

文章编号:2096 - 5389(2021)06 - 0050 - 09

云南两次局地暴雨过程水汽输送特征分析

马志敏¹, 朱 莉¹, 连 钰¹, 米瑞芝¹, 牛法宝¹, 王 将²

(1. 云南省气象台, 云南 昆明 650034; 2. 云南省昆明市气象局, 云南 昆明 650501)

摘 要:采用常规观测资料、NCEP 再分析资料, 结合数值试验, 对 2012 年 5 月 24 日和 2015 年 9 月 27 日云南两次局地暴雨过程水汽输送特征进行分析。结果表明:①两次过程主要受副热带高压影响, 强降雨及其水汽输送伴随副热带高压西伸而中断, “5.24”过程动力条件主要由天气尺度系统提供, “9.27”过程动力条件主要为地形抬升作用;②两次过程水汽源地均为孟加拉湾、南海、西太平洋, “5.24”过程以西南路径水汽输送为主, 输送距离较远, “9.27”过程以东南路径水汽输送为主, 输送距离较短, 局地特征更显著;③“9.27”过程水汽通量及最大雨量值均高于“5.24”过程, 水汽通量与强降雨相关性较好, 对强降雨具有一定指示意义;④两次过程水汽输送均集中在 600 hPa 以下层, 以经向偏南水汽输送为主, 水汽输送增强时间较强降雨开始时间提前 48 ~ 72 h;⑤数值模拟结果与常规分析一致, 同时可显示水汽垂直输送特征, 低层以偏南路径为主, 中层西南路径增多, 中层以上出现偏西路径, 存在沿西风带来自印度半岛及青藏高原的水汽贡献。

关键词:局地暴雨;水汽输送;数值模拟;轨迹

中图分类号:P458.1+21.1 **文献标识码:**A

Analysis the Characteristics of Water Vapor Transport of Two Local Heavy Rain Processes in Yunnan Province

MA Zhimin¹, ZHU Li¹, LIAN Yu¹, MI Ruizhi¹, NIU Fabao¹, Wang Jiang²

(1. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034, China;

2. Meteorological Bureau of Kunming, Kunming 650501, China)

Abstract: Based on the conventional observations, NCEP reanalysis data and numerical test, water vapor transport characteristics of two local rainstorm processes in Yunnan on May 24, 2012 and September 27, 2015 are analyzed. The results show that:① The two processes are mainly affected by the subtropical high, the heavy rainfall and its water vapor transport are interrupted due to the extension of the subtropical high, the dynamic condition of the “5.24” process are mainly provided by the weather scale system, the dynamic condition of the “9.27” process is mainly used for the terrain uplift;② The water vapor sources of the both processes are the bay of Bengal, the South China Sea and the Western Pacific, the “5.24” process was dominated by water vapor transport in the southwest, the conveying distance is long, the “9.27” process was dominated by water vapor transport in the southeast, the conveying distance is short, the local characteristics are more significant;③ “9.27” process’s water vapor flux and maximum rainfall are higher than that of “5.24” process, the correlation between water vapor flux and heavy rainfall is good, it has a certain indication significance for heavy rainfall;④ The water vapor transport of the two processes was concentrated in the layer below 600 hPa, the water vapor is mainly transported from

收稿日期:2020 - 12 - 16

第一作者简介:马志敏(1984—),男,副高,主要从事天气预报及数值模拟研究工作,E-mail:413931483@qq.com。

通讯作者简介:牛法宝(1972—),男,副高,主要从事中短期天气气候预测和研究工作,E-mail:flybs@163.com。

资助项目:云南省科技计划项目(2018BC007):气候变化下主要气象对高原特色农业的影响评估及监测预报技术研究;国家自然科学基金项目:高原涡影响下的云南大雨暴雨分布特征及其形成机理研究(41765003)、青藏高原东南角“桃花汛”暴雨的天气学成因及地形影响机制研究 42075013、北极涛动与南支槽的关系及对云南冬春季降水影响的研究(41665005);中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-120);云南省智能网格预报要素一致性技术研究。

meridional to southerly, the intensive time of water vapor transport is earlier than the beginning time of rainfall 48 to 72 hours; ⑤ The numerical simulation results are consistent with the conventional analysis, at the same time, the vertical transport characteristics of water vapor can be displayed, the lower layer is mainly southward, the number of middle – level southwest paths increased, there is a westward path above the middle level, there is a contribution of water vapor from the Indian peninsula and the Tibetan Plateau along the westerly belt.

Key words: local rainstorm; water vapor transport; numerical simulation; trajectory

0 引言

云南暴雨具有突发性强、范围小、历时短、强度大等特点,且多发生在夜间,常引发山洪、滑坡、泥石流、城市内涝等灾害,给人民生命财产造成重大损失。如:2010年曲靖市马龙县“6.25”特大暴雨,导致全县5万多人受灾,1人死亡;2016年大姚县“09.26”暴雨导致2人死亡,损失惨重;2017年昆明“7.20”暴雨,导致严重城市内涝,2人死亡,多处道路被淹,交通中断。研究该型暴雨发生发展机制,提高预报准确率,可减小暴雨致灾损失,保护人民生命财产安全。

近年来,许多气象工作者对云南暴雨天气过程进行深入细致研究^[1-7],建立了云南暴雨发生发展的理论基础,丰富了预报员对暴雨过程的认识。在实际业务预报中,气象工作者也认识到,水汽条件作为暴雨发生的必要条件之一,除水汽在暴雨区辐合外,还需水汽源地持续的水汽输送,即水汽输送条件。在云南暴雨中的研究中针对水汽条件相对较少,其重要性则早已有学者提出,张腾飞等^[8]发现,无南支槽配合的云南强降水过程中,其水汽可来自阿拉伯海等较远海域;何华等^[9]分析云南46次大暴雨过程后指出,水汽输送主要来源于孟加拉湾,暴雨发生前,孟加拉湾至云南一直维持强水汽通量大值带;董海萍等^[10]分析云南初夏一次暴雨过程发现,水汽输送主要来源于孟加拉湾,水汽辐合可存在于较高气压层。丁一汇等^[11]分析了1998年中国大洪水时期的水汽收支特征,得到了部分水汽收支图像;周长艳等^[12]研究四川“9.3”大暴雨过程发现,水汽源于南海、西太平洋地区,异常水汽输送所占比例较大;王婧羽等^[13]利用HYSPLIT轨迹模式研究北京一次特大暴雨过程水汽输送特征,发现经向水汽输送起主要作用;江志红等^[14]模拟淮河流域强降水过程后指出,水汽通道主要有3支且贡献率不同;戴竹君等^[15]研究热带风暴暴雨增幅前后水汽轨迹后发现,孟加拉湾西南气流输送的水汽对此次暴雨起重要作用;王佳津等^[16]同样利用HYSPLIT模式模拟四川极端暴雨水汽输送过程,指出四川盆

地不同类型极端暴雨不同层次水汽输送轨迹不同。

对暴雨过程中水汽输送特征研究,可加深对暴雨过程水汽条件的认识,建立健全暴雨发生发展机制。然而,对云南暴雨过程,特别是局地暴雨过程中不同高度层次水汽输送及水汽源地分析则尚未开展专门研究。为此,本文选取两次云南发生频率较高的局地暴雨个例,在常规计算基础上,利用HYSPLIT模式对暴雨过程水汽输送路径进行后向轨迹试验,确定不同高度层次水汽输送特征及其源地,为云南暴雨预报提供参考依据。

1 资料与模式说明

1.1 资料

本文所用资料包括地面自动气象站观测数据、NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料、NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ GDAS(Global Data Assimilation System)资料。其中GDAS资料为全球资料同化系统同化NCEP再分析资料所得,可作为HYSPLIT模式初始场,该资料垂直方向21层,包括高度、温度、风场、比湿等气象要素,数据自2005年1月至今,每7d资料存储1个文件,每月存储5个文件,逐月更新,时间为世界时,文中数值试验部分时间均为世界时。

1.2 模式简介

HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Modle)模式是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)与澳大利亚气象局联合开发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散的专业轨迹模式。模式平流计算采用拉格朗日方法,常用于跟踪气流所携带的粒子或其移动方向,可实时预报风场形势、分析降水、研究轨迹、水汽路径等。模式假设空气微团随风移动,其移动轨迹相当于时间和空间上位置矢量积分,其原理如下:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t) \Delta t \quad (1)$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5[V(P, t) + V(P', t + \Delta t)] \Delta t \quad (2)$$

公式(1)、(2)表示,气团最终位置 $P(t + \Delta t)$ 由气团初始三维速度矢 $V(P, t)$ 与第一猜位置 $P'(t + \Delta t)$ 的速度矢 $V(P', t + \Delta t)$ 求平均后针对时间积分

所得。时间步长 Δt 需满足条件: $\Delta t < 0.75$ 格距 $/U_{max}, U_{max}$ 为最大风速, 即一个时间步长内气团移动不超过 0.75 个格距, $U_{max} \Delta t < 0.75$ 。

2 实况及天气背景

2.1 降雨实况

2012 年 5 月 24 日 20 时—25 日 20 时(简称“5.24”,下同),受两高辐合系统影响,全省出现暴雨 1 站、大雨 6 站、中雨 12 站、小雨 42 站;强降雨中心昆明站 24 h 雨量 99.8 mm,与其相邻的太华山站 24 h 雨量 27.5 mm,强降雨开始于 24 日 20 时,最大小时雨强达 64.4 mm,出现在 24 日 22 时,23 时开始,降雨迅速减小,25 日 05 时降雨结束,强降雨主要集中在 24 日 20—22 时,其中 21 时、22 时的雨量均超过 20 mm。2015 年 9 月 27 日 20 时—28 日 20 时(简称“9.27”,下同),受副热带高压外围气流影响,全省出现小雨 20 站、中雨 1 站、大暴雨 1 站;大暴雨中心河口站 24 h 累积雨量 140.9 mm,降雨主要出现在 28 日 06—13 时,最大小时雨强达 47.1 mm,

出现在 28 日 08 时。

综上所述,两次过程表现一致,强降雨具有局地性、突发性、雨量集中、雨强大等特征,属云南典型局地突发性暴雨过程。

2.2 天气背景

“5.24”过程强降雨开始前,即 5 月 24 日 20 时,500 hPa(图 1a)中高纬度地区为两槽一脊,东亚大槽略有东移,槽后内蒙、甘肃、四川一带有冷平流南下影响云南,高原上有短波东移,位置偏北,强度较弱,副高略有西伸,滇缅高压加强东进,昆明—玉溪—红河一线形成两高辐合区,孟加拉湾、中南半岛至北部湾海域均为低压控制,形成有利的大尺度水汽输送通道;700 hPa(图 1b),辐合区位于滇中至滇东南一线,滇中及以东地区为偏南气流控制,有利于低层水汽向暴雨区输送;地面图上(图略),丽江—楚雄—昆明—红河一线为一中尺度辐合线,为强对流天气发生提供一定触发条件;25 日 08 时(图略),副热带高压加强西伸,辐合区西移减弱,水汽输送通道受阻,强降雨结束。

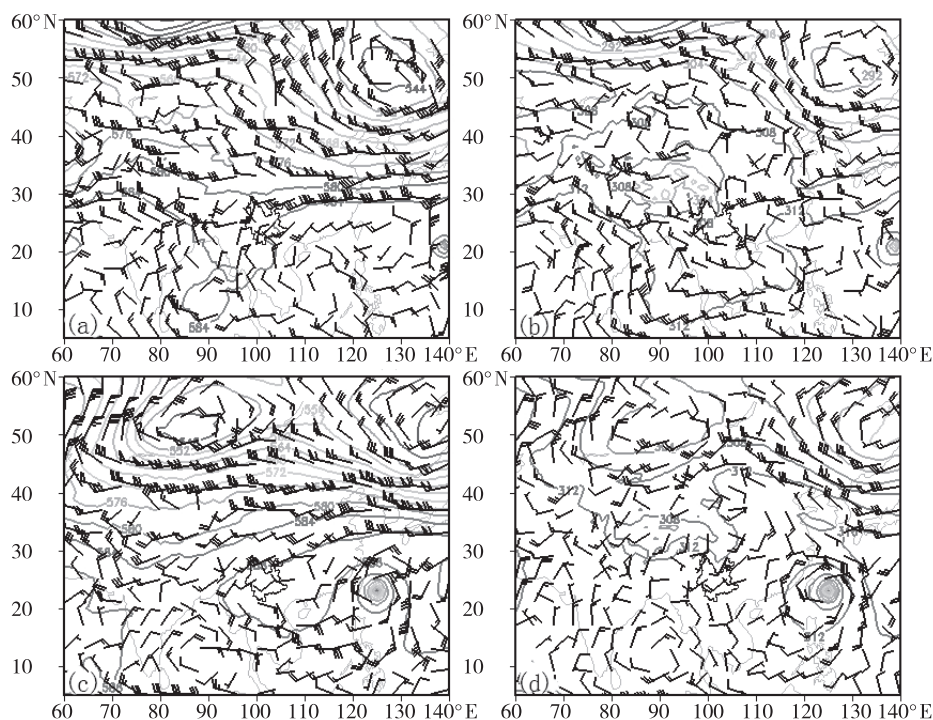


图 1 2012 年 5 月 24 日 20 时 500 hPa(a)及 700 hPa(b)和 2015 年 9 月 28 日 02 时 500 hPa(c)及 700 hPa(d)风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)和高度场(单位: dagpm)

Fig. 1 The wind field (unit: m/s) and the height field (unit: dagpm) of the 500 hPa (a) and 700 hPa (b) at 20:00 on May 24, 2012 and the 500 hPa (c) and 700 hPa (d) at 02:00 on September 28, 2015

“9.27”过程强降雨开始前,即 9 月 28 日 02 时,500 hPa 副高西伸北抬,云南处于副高西北侧偏西或偏南气流控制,北部中高纬度为稳定维持的两槽一

脊形势,主槽位置偏北偏东,高原南侧有短波活动,无明显冷空气南下影响云南,孟加拉湾为一低压控制,台风杜鹃位于台湾以东洋面,以偏北路径移动,

在西太平洋、孟加拉湾低值带形成有利的水汽输送通道(图1c);低层700 hPa、850 hPa,暴雨区为偏南气流控制,有利于水汽向暴雨区输送(图1d);强降雨开始后(图略),带状副高加强西伸,中南半岛北部、孟加拉湾北部、云南南部处于副高控制下,水汽输送通道受阻,强降雨结束。

综上所述,两次过程强降雨开始与结束均受副热带高压影响,副高加强西伸后降雨结束;西太平洋、孟加拉湾一带均为低值区,水汽输送通道畅通,副热带高压加强西伸后,水汽输送通道受阻,强降雨结束;有利的大尺度水汽输送环境是两次强降雨发生的重要条件。

3 水汽输送特征分析

水汽条件是暴雨发生的必要条件,如果没有水汽补充,某一局地上空的水汽总是有限的,要使降水得以维持,降水量增大,必须有持续不断的水汽输送^[17]。首先对基于常规计算所得水汽通量进行分析,探索两次过程水汽输送路径及源地。

“5.24”强降雨过程,2012年5月24日20时(图2a),暴雨中心西南水汽输送主要有3条路径,第一条为孟加拉湾槽前西南气流经滇缅高压脊转向向后形成的西南水汽输送,水汽源地为孟加拉湾;第二条为孟加拉湾槽前西南气流经中南半岛北部转向与副热带高压西侧偏南气流汇合后形成的

西南水汽输送,源地为孟加拉湾、南海、西太平洋;第3条为副热带高压西侧西南气流向暴雨区的水汽输送,水汽源地为南海、西太平洋;暴雨区水汽输送通道畅通,水汽输送较强,水汽通量达 $10.548 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。5月25日08时(图2b),副热带高压加强西伸,云南中东部为副热带高压控制,滇缅高压脊减弱,两高辐合区西移减弱,孟加拉湾至中南半岛一带气流平直,暴雨区水汽输送减弱,水汽通量减小至 $6.671 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,强降雨趋于结束。“9.27”强降雨过程,2015年9月28日02时(图2c),暴雨中心河口地区主要为副热带高压外围东南水汽输送,存在两条水汽输送路径,一条为台风杜鹃西侧与副热带高压东侧东北气流经北部湾、越南北部转向后形成的东南水汽输送,水汽源地为南海、西太平洋;另外一条路径为孟加拉湾低压东侧偏南气流与副热带高压西侧东南气流汇合向后形成的东南水汽输送,水汽源地为孟加拉湾;28日02时,暴雨中心水汽通量值增大至 $12.849 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;28日08时(图略),暴雨区维持较强东南水汽输送,水汽输送通道畅通;28日14时(图2d),台风杜鹃继续北上,副热带高压北抬西伸,云南中南部处于副热带高压控制下,水汽输送通道受阻,暴雨区水汽输送减弱,强降雨结束;28日20时(图略)暴雨中心水汽通量减小至 $9.727 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,降雨过程结束。

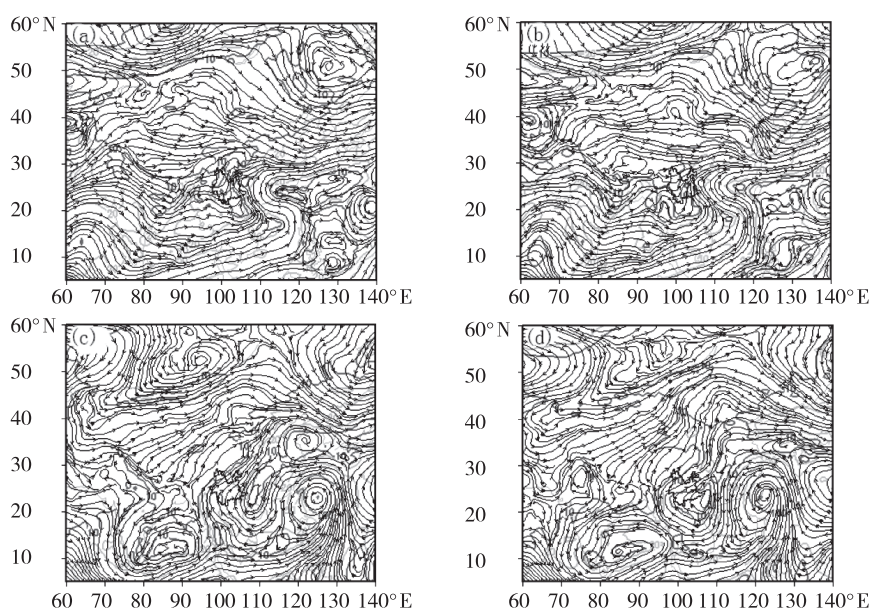


图2 2012年5月24日20时(a)及25日08时(b)和2015年9月28日02时

(c)及28日14时(d)整层水汽通量分布,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 2 The water vapor flux distribution of the whole layer at 20:00 (a) and 08:00 (b) on May 24, 2012 and 02:00 (c) and 14:00 (d) on September 28, 2015, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

分析两次过程强降雨中心水汽通量时间演变可见,“5.24”过程(图 3a、3b),经向、纬向水汽通量均为单峰结构,22 日水汽通量开始增加,暴雨开始前 48~54 h 内(22 日 20 时—24 日 02 时)维持水汽输送峰值,暴雨开始前 24 h,水汽通量逐渐降低,纬向通量显著低于经向通量;暴雨区水汽输送主要集中于 600 hPa 以下层,以偏南水汽输送为主,22 日水汽通量开始增大,水汽输送逐渐增强,48~54 h 内维持强水汽通量中心,最强中心出现于 23 日 20 时,750~700 hPa 层;25 日 02 时开始,水汽通量迅速减

小,降雨趋于结束。“9.27”过程(图 3c、3d),经向水汽通量为单峰结构,25 日 08 时开始增强,暴雨开始前 48 h 内(26 日 02 时—28 日 02 时)维持水汽通量峰值,28 日 02 时水汽通量逐渐减小,纬向通量则较经向通量弱,整个时段内均为下降趋势;水汽输送主要集中于 600 hPa 以下层,以偏南水汽输送为主,26 日 02 时—28 日 02 时整层经向水汽通量峰值时段,850~600 hPa 为强水汽通量中心,28 日 14 时,偏南水汽输送逐渐减弱,强降雨结束。

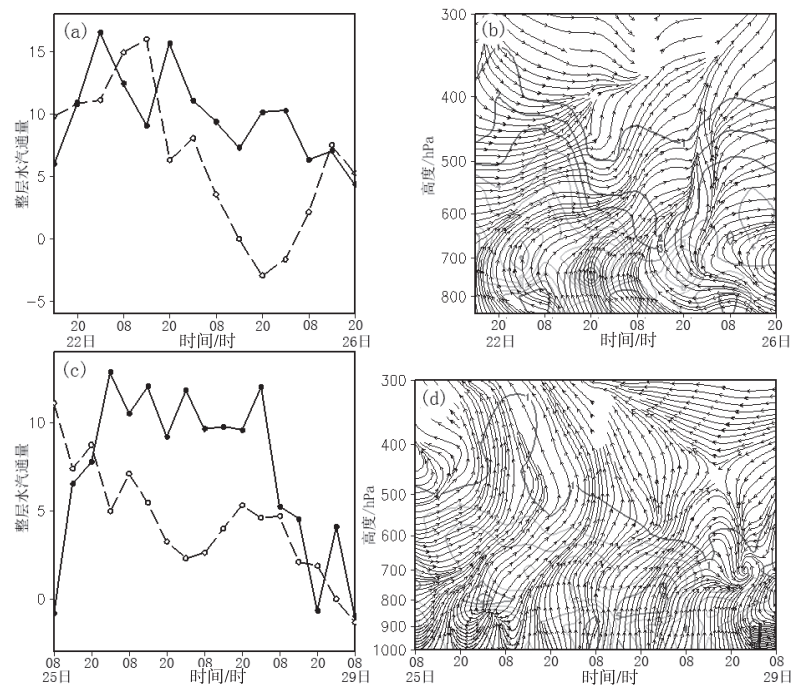


图 3 昆明站整层水汽通量时间演变(a)及单层水汽通量时间—高度分布(b)和河口站整层水汽通量时间演变(c)及单层水汽通量时间—高度分布(d),整层水汽通量(实线为经向通量,虚线为纬向通量)单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,单层水汽通量单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 3 The time evolution of water vapor flux in whole layer (a) and time height distribution of water vapor flux in single layer (b) at Kunming Station and time evolution of water vapor flux in whole layer(c) and time height distribution of water vapor flux in single layer (d) at Hekou station, the unit of whole layer water vapor flux (the solid line meridional flux, the dotted line is latitudinal flux): $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the unit of single layer water vapor flux: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

综上所述,两次局地暴雨过程水汽源地均为南海、西太平洋、孟加拉湾,水汽输送主要集中在 600 hPa 以下层,以经向偏南水汽输送为主,强降雨开始前 48~72 h,水汽通量增大,水汽输送加强,副高西伸后,水汽输送通道受阻,水汽输送减弱,强降雨结束;两次过程大尺度环流背景的差异导致水汽输送路径不同,两高辐合型“5.24”过程为西南水汽输送路径,副高外围型“9.27”过程为东南水汽输送路径。

4 数值试验分析

基于上述分析,应用 HYSPLIT 模式对两次局地暴雨过程水汽输送源地及路径进行模拟追踪,数值试验涉及时间均为世界时。

4.1 模式误差验证

模式计算误差分为两类,积分误差与分辨率误差。积分误差主要由模式方程截断产生,分辨率误差为格点气象数据时空分辨率有限性产生。由于

粒子轨迹没有实况观测资料进行对比分析,可设计如下方案进行误差分析:积分误差可选定追踪点,首先进行一定时间前向轨迹模拟,以模拟终点为起点进行相同时间的后向轨迹模拟,误差大小为后向轨迹终点与前向轨迹起点间距离的 $1/2$;分辨率误差可以通过设置模拟起始点水平与垂直方向上偏移量进行轨迹估计^[14]。具体验证方案如下:

4.1.1 积分误差 “5.24”追踪点为暴雨中心昆明(102.65°E 、 25.0°N 、 $1\,888.1\text{ m}$),模拟高度 $3\,000\text{ m}$,起始时间2012年5月24日12时,前向模拟96 h,

以前向模拟终点为起点进行96 h后向追踪(图4a);“9.27”追踪点为暴雨中心河口(103.95°E 、 22.5°N 、 137.8 m),模拟高度 $1\,500\text{ m}$,起始时间2015年9月28日00时,前向模拟72 h,以前向模拟终点为起点进行72 h后向追踪(图4c)。

4.1.2 分辨率误差 取积分误差模拟点位置设置,增加初始场 x 、 y 方向 0.5 格距偏移量, z 方向 0.01 (σ 值)偏移量,进行后向72 h、96 h追踪,得到昆明、河口均有27条气块轨迹(图4b、图4d)。

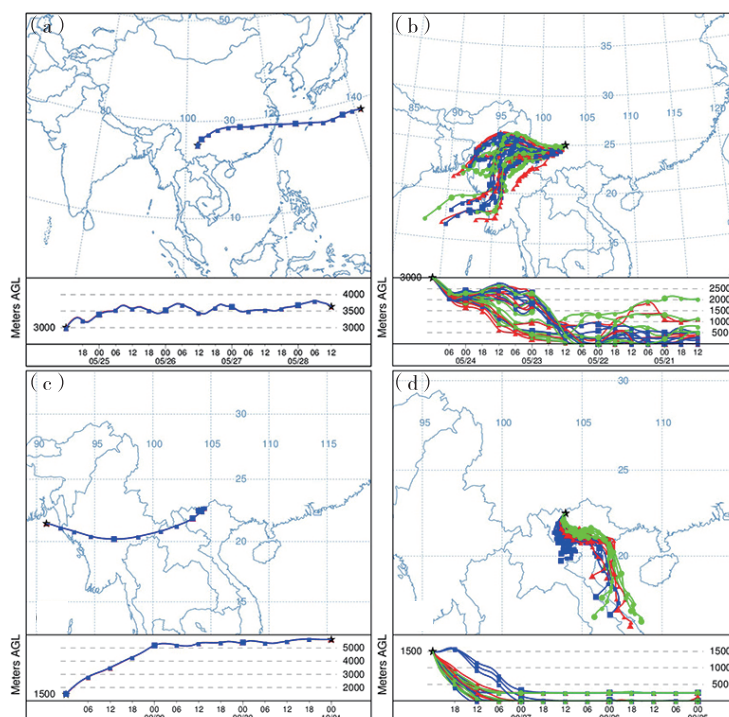


图4 昆明积分误差(a)及其分辨率误差(b)和河口积分误差(c)及其分辨率误差(d)分布
Fig.4 The distribution of integral error (a) and its resolution error (b) at Kunming station and integral error (c) and its resolution error (d) at Hekou station

基于误差验证方案设计模拟得到模式误差分布(图5a、图5c),不同追踪点、不同模拟时段内,前向轨迹与后向轨迹无论水平尺度还是垂直尺度上均高度重合,说明模式在模拟计算过程中积分误差很小,基本可以忽略。由图5b、5d可见,水平与垂直方向上,轨迹间偏离程度随模拟时间延长而增大,追踪时效越长轨迹离散度越大,但在所选计算时段内仍然可以较好再现真实气流的来向和高度变化。由此可知,分辨率误差较积分误差大,但总体特征表明,积分误差与分辨率误差对气块轨迹模拟影响较小,可通过气流运动轨迹表征水汽输送路径及相关特征。

4.2 气块轨迹分析

“5.24”试验方案的模拟起始时间为2012年5月24日12时,模拟高度层为 750 m 、 $1\,200\text{ m}$ 、 $2\,000\text{ m}$ 、 $2\,500\text{ m}$ 、 $3\,000\text{ m}$ 、 $3\,600\text{ m}$,追踪点为暴雨中心昆明,模式顶高 10 km ,垂直分层采用初始场数据分层,后向追踪96 h;气块位置信息1 h输出1次,最终得到6条气块轨迹(图5a)。“9.27”试验方案的模拟起始时间为2015年9月28日00时,模拟高度层为 50 m 、 200 m 、 400 m 、 750 m 、 $1\,500\text{ m}$ 、 $3\,000\text{ m}$ 、 $4\,000\text{ m}$ 、 $5\,500\text{ m}$,追踪点为暴雨中心河口,模式顶高 10 km ,垂直分层采用初始场数据分层,后向追踪72 h;气块位置信息1 h输出1次;最终得到8条气

块轨迹(图 5b)。

由图 5a 看出,6 条水汽输送路径均为偏南或偏西路径,其中 750 m 高度为东南路径,源地可追溯至北部湾沿岸;西南路径包含 3 条轨迹,即 1 200 m、2 000 m、2 500 m,源地为中南半岛北部;偏西路径包含 2 条轨迹,即 3 000 m、3 600 m,源地为孟加拉湾北部;22 日 00 时,3 000 m、3 600 m 气块逐渐向高层移动,23 日 00 时,2 000 m、2 500 m 气块逐渐向高

层移动,低层 750 m、1 200 m 气块向高层移动始于 23 日 18 时。由此可见,“5. 24”过程数值模拟结果总体呈现西南路径水汽输送特征,与数值计算结果一致,但数值模拟可再现水汽输送路径的垂直结构;低层主要为东南或西南水汽输送,中层则主要为偏西水汽输送;降雨开始前 24 ~ 48 h,低层气块迅速向高层移动,水汽不断凝结,最终导致强降雨发生。

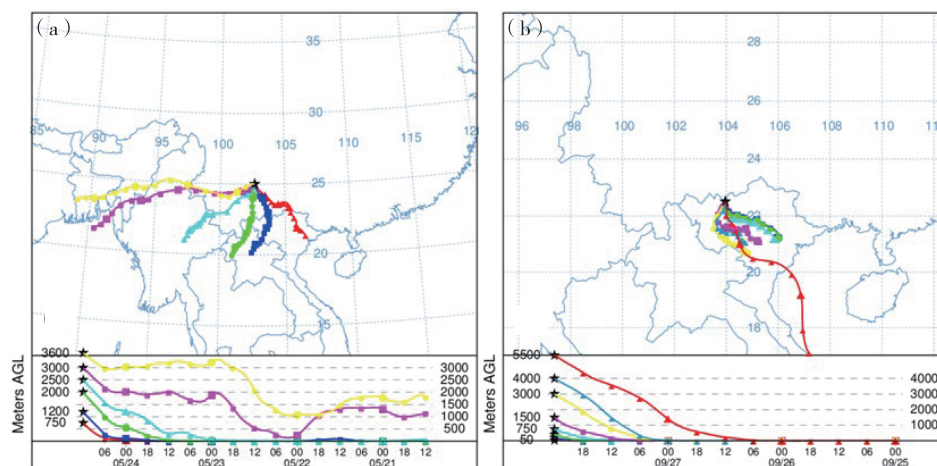


图 5 昆明(a)和河口(b)后向轨迹分布

Fig. 5 The backward trajectory distribution of Kunming (a) and Hekou (b)

由图 5b 显示,“9. 27”过程暴雨中心 8 条水汽输送路径一致性较好,均为红河流域东南水汽输送,与数值计算结果表现一致,水汽源地除中层 5 500 m 可追溯至北部湾海域外,其余模拟层水汽源地均为越南北部红河流域;5 500 m 高度,26 日 00 时气块开始逐渐向高层移动,4 000 m 及以下层 27 日 00 时气块开始自低层迅速向高层移动,5 500 m 高度气块向高层移动时间较 4 000 m 高度以下层提前 24 h,即强降雨开始前 24 ~ 48 h,气块垂直方向运动剧烈,低层气块逐渐向高层移动,水汽不断凝结,最终导致强降雨发生。

“5. 24”暴雨过程中,分别计算 750 m、1 200 m、2 000 m、2 500 m、3 000 m、3 600 m 后向 96 h 日轨迹,遵循类与类之间差异极大而同一类内部差异极小原则,对每一层轨迹进行聚类分析得到轨迹聚类平均图(图 6)。750 m 高度(图 6a),存在 3 条路径,东北路径、偏东路径、西南路径,其中西南路径包括两条轨迹,百分比分别为 8%、26%、58%、8%;1 200 m 主要为 3 条路径(图 6b),东北路径、偏南路径、西南路径,东北路径包括 2 条轨迹,百分比分别

为 5%、19%、26%、50%;2 000 m(图 6c)存在 4 条路径,东北路径占 6%,偏南路径占 26%,西南路径占 38%,偏西路径包括 2 条轨迹,百分比分别为 10%、20%;2 500 m(图 6d),偏南路径占 18%,西南路径占 23%,偏西路径包括 3 条轨迹,百分比分别为 11%、14%、34%;3 000 m 仍为 3 条路径(图 6e),偏南路径占 16%、西南路径占 6%,偏西路径包括 3 条轨迹,百分比分别为 50%、22%、16%;3 600 m(图 6f)为 3 条路径,偏南路径占 14%,西南路径占 16%,偏西路径包括 3 条轨迹,百分比分别为 41%、16%、14%。由此可见,“5. 24”过程以西南路径水汽输送为主,同时存在东北路径、偏东路径、偏南路径、偏西路径;低层主要为偏南路径、西南路径,中层西南路径增多,中层以上以偏西路径为主。水汽源地为孟加拉湾、中南半岛北部、印度半岛。

“9. 27”暴雨过程中,选取 200 m、750 m、1 500 m、3 000 m、4 000 m、5 500 m 高度层进行后向 72 h 日轨迹计算,遵循类与类之间差异极大而同一类内部差异极小的原则,对每一层总轨迹进行聚类分析得到轨迹聚类平均图(图 7)。在 200 m 高度(图 7a)

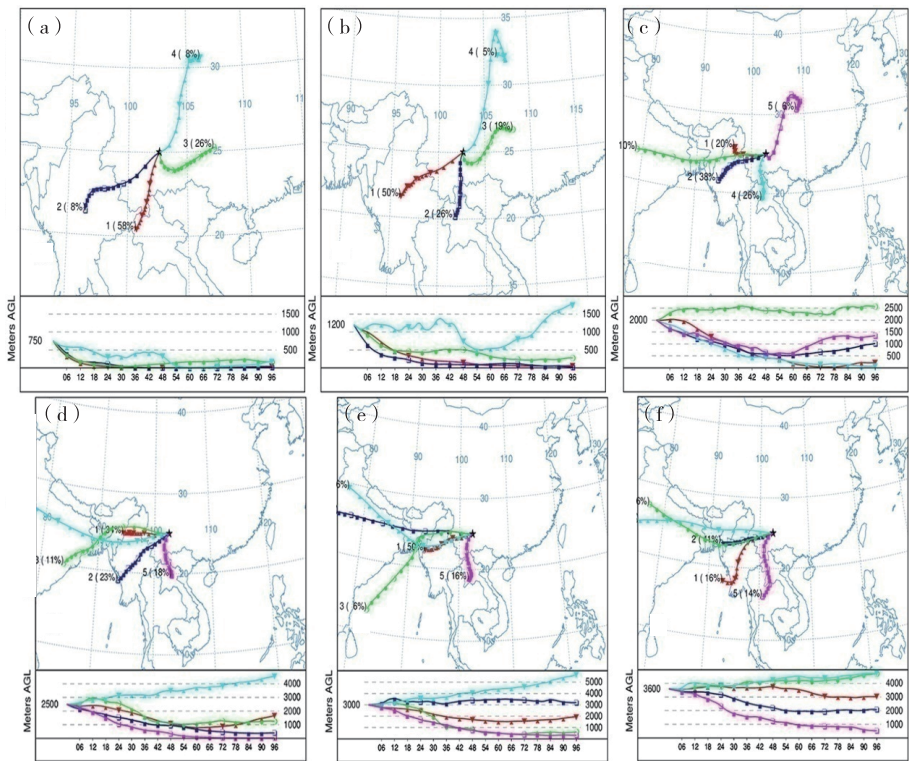


图6 昆明5月24日12时不同高度后向96 h 轨迹聚类平均分布

Fig. 6 The clustering average distribution of 96h backward trajectory at different altitudes at 12:00 on May 24 in Kunming

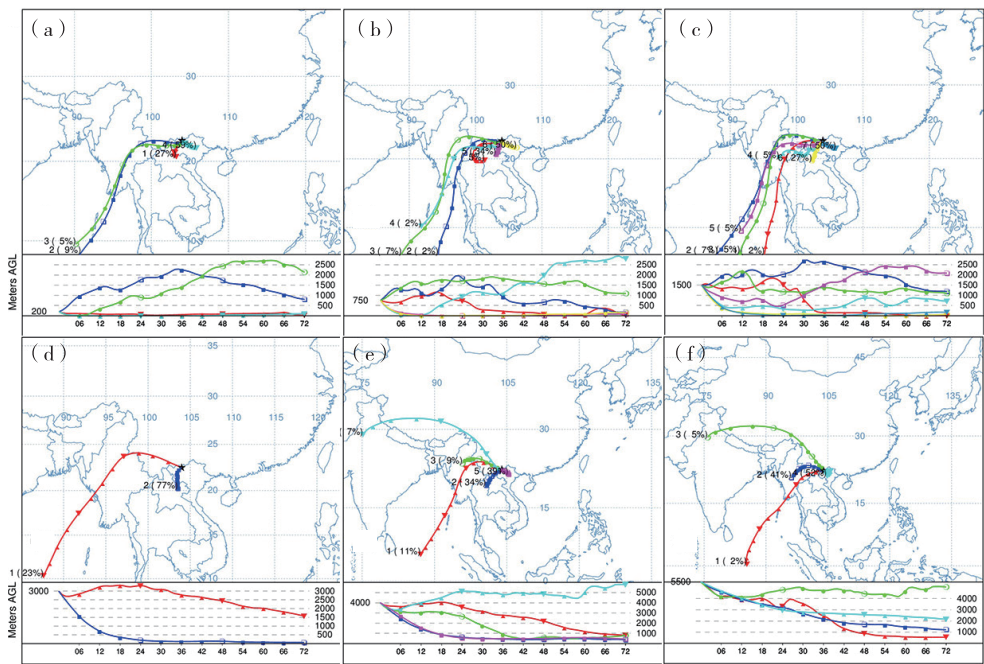


图7 河口9月28日00时不同高度后向72 h 轨迹聚类平均

Fig. 7 The clustering average of backward 72 h trajectories at different heights at 00:00 on September 28 in Hekou

上,主要为3条水汽路径,东南路径、偏南路径、西南路径,其中轨迹数百分比分别为59%、27%、14%;750 m高度(图7b)同样为东南路径、偏南路径、西南路径,轨迹数百分比分别为50%、34%、16%;

1 500 m(图7c)仍为东南路径、偏南路径、西南路径,分别占50%、27%、23%;3 000 m高度(图7d)出现转折,只存在偏南路径和西南路径,分别占77%、23%;4 000 m高度(图7e)则为东南路径、西

南路径、偏西路径、西北路径,其中西南路径包括 2 条轨迹,百分比分别为 39%、34%、11%、20%、7%; 5 500 m 高度(图 7f)上为东南路径、西南路径、西北路径,百分比分别为 52%、43%、5%。由此可见,“9.27”暴雨过程水汽输送路径主要为东南路径和偏南路径,西南路径和西北路径轨迹数较少;东南路径和偏南路径水汽源地主要为红河流域,输送距离较短;西南路径输送距离较远,可追溯至孟加拉湾;西北路径主要出现在中层 3 000 m 高度以上,沿西风带来自印度半岛北部地区。垂直方向上,水汽输送过程中变化较大,主要水汽源均来自低层。

综上所述,数值模拟结果总体表现与计算结果一致,但数值模拟结果较为详细地显示了水汽输送的垂直结构特征。“5.24”过程水汽输送路径主要为西南路径,“9.27”过程为东南路径;随着垂直方向高度升高,两次过程低层偏南水汽输送均向偏西水汽输送转变,即中层存在偏西水汽输送路径;两次过程水汽输送路径及源地均较数值计算结果清楚,水汽输送局地特征明显,低层水汽输送路径较短,水汽源地可追溯至红河流域、中南半岛北部、印度半岛等地,但“5.24”过程还存在较弱偏北水汽输送路径,可能与低层弱冷空气相关。

5 结论与讨论

①“5.24”过程为两高辐合型暴雨,“9.27”过程为副高外围型暴雨,均受副热带高压影响,暴雨区盛行偏南气流,水汽输送通道畅通,降雨后期,副高西伸,水汽输送通道受阻,水汽输送减弱,降雨结束。“5.24”过程两高辐合区并伴有地面辐合线,动力条件主要为大尺度系统抬升;“9.27”过程无冷平流影响,动力条件主要为暴雨中心喇叭口地形作用。

②两次过程水汽源地均为孟加拉湾、南海、西太平洋,“5.24”过程以西南水汽输送为主,存在 3 条水汽输送路径,输送距离较远,“9.27”过程以东南水汽输送为主,存在 2 条水汽输送路径,输送距离较短,局地特征更显著。

③两次过程水汽输送均集中在 600 hPa 以下层,以经向偏南水汽输送为主,水汽输送增强时间较强降雨开始时间提前 48~72 h。

④“5.24”过程最大水汽通量 $10.548 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,最大雨量 99.8 mm,“9.27”过程最大水汽通量 $12.849 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,最大雨量 140.9 mm,“9.27”过程水汽通量、最大雨量均强于“5.24”过程,水汽通量与强降雨相关性较好,对强降雨具有一定指示意义。

⑤数值模拟结果与常规计算结果一致,同时可显示水汽垂直输送特征,低层以偏南路径为主,中层西南路径增多,中层以上出现偏西路径,即存在沿西风带来自印度半岛及青藏高原的水汽贡献;初始气块均源自低层,暴雨开始前 24~48 h,气块垂直方向运动剧烈,水汽自低层向高层汇聚,水汽不断凝结,最终导致强降雨发生。

需要指出的是,本文主要针对两次云南局地暴雨过程水汽输送特征进行分析,在一定水汽条件下,局地暴雨发生发展机制及其出现地域,还取决于局地热力条件、动力条件、触发机制等强降雨产生条件。

参考文献

- [1] 许美玲,尹丽云,金少华,等. 云南突发性特大暴雨过程成因分析[J]. 高原气象,2013,32(4):1062-1073.
- [2] 金少华,邹阳,周泓,等. 低纬高原一次冬季暴雨转雪成因分析[J]. 中低纬山地气象,2019,43(2):8-16.
- [3] 许美玲,段旭,孙绩华,等. 云南初夏罕见暴雨的螺旋度分析[J]. 热带气象学报,2003,19(2):184-190.
- [4] 张秀年,段旭. 低纬高原西南涡暴雨分析[J]. 高原气象,2005,24(6):941-947.
- [5] 尹丽云,普贵明,张腾飞,等. 滇东一次局地特大暴雨的中尺度特征和地闪特征分析[J]. 云南大学学报,2012,34(4):425-431.
- [6] 王将,段玮,康道俊,等. 金沙江乌东德水电站暴雨概念模型与云型特征[J]. 中低纬山地气象,2020,44(5):1-10.
- [7] 沈倩,裴明等. 昭通市一次辐合带系统暴雨过程分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(2):59-65.
- [8] 张腾飞,鲁亚斌,张杰,等. 2000 年以来云南 4 次强降雪过程的对比分析[J]. 应用气象学报,2007,18(1):64-72.
- [9] 何华,孙绩华. 云南冷锋切变大暴雨过程的环流及水汽输送特征[J]. 气象,2001,29(4):48-52.
- [10] 董海萍,赵思雄. 2004 年初夏一次云南暴雨过程的中尺度系统及其水汽特征分析研究[J]. 2011,27(5):657-668.
- [11] 丁一汇,胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. 气象学报,2003,61(2):129-145.
- [12] 周长艳,李跃清. 四川“9.3”大暴雨中的水汽输送分析[J]. 成都信息工程学院学报,2005,20(6):733-738.
- [13] 王婧羽,崔春光,王晓芬,等. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J]. 气象,2014,40(2):133-145.
- [14] 江志红,梁卓然,刘政宇,等. 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,2011,35(2):361-372.
- [15] 戴竹君,王黎娟,管兆勇,等. 热带风暴“Bilis(0604)”暴雨增幅前后的水汽输送轨迹路径模拟[J]. 大气科学,2015,39(2):422-432.
- [16] 王佳津,肖递详,王春学,等. 四川盆地极端暴雨水汽输送特征分析[J]. 自然资源学报,2017,32(10):1768-1783.
- [17] 许美玲,段旭,杞明辉,等. 云南省天气预报员手册[M]. 北京:气象出版社:258-259.