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

爬流和绕流对四川盆地一次盛夏暴雨过程的影响分析

谢新 李国平 郑建萌 许一洲

Analysis of the impact of flow over and flow around on a midsummer rainstorm event in the Sichuan Basin

XIE Xin，LI Guoping，ZHENG Jianmeng，XU Yizhou

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-152

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

超低空急流形成的爬、绕流对长白山地区一次突发性暴雨的影响
Impact of flow over and flow around caused by super low-level jet on a sudden rainstorm over the Changbai Mountains
暴雨灾害. 2023, 42(3): 273-282 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-035

四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析
Mesoscale analysis on one warm Southwest Vortex rainstorm in the Sichuan basin
暴雨灾害. 2023, 42(1): 24-36 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-024

四川盆地一次暴雨过程中西南低涡非对称结构特征及其成因分析
Analysis on characteristics and causes of the Southwest Vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin
暴雨灾害. 2024, 43(6): 627-636 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-239

基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析
Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data
暴雨灾害. 2024, 43(1): 13-22 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-221

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

重力波在四川盆地东北部一次夜间山地暴雨中的作用初探
The role of gravity wave in a nocturnal mountain rainstorm in the northeastern Sichuan Basin
暴雨灾害. 2024, 43(2): 146-157 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-115

关注微信公众号，获得更多资讯信息

谢新,李国平,郑建萌,等.2026.爬流和绕流对四川盆地一次盛夏暴雨过程的影响分析[J].暴雨灾害,45(2):196−205. XIE Xin, LI Guoping, ZHENG Jianmeng, et al. 2026. Analysis of the impact of flow over and flow around on a midsummer rainstorm event in the Sichuan Basin [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):196−205 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−152

爬流和绕流对四川盆地一次盛夏暴雨过程的影响分析

谢新[1], 李国平[1], 郑建萌[2], 许一洲[1]

(1. 成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室/气象灾害预测预警四川省工程研究中心/成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站, 成都 610225; 2. 云南省气候中心, 昆明 650034)

摘　要: 四川盆地四周地形多样, 产生的爬流与绕流运动显著, 目前关于爬、绕流运动对该地区暴雨影响研究待深入研究。基于 ERA5 再分析资料和 GPM 卫星降水产品, 运用爬、绕流分解方程组与水汽通量散度、涡度方程及螺旋度方程, 对 2023 年 7 月 12—13 日四川盆地暴雨过程中爬、绕流运动对其动力、热力及水汽输送的影响进行了诊断分析。结果表明: (1) 暴雨初生期, 爬流平流项与绕流散度项协同驱动正涡度增长; 其强盛期, 扭转项激增主导涡度增强而绕流平流项的抑制作用明显; 其结束期, 持续强抑制的爬流散度项和绕流平流项共同作用导致正涡度快速衰减。(2) 整个过程中, 绕流和爬流散度项对涡度的贡献相反并占据主导地位, 前者始终促进涡度发展, 而后者持续抑制涡度增长, 在促进和抑制贡献上分别占比 64.6% 和 44.6%。(3) 爬流的水汽和热力螺旋度驱动中低层水汽和热量向上输送; 绕流的水汽和热力螺旋度提升低层向中层水汽输送的效率和强度并通过抽吸低层高温空气, 不断增强中层位势不稳定, 最终通过不稳定能量的释放产生暴雨。通过对爬、绕流运动的定量解析, 可望为四川盆地山区暴雨的预报提供参考。

关键词: 暴雨; 爬流; 绕流; 涡度收支; 螺旋度; 四川盆地

中图法分类号: P445　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−152

Analysis of the impact of flow over and flow around on a midsummer rainstorm event in the Sichuan Basin

XIE Xin[1], LI Guoping[1], ZHENG Jianmeng[2], XU Yizhou[1]

(1. *School of Atmospheric Sciences*, *Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province*, *Sichuan Provincial Engineering Research Center for Meteorological Disaster Prediction and Early Warning*, *Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225; 2. *Yunnan Climate Centre*, *Kunming* 650034)

Abstract: The Sichuan Basin is surrounded by complex topography, resulting in significant over flows and around flows. However, research on the roles of these flows in term of dynamic, thermodynamic processes and water transport remains insufficient. Based on the ERA5 reanalysis data and GPM satellite precipitation products, this study presents a diagnostic analysis of the roles of topographically forced over flows and around flows in heat and water vapor transport during a heavy rainstorm in the Sichuan Basin from July 12 to 13, 2023, using a set of decomposition equations for the over and around flows together with equations of water vapor flux divergence, vorticity and helicity. The results are as follows. (1) The over flow advection term and around flow divergence term synergistically drive positive vorticity growth during the initial stage of the rainstorm; In the mature stage, surge of the tilting term dominates vorticity enhancement while the suppressive effect of the around flow advection term is pronounced. During the dissipation stage, the persistently strongly suppressive divergence term of the over flow and advection term of the around flow jointly cause rapid decay of positive vorticity. (2) Throughout the process, the divergence terms of the around flow and over flow exhibit opposing contributions to vorticity, with the former consistently promoting vorticity development (64.6%) and the latter continuously inhibiting it (44.6%). (3) The moisture and thermal helicity of the over flow drive upward transport of water vapor and heat from the middle and lower troposphere; the moisture and

收稿日期: 2025−08−09; **定稿日期**: 2025−12−01

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42175002, 42075013); 四川省科技计划资助项目 (2025ZNSFSC0334)

第一作者: 谢新, 主要从事天气动力学研究。 E-mail: 983089479@qq.com

通信作者: 郑建萌, 主要从事极端天气气候事件诊断与短期气候预测研究。 E-mail: hhzth@sina.com

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

thermal helicity of the around flow enhance the moisture transport from the lower to middle troposphere, while they continuously intensify mid-level potential instability by pumping high-temperature air from lower troposphere. Ultimately, rainstorms are generated through the release of unstable energy. This quantitative analysis of the over and around flows provides a theoretical reference for forecasting mountain-triggered rainstorms in the Sichuan Basin.

Key words: rainstorm; flow over ; flow around; vortex budget; helicity; Sichuan Basin

引　言

暴雨作为极端天气事件之一, 其突发性强、致灾性高, 往往是在有利的大尺度环流背景下, 由不同尺度天气系统相互作用产生的 (陶诗言, 1980), 尤其与西北太平洋副热带高压、阻塞高压及低涡 (低槽) 等系统的协同作用密切相关 (高守亭等, 2018), 其形成需满足充分的水汽供应、持续的动力抬升及不稳定的大气层结等条件 (朱乾根, 2007; 陆汉城和杨国祥, 2015)。在全球气候暖化背景下, 地形与大气过程的耦合效应进一步复杂化, 导致暴雨的预报难度显著增加 (Sarmadi et al., 2017; Huang et al., 2018)。地形作为触发和增强暴雨的关键性因素, 一直以来都是气象学领域研究的热点。

地形差异显著影响降水落区分布, 导致降水在迎风坡显著增强 (王丛梅等, 2017), 同时地形抬升加大锋面附近的热力差异, 使水汽辐合和斜压不稳定性增强 (周盈颖等, 2025)。地形可以通过摩擦从而阻挡南北向气流影响西南涡移动 (Wang et al., 2016; 邓承之, 2016; Xu et al., 2025)。地形对气流的作用主要分为爬流、绕流、摩擦和阻挡、(李国平, 2021), 其中爬流抬升与绕流辐合的协同作用是触发暴雨的关键 (Houze et al., 2012)。蒋强等 (2023) 分析祁连山的一次暴雨过程发现绕流运动可扮演主要的水汽携带者, 降水中心附近的气旋性辐合主要来自绕流风场的贡献。刘成瀚等 (2023) 通过一次超低空急流形成的爬、绕流运动分析出二者的共同作用可使得坡地次级环流上升支触发对流发展, 不稳定能量的释放导致山区局地大暴雨。此外, 地形的扰动会通过改变爬、绕流的垂直切变以及广义位温的水平梯度来影响位势稳定度的变化 (谢越等, 2024)。

四川盆地位于青藏高原东侧, 盆地边缘地区的地形以山地为主, 相较于盆地中央的平原地区, 暴雨因地形动力强迫作用表现出更强的局地性和突发性 (郑永光等, 2008), 同时具有高夜发频次和夜间加强的新特征 (李国平, 2025), 存在的爬、绕流运动也十分显著。金研和李国平 (2021) 分解爬、绕流方程发现爬流运动强迫出的垂直速度加强了上升运动且对降水区水汽的垂直输送有重要作用。爬流在四川盆地迎风坡形成强垂直上升运动, 盆地形成垂直环流, 绕流有利于涡旋产生和加强 (李毅和李国平, 2023)。Wu 等 (2023) 指出爬流强迫四川盆地西部产生上升运动, 而来自南方的暖湿气流与青藏高原的下坡冷干气流交汇, 触发对流并显著增强垂直速度。

综上, 尽管已有一些学者对四川盆地周边大气爬、绕流运动对暴雨的作用从中小尺度气象学的角度进行了相关研究, 但对爬流与绕流在暴雨动力、热力和水汽供应机制中的定量贡献仍缺乏系统性分析。本文以 2023 年 7 月 12—13 日四川盆地暴雨过程为研究对象, 通过动力学公式 (方程) 定量解析地形强迫的爬流与绕流运动的动力和热力作用, 讨论爬绕流对涡度制造的贡献, 以及在中低层水汽及热量垂直输送中的作用, 为阐明复杂地形区暴雨过程中爬流与绕流的协同作用机制和提升山地暴雨预报能力提供依据。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文采用的资料包括: (1) 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 ERA5 再分析数据集, 水平分辨率为 0.25°× 0.25°, 时间间隔为 1 h, 垂直方向上共 37 层, 用于分析暴雨过程中的环流形势、爬绕流运动、水汽及动热力等物理量特征。(2) 美国国家航空航天局 (NASA) 和日本宇宙航天研究开发机构 (JAXA) 联合提供的全球卫星降水测量计划 (GPM) 0.1°× 0.1°的 30 min 降水量产品, 用于分析降水强度及分布特征。

1.2 爬流和绕流的分解算法

为了研究爬、绕流运动对暴雨过程的影响, 首先采用张耀存和钱永甫 (1999) 对模式底层风场所采取的分解方案, 利用 ERA5 风场再分析资料, 将水平风矢量分解为绕流分量和爬流分量, 然后再根据绕流分量垂直于地形梯度和爬流分量平行于地形梯度的原理 (Smith et al., 1979), 得出以下联立计算公式

$$u_{\mathrm{r}}=\left[u_{\mathrm{s}}\left(\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial y}\right)^{2}-v_{\mathrm{s}}\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial x}\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial y}\right]/|\nabla z_{\mathrm{s}}|^{2}$$

$$v_{\mathrm{r}}=\left[v_{\mathrm{s}}\left(\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial x}\right)^{2}-u_{\mathrm{s}}\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial x}\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial y}\right]/|\nabla z_{\mathrm{s}}|^{2}$$

$$u_{\mathrm{p}}=\left[u_{\mathrm{s}}\left(\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial x}\right)^{2}+v_{\mathrm{s}}\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial x}\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial y}\right]/|\nabla z_{\mathrm{s}}|^{2}$$
$$v_{\mathrm{p}}=\left[v_{\mathrm{s}}\left(\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial y}\right)^{2}+u_{\mathrm{s}}\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial x}\frac{\partial z_{\mathrm{s}}}{\partial y}\right]/|\nabla z_{\mathrm{s}}|^{2} \quad (1)$$

式中，z_{s}为地形高度 (单位：m)；∇z_{s}为地形高度梯度，且$\nabla=\frac{\partial}{\partial x}\vec{i}+\frac{\partial}{\partial y}\vec{j}$。$u_{\mathrm{s}}$和$v_{\mathrm{s}}$分别是经向风和纬向风 (单位：$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)；下标 p 和 r 代表爬流运动和绕流运动；$u_{\mathrm{p}}$、$v_{\mathrm{p}}$、$u_{\mathrm{r}}$和$v_{\mathrm{r}}$分别是爬流和绕流的经向分量和纬向分量 (单位：$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)。绕流运动垂直于地形梯度，爬流运动平行于地形梯度，地形强迫出来的垂直运动只与爬流运动有关，绕流不直接产生垂直运动。计算等压面一般选取研究区域内地形强迫产生爬、绕流最显著、最直接的层次。

采用涡度收支方程 (杨颖璨等, 2018) 来诊断计算爬、绕流运动对涡度 (ζ) 制造的贡献，即

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}=-\left(u\frac{\partial\zeta}{\partial x}+v\frac{\partial\zeta}{\partial y}\right)-\omega\frac{\partial\zeta}{\partial p}-\beta v-(f+\zeta)\nabla\cdot\boldsymbol{V}-\left(\frac{\partial\omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial p}-\frac{\partial\omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial p}\right) \quad (2)$$

式中，科氏参数 $f=2\Omega\sin\varphi$；Ω为地转角速度；φ为纬度；$\beta=\frac{\partial f}{\partial y}$。右端第一项为涡度平流项，第二项为涡度垂直输送项，第三项为 β 效应项，第四项为水平散度项，第五项为扭转项 (即水平涡度向垂直涡度的转换)，计算时忽略摩擦的影响。利用公式 (2) 所示的涡度收支方程，将爬、绕流的经纬向分量分别带入涡度平流项、水平散度项和扭转项，以分析暴雨过程中爬、绕流分量对涡度制造的贡献。爬、绕流运动对于涡度垂直输送项的影响取决于爬流强迫出来的垂直速度 (金研和李国平, 2021)，β 效应项取决于暴雨系统的尺度，由于爬、绕流对涡度垂直输送项、β 效应项的影响程度远不及涡度平流项、水平散度项和扭转项，因此下文不讨论这两项。

采用等压面上水汽收支方程 (陈红专等, 2019) 研究爬、绕流对中底层水汽辐合方面的贡献

$$\frac{1}{g}\frac{\partial q}{\partial t}+\nabla\cdot q\vec{V}+\frac{\partial(q\omega)}{\partial p}=-m \quad (3)$$

式中，g 为重力加速度 (单位：$\mathrm{m\cdot s^{-2}}$)；q 为比湿 (单位：$\mathrm{g\cdot kg^{-1}}$)；m 为凝结率。将公式 (1) 计算出来的爬、绕流运动的经纬向分量带入公式 (3) 左端第二项所示的水汽通量散度项，可得爬、绕流对应的水汽通量散度项∇qV_{p}和∇qV_{r}，以此来探究暴雨中爬、绕流运动在水汽辐合方面的作用。

爬、绕流对水汽和热量垂直输送贡献，引入湿 z-螺旋度 (H_q, 陈得圆等, 2022)

$$H_q=\frac{\omega}{\rho}\left[\frac{\partial(qv)}{\partial x}-\frac{\partial(qu)}{\partial y}\right] \quad (4)$$

式中，ρ为密度 (单位：$\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$)。类似地，引入广义位温θ^{*}，将公式 (4) 中的比湿 q 用广义位温θ^{*}替换掉，就可得到热力螺旋度 (H_t) 公式

$$H_t=\frac{\omega}{\rho}\left[\frac{\partial(\theta^{*}v)}{\partial x}-\frac{\partial(\theta^{*}u)}{\partial y}\right] \quad (5)$$

将公式 (4) 和 (5) 中的 u 和 v 分别用u_{p}、v_{p}、u_{r}和v_{r}替换掉即可得爬绕流的水汽和热力螺旋度公式。

2 降水实况与大尺度环流背景

2.1 降水实况

2023 年 7 月 12—13 日在四川盆地以及周边山地出现了一次大暴雨过程。图 1a、b 分别是 24 h 累计降水量以及降水集中时段的 12 h 降水量。降水于 12 日 20 时 (北京时，下同) 始发于四川盆地东南部，随后不断增强并向北移动经过乐山、眉山等地。13 日 02 时—13 日 08 时，成都、德阳和绵阳江油也出现强降水，小时降水量最大达 43 mm，整个过程降水呈西南—东北分布，降水集中时段在 13 日 02—14 时，12 h 累计降水量大于 200 mm。

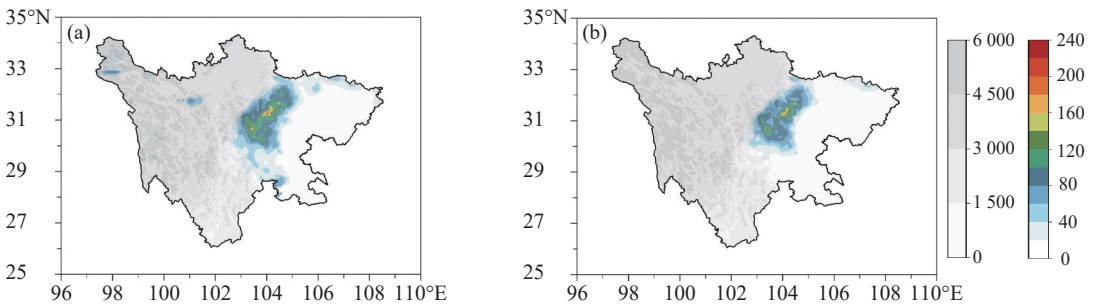


图 1 四川省 2023 年 7 月 12 日 16 时—13 日 16 时 24 h 累计降水量 (a)，2023 年 7 月 13 日 02 时—14 时 12 h 累计降水量 (b) (彩色阴影表示降水量，单位：mm，灰色阴影表示地形高度，单位：m)

Fig. 1 (a) 24 h accumulative precipitation from 16:00 BT 12 to 16:00 BT 13 July 2023, (b) 12 h accumulative precipitation from 02:00 BT 13 July to 14:00 BT 13 July 2023 in Sichuan area (colorful shadow denotes precipitation, unit: mm, grey shadow denotes terrain elevation, unit: m)

2.2 环流背景

此次暴雨过程发生时的 12 日 20 时, 500 hPa 图上中高纬地区呈现为“两脊一槽”环流形势, 长波槽位于贝加尔湖以南, 两高压脊分别位于巴尔喀什湖和我国东北地区, 四川盆地中部存在一明显低槽, 西太平洋副热带高压脊线稳定在 25°N 以北 (图 2a)。从 12 日 23 时开始 (图略), 850 hPa 四川盆地东侧偏东气流引导北方干冷空气加强南下, 而从低纬来的偏南气流携带大量水汽通过贵州转向进入四川。两股气流在盆地相遇, 通过切变、辐合方式逐渐在四川盆地内形成涡旋, 为暴雨提供了有利的水汽和动力条件。13 日 20 时整个暴雨过程结束时 (图 2b), 南、北向风速明显下降, 水汽输送强度大幅减弱。

3 中小尺度环境条件

3.1 水汽条件

暴雨的形成依赖于持续水汽供应, 包括水汽输送和水汽辐合 (毛紫怡等, 2021)。13 日 02 时, 四川盆地中部及东南部存在水汽通量散度辐合区, 强度超过-2×10^{-7} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1} (图 3a), 为暴雨提供了充足的水汽条件。图 3b 展示了 02—08 时暴雨关键区 (103°—104.5°E, 30°—31.5°N) 水汽通量散度项、水汽垂直输送项和水汽局地变化项 (具体算法参考陈红专等 (2019) 的工作) 的垂直廓线。由图可知, 三者在垂直方向上差异显著, 水汽通量散度项在低层呈现出强烈辐合, 中心强度达-9×10^{-7} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}, 为三项贡献中辐合极值最大者。相比之下, 水汽垂直输送项在 1 000—700 hPa 表现为辐散, 但在 700 hPa 以上的中高层, 该项转为显著辐合。水汽局地变化项在整层贡献均极其微弱, 仅在近地层存在可忽略的微弱辐合, 对暴雨的直接贡献很小。

3.2 垂直上升运动及不稳定层结

图 4a、b 是垂直速度和风场分别沿本次暴雨中心经 103.5°E 和 30.75°N 的经度-高度剖面和纬度-高度剖面。在 103°E 至 105°E 范围内存在两个显著的垂直上升运动中心, 其极值中心位于 103.5°E 附近, 上升气流强烈且与强降水中心对应良好。同时 103°E 以东近地层, 存在一个显著的假相当位温等值线密集区, 量值随高度递减, 形成了深厚的对流不稳定层结。由图 4b 可见, 暴雨区上空存在几乎贯穿整个对

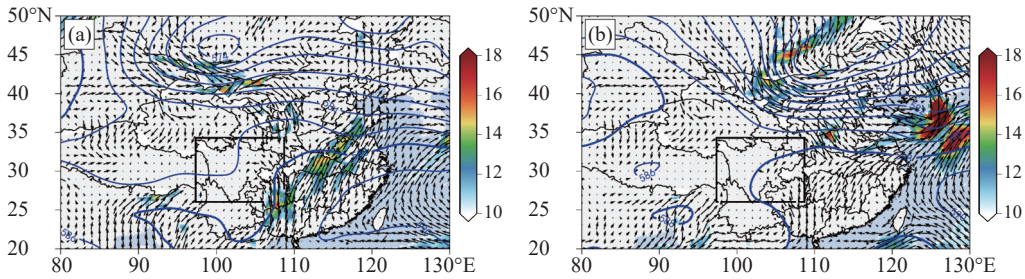


图 2 2023 年 7 月 12 日 20 时 (a) 和 13 日 20 时 (b) 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、850 hPa 风场 (矢量箭头, 单位: m·s^{-1}) 和 850 hPa 急流 (彩色阴影, 单位: m·s^{-1}) (黑色方框代表四川地区)

Fig. 2 500 hPa height field (contour, unit: dagpm), 850 hPa wind (arrows, unit: m·s^{-1}), 850 hPa jet (color shaded, unit: m·s^{-1}) at (a) 20:00 BT 12 July, (b) 20:00 BT July 13 (The black box represents the Sichuan area)

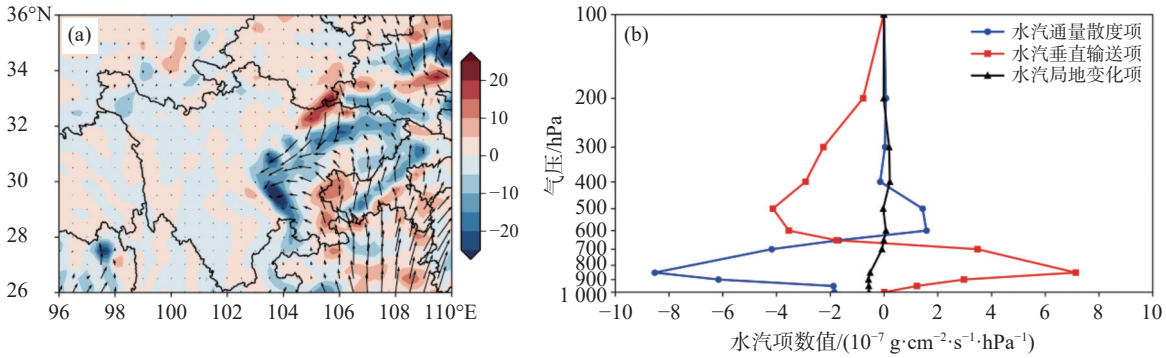


图 3 2023 年 7 月 13 日 02 时 850 hPa 的水汽通量散度 (填色, 单位: 10^{-7} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}) (a) 和 02—08 时暴雨关键区 (103°—104.5°E, 30°—31.5°N) 平均的水汽通量散度项、水汽垂直输送项和水汽局地变化项 (单位: 10^{-7} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}) 垂直廓线 (b)

Fig. 3 (a) Water vapor flux divergence at 850 hPa (shaded, unit: 10^{-7} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}) at 02:00 BT on 13 July, 2023 and (b) vertical profiles of the water vapor flux divergence term, vertical transportation term and local change of water vapor term (unit: 10^{-7} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}) in rainstorm critical area (103°-104.5°E, 30°-31.5°N) from 02:00 BT to 08:00 BT on 13 July, 2023

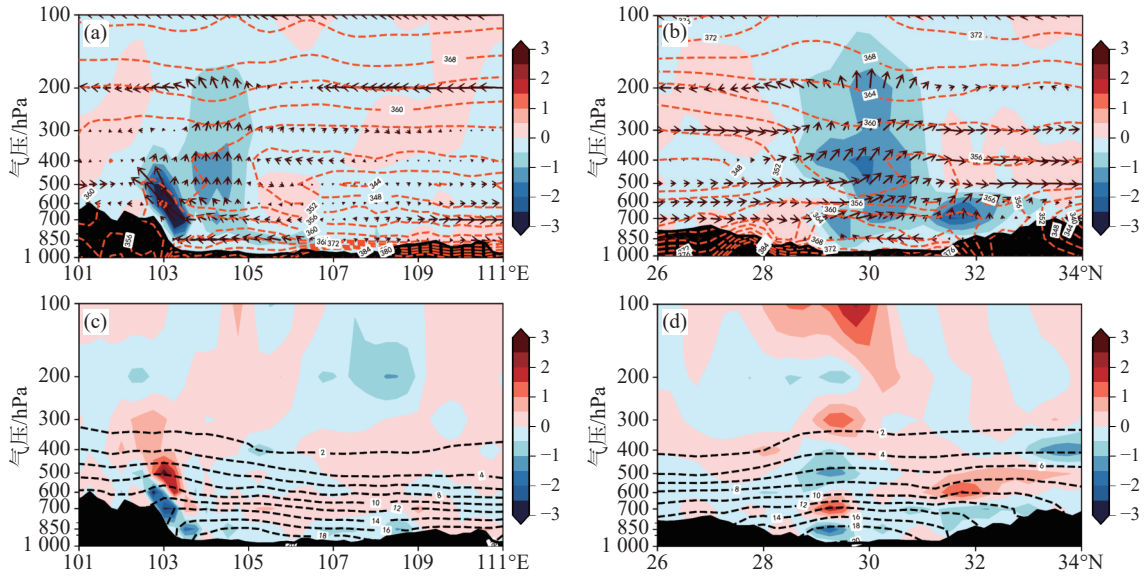


图 4 2023 年 7 月 13 日 02 时经暴雨中心沿 103.5°E 和 30.75°N 的垂直速度 (填色, 单位: Pa·s^{-1}), 假相当位温 (橙色虚线, 单位: K), u、v 与 20 倍 w 合成风场 (箭头, 单位: m·s^{-1}) 的经度-高度剖面 (a) 和纬度-高度剖面 (b), 经暴雨中心沿 103.5°E 和 30.75°N 的水平散度 (填色, 单位: 10^{-4}s^{-1}) 和比湿 (黑色虚线, 单位: g·kg^{-1}) 的经度-高度剖面 (c) 和纬度-高度剖面 (d) (黑色区域表示地形)

Fig. 4 (a) Longitude-height profile and (b) latitude-height profile of vertical velocity (shaded, unit: Pa·s^{-1}), pseudoequivalent temperature (orange dashed line, unit: K), and synthetic wind fields (arrows, unit: m·s^{-1}) of (u, 20×w) and (v, 20×w), (c) Longitude-height profile and (d) latitude-height profile of horizontal divergence (shaded, unit: 10^{-4}s^{-1}) and specific humidity (black dashed lines, unit: g·kg^{-1}) alone the center of precipitation extremes on 02:00 BT 13 July, 2023 (The black area represents terrain)

流层的强烈垂直上升运动, 该深厚的上升气流可高效地向上输送水汽和热量, 从而进一步提高降水效率。

图 4c、d 是水平散度和比湿分别沿暴雨中心经 103.5°E 和 30.75°N 的经度-高度剖面和纬度-高度剖面。在经度-高度剖面上强降水区清晰可见低层存在显著辐合中心同时伴随中高层辐散, 而纬度-高度剖面上尽管中低层存在辐合辐散的交替结构, 但低层辐合区恰好对应高比湿区, 使得降水持续发展, 同时加强低层水汽辐合的效率, 构成了对大暴雨有利的水汽、动力条件协同环境。

4 爬、绕流对暴雨过程的影响

4.1 爬、绕流的强度和分量流场空间分布

气流在遇到地形阻挡时会产生爬流和绕流运动, 根据测试, 900 hPa 等压面是本文研究区域内地形强迫气流产生爬、绕流分量最显著、最直接的层次 (张耀存和钱永甫, 1999), 能够清晰反映气流与地形相互作用的强度特征, 故本文选取 900 hPa 等压面作为代表层计算爬、绕流的矢量模 (u 和 v 的平方和) 来代表具体强度。图 5a 和图 5b 分别是暴雨过程中产生的爬流和绕流运动, 由图 5a 可见, 受四川盆地盆周复杂地形的动力强迫作用, 低空气流在盆地内广泛受阻发生显著的爬流运动。爬流运动在 29°N 以北、103°E 以东的盆地区域均较明显。在盆地北部江油一带存在强度达 12 m·s^{-1} 的极值中心, 其位置位于最大降水中心附近, 是触发局地强上升运动的关键动力源。从绕流矢量模 (图 5b) 来看, 与爬流相比, 绕流矢量模在四川盆地的空间分布形态总体相似但更紧凑集中, 最显著的特征是在盆地中部存在强度为 16 m·s^{-1} 的极大值中心。绕流通过改变水汽输送格局, 维持降水区的水汽供应。

图 5c 和图 5d 分别是暴雨发生过程中小时降水量最大时刻的爬流和绕流的矢量模分布。暴雨峰值时刻的流场特征显示, 驱动强降水的动力与水汽源于东北与东南两个方向的低空气流。来自东北方向的冷空气在逼近四川盆地内平坦和山地交界带时, 受地形梯度强迫产生爬流分量和绕流分量。其中, 爬流分量在龙门山脉等迎风坡剧烈抬升, 同时绕流分量在盆地内部地形东侧受阻, 形成局地涡旋并参与动力辐合。另一方面, 源自南方的低空急流携带水汽, 在盆地东南部地形作用下也发生爬绕流运动, 其气流最终与北来的爬绕流汇合, 川东北干冷空气与川东南暖湿急流共同作用, 通过爬流与绕流的空间配置与相互作用, 成为本次盆地边缘迎风坡大暴雨形成的关键。

4.2 爬绕流对涡度制造的影响

在近地层, 地形对风场的直接机械强迫最为强烈和直接, 分解出的爬流和绕流分量物理意义清

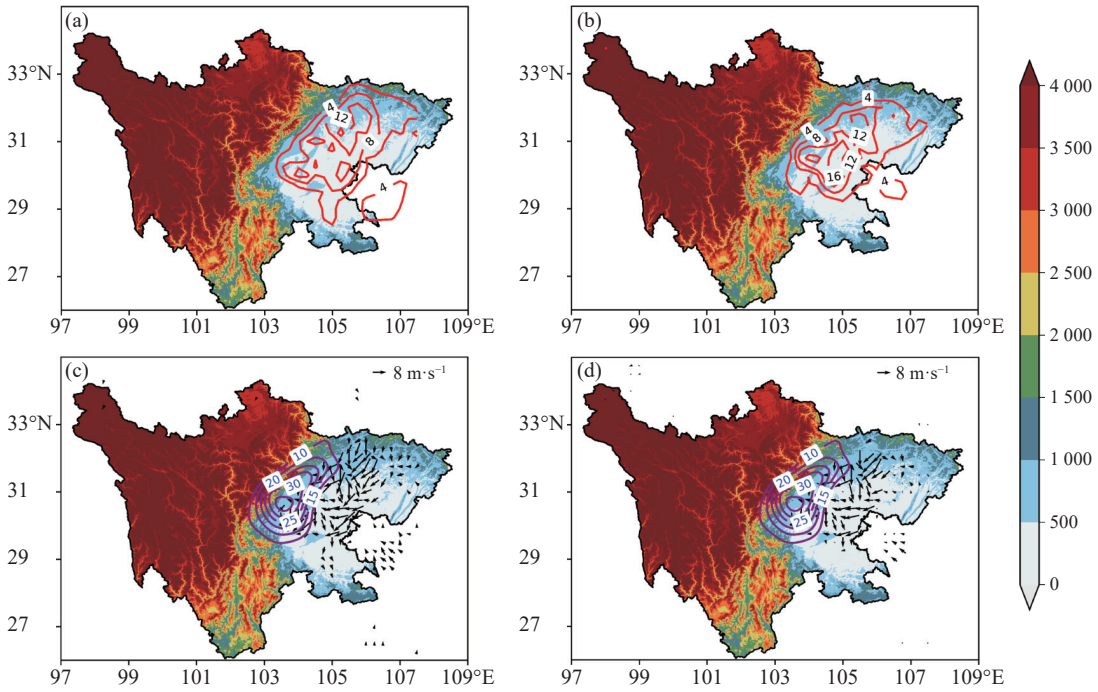


图 5 2023 年 7 月 13 日 04 时暴雨发生过程中的爬流 (a) 和绕流 (b) 的矢量模 (红色等值线, 单位: $m \cdot s^{-1}$), 爬流流场 (c) 和绕流流场 (d) (矢量箭头, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 分别叠加 1 h 降水量 (紫色等值线, 单位: mm) 和地形高度 (填色, 单位: m)

Fig. 5 Distribution of vector mode of (a) flow over and (b) flow around during the rainstorm (red contour, unit: $m \cdot s^{-1}$), the distribution of flow field of (c) flow over and (d) flow around during the rainstorm (red vector arrows, unit: $m \cdot s^{-1}$), 1-hour precipitation (purple contour, unit: mm), terrain height (shaded, unit: m)

晰。随着高度的增加, 地形对气流的直接机械阻挡作用减弱, 大尺度环流、热力强迫等因素的影响增强, 分解出的爬绕流分量所代表的“纯粹”地形强迫物理意义会变得相对模糊和复杂, 爬流分量可能更多的反映的是大尺度环流场与地形分布之间的统计关联或残留的地形影响信号 (Smith et al., 1979), 绕流分量也可能包含大量与地形无关的大尺度环流信息。因此在探究爬绕流与涡度之间的关系过程中, 本文重点分析 500 hPa 及以下层次。

图 6 给出了暴雨关键区每间隔 2 h 的涡度收支各项的垂直廓线演变特征。在暴雨发生之前的 00 时 (图 6a), 四川盆地的爬流和绕流运动整体较弱, 涡度变化尚不明显, 对涡度制造起主导作用的是爬流平流项和绕流散度项, 两者共同促进了涡度的增长; 而爬流散度项则表现为稳定的负贡献, 抑制涡度发展。到 02 时暴雨初期阶段 (图 6b), 随着爬流和绕流运动的增强, 爬流平流项的正贡献在中低层尤其是 850 hPa 达到峰值。与此同时, 绕流散度项的正贡献和爬流散度项的负贡献依然维持主导地位。暴雨最猛烈的时段 (图 6c), 受低空急流增强、充沛水汽输送及东北冷空气加强侵入的影响, 盆地低层风速急剧增大, 进而加强了爬绕流运动的强度。反映在涡度收支特征上: 爬流和绕流的扭转项正贡献均显著增大, 表明存在强烈的辐合上升和水平涡度向垂直涡度的高效转换。此时促进涡度增长的核心因子转变为爬流平流项、绕流散度项以及贡献激增的扭转项; 而抑制作用变为爬流散度项和较前两个阶段抑制作用明显增强的绕流平流项。而在暴雨后期 06 时 (图 6d), 低层 1 000—850 hPa, 爬流和绕流的平流项的抑制作用持续加大, 在低层尤为突出, 这可能与低层急流轴移动或风速脉动减弱导致涡度平流结构改变有关, 然而, 在 850 hPa 以上层次, 以扭转项和绕流散度项为主的促进因子仍持续发挥作用。

通过上述分析可以看出爬流散度项和绕流平流项在整个过程中抑制涡度发展, 而其余项都对涡度增长有促进作用。图 7 分别是暴雨关键区每间隔 2 h 和整个过程的涡度收支各项贡献占比图。对于抑制因子而言, 绕流平流项的贡献占比有逐渐增大, 最终能够接近爬流散度项的负贡献, 两者占比分别为 40.8% 和 46.8%。整个过程以爬流散度项的负贡献为主, 绕流平流项的负贡献次之, 总贡献比分别为 64.6% 和 35.4%。从促进项来看, 绕流散度项在每一个时刻均占据主导地位, 爬流平流项的正贡献占比随时间减弱, 从开始的 35.4% 到最后的 2.0%, 这与低层的爬流平流项由正转负有关, 而爬流的扭转项相反, 正贡献比逐渐增大, 在 06 时贡献接近绕流散度

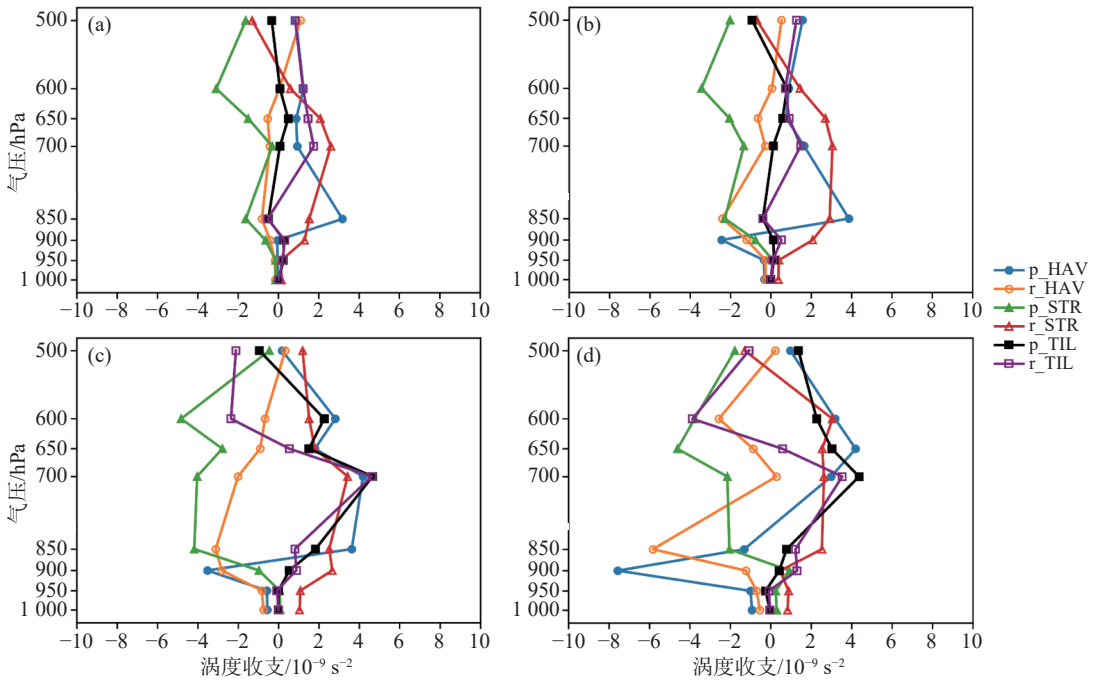


图 6 2023 年 7 月 13 日 00 时 (a), 02 时 (b), 04 时 (c) 和 06 时 (d) 暴雨关键区涡度收支各项的平均值 (单位: 10^{-9} s^{-2}) 垂直廓线 (图标中 p 和 r 分别表示爬流和绕流分量, HAV、STR 和 TIL 分别为水平散度项、涡度平流项和扭转项, 下同)

Fig. 6 Mean of the vortex budget (unit: 10^{-9} s^{-2}) in rainstorm critical area at (a) 00:00, (b) 02:00, (c) 04:00 and (d) 06:00 BT on 13 July, 2023 (p, r, HAV, STR and TIL indicate flow over fraction, flow around fraction, vortex advection term, horizontal divergence term and torsion term)

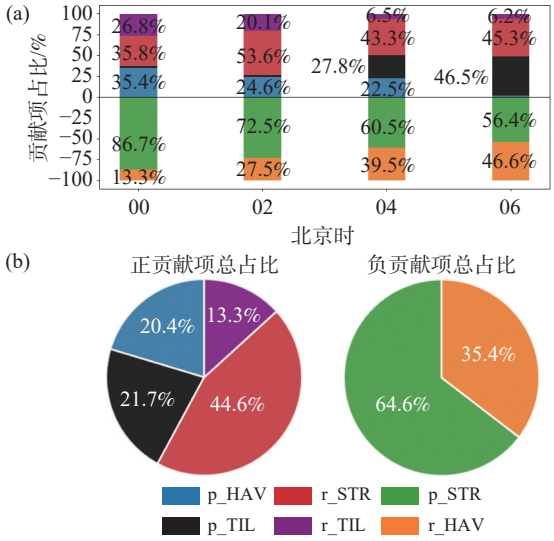


图 7 2023 年 7 月 13 日 00—06 时不同时次 (a) 和整个过程 (b) 暴雨关键区的爬绕流各项贡献占比和正、负贡献项总占比

Fig. 7 Contribution shares of flow over, flow around, positive and negative terms in rainstorm critical area from 00:00 BT to 06:00 BT on 13 July, 2023 and throughout the entire process

项。整个过程, 绕流散度项的正贡献占比达到 44.6%, 是促进涡度增长的主要因子, 而爬流扭转项次之。综上所述, 对涡度起正负贡献的主要因子分别是绕流散度项和爬流散度项, 虽然绕流散度项的贡献占比低于爬流散度项, 但促进项的数值在暴雨发展增强的过程中均高于抑制项, 正涡度得以加强。

4.3 爬、绕流对中低层水汽辐合的影响

水汽通量散度辐合是暴雨维持的必要条件。为量化地形驱动的爬流与绕流运动对水汽辐合的贡献及其垂直分布, 通过公式 (3) 分层计算了爬绕流水汽通量散度。图 8 为暴雨关键区在暴雨初发时刻 (02 时) 及集中时段 (02—08 时) 平均的垂直廓线。在暴雨的发生初期大量水汽随气流输入四川盆地, 受地形强迫分解为爬流和绕流运动。两者在 850h Pa 高度均呈现最强辐合中心 (-4×10^{-7} $g\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot hPa^{-1}$), 向上辐合强度递减 (图 8a); 爬流分量在 500 hPa 转为弱辐散, 这与水汽随高度递减的特征一致。时段平均图 8b 显示绕流辐合强度在中低层 (1 000—500 hPa) 均显著大于爬流, 表明绕流是水汽输送的主要贡献者。爬流通过垂直抬升将低层水汽输送至中高层, 而绕流则实现水汽的水平转运。

4.4 爬、绕流对水汽以及热力垂直输送的影响

图 9 分别是 7 月 13 日 02 时沿着暴雨中心的爬、绕流水汽螺旋度和爬绕流热力螺旋度的经度-高度剖面。在暴雨的发生区 (103°—104.5°E) 爬流水汽螺旋度存在显著的极值中心, 位置与强降水区高度吻合, 空间上延伸至 600 hPa (图 9a)。其与垂直上升运动紧密配合, 不断地将低层积聚的水汽向上输送。另一方面, 在迎风坡低层 (850 hPa) 存在绕流水汽螺旋度极值中心 (图 9b), 显著提升了从中低层向上输送水汽的效率。爬流与绕流水汽螺旋度共同构建的垂

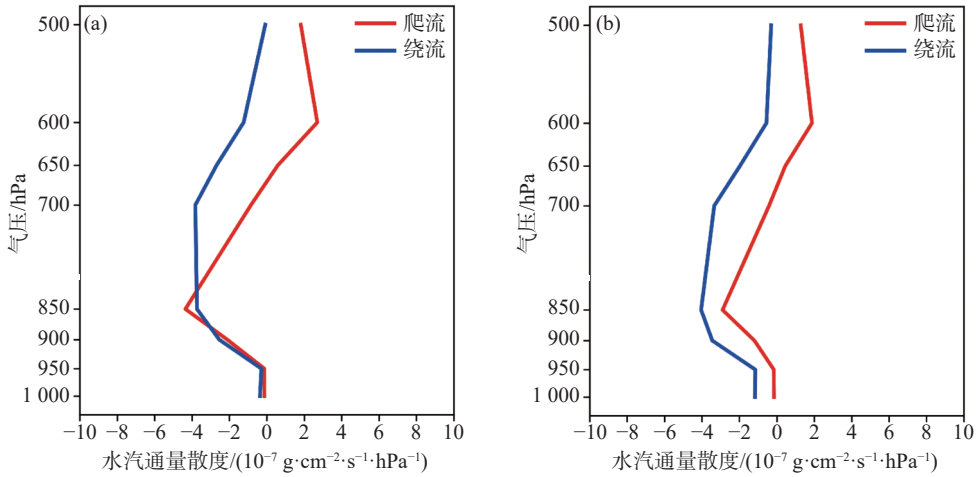


图 8 2023 年 7 月 13 日 02 时 (a) 和 02—08 时平均 (b) 暴雨关键区爬流和绕流的水汽通量散度垂直廓线

Fig. 8 Vertical profiles of flow over and flow around water vapor flux dispersion in rainstorm critical area at (a) 0200 BT and (b) average from 02:00 to 08:00 BT on 13 July, 2023

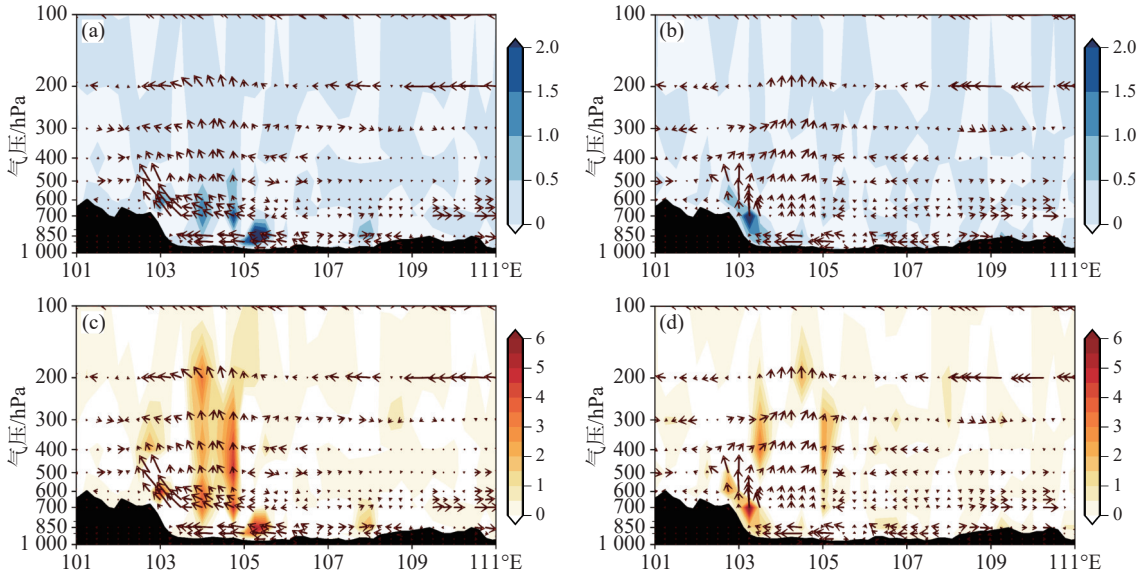


图 9 2023 年 7 月 13 日 02 时沿 37.75°N 的爬流水汽螺旋度 (a)、绕流水汽螺旋度 (b) (蓝色填色, 单位: 10^{-6} kg$^{-1}\cdot$Pa$\cdot$m$^3\cdot$s^{-1})、爬流热力螺旋度 (c) 和绕流热力螺旋度 (d) (红色填色, 单位: 10^{-2} K$\cdot$kg$^{-1}\cdot$Pa$\cdot$m$^3\cdot$s^{-2}) 以及爬流流场 (a, c)、绕流流场 (b, d) 与垂直速度的合成风场 (箭头, 单位: m$\cdot$s^{-1}) 经度-高度剖面

Fig. 9 Water vapor helicity (shaded in blue, unit: 10^{-6}kg$^{-1}\cdot$Pa$\cdot$m$^3\cdot$s^{-1}) of (a) flow over and (b) flow around and the thermal helicity (shaded in red, unit: $\times10^{-2}$K$\cdot$kg$^{-1}\cdot$Pa$\cdot$m$^3\cdot$s^{-2}) of (c) flow over and (d) flow around, Synthetic wind field for flow field of (a, c) flow over and (b, d) flow around with vertical velocity across 37.75°N on 02:00 BT 13 July, 2023

直结构, 主导低层至中层的系统性水汽垂直向上输送, 使得本次暴雨事件得以发生和持续。

在暴雨核心区, 爬流热力螺旋度同样存在双低层极值中心 (图 9c), 其轴线垂直伸展至中高层, 热力扰动结构较为深厚。热力螺旋度与强上升运动耦合, 将中低层热量向上输送。绕流热力螺旋度出现在迎风坡 850 hPa 的极值中心 (图 9d), 其空间模态与水汽螺旋度高度一致。绕流通过旋转上升机制, 高效抽吸低层高温高能空气, 把热力扰动向上层大气传送, 显著增强了对流层中层的不稳定能量。

5 结论与讨论

本文通过分解计算爬、绕流和水汽通量散度等, 对 2023 年 7 月 12—13 日四川盆地一次大范围暴雨过程进行诊断分析, 探讨了爬、绕流对涡度制造以及水汽输送、热力输送的影响, 归纳出此次暴雨过程的示意图 (图 10), 并得到如下主要结论:

(1) 在欧亚大陆为“两脊一槽”的环流形势下, 西太平洋副热带高压西侧偏南气流携带水汽进入四川盆地形成强烈的低层水汽辐合, 同时伴随着深厚上升运动及低层辐合构成了暴雨发生的有利环境。随

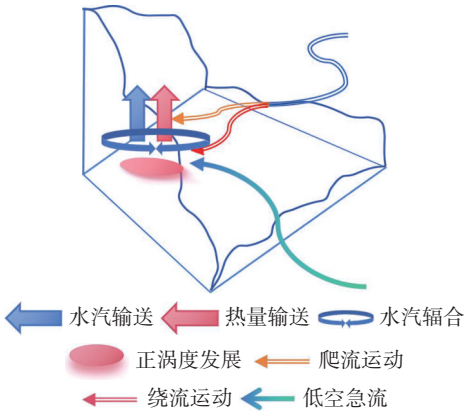


图 10 2023 年 7 月 13 日四川盆地暴雨过程中爬、绕流对其动力、热力及水汽输送的影响示意图

Fig. 10 Conceptual model diagram of the role of dynamic heat and water vapor transport under the impact of flow over and flow around on 13 July, 2023

着北方冷空气和偏南暖湿气流的不断加强，四川盆地周围的爬、绕流运动显著增大，绕流散度平流项对动力作用正贡献不断增强和爬、绕流对低层的水汽辐合以及垂直方向的水汽和热量的持续输送，是导致本次暴雨不断发展增强的主要原因。

(2) 盆地暴雨涡度演化受爬流与绕流协同调控。暴雨初期，涡度增长由爬流涡度平流项与绕流水平散度项驱动。强盛期，动热力耦合触发扭转项激增，同时绕流涡度平流项对涡度的抑制作用显著增强构成涡度增长转折点。减弱期，在爬流与绕流涡度平流项共同抑制下，正涡度趋于衰减。整个过程绕流散度项和爬流散度项分别占据促进和抑制涡度发展的主导地位。

(3) 暴雨期间爬流与绕流协同影响水汽输送过程。爬流激发强辐合抬升驱动深厚对流，在迎风坡加强垂直上升造成水汽向上输送。而绕流则主导低层水平水汽输送的汇聚和维持，并在盆地内部形成涡旋增强辐合。

(4) 爬绕流水汽和热力螺旋度中心与降水落区高度吻合。爬流通过低层垂直环流强化水汽向上泵送，提升了水汽输送效率。同时爬流热力螺旋度主导感热和潜热垂直通量输送。而绕流热力螺旋度抽吸低层高温空气，其热力扰动上传至中层显著增强位势不稳定，是本次暴雨触发和维持中的关键。

需要指出的是，本文仅基于典型个例诊断分析侧重讨论暴雨过程中爬流与绕流的动力、热力和水汽输送影响，揭示了其与涡度演变、水汽及热量垂直输送的关联，为加深爬、绕流运动对地形暴雨影响的认识提供了不同视角的探索途径，未来还需要利用更多的暴雨个例进行验证。此外，气流通过地形产生爬绕流运动的有效影响高度 (作用层次)，地形摩擦对爬绕流制造涡度贡献的影响，地形强迫产生的爬绕流与基本不受地形扰动影响的中高层环流的相互作用以及对地形强降水的相对贡献等问题都有待进一步探究。

参考文献 (References)：

陈得圆,王磊,李谢辉,等.2022.四川盆地西部一次典型连续夜雨的数值模拟[J].高原气象,41(1):216−225. Chen D Y, Wang L, Li X H, et al. 2022. Numerical simulation of a typical continuous night rain processin the western Sichuan basin [J]. Plateau Meteorology,41(1):216−225 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00109

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 Hu-nan Province in June 2017 [J]. Meteorological Monthly,45(9):1213−1226 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.09.003

邓承之,何跃,庞玥,等.2016. 2014 年一次渝东北大暴雨天气成因诊断分析[J].气象科技,44(2):290−296. Deng C Z, He Y, Pang Y, et al. 2016. Diagnostic analysis of a heavy rain over Northeastern Chongqing [J]. Meteorological Science and Technology,44(2):290−296 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2016.02.019

高守亭,周玉淑,冉令坤.2018.我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J].大气科学,42(4):833−846. Gao S T, Zhou Y S, Ran L K. 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences,42(4):833−846 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1802.17277

蒋强,魏林波,李超,等.2023.高低层多尺度系统耦合下一次祁连山降水数值模拟及诊断[J].高原气象,42(3):273−282. Jiang Q, Wei L B, Li C, et al. 2023. Numerical simulation and diagnosis of a precipitation in Qilian Mountains under the coupling of upper and lower systems [J]. Plateau Meteorology,42(3):273−282 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00096

金研,李国平.2021.爬流和绕流对山地突发性暴雨的影响[J].高原气象,40(2):314−323. Jin Y, Li G P. 2021. Impact of flow around and flow over in sudden rainstorm on mountains [J]. Plateau Meteorology,40(2):314−323 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00041

刘成瀚,王月,阎琦,等.2023.超低空急流形成的爬绕流对长白山地区一次突发性暴雨的影响[J].暴雨灾害,42(5):1298−1310. Liu C H, Wang Y, Yan Q, et al. 2023. Impact of flow over and flow around caused by super low-level jet on a sudden rainstorm over the Changbai Mountains [J]. Torrential rain and disasters,42(5):1298−1310 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−035

李国平.2021.青藏高原动力气象学 (第三版)[M].北京:气象出版社:113-116. Li G P. 2021. Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing:Meteorological Press:113-116 (in Chinese)

李国平.2025.四川盆地周边山地夜间暴雨的特征与机理研究新进展[J].沙漠与绿洲气象,19(3):1−9. Li G P. 2025. Advances in understanding the mechanisms and features of night rainstorms in the mountainous regions of the Sichuan Basin [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(3):1−9 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2409.23002

陆汉城,杨国祥.2015.中尺度天气原理和预报[M].北京:气象出版社. Lu H C,Yang G X. 2015. Principles and Forecasting of Mesoscale Weather [M]. Beijing:Meteorological Press

李毅,李国平.2023.四川盆地东北部山地夜间暴雨特征的合成分析[J].高原山地气象研究,43(3):21−31. Li Y, Li G P. 2023. Composite analysis of nocturnal rainstorm characteristics in Northeastern Sichuan Basin [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(3):21−31 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.03.003

毛紫怡,李国平,许霖.2021.湖南一次持续性暴雨过程中的水汽输送与收支特征[J].暴雨灾害,40(5):513−522. Mao Z Y, Li G P, Xu L. 2021. Analysis on transport and budget characteristics of water vapor in a sustained heavy rain event in Hunan Province [J]. Torrential rain and disasters,40(5):513−522 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.05.008

陶诗言.1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社:1-14. Tao S Y. 1980. Rainstorm in China [M]. Beijing:Science Press:1-14 (in Chinese)

王丛梅,俞小鼎,李芷霞.2017.太行山地形影响下的极端短时强降水分析[J].气象,43(4):425−433. Wang C M, Yu X D, Li Z X. 2017. Investigation of extreme Flash-Rain events on the impact of Taihang Mountain [J]. Meteorological Monthly,43(4):425−433 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.04.004

谢越,冉令坤,沈新勇,等.2024.一次天山南脉暴雨过程的位势稳定度变化及地形敏感性研究[J].大气科学,48(5):1817−1836. Xie Y, Ran L K, Shen X Y, et al. 2024. Potential stability features and topographic sensitivity simulation for a rainstorm process over the southern slope of the Tianshan Mountains, China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(5):1817−1836 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2008.06.10

杨颖璨,李跃清,陈永仁.2018.高原低涡东移加深过程的结构分析[J].高原气象,37(3):702−720. Yang Y C, Li Y Q, Chen Y R. 2018. The characteristic analysis of an eastwards plateau vortex by its strengthening process [J]. Plateau Meteorology,37(3):702−720 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2017.00054

朱乾根.2007.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社. Zhu Q G. 2007. Principles and Methods of Weather Analysis [M]. Beijing:Meteorological Press (in Chinese)

张耀存,钱永甫.1999.青藏高原隆升作用于大气临界高度的数值研究[J].气象学报,57(2):157−167. Zhang Y C, Qian Y F. 1999. Numerical studies on the effects of the critical height of Qinghai-Xizang Plateau uplift on the atmosphere [J]. Acta Meteorological Sinica,57(2):157−167 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb1999.014

郑永光,陈炯,朱佩君.2008.中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J].科学通报,53(4):471−481. Zheng Y G, Chen J, Zhu P J. 2008. Distribution and diurnal variation characteristics of mesoscale convective systems over China and its surrounding regions in summer [J]. Chinese Science Bulletin,53(4):471−481 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0023−074X.2008.04.015

周盈颖,李强,赵衍斌,等.2025.大巴山南麓地形影响下两次暴雨过程对比分析[J].暴雨灾害,44(4):515−525. Zhou Y Y, Li Q, Zhao Y B, et al. 2025. Comparative analysis of two rainstorm events under the influence of topography at the southern foot of Daba Mountain [J]. Torrential rain and disasters,44(4):515−525 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−019

Houze R A. 2012. Orographic effects on precipitating clouds [J]. Reviews of Geophysics,50(1):1−47. doi:10.1029/2011RG000365

Huang Y, Chubb T, Sarmadi F, et al. 2018. Evaluation of wintertime precipitation forecasts over the Australian snowy mountains [J]. Atmosphere Research,207(20):42−61. doi:10.1016/j.atmosres.2018.02.017

Smith R B. 1979. The influence of mountains on the atmosphere [J]. Advances in Geophysics,21(1):87−230. doi:10.1016/S0065−2687(08)60262−9

Sarmadi F, Huang Y, Siems S T, et al. 2017. Characteristics of wintertime daily precipitation over the Australian snowy mountains [J]. Journal of Hydrometeorology,18(10):2849−2867. doi:10.1175/JHM−D−17−0072.1

Wu A N, Li G P. 2023. Roles of the Topographically-Affected boundary layer Low-Level jet in the moisture transport process of nocturnal rainstorms in mountainous areas around the Western Sichuan basin [J]. Atmosphere,14(1):84. doi:10.3390/atmos14010084

Wang Q, Xue M, Tan Z. 2016. Convective initiation by topographically induced convergence forcing over the Dabie Mountains on 24 June 2010 [J]. Advances in Atmospheric Sciences,33(10):1120−1136. doi:10.1007/s00376−016−6024−z

Xu Y Z, Li G P, Zhang X Y, et al. 2025. Formation mechanism of overshooting convection in the southwest vortex circulation under the influence of mesoscale gravity wave [J]. Dynamics of Atmosphere and Oceans,110:101559. doi:10.1016/j.dynatmoce.2025.101559

(责任编辑　唐国瑛)