

潘劲松, 周玲丽, 陆玮, 等. 2019. 两个相似路径台风残余造成局地特大暴雨的成因机制和能量收支对比分析 [J]. 大气科学, 43(6): 1399–1412.
PAN Jinsong, ZHOU Lingli, LU Wei, et al. 2019. Comparative Analyses of Mechanisms and Energy Budgets of Local Extreme Rainfall Events Caused by Remnant Clouds of Two Typhoons with Similar Tracks [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1399–1412. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18239

两个相似路径台风残余造成局地特大暴雨的成因机制和能量收支对比分析

潘劲松¹ 周玲丽¹ 陆玮¹ 罗玲¹ 翟国庆²

1 浙江省气象台, 杭州 310017

2 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

摘要 本文利用ERA-Interim $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 再分析资料、自动站小时和分钟加密资料、风云2G (FY-2G) 卫星红外云图及多普勒雷达和风廓线雷达资料对2015年路径高度相似的“苏迪罗”和“杜鹃”台风在浙江沿海引发的局地特大暴雨进行对比分析。这两次降水过程都是在台风减弱为热带低压甚至残压并深入内陆远离浙江沿海后发生的。结果表明, “苏迪罗”降水过程是由低层强东南和偏南急流长时间辐合加上有利地形共同作用导致的; 经向环流背景下来自季风持续的水汽输送有利于“苏迪罗”维持较长的生命史和稳定的降水。“杜鹃”残压特大暴雨的触发系统则是高纬地面冷高压底部的东东北出流南下与“杜鹃”北象限的东东南风交汇形成的中尺度倒槽; 纬向环流和强盛副热带高压造成的弱引导气流及夏季风南撤和低涡卷挟造成的水汽通道断裂是“杜鹃”登陆后快速减弱为残压和降水维持时间较短的原因。两次台风降水过程中均无外部动能输送和来自有效位能的动能转换。动能收支的主要影响因子为中低层局地次网格运动间的能量转换、旋转风和散度风效应及下垫面的摩擦耗散。所以, 虽然“杜鹃”的对流有效位能很小, 但仍可造成强对流和特大暴雨。此外, 降水过程中释放的凝结潜热造成的局地非绝热加热使气柱中显热能大量累积, 促使地面中小尺度涡旋和倒槽不断加深, 造成降水的增幅。

关键词 台风 局地特大暴雨 辐散动能 旋转动能

文章编号 1006-9895(2019)06-1399-14

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18239

Comparative Analyses of Mechanisms and Energy Budgets of Local Extreme Rainfall Events Caused by Remnant Clouds of Two Typhoons with Similar Tracks

PAN Jinsong¹, ZHOU Lingli¹, LU Wei¹, LUO Ling¹, and ZHAI Guoqing²

1 Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017

2 Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract Using $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ERA-Interim analysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, hourly and minutely observational data from Automatic Weather Stations (AWS), Doppler radar and wind

收稿日期 2018-10-17; 网络预出版日期 2019-03-12

作者简介 潘劲松, 男, 1968年出生, 高级工程师, 主要从事天气预报和台风有关研究。E-mail: js_p@sina.com

通讯作者 周玲丽, E-mail: zhoulingshi_lisa@outlook.com

资助项目 国家自然科学基金项目41575042, 中国气象局关键技术发展专项YBGJXM(2018)1B-06, 浙江省科技重大项目2017C03035

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41575042), Special Program for Key Technology development of China Meteorological Administration (Grant YBGJXM (2018) 1B-06), Major Science and Technology projects of Zhejiang Province (Grant 2017C03035)

profile radar, as well as infrared cloud images from the Fengyun 2G Satellite (FY-2G), we investigated two local torrential rain events in coastal Zhejiang Province caused by two typhoons with similar tracks, Soudelor and Dujuan, 2015. Both rain events were generated after the typhoons had weakened to tropical depression or remnants and travelled far from Zhejiang. It was found that the rain event associated with Soudelor was triggered by long-duration convergence of a strong low-level southeast jet and a south jet as well as topography. Meridional circulation with persistent water vapor transfer by summer monsoon provided a favorable background for the long-lasting life cycle of Soudelor and its precipitation. In contrast, the rain brought about by remnants of Dujuan was produced by a mesoscale inverted trough, comprised of the east-northeast boundary layer flow out of the cold high in the high latitudes and the east-southeast wind in the north quadrant of Dujuan. Zonal circulation, weak steering currents under a powerful western pacific subtropical high, water vapor transport cut off by monsoonal retreat, and vortex entrainment were reasons for the rapid decay of Dujuan and reduced duration of rain compared with Soudelor. There was no external transfer or convective available potential energy (CAPE) conversion to kinetic energy for both rain events. Rotational divergent wind effects and energy transfer between resolvable and unresolvable scale motions, as well as frictional processes in the lower and middle levels, were main-impact factors in the kinetic energy budgets of these two rain events. As a result, convective forcing and heavy rain occurred despite the small CAPE of Dujuan. Diabatic heating associated with condensational latent heat released by local precipitation massively increased the sensible heat energy in the air column, and consequently, potentially promoted meso- and micro-scale vortices and an inverted trough. As a result, the rain events were intensified and sustained.

Keywords Typhoon, Local extreme rain, Divergent kinetic energy, Rotational kinetic energy

1 引言

浙江省是我国受台风影响最严重的省份之一。据统计, 1949年至2016年期间共有286个台风给浙江省带来暴雨和大风的影响, 其中在福建沿海登陆的台风有95个, 超过影响浙江台风总数的33%。这类在福建登陆同时对浙江造成较大影响的台风大多都是在闽中北部登陆后向西北行, 但是造成的影响往往是浙江大于福建(张建海等, 2010)。在实际业务中, 常常通过比对相似路径历史台风的移动、强度和风雨影响来进行预报。然而, 影响热带气旋降水的主要物理因子有水汽、上升运动、位势不稳定、对流层上层辐散和中小尺度系统作用, 这些因子的产生、维持和强弱又与外部环境流场密切联系(陈联寿和丁一汇, 1979; 程正泉等, 2007)。因此, 即使是相似台风的风雨强度和分布也常常会有显著的差异, 使预报产生较大的偏差。例如1105号Meari和1109号Muifa热带气旋, 由于影响辽东半岛时两者处于不同变性阶段, 且辽东半岛位于台风不同的对流发展区域, 从而导致降水强度出现差异(梁军等, 2015)。还有0814号台风“黑格比”和9615号台风“莎莉”、0513号台风“泰利”和0608号台风“桑美”降水出现较大差异的原因都是前者有冷空

气侵入台风外围, 而后者无冷空气活动(陈丽芳, 2008; 黄灌等, 2010)。冷空气的侵入往往能够为台风环流中局地强对流的发展提供动力和不稳定能量(周玲丽等, 2011), 造成相似路径台风局地降水的差异。1409号“威马逊”和1415号“海鸥”在云南暴雨分布差异的产生则主要是环境场气流的作用, 造成锋生以及能量变化的差异, 以及地形的作用(梁红丽和程正泉, 2017)。端义宏等(2005)的研究表明下垫面(如海洋、地形)的作用在一个成熟台风趋向登陆或近海北上时尤为重要, 台风与下垫面之间的摩擦会引发大尺度环流的调整变化, “地形效应”对局地台风降水增幅作用在台风总体降水巾占比达50%左右(Pan et al., 2018)。但周玲丽等(2009)的研究发现, 对于边界层内不同气流造成的中尺度辐合带降水过程, 地形的作用仅可阻挡降水的延伸, 对降水的增幅作用较小。台湾岛地形对台风形成半圆形非对称对流分布起积极作用, 还会使台风移动速度减慢、强度减弱(胡姝等, 2013)。当台风先后两次登陆后, 强度一般会迅速减小, 降水也会随之减弱。但是研究发现(段丽和陈联寿, 2005; 韩桂荣等, 2007; 李英等, 2008), 当台风环流减弱为热带低压甚至残压云系后, 仍然有可能会产生局地的暴雨和大暴雨。例如0009号台风减弱为

热带低压后在12小时内给上海徐家汇地区带来264 mm的强降水(齐琳琳和赵思雄, 2004; 杜小玲等, 2007); 2006年碧利斯台风登陆后迅速减弱为热带低压却仍然在我国西南大部地区造成超过500 mm的强降水(Gao et al., 2009); 0801台风Neoguri在内陆减弱为热带低压后反而产生比登陆前更强的降水(张晓惠等, 2009); 2010年莫兰蒂台风的残余云系在浙江北部地区引发局地大暴雨, 3小时雨量高达219 mm(Zhou et al., 2013)。这类台风减弱后所产生的局地暴雨的预报难度较大, 往往会出现漏报的情况, 造成严重的城市内涝和经济损失。

2015年13号“苏迪罗”和21号“杜鹃”台风路径高度相似并都在浙江沿海引发了局地特大暴雨。这两次降水过程都是在台风减弱为热带低压甚至残压并深入内陆远离浙江沿海后发生的, 但降水的时空分布有显著差异。本文将利用ERA-Interim $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 再分析资料、自动站小时和分钟加密资料、风云2G(FY-2G)卫星红外云图及多普勒雷达和风廓线雷达资料对这两次台风降水过程的天气尺度背景和中小尺度系统结构特征进行深入的对比分析, 还将针对局地强降水的动能和热能收支进行定量化的诊断研究, 揭示局地强降水形成的物理机制和导致降水差异的原因, 为今后类似台风降水的预报提供参考。

2 过程概况

2015年13号台风“苏迪罗”和21号台风“杜鹃”都是在西北太平洋洋面上生成的, 随后向西偏北方向移动, 最强达到超强台风等级, 均先后于台湾北部和福建中部沿海登陆, 路径高度重合(图1a)。从距台湾以东200 km洋面处开始到登陆福建前, 两个台风的中心气压强度和演变趋势基本是一致的; 登陆福建后约8个小时, “杜鹃”迅速减弱为热带低压, 后在江西北部填塞; “苏迪罗”登陆福建后29个小时才在江西北部减弱为热带低压, 最后在安徽南部填塞(图1b)。

“苏迪罗”过程累积降水主要出现在浙南和浙中沿海地区, 呈“南强北弱”分布; 浙中沿海超过80%的降水产生于“苏迪罗”从福建中部移至江西北部期间[8月9日06:00至10日08:00(北京时, 下同)], 强度为热带风暴后继续减弱为热带低压(图1a和图2a), 降水强度稳定($30\sim40 \text{ mm h}^{-1}$)且持续时间长, 单站最大雨量为台州外金村497 mm(图2b)。“杜鹃”过程总雨量分布形态和“苏迪罗”相似, 但相反地呈“北强南弱”; 浙北沿海超过95%的降水是在“杜鹃”残压环流位于江西境内期间(29日18:00至30日08:00)产生的(图1a和2b), 降水持续时间短但短时雨量大, 最大雨强 $60\sim80 \text{ mm h}^{-1}$, 单站最大降水为宁波岭口408 mm(图2d)。

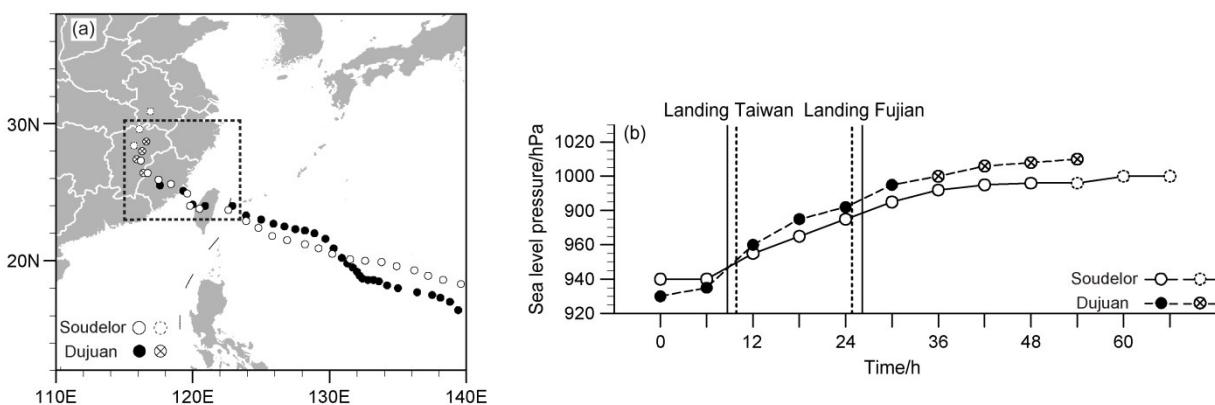


图1 2015年“苏迪罗”和“杜鹃”台风(a)路径和(b)强度的对比。(a)中的虚线方框代表“苏迪罗”和“杜鹃”影响浙江期间台风的位置;(b)中从台湾以东200 km处开始的台风中心气压时间序列, 图中虚线圆和叉圆分别代表“苏迪罗”和“杜鹃”减弱为热带低压以后的位置

Fig. 1 (a) Tracks and (b) intensity of typhoons Soudelor and Dujuan. The dashed line square in (a) represents the time period when Soudelor and Dujuan was affecting Zhejiang Province. (b) Time evolution of the central sea level pressure of Soudelor and Dujuan from 200 km east to Taiwan; the dashed line circles and the cross circles stand for Soudelor and Dujuan, respectively, when they had weakened to tropical depressions

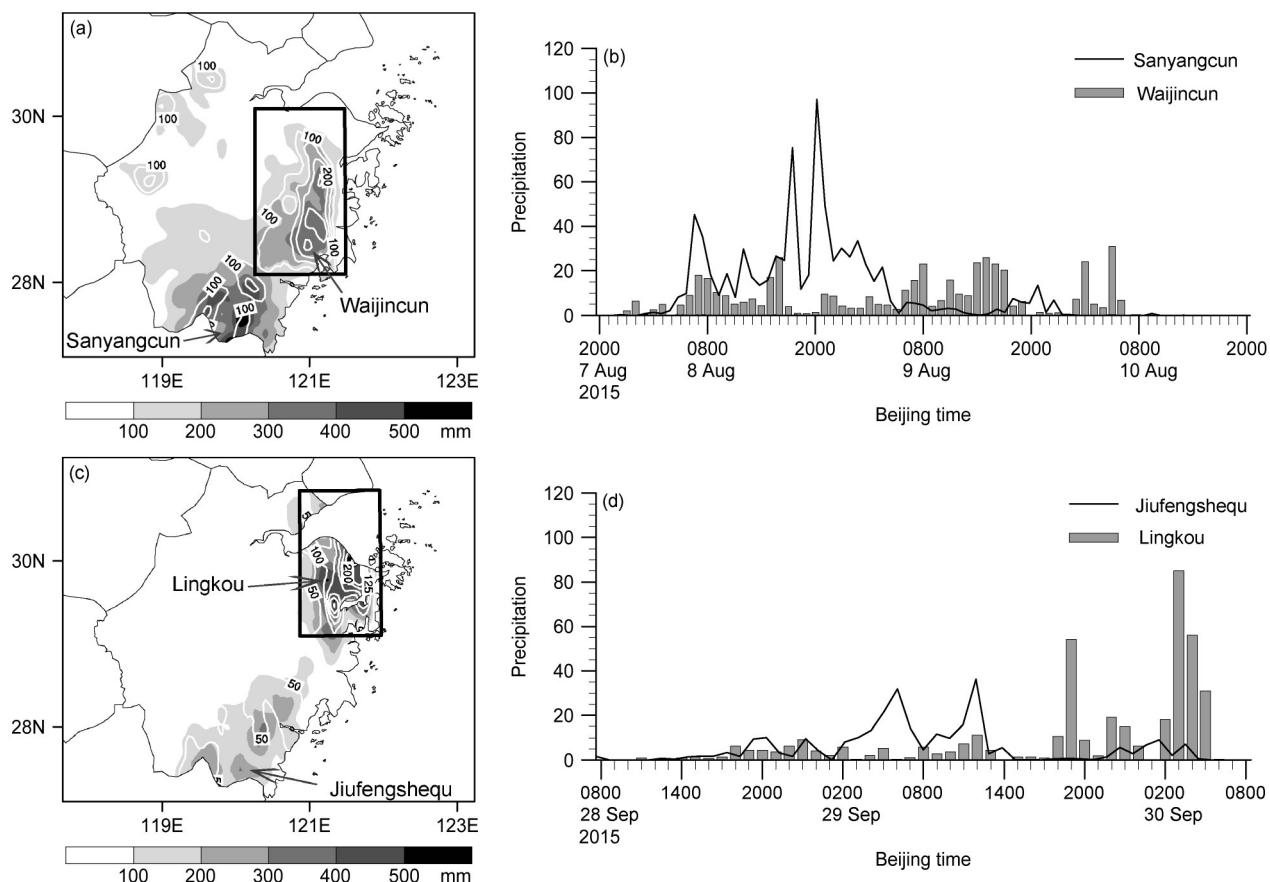


图2 2015年8月7日20:00至10日14:00(北京时,下同)浙江省受台风“苏迪罗”影响过程中的(a)累积降水量(阴影)和(b)单站逐小时降水量,白色等值线为2015年8月9日06:00至10日08:00的局地特大暴雨过程雨量(≥ 100 mm)。2015年9月28日08:00至30日14:00浙江省受台风“杜鹃”影响过程中的(c)累积降水量(阴影)和(d)单站逐小时降水量,白色等值线为2015年9月29日18:00至30日08:00的局地特大暴雨过程雨量(≥ 50 mm)。(a、c)中黑色箭头标注的为南北雨区中单站最大降水所在位置,即(b、d)中的站点;黑色方框代表图8和图9能量的积分区域

Fig. 2 (a) Accumulative rainfall (gray shades; units: mm) and (b) hourly single-station rainfall (units: mm) from 2000 BT (Beijing time), August 7 to 1400 BT, August 10, 2015 during the affecting period of typhoon Soudelor, white contour lines stand for the total precipitation (≥ 100 mm) of local extraordinary rain from 0600 BT, August 9 to 0800 BT August 10, 2015. (c) Accumulative rainfall (gray shades; units: mm) and (b) hourly single-station rainfall (units: mm) from 0800 BT, September 28 to 1400 BT, September 30, 2015 during the affecting period of typhoon Dujuan, white contour lines stand for the total precipitation (≥ 50 mm) of local extraordinary rain from 1800 BT, September 29 to 0800 BT September 30, 2015. The black arrows in (a, c) stand for the location of the stations in (b, d); the black rectangles give the computational areas in Fig. 8 and Fig. 9

3 环流背景

“苏迪罗”环流背景具有经向特征,中高纬为“两脊一槽”型,但西风槽的位置偏高;副热带高压(以下简称副高)断裂成多块,主体在海上;“杜鹃”环流背景为纬向型,35°N以北为较为平浅的“两槽一脊”配置,35°N以南大部受稳定强大的带状副高控制。登陆福建前,两个台风在副高边缘引导气流的作用下均向西北偏西方向移动。登陆福建后,西风槽东移南压,副高东撤,“苏迪罗”受南风气流引导转为西北偏北方向快速移动;“杜

鹃”进入副高控制区内引导气流较弱,在闽赣境内缓慢移动减弱消亡(图略)。

FY-2G卫星云图显示,“苏迪罗”台风环流尺度明显大于“杜鹃”,云系覆盖整个浙闽地区,西南季风云系强盛与台风环流联系(图3a)。虽然“莫拉菲”(14号热带风暴,于2015年8月7日20:00编报)卷走了西太平洋上的东路水汽,但来自南半球跨赤道转向的西风急流一直持续提供西路水汽输送,水汽通道南北宽度超过2500 km,急流中心风速超过 20 m s^{-1} ,水汽通量中心高达 $30 \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (图3c)。“杜鹃”台风环流尺度较

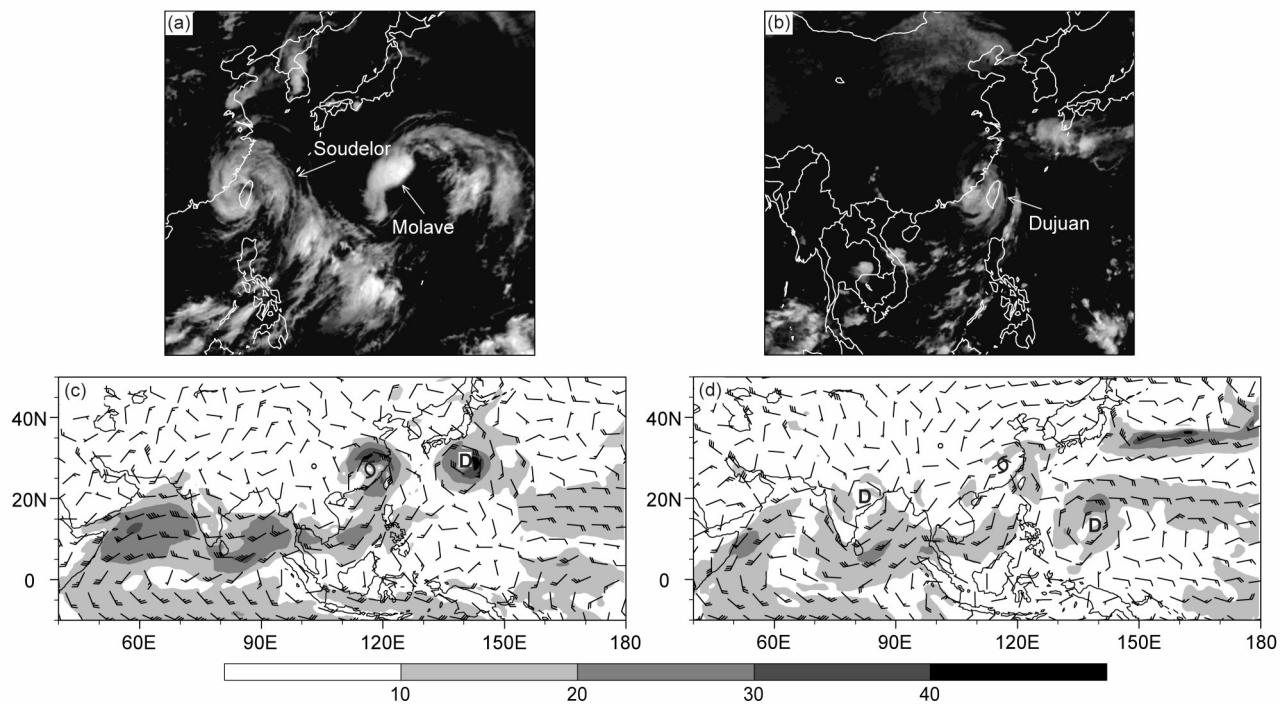


图3 2015年(a、c)“苏迪罗”和(b、d)“杜鹃”台风的(a、b)风云2G(FY-2G)卫星红外云图与(c、d)925 hPa水汽通量(灰色阴影区, 单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$)和风场(风羽一杠代表 4 m s^{-1})分布: (a) 8月8日14:00; (b) 9月29日08:00; (c) 8月9日20:00; (d) 9月30日02:00

Fig. 3 (a, b) Fengyun 2G satellite (FY-2G) infrared cloud images and (c, d) 925 hPa moisture fluxes (units: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) and wind barbs (full ticks in wind barb represent 4 m s^{-1}) during the affecting periods of (a, c) typhoon Soudelor and (b, d) typhoon Dujuan: (a) 1400 BT 8 August, 2015; (b) 0800 BT 29 September, 2015; (c) 2000 BT 9 August, 2015; (d) 0200 BT 30 September, 2015

小, 本体云系仅覆盖浙中南和福建地区, 南部季风云系较弱(图3b), 西太平洋和中南半岛附近又各有低涡生成将东西两路水汽卷挟, 导致“杜鹃”失去水汽输送, 登陆福建后很快减弱为残压(图3d)。

4 局地强降水的中尺度分析

浙江沿海多山脉, 海拔高度在600~1000 m左右, 呈东北—西南向与海岸线近似平行, 山脉东侧有许多小喇叭口和狭管地形; 海岸线复杂曲折, 有多个港口和海湾(图4)。在这样的地形条件下, 9日15:29“苏迪罗”外围东南急流进入沿海山区, 在地形的触发下形成若干个沿着气流方向排列的中小尺度涡旋结构, 对应出现两条中尺度强回波带; 同时沿海海面上的东南急流迅速加强至 24 m s^{-1} , 急流中心正好位于($28.3^{\circ}\text{N}, 121.3^{\circ}\text{E}$)的乐清湾入口处, 在湾内造成空气质点的堆积辐合, 发展出新的回波团(图4a)。17:37随着台风北抬, 回波合

并加强成近似南—北向延伸的回波带并先后重复影响浙中沿海, 带来持续稳定的降水(图4b)。21:53“苏迪罗”进一步西进, 沿海海面上的东南气流迅速减弱, 移入平原地带的回波带随之减弱消散(图4c)。10日05:51“苏迪罗”转向北上, 南部沿海海面转为西南风, 中部沿海海面仍为东南急流, 两支气流辐合于同一处发展出第二支强回波带(图4d)。在随后的4至5个小时中, 沿海海面自南向北依次转南风, 使回波带再度顺时针转向为南—北走向并沿海岸线北移, 再次给浙中沿海带来连续性降水(图4e和f)。两个阶段降水共维持了近20个小时, 重复落区降水造成特大暴雨。

“杜鹃”在浙北沿海形成的南—北向中尺度回波带主要位于海岸线边缘狭长的平原地带, 而非山区。姜勇强等(2003)和孙建华等(2006)的研究指出, 在台风倒槽内的中尺度对流系统的发展是造成台风局地特大暴雨的重要因素。赵宇等(2008)认为, 台风倒槽的增强和中尺度低涡的形成是低空急流及其动力作用的结果。29日22:43(图5a),

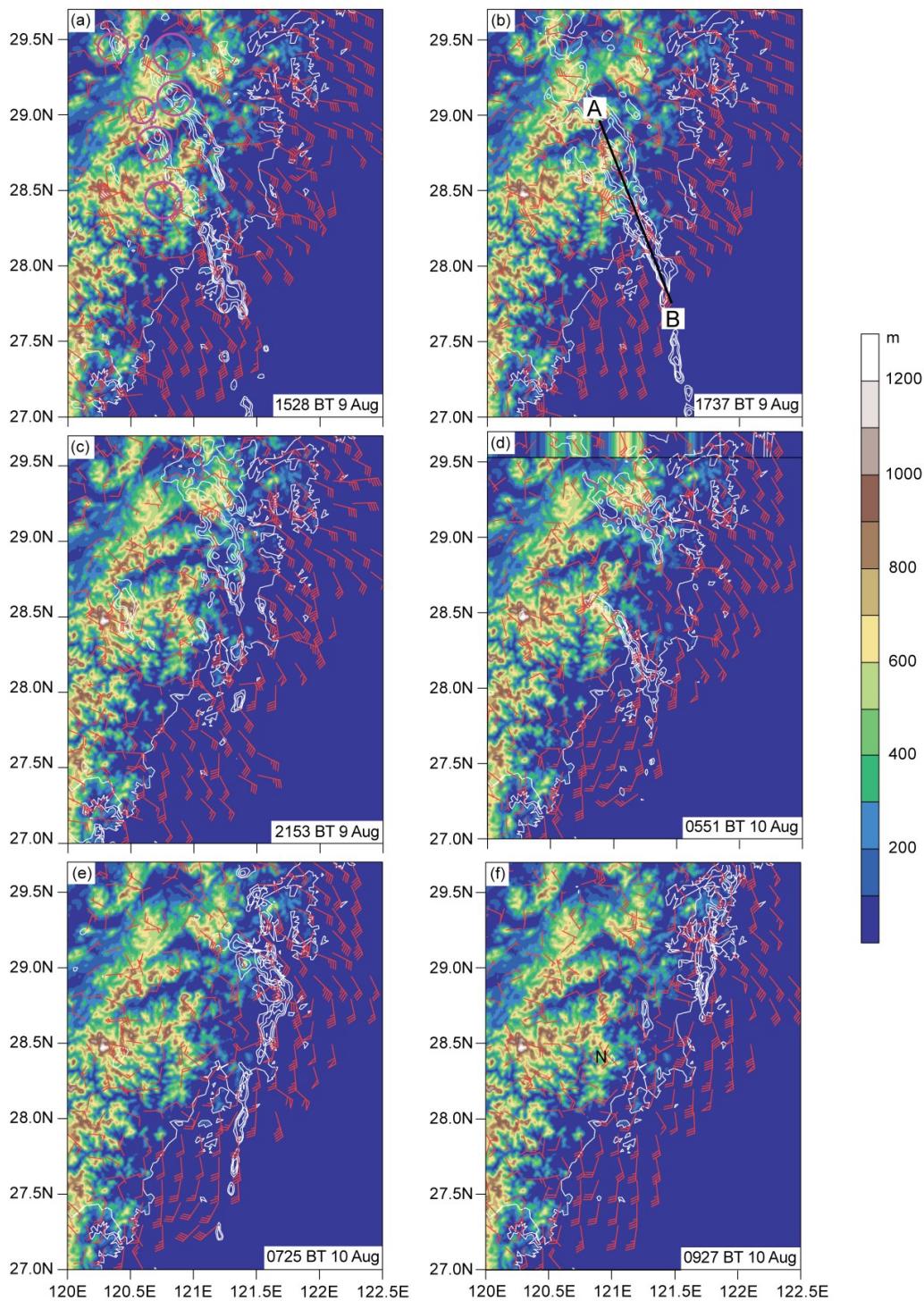


图4 2015年8月“苏迪罗”影响期间温州雷达0.5°仰角雷达反射率因子（白色等值线，大于30 dBZ），同时刻浙江省自动站分钟极大风客观插值场（红色风向杆，一杠代表 4 m s^{-1} ）与1 km分辨率地形高度（填色，单位：m）分布：(a) 9日15:29；(b) 9日17:37；(c) 9日21:53；(d) 10日05:51；(e) 10日07:25；(f) 10日09:27。(a) 中紫红色圆圈表示地面涡旋的位置，(b) 中黑色直线AB代表图7b雷达剖面的位置

Fig. 4 Doppler radar reflectivity (white contours; $>30 \text{ dBZ}$) at 0.5° elevation at Wenzhou station and the objective interpolation field of minutely extreme wind (red wind barb, full ticks in wind barb represent 4 m s^{-1}) from AWS (Automatic Weather Station), and 1-km resolution terrain height (shaded, units: m) during the affecting period of typhoon Soudelor: (a) 1529 BT 9 August, 2015; (b) 1737 BT 9 August, 2015; (c) 2153 BT 9 August, 2015; (d) 0551 BT 10 August, 2015; (e) 0725 BT 10 August, 2015; (f) 0917 BT 10 August, 2015. The purple circles in (a) give surface vortices, and the black line AB in (b) denotes the cross line for Fig.7b

29.5°~30.2°N之间浙江沿海地区盛行的是暖湿的东南风, 30.2°N以北的杭州湾附近为自中高纬地面冷性反气旋流出的偏冷东东北风(图略), 风速均在 20 m s^{-1} 左右, 构成一支东北—西南向的地面中尺度倒槽, 并在两侧附近发展出多个中尺度强对流云团, 强度在45 dBZ左右。30日00:07~00:56(图5b和c), 沿海海面南风分量的加强促使倒槽发

展加深, 对流云团得到加强也结合成完整的回波带, 同时海岸线附近辐合新生回波的加入使回波带还在不断地向南北两端延伸生长。05:55(图5d)“杜鹃”进一步填塞, 倒槽消失, 回波带消散减弱。在倒槽和回波带发展最强时刻, 回波的南北纵向尺度长达300 km, 自南向北移经浙北沿海, 5个小时内给该区域带来的雨量超过250 mm。

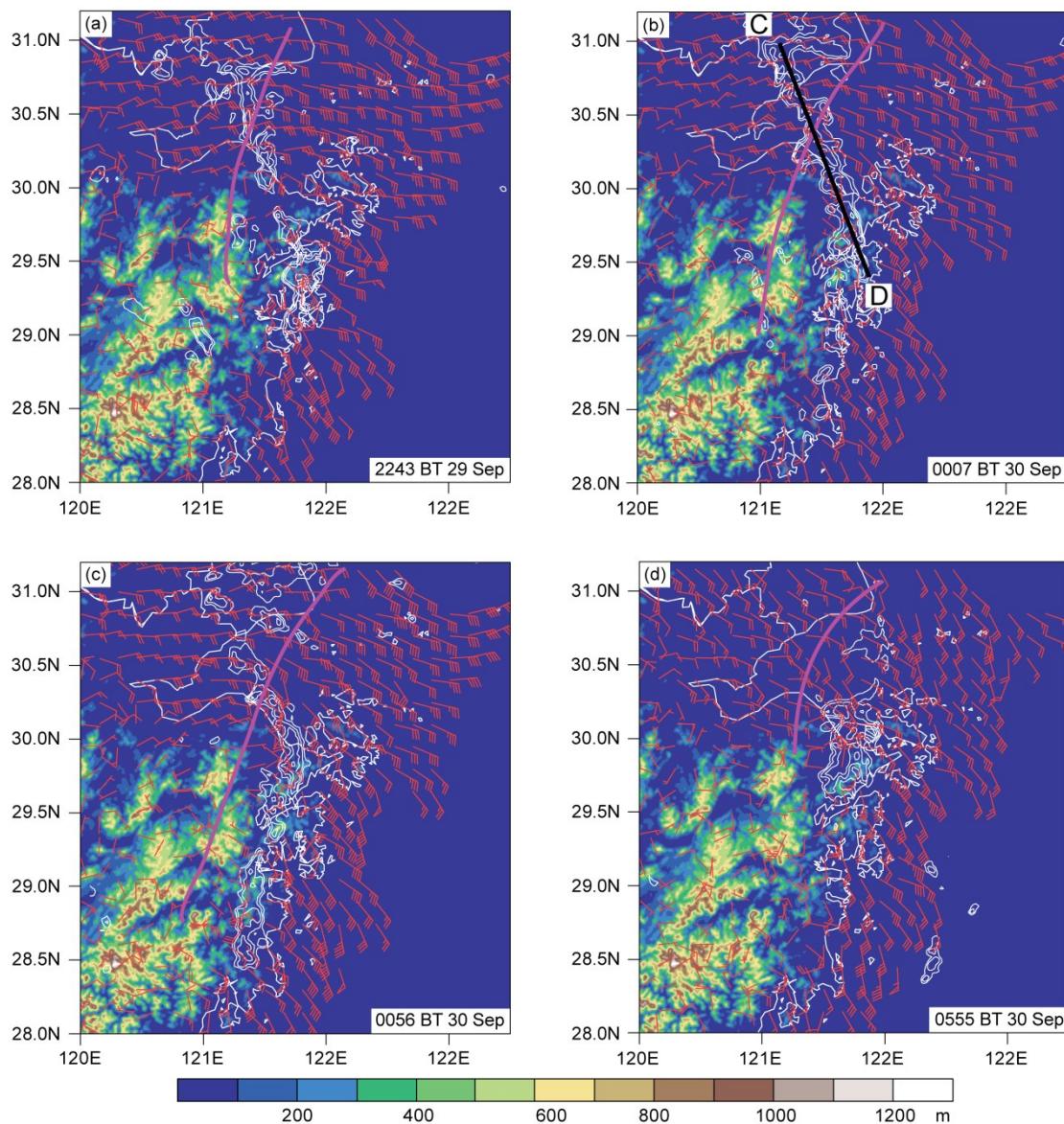


图5 2015年9月“杜鹃”影响期间宁波雷达0.5°仰角雷达反射率因子(白色等值线, 大于30 dBZ), 同时刻浙江省自动站分钟极大风客观插值场(红色风向杆; 单位: m s^{-1})与1 km分辨率地形高度(填色, 单位: m)分布: (a) 29日22:43; (b) 30日00:07; (c) 30日00:56; (d) 30日05:55。紫红色粗线标示中尺度倒槽的位置, 图5b中黑色直线CD代表图7d中雷达剖面的位置

Fig. 5 Doppler radar reflectivity at 0.5° elevation at Ningbo station (white contours; $>30\text{ dBZ}$) and the objective interpolation field of minutely extreme wind (red wind barb; units: m s^{-1}) from AWS with 1-km resolution terrain height (shaded, units: m) during the affecting period of typhoon Dujuan: (a) 2243 BT 29 September, 2015; (b) 0007 BT 30 September, 2015; (c) 0056 BT 30 September, 2015; (d) 0555 BT 30 September, 2015. The bold purple lines stand for mesoscale inverted trough, and the black line CD in (b) denotes the cross line for Fig. 7d

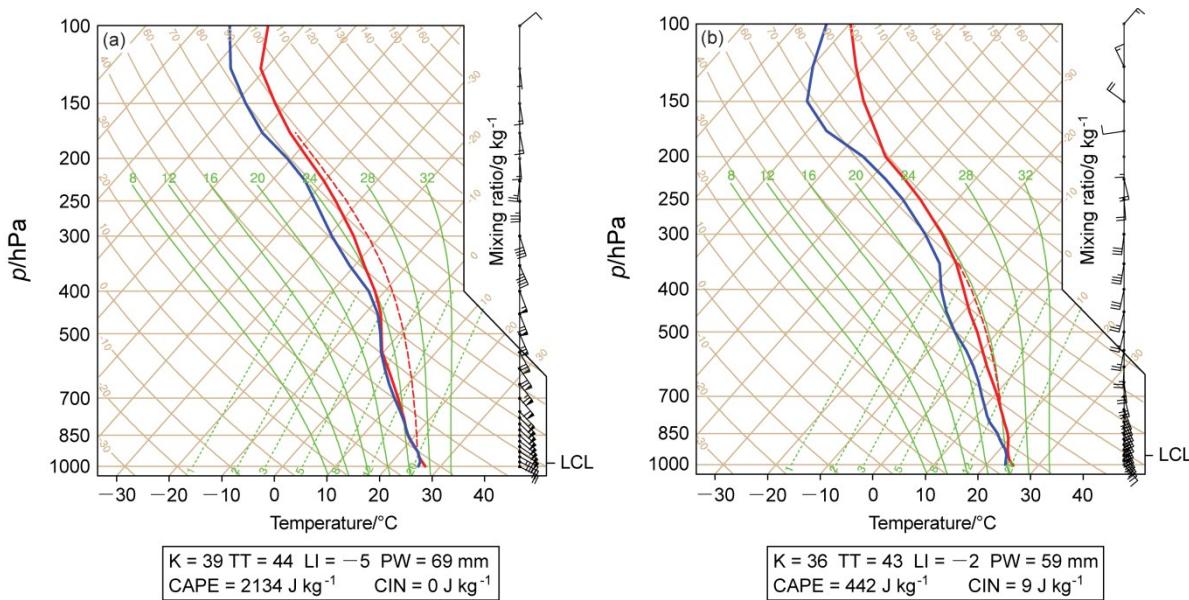


图6 (a) “苏迪罗”台风2015年8月9日08:00外金村站探空图, (b)“杜鹃”台风2015年9月30日02:00岭口站探空图。图中探空时次为所在雨区降水高峰期前2小时, 所用资料为ERA-Interim $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 再分析资料, 图中红色虚线为状态曲线, 红色粗线为温度层结曲线, 蓝色粗线为露点层结曲线, 探空站点的位置见图2a和2b

Fig. 6 (a) Skew T-LnP chart at Wajincun station (Fig. 2a) at 0800 BT 9 August, 2015, of Soudelor. (b) Skew T-LnP at Lingkou station (Fig. 2b) at 0200 BT, September 30, 2015, during the affecting period of typhoon Dujuan. The skew T-LnP figures are draw using ERA-Interim data with a resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, and the time for Fig. 6a and 6b is two hours before the rainfall peak. The red dashed line stands for the temperature profile of the air parcel, and the red bold line stands for the temperature profile of the environment, and the blue bold line denotes the dew point temperature profile

图6给出了两个台风在浙中北部沿海引发局地特大暴雨之前2小时左右位于降水中心附近站点的探空。从图6a可见, “苏迪罗”台风期间外金村站整层近似饱和, 有利于浙江沿海降水的东南气流强且深厚, 925~400 hPa之间的东南风速和0~6 km垂直风切变均超过 20 m s^{-1} , 对流有效位能(CAPE)值大于 2000 J kg^{-1} , 抬升凝结高度极低。相比之下, “杜鹃”台风期间岭口站水汽和能量条件都不理想 (CAPE仅 442 J kg^{-1}), 东南气流只影响近地面至700 hPa之间的层次, 风速也较小 ($< 10 \text{ m s}^{-1}$; 图6b)。

“苏迪罗”台风中尺度回波发展盛期, 距离外金村站最近的温州洞头站雷达风廓线(图7a)显示边界层内近地面0.25 km高度以下有一支很强的东风急流, 中心风速 16 m s^{-1} 左右, 从11:30左右开始出现, 23:00左右消失, 持续了约12个小时; 在这期间垂直速度一直较弱, 维持在 0.35 m s^{-1} 以下, 即回波的形成主要由水平方向上风速的辐合为主。图7c给出的“杜鹃”中尺度回波距离最近的慈溪站雷达风廓线则显示有清楚的垂直切变和垂直低涡

环流结构, 主要出现时段为29日22:00至30日02:00, 垂直发展高度超过0.5 km, 垂直风速比“苏迪罗”强得多, 超过 5 m s^{-1} 。对比图7b和d沿回波方向的剖面也可以发现, “苏迪罗”中尺度回波带为低质心结构, 发展高度较低但强度稍强; 而“杜鹃”中尺度回波带发展高度更高但强度略弱一些。

5 动能和热能收支分析

能量的变化是天气演变机制的根本原因, 天气尺度环境和中尺度对流系统之间存在显著的能量转换和传输 (Fuelberg and Scoggins, 1978; Robertson and Smith, 1980; Fuelberg and Jedlovec, 1982)。为了更深入地讨论两个台风中尺度局地强降水过程的能量变化, 本文利用 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的ERA-Interim再分析资料对动能和热能收支进行分析。计算“苏迪罗”局地强降水动能和热能收支的范围如图2a中方框所示, 为累积雨量100 mm以上的区域。由于“杜鹃”台风局地强降水较“苏迪罗”偏弱, 因此计算范围为累积雨量在50 mm以上的区域, 如图

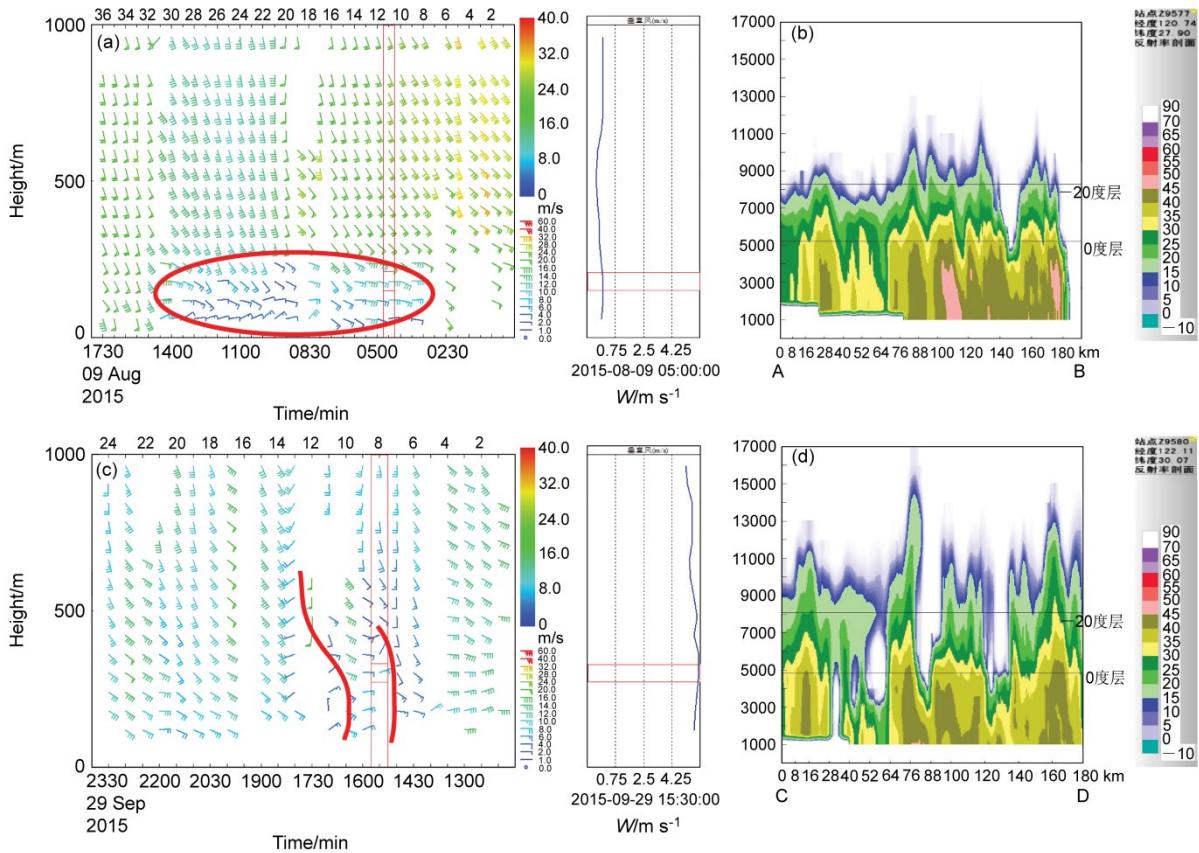


图7 (a) 浙江温州洞头站观测的“苏迪罗”台风风廓线雷达资料以及 (b) 2015年8月9日17:37沿图4b中AB的雷达反射率剖面; (c)浙江宁波慈溪站观测的“杜鹃”台风风廓线雷达资料以及 (d) 2015年9月30日00:07沿图5b中CD的雷达反射率剖面。图7a和7c为0~1 km高度的单站水平风场时序图和红色方框对应时刻的垂直风速廓线, 红色圈标示低空急流, 红色曲线标示垂直切变和垂直低涡

Fig.7 (a) Wind profile from Dongtou station during Soudelor. (b) Reflectivity cross section along line AB in Fig. 4b at 1737 BT 9 August, 2015. (c) Wind profile from Cixi station during Dujuan. (d) Reflectivity cross section along line CD in Fig. 5b at 0007 BT September 30, 2015. The charts on the right side of Fig. 7a and Fig. 7c give the vertical velocity profiles corresponding to the time denoted by the red boxes in the left charts. The red bold oval in Fig. 7a stands for the low-level jet, and the red bold curve lines in Fig. 7c stand for shear lines

2b中方框所示。计算时间为降水过程开始前10个小时左右至过程结束, 分别为8月8日20:00至10日08:00以及9月29日08:00至30日08:00。

5.1 动能收支

Chen and Wiin-Nielsen (1976) 利用模式和观测数据分析发现, 仅占总动能1%的辐散动能对能量平衡具有至关重要的作用, 它能催化有效位能向旋转动能转换。本文通过涡度场和散度场将风场分解为旋转风和散度风, 然后根据辐散风和旋转风的完全动能收支及转换对两个降水过程进行研究。分解后的散度风和旋转风的各层重建风场与原始风场之间的绝对平均误差较小, 量级在 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, 计算结果能反映动能收支的实际情况(表1和表2)。

本文根据 Buechler and Fuelberg (1986) 的方法, 采用的动能收支方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{KD}}{\partial t} &= \iint -V_D \cdot \frac{\partial V_R}{\partial t} dA - \\ &\quad \text{DKD} \quad \text{INTD} \\ &\left[\iint -f(v_R u_D - u_R v_D) dA + \iint -\zeta(v_R u_D - u_R v_D) dA + \right. \\ &\quad \text{Af} \quad \text{Az} \\ &\quad \left. \iint -\omega \frac{\partial k_R}{\partial p} dA + \iint -\omega V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial p} dA \right] + \\ &\quad \text{B} \quad \text{C} \\ &\iint -V_D \cdot \nabla \phi dA + \iint -\nabla \cdot k V_D dA + \iint -\frac{\partial \omega k}{\partial p} dA + \\ &\quad \text{GD} \quad \text{HFD} \quad \text{VF} \end{aligned}$$

$$\iint V_D \cdot F dA, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & DD \\ & \frac{\partial KR}{\partial t} = \iint -V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial t} dA + \\ & DKR \quad INTR \\ & \left[\iint -f(v_R u_D - u_R v_D) dA + \iint -\zeta(v_R u_D - u_R v_D) dA + \right. \\ & \quad Af \quad Az \\ & \left. \iint -\omega \frac{\partial k_R}{\partial p} dA + \iint -\omega V_R \cdot \frac{\partial V_D}{\partial p} dA \right] + \\ & B \quad C \\ & \iint -V_R \cdot \nabla \phi dA + \iint -\nabla \cdot k V_R dA + \iint V_R \cdot F dA, \quad (2) \\ & GR \quad HFR \quad DR \end{aligned}$$

其中, $V = V_R + V_D$, V_R 为旋转风, V_D 为散度风, u_R 、 v_R 、 u_D 、 v_D 分别为旋转风和辐散风分量; $k = k_R + k_D + V_R \cdot V_D$, $k_R = 1/2(V_R \cdot V_R)$, $k_D = 1/2(V_D \cdot V_D)$; f 为科里奥利力; ζ 为相对涡度; ω 为垂直速度; $\nabla \phi$ 为位势梯度; F 为摩擦力; A 为计算区域面积。

等压坐标下的空气柱动能各分量表示为

$$KR = \iint k_R dA, \quad (3)$$

$$KD = \iint k_D dA, \quad (4)$$

$$\iint dA = \frac{1}{gA} \iint dx dy dp, \quad (5)$$

其中, g 为重力加速度, p 为气压。因此等压坐标下的空气柱动能 (K) 可写为

$$K = KR + KD + \iint V_R \cdot V_D dA. \quad (6)$$

公式 (1) 和 (2) 分别为辐散和旋转动能收支方程, 公式 (1) 左侧的 DKD 项和 DKR 项分别为辐散动能和旋转动能的总变化项; 公式 (1) 右侧方括号中的四项之和大小相等, 符号相反, 代表 KR 和 KD 之间的能量转换; GD 和 GR 项为动能制造项, 代表有效位能与 KD 和 KR 之间的能量转换; HFD 项和 HFR 项分别表示由辐散风和旋转风造成的总动能水平通量散度; VF 项为总动能的垂直通量散度, 仅对 DKD 项有影响; DD 项和 DR 项为耗散项, 由摩擦过程及次网格尺度运动之间的能量转换造成的; INTD 项和 INTR 项分别为旋转风对 KD 和 辐散风对 KR 造成的影响项, 与公式 (6) 中的 $V_R \cdot V_D$ 有关。

表 1 “苏迪罗”局地强降水过程 8月 8日 20:00 至 10 日 08:

00 散度风和旋转风的重建风场与原始风场的平均绝对误差

Table 1 Mean absolute differences between original and reconstructed wind components for lower, middle, and upper atmosphere during local heavy rain event caused by Soudelor from 2000 BT 8 August to 0800 BT 10 August, 2015

	重建风场与原始风场的平均绝对误差/m s ⁻¹		
	<i>u</i>	<i>v</i>	风速
低层 (700 hPa 以下)	1.42×10^{-4}	3.13×10^{-4}	6.74×10^{-5}
中层 (700~400 hPa)	9.77×10^{-5}	3.79×10^{-4}	1.62×10^{-4}
高层 (400 hPa 以上)	7.70×10^{-5}	2.45×10^{-4}	1.89×10^{-4}

表 2 “杜鹃”局地强降水过程 9月 29 日 14:00 至 30 日 08:

00 散度风和旋转风的重建风场与原始风场的平均绝对误差

Table 2 Mean absolute differences between original and reconstructed wind components for lower, middle, and upper atmosphere during local heavy rain event caused by Dujuan from 1400 BT September 29 to 0800 BT September 30, 2015

	重建风场与原始风场的平均绝对误差/m s ⁻¹		
	<i>u</i>	<i>v</i>	风速
低层 (700 hPa 以下)	1.84×10^{-4}	6.07×10^{-5}	1.35×10^{-4}
中层 (700~400 hPa)	2.02×10^{-4}	2.14×10^{-4}	2.36×10^{-4}
高层 (400 hPa 以上)	1.07×10^{-4}	2.15×10^{-4}	1.32×10^{-5}

根据公式 (1) 和 (2) 计算得到的辐散和旋转动能收支结果显示, “苏迪罗”局地强降水过程中, INTD 项和 INTR 项是最大动能源, 整层动能贡献分别为 0.72 W m^{-2} 和 0.88 W m^{-2} , 整层旋转风摩擦耗散使得 DR 项高达 -3.96 W m^{-2} , 是最主要的动能汇; INTD 项主要发生在中层 (0.44 W m^{-2}), INTR 项集中出现在低层 (0.48 W m^{-2}), 低层和中层均有较强的旋转风摩擦耗散 (DR 项约 1.8 W m^{-2}), 而高层对动能的影响很小 (图 8 左列)。“杜鹃”局地强降水过程中动能总量为 8.02 J m^{-2} , 动能收支比“苏迪罗”动能总量 28.75 J m^{-2} 要弱得多, 辐散风次网格运动的能量转换项 DD (0.54 W m^{-2}) 和 INTD 项 (0.45 W m^{-2}) 是最主要的动能源, 旋转风摩擦耗散项 DR 为动能汇

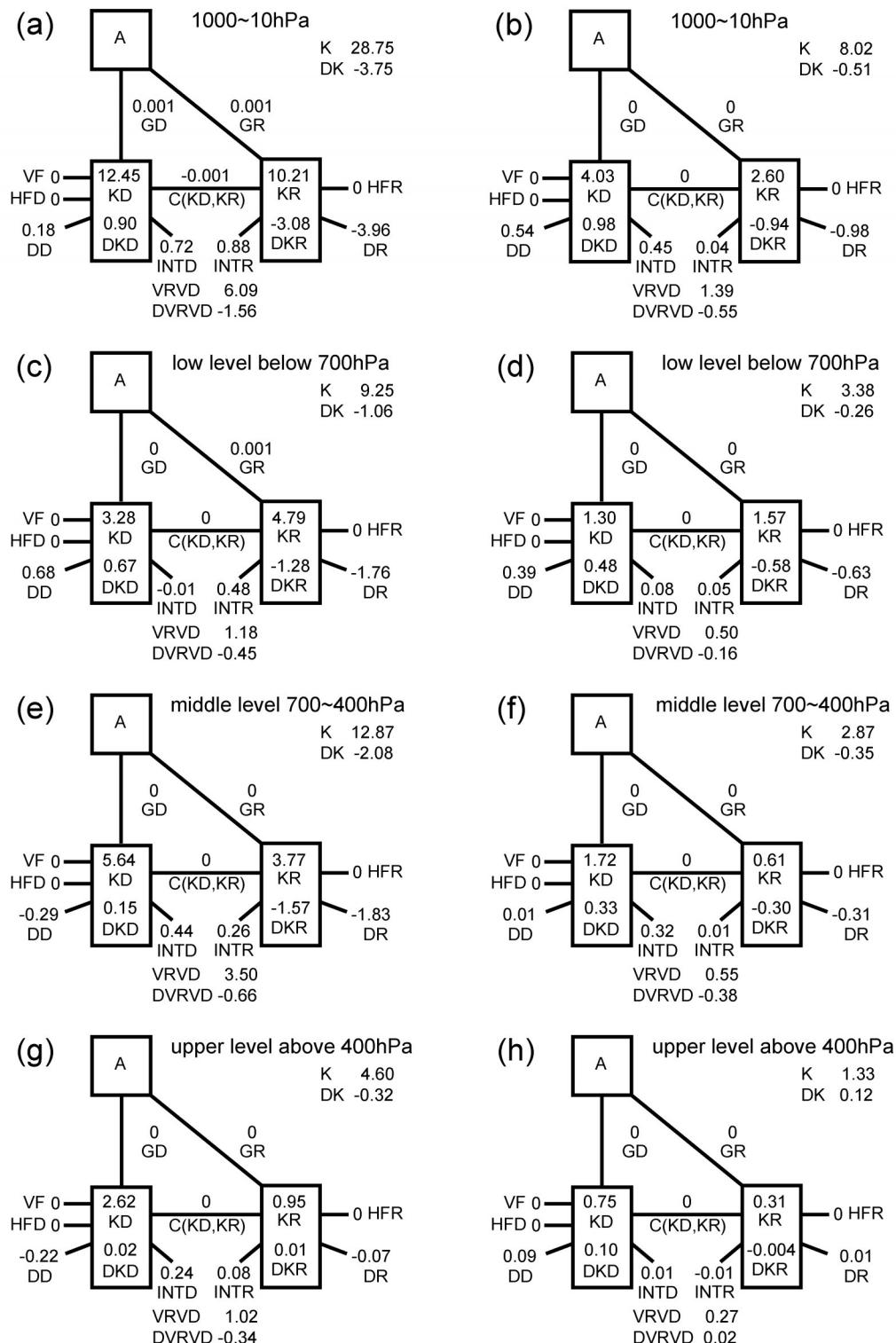


图8 “苏迪罗”(左列) 和“杜鹃”(右列) 台风局地强降水过程的动能收支图: (a, b) 整层 1000~10 hPa; (c, d) 700 hPa 以下低层; (e, f) 700~400 hPa 中层; (g, h) 400 hPa 以上高层。K (空气柱动能)、KD (辐散动能)、KR (旋转动能)、VRVD (辐散风和旋转风相互作用产生的动能) 的单位为 $J \text{ m}^{-2}$, 其它各项的单位为 W m^{-2} ; 计算区域如图 2a 和 b 所示

Fig. 8 Mean budgets of divergent and rotational kinetic energy integrated (a, b) from 1000 to 10 hPa, (c, d) from 1000 to 700 hPa, (e, f) from 700 to 400 hPa, (g, h) from 400 to 10 hPa over the computational and temporal domains of Souledor (left column) and Dujuan (right column) local heavy rain events. K (kinetic energy), KD (divergent kinetic energy), KR (rotational kinetic energy), VRVD (kinetic energy produced by the interaction between divergent wind and rotational wind) are in $J \text{ m}^{-2}$, while others are in W m^{-2} . The computational area can be seen in Fig. 2a and Fig. 2b

(-0.98 W m^{-2})；散度风次网格运动的能量转换项 DD 和旋转风摩擦耗散项 DR 都集中出现在低层，分别为 0.39 W m^{-2} 和 -0.63 W m^{-2} ，最大的INTD 项则位于中层，约为 0.32 W m^{-2} (图 8 右列)。在两个台风降水过程中，均无外部动能输送或大气中存储的有效位能向动能的转换，动能的收支主要受局地次网格运动、旋转风和散度风场以及下垫面摩擦的影响。因此虽然“杜鹃”的对流有效位能很小 (图 6b)，但仍然可以发展出较强的对流形成强降水。

5.2 热能收支分析

根据热力学第一定律，采用的显热能和潜热能收支方程如下：

$$\frac{\partial ES}{\partial t} = \iint c_p V \cdot \nabla T dA + c_p \frac{\omega}{\rho g} (\gamma_d - \gamma) dA + \iint \frac{dQ}{dt} dA, \quad (7)$$

$$\frac{\partial EL}{\partial t} = \iint -\nabla \cdot (LqV) dA + \iint \frac{d\theta_e}{dt} dA, \quad (8)$$

其中，公式 (7) 左端为等压坐标下空气柱显热能的局地变化，右端第一项为温度平流项，第二项为

绝热冷却项，第三项为非绝热加热项。公式 (8) 左端为等压坐标下空气柱潜热能的局地变化，右端第一项为水汽通量辐合项，第二项为水汽源汇项。
 $ES = \iint c_p T dA$ 为等压坐标下的空气柱显热能，
 $EL = \iint L q dA$ 为潜热能， $\gamma = -\partial T / \partial z$ 为温度直减率， $\gamma_d \approx 9.76 \text{ K km}^{-1}$ ， $c_p \approx 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 为定压比热， $L \approx 2.501 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ 为凝结潜热， T 为温度， q 为比湿， θ_e 为相当位温， $\rho \approx 1.2923 \text{ kg m}^{-3}$ 为大气密度，其他各项符号同前。

计算结果显示 (图略)，两次局地强降水过程中的显热和潜热收支各项中，非绝热加热和水汽源汇项是影响热能的主要因子 (量级为 $10^0 \sim 10^1 \text{ W m}^{-2}$)，而温度平流项、绝热冷却项和水汽辐合项的量级都为 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$ ，可忽略不计。在两次降水期间，由于降水凝结导致潜热的大量释放，大气中的潜热能迅速减小，局地温度升高造成的非绝热加热又使得显热能迅速地增加，尤其是 700 hPa 以下的低层大气中显热能的增加最为显著 (图 9)。显热能的增加使低层空气增暖，一方面有利于层结不稳定性加强，另一方面增暖造成的气柱膨胀促

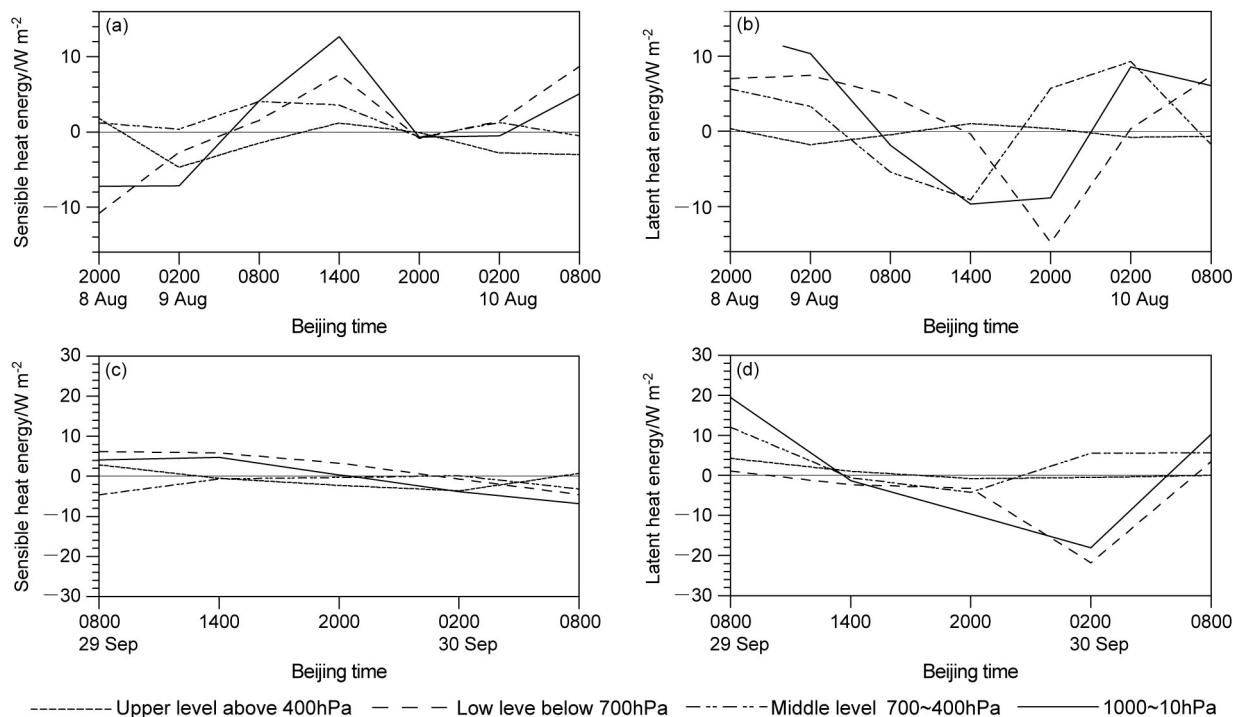


图9 (a、b) “苏迪罗”和(c、d)“杜鹃”台风局地强降水过程的显热能(左列)和潜热能(右列)随时间演变，单位： W m^{-2} 。计算区域和层次同图8

Fig. 9 Time evolution of sensible heat energy (left column) and latent heat energy (right column) during (a, b) Soudelor and (c, d) Dujuan local torrential rain events. The computational area and levels of heat energy are the same as in Fig. 8

使地面倒槽和中小尺度涡旋能够得到进一步的加深发展, 这对于降水的增幅和维持都是有利条件(蒋瑞宾等, 1995; 张苏平等, 2006)。

6 结论

本文利用 ERA-Interim $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 再分析资料、自动站小时和分钟加密资料、FY-2G 红外云图、多普勒雷达和风廓线雷达资料对两个路径高度相似、登陆福建减弱为热带低压甚至残余低压后仍在浙江沿海地区引发局地强降水的“苏迪罗”和“杜鹃”台风进行对比分析, 结果表明:

(1) “苏迪罗”处于经向环流中, 有利于登陆福建后北上; 季风爆发有充沛持续的水汽输送, 使台风环流尺度大、影响范围广、生命史长、降水量大。“杜鹃”处于纬向环流中, 登陆福建后引导气流弱, 不利于向内陆移动; 夏季风南撤退出我国大陆, 水汽条件差, 台风登陆后迅速减弱, 影响范围小、持续时间短、累积降水量小。

(2) “苏迪罗”登陆后进入闽赣地区并减弱为热带风暴(低压)后在浙江沿海引发的局地强降水是由低层强东南和偏南急流长时间辐合加上有利地形触发的。“杜鹃”登陆福建后迅速减弱为热带低压和残余云系, 但在进入闽赣地区后也在浙江沿海产生局地强降水, 主要是由中高纬地面高压底部的东东北气流南下与“杜鹃”北象限的东到东南风汇合形成中尺度倒槽触发造成的。

(3) 两个台风降水过程均无外部动能输送和来自有效位能的动能转换, 动能的收支主要受中低层局地次网格运动、旋转风和散度风场以及下垫面摩擦的影响。这是“杜鹃”对流有效位能较小但仍可发展出较强的对流和降水的原因。降水过程释放的凝结潜热造成局地的非绝热加热作用使得气柱中显热能的大量累积, 造成低层空气增暖, 层结不稳定性加强, 地面倒槽和中小尺度涡旋进一步加深发展, 从而使降水得到增幅和维持。

参考文献 (References)

- Buechler D E, Fuelberg H E. 1986. Budgets of divergent and rotational kinetic energy during two periods of intense convection [J]. Mon. Wea. Rev., 114(1): 95–114. doi: 10.1175/1520-0493(1986)114<0095:BODARK>2.0.CO;2
- 陈丽芳. 2008. 相似台风“泰利”和“桑美”的数值模拟和对比分析 [J]. 气象科技, 36(3): 262–267. Chen Lifang. 2008. Numerical simulation and comparative analysis of typhoons Talim and Saomei [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 36(3): 262–267. doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2008.03.002
- Chen T C, Wiin-Nielsen A C. 1976. On the kinetic energy of the divergent and nondivergent flow in the atmosphere [J]. Tellus, 28(6): 486–498. doi: 10.3402/tellusa.v28i6.11317
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 491pp. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to Western Pacific Typhoons (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 491pp.
- 程正泉, 陈联寿, 刘燕, 等. 2007. 1960~2003年我国热带气旋降水的时空分布特征 [J]. 应用气象学报, 18(4): 427–434. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Liu Yan, et al. 2007. The spatial and temporal characteristics of tropical cyclone-induced rainfall in China during 1960–2003 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18(4): 427–434. doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2007.04.002
- 杜小玲, 喻自凤, 鲁崇明, 等. 2007. 上海“0185”热带低压特大暴雨维持机理研究 [J]. 南京大学学报(自然科学), 43(6): 621–632. Du Xiaoling, Yu Zifeng, Lu Chongming, et al. 2007. A research on the mechanism for the Shanghai heavy rainfall event on 5–6 August 2001 caused by a tropical depression [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 43(6): 621–632. doi: 10.3321/j.issn:0469-5097.2007.06.007
- 段丽, 陈联寿. 2005. 热带风暴“菲特”(0114)特大暴雨的诊断研究 [J]. 大气科学, 29(3): 343–353. Duan Li, Chen Lianshou. 2005. Diagnostic analysis and numerical study of torrential rain associated with the tropical storm Fitow (0114) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(3): 343–353. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.02
- 端义宏, 余晖, 伍荣生. 2005. 热带气旋强度变化研究进展 [J]. 气象学报, 63(5): 636–645. Duan Yihong, Yu Hui, Wu Rongsheng. 2005. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63(5): 636–645. doi: 10.11676/qxb2005.062
- Fuelberg H E, Scoggins J R. 1978. Kinetic energy budgets during the life cycle of intense convective activity [J]. Mon. Wea. Rev., 106(5): 637–653. doi: 10.1175/1520-0493(1978)106<0637: KEBDTL>2.0.CO;2
- Fuelberg H E, Jedlovec G J. 1982. A subsynoptic-scale kinetic energy analysis of the Red River Valley tornado outbreak (AVE-SESAME I) [J]. Mon. Wea. Rev., 110(12): 2005–2024. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<2005:ASSKEA>2.0.CO;2
- Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al. 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe tropical storm Bilis (2006) after its landfall [J]. Mon. Wea. Rev., 137(6): 1881–1897. doi: 10.1175/2008MWR2669.1
- 韩桂荣, 唐晓文, 魏建苏. 2007. 登陆台风变性发展与消亡的对比分析 [J]. 气象科学, 27(1): 35–41. Han Guirong, Tang Xiaowen, Wei Jiansu. 2007. The extratropical transition analyses on two landfall typhoons [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 27(1): 35–41. doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2007.01.005
- 胡姝, 李英, 魏娜. 2013. 台风Nari(0116)登陆台湾过程中结构强度

- 变化的诊断分析 [J]. 大气科学, 37(1): 81–90. Hu Shu, Li Ying, Wei Na. 2013. Diagnostic analysis on Nari (0116) structure and intensity changes during its landfall process on Taiwan Island [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(1): 81–90. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11115
- 黄滢, 郭亮, 江源源. 2010. “黑格比”和“莎莉”两个相似台风暴雨对比分析 [J]. 海洋预报, 27(1): 49–52. Huang Ying, Guo Liang, Jiang Yuanyuan. 2010. Comparative analysis of heavy rains due to analogous typhoons “Hagupit” and “Sally” [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 27(1): 49–52. doi:10.3969/j.issn.1003-0239. 2010.01.009
- 蒋瑞宾, 朱平, 王邦中, 等. 1995. 一次中尺度天气过程中湍流特征分析 [J]. 气象, 21(4): 11–15. Jiang Ruibin, Zhu Ping, Wang Bangzhong, et al. 1995. Analyses of turbulent characteristics during the process of a mesoscale system [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 21(4): 11–15. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1995.04.003
- 姜勇强, 王昌雨, 张维桓, 等. 2003. 台风倒槽内 β 中尺度低涡及特大暴雨的数值模拟 [J]. 气象学报, 61(3): 312–322. Jiang Yongqiang, Wang Changyu, Zhang Weiheng, et al. 2003. Numerical simulation of extremely heavy rain and meso- β scale low vortex in inverted typhoon trough [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61(3): 312–322. doi:10.11676/qxxb2003.030
- 李英, 陈联寿, 雷小途. 2008. 变性台风 Winnie (9711)环流中的锋生现象 [J]. 大气科学, 32(3): 629–639. Li Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. 2008. Frontogenesis in the circulation of typhoon Winnie (1997) during its extratropical transition process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(3): 629–639. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.18
- 梁红丽, 程正泉. 2017. 2014年两次相似路径影响云南台风降水差异成因分析 [J]. 气象, 43(11): 1339–1353. Liang Hongli, Cheng Zhengquan. 2017. Cause analysis of precipitation difference between two typhoons influencing Yunnan along similar tracks in 2014 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(11): 1339–1353. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.003
- 梁军, 李英, 张胜军, 等. 2015. 影响辽东半岛两个台风 Meari 和 Muifa 暴雨环流特征的对比分析 [J]. 大气科学, 39(6): 1215–1224. Liang Jun, Li Ying, Zhang Shengjun, et al. 2015. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Meari and Muifa over Liaodong Peninsula [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(6): 1215–1224. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14191
- Pan J S, Teng D G, Zhang F Q, et al. 2018. Dynamics of local extreme rainfall of super typhoon Soudelor (2015) in East China [J]. Science China Earth Sciences, 61(5): 572–594. doi:10.1007/s11430-017-9135-6
- 齐琳琳, 赵思雄. 2004. 一次热带低压引发上海特大暴雨过程的中尺度系统分析 [J]. 大气科学, 28(2): 254–268. Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2004. An analysis of mesoscale features of heavy rainfall in Shanghai on 5–6 August 2001 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(2): 254–268. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.02.008
- Robertson F R, Smith P J. 1980. The kinetic energy budgets of two severe storm producing extratropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 108(2): 127–143. doi:10.1175/1520-0493(1980)108<0127:TKEBOT>2.0.CO;2
- 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. 2006. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究 [J]. 气象学报, 64(1): 57–71. Sun Jianhua, Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608” typhoon [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64(1): 57–71. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.01.006
- 张苏平, 李春, 白燕, 等. 2006. 一次北方台风暴雨(9406)能量特征分析 [J]. 大气科学, 30(4): 645–659. Zhang Suping, Li Chun, Bai Yan, et al. 2006. Energy analysis on a heavy storm case in North China caused by typhoon No. 9406 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(4): 645–659. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.10
- 张晓惠, 许爱华, 刘晓晖. 2009. 热带低压“浣熊”与中纬度低槽系统相互作用下的一次暴雨过程的诊断分析 [J]. 热带气象学报, 25(S1): 29–38. Zhang Xiaohui, Xu Aihua, Liu Xiaohui. 2009. A diagnostic case study on the interaction between mid-latitude trough and tropical depression “Neoguri” [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25(S1): 29–38. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.Z1.004
- 张建海, 于忠凯, 何勇. 2010. 两个路径相似台风暴雨过程的模拟分析 [J]. 热带气象学报, 26(4): 392–400. Zhang Jianhai, Yu Zhongkai, He Yong. 2010. Analysis of a simulation of heavy rainfall associated with two typhoons with similar routes [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26(4): 392–400. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.04.002
- 赵宇, 崔晓鹏, 王建国. 2008. 由台风低压倒槽引发的山东暴雨过程研究 [J]. 气象学报, 66(3): 423–436. Zhao Yu, Cui Xiaopeng, Wang Jianguo. 2008. A study on a heavy rainfall event triggered by inverted typhoon trough in Shandong Province [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66(3): 423–436. doi:10.11676/qxxb2008.039
- 周玲丽, 翟国庆, 王东法, 等. 2009. 0505号“海棠”台风雨数值模拟试验和分析 [J]. 大气科学, 33(3): 489–500. Zhou Lingli, Zhai Guoqing, Wang Dongfa, et al. 2009. Numerical simulation and analysis of typhoon Haitang (0505) heavy rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(3): 489–500. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.07
- 周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等. 2011. 0713号“韦帕”台风雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析 [J]. 大气科学, 35(6): 1046–1056. Zhou Lingli, Zhai Guoqing, Wang Donghai, et al. 2011. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 typhoon Wipha [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(6): 1046–1056. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.05
- Zhou L L, Du H L, Zhai G Q, et al. 2013. Numerical simulation of the sudden rainstorm associated with the remnants of typhoon Meranti (2010) [J]. Adv. Atmos. Sci., 30(5): 1353–1372. doi:10.1007/s00376-012-2127-3