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

青海“8·18”短时强降水过程的水汽特征分析

安琳 权晨 沈晓燕 申燕玲 管琴 王惠平 保广裕

Analysis of water vapor characteristics of the "8·18" short-duration heavy rainfall event in Qinghai

AN Lin，QUAN Chen，SHEN Xiaoyan，SHEN Yanling，GUAN Qin，WANG Huiping，BAO Guangyu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-240

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

“18·8”广东季风低压持续性特大暴雨水汽输送特征

Analysis of water vapor transport characteristics of a monsoon low-pressure continuous heavy rain event at the end of August 2018 in Guangdong area

暴雨灾害. 2019, 38(6): 587-596 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.06.003

南疆西部暴雨过程水汽来源及输送特征

Characteristics of water vapor source and transport during rainstorm in western southern Xinjiang

暴雨灾害. 2022, 41(5): 544-555 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-142

贵州铜仁一次持续性暴雨水汽收支定量分析

Quantitative analysis of water vapor budget of a persistent rainstrom event in Tongren of Guizhou Province

暴雨灾害. 2023, 42(6): 648-658 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-064

四川盆地东北部三次持续性暴雨过程水汽输送特征分析

Analysis of water vapor transport characteristics of the three persistent rainstorm processes in northeastern Sichuan basin

暴雨灾害. 2020, 39(3): 234-240 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.003

湖南一次持续性暴雨过程的水汽输送与收支特征

Analysis ontransport and budget characteristics ofwater vapor in a sustained heavy rainevent in Hunan Province

暴雨灾害. 2021, 40(5): 513-522 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.008

一次极端短时强降水过程中FY-3微波湿度计观测特征分析

Analysis of observation characteristic of FY-3 microwave hygrometer during an extreme short-term heavy precipitation process

暴雨灾害. 2020, 39(3): 300-305 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.011

关注微信公众号，获得更多资讯信息

安琳,权晨,沈晓燕,等.2025.青海“8·18”短时强降水过程的水汽特征分析[J].暴雨灾害,44(1):41−51. AN Lin, QUAN Chen, SHEN Xiaoyan, et al. 2025. Analysis of water vapor characteristics of the "8·18" short-duration heavy rainfall event in Qinghai [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):41−51 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−240

青海“8·18”短时强降水过程的水汽特征分析

安琳[1,2],权晨[1,4],沈晓燕[1,4],申燕玲[1,4],管琴[1,4],王惠平[1,4],保广裕[3]

(1. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001; 2. 青海省气象灾害防御技术中心, 西宁 810001;
3. 青海省气象服务中心, 西宁 810001; 4. 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁 810001)

摘　要: 2022 年 8 月 17—18 日青海省东北部出现一次短时强降水事件, 造成多个市 (县) 出现重大人员伤亡和财产损失。本文利用青海省东北部 513 个国家和区域气象观测站的逐时观测资料、地基全球导航卫星系统 (GNSS) 反演的水汽资料以及 ERA5 再分析资料, 分析此次短时强降水过程的大气可降水量 (PWV)、水汽输送及收支特征。结果表明: (1) PWV 的演变对强降水发生和结束有较好的指示意义, 强降水发生前 1~2 h, PWV 出现急升, 直至达到峰值; 而强降水过程结束前 1~2 h, PWV 出现突降。(2) 强降水发生前, 青海省东北部整层水汽辐合量急剧增大, 同时 500 hPa 垂直上升速度增强, 为强降水形成提供了很好的水汽和动力条件。(3) 高空西风水汽输送是此次强降水过程的主要水汽输送通道, 且北部发生强降水前期, 水汽条件的改善主要依赖于低层东风和南风水汽输送, 而南部发生强降水的水汽输送除上述外, 还依赖于低层北风水汽输送。

关键词: GNSS/MET 可降水量; 水汽输送; 水汽收支

中图法分类号: P458　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−240

Analysis of water vapor characteristics of the "8·18" short-duration heavy rainfall event in Qinghai

AN Lin[1,2], QUAN Chen[1,4], SHEN Xiaoyan[1,4], SHEN Yanling[1,4],
GUAN Qin[1,4], WANG Huiping[1,4], BAO Guangyu[3]

(1. *Qinghai Institute of Meteorological Science*, *Xining* 810001; 2. *Meteorological Disaster Prevention Technology Center in Qinghai Province*, *Xining* 810001; 3. *Qinghai Meteorological Service Center*, *Xining* 810001; 4. *Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai Province*, *Xining* 810001)

Abstract: A short-duration heavy rainfall event occurred in northeast Qinghai Province from August 17 to 18, 2022, causing serious casualties and property loss in several cities (counties). In this study, the characteristics of atmospheric precipitable water vapor (PWV), water vapor transport and budget of this short-duration heavy rainfall process were discussed based on the hourly rain gauge records in the northeast region of Qinghai Province, water vapor dataset from ground-based Global Navigation Satellite System Meteorological areObserving (GNSS/MET) and the ERA5 reanalysis data. The results are as follows. (1) The evolution of PWV was a good indicator for the occurrence and end of heavy precipitation. There was a sharp rise in PWV 1~2 h before the heavy rainfall, continuing to reach its peak. While the dramatic decrease in PWV indicates the end of the precipitation process. (2) Before the occurrence of heavy rainfall, the water vapor convergence in the study area increased dramatically, accompanied by an increase in the vertical ascending motion of the airflow at 500 hPa, which laid the foundation for the formation of heavy rainfall. (3) The upper westerly water vapor transport was the main water vapor transport channel during the heavy rainfall process. The improvement of water vapor conditions in the early stage of heavy rainfall in the northern part of the study area mainly depended on the low-level easterly and southerly winds water vapor transport. While in the southern part of the study area, in addition to the factors mentioned above, it also depends on the low-level northerly wind water vapor transport.

Key words: GNSS/MET precipitable water vapor; water vapor transport; water vapor budget

收稿日期: 2023−11−09; **定稿日期**: 2024−03−25

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1302601); 青海省自然科学基金项目 (2023-SF-111); 青海省气象局“揭榜挂帅”项目 (OXGS2023-06); 四川省重点实验室开放研究基金项目 (SZKT202211); 西宁市科技计划项目 (2023-M-06)

第一作者: 安琳, 主要从事天气预报及其相关方法研究。E-mail: al19961212@163.com

通信作者: 权晨, 主要从事天气预报及其相关方法研究。E-mail: quanchen007@sina.com

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

引　言

青海省位于青藏高原东北部，属于高原大陆性气候。近十几年来，青海省夏季极端降水事件明显增多，特别是短时强降水事件频发。短时强降水(1 h 降水量≥20 mm) (俞小鼎，2013) 表现为历时短、强度大的特点，容易导致山体崩塌、滑坡等局地而短促的地质灾害 (Shieh et al.，2009)，往往对农业、畜牧业、水利、交通、建筑及人民生命财产等造成严重影响，已成为青海省最主要的灾害性天气之一 (李生辰等，2022)。例如，2013 年 8 月 20 日，青海省海西州乌兰县发生的短时强降水引发洪水，造成 24 人死亡；2018 年 8 月 2—4 日，青海省海东市乐都县连续 2 d 出现多次短时强降水，导致 2 人死亡，直接经济损失达 1 613.9 万元。

短时强降水是以大尺度环境场为背景，大尺度环境参数配置影响或制约着中小尺度系统的发生发展及演变，进而由中小尺度驱动 (周泓等，2024)。孙继松 (2017) 指出短时强降水一般由对流降水形成，引发短时强降水的要素主要包括水汽条件、层结不稳定、垂直风切变等，近年来，许多学者对此进行了研究 (常煜等，2018；张青梅等，2022；朱平和肖建设，2022)。如针对北京市“7·21”暴雨过程的研究，分析表明，深厚的湿层、强的低空急流、高的地面露点温度和异常大的可降水量为暴雨区提供了比周边更有利的环境条件，东南风或偏南风低空急流的建立和加强为华北地区输送了充足的水汽，为此次特大暴雨的发生提供了极为关键的条件，同时来自孟加拉湾和南海的水汽输送对这次强降水起到了明显的增强作用 (俞小鼎等，2012；王婧羽等，2014)；王宝鉴等 (2016) 对甘肃陇南一次暴雨过程研究表明，不稳定层结和低层垂直风切变等在强对流触发和维持中具有重要作用。这些研究成果对深入了解不同地区、不同天气过程和不同大气环境下的短时强降水的成因、触发和维持机制提供了坚实的基础。其中，大气水汽作为表征极端强降水的主要参量，其在相变过程中通过吸收或释放大量凝结潜热来影响地面和空气温度，对于强降水天气的发生、发展和演化起着关键作用 (Liu et al.，2020；郑志卿，2023)。针对强降水天气过程的水汽特征，较多专家也进行了研究 (Tian et al.，2015；Zhang et al.，2022；闫伟等，2024)，其中，有学者利用基于拉格朗日方法的 HYSPLIT 轨迹模式模拟分析了暴雨区的水汽输送轨迹，指出了不同源地的水汽贡献 (孙颖姝等，2019；李如琦等，2022)，也有学者分析了暴雨过程水汽输送和收支特征 (杨柳等，2018；李超等，2022；付伟等，2024)。这些研究成果在不同程度上揭示了各地区极端降水期间水汽输送和聚集机制。

2022 年 8 月份青海省有 10 站次的日降水量突破或接近 1961 年以来同期极值，暴雨洪涝强度为历史罕见，尤其是 8 月 17—18 日(以下简称为“8·18”短时强降水过程)青海省东北部地区出现的一次典型的短时强降水事件。期间，西宁、海东、海北、黄南等多个市 (州) 出现暴雨，造成重大人员伤亡和财产损失，其中，18 日 00 时 (北京时，下同) 左右，西宁市大通县青山、青林乡政府站出现的短时强降水引发山洪灾害，导致 26 人遇难、5 人失踪。此次山洪灾害是前期持续性降水和当日短时强降水耦合形成的自然灾害，具有影响范围大、受灾区集中、损失重等特点 (和海霞和李博，2023)。青海省位于西北干旱区，缺少河流、湖泊等水源，其外部输送是水汽重要来源，水汽输送异常是影响降水异常的主要原因 (徐栋等，2016)。黄玉霞等 (2006) 通过对青海夏季降水异常及其水汽输送特征的分析表明，整层水汽通量自西向东界增加，水汽收支整体呈增加趋势。

青海省强降水天气具有很强的区域性和局地性特点，以往对其的研究主要集中在气候特征 (李双行等，2024)、天气形势配置 (张青梅等，2022；谢天蓉等，2023) 及成因分析 (马琼等，2023) 等方面，针对短时强降水天气的水汽含量演变、水汽输送及收支等特征尚属空白。近期，李泽雯等 (2024) 以包含对流层高层气温特征的三维环流结构为切入点，分析了此次“8·18”短时强降水特征，其研究结果也尚未详细涉及降水落区内水汽输送和收支等特征。本文在前人研究基础上着重分析了 2022 年青海“8·18”短时强降水过程的水汽条件，包括水汽含量演变、水汽输送、水汽辐合及水汽收支等特征，以加深对高原东部短时强降水天气的认识，进而为此类短时强降水天气预报预警提供科学依据。

1　资料与方法

1.1　资料说明

本文选取青海省东北部 (99.0°—103.2°E，35.0°—39.0°N) 作为研究区域，包含西宁、海东市、海北、海南州及黄南州北部 (尖扎县和同仁县)，如图 1 中红框所示。资料包括：(1) 国家气象信息中心下发的研究区域内共计 513 个气象站 (包含国家气象站和区域气象站，简称国家站和区域站) 的逐小时降水资料。(2) 来源于青海省“天擎”大数据云平台的地基全球导航卫星系统气象观测 (GNSS/MET) 反演的站点逐小时柱积分大气可降水量 (PWV) 产品。(3) 欧洲中期

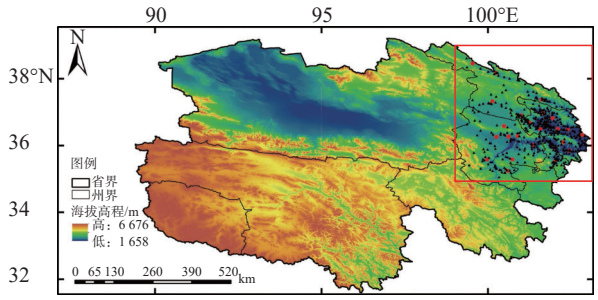


图 1 研究区域 (红色方框) 及区域内国家气象站 (红色圆点)、区域气象站点 (黑色三角) 分布

Fig. 1 The study area (red box) and distribution of national (red dots) and regional meteorological stations (black triangles) in the study area

天气预报中心 (ECMWF) 提供的第五代全球大气再分析数据集 (ERA5), 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.25°×0.25°。需要说明的是, GNSS 作为一种新型的水汽探测手段 (Liang et al., 2015; Wang et al., 2021), 具有高精度、高时空分辨率和低成本等优势, 其反演的水汽产品已被广泛应用于局地强降水的分析和预报中 (Barindelli et al., 2018; 刘晶等, 2019)。此外, 在利用 ERA5 资料计算整层水汽相关变量时选择 300 hPa 作为大气层顶。

1.2 研究方法

1.2.1 大气可降水量 (PWV) 计算方法

GNSS/MET 观测网反演的 PWV计算公式 (Bevis et al., 1992) 如下

$$\mathrm{PWV}=\prod\cdot Z_{\mathrm{WD}} \tag{1}$$

其中, PWV 是大气气柱的总水汽含量转换成等效液态水柱的高度, Z_{WD}为天顶湿项延迟, 与静力延迟 (Z_{HD}) 之和称之为天顶总延迟 (Z_{TD}), Z_{TD}和 Z_{HD} 可通过 GNSS/MET 观测网的原始数据通过专业软件进行解算, $\prod$为转换因子, 计算公式如下

$$\prod=\frac{10^6}{\rho_{\mathrm{w}}R_{\mathrm{v}}(k_2'+k_3/T_{\mathrm{m}})} \tag{2}$$

其中, ρ_{w}是液态水密度, R_{v}为水汽的比气体常数, k_2'和k_3是实验常数, T_{m}为大气加权平均温度, 公式如下

$$T_{\mathrm{m}}=\frac{\int(e/T)\,\mathrm{d}z}{\int\left(e/T^2\right)\mathrm{d}z} \tag{3}$$

其中, e为水汽的分压, T为气温 (单位: K)。统计发现, T_{m}与地面气温T_{s}有良好线性关系, 本文使用最早由 Bevis (1992) 提出的T_{m}近似计算公式: $T_{\mathrm{m}}=70.2+0.72T_{\mathrm{s}}$来计算。

1.2.2 水汽计算方法

(1) 水汽收支计算。单位气柱内的水汽收支方程 (Brubaker et al., 1993) 如下

$$P=-\frac{1}{g}\int_{P_{\mathrm{S}}}^{P_T}\left(\nabla\cdot\vec{V}q+\omega\frac{\partial q}{\partial p}\right)\mathrm{d}p+E+\delta \tag{4}$$

其中, P表示局地降水量, E表示蒸发量, 一般降水区域空气接近饱和, 蒸发量很小, 可忽略不计, δ为湍流扩散量, 其量级相对较小 (Shi and Yan, 2019), 故本文不做讨论。此外, 在大气上界垂直速度ω_T及比湿q_T均为 0, 在地面垂直速度$\omega_{\mathrm{s}}\approx0$。因此, 降水变化主要由水汽在水平方向的辐合 (辐散) 量 (单位: $\mathrm{kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}}$) 决定, 即气柱的降水量近似等于气柱内水汽的辐合量 (朱乾根等, 2000)。

(2) 水汽通量及各边界水汽收支计算。水汽通量 (An et al., 2022) (单位: $\mathrm{kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}}$) 表示某区域单位时间内流经单位截面积的水汽质量, 包含纬向水汽通量和经向水汽通量。研究区域不同层次、不同边界的水汽输送量先由 ERA5 再分析资料计算各层各格点的水汽通量, 再进行水平边界和垂直厚度积分, 从而得到不同层次、不同边界的水汽输送量。通过边界向研究区域有水汽输入时, 水汽收支为正, 表示有水汽净输入; 通过边界研究区域向外有水汽输出时, 水汽收支为负, 表示有水汽净输出。水汽通量和各边界水汽收支具体计算方法参照徐栋等 (2016) 和段丽君等 (2021) 的研究。

2 降水实况与环流形势

2.1 降水实况

2022 年 8 月 17 日 18 时—18 日 17 时, 青海省东北部 513 个国家和区域气象站中有 394 个站中出现降水, 6 个站出现暴雨 (24 h 降水量≥50 mm), 78 个站出现大雨 (24 h 降水量≥25 mm), 最大累积降水量为 58.3 mm, 出现在西宁市大通县青林乡政府站。8 月 17 日夜间—18 日, 研究区域共计 58 站次出现短时强降水, 主要集中在西宁市 (29 站次) 和海东市 (20 站次); 17 日 22 时—23 时, 大通县青林乡政府站和青山乡政府站降水量分别达 39.3 mm 和 34.6 mm, 打破这两个区域站自建站 (分别为 2017 年和 2012 年) 以来小时降水量记录 (图 2a)。图 2b 为此次过程中 5 个国家站小时降水量演变, 18 日 00—02 时降水强度较强, 其中, 17 日 23 时—18 日 00 时大通站降水量为 40.6 mm, 18 日 00 时—01 时西宁站降水量为 20.1 mm, 18 日 01 时—02 时海东市乐都站降水量为 29.9 mm, 此后强降水趋于减弱, 至 18 日 07 时和 18 日 17 时海东市循化站和海南州贵南过马营站再次出现短时强降水。

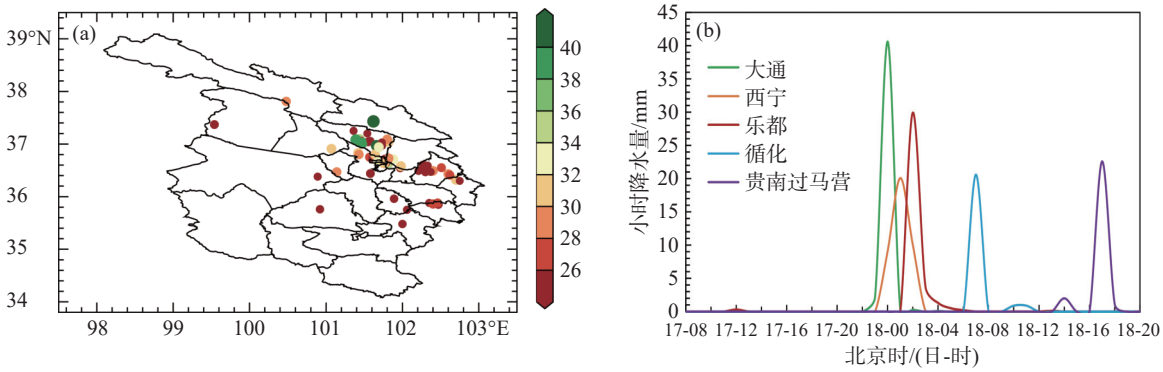


图 2 2022 年 8 月 17 日 08 时—18 日 20 时青海省东北部短时强降水 (单位: mm) 实况 (a) 及 5 个国家气象站逐小时降水量演变 (b)

Fig. 2 The (a) spatial distribution of precipitation (unit: mm) at stations with short-duration heavy rainfall (≥20 mm·h^{-1}) and (b) evolution of hourly precipitation at 5 national stations in the northeast Qinghai from 08:00 BT on August 17 to 20:00 BT on August 18, 2022

2.2 高空环流形势

此过程前期 (前 10 d 左右), 500 hPa 上, 西太平洋副热带高压 (以下简称为副高)呈带状分布, 西伸至青海西部地区, 与历年同期相比, 副高异常偏北偏西, 强度偏强, 青海省大部处于副高控制内, 研究区域内近地层储存大量能量; 200 hPa 上, 从青藏高原北部到蒙古高原南部有位势高度正异常, 同时青藏高原南部有反气旋环流, 有利于研究区域上空气流的辐散 (图略)。选取此次强降水发生前 (17 日 08 时)、临近时 (17 日 16 时)、最强时 (18 日 01 时) 以及趋于减弱至结束 (18 日 23 时) 的时次, 分析导致强降水发生的环流背景和影响系统。强降水发生前, 研究区域受高空急流影响, 急流中心超过 60 m·s^{-1}, 有明显的风速辐散, 副高东退至 100°E, 研究区域位于副高北侧, 西风槽位于巴尔喀什湖附近, 同时阿拉伯海至印度半岛和孟加拉湾地区有热带低值系统活动 (图 3a); 强降水过程临近时, 副高继续东退至 116°E, 研究区域位于副高西侧, 高空槽东移至新疆中部地区, 孟加

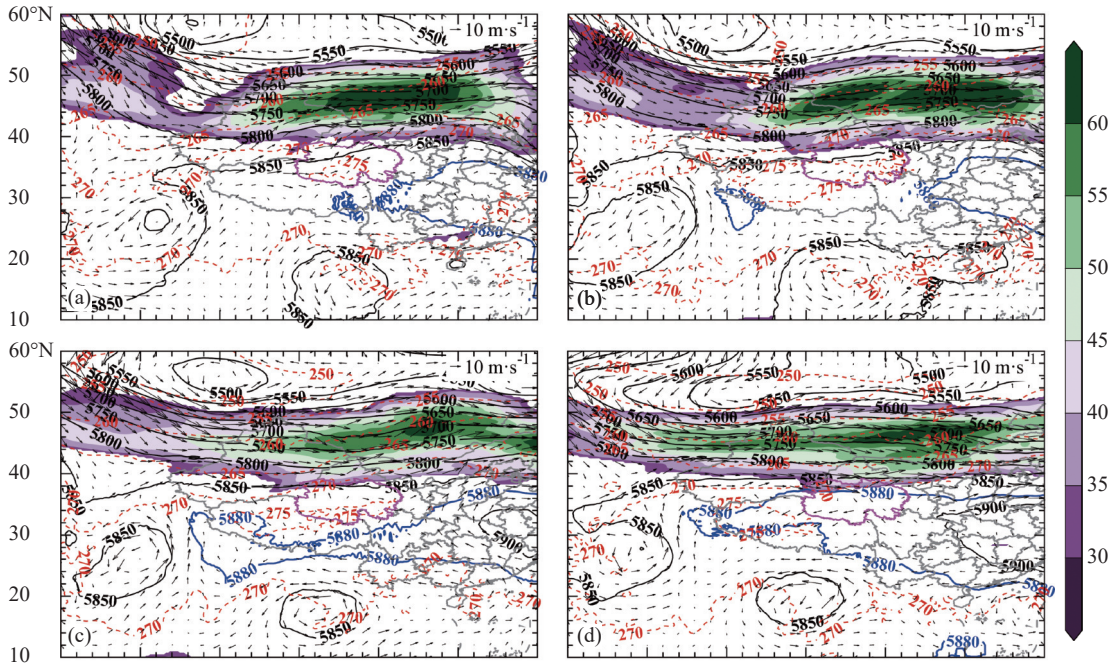


图 3 2022 年 8 月 17 日 08 时 (a)、16 时 (b)、18 日 01 时 (c) 及 23 时 (d) 200 hPa 高空急流 (填色, 单位: m·s^{-1}), 500 hPa 位势高度 (黑色实线, 单位: gpm)、温度 (红色虚线, 单位: K) 和风场 (矢量箭头, 单位: m·s^{-1}) 分布 (图中蓝色和粉色实线分别代表 5 880 gpm 线和青海省界线)

Fig. 3 The high-level jet (shaded, unit: m·s^{-1}) at 200 hPa, geopotential height (black line, unit: gpm), tempearture (red line, unit: K) and the wind field (vectors, unit: m·s^{-1}) at 500 hPa at (a) 08:00 BT, (b) 16:00 BT on August 17, (c) 01:00 BT and (d) 23:00 BT on August 18, 2022 (The pink, green, blue and yellow contours represent the 588 dagpm at 08:00, 14:00, 20:00 BT on August 17 and 02:00 BT on August 18, 2022 (The blue contours and pink lines represent the 5 880 gpm and Qinghai provincial boundary, respectively)

拉湾地区的低值系统略有加强, 高空急流依旧维持, 受上述系统的影响, 研究区域在前期储存大量能量基础上, 配合副高西侧暖湿气流持续输送 (高温高湿), 在西风槽携带的冷空气抬升下触发了短时强降水 (图 3b); 随着强降水发生至最强时, 高空急流和西风带槽有所减弱, 副高西伸南落至 75°E, 热带低值系统也略有减弱 (图 3c); 强降水结束时, 研究区域上空转为平直西风气流, 副高西伸北抬, 青海省大部再次处于副高控制内并受反气旋环流影响 (图 3d)。

3 水汽特征

3.1 水汽和降水量对应关系

充沛的 PWV 是形成极端强降水的必要条件, PWV 变化与局地降水关系密切 (刘晶等, 2019)。由于此次短时强降水落区主要集中在西宁和海东市, 因此选取位于这两个地区的大通、西宁、湟源、民和、化隆及循化 6 个市 (县) 出现短时强降水的站点 (表 1) 降水量实况及对应的 PWV, 研究强降水发生时及发生前 PWV 的演变规律。如图 4 所示, 17 日 08 时起, 大通、西宁和湟源站的 PWV 开始缓升, 23 时—18 日 00 时, 大通和西宁站的 PWV 急升并达峰值, 此后大通站的 PWV 在 18 日 00—05 时急剧下降 (大通地区出现降水), 此后开始缓升至 15 时达第二个峰值, 说明该时段仍具备较好的水汽条件, 只要动力等条件重新达到, 此后还会有降水发生, 而西宁站的 PWV 在 18 日 00 时后急剧下降。湟源站在 17 日 23 时—18 日 01 时急升并达峰值, 01 时后开始突降 (图 4a—c)。民和站的 PWV 自 17 日 08 时—18 日 02 时呈波动上升趋势, 至 02 时呈下降趋势 (图 4d)。化隆和循化站的 PWV 自 17 日 08 时起分别至 18 日 04 时和 06 时呈缓慢上升趋势并达峰值, 此后出现突降 (图 4e、f)。有学者研究发现暴雨事件发生前 PWV 会快速上升, 并将该表现称为 PWV 的跳跃性变化 (Sapucci et al., 2019), 这与我们的研究结果较一致。对比降水实况发现, 大通县内各区域站在 17 日 22 时开始出现降水, 峰值降水出现在 18 日 00 时, 02 时左右降水基本结束 (图 4a); 西宁市区内各站在 18 日 00 时左右出现降水, 峰值降水出现在 01 时 (图 4b); 湟源县内一个区域站在 18 日 02 时出现降水并达峰值 (图 4c); 民和县两个区域站在 18 日 03 时出现降水并达峰值 (图 4d); 化隆和循化县内的区域站分别在 18 日 06 时和 07 时出现降水并达峰值 (图 4e、f)。上述分析证明 PWV 演变对降水的发生有较好的指示意义, 在强降水出现前 10 ~ 12 h, PWV 整体呈上升趋势, 在强降水前 1 ~ 2 h, PWV 出现急升, 直至达到峰值, 而强降水过程结束前 1 ~ 2 h, PWV 出现突降。

基于水汽收支方程, 计算研究区域内整层水汽水平辐合 (辐散) 项与降水量的对应关系。由图 5 可见, 研究区域上空水汽水平辐合 (辐散) 对区域内强降水的发生有较好的指示意义。强降水发生前 (17 日 11—15 时), 水汽辐合量急剧增大, 表明该地区水汽堆积; 强降水发生时 (17 日 22 时—18 日 07 时), 由于水汽凝结成云致雨, 消耗大气中的水汽导致水汽辐合量逐渐减小; 随着强降水趋于结束, 水汽辐合 (辐散) 程度也逐渐减弱。

表 1 青海省大通、西宁、湟源、民和、化隆及循化市 (县) 出现短时强降水的站点信息

Table 1 Information on stations with short-term heavy rainfall in Datong, Xining, Huangyuan, Minhe, Hualong and Xunhua cities (counties) in Qinghai Province

地区	区站号	站名
大通县	X0046	宝库乡种牛场
	X0005	城关镇
	X0023	青山乡
	X0024	多林镇
	X0055	黑泉水库
	X0057	青林乡
	X0095	逊让乡
	X0127	新庄镇
	52862	大通
	X0013	鹞子沟
	X0048	向化
	X0056	景阳镇
	X0098	桦林乡
	X0099	朔北乡
	X0105	桥头镇
西宁市区	52866	西宁
	X0001	城西
	X0035	湿地公园
	X0038	北山美丽园
	X0040	生物园区
	X0042	西杏园村
	X0049	朝阳收费站
	X0062	气象局大院
湟源县	X0010	日月山
民和县	X1037	百姓村
	X1124	核桃庄乡
化隆县	X1072	东三村
循化县	52972	循化
	X1009	线尕拉村
	X1054	牙门曲乎村
	X1115	北新建村

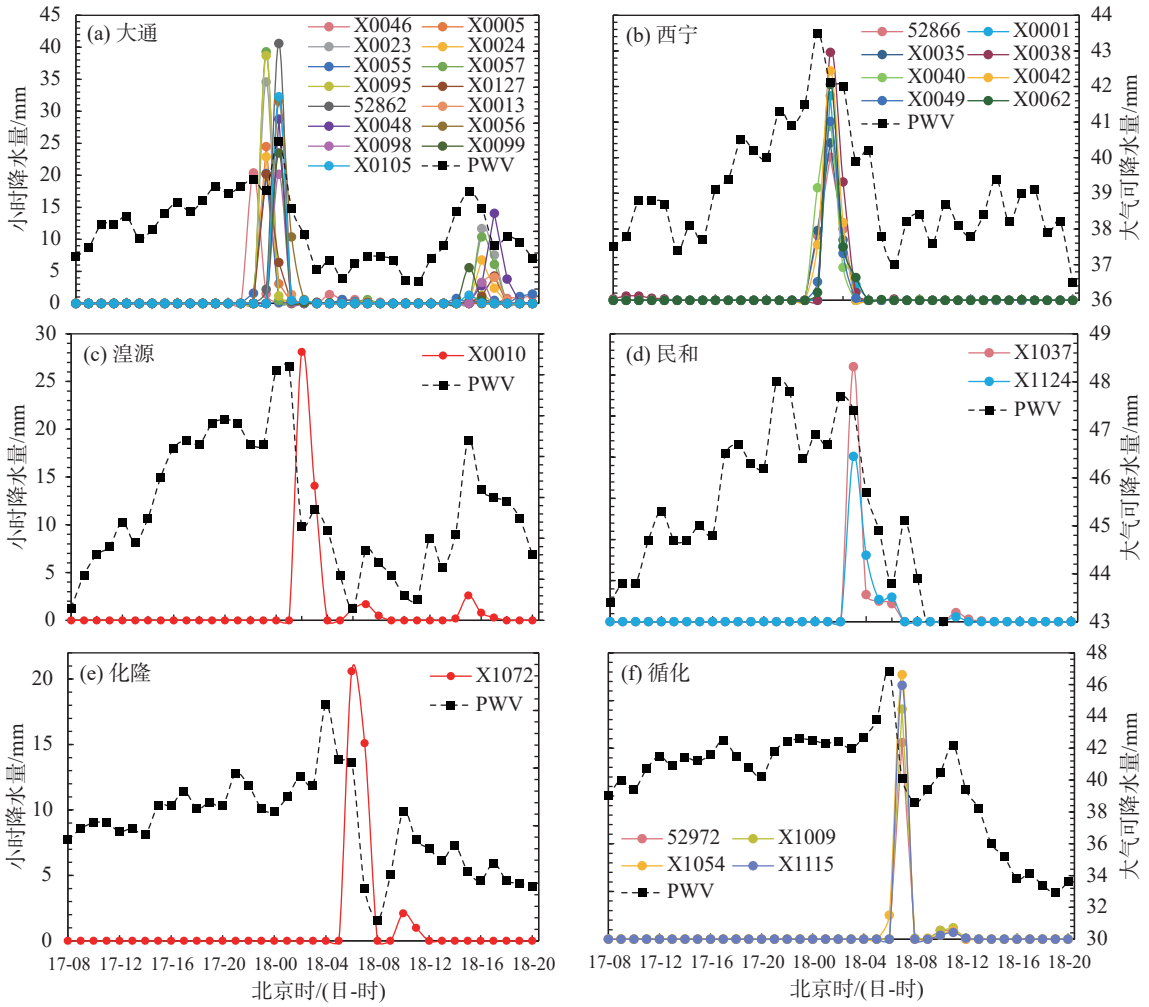


图 4 2022 年 8 月 17 日 08 时—18 日 20 时青海省大通县 (a)、西宁市 (b)、湟源县 (c)、民和县 (d)、化隆县 (e) 及循化县 (f) 内出现短时强降水站点的小时降水量和 GNSS/MET 反演的大气可降水量 (PWV) 时序图

Fig. 4 The time series of hourly precipitation at stations with short-duration heavy rainfall and the atmospheric precipitation water vapor (PWV) inversion of GNSS/MET in (a) Datong, (b) Xining, (c) Huangyuan, (d) Minhe, (e) Hualong and (f) Xunhua counties in Qinghai Province from 08:00 BT on August 17 to 20:00 BT on August 18, 2022

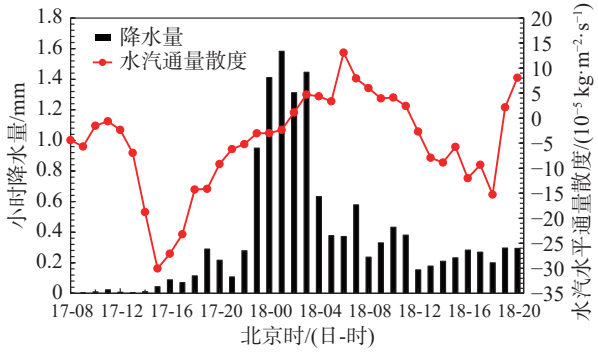


图 5 2022 年 8 月 17 日 08 时—18 日 20 时青海省东北部小时降水量和区域上空水汽的水平通量散度随时间的演变

Fig. 5 The evolution of the hourly precipitation and horizontal water vapor flux divergence over the northeast Qinghai from 08:00 BT on August 17 to 20:00 BT on August 18, 2022

综上, PWV 演变对降水的发生有较好的指示意义, 在强降水出现前 10 ~ 12 h, PWV 整体呈上升趋势, 在强降水前 1 ~ 2 h, PWV 出现急升, 直至达到峰值, 而强降水过程结束前 1 ~ 2 h, PWV 出现突降。同时, 水汽辐合量与强降水的发生有较好的对应关系, 整层水汽辐合量急剧增大, 表明该地区水汽堆积, 为强降水形成奠定了基础, 强降水结束时, 水汽辐合 (辐散) 程度也随之减弱。

3.2 水汽输送及水汽收支

3.2.1 水汽通量及散度分布

研究表明, 我国西北地区的水汽输送主要来源于孟加拉湾、南海及西伯利亚和蒙古国方向 (魏娜等, 2010; 王雅琦等, 2020)。结合图 2a 表明, 此次强降水过程中的水汽主要来源于中纬度西风带气流、印度西南季风经孟加拉湾的流入及沿副高的东南季风水汽输送。其中, 17 日 16 时, 研究区域内逐步建立水汽输送通道, 西边来源于新疆境内经柴达木盆

地流入; 南边, 沿副高西侧的偏南风水汽输送沿伸至甘肃兰州后转为东南风水汽输送, 以及经孟加拉湾的西南风水汽输送, 同时配合较强的水汽辐合 (水汽通量散度超过 14×10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1}), 强辐合中心与研究区域对应较好 (图 6a)。可见, 水汽强烈聚集表明研究区域比周边区域具有更好的水汽条件。17 日 20 时, 各水汽输送通道依旧维持, 部分区域由于已出现降水, 水汽辐合区范围有所减少, 主要集中在西宁、海东市一带 (图 6b)。18 日 00 时, 北边的水汽输送有所减弱, 但仍维持着南风水汽输送, 水汽辐合区在西宁市一带更加集中且在辐合区中心出现一定的辐散, 表明西宁及大通地区的强降水消耗了大气中的部分水汽 (图 6c)。18 日 04 时, 虽仍有一定的西风带水汽输送, 但水汽基本呈辐散状态, 降水过程趋于结束 (图 6d)。

图 7 给出研究区域水汽通量、水汽通量散度及垂直速度的配合情况。17 日 18 时, 500 hPa 上, 自西向东水汽输送达 10 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1} 且水汽通量散度约-4×10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, 垂直上升速度的中心主要位于青海湖南侧, 中心值为 1 Pa·s^{-1}, 后期逐渐东移北抬影响西宁地区 (图 7a); 600 hPa 上, 水汽从西侧及东南侧均向研究区域输送, 水汽通量约 5 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}, 水汽通量散度约-3×10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, 垂直上升速度中心值约 1 Pa·s^{-1}(图 7b)。对近 10 a 青海省强降水个例的分析表明, 青海东部地区发生大到暴雨前期 500 hPa 和 700 hPa 高度之间水汽通量值通常大于 1 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}, 水汽通量散度值多在 $(-4\sim1)\times10^{-7}$ g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}, 垂直上升速度中心值多大于 1 Pa·s^{-1}。可见, 此次过程的水汽条件接近于历年发生强降水的水汽特征值。同时由沿 101.5°E 的纬度-高度剖面图 (图 7c) 可见, 36°—38°N 之间水汽通量、水汽通量散度及垂直上升运动配合较好, 具备发生强降水的基本条件。时间-高度剖面图 (图 7d) 亦显示, 17 日 15 时开始, 500 hPa 上, 水汽输送、水汽辐合及垂直上升运动建立起较好的配合, 20 时后, 水汽辐合和垂直上升运动虽有所减弱, 但中低层的水汽输送持续加强, 有利于强降水的发生和维持。

3.2.2 不同边界水汽收支

研究区域各边界水汽收支演变能反映该区域内各水汽输送通道强度变化。利用“箱体”模型分别计算了整层大气 (1 000—300 hPa) 和低层大气 (700—600 hPa) 的水汽收支情况 (图 8), 各边界经纬度范围如图 7 黑框所示。17 日 08 时开始, 研究区域内有较强的整层西风水汽输入 (9.8×10^6 kg·s^{-1}), 南风水汽输入较弱 (0.8×10^6 kg·s^{-1}), 净水汽输送强度为 1.8×10^6 kg·s^{-1}。降水发生前 10 h (17 日 12 时) 开始, 整层水

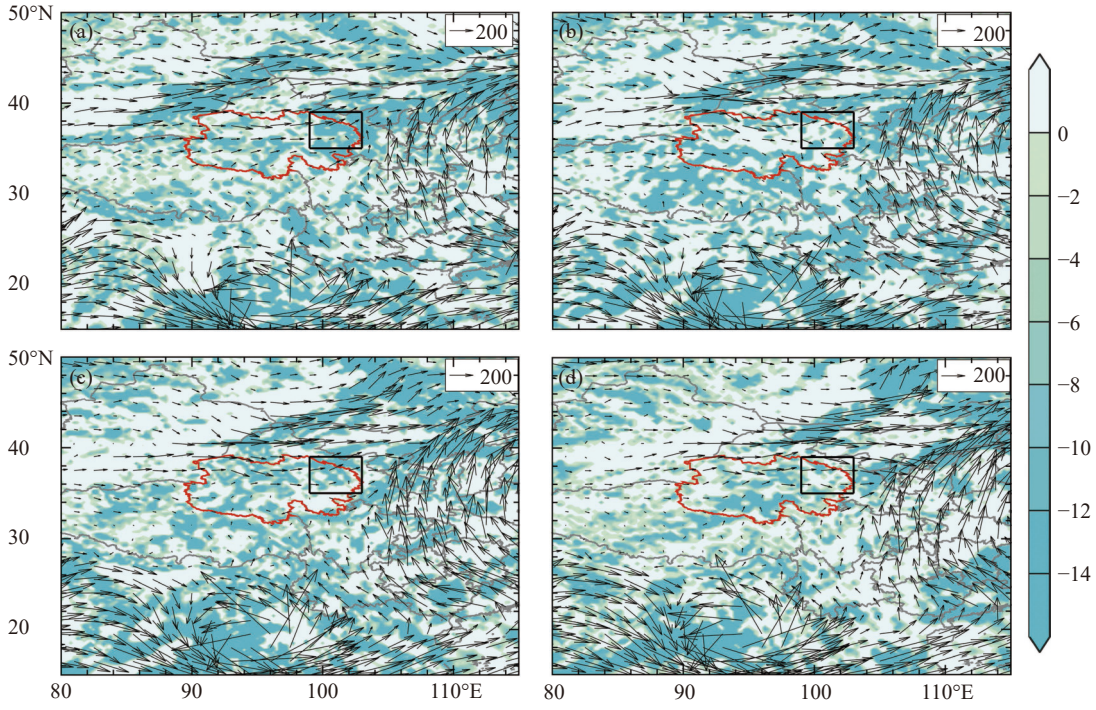


图 6 2022 年 8 月 17 日 16 时 (a)、20 时 (b)、18 日 00 时 (c)、04 时 (d) 整层积分的水汽通量 (矢量箭头, 单位: kg·m^{-1}·s^{-1}) 和水汽通量散度 (填色, 单位: 10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1}) 分布 (图中红色实线为青海省界线, 黑色方框为研究区域)

Fig. 6 The distribution of total column vertically integrated water vapor flux (vectors, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and water vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1}) at (a) 16:00 BT on August 17, (b) 20:00 BT on August 17, (c) 00:00 BT on August 18, (d) 04:00 BT on August 18, 2022 (The red lines represent the Qinghai Provincial boundary and the black boxes represent the study area)

汽输送仍以西风输入为主，且西风输入和南风输入强度逐渐增强，水汽净输入最强达 11.7×10^6 kg·s^{-1}，出现在 15 时；低层，西边界由水汽输出开始逐渐转为输入且东风水汽输入强度迅速加强，最强达 3.7×10^6 kg·s^{-1}，出现在 17 时。西宁城区、大通、湟源、民和县等研究区域偏北地区发生短时强降水时段 (17 日

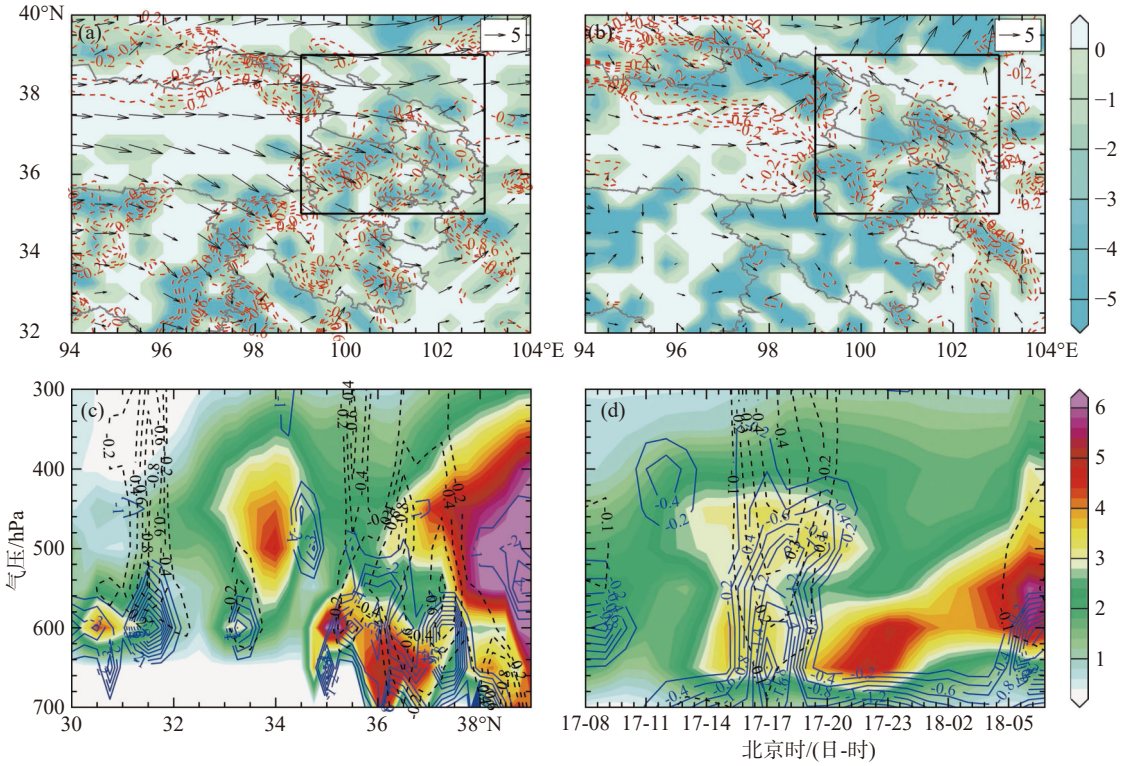


图 7 2022 年 8 月 17 日 18 时 500 hPa (a) 和 600 hPa (b) 水汽通量 (矢量箭头，单位：g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})、水汽通量散度 (填色，单位：10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) 和垂直速度 (红色等值线，单位：Pa·s^{-1}) 分布，沿 101.5°E 的水汽通量 (填色，单位：g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})、水汽通量散度 (蓝色等值线，单位：10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) 和垂直速度 (黑色等值线，单位：Pa·s^{-1}) 的纬度-高度剖面图 (c)，2022 年 8 月 17 日 08 时—18 日 08 时在 (100°—102°E，35°—37°N) 范围内的水汽通量 (填色，单位：g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})、水汽通量散度 (蓝色等值线，单位：10^{-7}g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) 和垂直速度 (黑色等值线，单位：Pa·s^{-1}) 的时间-高度剖面图 (d) (图 a 和 b 中黑框为研究区域)

Fig. 7 The distribution of water vapor flux (vectors, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}), water vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}), and vertical velocity (red isoline, unit: Pa·s^{-1}) at (a) 500 hPa and (b) 600 hPa. The (c) Latitude-height profile of the water vapor flux (shaded, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}), water vapor flux divergence (blue isoline, unit: 10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}), and vertical velocity (black isoline, unit: Pa·s^{-1}) along 101.5°E at 18:00 BT on August 17, 2022. The (d) Time-height profile of the water vapor flux (shaded, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}), water vapor flux divergence (blue isoline, unit: 10^{-7} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) and vertical velocity (black isoline, unit: Pa·s^{-1}) in the range of (100°-102°E, 35°-37°N) from 08:00 BT on August 17 to 08:00 BT on August 18, 2022 (The black box represents the study area in Fig. 7a, b)

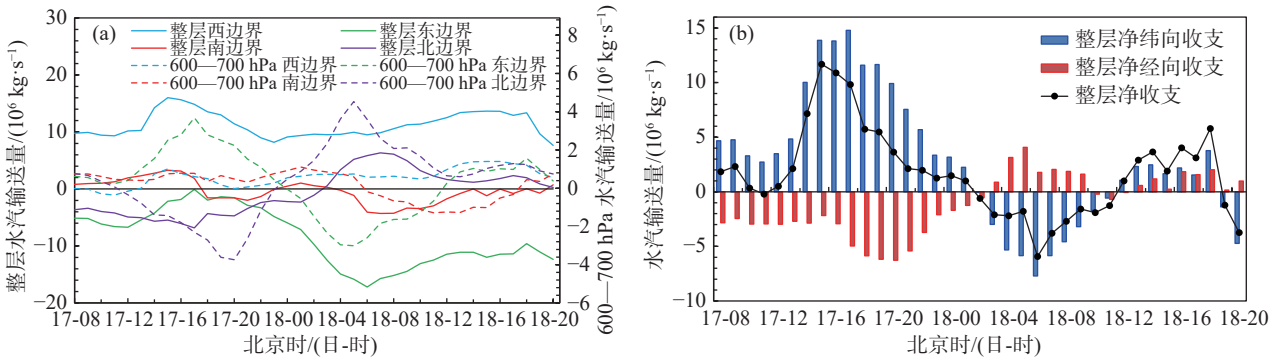


图 8 2022 年 8 月 17 日 08 时—18 日 20 时青海省东北部区域上空整层及 600—700 hPa 上各边界水汽收支 (a) 及整层净纬向、净经向、净水汽收支 (b) 随时间的演变

Fig. 8 The evolution of the (a) water vapor budget of the total column vertically integrated and between 600 and 700 hPa at each boundary and (b) net latitude, net meridional, and net water vapor budget over the the northeast Qinghai from 08:00 BT on August 17 to 20:00 BT on August 18, 2022

22 时—18 日 03 时), 整层净水汽收支贡献主要来源于高空西风水汽输入 (平均为 9.2×10^6 kg·s^{-1}) 和南风水汽输入; 低层, 东风水汽输入逐渐减弱, 南风和西风水汽输入有所加强, 同时北边界水汽输送由输出开始转为输入且强度迅速增强。化隆、循化县等研究区域偏南地区发生短时强降水时段 (18 日 04—08 时), 研究区域内仅维持着整层西风水汽输入 (平均为 10.0×10^6 kg·s^{-1}) 和北风水汽输入 (平均为 5.9×10^6 kg·s^{-1}), 净水汽收支为负; 低层主要为北风水汽输入, 最强达 4.5×10^6 kg·s^{-1}, 出现在 18 日 05 时。可见, 研究区域偏北地区强降水的发生主要靠前期高空西风水汽输送及低层的东风和南风水汽输送, 而导致研究区域偏南地区发生强降水的水汽输送除上述外, 还有低层北风水汽输送。

3.2.3 不同高度水汽输送特征

利用 17 日 08 时和 20 时西宁站的温度对数压力图分析不同高度水汽输送特征发现, 西宁站上空有两个明显的湿层, 且从 08—20 时, 湿层显著增厚, 垂直风切变加大。其中 17 日 20 时, 低层 (700—600 hPa) 为东南风, 引导暖湿气流输送; 中高层 (500—400 hPa), 风向由东南风经西南风逐渐转为偏西风, 引导来自西部的冷空气向东输送 (图 9)。图 9 所显示的不同高度湿层的水汽输送特征与图 7 中基于 ERA5 资料计算的水汽通量垂直分布特征“强降水发生前, 在 500 hPa 和 600 hPa 高度上研究区域水汽分别来源于偏西风和东南风输送”的结果较为吻合, 且与图 8 中显示的研究区域水汽输送以西边界和东边界为主的结论也相一致。此外, 17 日 20 时, 探空曲线呈“瘦高型”短时强降水形态特征, 对流有效位能 (CAPE) 增加至 1 336.7 J·kg^{-1}, 沙氏指数 (SI) 为−1.4 ℃, 说明具备发生强对流的潜势。由此可见, 中高层偏西风输送的冷湿气流和低层东南风输送的暖湿气流相遇, 会使得湿层厚度增加。这种湿层增厚是由天气尺度辐合场中的上升运动造成的, 可以表示强降水区水汽集中的程度, 且使对流不稳定度也明显加大, 强的对流不稳定也是形成短时强降水的重要条件之一。

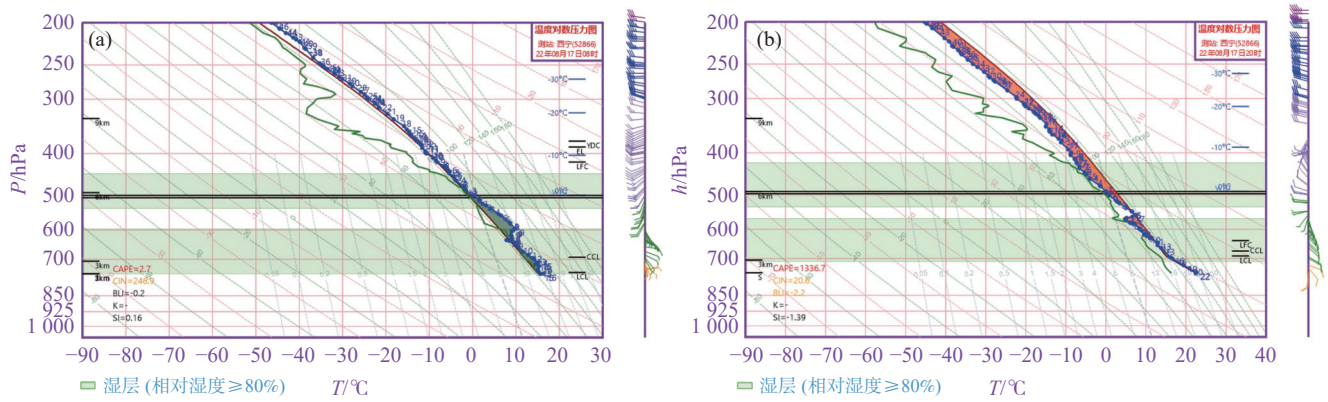


图 9 2022 年 8 月 17 日 08 时 (a) 和 20 时 (b) 西宁站的 T-ln$P$ 图

Fig. 9 The T-ln$P$ map at Xining station at (a) 08:00 BT on August 17 and (b) 20:00 BT on August 17, 2022

4 结论与讨论

本文利用地面气象站逐时观测资料、GNSS/MET 反演的大气可降水量 (PWV) 以及 ERA5 再分析资料等, 分析了 2022 年 8 月 17—18 日青海省短时强降水过程的水汽特征, 得出如下主要结论:

(1) PWV 的演变对强降水的生消有较好的指示意义。强降水发生前 10~12 h, PWV 呈上升趋势, 强降水发生前 1~2 h, PWV 出现急升, 直至达到峰值; 而强降水结束前 1~2 h, PWV 出现突降。

(2) 强降水发生前, 青海省东北部整层水汽辐合量急剧增大, 表明该地区水汽堆积, 同时 500 hPa 垂直上升速度增加, 为强降水形成奠定了基础。

(3) 高空西风水汽输送 (最强为 16.0×10^6 kg·s^{-1}) 及低层 (700—600 hPa) 的东风 (最强为 3.7×10^6 kg·s^{-1}) 和南风水汽输送 (最强为 1.1×10^6 kg·s^{-1}) 为青海省东北部偏北地区强降水的发生提供了源源不断的水汽来源, 从而导致偏南地区发生强降水的水汽条件除上述外, 还有低层北风水汽输送 (最强为 4.5×10^6 kg·s^{-1})。中高层冷湿气流和低层暖湿气流相遇, 使降水区湿层增厚, 同时冷暖气流交汇又增强了对流不稳定, 亦为此次短时强降水的发生提供了有利条件。

本文分析了 2022 年 8 月青海省一次短时强降水期间的水汽特征, 其结论与燕振宁和马学谦 (2018) 得出的“6 h 降水量大于 10 mm 的降水与大气可降水量呈明显的正比关系”的结果较为一致, 水汽含量演变对降水特别是强降水的发生指示意义较大。然而, 由于降水问题十分复杂, 今后可进一步利用区域高时空分辨率的观测资料对大量短时强降水

天气个例进行综合分析，使结论更具参考意义。此外，除关注副高影响下的强降水天气过程外，高原低涡关联的强降水也是青海省汛期常见的灾害性天气过程，未来将结合不同天气系统类型按不同区域针对短时强降水天气过程进行深入研究。

参考文献 (References)：

常煜,马素艳,仲夏.2018.内蒙古夏季典型短时强降水中尺度特征[J].应用气象学报,29(2):232−244. Chang Y, Ma S Y, Zhong X. 2018. Meso-scale characteristics of typical summer short-time strong rainfall events in inner Mongolia [J]. Journal of Applied Meteorological Science,29(2):232−244 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20180209

段丽君,申红艳,余迪,等.2021.青藏高原雨季降水的水汽条件研究[J].冰川冻土,43(4):939−947. Duan L J, Shen H Y, Yu D, et al. 2021. Study on water vapor conditions of precipitation on the Tibetan Plateau during rainy season [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 43(4):939−947 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0240.2021.0050

付伟,魏秋实,邱学兴,等.2024.芜湖市一次引发严重内涝暴雨过程的水汽输送特征[J].大气科学学报,47(3):486−497. Fu W, Wei Q S, Qiu X X, et al. 2024. Water vapor transport characteristics of a rainstorm process leading to severe urban waterlogging in Wuhu city [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,47(3):486−497 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20231217001

黄玉霞,王宝鉴,王鹏祥.2006.青海高原夏季降水异常及其水汽输送特征分析[J].气象,32(1):18−23. Huang Y X, Wang B J, Wang P X. 2006. Analysis of summer precipitation anomaly and water vapor transport in Qinghai Plateau [J]. Meteorological Monthly,32(1):18−23 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2006.1.003

和海霞,李博.2023.青海大通“8·18”山洪灾害特征及风险分析[J].自然资源遥感,36(2):135−141. He H X, Li B. 2023. Analysis on characteristics and risk of the "8·18" flash flood disaster in Datong, Qinghai Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 36(2):135−141 (in Chinese). doi:10.6046/zrzyyg.20230023

李超,崔春光,徐慧燕,等.2022.河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J].气象,48(12):1497−1511. Li C, Cui C G, Xu H Y, et al. 2022. Characteristics associated with the transport, budget, conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021 [J]. Meteorological Monthly,48(12):1497−1511 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.072701

李如琦,李桉宇,李海花,等.2022.塔克拉玛干沙漠南缘两次极端暴雨的气流模型与水汽输送特征[J].沙漠与绿洲气象,16(6):1−10. Li R Q, Li A B, Li H H, et al. 2022. Air flow model and water vapor transport characteristics of two extreme rainstorms in the southern edge of Taklimakan Desert [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(6):1−10 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2022.06.001

李生辰,张青梅,沈晓燕,等.2022.青海高原暴雨的形成条件与基本特征分析[J].高原气象,41(2):526−540. Li S C, Zhang Q M, Shen X Y, et al. 2022. Torrential rain in Qinghai Plateau: forming conditions and characteristics [J]. Plateau Meteorology,41(2):526−540 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00009

李双行,王慧,李栋梁,等.2024.青藏高原中东部暖季极端降水的区域特征及其典型环流[J].高原气象,43(6):1364−1379. Li S X, Wang H, Li D L, et al. 2024. Regional characteristics and typical circulation of extreme precipitation in the warm season over the central and eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology,43(6):1364−1379 (in Chinese). doi:62.1061.P.20240513.1042.008

李泽雯,孙溦,宇如聪.2024.产生青海“22·8”极端强降水的三维环流结构分析[J].气象学报,82(1):37−54. Li Z W, Sun W, Yu R C. 2024. Analysis of the three-dimensional circulation changes during the August 2022 extremely heavy rainfall event in Qinghai Province, China [J]. Acta Meteorologica Sinica,82(1):37−54 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2024.20230105

刘晶,周玉淑,杨莲梅,等.2019.伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J].大气科学,43(5):959−974. Liu J, Zhou Y S, Yang L M, et al. 2019. A diagnostic study of water vapor during an extreme precipitation event in the Yili River Valley [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(5):959−974 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1901.18114

马琼,邢子毅,马晓真,等.2023. 2022 年 8 月青海东部一次极端性降水过程的成因分析[J].农业灾害研究,13(1):55−58, 62. Ma Q, Xing Z Y, Ma X Z, et al. 2023. Cause analysis of an extreme precipitation process in eastern Qinghai in August 2022 [J]. Journal of Agricultural Catastrophology,13(1):55−58, 62 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−3305.2023.01.019

孙继松.2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,36(6):498−506. Sun J S. 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall [J]. Torrential Rain and Disasters, 36(6):498−506 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.06.002

孙颖姝,周玉淑,王咏青.2019.一次双高空急流背景下南疆强降水事件的动力过程和水汽源分析[J].大气科学,43(5):1041−1054. Sun Y S, Zhou Y S, Wang Y Q. 2019. Analysis of dynamic process and moisture source on a heavy precipitation event in Southern Xinjiang associated with the double upper-level jet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(5):1041−1054 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1812.18168

王宝鉴,孔祥伟,傅朝,等.2016.甘肃陇东南一次大暴雨的中尺度特征分析[J].高原气象,35(6):1551−1564. Wang B J, Kong X W, Fu Z, et al. 2016. Analysis on Mesoscale Characteristics of a Rainstorm Process in Southeastern Gansu [J]. Plateau Meteorology,35(6):1551−1564 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2015.00114

王婧羽,崔晓光,王晓芳,等.2014. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J].气象,40(2):133−145. Wang J Y, Cui X G, Wang X F, et al. 2014. Analysis on water vapor transport and budget of the severe torrential rain over Beijing region on 21 July 2012 [J]. Meteorological Monthly,40(2):133−145 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.02.001

王雅琦,冯娟,李建平,等.2020.西北地区东部夏季降水年际变化特征及其与环流的关系[J].高原气象,39(2):290−300. Wang Y Q, Feng J, Li J P, et al. 2020. Interannual variation of summer precipitation in the eastern of Northwest China and its relationship with circulation [J]. Plateau Meteorology,39(2):290−300 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00023

魏娜,巩远发,孙娴,等.2010.西北地区近 50a 降水变化及水汽输送特征[J].中国沙漠,30(6):1450−1457. Wei N, Gong Y F, Sun, X, et al. 2010. Variation of precipitation and water vapor transport over the Northwest China from 1959 to 2005 [J]. Journal of Desert Research,30(6):1450−1457 (in Chinese)

谢天蓉,祁彩虹,张宁瑾.2023.青海一次短时强降水中 FY-4A 云型特征分析[J].农业灾害研究,13(10):235−237. Xie T R, Qi C H, Zhang N J. 2023. Analysis of FY-4A cloud pattern characteristics in a short-term heavy rainfall in Qinghai Province [J]. Journal of Agricultural Catastrophology,13(10):235−237 (in Chinese)

徐栋,孔莹,王澄海.2016.西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系[J].

干旱气象,34(3):431−439. Xu D, Kong Y, Wang C H. 2016. Changes of water vapor budget in arid area of Northwest China and its relationship with precipitation [J]. Journal of Arid Meteorology, 34(3):431−439 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2016)−03−0431

燕振宁,马学谦.2018.青海高原不同地区大气水汽含量对比分析[J].干旱气象,36(3):365−372. Yan Z N, Ma X Q. 2018. Comparison and analysis of precipitable water vapor in different regions of the Qinghai Plateau [J]. Journal of Arid Meteorology,36(3):365−372 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2018)−03−0365

闫伟,欧阳智,王泳棋,等.2024. 2021 年“7·20”河南特大暴雨水汽输送特征[J].兰州大学学报 (自然科学版),60(2):143−150. Yan W, Ou Y Z, Wang Y Q, et al. 2024. Water vapor transport characteristics of July 20, 2021 rainstorm in Henan province [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences),60(2):143−150 (in Chinese). doi:10.13885/j.issn.0455−2059.2024.02.001

杨柳,赵俊虎,封国林.2018.中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异[J].大气科学,42(1):81−95. Yang L, Zhao J H, Feng. G L. 2018. Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with four rainfall patterns over Eastern China Monsoon Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(1):81−95 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1706.16273

俞小鼎.2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J].气象,38(11):1313−1329. Yu X D. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21July 2012 [J]. Meteorological Monthly,38(11):1313−1329 (in Chinese)

俞小鼎.2013.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,32(3):202−209. Yu X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters,32(3):202−209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.002

张青梅,李生辰,苏永玲,等.2022.青海高原短时强降水时空分布及天气学概念模型[J].高原气象,41(2):515−525. Zhang Q M, Li S C, Su Y L, et al. 2022. Temporal-spatial distribution characteristics and synoptic conceptual models of short-time heavy rainfall over the Qinghai Plateau [J]. Plateau Meteorology,41(2):515−525 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00068

郑志卿. 2023. GNSS 水汽探测方法及其在特大暴雨中的应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学. Zhen Z Q. 2023. GNSS water vapor detection method and its application in heavy rainstorm [D]. Beijing:China University of Mining and Technology (in Chinese)

周泓,闵颖,许彦艳,等.2024.滇中地区不同影响系统下 3 次短时强降水过程的大气环境特征和雷达特征分析[J].高原气象,43(1):166−183. Zhou H, Min Y, Xu Y Y, et al. 2024. Analysis of atmospheric environment characteristics and radar characteristics of three short-time heavy precipitation cases under different influence systems in Central Yunnan [J]. Plateau Meteorology,43(1):166−183 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2023.00046

朱平,肖建设.2022.青海高原短时强降水天气的葵花-8 卫星监测预警特征对比分析[J].高原气象,41(2):502−514. Zhu P, Xiao J S. 2022. Comparative analysis of Himawari-8 satellite monitoring and early warning characteristics in short-time heavy precipitation weather over Qinghai Plateau [J]. Plateau Meteorology,41(2):502−514 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00104

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2000.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社:641. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2000. Principle of Synoptic Meteorology [M]. Beijing:Meteorological Press:641 (in Chinese)

An L, Yao Z Y, Zhang P, et al. 2022. Regional characteristics and exploitation potential of atmospheric water resources in China [J]. International Journal of Climatology,42(5):3225−245. doi:10.1002/joc.7575

Barindelli S, Realini E, Venuti G, et al. 2018. Detection of water vapor time variations associated with heavy rain in northern Italy by geodetic and low-cost GNSS receivers [J]. Earth, Planets and Space,70:1-28. doi:10.1186/s40623−018−0795−7

Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,97(D14):15787−15801. doi:10.1029/92JD01517

Brubaker K L, Entekhabi D, Eagleson P S. 1993. Estimation of continental precipitation recycling [J]. Journal of Climate,6(6):1077−1089. doi:10.1175/1520−0442(1993)006<1077:EOCPR>2.0.CO;2

Liang H, Cao Y C, Wan X M, et al. 2015. Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China [J]. Geodesy and Geodynamics, 6(2):135−142. doi:10.1016/j.geog.2015.03.001

Liu B, Tan X, Gan T Y, et al. 2020. Global atmospheric moisture transport associated with precipitation extremes: Mechanisms and climate change impacts [J]. WIREs Water: 7(2):e1412. doi:10.1002/wat2.1412

Sapucci L F, Machado L, de Souza E M, et al. 2019. Global positioning system precipitable water vapour (GPS-PWV) jumps before intense rain events: A potential application to nowcasting [J]. Meteorological Applications,26(1):49−63. doi:10.1002/met.1735

Shi J, Yan Q. 2019. Evolution of the Asian–African monsoonal precipitation over the last 21 kyr and the associated dynamic mechanisms [J]. Journal of Climate,32(19):6551−6569. doi:10.1175/JCLI−D−19−0074.1

Shieh C L, Chen Y S, Tsai Y J, et al. 2009. Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China [J]. International Journal of Sediment Research,24(2):177−188. doi:10.1016/S1001−6279(09)60025−1

Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al. 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China [J]. Journal of Meteorological Research,29(3):370−384. doi:10.1007/s13351−014−4119−y

Wang H, Ding N, Zhang W. 2021. An adaptive non-uniform vertical stratification method for troposphere water vapor tomography [J]. Remote Sensing,13(19):3818. doi:10.3390/rs13193818

Zhang Y, Zhou W, Ling J, et al. 2022. Water vapor transport by an equivalent-barotropic cyclonic anomaly corresponding to extreme austral late summer precipitation in southeast Australia during 2021 [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,79:2343−2361. doi:10.1175/JAS−D−21−0267.1

(责任编辑　唐国瑛)