

湖北省三次春季暴雨过程水汽来源与输送特征分析

熊秋芬¹ 姜晓飞¹ 鞠英芹² 汤兴芝²

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 中国气象局气象干部培训学院湖北分院, 武汉 430074)

摘要: 利用常规观测资料、地面加密资料, 先分析了2017年4月8—9日、2005年4月8—9日和2019年4月8—9日湖北三次暴雨过程(分别简称“2017年”“2005年”“2019年”暴雨过程, 下同)的环流背景和主要影响系统; 再利用HYSPLIT模式和NCEP 6 h一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析场模拟了三次暴雨过程中最强降水中心气块的后向轨迹, 讨论了不同高度轨迹中的气块在移动过程中水汽的变化。得到如下结论: 1) 三次暴雨过程发生均在500 hPa槽东移的背景下, 中低层有低涡、切变线、低空急流、地面冷锋等辐合系统, 并伴有高空辐散, 上升运动强、水汽充沛。2) 三次暴雨过程的共同特征是水汽均主要来源于对流层中低层气块, 特别是3000 m以下的气块水汽含量大, 是暴雨过程水汽的主要贡献者; 但气块的源地、移动路径和气块获得水汽的途径不同。三次暴雨过程中终点到达5000, 7000和9000 m的气块均源自孟加拉国及其以西地区, 向东或东北方向移向强降水中心, 但水汽含量小; 终点到达500、1500、3000 m的气块源地相对分散, 即终点到达500 m的气块分别来自中南半岛北部、东海和暴雨区南侧的近地层, 水汽含量最大; 终点到达1500 m的气块, 分别源自暴雨区的北侧、孟加拉湾东部和暴雨区南侧的近地层; 水汽含量较大; 终点到达3000 m的气块, 分别源自黄海、西亚地区, 仍有一定的水汽含量。“2017年”“2005年”暴雨过程中的气块主要从近海面获得水汽, 其次是从陆地上获得水汽, 而“2019年”暴雨过程中的气块主要是获得陆地蒸发的水汽。表明了暴雨过程中水汽来源和输送的多样性和复杂性。3) 通过对三次暴雨过程的分析得到的预报启示是: 在西风带高低空系统有利的配置下, 除了关注副热带夏季风从南海输送水汽外, 还要重视暴雨区本地及其周边地区近地层高温高湿环境中水汽的贡献。

关键词: 暴雨, 水汽, 轨迹, 模拟, 春季

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.03.005

Analysis of Moisture Source and Transport Pathway of Three Rainstorms in Hubei Province in Spring

Xiong Qiufen¹, Jiang Xiaofei¹, Ju Yingqin², Tang Xingzhi²

(1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081 2 Hubei Branch of China Meteorological Administration Training Centre, Wuhan 430074)

Abstract: Analysis of three rainstorms occurred on 8–9 April 2017, 2005 and 2019 in Hubei province were carried out using conventional observations, hourly surface observation. 192, 120 and 144 h backward trajectories were simulated and studied based on HYSPLIT model and 6-hourly NCEP reanalysis data. (1) The results showed that three rainstorms happened with 500 hPa trough, vortex, shear lines, low level jets and cold front and divergence at 200 hPa. (2) In general, water vapor mainly comes from the middle-low troposphere during three rainstorms, especially below 3000 m and contributed more. But the source region, the movement and the way of picking up moisture of air parcels are different in three rainstorm processes. Air parcels ended up over 5000, 7000 and 9000 m came from outside of China are dry air and contribute little. But air parcels ended up over 500, 1500 and 3000 m originated from different areas. Air parcels ended up over 500 m came from the north of Indo China Peninsula, East China Sea and the south of rainstorm area with the highest specific humidity. Air parcels ended up over 1500 m originated from the north of rainstorm area, the east of Bay of Bengal and the south of rainstorm area with higher moisture. Air parcels ended up over 3000 m came from Yellow Sea and West Asia area with moderate water vapor. Air parcels picked up moisture mainly from sea surface, secondly from land surface in “2017” and “2005” cases, but air parcels picked up moisture mainly from land surface in “2019” case. There are diversity and complexity of moisture source and transport. (3) With the advantage of synoptic situation, beside the water vapor from South China Sea with subtropical monsoon, moist air from rainstorm area and its surrounding regions is very important.

Keywords: rainstorm, moisture, trajectory, simulation, spring

收稿日期: 2020年11月16日; 修回日期: 2020年12月20日
 第一作者: 熊秋芬(1968-), Email: xiongqf@cma.gov.cn
 资助项目: 中国气象局短时临近预报教学科研团队; 中亚大气科学研究基金项目(CAAS201906); 国家自然科学基金(41705031)

0 引言

我国东部地处典型的季风气候区，降水的水汽来源与东亚季风关系密切^[1]。而东亚季风系统由热带季风和副热带季风共同组成^[2-6]，但在热带季风爆发之前的3月末—4月初，副热带季风已经爆发，江南和华南春雨盛行^[7-10]；任珂等^[11]的研究表明江南南部和华南北部降水中的水汽主要来源于西太平洋副热带高压南侧转向的西南水汽输送，其源地即为副热带季风雨季的开始。

另一方面，关于水汽输送特征的研究主要从欧拉观点和拉格朗日的观点出发，尽管基于欧拉观点的水汽的输送和辐合被广泛应用于暴雨过程的诊断分析中^[12]，但近年来，许多学者采用拉格朗日的观点、结合HYSPLIT模式^[13-15]来追踪降水过程中水汽的来源及输送特征。如江志红等^[16]基于拉格朗日法分析了江淮梅雨水汽特征，梅雨水汽主要来自印度洋、太平洋和孟加拉湾—南海等；杨浩等^[17]对比了江淮梅雨和淮北市水汽输送的气候差异，淮北市水汽来自印度洋水汽比梅雨少20%，而来自欧亚大陆偏多19%；陈斌等^[18]的研究发现陆地蒸发对水汽贡献相对重要，熊秋芬等^[19]发现由北上江淮气旋引发的暴雪过程中，水汽并不直接来自南海或孟加拉湾，而是来自东亚大陆气块，在经过黄海、渤海和日本海时获得水汽；许彬等^[20]的结果表明南昌大暴雨过程的水汽主要来自于对流层低层南海西南部向我国陆地的水汽输送和本地周围水汽的贡献。李晓蓉等^[21]揭示了孟加拉湾和南海两支水汽输送对四川暴雨的作用。由此可见不同的天气过程，水汽的来源并不完全相同。鉴于HYSPLIT模式能追踪不同高度气块轨迹和定量统计水汽等优点，以及少有文献讨论长江中下游春季强降水中水汽来源及输送路径等问题，本文将HYSPLIT模式引入湖北省春季大暴雨过程水汽的研究中。

春季是湖北省降水多发的时段，为了追踪春季暴雨中水汽的来源，本文选取了2017年4月8—9日、2005年4月8—9日和2019年4月8—9日发生在湖北省的三次暴雨过程，过程平均雨量分别排名历史同期第1、第2和第4，利用常规观测、地面加密观测资料先分析了三次暴雨过程的环流背景和主要影响系统；再基于HYSPLIT模式和6 h一次的NCEP 1°×1°再分析场模拟了三次过程中最大降水中心（分别为阳新、汉川和广水站）上空不同高度气块的后向轨迹、给出了气块运动过程中物理属性（高度、气压、相对湿度、比湿等），以揭示在热带夏季风爆发前湖北暴雨过程中不同高度气块的路径及高低空垂直配置，定量分析对流层中低层水汽变化特征，讨论副热带夏季风对湖北暴雨过程的水汽贡献及春季水汽来源的多样性，以期提高对春季暴雨天气的认识和预报能力。

1 过程简介

1.1 三次过程降水概况

2017年4月8日20时—9日20时（北京时，下同）湖北大部出现暴雨天气过程，其中鄂东南的阳新出现了113.7 mm的大暴雨（图1a），全省过程平均降水量和阳新站单站降水量均居历史同期第一。

2005年4月8日20时—9日20时鄂西南出现了暴雨，江汉平原、鄂东北和鄂东南的部分地区也有暴雨发生，最大降水量在汉川（69.8 mm）（图1b）。全省过程平均降水量居历史同期第二。

2019年4月8日20时—9日20时鄂西南、江汉平原北部、鄂东北出现了暴雨天气，其中鄂东北的广水和随州分别为105 mm和103 mm的大暴雨（图1c）。全省过程平均降水量居历史同期第四；同时广水、随州等24 h和1 h降水量均打破了本站历史同期降水量的极值。

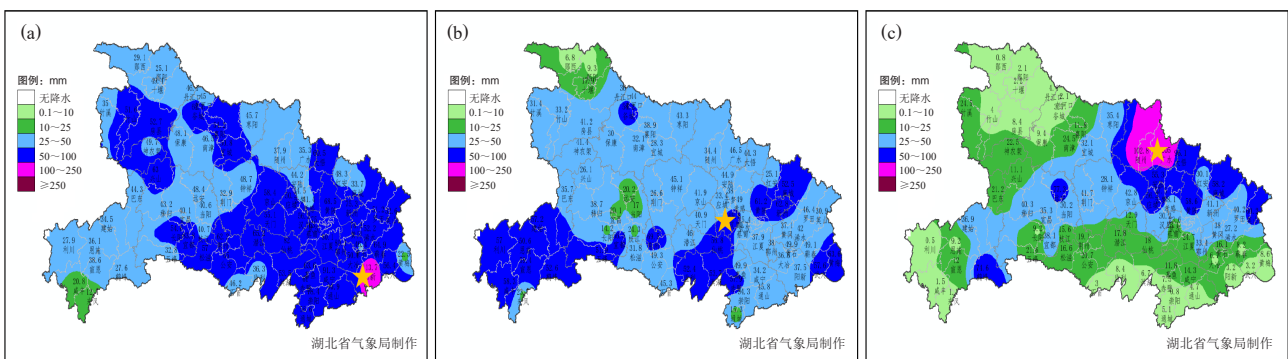


图1 2017年4月8日20时—9日20时 (a)，2005年4月8日20时—9日20时 (b)，2019年4月8日20时—9日20时 (c) 湖北省降水量分布 (单位: mm)，★为强降水中心阳新、汉川和广水

Fig. 1 Total rainfall (unit: mm) in Hubei province from 20: 00 BT 8 to 20: 00 BT 9 April 2017 (a), 2005 (b) and 2019 (c), ★ indicates rainfall centers of Yangxin, Hanchuan and Guangshui, respectively

1.2 天气背景和主要影响系统

1.2.1 2017年4月8—9日暴雨过程

2017年4月8日20时, 500 hPa低槽分别在甘肃东部—川西、安徽—湖北西部、湖南—广东西部(图2a), 588 dagpm线位于华南大陆; 对应700 hPa暖切变线在川东—湖北西部; 850 hPa低涡在安徽, 与其相伴的冷式切变线位于湖北东部—湖南北部, 切变线南侧的低空急流达 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 湖北大部比湿达 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且湖北东部气温达 $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 925 hPa暖切变线在安徽南

部—湖北东南部; 地面冷锋快速南下, 已到达湖北东南部; 湖北大部还处于高空200 hPa急流的风向分流辐散区中, 也有利于低层辐合上升运动的增加和暴雨的产生。9日08时(图略)随着500 hPa上述低槽的继续东移, 700 hPa暖切变线向湖北东部延伸, 而850 hPa湖北南部—湖南北部由冷式切变线又转为暖式切变线, 925 hPa切变线和地面冷锋已南压到湖南—江西中部; 这种有利的降水形势维持到9日20时, 使得湖北大部产生了暴雨天气, 其中850 hPa切变线在湖北东南部维持时间长造成了阳新(图2a中的★)的大暴雨。

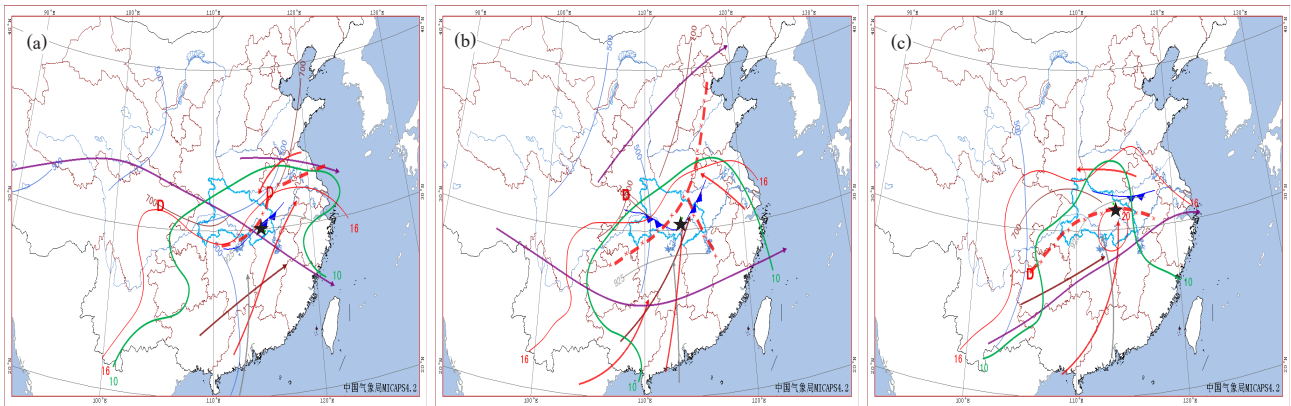


图2 2017年4月8日20时(a)、2005年4月8日20时(b)和2019年4月8日20时(c)高低空系统配置图(带数字的蓝色、棕色和灰色实线分别为500 hPa槽、700和925 hPa切变线, 紫色箭头、红色箭头和灰色箭头分别为200、850和925 hPa急流轴, 红色断线为850 hPa切变线, 红色实线分别为850 hPa 16或 20°C 等温线, 绿色实线为850 hPa $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的等比湿线, 蓝色箭头为地面冷锋, ★为强降水中心)

Fig. 2 Distribution of 500 hPa trough (blue line with number 500), 700 hPa shear line (brown line with number 700) and jet (brown arrow), 925 hPa shear line (grey line with number 925) and jet (grey arrow), 850 hPa shear line (red dash line), jet (red arrow), isotherm of 16, 20°C (red solid line) and isohume of $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (green solid line), and surface cold front (blue arrow) at 20: 00 BT 8 April 2017 (a), 2005 (b) and 2019 (c), ★ are locations of Yangxin, Hanchuan and Guangshui, respectively

1.2.2 2005年4月8—9日暴雨过程

2005年4月8日20时(图2b) 500 hPa冷槽位于河西走廊, 湖北西部也有低槽, 槽前700 hPa陕南—川东有低涡, 与其相伴的暖切变线向东延伸到湖北西部, 850 hPa西南涡位于贵州, 但湖北及其周围地区有“人字形”切变线形成, 切变线南侧有低空偏南急流输送暖湿气流, 湖北大部比湿达 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、气温在 16°C 以上, 且强降水中心汉川(图2b中的★)位于急流轴的顶端; 925 hPa暖切变线东段位于湖南—江西北部; 地面冷锋已到达湖北东北部—西南部。9日08时(图略)随着500 hPa低槽的加深东移, 588 dagpm北抬到海南岛南部; 对应700 hPa低涡移动湖北西部; 850 hPa转受冷切变线影响, 切变线南侧西南低空急流加强至 $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 925 hPa由暖切变线转为冷式切变线, 位于湖北东部—广西北部, 地面冷锋已移过湖北; 9日20时各层系统快速东移南压, 湖北降水结束。暴雨期间,

湖北上空也伴有200 hPa急流的风向分流引起的辐散(图略)。

1.2.3 2019年4月8—9日暴雨过程

2019年4月8日20时500 hPa冷槽位于甘肃南部到云南南部(图2c); 对应700 hPa暖切变线在川东—湖北西北部; 850 hPa低涡、暖切变线在湖北东北部—贵州北部, 切变线南侧有 $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 低空急流输送水汽, 湖北处于暖脊和湿舌中, 比湿高达 $10\sim 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。图2c中也显示湖北东北部(强降水中心广水★周边的区域)位于850 hPa低空急流轴的顶端、暖中心的北侧、925和850 hPa切变线附近, 有利于水汽的辐合上升运动; 此时地面冷锋已进入湖北北部, 但锋前已有暖区降水; 高空200 hPa急流出口左侧辐散有利于上升运动。9日08时(图略), 500 hPa槽减弱东移到陕南至川东, 700 hPa湖北转受冷切变线影响; 850 hPa低涡东移到安徽、同时湖北大部转受冷式切变线控制; 925 hPa冷式

切变线和地面冷锋南压到湖南北部，整层上升运动减弱（图略），湖北降水也逐渐减弱。至9日20时500 hPa槽移到湖北西部，700、850 hPa切变线快速南下到湖南、江西（图略），湖北大部分地区转为下沉气流控制（图略），降水结束。

综上所述，三次暴雨天气过程均发生相似的天气背景下，即500 hPa西风带低槽缓慢东移，中低层有低涡、切变线和低空急流、地面有冷锋影响湖北，并伴有高空200 hPa辐散，对流层低层比湿大（ $\geq 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、气温高（ $\geq 16^\circ\text{C}$ ），水汽和动力条件均有利于暴雨的发生。但三次过程中各层系统的位置、强度及持续的时间不完全相同，如“2019年”暴雨过程中先锋前暖区降水后锋面降水，而“2017年”和“2005年”暴雨过程均是锋面降水。

2 暴雨中心气块的轨迹与水汽的演变

2.1 模拟方案

考虑到驱动轨迹模式的NCEP资料时空分辨率较低，为了分析模式分辨率误差，采用类似于样本误差分析的方法^[13, 22]，即可以通过初始点水平和垂直方向上偏移所模拟出的轨迹进行估计。本文选取三次暴雨过程中最强降水中心，即阳新站、汉川站和广水站分别作为三次过程模拟区域的中心点，将1500 m高度上这三个点的初始位置分别在纬向（ x ）、经向（ y ）偏移 0.5° ，垂直方向（ z ）偏向 0.01σ ，初始时间分别选取在暴雨即将发生时的2017年4月8日20时、2005年4月8日20时、2019年4月8日20时，基于6 h一次的NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析场和HYSPLIT模式进行240 h（10 d）的后向轨迹模拟。通过上述偏移后可以得到每次暴雨过程27条轨迹样本，分别计算每次过程的27条样本在各个时刻 x 、 y 和 z 的平均值和标准差，通过标准差与平均值的比值（即变差系数）来评估模式的分辨率误差。本文的计算表明（图略）三次暴雨过程分别在8 d（192 h）、5 d（120 h）和6 d（144 h）以内变差系数较小，从9、6、7 d开始变差系数增大，因此确定对三次暴雨过程分别进行后向8 d（192 h）、5 d（120 h）和6 d（144 h）的轨迹模拟。

为了进一步定量考察3个强降水中心上空水汽来源与水汽含量大小，以三次暴雨过程中阳新、汉川和广水站点的地理位置为基础，用HYSPLIT模式分别模拟2017年4月8日20时、2005年4月8日20时、2019年4月8日20时强降水临近时刻阳新、汉川和广水站不同高度（500、1500、3000、5000、7000和9000 m）上空气块的后向192、120和144 h后向轨迹（图3、图5和图7），向后的时间步长为1 h，且逐小时输出一次轨迹点的位置，

并插值得到相应位置上的物理属性（如高度、气压、相对湿度、比湿等），结果详见图4、图6和图8。

2.2 气块的轨迹与水汽的演变

2.2.1 2017年4月8日20时阳新站上空水汽输送特征

图3给出了2017年4月8日20时大暴雨中心阳新站不同层次192 h后向轨迹，其中红色轨迹代表的是3月31日20时源自中南半岛北部6000 m左右的干空气，相对湿度40%、比湿 $2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ （图4），该气块在对流层中层东移，于4月2日08时到达南海西北部，其相对湿度和比湿略有增加；此后气块逐步下沉、在南海北部东移于3日08时到海南岛东部，比湿增加到 $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，相对湿度先增加到后减；3日08时—6日08时在海南岛东南部转向北上，并下沉到1500 m以下，期间气块长时间停留在海南岛东部的海面上，从海面获得水汽，比湿和相对湿度分别逐步增加到 $12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、80%以上；6日08时以后气块从华南北上进入大陆，继续下沉、于8日20时到阳新站500 m上空，维持较高的比湿（ $12.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和77%的相对湿度。

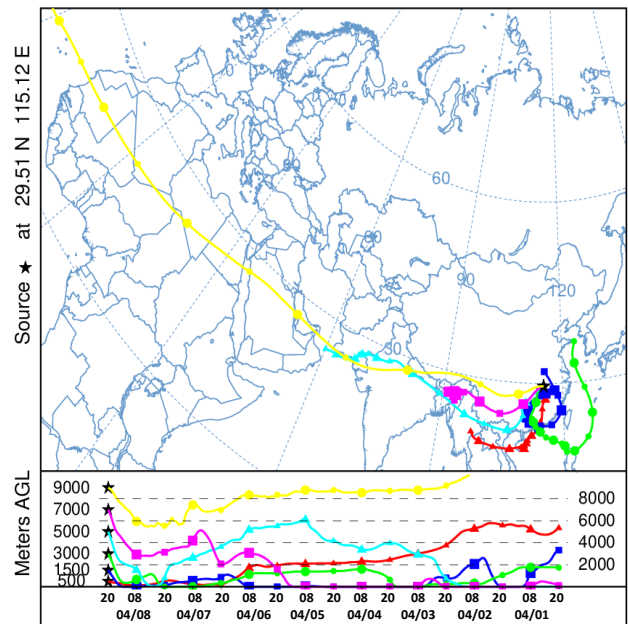


图3 2017年4月8日20时阳新站（★）不同层次192 h后向轨迹图
Fig. 3 192 h backward trajectories ending at 20:00 BT 8 April 2017 for Yangxin (★) in different levels

蓝色轨迹（图3）表示的是3月31日20时来自大暴雨中心的北侧4000 m以下的气块，其比湿只有 $1.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，相对湿度66%（图4）；气块向东南方向移动，先下沉到近地层再上升到1500 m以上，比湿和相对湿度均先小幅上升后下降；于2日08时进入台湾海峡后，气块再转向西南方向移动南海北部，且下沉到近海面，海气交换使得比湿和相对湿度均快速增加，

3日08时进入华南大陆时,比湿和相对湿度分别达 $11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和60%以上;此后气块先向西移动,至4日08时再转向北上,期间气块一直在近地层移动,气块从下垫面获得水汽,比湿和相对湿度均呈增加的趋势;8日20时气块上升到阳新站1500 m上空时,比湿和相对湿度均先小幅上升后下降,分别为 $10.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、89.6%,表明有水汽凝结发生。

绿色轨迹(图3)代表3月31日20时从山东半岛附近的黄海2000 m上空快速向南移动并伴有下沉运动的干空气,比湿和相对湿度分别在 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、40%以下(图4),气块于3日08时下沉到菲律宾北部的近海面,海气交换使比湿达到 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度达75%以上;3日20时以后气块转向西北、缓慢移到南海北部并上升到1200 m,期间比湿和相对湿度先减后增;6日20时从华南沿海进入大陆时气块下降到近地层,并沿近地层北上,气块从近地层获得水汽;至7日08时比湿达 $16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度达90%以上;此后比湿下降、而相对湿度呈现出明显的日变化;8日08时以后气块快速上升到达阳新站3000 m上空,比湿骤降到 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对湿度接近100%,也表明有水汽的凝结发生。

天蓝色轨迹(图3)表示3月31日20时来自阿拉伯海西北部近地层的气块,比湿和相对湿度分别为 $7.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和33%(图4),在近海面东移比湿和相对湿度均增加;2日08时到达印度半岛西部时比湿和相对湿度又有所下降;2日20时气块继续向东移时逐渐上升,5日08时到达印度北部6000 m上空,期间比湿减小到 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而相对湿度呈增加的趋势;此后气块又转为下沉运动,6日20时到达中南半岛西部4000 m上空比湿和相对湿度均下降,比湿不足 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 相对湿度30%以下;7日08时气块向东移动到中越边境时转向北上进入大陆且下沉到1500 m以下,从近地层获得水汽,比湿和相对湿度迅速增加;7日20时下沉到近地面时,比湿增加到 $14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度90%以上。此后气块继续北上并上升到阳新站5000 m上空,比湿下降至 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为80%,表明气块在到达阳新站之前有水汽凝结发生。

玫瑰红色轨迹(图3)代表3月31日20时孟加拉国近地层的湿空气,比湿达 $12.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为71.8%(图略),31日20时—6日20时在孟加拉国近地层长时间停留,期间仍维持较高的比湿和相对湿度(图略);其中5日08时以后气块开始上升,6日08时到达3000 m,比湿下降到 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对湿度为80%;6日20时向东移动略有下沉,但7日08时继续东移进入云南并上升到5000 m,比湿降至 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度

不足20%;此后气块向东北方向移动、再上升到阳新站7000 m上空,期间比湿有所上升,但很快又降到 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度71.3%。

黄色轨迹(图3)表明来自大西洋、对流层上层的干空气,比湿不足 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对湿度18.8%(图略),气块快速向东移动到暴雨中心上空9000 m,但上升和下沉均在对流层上层,气块一直比较干燥。

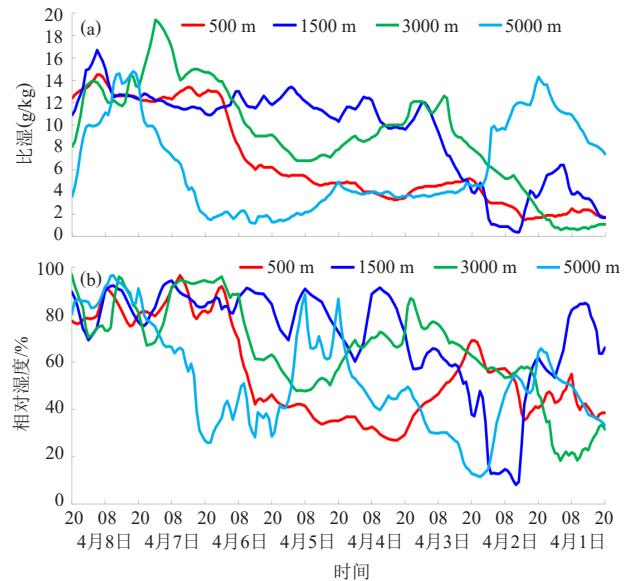


图4 2017年4月8日20时阳新站500、1500、3000、5000 m上空192 h后向轨迹中气块的比湿(a)和相对湿度(b)的演变特征

Fig. 4 Distribution of specific humidity (a) and relative humidity (b) for 192 h backward trajectories ending at 20: 00 BT 8 April 2017 for Yangxin over 500, 1500, 3000, 5000 m

上述对轨迹追踪得到了各高度最终到达阳新站上空气块的比湿,再利用江志红等^[22]公式(4)计算每层水汽输送占比,从低层到高层轨迹(分别对应图3中红色、蓝色、绿色、天蓝色、玫瑰红和黄色轨迹)中气块水汽贡献占比分别是32.4%、28.5%、20.9%、10.4%、5.2%、2.6%,表明对流层中低层5000 m以下气块所含的水汽是暴雨区水汽的主要来源。由此可见,初始时源自中南半岛北部6000 m左右的干空气(红色轨迹),东移时下沉到南海北部近海面,在贴近海面缓慢移动过程中与海气交换时间长,是暴雨区水汽的主要贡献者;来源于大暴雨中心的北侧对流层中层的气块(蓝色轨迹),向东南方向移动进入台湾海峡、再转向西南方向移动并下沉到南海北部近海面,海气交换使得比湿和相对湿度均快速增加,是暴雨区水汽的次要贡献者;从山东半岛附近的黄海上空2000 m快速向南移动并伴有下沉运动的干空气(绿色轨迹),在菲律宾转向西移过程中从近海面获得水汽,上升到阳新站

3000 m时仍然有较大的比湿,对暴雨区的水汽也有一定的贡献;来自阿拉伯海西北部的气块(天蓝色轨迹)在东移过程中从近地面获得水汽,但上升到阳新站5000 m的过程中由于水汽凝结而变干,对暴雨区的贡献小;7000 m以上的气块水汽含量少,对暴雨区的贡献很小。

2.2.2 2005年4月8日20时汉川站上空水汽输送特征

图5显示了2005年4月8日20时暴雨中心汉川站不同层次120 h后向轨迹,其中的红色轨迹表明3日20时源自东海1500 m上空的干空气,比湿为 $1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度13.9%(图6);气块先向南移动,再转向西南移动并下沉到南海北部的近海面,海气交换使气块变湿,比湿和相对湿度分别增加到 $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、90%以上;6日08时在南海西部转向北上,仍贴近海面移动,气块维持较高的水汽含量;7日20时从华南进入大陆,比湿和相对湿度略有下降;8日20时到达汉川站500 m上空时,比湿达 $13.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为80.4%。

蓝色轨迹代表3日20时来自孟加拉湾东部3000 m上空的干空气(图5),比湿为 $5.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为50.1%(图6),气块先向西北方向移动,比湿和相对湿度均增加;4日20时气块转向东移,并下沉经过中南半岛,期间比湿先减后增,而相对湿度呈下降趋势;7日08时到达中南半岛东部,比湿达 $10.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为60%;此后气块继续下沉到北部湾近海面但转向北上,海气交换使气块增湿;7日20时以后从北部湾进入大陆,比湿缓慢增加而相对湿度迅速加大;8日20时气块上升到汉川站1500 m上空,比湿和相对湿度分别为 $11.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、87.8%。

绿色轨迹(图5)表明3日20时起源于西亚5000 m上空的干空气,比湿为 $0.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为38.4%(图6);该气块缓慢下沉、先向东南方向移动,于6日08时到达印度东北部,比湿和相对湿度变化不大;此后气块水平东移,相对湿度和比湿分别增加到 $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、60%以上;7日08时气块从云南进入大陆后又开始下沉,相对湿度和比湿略有减小;至8日08时气块下沉到1500 m左右,从近地层获得水汽,比湿增加到 $7.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度60%;8日20时气块再上升到3000 m,比湿仍为 $7.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度88.6%。

天蓝色轨迹(图5)代表3日20时源自西亚、6000 m左右的干空气,比湿仅为 $0.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度在10%以下(图6);气块先准水平东移,5日20时开始缓慢下沉,期间比湿和相对湿度均变化不大;6日20时气块下沉东移到孟加拉国时比湿和相对湿度有所增加;8日08时气块到达3000 m上空,此时比湿达 $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿

度为58%;8日20时气块又快速上升到了5000 m,比湿仅为 $3.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度85.7%。

玫瑰红色轨迹和天蓝色轨迹类似(图5),只是干空气先准水平东移、速度稍快,6日20时以后开始下沉,7日20时后下降到5000 m以下,比湿仅为 $1.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为24.5%(图略);8日20时气块上升到了7000 m,比湿为 $1.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度在80.2%。

黄色轨迹(图5)显示3日20时从非洲北部7500 m上空向东移动、最终到达汉川站9000 m的干空气(比湿为 $0.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为13.1%),其上升和下沉都在对流层中上层,虽然相对湿度增加到90%,但比湿在 $1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下(图略)。

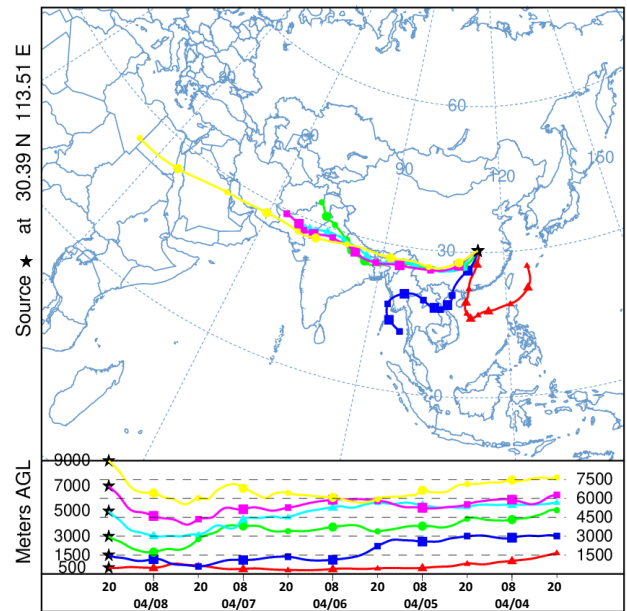


图5 2005年4月8日20时汉川站(★)不同层次120 h后向轨迹图
Fig. 5 120 h backward trajectories ending at 20: 00 BT 8 April 2005 for Hanchuan (★) in different levels

同样计算汉川站上空每层水汽输送占比,从低层到高层轨迹(分别对应图5中红色、蓝色、绿色、天蓝色、玫瑰红和黄色轨迹)中气块水汽贡献占比分别是34.3%、29.6%、19.6%、9.7%、4.2%、2.6%,表明对流层中低层3000 m以下气块所含的水汽是暴雨区水汽的主要来源。由此得到初始时源自东海1500 m上空的干空气(图5中红色轨迹)下沉到南海北部近海面,海气交换时间长,到达汉川站500 m时水汽含量大,是暴雨区水汽的主要贡献者;来自孟加拉湾东部3000 m上空的干空气(图5中蓝色轨迹)下沉到北部湾近海面时水汽增加,是暴雨区水汽的次要贡献者;起源于西亚对流层中层的干空气(图5中绿色轨迹),下沉到我国大陆1500 m时,陆面蒸发使气块获得水汽,对暴雨区的

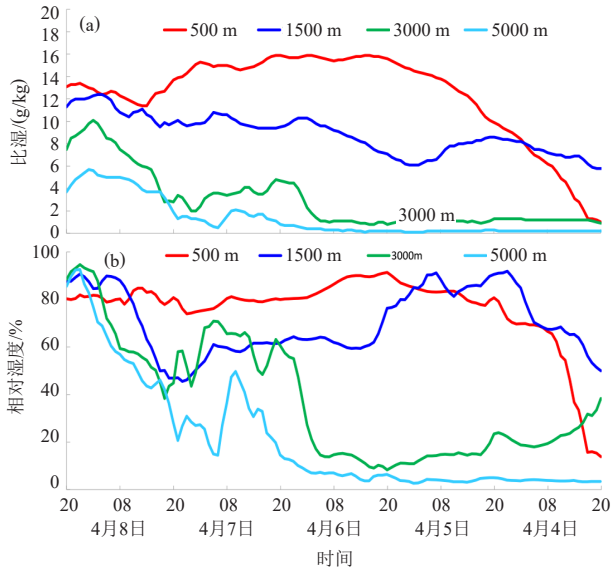


图6 2005年4月8日20时汉川站500、1500、3000、5000 m 上空120 h后向轨迹中气块的比湿 (a) 和相对湿度 (b) 的演变特征

Fig. 6 Distribution of specific humidity (a) and relative humidity (b) for 120h backward trajectories ending at 20: 00 BT 8 April 2005 for Hanchuan over 500, 1500, 3000, 5000 m

水汽也有一定的贡献；而5000 m以上的气块水汽含量少，对暴雨区的贡献很小。

2.2.3 2019年4月8日20时广水站上空水汽输送特征

从图7中可以看到广水站不同高度气块的144 h 的后向轨迹，其中图7a的500和1500 m的轨迹由于看不清而进行了放大，见图7b和7c。表明2日20时有来自湖南北部贴地层（图7a红色轨迹和图7b中轨迹）的气块，其具有较高的比湿（ $8.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和94%相对湿度（图8）；该气块贴近地面缓慢向南移到湖南南部，比湿略有增加（ $9.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）而相对湿度维持在80%以上；气块在5日白天转向北上经江西到湖北，期间比湿和相对湿度均呈现出明显的日变化，即比湿白天大夜间小、相对湿度则是白天小夜间大；8日20时气块快速上升到广水500 m上空，比湿为 $11.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度53%。

图7a中蓝色轨迹（图7c中轨迹）中代表2日20时来自江西中部贴地层的气块，具有 $9.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的比湿和91%的相对湿度（图8）；气块先缓慢南移到江西南部，6日02时后转向北上，且一直在贴地层缓慢移动，期间比湿和相对湿度的变化趋势与500 m轨迹中的气块类似；该气块于8日20时达到广水1500 m上空时比湿为 $10.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度71%。

绿色轨迹（图7a）代表2日20时来自西亚4000 m 上空的气块，其比湿不大（ $2.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）、相对湿度为78%

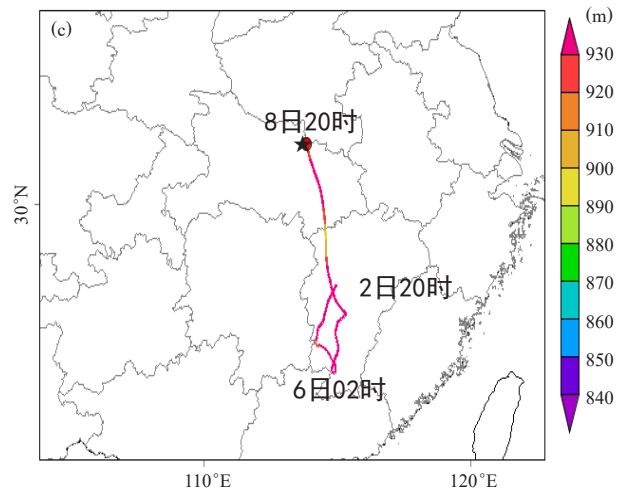
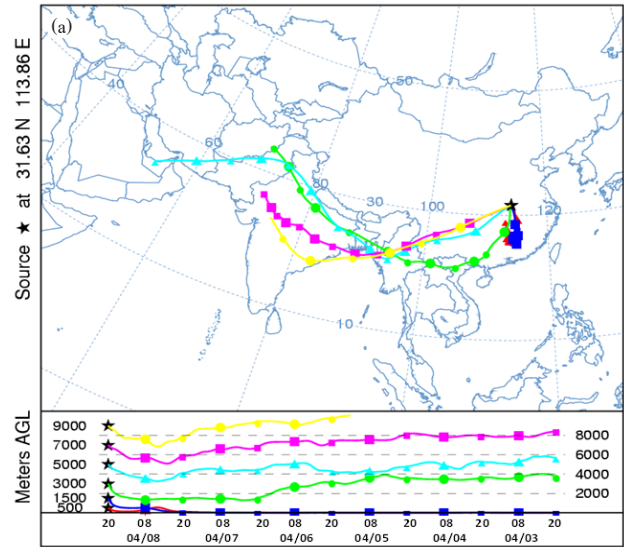


图7 2019年4月8日20时广水站（★）不同层次 (a)、500 (b) 和1500 m (c) 144 h后向轨迹图 (b, c中色标为海拔高度)
Fig. 7 144 h backward trajectories ending at 20: 00 BT 8 April 2019 for Guangshui (★) in different levels (a), 500 m (b) and 1500 m (c)

（图8），气块向东移动并从4000 m下沉过程中，相对湿度减小到30%以下、比湿一直小于 $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；5日绕

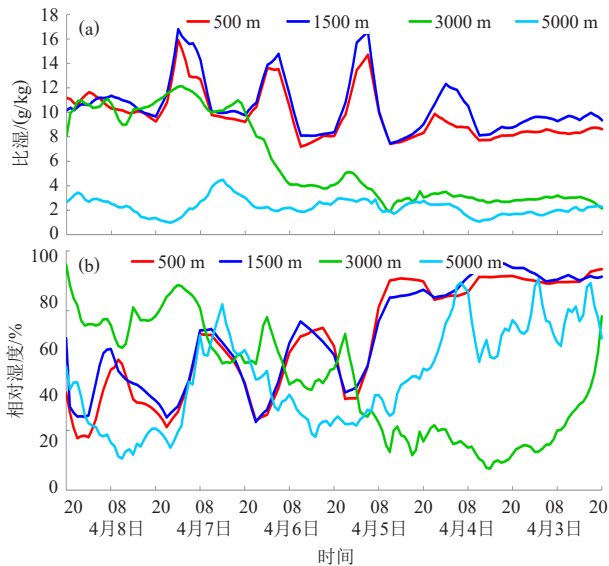


图8 2019年4月8日20时广水站500、1500、3000、5000 m上空144 h后向轨迹中气块的比湿(a)和相对湿度(b)的演变特征

Fig. 8 Distribution of specific humidity (a) and relative humidity (b) for 144 h backward trajectories ending at 20: 00 BT 8 April 2019 for Guangshui over 500, 1500, 3000, 5000 m

青藏高原以南的孟加拉湾北部东移时比湿和相对湿度均呈增加的趋势；6日夜间到7日从广西进入大陆后已下沉到1500 m以下，以水平运动为主，有利于气块与下垫面水汽和能量的交换，因此比湿增加至 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度在60%~90%波动；气块再上升到达广水上空3000 m时，比湿下降到 $8.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度接近饱和(95%)，表明有水汽凝结发生。

天蓝色轨迹(图7a)表明2日20时来自阿拉伯半岛6000 m以下的气块，比湿为 $2.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为70%(图8)；该气块向东北方向移动到青藏高原西侧后，再绕高原南部移动，从云南进入我国，期间上升和下沉运动均在对流层中层，8日20时到达广水站5000 m上空时比湿仅为 $1.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、相对湿度为61%。

玫瑰红色和黄色轨迹(图7a)表明2日20时来自印度西北部对流层上层的气块，具有极低水汽含量(比湿均小于 $0.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和20%相对湿度(图略)；其移动路径与5000 m轨迹类似，但上升和下沉运动均在对流层上层。因此到达广水上空7000和9000 m时，比湿和相对湿度分别在 $1.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、88%以下。

计算最终到达广水站每层水汽输送占比，从低层到高层轨迹(分别对应图7a中红色、蓝色、绿色、天蓝色、玫瑰红和黄色轨迹)中气块水汽贡献占比分别是34.8%、31.7%、25.2%、3.4%、3.4%、1.5%，可见对流层中低层3000 m以下气块所含的水汽是暴雨区水汽

的主要来源。因此初始时源自对流层低层1500 m以下(图7a红色和蓝色轨迹)湖南和江西的气块、贴近地面缓慢移动过程中与下垫面水汽交换时间长，是暴雨区水汽的主要贡献者；来源于西亚对流层中层4000 m的干空气(图7a绿色轨迹)在移到我国大陆时下沉到1500 m以下，从下垫面获得水汽而变湿，再上升到3000 m时仍然有较大的比湿，对暴雨区的水汽也有一定的贡献；而5000 m以上的气块水汽含量少，对暴雨的贡献很小。

3 结论和讨论

3.1 结论

通过对湖北三次春季暴雨过程发生的天气形势、主要影响系统分析以及强降水中心上空192、120、144 h后向轨迹模拟结果的分析，得到以下结论：

1) 三次暴雨过程发生均在500 hPa槽移动缓慢，低层低涡、切变线、低空急流、地面冷锋等天气系统共同影响的背景下，上升运动强、水汽充沛，高空辐散也有利于暴雨过程的发生发展。但三次过程中各层系统的位置、强度及持续的时间不完全不同，如“2019年”暴雨过程中先锋前暖区降水后锋面降水，而“2017年”“2005年”均是锋面降水。

2) “2017年”暴雨过程强降水中心阳新站的水汽主要来自5000 m以下，其中终点到达阳新站500、1500、3000 m上空的气块，虽然气块的起始高度、移动方向和属性不同，但均从南海北部近海面获得水汽，对暴雨过程水汽贡献大；而来自阿拉伯海西北部的气块在东移过程中从近地面获得水汽，再上升到5000 m时变干，对暴雨过程水汽的贡献相对小。

3) “2005年”暴雨过程强降水中心汉川的水汽主要来自3000 m以下，其中终点到达汉川站上空500 m、1500 m的气块，从不同的方向分别下沉到南海北部近海面 and 北部湾近海面，在近海面停留时间长，水汽增加，对暴雨过程水汽贡献大；起源于西亚对流层中层的干空气下沉到我国大陆1500 m时，陆面蒸发使气块获得水汽，气块到达3000 m仍有较高的比湿。

4) “2019年”暴雨过程对流层中低层3000 m以下气块所含的水汽是强降水中心广水站水汽的主要来源。其中源自对流层低层1500 m以下湖南和江西的气块，从近地面获得水汽，是暴雨水汽的主要贡献者；其次是从西亚对流层中层下沉到华南大陆1500 m以上的气块，下垫面水汽蒸发使气块变湿，气块上升到3000 m时仍有较大的水汽含量。

5) 三次暴雨过程的共同特征是水汽均来源于对流层中低层气块，特别是3000 m以下的气块水汽含量

大,对暴雨区的贡献大;但气块的源地、移动路径和气块获得水汽的途径不同。三次暴雨过程中终点到达5000、7000和9000 m的气块,均来自孟加拉国及其以西地区,向东或东北方向移动到强降水中心,水汽含量少;终点到达500 m的气块,分别来自中南半岛北部、东海和暴雨区南侧的近地层,气块比湿最大;终点到达1500 m的气块,分别源自暴雨区的北侧、孟加拉湾东部和暴雨区南侧的近地层,气块比湿较大;终点到达3000 m的气块,分别源自黄海、西亚地区,气块仍有一定的水汽含量。“2017年”“2005年”暴雨过程主要从南海近海面获得水汽,其次是从陆地上获得水汽,而“2019年”暴雨过程主要是获得陆地蒸发的水汽。表明暴雨过程中水汽来源和输送的多样性和复杂性。

通过对湖北春季三次暴雨过程的分析得到的预报启示是:在西风带高低空系统有利的配置下,除了关注副热带夏季风从南海输送水汽外,还要重视暴雨区本地及其周边地区近地层高温高湿环境中水汽的贡献。

3.2 讨论

1) 作者对“2019年”暴雨过程中其他暴雨中心,如随州站和坛子岭站的后向轨迹追踪结果与广水站各层气块的特征基本相似,再次证明了本地及其周围地区水汽的重要性。

2) 尽管“2005”和“2017年”暴雨过程中有来自海上的气块,但这些气块并不是湿气块。对这2次过程气块起始时刻(分别为2017年3月31日20时和2005年4月3日20时)的天气背景进行了分析,发现这2次过程均受高空偏北气流和地面冷高压控制,晴朗少云,空气干燥,且伴有下沉气流,水汽含量少。因此来自海上的气块不一定是湿气块,要仔细气块分析在源地及其移动过程中水汽的变化。

3) 阳新和汉川的大暴雨中心分别出现在幕阜山和大别山地形的迎风坡,地形对暴雨的增幅的定量计算也值得进一步研究。

参考文献

- [1] 陈隆勋,李薇,赵平,等.东亚地区夏季风爆发过程.气候与环境研究,2000,(5):346-355.
- [2] Zhu Q G, He J H, Wang P X. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction. *advances in atmospheric sciences*, 1986, (3): 466-477.
- [3] 刘伯奇,何金海.亚洲夏季风动力学研究综述.热带气象学报,2015,31(6):869-880.
- [4] 何金海,祁莉,韦晋,等.关于东亚副热带季风和热带季风的再认识.大气科学,2007,31(6):1257-1265.
- [5] 何金海,赵平,祝从文,等.关于东亚副热带季风若干问题的讨论.气象学报,2008,66(5):683-696.
- [6] 朱志伟,何金海.东亚副热带季风的季节转变特征及其可能机理.热带气象学报,2013,29(2):245-254.
- [7] 赵平,周秀骥,陈隆勋,等.中国东部—西太平洋副热带季风和降水的气候特征及成因分析.气象学报,2008,66(6):940-954.
- [8] 万日金,吴国雄.江南春雨的气候成因机制研究.中国科学(地球科学),2006,36(1):936-950.
- [9] 万日金,吴国雄.江南春雨的时空分布.气象学报,2008,66(3):310-319.
- [10] 祝从文,周秀骥,赵平,等.东亚副热带夏季风建立与中国汛期开始时间.中国科学(地球科学),2011,41(8):1172-1181.
- [11] 任珂,何金海,祁莉.东亚副热带季风雨带建立特征及其降水水质分析.气象学报,2010,68(4):550-558.
- [12] 杜小玲,彭芳,蓝伟,等.“7.23”水城特大滑坡事件的降水背景分析.暴雨灾害,2020,39(4):344-353.
- [13] Draxler R R, Hess G D. An overview of HYSPLIT_4 modeling system for trajectories dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, 47: 295-308.
- [14] Drumond A, Nieto R, Gimeno L. On the contribution of the tropical western hemisphere warm pool source of moisture to the Northern Hemisphere precipitation through a Lagrangian approach. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 6: D00Q04, doi: 10.1029/2010JD015397.
- [15] Malin G, David R, Chen D L. Extreme rainfall events in southern Sweden: where does the moisture from? *Tellus*, 2010, 62A: 605-616.
- [16] 江志红,任伟,刘征宇,等.基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析.气象学报,2013,71(2):295-304.
- [17] 杨浩,江志红,刘征宇,等.基于拉格朗日方法的水汽输送气候特征分析——江淮梅雨和淮北雨季的对比.大气科学,2014,38(5):965-973.
- [18] 陈斌,徐祥德,施晓晖.拉格朗日方法诊断2007年7月中国东部系列极端降水的水汽输送路径及其可能蒸发源区.气象学报,2011,69(5):810-818.
- [19] 熊秋芬,张玉婷,姜晓飞,等.锢囚气旋钩状云区暴雪过程的水汽源地及输送分析.气象,2018,44(10):1267-1274.
- [20] 许彬,熊秋芬,姜晓飞,等.“5·12”南昌大暴雨过程的水汽来源及输送特征分析.气象与减灾研究,2019,42(2):89-95.
- [21] 李晓蓉,高青云,付世军.四川盆地东北部三次持续性暴雨过程水汽输送特征分析.暴雨灾害,2020,39(4):234-240.
- [22] 江志红,梁卓然,刘征宇,等.2007年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析.大气科学,2011,35(2):361-371.