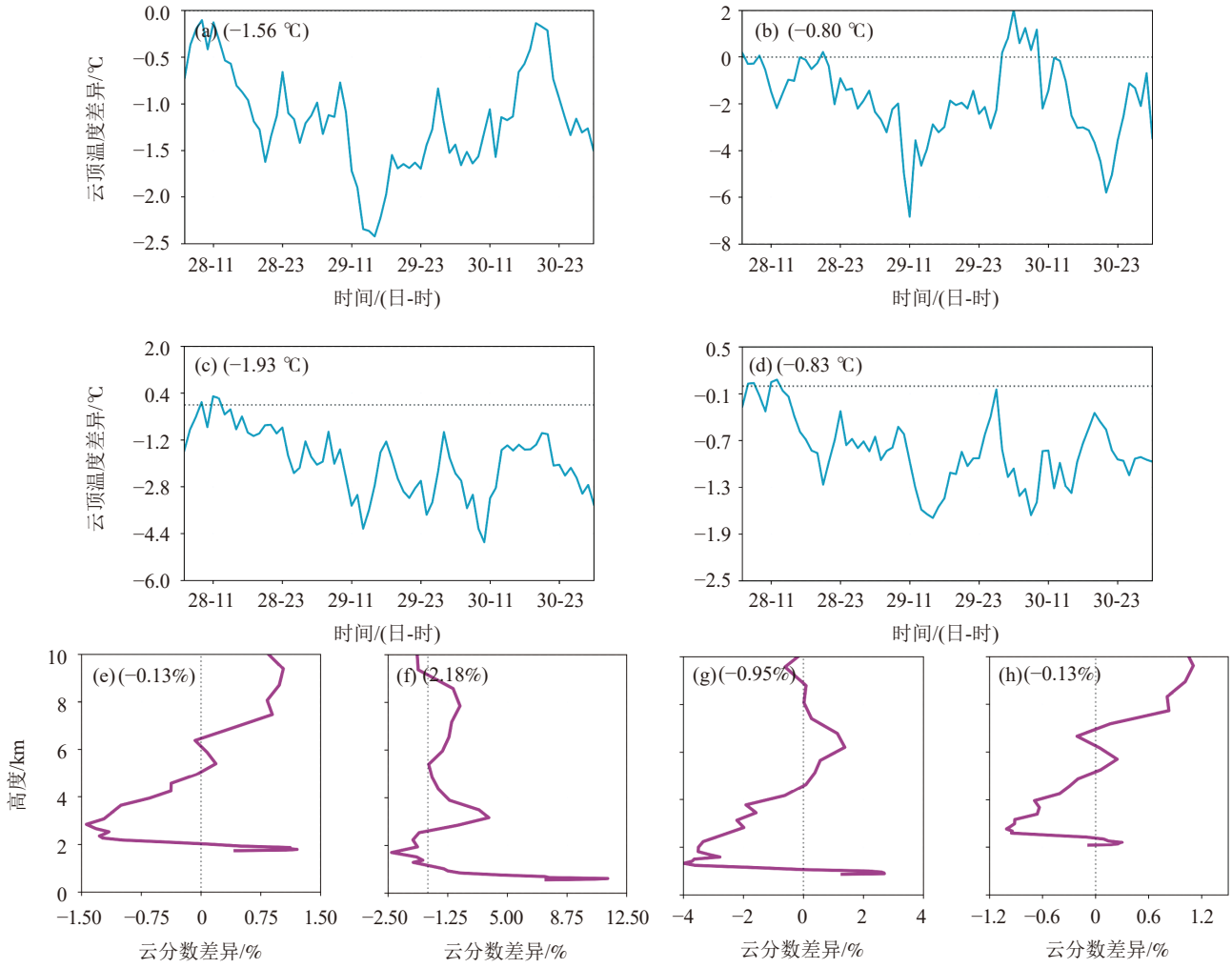


图 10 沙尘气溶胶在总降水 (a, e)、大雨 (b, f)、中雨 (c, g)、小雨 (d, h) 条件下引起的云顶温度差异的时间序列 (a, b, c, d) 和云分数差异的垂直分布 (e, f, g, h) (左上角数字代表沙尘气溶胶引起的区域-时间平均云顶温度差异和区域-时间-垂直平均云分数差异)

Fig. 10 Time series of (a, b, c, d) cloud top temperature differences and (e, f, g, h) the vertical distribution of cloud fractions differences induced by dust aerosol on (a, e) total precipitation, (b, f) heavy precipitation, (c, g) moderate precipitation, (d, h) light precipitation (The numbers in the upper-left corner represent the area-time-averaged cloud top temperature differences and area-time-vertical-averaged cloud fraction differences induced by the dust aerosol)

部结构差异很大, 青藏高原上空的冰相云主导了该地区降水的形成 (Wu et al., 2023)。总体来说, 沙尘气溶胶使云顶温度降低, 增加云分数, 延长云的寿命。

综上所述, 青藏高原沙尘气溶胶通过促进强降水条件中云的发展, 增强垂直上升运动、增加雨滴浓度来增强降水。而对弱降水, 沙尘气溶胶通过抑制云的发展, 减弱上升运动、减弱水成物浓度、抑制雨滴的形成而减弱降水。

4 结论与讨论

利用 WRF-Chem 数值模式结合多种卫星和再分析资料以及地面观测数据, 研究了沙尘气溶胶对青藏高原地区一次降水过程的贡献。通过与多源数据的对比表明, 模式能较好地再现沙尘气溶胶和降水的时空分布特征, 并得出以下主要结论:

(1) 沙尘气溶胶对不同等级的降水有着不同的影响。沙尘气溶胶对大雨有较强促进作用, 使其 24 h 累计降水量平均增加 20.5% (7.17 mm); 对中雨的促进作用较弱, 使其增长量为 1.25% (0.26 mm); 对小雨为抑制作用, 使其降水量平均减少 13.0% (1.44 mm)。沙尘气溶胶对强降水的促进作用强于对弱降水的抑制作用, 24 h累计降水量平均增加 4.96% (0.37 mm)。

(2) 沙尘气溶胶对不同等级降水的影响机制不同。从宏观条件来看, 沙尘气溶胶能使大雨情况下的垂直速度增加, 最大增加超过 0.06 $m \cdot s^{-1}$, 上升运动增强, 对流活动更加剧烈, 因此大雨增量最大。沙尘气溶胶使小雨的垂直速度减弱, 抑制其上升运动, 不利于对流发展, 且沙尘气溶胶还使小雨条件下的气温升高最显著, 弱降水下落过程中易被有效蒸发, 因此沙尘气溶胶抑制小雨。

(3) 沙尘气溶胶对云微物理特性等微观条件的影响是造成降水差异的主要原因。沙尘气溶胶使云水混合比和雨水混合比增加, 特别使大雨条件下的混合比增长约为小雨的 8 倍。其次, 沙尘气溶胶在云中充当冰核粒子, 不同等级降水下的冰晶粒子均有所增加。沙尘气溶胶倾向于降低云顶温度, 总降水的云顶温度平均降低 1.56 ℃。沙尘气溶胶增加高云分数, 延长云的寿命。因此水汽充足的情况下, 云不断发展有利于降水形成, 而水汽较少的情况下, 沙尘气溶胶需要竞争有限的水汽且冰晶粒子需发展到一定尺寸才能形成降水, 故抑制弱降水过程。

本文基于高原夏季降水个例分析了沙尘气溶胶对分级降水的不同影响及其原因, 在实际气象预报和数值模拟中需要充分考虑沙尘气溶胶-降水的相互作用, 这对理解青藏高原地区的气候变化、极端天气事件具有重要意义。在未来还可以通过不同季节的个例或长期模拟的统计分析得到沙尘气溶胶影响降水的季节或共性特征, 进一步增强对沙尘气溶胶影响降水的物理机制的认识。

参考文献 (References):

陈权亮,刘皓,胡淼,等.2024.青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展[J].暴雨灾害,43(3):255−265. Chen Q L, Liu H, Hu M, et al. 2024. A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):255−265 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−216

陈丽,银燕,杨军,等.2007.沙尘气溶胶对云和降水影响的模拟研究[J].南京气象学院学报,30(5):590−600. Chen L, Yin Y, Yang J, et al. 2007. Effects of sand dust particles on cloud and precipitation: a numerical study [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology,30(5):590−600 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2007.05.004

华维,邓浩,夏昌基,等.2024.青藏高原水循环中高原低涡及多季风交汇的研究进展[J].沙漠与绿洲气象,18(2):1−11. Hua W, Deng H, Xia C J, et al. 2024. Advance of research on plateau vortex and multi-monsoon interaction in water cycle of Tibetan Plateau [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(2):1−11 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.02.001

彭杰.2015.上海及周边地区气溶胶对云和降水的影响初探[J].暴雨灾害,34(4):324−334. Peng J. 2015. Tentative discussion on the impact of aerosol on cloud and precipitation over Shanghai and its surrounding areas [J]. Torrential Rain and Disasters,34(4):324−334 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2015.04.005

苏珍,刘宗香,王文悌,等.1999.青藏高原冰川对气候变化的响应及趋势预测[J].地球科学进展,14(6):607−612. Su Z, Liu Z X, Wang W T, et al. 1999. Glacier fluctuations responding to climate change and forecast of its tendency over the Qinghai-Tibet plateau [J]. Advances in Earth Sciences,14(6):607−612 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001−8166.1999.06.0607

汪庆丽,范广洲.2024.青藏高原地表蒸发与高原低涡降水的联系[J].高原山地气象研究,44(4):21−29 Wang Q L, Fan G Z. 2024. Relationship between evaporation on Tibetan Plateau and the Tibetan Plateau vortex precipitation [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 44(4):21−29 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.04.003

王雨,银燕,陈倩等.2017.沙尘气溶胶作为冰核对阿克苏地区一次多单体型强对流风暴降水及其微物理过程影响的数值模拟研究[J].大气科学,41(1):15−29. Wang Y, Yin Y, Chen Q, et al. 2017. A numerical study of the effect of aerosols acting as ice nuclei on the precipitation and microphysical processes in a multi-size convective storm occurring in Aksu in Xinjiang, Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,41(1):15−29 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1605.15246

徐祥德,马耀明,孙婵,等.2019.青藏高原能量、水分循环影响效应[J].中国科学院院刊,34(11):1293−1305. Xu X D, Ma Y M, Sun C, et al. 2019. Effect of energy and water circulation over tibetan plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,34(11):1293−1305 (in Chinese). doi:10.16418/j.issn.1000−3045.2019.11.012

张艳晴,高怡,许丽人,等.2024.气溶胶效应对北京一次暴雨过程影响的

数值模拟研究[J].暴雨灾害,43(6):657−667 Zhang Y Q, Gao Y, Xu L R, et al. 2024. Numerical analysis of aerosol effects on a heavy precipitation event in Beijing [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6): 657−667 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−235

张镱锂,刘林山,李炳元等.2021.青藏高原范围数据集 2021 与 2014 年版比较研究[J].全球变化数据学报,5(3):322−332. Zhang Y L, Liu L S, Li B Y, et al. 2021. Comparison of boundary datasets covering Tibetan Plateau between 2021 and 2014 Versions [J]. Journal of Global Change Data & Discovery,5(3):322−332 (in Chinese). doi:10.3974/geodp.2021.03.10

朱平,李生辰,王振会,等.2014.青藏高原东部暴雨云团局地强降水响应特征[J].遥感学报,18(2):405−431. Zhu P, Li S C, Wang Z H, et al. 2014. Characteristics of rainstorm cloud clusters to local heavy precipitation over the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Remote Sensing,18(2):405−431 (in Chinese). doi:10.11834/jrs.20143069

Adhikari P, Mejia J F. 2022. Impact of transported dust aerosols on precipitation over the Nepal Himalayas using convection-permitting WRF-Chem simulation [J]. Atmospheric Environment: X, 15:100179. doi:10.1016/j.aeaoa.2022.100179

Barman N, Gokhale S. 2022. Aerosol influence on the pre-monsoon rainfall mechanisms over North-East India: a WRF-Chem study [J]. Atmospheric Research,268:106002. doi:10.1016/j.atmosres.2021.106002

Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Monthly weather review, 129(4):569−585.doi:10.1175/1520−0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2

Choobari O A. 2018. Impact of aerosol number concentration on precipitation under different precipitation rates [J]. Meteorological Applications,25(4):596−605. doi:10.1002/met.1724

Creamean J M, Suski K J, Rosenfeld D, et al. 2013. Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the western US [J]. Science,339(6127):1572−1578. doi:10.1126/science.1227727

Cuo L, Zhang Y. 2017. Spatial patterns of wet season precipitation vertical gradients on the Tibetan Plateau and the surroundings [J]. Scientific Reports,7(1):5057. doi:10.1038/s41598−017−05345−6

Cuo L, Zhang Y, Zhu F, et al. 2014. Characteristics and changes of streamflow on the Tibetan Plateau: a review. Journal of Hydrology [J]. Regional Studies,2:49−68. doi:10.1016/j.ejrh.2014.08.004

Davis M E, Thompson L G, Yao T, et al. 2005. Forcing of the Asian monsoon on the Tibetan Plateau: Evidence from high - resolution ice core and tropical coral records [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,110:D04101. doi:10.1029/2004JD004933

Fan K, Xie Z M, Xu Z Q. 2016. Two different periods of high dust weather frequency in northern China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,9(4):263−269. doi:10.1080/16742834.2016.1176300

Fang X, Han Y, Ma J, et al. 2004. Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: a case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa [J]. Chinese Science Bulletin,49:953−960. doi:10.1007/BF03184018

Feng T, Yuan T, Cao J, et al. 2023. The influence of dust on extreme precipitation at a large city in North China [J]. Science of The Total Environment,16:5890. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165890

Gillette D A, Passi R. 1988. Modeling dust emission caused by wind erosion [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,93:14233−14242. doi:10.1029/JD093iD11p14233

Grell G A, Dévényi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques [J]. Geophysical Research Letters,29(14):381−384. doi:10.1029/2002GL015311

Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model [J]. Atmospheric Environment, 39(37):6957−6975. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.04.027

Guenther A, Karl T, Harley P, et al. 2006. Estimates of global terrestrial isopreneemissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,6(11): 3181−3210. doi:10.5194/acp−6−3181−2006

Hanna S R, Yang R, Yin X. 2000. Evaluations of numerical weather prediction (NWP) models from the point of view of in-puts required by atmospheric dispersion models [J]. International Journal of Environment and Pollution,14(1-6):98−105. doi:10.1504/IJEP.2000.000530

Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Monthly weather review,134(9):2318−2341. doi:10.1175/MWR3199.1

Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. 2006. Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing,44(11):3180−3195. doi:10.1109/TGRS.2006.879540

Hu Z, Huang J, Zhao C. et al. 2020. Modeling dust sources, transport, and radiative effects at different altitudes over the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,20(3):1507−1529. doi:10.5194/acp−20−1507−2020

Huffman G J, Stocker E F, Bolvin D T, et al. 2019. GPM IMERG early precipitation L3 half hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06 [J]. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC): Greenbelt,134:D6. doi:10.5067/GPM/IMERG/3B−HH−E/06

Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 113:D13. doi:10.1029/2008JD009944

Immerzeel W W, Van Beek L P H, Bierkens M F P. 2010. Climate change will affect the Asian water towers [J]. science,328(5984):1382−1385. doi:10.1126/science.118318

Janssens-Maenhout G, Crippa M. 2015. HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,15(19):11411−11432. doi:10.5194/acp−15−11411−2015

Jia B, Wang L, Xie Z. 2023. Increasing lake water storage on the Inner Tibetan Plateau under climate change [J]. Science Bulletin,68(5):489−493. doi:10.1016/j.scib.2023.02.018

Jia R, Liu Y, Chen B, et al. 2015. Source and transportation of summer dust over the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Environment,123:210−219. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.10.038

Jin Q, Wei J, Yang Z L, et al. 2015. Consistent response of Indian summer monsoon to Middle East dust in observations and simulations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,15(17):9897−9915. doi:10.5194/acp−15−9897−2015

Liu Y, Lu M, Yang H, et al. 2020. Land-atmosphere-ocean coupling associated with the Tibetan Plateau and its climate impacts [J]. National Science Review,7(3):534−552. doi:10.1093/nsr/nwaa011

Liu Y, Sato Y, Jia R, et al. 2015. Modeling study on the transport of summer dust and anthropogenic aerosols over the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,15(21):12581−12594. doi:10.5194/acp−15−12581−2015

Luo R, Liu Y, Luo M, et al. 2023. Dust effects on mixed-phase clouds and precipitation during a super dust storm over northern China [J]. Atmospheric Environment,313:120081. doi:10.1016/j.atmosenv.2023.120081

Mao R, Hu Z, Zhao C, et al. 2019. The source contributions to the dust over the Tibetan Plateau: A modelling analysis [J]. Atmospheric Environment,214:116859. doi:10.1016/j.atmosenv.2019.116859

Morrison H, Thompson G, and Tatarskii, V. 2009. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes [J]. Monthly weather review,137(3):991−1007. doi:10.1175/2008MWR2556.1

Parajuli S P, Stenchikov G L, Ukhov A, et al. 2022. Effect of dust on rainfall over the Red Sea coast based on WRF-Chem model simulations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,22(13):8659−8682. doi:10.5194/acp−22−8659−2022

Randles C, Da Silva A, Buchard V. et al. 2017. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation [J]. Journal of climate,30(17):6823−6850. doi:10.1175/JCLI−D−16−0609.1

Saidou A A, Ma X, Sha T. 2020. Dust radiative forcing and its impact on surface energy budget over West Africa [J]. Scientific Reports,10(1):12236. doi:10.1038/s41598−020−69223−4

Sharma S, Khadka N, Hamal K, et al. 2020. How accurately can satellite products (TMPA and IMERG) detect precipitation patterns, extremities, and drought across the Nepalese Himalaya? [J]. Earth and Space Science,7(8):e2020EA001315. doi:10.1029/2020EA001315

Su S, Wang J, Yin Z. 2022. Understanding the daytime and nighttime impacts of dust aerosols on surface energy and meteorological fields in northwest China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,127(24):e2022JD037137. doi:10.1029/2022JD037619

Sun C, Xu X D, Wang P J, et al. 2022. The warming and wetting ecological environment changes over the Qinghai-Tibetan Plateau and the driving effect of the Asian Summer Monsoon [J]. Journal of Tropical Meteorology,28(1):95−108. doi:10.46267/j.1006−8775.2022.008

Tsarpalis K, Katsafados P, Papadopoulos A. 2020. Assessing desert dust indirect effects on cloud microphysics through a cloud nucleation scheme: a case study over the Western Mediterranean [J]. Remote Sensing,12(21):3473. doi:10.3390/rs12213473

Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al. 2008. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia [J]. Geophysical Research Letters,35(14):L14702. doi:10.1029/2008GL034330

Wang X, Pang G, Yang M. 2018. Precipitation over the Tibetan Plateau during recent decades: a review based on observations and simulations [J]. International Journal of Climatology,8(3):1116−1131. doi:10.1002/joc.5246

Wiedinmyer C, Akagi S K, Yokelson R J, et al. 2011. The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning [J]. Geoscientific Model Development,4(3):625−641. doi:10.5194/gmd−4−625−2011

Wu G, Liu Y, Zhang Q, et al. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate [J]. Journal of Hydrometeorology,8(4):770−789. doi:10.1175/JHM609.1

Wu G, Duan A, Liu Y, et al. 2015. Tibetan Plateau climate dynamics: recent research progress and outlook [J]. National Science Review,2(1):100−116. doi:10.1093/nsr/nwu045

Wu Y, Gao J, Zhao A. 2023. Cloud properties and dynamics over the Tibetan Plateau-A review [J]. Earth-Science Reviews,2023:104633. doi:10.1016/j.earscirev.2023.104633

Yuan T, Chen S, Huang J. et al. 2019. Influence of dynamic and thermal forcing on the meridional transport of Taklimakan Desert dust in spring and summer [J]. Journal of Climate,32(3):749−767. doi:10.1175/JCLI−D−18−0361.1

Zaveri R A, Easter R C, Fast J D, et al. 2008. Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry (MOSAIC) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,113:D13204. doi:10.1029/2007JD008782

Zaveri R A, Peters L K. 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,104(D23):30387−30415, doi:10.1029/1999JD900876

Zhang D, Liu D, Luo T, et al. 2015. Aerosol impacts on cloud thermodynamic phase change over East Asia observed with CALIPSO and CloudSat measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,120(4):1490−1501. doi:10.1002/2014JD022630

Zhang Q, Yuan R, Singh V P. et al. 2022. Dynamic vulnerability of ecological systems to climate changes across the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Ecological Indicators,134:108483. doi:10.1016/j.ecolind.2021.108483

Zhang Y, Yu F, Luo G, et al. 2021. Impacts of long-range-transported mineral dust on summertime convective cloud and precipitation: a case study over the Taiwan region [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,21(23):17433−17451. doi:10.5194/acp−21−17433−2021

Zhang Z, Liang J, Ji H, et al. 2024. Quantifying mineral dust emissions on the Tibetan Plateau with a modified dust source map [J]. Geophysical Research Letters,51(1):e2023GL107042. doi:10.1029/2023GL107042

(责任编辑　唐永兰)