吕春艳,陈军,刘艺朦,等.2023.贵州铜仁一次持续性暴雨水汽收支定量分析[J].暴雨灾害,42(6):648-658. LV Chunyan, CHEN Jun, LIU Yimeng, et al. 2023. Quantitative analysis of water vapor budget of a persistent rainstrom event in Tongren of Guizhou Province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):648-658 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-064

贵州铜仁一次持续性暴雨水汽收支定量分析

吕春艳[1],陈军[1],刘艺朦[2],杨群[1],向楠[1],符晴[3]

(1. 贵州省铜仁市气象局,铜仁 554000;2. 海南省气象探测中心,海口 570203;3. 贵州省印江县气象局,印江 555200)

摘　要: 基于混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式(版本4)(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, HYSPLIT4),利用降水观测数据、ERA5和NCEP GDAS (National Centers for Environmental Prediction, Global Data Assimilation System)再分析数据,分析2014年7月13—16日铜仁持续性暴雨过程的水汽输送、收支和各水汽源地的定量贡献。结果表明:(1) 东伸的南亚高压和高低空急流的耦合作用增强了低层辐合、高层辐散的动力机制,利于水汽在目标区域辐合上升、凝结,形成降水。(2) 500 hPa稳定控制贵州南部以南地区的副热带高压、短波槽和低纬印度半岛的热带气旋协同作用,建立明显的水汽输送通道,使海上的水汽源源不断地输送到暴雨区。(3) 后向追踪120 h发现,暴雨区空气块主要来自阿拉伯海、孟加拉湾和南海,所处高度较低;少量空气块来自铜仁以北至欧亚大陆、大西洋,所处高度较高。(4) 影响铜仁暴雨的水汽源地为铜仁以南-南海及附近岛屿和海域、印度半岛东部-孟加拉湾、阿拉伯海-印度半岛西部,水汽贡献率分别为48.29%、32.17%和10.47%,铜仁以北至欧亚大陆、大西洋的贡献率为9.07%。(5) 850 hPa和700 hPa为主要的水汽输送层,为暴雨区贡献了近3/4的水汽,其余1/4水汽由500 hPa输送。

关键词: 持续性暴雨;HYSPLIT4模式;水汽源地;水汽贡献率

中图法分类号: P458.1+ 21.1　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-064

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

LV Chunyan[1], CHEN Jun[1], LIU Yimeng[2], YANG Qun[1], XIANG Nan[1], FU Qing[3]

(1. *Tongren Meteorological Bureau, China Meteorological Administration, Tongren* 554300; 2. *Hainan Meteorological Observation Centre, Haikou* 570203; 3. *Yinjiang Meteorological Bureau, China Meteorological Administration, Yinjiang* 555200)

Abstract: This paper focus on revealing the features of the water vapor transport, water vapor budget and the contribution percentage of water vapor source regions of the persistent rainstorm in Tongren from July 13th to 16th, 2014 based on precipitation observation data, ERA5 and NCEP GDAS (National Centers for Environmental Prediction, Global Data Assimilation System) reanalysis data and the HYSPLIT4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) mode. The results show that: (1) the eastward South Asian High and coupling mechanism of high and low level jets enhanced the dynamic mechanism of convergence at low level and divergence at high level which is conducive to the convergence of water vapor in the target region to condense and then form precipitation. (2) The water vapor over the ocean was continuously transported to the rainstorm area by the water vapor channel built by the synergistic effect of the subtropical high which table controlled the south of Guizhou province, shortwave trough lay the northwest side of subtropical high, and tropical cyclone in the Indian Peninsula at 500 hPa. (3) The air particles in the rainstorm area mainly came from the Arabian Sea, the Bay of Bengal and the South China Sea at a lower height, while a few particles came from the north of Tongren to Eurasia, the Atlantic Ocean at a higher height by 120 h backward trajectory simulation. (4) The contribution percentage of water vapor source regions of the south of Tongren-South China Sea and its nearby islands and water, the east of the Indian Peninsula-the Bay of Bengal, the Arabian Sea-the west of the Indian Peninsula were 48.29%,32.17 % and 10.47% respectively. In addition, the water vapor the north of Tongren to Eurasia and the Atlantic Ocean also contributed to the rainstorm in Tongren (9.07%). (5) 850 hPa and 700 hPa were the main water vapor contribution levels which provided nearly 3/4 of water vapor to the rainstorm area, the remaining quarter was transported by 500 hPa.

Key words: persistent rainstorm; HYSPLIT4 model; water vapor source regions; contribution percentage of water vapor

收稿日期: 2023-04-03;**定稿日期:** 2023-07-10

资助项目: 贵州省气象局科研业务项目(黔气科登2022-05-09);铜仁市科技局项目(铜市科研2022-44);铜仁市短历时暴雨监测预警技术研究攻关团队项目(QHLSSLJ2022-05)

第一作者: 吕春艳,主要从事灾害性天气预报。E-mail: 315314378@qq.com

通信作者: 杨群,主要从事灾害性天气预报。E-mail: 315314378@qq.com

引 言

暴雨由于持续时间久，累积降水量大，常引起城市洪涝、山体滑坡、泥石流等灾害，造成严重的经济损失和人员伤亡(陈文等，2013)。它是我国主要的气象灾害之一，主要发生在亚洲夏季风爆发和盛行时期(陶诗言，1980)。在全球变暖背景下，极端降水事件增多，强度增大，暴雨灾害造成的损失日趋严重，影响也越来越大(Jiang et al.，2014；Ma et al.，2015)，因此加强对暴雨形成机制的理解和预报方法的研究极为重要。

充沛的水汽供应是暴雨发生、发展和维持的重要条件。暴雨的发生，不仅需要暴雨区大气柱中的水汽含量高，还需要大气环流将外部的水汽源源不断地向暴雨区输送并产生局地辐合(陶诗言，1980)，因此暴雨过程的水汽输送一直是气象学者的研究重点。夏季影响中国大陆的水汽输送在低纬地区主要有三条通道，分别是南亚季风影响的西南通道、南海季风影响的南海通道和副热带季风影响的东南通道，在高纬还有一条很弱的受西风带影响的西北通道(Simmonds et al.，1999；田红等，2004；王婧羽等，2014；孙建华等，2016)，其中西南通道和南海通道是我国西南地区暴雨的主要水汽来源(陈红专等，2019；李晓容等,2020；王钦等，2022)。上述对水汽输送的研究主要基于欧拉方法，该方法无法定量估计各水汽输送对暴雨的具体贡献，因此一些学者利用基于拉格朗日方法的HYSPLIT4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)模式来客观识别水汽源地并定量估计各源地贡献。如王佳津等(2015)分层次研究了四川盆地夏季暴雨的水汽输送情况，指出950 hPa的水汽源地有四个，其中阿拉伯海-孟加拉湾地区的水汽输送贡献最大(44.1%)，中南半岛-南海地区的水汽贡献次之(33.1%)，巴尔喀什湖地区(15.7%)和贝加尔湖地区(7.1%)的水汽贡献相对较弱。850 hPa也有四个水汽源地，阿拉伯海地区的水汽最重要(89.4%)，从巴尔喀什湖-贝加尔湖来的干冷空气相对较弱(6.3%)，而孟加拉湾(3%)和局地(1.3%)水汽贡献非常小。施逸等(2022)也追踪了1961—2010年中国东部地区各雨季不同垂直层上水汽输送路径与水汽贡献。受地形影响，孟加拉湾通道的水汽主要输送至暴雨区700 hPa，其它低纬洋面的水汽主要输送到850 hPa及以下高度(王佳津等，2015；陈红专等，2019)，源于中纬西风带的水汽输送主要集中在对流层中上层(周晓霞等，2008；施逸，2022)。

铜仁位于贵州东北部，武陵山区腹地，西高东低，在其中部有一近南北向的主峰“梵净山”，最高海拔2 572 m。受梵净山阻挡，当低层盛行偏东气流时，梵净山东侧常发生强降水(陈军等，2020)，此外西南风水汽输送对强降水过程也有重要影响(周涛等，2017；廖洪敏等，2020)。以往对铜仁暴雨的研究主要集中在大气环流背景、环境场等方面(陈军等，2020；聂云等，2021；杨群等，2016,2021)，而针对水汽输送特征及源地等问题的研究较少。2014年7月13—16日，铜仁出现持续性暴雨，强降水导致铜仁多个区县发生城市内涝，锦江河水暴涨，机场航班延误，多条高速公路关闭，湘黔铁路中断(杜小玲等，2016)，造成严重的经济损失。本文分析了此次暴雨过程的环流背景、水汽输送特征，并利用HYSPLIT4模式确定水汽源地及各源地贡献，以期加深对铜仁暴雨形成机理的认识，把握铜仁暴雨发生的先兆信号，为提高铜仁暴雨预报预警业务及服务能力提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

使用的数据包括：(1) 贵州铜仁181个站点(包含国家站和区域站)逐小时降水量资料；(2) 欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据集(ERA5)，包括高度场、风场、比湿等，水平分辨率为0.25°×0.25°；(3) NCEP GDAS (National Centers for Environmental Prediction, Global Data Assimilation System)全球再分析数据，时间分辨率为6 h，水平分辨率为1.0°×1.0°，垂直方向共17层(1 000—10 hPa)，用来基于HYSPLIT4模式对气块轨迹进行追踪；(4)全球1 km基础高程的ETOPO2V2地形数据，来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 网站(https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/topo.html)。以上数据选取时段为2014年7月13—16日。

1.2 HYSPLIT4模式及模拟方案

本文使用美国国家海洋和大气管理局空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的基于拉格朗日方法计算的HYSPLIT4模式(Draxler and Hess,1998)。HYSPLIT4模式分析气流轨迹的思路是假设空气中的粒子随风飘动，粒子的移动轨迹是其在时间和空间上位置矢量的积分，最终位置由初始位置和第一猜测位置决定(Draxler and Hess，1998)。

为深入研究铜仁暴雨时段(2014年7月13日20时—16日20时，北京时，下同)水汽输送特征，将模拟区域设置为107.5°—109.5°E，27°—29.5°N，水平分辨率为0.5°×0.5°，模拟空间的轨迹初始点有30个。垂直方向上选取1 500 m (850 hPa)、3 000 m (700 hPa)和5 500 m (500 hPa)为模拟的起始高度，后向追踪所有空气块的三

维运动轨迹，每6 h输出一次轨迹点的位置，利用GDAS资料插值得到相应位置的物理属性，如气温、比湿等。

1.3 水汽收支及水汽源地定量贡献

为了估计水汽输送对目标区域暴雨的影响，本文计算了整层大气水汽通量，公式如下

$$Q = \frac{1}{g}\int_{300\ \text{hPa}}^{p_s} q\bar{V}\text{d}p \tag{1}$$

由于300 hPa高度以上的空气非常干燥，对水汽输送的贡献不大(Sun et al., 2014)，因此本文从地面到300 hPa对水汽通量进行积分。公式(1)包含了纬向(Q_{lat})和经向(Q_{lon})的水汽输送通量

$$Q_{lat} = \frac{1}{g}\int_{300\ \text{hPa}}^{P_s} uq\text{d}p \tag{2}$$

$$Q_{lon} = \frac{1}{g}\int_{300\ \text{hPa}}^{P_s} vq\text{d}p \tag{3}$$

各边界纬向(A_{lat})和经向(A_{lon})的水汽收支量：

$$A_{lat} = \int_{y_1}^{y_2} Q_{lat}\text{d}y \tag{4}$$

$$A_{lon} = \int_{x_1}^{x_2} Q_{lon}\text{d}x \tag{5}$$

公式中，q、g、p_s、$\bar{V}$ 和 Q 分别代表比湿，重力加速度，地表气压，水平风速和水汽通量，x_1、x_2 和 y_1、y_2 为边界的起始、终点经度和纬度(刘菊菊等，2019)。通过公式(4)和(5)，计算了目标区域东、西、南、北四个边界的水汽收支，而目标区域水汽净收支取决于四个边界的水汽收支和。

根据江志红等(2011)定义水汽通道贡献率的方法，本文将初始点后向追踪120 h的三维运动轨迹划分为不同的水汽源地，并计算不同源地对目标区域暴雨的水汽贡献。

$$Q_s = \frac{\sum_1^m q_{last}}{\sum_1^n q_{last}} \times 100\% \tag{6}$$

其中，Q_s 为水汽贡献率，q_{last} 为最终位置的比湿，m 为水汽源地所包含的轨迹条数，n 为总轨迹数。

2 降水实况与环流形势

2014年7月13日夜间铜仁东北部开始出现强降水，14日白天降水范围逐渐扩大，强降水区域位于铜仁中部偏北一带，最大小时雨量为125.4 mm (石阡甘溪镇)。其中14日07—13时松桃九江镇小时雨量一直大于20 mm (最大为72.9 mm)，导致该地区24 h降水量达272.5 mm。此阶段为此次持续性暴雨的发展阶段，以局地强降水为主(图 1a)。之后强降水继续发展，范

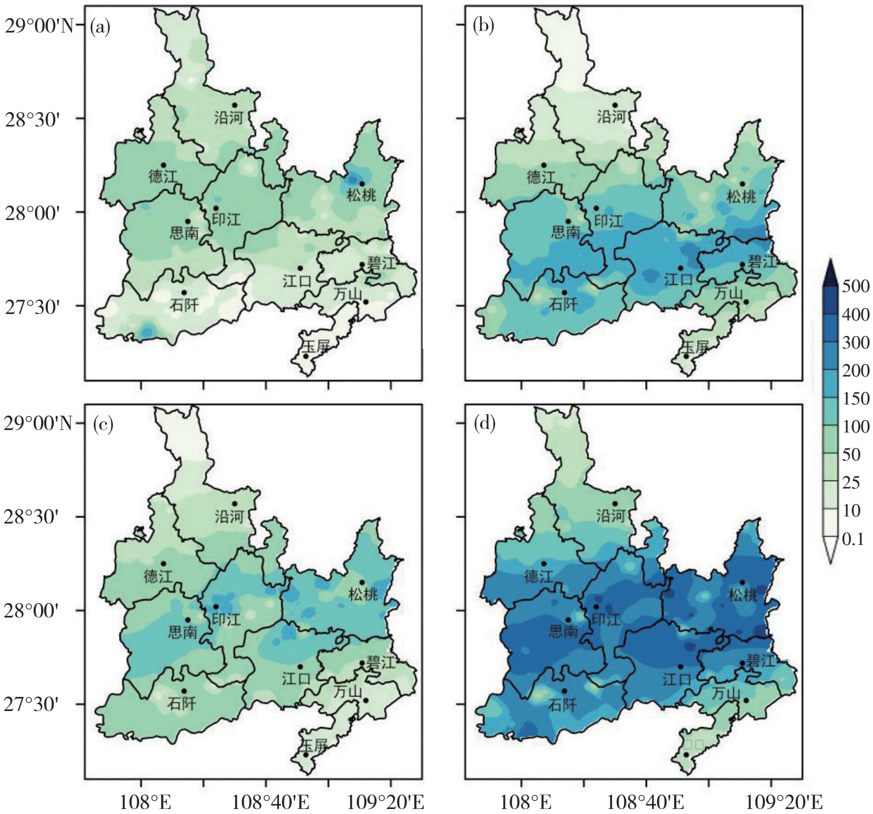

图1 铜仁市2014年7月13日20时—14日20时(a)、14日20时—15日20时(b)、15日20时—16日20时(c)和13日20时—16日20时(d)的累积降水量(单位：mm)的空间分布

Fig.1 The spatial distribution of accumulated precipitation (unit: mm) in Tongren (a) from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 14, (b) from 20:00 BT 14 to 20:00 BT 15, (c) from 20:00 BT 15 to 20:00 BT 16, and (d) from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 16 July 2014

围扩大，强中心位置南移至铜仁中部偏南一带，有134站降水量达50 mm以上，最大小时雨量为47 mm (印江合水镇，15日00—01时)。此阶段小时雨量不及发展阶段，但强降水时间维持长，24 h最大累积降水量为300.4 mm(松桃大兴街道)。该阶段为暴雨强盛阶段，以区域性强降水为主(图1b)。15日20时—16日20时为暴雨减弱阶段，降水强度减弱，范围北缩(图1c)。

此次暴雨过程累积降水量大，最大为547 mm。降水大值区主要出现在思南、印江、江口和松桃境内(图1d)，其中印江、松桃、思南、江口城区累积降水量分别达384.7 mm、361.5 mm、339.7 mm和309.1 mm，均突破历史极值(杨群等，2016)。

图2为2014年7月13—15日对流层高、中、低层环流形势图，从图2a可见，暴雨发展阶段，位于日本海上空的副热带西风急流中心强度达55 m·s^{-1}，一直向西延伸到四川北部。南压高压向东伸展影响我国西南地区东部。500 hPa中高纬稳定维持“两槽一脊”的形势，高压脊位于贝加尔湖西侧，西部槽位于乌拉尔山，东部槽位于东亚，东亚大槽槽底区域对应高空急流。西太平洋副热带高压(以下简称副高)位置偏西、偏北，稳定控制贵州南部以南区域，在其西北侧稳定维持近东西向的短波槽，此时铜仁位于南亚高压东侧、西风急流入口区右侧和副高西北侧短波槽前，高层有很强的辐散(高晓梅等，2023)。700 hPa和850 hPa偏南气流显著，在铜仁有明显的风速辐合，同时850 hPa铜仁中北部存在暖式切变线(图2d、g)。

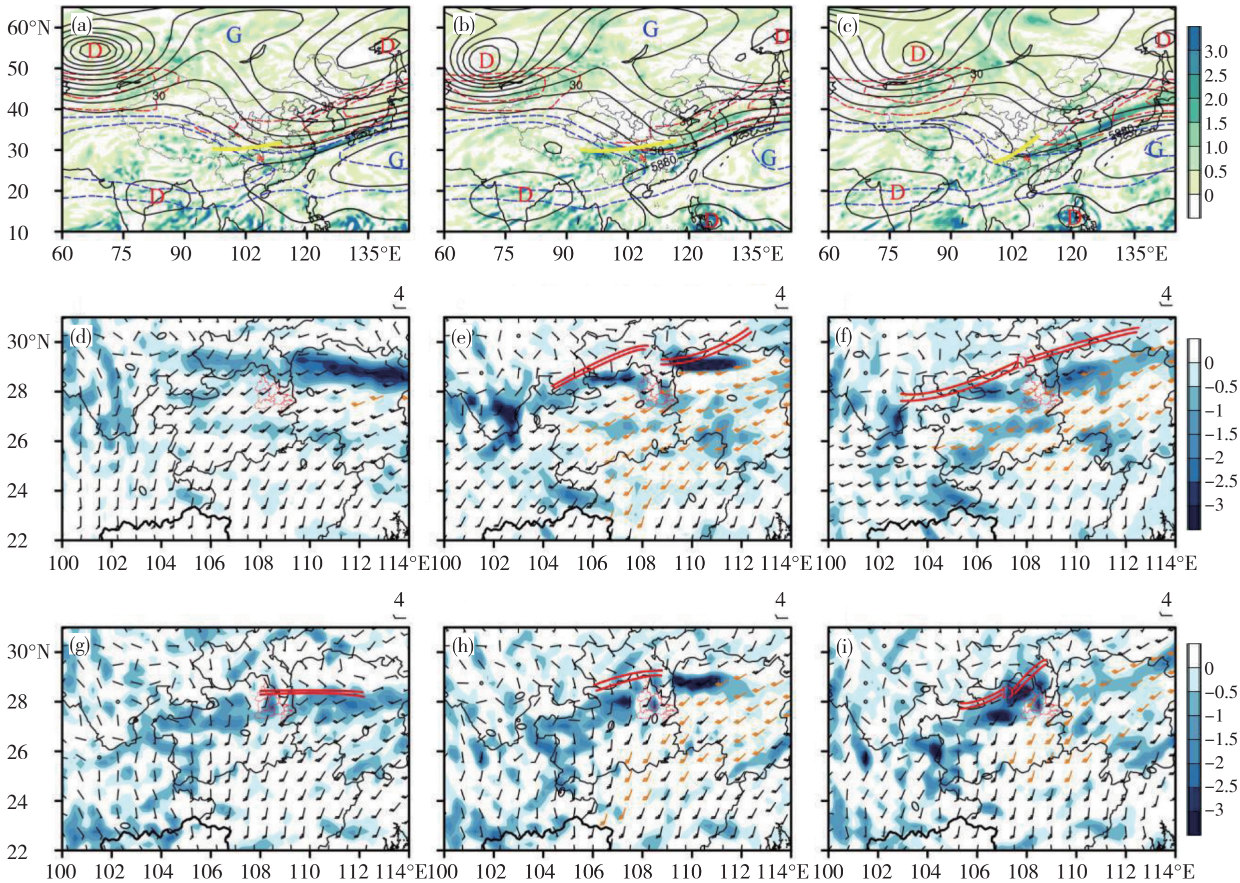

图2 2014年7月13日20时—14日20时(a，d，g)、14日20时—15日20时(b，e，h)、15日20时—16日20时(c，f，i) 200 hPa纬向风(≥30 m·s^{-1}，红色虚线)、南亚高压(蓝色虚线，单位：gpm)、散度(阴影，单位：10^{-5}s^{-1})和500 hPa位势高度(黑实线，单位：gpm) (a—c)，700 hPa (d—f)、850 hPa (g—i)风场(风向杆)和散度(阴影，单位：10^{-5}s^{-1})(红双实线为切变线，黄线为500 hPa短波槽)

Fig.2 (a–c) Zonal wind (≥30 m·s^{-1}, red dashed line), the south Asian high (blue dashed line, unit: gpm) and divergence (shaded, unit:10^{-5}s^{-1}) at 200 hPa, geopotential height (black solid line, unit: gpm) at 500 hPa. Wind field (wind barb) and divergence (shaded, unit:10^{-5}s^{-1}) at (d–f) 700 hPa and (g–i) 850 hPa (a, d, g) from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 14, (b, e, h) from 20:00 BT 14 to 20:00 BT 15, and (c, f, i) from 20:00 BT 15 to 20:00 BT 16 July 2014 (yellow solid line represent shortwave at 500 hPa, the double solid lines are shear lines)

随着东亚西风急流右后侧向南移动靠近铜仁，高层辐散气流更强。700 hPa在贵州北部出现切变线，西南气流增强达到急流强度，铜仁位于急流左侧，850 hPa偏南气流增强，两者相互作用向暴雨区输送更多的水汽、热量和动量，使得铜仁低层辐合更明显，降水更强(图2b、e、h)。暴雨减弱阶段，南压高压西退，

西风急流东缩至安徽，副高东退南压至广西东南部，高层仍有强辐散。700 hPa和850 hPa在贵州北部有明显的低涡切变，此时偏南急流位置北抬，导致明显辐合区位于铜仁北部(图2c、f、i)，强降水中心位置北移。

3 水汽输送特征和水汽收支分析

3.1 水汽输送特征

从地面到300 hPa对暴雨时段的水汽进行积分得到了整层水汽通量及其散度的分布(图3)。暴雨发展阶段(图3a)，影响铜仁暴雨水汽主要源于阿拉伯海、孟加拉湾，经中南半岛向北输送到铜仁；还有部分水汽直接从南海向北输送到铜仁，使得水汽在铜仁发生明显辐合(图3b)。随着印度半岛热带气旋向西移动，源于阿拉伯海、孟加拉湾的更多水汽被输送到铜仁。然而由于台风“威马逊”加强，源于南海的部分水汽随着台风环流在菲律宾群岛附近发生辐合，少量水汽继续向北输送到铜仁(图3c)。此时铜仁水汽辐合增强，与降水强度增强相对应(图3d)。

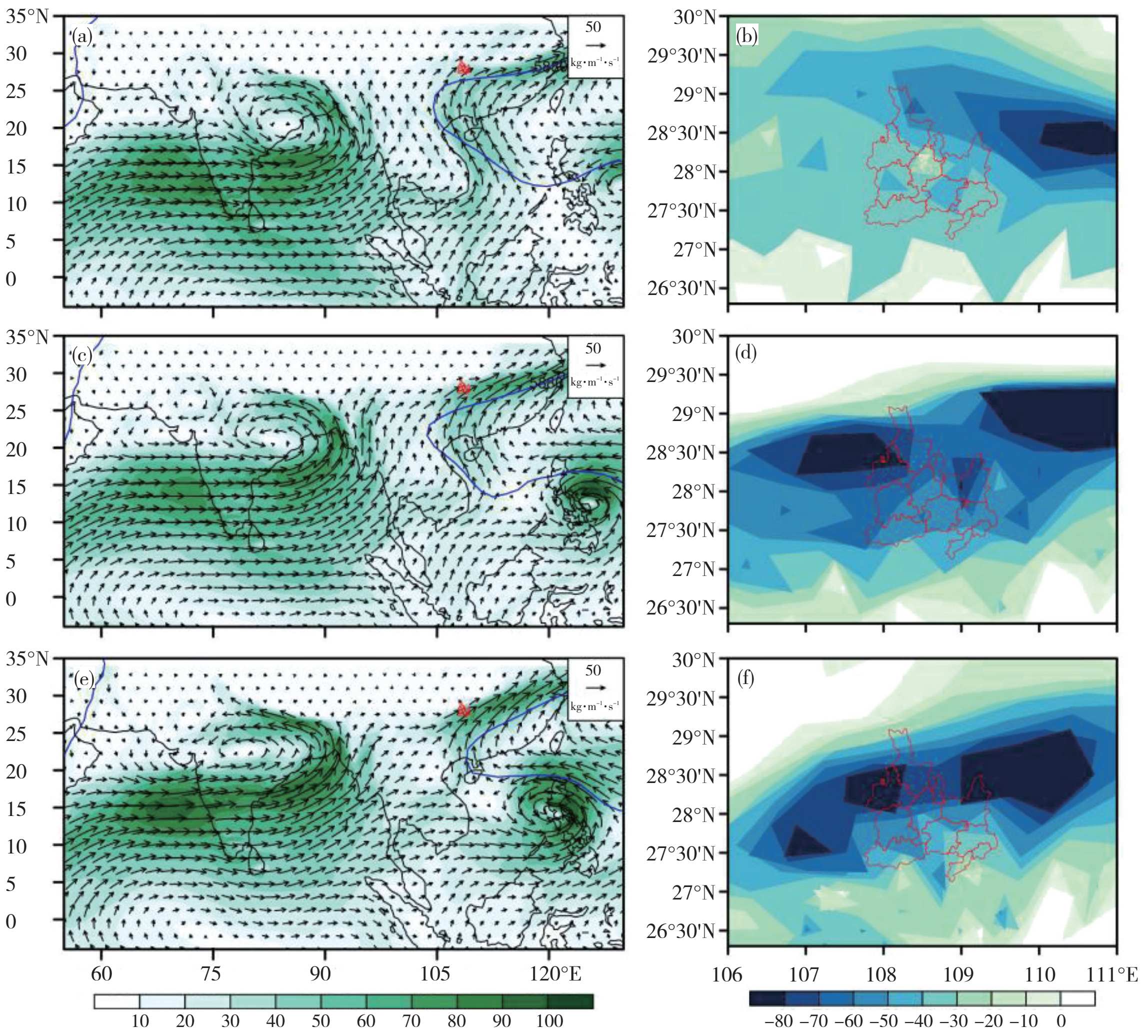

图3 2014年7月13日20时—14日20时(a—b)，14日20时—15日20时(c—d)，15日20时—16日20时(e—f)整层积分的水汽通量(a，c，e；阴影，单位：10 kg·m^{-1}·s^{-1})和水汽通量散度(b，d，f；阴影，单位：10^{-5} kg·m^{-2}·s^{-1})(蓝线为500 hPa等压面上5 880 gpm等值线)

Fig.3 The vertically integrated of water vapor flux (a, c, e, shaded, unit: 10 kg·m^{-1}·s^{-1}) and water vapor flux divergence (b, d, f, shaded, unit:10^{-5}kg·m^{-2}·s^{-1}) (a, b) from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 14, (c, d) from 20:00 BT 14 to 20:00 BT on 15 and (e, f) from 20:00 BT 15 to 20:00 BT 16 July 2014 (the blue line represents the feature line of 5 880 gpm at 500 hPa)

暴雨减弱阶段，印度半岛热带气旋继续西移，导致从阿拉伯海、孟加拉湾向东、向北输送到铜仁的水汽减少。同时台风“威马逊”西移，副高东退南压，少量水汽从北印度洋一直向东输送，在“威马逊”影响下，从南海直接向北输送到铜仁的水汽也减少(图3e)。此次过程，副高和印度半岛热带气旋稳定维持将源于阿拉伯海、孟加拉湾和南海的水汽源源不断的输送到铜仁，这为暴雨的发生提供了充沛的水汽条件。

3.2 暴雨区水汽收支分析

通过对水汽通量的分析，发现影响铜仁持续性暴

雨的水汽主要源于铜仁南侧海洋,为了理清楚这些水汽在垂直方向上的分布,将整层空气柱分成500—300 hPa(高层)、700—500 hPa(中层)和地面—700 hPa(低层)来定量分析铜仁四个边界水汽的收支(图4)。

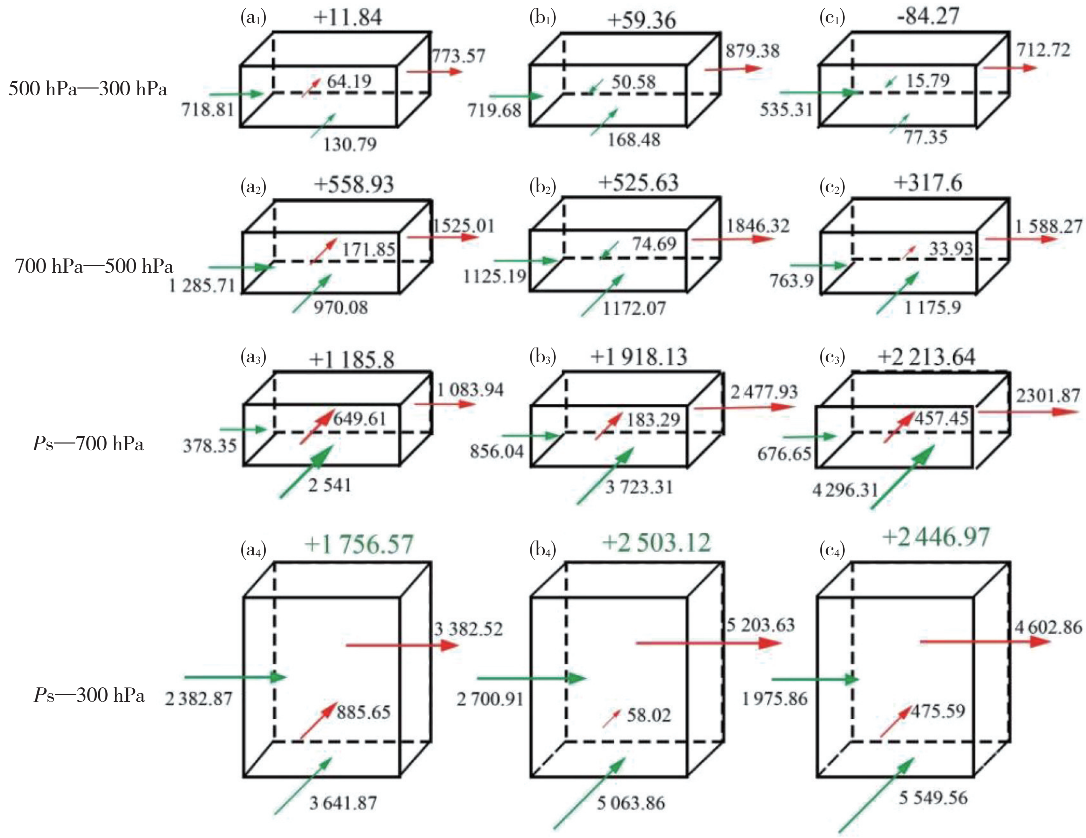

图4 2014年7月13日20时—14日20时(a_1—a_4)、14日20时—15日20时(b_1—b_4)、15日20时—16日20时(c_1—c_4) 500—300 hPa (a_1—c_1)、700—500 hPa (a_2—c_2)、地面—700 hPa (a_3—c_3)、地面—300 hPa (a_4—c_4)通过铜仁东、西、南和北边界水汽通量的垂直分布(单位:kg·s^{-1})(其中绿(红)色箭头表示水汽流入(出),正(负)号表示净的水汽流入(出))

Fig.4 Vertical distribution of water vapor transport of (a_1–c_1) 500–300 hPa, (a_2–c_2) 700–500 hPa, (a_3–c_3) surface pressure to 700 hPa and (a_4–c_4) the whole air column across the four boundaries of the Tongren (unit: kg·s^{-1}) (a_1–a_4) from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 14, (b_1–b_4) from 20:00 BT 14 to 20:00 BT 15 and (c_1–c_4) from 20:00 BT 15 to 20:00 BT 16 July 2014 (The green (red) arrows indicate the water vapor influxes (outfluxes), the positive (negative) numbers indicate net water vapor inflow (outflow) at different layer)

暴雨发展阶段,水汽通过西边界、南边界进入铜仁,通过北边界、东边界流出铜仁。南边界低层水汽流入值最大,到了中高层,随着比湿减少,水汽流入值减小;西边界由于海拔相对较高,水汽流入值在中层最大,高层次之,低层最小。北边界水汽流出值从低层到高层递减;东边界水汽流出值在中层最大,低层次之,高层最小。通过计算各层水汽净收支,发现水汽净流入在低层最大,中层次之,高层最小,整层水汽净流入为1 756.67 kg·s^{-1}(图4a_1—a_4)。

暴雨强盛阶段,通过南边界和西边界的水汽流入显著增加,分别为5 063.86和2 700.91 kg·s^{-1},南边界整层水汽流入显著增加,西边界在低层增加,在中层略微减少。与发展阶段相比,南(西)边界水汽流入值增加了1 421.99 (318.04) kg·s^{-1}。虽然东边界的水汽流出值增加了1 821.11 kg·s^{-1},但北边界在低层水汽流出值显著减少,且中层和高层由水汽流出变为水汽流入,整层水汽流出值减少827.63 kg·s^{-1},为2 503.12 kg·s^{-1},比发展阶段增加了446.55 kg·s^{-1}。

暴雨减弱阶段,西边界水汽流入显著减少,为1 975.86 kg·s^{-1},其中,中高层流入值比前两个阶段小,而低层比强盛阶段小(小179.39 kg·s^{-1}),但比发展阶段大(大298.3 kg·s^{-1});南边界水汽流入值在低层继续增加至4 296.31 kg·s^{-1},在中层与强盛阶段相当,为1 175.9 kg·s^{-1},在高层略微减少,整层水汽净流入值为5 549.56 kg·s^{-1},较强盛阶段略微增加。东边界水汽流出值为4 602.86 kg·s^{-1},比强盛阶段减少600.77 kg·s^{-1},但比发展阶段增多1 220.34 kg·s^{-1}。北边界整层水汽流出值比强盛(发展)阶段减少(增加)410.06(417.57) kg·s^{-1},为475.59 kg·s^{-1}。

综上,暴雨时段水汽主要通过西边界和南边界进入铜仁,这与水汽通量表现一致。南(西)边界的水汽流入增多、北边界水汽流出显著减少是导致水汽集中

在铜仁,进而产生强降水的主要原因。

4 水汽来源追踪和水汽源地定量分析

4.1 24 h和48 h水汽来源特征

暴雨发生前24 h、48 h是预报预警和防汛减灾的关键时段,因此本文利用HYSPLIT4模式分析暴雨时段区域内所有空气块后向追踪24 h(图5)和48 h(图6)的高度、比湿和相对湿度的分布。从图5可见,影响铜仁暴雨的大部分空气块源于铜仁南侧地区,最远可追踪到南海,输送到暴雨区850 hPa、700 hPa和500 hPa。大部分空气块高度在1 500 m以下,比湿在11~22 g·kg^{-1}之间,相对湿度为70%~98%;少数空气块在1 500~3 000 m之间,比湿约8 g·kg^{-1},相对湿度为60%~70%(图5a_1、b_1、c_1、a_2、b_2、c_2);极少量空气块高度在4 500~6 000 m之间,比湿在2~6 g·kg^{-1}之间,相对湿度为30%~60%(图5a_3,b_3,c_3)。

其余空气块来自铜仁以北地区,最远可追溯到甘肃,主要输送到暴雨区500 hPa,高度在4 500~6 000 m之间,其中少量空气块输送到850 hPa和700 hPa,高度在3 000 m左右(图5a_1—a_3)。来自铜仁北侧空气块的比湿和相对湿度明显小于来自其南侧地区的空气块,且纬度越高,比湿和相对湿度值越小,比湿在1~4 g·kg^{-1}之间,相对湿度为70%~100%(图5b_1—b_3、图5c_1—c_3)。当空气块输送到铜仁上空850 hPa、700 hPa和500 hPa时水汽所有增加,相对湿度为80%~100%,比湿分别在11~13 g·kg^{-1}、8~9 g·kg^{-1}和5 g·kg^{-1}之间。

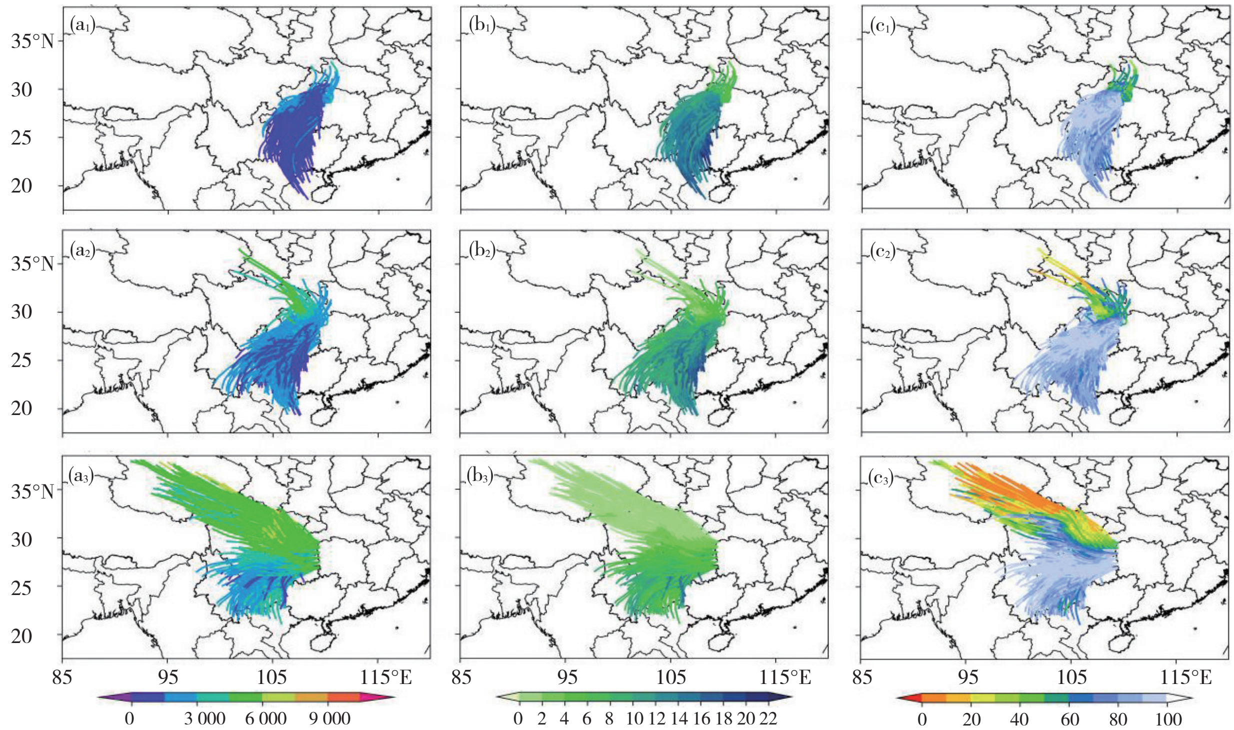

图5 暴雨时段后向追踪24 h空气块运动轨迹的850 hPa (a_1、b_1、c_1)、700 hPa (a_2、b_2、c_2)、500 hPa (a_3、b_3、c_3)的高度(a_1—a_3,单位:m)、比湿(b_1—b_3,单位:g·kg^{-1})和相对湿度(c_1—c_3,单位:%)

Fig.5 The spatial distribution of height (a_1–a_3, unit: m), specific humidity (b_1–b_3, unit: g·kg^{-1}) and relative humidity (c_1–c_3, unit:%) of the air particles 24 h backward trajectory simulation at (a_1–c_1) 850 hPa, (a_2–c_2) 700 hPa, and (a_3–c_3) 500 hPa during the rainstorm process

对空气块后向追踪48 h显示(图6),源于铜仁南侧的空气块最远追溯到南海和中南半岛,输送到暴雨区850 hPa的空气块高度低于1 500 m,比湿为18~22 g·kg^{-1},相对湿度为74%~94%(图6a_1—c_1);暴雨区700 hPa的空气块来自3 000 m高度以下,比湿为12~17 g·kg^{-1},相对湿度为76%~94%(图6a_2—c_2);暴雨区500 hPa空气块来自较高高度,最高达6 000 m,比湿为4~15 g·kg^{-1},相对湿度为76%~95%(图6a_3—c_3)。源于铜仁北侧的空气块最远可以追踪到新疆地区,其中大部分空气块来自4 500~7 500 m高度,主要输送到暴雨区500 hPa,比湿小于2 g·kg^{-1},相对湿度位10%~70%;少量空气块高度在4 500 m以下,主要输送到暴雨区850 hPa和700 hPa,比湿和相对湿度分别在2~4 g·kg^{-1}、10%~40 %之间。

4.2 120 h水汽来源特征

由前面分析可见,随着后向追踪时长增加,源自铜仁南侧的空气块可追踪到海洋上(南海),而海洋是陆地降水的主要水汽源地,因此本文继续分析了后向追踪120 h的轨迹分布(图7)。源于铜仁南侧的空气块来自南海、孟加拉湾和阿拉伯海,高度在1 500 m以下(图7a_1—a_3),比湿为10~20 g·kg^{-1},相对湿度为70%~94%

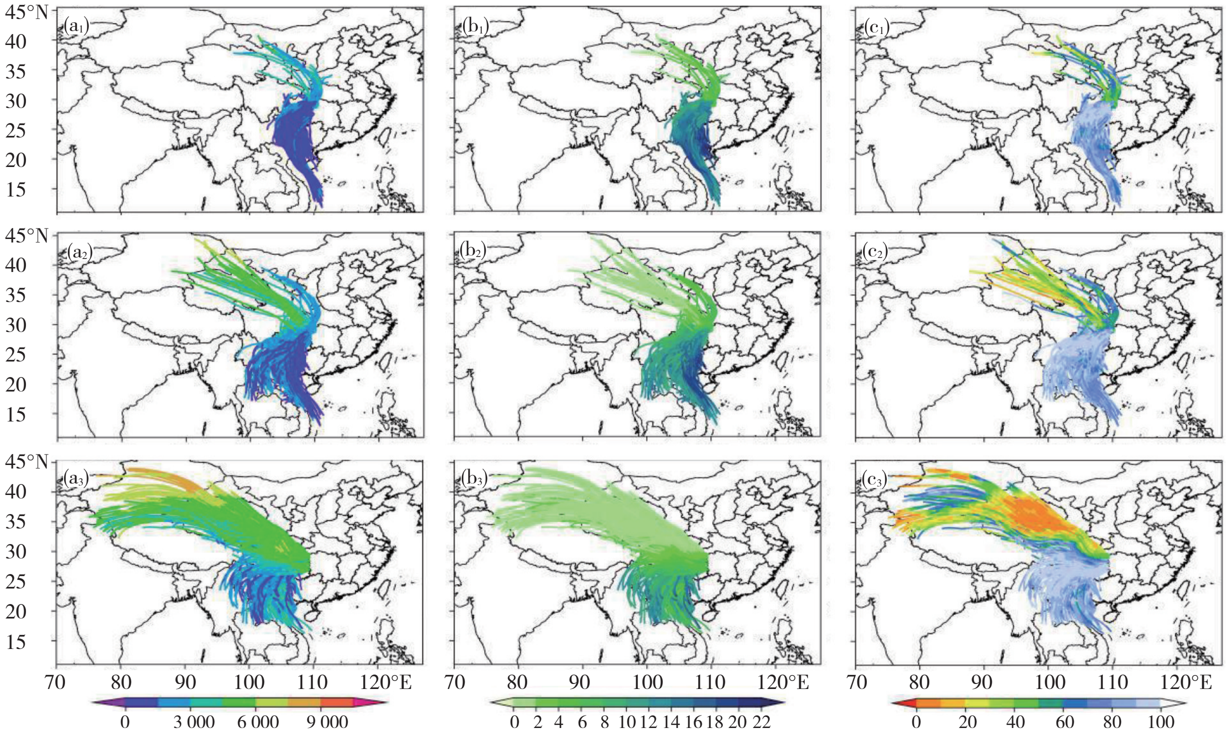

图6 同图5,但为48 h

Fig.6 Same as Fig.5, but for 48 h

(图7b1—b3、图7c1—c3)。来自铜仁北侧的空气块大部分来自铜仁以北至欧亚大陆,少数来自大西洋。由于源于欧亚大陆和大西洋的空气块所处高度高(高5 000 m以上),水汽含量少,因此比湿接近0 g·kg^{-1},相对湿度低于30 %。受西风带影响,这些空气块在120 h内输送的距离远大于来自低纬地区的空气块。

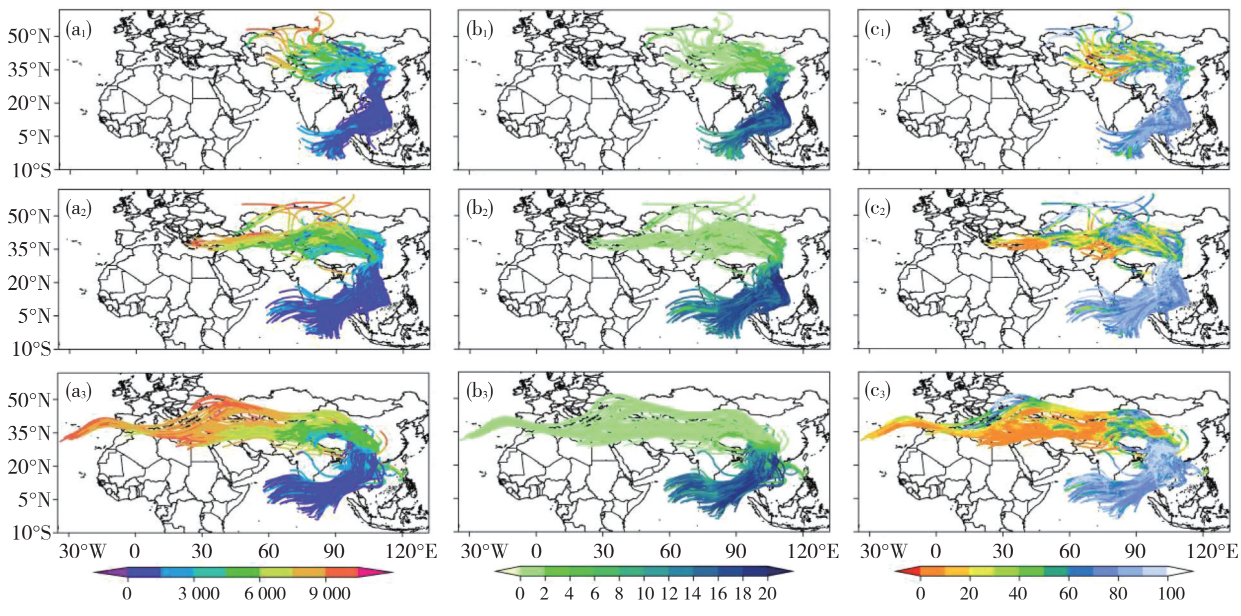

图7 同图5,但为120 h

Fig.7 Same as Fig.5, but for 120 h

4.3 120 h水汽源地和源地定量贡献

由于降水的水汽主要来自海洋,因此根据后向追踪120 h空气块的轨迹分布,将水汽源地划分为4个区域(图8a),分别是阿拉伯海–印度半岛西部(A)、印度半岛东部–孟加拉湾(B)、铜仁以南–南海及附近岛屿和海域(C)和暴雨区以北至欧亚大陆(D)。从图8b为不同水汽源地不同高度层对铜仁暴雨的贡献率,可见C区的水汽总贡献率(850 hPa、700 hPa和500 hPa之和)最大,为48.29%,B区(32.17%)次之,A区(10.47%)和D区(9.07%)最小,其中源地C、源地B和源地A的水汽贡献

率总和达90.93%,表明影响铜仁暴雨的水汽主要来自低纬海洋。

来自铜仁以南—南海及附近岛屿和海域(C)的水汽在850 hPa、700 hPa和500 hPa的贡献率分别为55.82%、45.4%和41.26%。该区域距离铜仁近,位于低海拔的空气块摄取C区大量水汽,沿途所经区域地势相对平坦,且无明显天气系统影响和截留(图2),这些水汽能很好的留在空气块中,最终随空气块输送到铜仁。来自印度半岛东部–孟加拉湾(B)的水汽向东向北输送过程中受地形影响,水汽贡献在850 hPa (27.85%)要低于700 hPa (40.35%),500 hPa与850 hPa相当,为27.23%。

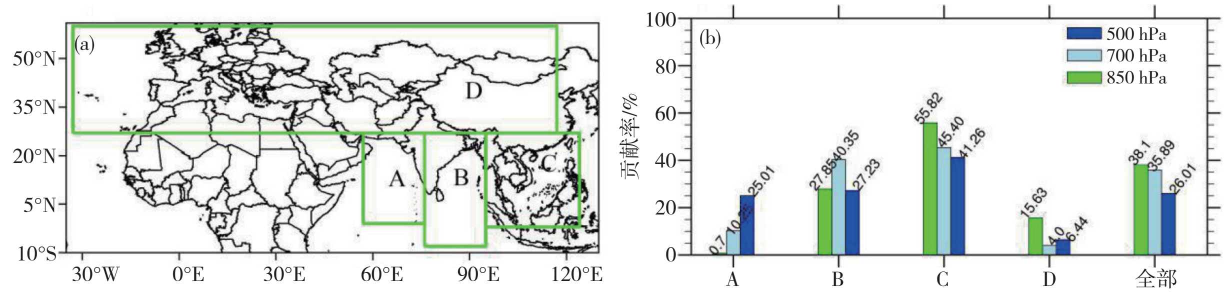

图8 不同水汽源地(a)以及不同水汽源地不同高度层对铜仁暴雨的贡献率(b)(A表示阿拉伯海–印度半岛西部、B表示印度半岛东部–孟加拉湾、C表示铜仁以南–南海及附近岛屿和海域、D表示暴雨区以北至欧亚大陆区域)

Fig.9 (a) The distribution of four water vapor source regions and (b) the contribution percentage of the these water vapor source regions to rainstorm in Tongren (A,B,C and D represent the Arabian Sea–the west of the Indian Peninsula, the east of the Indian Peninsula–the Bay of Bengal, the south of Tongren–South China Sea and its adjacent islands and waters, and the north of Tongren to Eurasia, respectively)

阿拉伯海区域是三个洋面中对铜仁暴雨贡献最小的区域,原因有两点,一是该区域离铜仁距离较远,该区域的大部分空气块在120 h内还没被输送到铜仁;二是受印度半岛热带气旋影响,部分水汽被输送到印度半岛北部(图3)。850 hPa、700 hPa和500 hPa的水汽贡献率分别为0.7%、10.25%和25.01%,贡献率从低层到高层递增,是因为源于低海拔的空气块在低层(850 hPa和700 hPa)受地形等因素影响,在120 h内从A区输送到铜仁的空气块数要小于500 hPa(图7)。D区的空气块由于路途遥远且来自高层,携带的水汽极少,因此它的贡献率最小。从850 hPa、700 hPa和500 hPa的总贡献率来看,850 hPa和700 hPa是铜仁暴雨主要的水汽贡献层,贡献了近3/4的水汽。500 hPa的总贡献率最小,为26.01%。

5 结论与讨论

本文利用降水观测数据、ERA5和NCEP GDAS再分析数据对铜仁一次持续性暴雨过程的大气环流形势、水汽收支、水汽源地和源地定量贡献进行了分析,得出主要结论如下:

(1) 东伸的南亚高压和高低空急流的耦合作用共同增强低层辐合、高层辐散的动力机制,利于水汽辐合上升凝结,形成降水。中层稳定控制贵州南部以南地区的副高及其西北部的短波槽与低纬印度半岛的热带气旋协同作用,建立明显的水汽输送通道,将海上的水汽源源不断向暴雨区输送。同时低层西南急流和副热带西风急流耦合作用使得低空西南急流稳定维持,不断向暴雨区输送水汽、动量和热量,利于水汽在暴雨区辐合上升产生强降水。

(2) 暴雨期间,水汽通过西边界和南边界进入铜仁,通过西边界的水汽主要集中在中层,通过南边界的水汽主要集中在低层,这与地形有关。水汽流出通过东边界和北边界,东边界整层都有水汽流出,且高度越低,水汽流出值越大;北边界在低层为水汽流出层,在中上层由于受天气系统的影响,在降水强盛时期会从水汽流出层转变为水汽流入层。中低层是暴雨时段水汽净流入层,且降水越强,水汽净流入值越大。

(3) 影响铜仁暴雨的空气块主要来自阿拉伯海、孟加拉湾、南海,位于较低的高度上,比湿为10~20 g·kg^{-1},相对湿度为70%~94%;少量空气块来自铜仁以北至欧亚大陆、大西洋(所处高度较高),比湿接近0 g·kg^{-1},相对湿度在0%~30%之间。当这些空气块输送到铜仁上空的850 hPa、700 hPa和500 hPa时,相对湿度变为80%~100%,比湿分别在11~13 g·kg^{-1}、8~9 g·kg^{-1}和5 g·kg^{-1}左右。

(4) 此次过程水汽源地主要为铜仁以南–南海及附近岛屿和海域、印度半岛东部–孟加拉湾、阿拉伯海–印度半岛西部,水汽贡献率分别为48.29%、32.17%和10.47%。除此之外,铜仁以北至欧亚大陆、大西洋的水汽也有一定贡献。850 hPa和700 hPa是主要水汽贡献层,总贡献率分别是38.1%、35.89%,为铜仁暴雨的发生贡献了近3/4的水汽,剩下1/4水汽由500 hPa贡献。

本文从水汽输送角度揭示了铜仁暴雨的动力机制，即稳定的大气环流形势背景下，印度半岛热带气旋与稳定少动的副高持续协同影响建立明显的水汽输送通道，使低纬海洋的水汽源源不断的向暴雨区输送，这为铜仁暴雨提供充沛水汽。铜仁处于云贵高原至湘西丘陵的斜坡地带，地形复杂，水汽进入铜仁须越过高大的地形，空气在山脉迎风坡被迫抬升冷却造成水汽凝结产生降水，在山脉背风坡气下沉增温变得干燥，而损失大量水汽，那么地形对铜仁暴雨过程水汽输送的影响和水汽损失有何作用，这需要进一步研究。

参考文献(References)：

陈红专,叶成志,陈静静,等.2019.2017年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J].气象,45(9):1213-1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al. 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017 [J]. Meteorological Monthly,45(9):1213-1226 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000 -0526.2019. 09.003

陈军,何为,杨群,等.2020.低层偏东气流对贵州梵净山东侧强降水的作用[J].暴雨灾害,39(2):158-166. Chen J, He W, Yang Q, et al. 2020. Effect of low-level eastward airflow on formation of severe precipitation on the east side of Fanjing Mountain [J]. Torrential Rain and Disaster,39(2):158-166 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.001

陈文,杨修群,黄荣辉,等. 2013. 中国南方洪涝和持续性暴雨的气候背景[M].北京:气象出版社:1. Chen W, Yang X Q, Huang R H, et al. 2013. The climatic background of floods and persistent rainstorm in southern China [M]. Beijing:Science Press:1

杜小玲,吴磊,杨秀庄,等.2016.梅雨锋西段持续性暴雨的环境场特征及贵阳极端降水成因[J].暴雨灾害,35(5):415-426. Du X L, Wu L, Yang X Z, et al. 2016. Analysis of environment conditions of a sustained heavy rain event occurred in western Meiyu front and cause of extreme precipitation in Guiyang [J]. Torrential Rain and Disaster,35(5):415-426 (in Chinese). doi:10.3969 /j.issn.1004-9045.2016.05.003

高晓梅,任广治,王向前,等.2023.2018年山东一次极端暴雨的环境场特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(5):56-63. Gao X M, Ren G Z, Wang X Q, et al. Environmental characteristics of historical extreme rainstorm in Shandong province caused by typhoon rumbia [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(5):56-63 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2 023.05.007

江志红,梁卓然,刘征宇,等.2011.2007年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J].大气科学,35(2):361-372. Jiang Z H, Liang Z R, Liu Z Y, et al. 2011. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the huaihe river basin in 2007 [J]. Journal of Atmospheric Sciences,35(2):361-372 (in Chinese)

李晓容,高青云,付世军.2020.四川盆地东北部三次持续性暴雨过程水汽输送特征分析[J].暴雨灾害,39(3):234-240. Li X R, Gao Q Y, Fu S J. 2020. Analysis of water vapor transport characteristics of the three persistent rainstorm processes innortheastern Sichuan basin [J]. Torrential Rain and Disaster,39(3):234-240 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045. 2020. 03. 003

廖洪敏,何为,石薇,等.2020.玉屏县2018-07-01强降水天气过程机制分析[J].中低纬山地气象,44(2):40-46. Liao H M, He W, Shi W, et al. 2020. Analysis on the mechanism of strong precipitation process over Yuping County on July1 [J]. Mid - low Latitude Mountain Meteorology, 44(2):40-46 (in Chinese)

刘菊菊,游庆龙,王楠.2019.青藏高原夏季云水含量及其水汽输送年际异常分析[J].高原气象,2019,38(3):449-459. Liu J J,You Q L, Wang N. 2019. Interannual anomaly of cloud water content and its connection with water vapor transport over the Qinghai-Tibetan Plateau in summer[J]. Plateau Meteorology,38(3):449-459 (in Chinese). doi:10.7522/j.iss n.1000-0534.2018.00138.

聂云,周继先,杨帆,等.2021.梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析[J].暴雨灾害,40(2):125-135. Nie Y, Zhou J X, Yang F, et al. 2021. Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains [J]. Torrential Rain and Disaster,40(2):125-135 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.003

施逸,江志红,李肇新.2022.基于拉格朗日方法的中国东部雨季水汽输送垂直特征[J].大气科学,46(2):380-392. Shi Y, Jiang Z H, Li Z X. 2022. Vertical Characteristics of Water Vapor Transport during the Rainy Season in Eastern China Based on the Lagrangian Method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(2):380-392 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1 006-9895.2105.20236

孙建华,汪汇洁,卫捷,等.2016.江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征[J].气象学报,74(4):542-555.Sun J H, Wang H J, Wei J, et al. 2016. The sources and transportation of water vapor in persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River Valley [J]. Acta Meteorologica Sinica,74(4):542-555 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.047

陶诗言.1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社, 1-225. Tao S Y.1980. The rainstorm in China [M]. Beijing:Science Press:1-225

田红,郭品文,陆维松.2004.中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析[J].热带气象学报,20(4):401-408. Tian H, Guo P W, Lu W S. 2004. Characteristics of vapor inflow corridors related to summer rainfall in China and impact factors [J]. Journal of tropical meteorology,20(4):401-408 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2004.04.008

王佳津,王春学,陈朝平,等.2015.基于HYSPLIT4的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J].气象,41(11):1315-1327. Wang J J, Wang C X, Chen C P, et al. 2015. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths and sources in Sichuan basin based on HYSPLIT4 model [J]. Meteorological Monthly,41(11):1315-1327 (in Chinese). doi:10.7519/j, issn.1000-0526. 2015.11.002

王婧羽,崔春光,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 C 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

王钦,曾波.2022.四川盆地两类区域持续性暴雨的环流物理量场特征及成因分析[J].高原气象,41(5):1175-1189. Wang Q, Zeng B. 2022.

Analysis of circulations and physical variables in Multi-levels Associated with two types of regional persistent heavy rainfall events [J]. Plateau Meteorology,41(5):1175-1189 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn. 1000-0534. 2021.00038

杨群,陈关清,茅海祥,等.2016.2014年7月贵州铜仁一次持续性暴雨过程物理机制分析[J].暴雨灾害,35(3):261-270. Yang Q, Chen G Q, Mao H X, et al. 2016. Analysis of the physical mechanism of a persistent heavy rain event at Tongren in July 2014 [J]. Torrential Rain and Disaster,35(3):261-270 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.03.009

杨群,张李娟,胡萍.2021.重庆低涡影响下贵州铜仁两次暴雨过程分析[J].沙漠与绿洲气象,15(4):26-34. Yang Q, Zhang L J, Hu P. 2021. Analysis of Two Rainstorm Processes in Tongren under the Influence of Low Vortex in Chongqing [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(4):26-34 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2021.04.004

周涛,白慧,李忠燕,等.2017.贵州夏季水汽输送与旱涝的关系[J].科技资讯,15(13):78-83. Zhou T, Bai H, Li Z Y, et al. 2017. Relationship between water vapor transfer and drought-flood during summer in guizhou [J]. Science & technology information,15(13):78-83. doi:10.16661/j.cnki.1672-3791.2017.13.078.

周晓霞,丁一汇,王盘兴.2008.夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响[J].气象学报,66(1):59-70. Zhou X X, Ding Y H, Wang P X. 2008. Moisture transpotr in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica,66(1):59-70 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.01.00 6

Draxler, R R, Hess, G D. 1998. An overview of the hysplit_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine,47(4), 295-308

Jiang Z H, Sun Y C, Ma T T, et al. 2014. Changes of Precipitation Intensity Spectra in Different Regions of Mainland China During 1961-2006 [J]. Journal of Meteorological Research,28(6):1085-1098. doi:10.1007/s13351-014-3233-1

Ma S, Zhou T, Dai A, et al. 2015. Observed Changes in the Distributions of Daily Precipitation Frequency and Amount over China from 1960 to 2013 [J]. Journal of Climate,28:6960-6978. doi:10.1175/JCLI-D-15-0011.1

Simmonds I, Bi D, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer [J]. Journal of Climate,12(5):1353-1367. doi:10.1175/1520-0442 (1999) 012<1353:AWVFAD>2.0.CO; 2

Sun B, Wang H. 2014. Moisture sources of semiarid grassland in china using the lagrangian particle model flexpart. Journal of Climate [J].27(6), 2457-2474. doi:10.1175/JCLI-D-13-0 0517.1

（责任编辑　闵爱荣）