徐亚钦，夏园锋，翟国庆，等，2018. “苏拉”台前强螺旋云带辐合特征分析[J]. 气象，44(10)：1275-1285.

“苏拉”台前强螺旋云带辐合特征分析*

徐亚钦[1]　夏园锋[1]　翟国庆[2]　黄　艳[1]

1 浙江省金华市气象局，金华 321099

2 浙江大学地球科学系，杭州 310027

提　要： 为了研究爆发式发展的台风苏拉台前强螺旋云带，采用多种实况资料，运用风场分解、Shuman-Shapiro 滤波、雷达回波相关性跟踪(TREC)反演风场等方法对其辐合特征进行分析。结果表明：从中尺度滤波场、变风场以及风场分解后的辐散风可见，螺旋云带形成于大范围辐合背景下。在低层，旋转风是水平动能输入的主要贡献者，它加强了低层动量堆积，辐散风则加强了风场水平辐合；在高层，辐散风是动能输出的主要贡献者，辐散风的增强，加强了高空辐散。旋转风和辐散风的不同配置形成了强上升运动，从而促进了强螺旋云带的发展。对地面风场进行中尺度滤波后，在选取的两个关键区内可见明显的中尺度辐合或涡旋，且辐合在更高层仍有一定的反映。中小尺度辐合与螺旋云带中对流云团的发展相互对应、相互反馈。

关键词： 螺旋云带，中尺度辐合，风场分解，中尺度滤波

中图分类号： P458　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.004

Convergence Characteristics of Severe Prefrontal Spiral Cloud Band of Typhoon Saola

XU Yaqin[1]　XIA Yuanfeng[1]　ZHAI Guoqing[2]　HUANG Yan[1]

1 Jinhua Meteorological Office of Zhejiang Province, Jinhua 321099

2 Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract: This paper analyses the convergence characteristics of explosive spiral cloud band of Typhoon Saola by using variety of observation data, wind decomposing, Shuman-Shapiro filtering and TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation) wind inversion methods. The results indicate that spiral cloud band formed in the background of large-scale convergence from the mesoscale filter wind, variation wind and divergent wind after decomposition. The low-level rotational wind was the major contributor to the horizontal kinetic energy input, which strengthened the low-layer momentum accumulation. Besides, the divergent wind strengthened the convergence. The upper divergent wind was the major contributor to kinetic energy output, which strengthened the upper divergence. The rotational and divergent wind strengthened the vertical motion, promoting the development of severe spiral cloud band. After surface mesoscale filtering, we could see obvious mesoscale convergence or vortex in the two areas, which were also reflected in higher levels. Thus, the mesoscale convergence zone and spiral cloud band affect each other.

Key words: spiral cloud band, mesoscale convergence, wind decomposition, mesoscale filter

---

* 国家自然科学基金项目(41575042)和金华市科学技术局社会发展类一般项目(20153029)共同资助

2017 年 7 月 24 日收稿；　2018 年 3 月 26 日收修定稿

第一作者：徐亚钦，主要从事中尺度强对流和数值模拟研究. Email：hekele@126.com

引 言

浙江省历年受台风影响，1949年以来在浙江登陆的台风年均达0.6个，其中台风Wanda(5612号)造成了4925人死亡，台风Amy(6214号)导致的直接经济损失甚至占浙江当年GDP的10.4%(陈海燕等，2011)。这对人民生产、生活安全和经济稳定造成巨大的威胁。而台风暴雨导致的灾害常大于其大风所致的灾害。在我国24 h降水记录中，前六位极端降水均由台风所引起(Chen et al，2010)。台风降水主要分为台风螺旋云(雨)带降水和内墙降水，螺旋云带和台风暴雨紧密相连，它是台风的主要特征之一。螺旋云带的演变及其结构特征是台风研究中的重点也是难点。

螺旋云带往往由多个对流系统组织而成(Yamasaki，2005)，中尺度辐合或者涡旋系统对螺旋云带的发展起着非常重要的作用。Akter and Tsuboki(2012)对2007年热带气旋锡德(Sidr)的外螺旋云带模拟分析认为，沿着螺旋云带的低层辐合由穿过云带两侧的气流决定，跨云带的梯度西风和非梯度南风的相互作用产生低层辐合，辐合带决定了云带的延展长度。螺旋云带中常常伴随着中尺度辐合带，它和雷达回波带有很好的对应(周玲丽等，2011)。赵坤等(2007)通过双多普勒雷达观测得到螺旋云带气流的三维特征，发现在螺旋云带内部和边缘都存在强辐合。Li and Wang(2012)进一步分析了不同螺旋云带中净辐合的发展高度。Zhou et al(2011)发现在台风麦莎(2005)螺旋云带的边界层内有一条强β中尺度辐合带，辐合带中有多个较小的辐合中心，它与雷达回波带有很好的对应。但他们往往侧重于分析辐合带和螺旋云带的关系或螺旋云带中辐合特征，而较少涉及中小尺度辐合和螺旋云带中对流单体的关系。许多学者通过对风场的多种处理来进一步分析螺旋云带结构及其风场特征。周玉淑等(2014)从无辐散风和无旋风分量上得到了比原始全风场更多的台风风场结构变化信息，他们认为对台风暴雨增幅起主导作用的，是无旋风的变化及其引起的散度变化。周海光(2010)通过双多普勒雷达反演风场发现在螺旋云带外侧低层有明显的内流，而在云带内侧存在明显的外流，两支气流在雨带内部低层辐合，在雨带内部形成强回波区。冀春晓等(2012)通过中尺度滤波、雷达风场反演和数值模拟结果表明，登陆台风的低层螺旋云带中活跃着中尺度气旋式涡旋系统，与之相伴随的为较强的中尺度上升区，中尺度垂直上升运动的强弱与雷达对流回波强度成正相关。

目前在螺旋云带爆发式发展背景下分析螺旋云带实况辐合特征、辐合气流构成，特别是分析中小尺度辐合和螺旋云带中对流系统对应关系的研究仍不多。本文采用NCEP 1°×1°再分析资料、FY-2D卫星黑体亮温资料、温州多普勒雷达资料、华东地区加密自动站资料等，运用风场分解、Shuman-Shapiro滤波、TREC风反演等技术方法来分析“苏拉”台前强螺旋云带爆发式发展的辐合场特征。

1 过程概括

1.1 台风概况

2012年第9号台风苏拉(Saola)于7月28日00时(UTC，下同)在菲律宾马尼拉以东约630 km的西北太平洋洋面上生成。之后向西北偏北方向移动，30日06时加强为台风，8月1日14时加强为强台风，于19:20在台湾花莲县秀林乡登陆，之后逆时针旋转出海，并在新北市贡寮区二次登陆。登陆后继续向西北方向移动，于8月2日22:50在福建福鼎秦屿镇沿海登陆，登陆时中心附近最大风力10级(25 m·s^{-1})，中心最低气压为985 hPa。台风登陆后继续向西北偏西方向移动横穿福建进入江西，3日13时减弱为热带低压(图1)(数据来自温州台风网)。

受“苏拉”影响，8月2—3日浙江省大部地区出现大雨到暴雨，沿海地区有大暴雨。温州市面雨量116.4 mm，其中温州市北林垟雨量达288.5 mm。特别是在台风登陆中国大陆前，有一条螺旋云带突然增强并横扫浙闽沿海地区，这条台前强螺旋云带在温州及附近地区的降水(主要集中在12 h内)占整个台风过程雨量的一半以上(图1)，其中乐清清江1 h雨量达66.8 mm，温州市北林垟12 h雨量达166.8 mm。“苏拉”给温州市农业、水利、交通、电力等基础设施造成了一定损失。其中平阳、泰顺、文成县共有7.85万人受灾，紧急转移人口3.55万人，倒塌房屋242间，直接经济损失1.10亿以上。

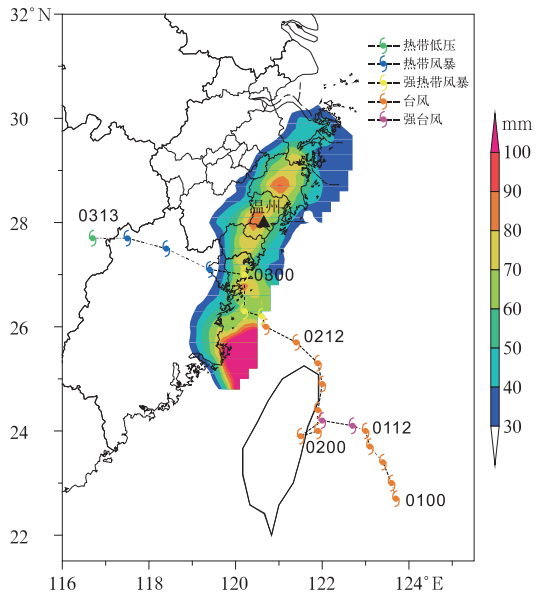

图 1　"苏拉"每 3 h 实况路径和 2012 年 8 月 3 日 00 时的 12 h 累计降水

(▲表示温州站位置,下同)

Fig. 1　Observed 3 h typhoon path and 12 h accumulated precipitation at 0000 UTC 3 August 2012

(▲ represents Wenzhou Station, similarly hereinafter)

1.2　螺旋云带云图特征

台风螺旋云带由对流旺盛、围绕台风中心规则排列的积云体组成,它和台风降水紧密相连。而云顶亮温(TBB)可以较好地反映出螺旋云带的演变过程,虽然由于中低层与高层云系之间存在差异以及在不同地形对台风暴雨增幅作用等因素的影响下,TBB 与实况降水之间存在些许差异,但它较低层辐合而言与整体实况降水有相对更好的对应。从"苏拉"螺旋云带的 TBB 演变可见,在台风移出台湾岛后(图 2a),在地形摩擦削弱作用下,台风结构已被严重破坏。此时台风北侧浙南沿海地区仅有零散的弱对流云系。2 h 后(图 2b),在浙南沿海(原零散对流云系)区域出现一条明显的西南—东北走向的对流云带,最大 TBB 达 −80 ℃。之后(图 2c)强螺旋云带向偏西方向移动,范围迅速扩大,覆盖了浙东南大部分地区。在地形的降水增幅作用下,浙东南沿海出现了明显的降水,此时台风中心所处位置正是产生浙江台风暴雨增幅最高发区域(余贞寿等,2017)。在 16 时(图 2d),螺旋云带结构疏散,强度迅速减弱,基本在 −60 ℃以下,降水也明显减弱。

可见,该螺旋云带具有几个特点:生成、发展迅速,在 2 h 内,从零散弱对流单体发展为旺盛的对流螺旋云带;强度强,在鼎盛时最大 TBB 值达 −80 ℃左右;持续时间短,强螺旋云带生命史只有 8 h 左右,但对浙东南地区的降水占整个台风降水过程一半以上。为何在浙东南沿海会突然形成一条强对流云带?本文从螺旋云带辐合特征作为切入点来讨论螺旋云带在浙南沿海爆发式发展的可能原因。

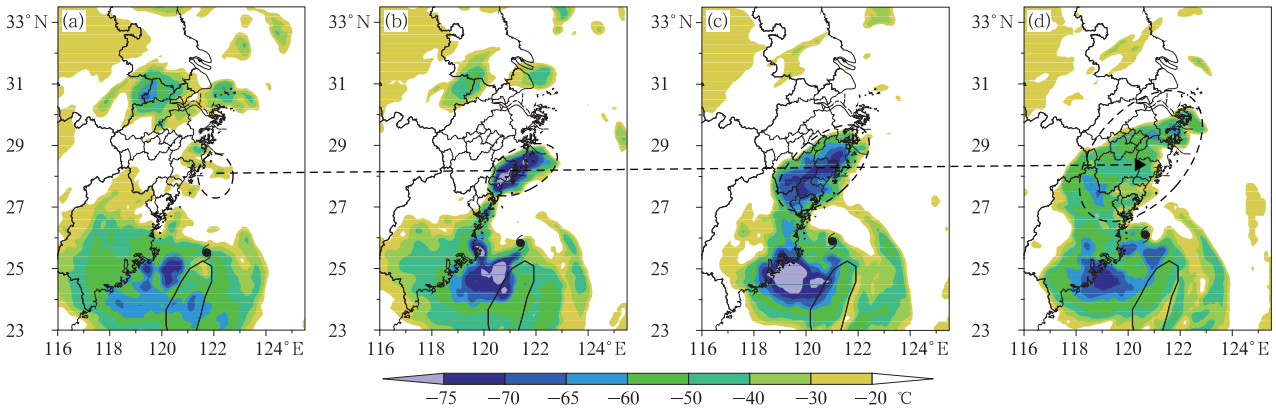

图 2　2012 年 8 月 2 日 10 时(a),12 时(b),14 时(c),16 时(d)台风螺旋云带登陆过程中 FY-2D 平均云顶亮温场

Fig. 2　The FY-2D average TBB of typhoon spiral cloud band during landfall at 1000 UTC (a), 1200 UTC (b), 1400 UTC (c), 1600 UTC (d) 2 August 2012

2 “苏拉”中尺度辐合特征

从环境风场可见，当“苏拉”靠近大陆时，在台风移向的右侧有一条强风速带(图 3a)，最大速度达 26 m·s^{-1}以上。强风速带出口区位于浙中南沿海地区，从而在浙南沿海地区形成了明显的风速和风向辐合(偏北和偏东风)。为了更直观地分析辐合带及其气流构成，通过 Shuman-Shapiro 滤波(章国材等，2007)对风场进行中尺度滤波，保留近 200 km 左右的 β 中尺度系统。其基本思路是：在得到格点要素场后，选取适当的滤波系数 S，对于二维要素场而言，9 点平滑的滤波算子为：

$$\bar{f}_{i,j} = f_{i,j} + \frac{S(1-S)}{2}(f_{i+1,j} + f_{i-1,j} + f_{i,j-1} + f_{i,j+1} - 4f_{i,j}) + \frac{S^2}{4}(f_{i+1,j+1} + f_{i-1,j+1} + f_{i-1,j-1} + f_{i+1,j-1} - 4f_{i,j}) \quad (1)$$

式中，S 为滤波系数，$f_{i,j}$ 为相应格点要素值，$\bar{f}_{i,j}$ 为滤波后平滑场。

那么它的响应函数为：

$$R(S,n) = [1 - 2\sin^2(\pi/n)]^2 \quad (2)$$

令 $R(S,n)=0$ 可以得到 S 与 n 的关系：

$$S = \frac{1}{2}\frac{1}{\sin^2(\pi/n)} \quad (3)$$

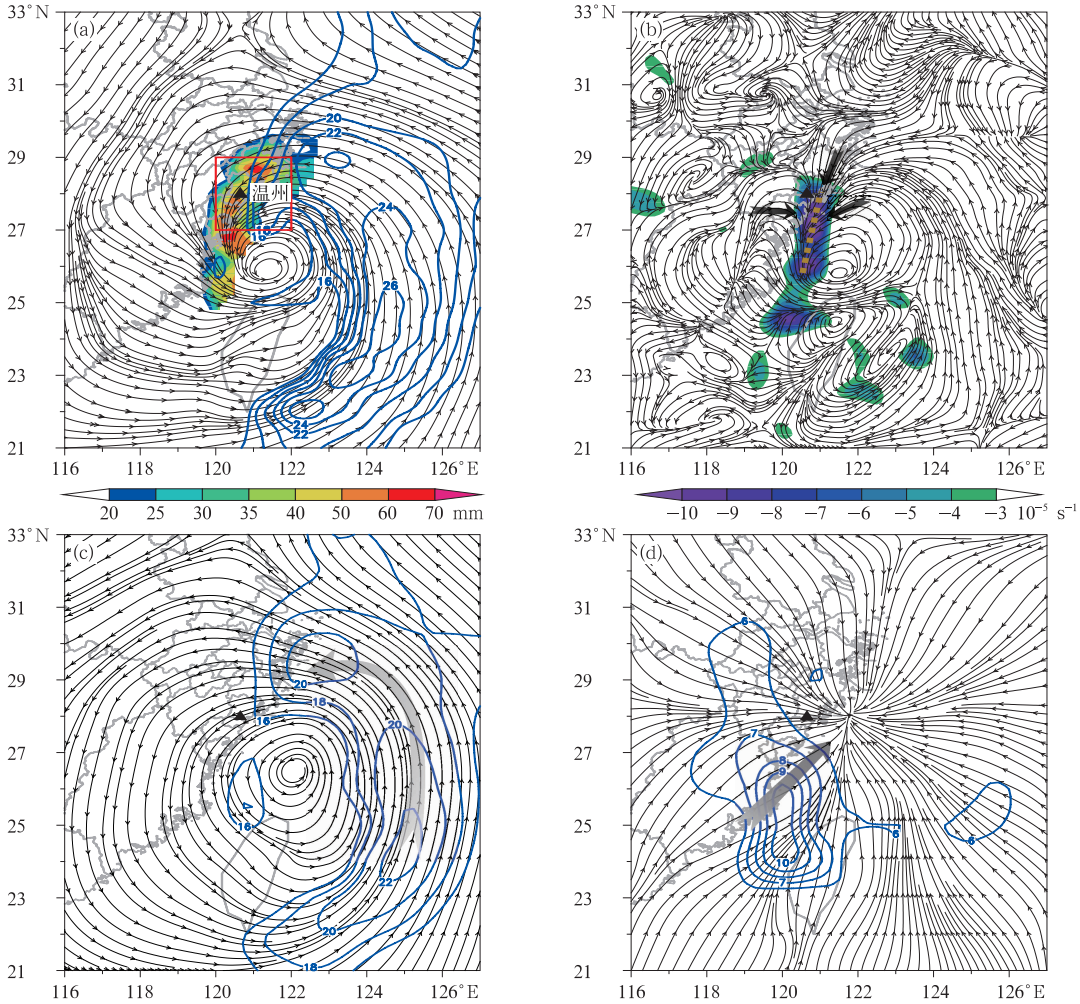

图 3 2012 年 8 月 2 日 12 时的 925 hPa(a)实况风场(等值线，单位：m·s^{-1})和未来 6 h 累计雨量(填色)；(b)中尺度滤波风场及其散度场(填色，虚线表示辐合线)；(c)旋转风及其全风速(等值线，单位：m·s^{-1})；(d)辐散风和全风速(等值线，单位：m·s^{-1})

Fig. 3 The 925 hPa (a) wind (contour, unit: m·s^{-1}) and observed precipitation over the next 6 h (shaded area) at 1200 UTC 2 August 2012; (b) mesoscale wind and divergence field after filtering (shaded area, dotted line: convergence line); (c) rotational wind and speed (contour, unit: m·s^{-1}); (d) divergent wind and speed (contour, unit: m·s^{-1}) at 1200 UTC 2 August 2012

取合适的滤波系数可以滤去 n 倍格距的波动，再用原始场减去滤波后的平滑场，即可分离出 n 倍格距波长的扰动波。可通过多次不同的滤波系数来构造所需的中尺度滤波器。滤波后可见(图 3b)，在台风中心 250 km 以内的环流与原始场基本一致。滤波后辐合的强度和范围比原始场更小(图略)，此时可以更明显地看到一条南西南—北东北的中尺度辐合线(图 3b 粗虚线)，滤波后辐合线的位置与未来中尺度短时强降水的位置(图 3a 填色)较为一致。滤波后的辐合带主要由偏东、偏北和偏西风三股气流组成，辐合最大强度达 $-1.0\times10^{-4}\ s^{-1}$。前两支气流在滤波前也可以看到，来源于台风右前侧的环流。而偏西气流是一支来自福建中东部地区的辐散性流出气流形成的偏东分量，它的出现将相对干的气流楔入到汇合气流，促进中尺度对流系统的发展，而中尺度系统是造成台风暴雨的直接原因(沈杭锋等，2014)。

按照 Helmholtz 定理可进一步把风场($\boldsymbol{V}$)分解为旋转风($\boldsymbol{V}_\psi$)和辐散风($\boldsymbol{V}_\chi$)。其中 $\boldsymbol{V}_\psi=\boldsymbol{k}\times\nabla\psi$，$\boldsymbol{V}_\chi=\nabla\chi$，$\psi$ 和 χ 分别为流函数和速度势。台风作为大尺度运动系统，旋转风动能是总动能的主要部分(程正泉等，2012)，辐散风分量比旋转风分量小很多，但辐散风在台风系统发展、特别是台风对流系统的发展起了重要的作用(邓涤菲和周玉淑，2011)。从旋转风场可见(图 3c)，在台风移向右侧同样有一条强风速带，最大风速达 22 $m\cdot s^{-1}$以上，在台风北侧有一次风速中心。随着台风的旋转移动，浙江沿海地区有着较为明显的偏东分量旋转风增大过程。从辐散风场可见(图 3d)，在浙江东部沿海存在一个辐合"汇"中心。辐散风大值区位于台湾海峡和福建东部，最大风速中心达 10 $m\cdot s^{-1}$以上，该辐散中心主要提供了西南风分量，这也是辐散风辐合的主要贡献分量。因此，风场分解后可见，在温州沿海地区，台风的旋转风提供了强偏东风动能的输送，此外台风的辐散风"汇"中心也位于该地区，并有较强的西南风分量。

为了进一步了解辐合区的风场变化，从 6 h 局地变化可见(图 4a)，浙中南沿海地区存在一风速增强中心(6 $m\cdot s^{-1}$)，在温州乐清湾处存在东北风分量的显著增强过程。风速增强带来的动量输送有利于出口区空气质点的堆积，从而有利于辐合区的建立和加强。此外，在辐合区右侧存在一水汽通量大值中心(45 $g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$)，这十分有利于温州沿海地区水汽的持续输送和抬升。并且，浙闽交界地区存在一西南风变风分量，在其东侧沿海则存在一东南风变风分量。这几个分量在温州沿海地区产生了明显的辐合效应，这与图 3b 滤波后的风场特征相对应。

从垂直结构可见(图 4b)，119°E 以东 850 hPa 以下为辐合区域，辐合中心略向台风外侧倾斜。强辐合中心位于温州及东侧沿海地区，最大辐合强度达 $-1.0\times10^{-4}\ s^{-1}$左右，与之相对应的是 600 hPa 以下存在强上升气流，最大上升速度位于 850 hPa 附近达 $-1.6\ Pa\cdot s^{-1}$以上。强辐合上升气流对该地区对流云带的爆发式发展起到了重要的触发和增强作用。

垂直风切变是影响对流发展的重要因素之一，从高低层水平风垂直切变可见，强上升气流区与高低层水平风垂直切变大值区相对应，最大垂直风切变达 17 $m\cdot s^{-1}$左右。具体而言，由于"苏拉"的偏心结构，高层台风眼相对低层更为偏西，使得该区域高低层风向有所偏移，300 hPa 为东东北气流，850 hPa 为东东南气流。此外，850 hPa 存在一风速大值中心。850 hPa 风向和风速的变化引起了高低层垂直风切变的增强。从中低层水平风垂直切变可见，在 122°E 以东的海面上，中低层垂直风切变相对较弱。而在 120°～122°E 中低层垂直风切变存在一陡升过程，最高达 18 $m\cdot s^{-1}$左右。具体而言，该区域为沿海岸地区，受地形摩擦和阻挡因素影响，内陆地区 925 hPa 水平风速相对海上明显减弱，从而使该区域中低层垂直风切变明显增强。这也增强了低层气流的堆积，形成强的辐合上升运动。垂直风切变所表征出的不同高度上的风场配置有利于辐合抬升运动的发展。

进一步取辐合区域(图 3a 红色区域)分析风场垂直结构和局地变化。从平均风场局地变化的垂直廓线可见(图 5a)，水平原始风从近地层到 650 hPa 为增大过程，最大平均增幅位于 900 hPa 附近达 4 $m\cdot s^{-1}$；300 hPa 以上为减少过程。即存在低层动量的输入堆积，高层动量的输出作用。相对应的是，近地层到 700 hPa 平均垂直速度变化为负值，即该区域上升速度增加，上升速度最大增幅位于900 hPa 附近达 5.5 $Pa\cdot s^{-1}$。因此，该区域中低层动能的增加对应着上升气流的加强，且动能贡献主要来源于 900 hPa 附近。从分解的旋转风和辐散风变化具体可见，在中低层900～700 hPa区域，旋转风有所增

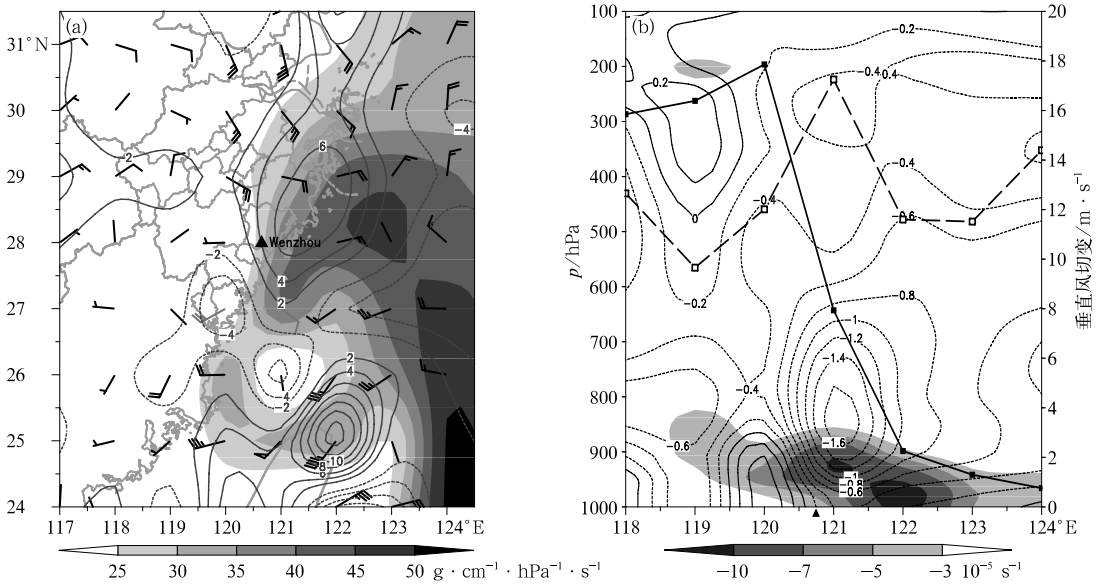

图 4 2012 年 8 月 2 日 12 时(a)925 hPa 的水汽通量场(填色)和 6 h 变风场(风向杆)、全风速局地变化场(等值线,单位:m · s^{-1});(b)沿 28°N 的散度(填色)、垂直速度(等值线,单位:Pa · s^{-1})剖面

[图 4b 中实线表示中低层(925～700 hPa)垂直风切变,虚线表示高低层(850～300 hPa)垂直风切变]

Fig. 4 (a) The 925 hPa water vapor flux (shaded area) and 6 h wind variation (wind barb, unit: m · s^{-1}); (b) the vertical cross-section of divergence field (shaded area) and vertical velocity (contour, unit: Pa · s^{-1}) along 28°N (b) at 1200 UTC 2 August 2012

(Fig. 4b solid line: mid-low level in 925－700 hPa vertical wind shear; dashed line: high-low level in 850－300 hPa vertical wind shear)

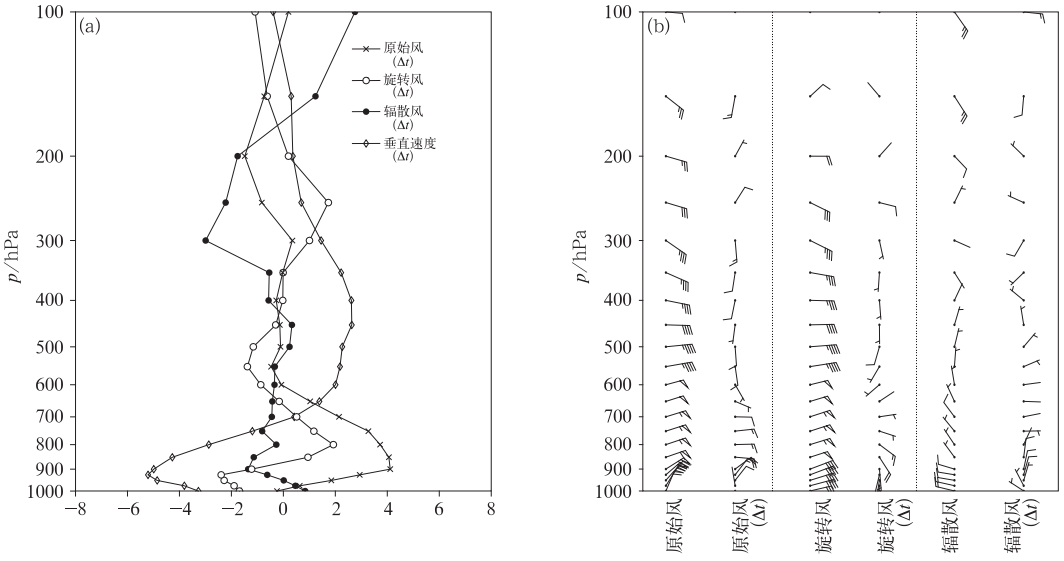

图 5 2012 年 8 月 2 日 12 时(a)图 3a 红色方框内的平均原始风、旋转风、辐散风和垂直速度的 6 h 局地变化垂直廓线图;(b)红框中心点的原始风、旋转风和辐散风和其 6 h 局地变化的垂直风廓线图

Fig. 5 (a) The averaged 6 h original wind, rotational wind, divergent wind and vertical velocity variation in the red box of Fig. 3a; (b) the original wind, rotational wind, divergent wind, vertical velocity and its variation in the red box center of Fig. 3a at 1200 UTC 2 August 2012

强，最大增幅为 2 m·s^{-1}；而辐散风则有所减弱，最大降幅为 1.7 m·s^{-1}。而在高层 300～200 hPa，辐散风变化减小，最大降幅为 3 m·s^{-1}，旋转风略有增加。因此旋转风是低层水平风动能输入增加的主要贡献者，辐散风是高层动能输出的主要贡献者。

从单点风廓线看(图 5b)，中低层偏东风较大，且存在一个风速增强过程，低层旋转风起了主要贡献。此时低层辐散风为西北偏西风，中低层辐散风的存在加强了风场水平辐合进而增强了垂直上升运动。在高层 300 hPa 以上，旋转风逐渐减弱，辐散风逐渐增强，辐散风对风场的影响更为显著。高层辐散风的增强对应着高空辐散的加强(图略)。

因此在"苏拉"台前螺旋云带爆发式发展过程中，中低层动能显著增强，低层空气质点堆积，且旋转风是水平动能输入的主要贡献者。辐散风则加强了风场水平辐合，进而增强了气流垂直上升运动。在高层，辐散风是动能输出的主要贡献者，辐散风的增强，加强了高空辐散。旋转风和辐散风的不同配置形成了强上升运动，从而促进了强螺旋云带的发展。

3　中尺度地面辐合特征

由于再分析资料时间和空间分辨率的局限性，我们从地面风场进一步分析地面辐合的发展演变过程。剔除高山站并经过质量控制后的地面风场可见，10:30(图 6a)温州沿海地区位于台风中心西北侧象限，地面原始风场为较一致的东北气流控制。11 时小时雨量位于温州沿海地区呈西南—东北带状型，中心最大雨量达 21mm 以上。通过中尺度滤波选取 30～60 km 左右的系统后可见(图 6b)，在温州沿海区域 a 处存在一西南风和东北风汇合形成的风场辐合，在区域 b 处则存在一 β 中尺度涡旋。此时台风螺旋云带位于辐合区东侧，呈西南—东北走向，主体较为分散。

中尺度地面辐合带和未来台风降水中心有较好的对应性(周福等，2016)。为了分析辐合区对流系统的发展演变情况，在区域 a，通过风暴追踪和识别算法(SCIT)(Johnson et al，1998)，选取经过该区域的风暴 St1 进行分析。而在区域 b，选取经过该区域的螺旋云带上强对流单体线性移动的质点中心(风暴 St2)进行分析。

11:10(图 6c)，螺旋云带有所发展，偏北一侧云带连接一起略呈弓状。滤波后，区域 a 处仍存在一西南风和东北风的持续性风场辐合。此时 St1 强度趋于最强，50 dBz 以上范围明显增大。11:30(图 6d)，强螺旋云带接近登陆，云带范围继续扩大连成带状，原区域 a 处云带强度减弱到 50 dBz 以下。区域 b 处的 β 中尺度涡旋系统仍然维持，在涡旋西侧存在一偏西风和偏东风的风场辐合，此时该区域螺旋云带强度趋于最强，达 50 dBz 以上。之后，螺旋云带登陆减弱，结构分散，风暴 St1 和 St2 也明显减弱。可见，螺旋云带上对流单体的强度变化和 β 中尺度涡旋或辐合区有着较为明显的对应关系。

从螺旋云带上 St1 和 St2 的时间演变可见，对于 St1(图 7a)，起初 50 dBz 以上强反射率延展高度在 4 km 以下。10:57 起，强反射率延展高度逐渐增加，在 11:09 左右达峰值约 6 km。此时回波顶高达最高约 13 km，之后明显减弱。对应的垂直累计液态含水量起初逐渐增加，于 11:09 左右达峰值约 57 kg·m^{-2}，之后快速减弱。对于 St2(图 7b)，起初 50 dBz 以上强反射率的延展高度较低，11:09 起，强反射率延展高度逐渐增加，在 11:32 左右达峰值约 4 km，11:43 后强度减弱至 50 dBz 以下。此时回波顶高(20 dBz)也达最高约 10 km，垂直累积液态含水量达峰值约 55 kg·m^{-2}。因此，从时间演变上可以清楚地看到螺旋云带上对流单体在进入中尺度辐合区时，强度逐渐增强到鼎盛，之后减弱的过程。

我们以 St1 作为代表进一步分析其垂直结构。当 St1 趋于最强时(11:10)(图 8a，8b)，50 dBz 以上反射率延展到 6 km 左右，回波略向螺旋云带外侧倾斜，这也是螺旋云带垂直结构常有的特征。从径向风可见，在强回波上空约 3～6 km 处有一显著的大速度区，已达到速度模糊，最大径向速度约 −34 m·s^{-1}。之后，随着 St1 的减弱(11:30)(图 8c，8d)，50 dBz 以上强反射率延展高度下降到6 km 以下，范围变窄且更为倾斜，此时径向风大值区范围明显减小。螺旋云带中强对流单体的发展伴随着东北气流大值中心，平均高度在 4.5 km 附近。

取 3 km 高度雷达反演的 TREC 风场来进一步分析更高层关键区的风场特征。TREC 法是将雷达

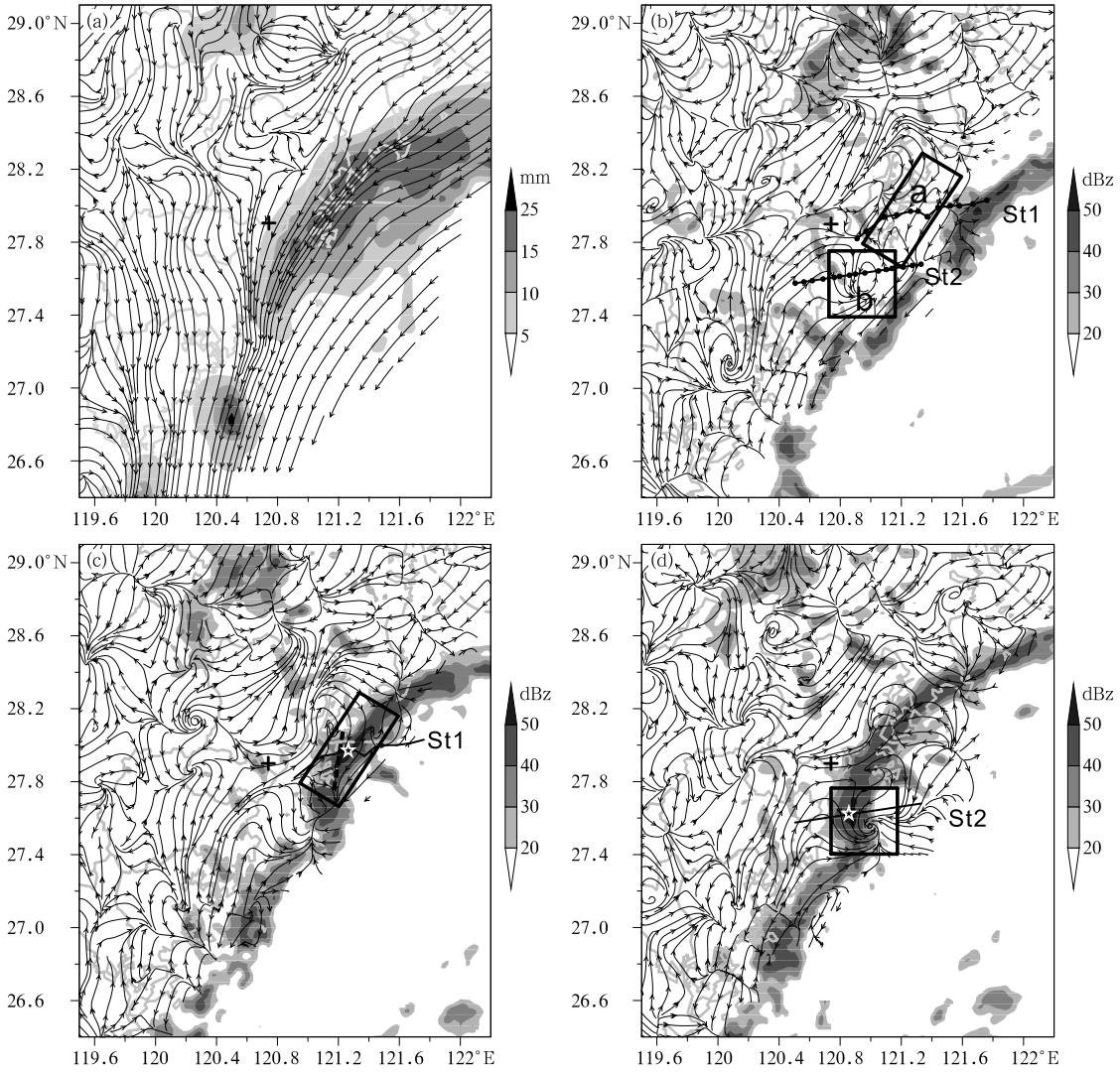

图 6 2012 年 8 月 2 日(a)10:30 实况地面流场和 11 时雨量(阴影);
10:30(b), 11:10(c), 11:30(d)滤波后地面流场和温州 0.5°仰角
雷达反射率(阴影)
(虚线表示辐合线,折线和直线分别表示风暴 St1、St2 的移动轨迹,
白色五角星表示该时刻风暴位置,"+"表示雷达位置)

Fig. 6 (a) The original surface flow field at 1030 UTC and 1 h rainfall (shaded area) at 1100 UTC 2 August 2012 filtering surface flow and Wenzhou 0.5° radar reflectivity (shaded area) at (b) 1030 UTC, (c) 1110 UTC, (d) 1130 UTC 2 August 2012
(Convergence line is represented by dashed line, track of storm St1 by polyline and St2 by straight line, storm location by white star and radar location by +)

回波划分成若干个网格区域,并与上一时次搜索半径内相同大小的各区域做空间交叉相关计算,找到与之最具相关性的区域,连接并计算它们的中心距离除以相应的时间间隔,得到该网格区域的矢量风场(Tuttle and Gall,1999)。

从 3 km 反演风场可见,11:10(图 9a),螺旋云带上 TREC 风在 28°N 以北大部分为偏西气流,28°N 以南则随着台风环流以东北气流为主。此外,在区域 a 附近存在一气旋性辐合,但辐合形态和地面辐合场有所区别。而在区域 b 以西(螺旋云带外侧)存在一偏北和东北风的辐合,它和地面辐合场也存在位置上的偏差。研究表明螺旋云带回波和辐合存在向外倾斜的现象(赵坤等,2007;周海光,2010),文中螺旋云带和辐合结构随高度也有所外倾(图 4b

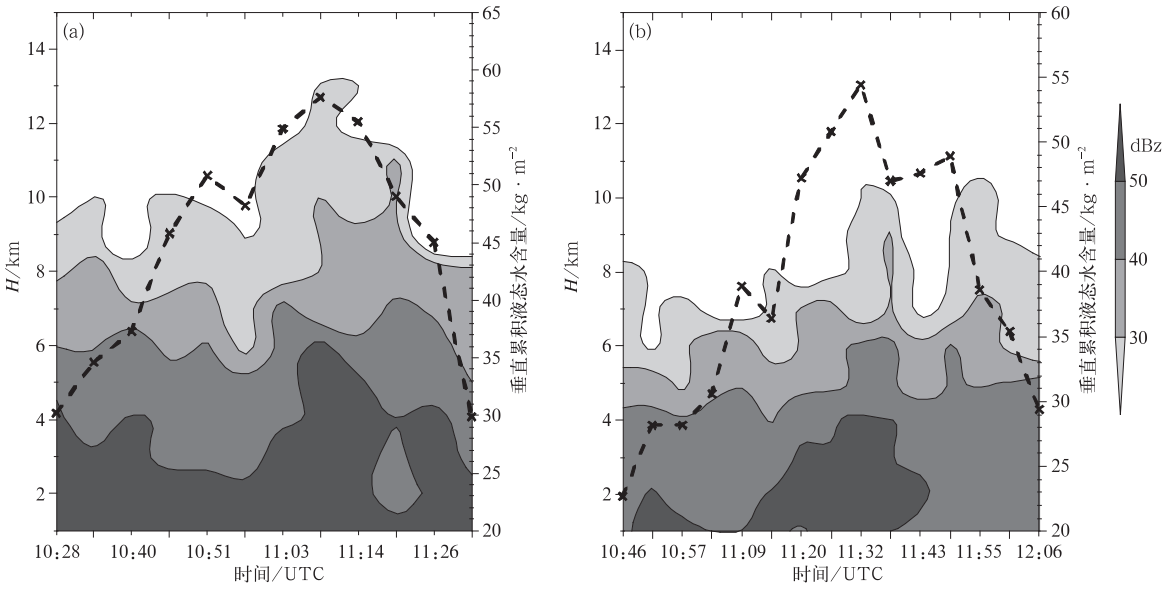

图 7　风暴 St1(a)和 St2(b)反射率垂直时间剖面图

(阴影表示雷达反射率,曲线表示垂直累积液态含水量)

Fig. 7　The height-time cross-section of storm St1 (a) and St2 (b)

(shaded area: radar reflectivity, curve: VIL)

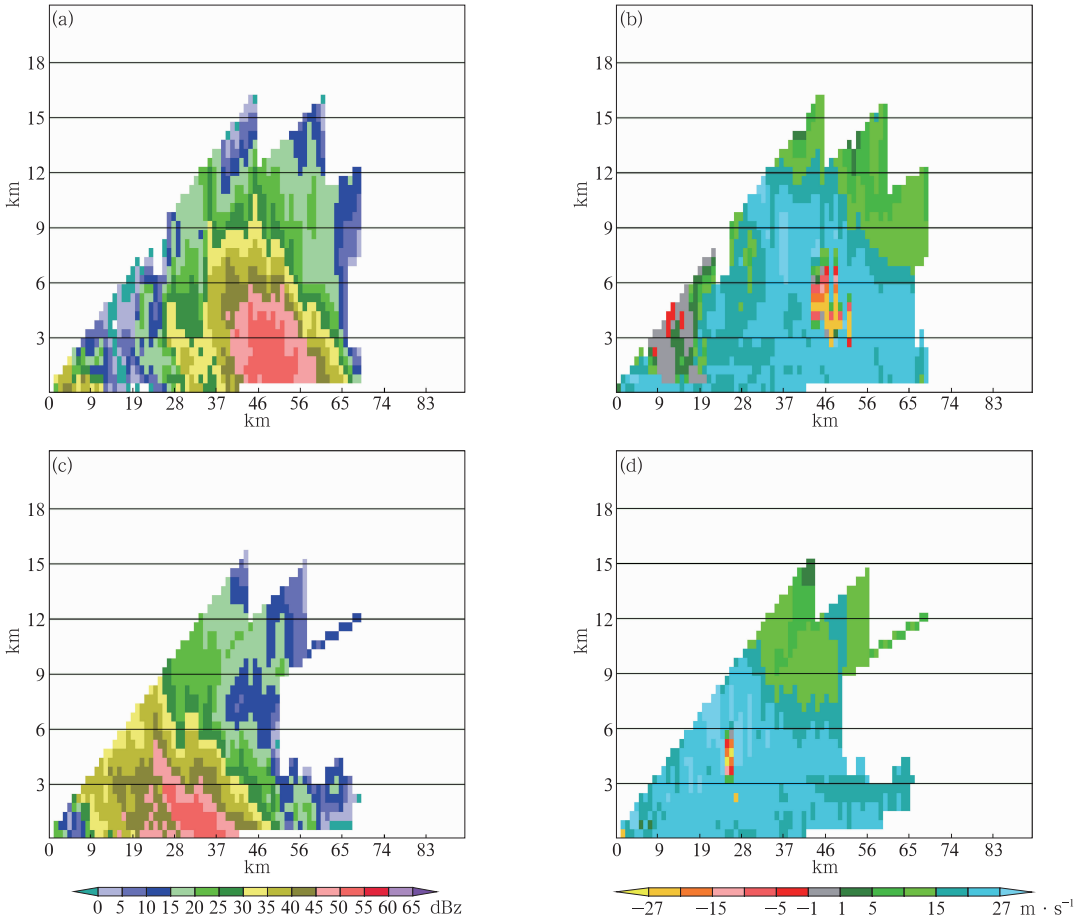

图 8　2012 年 8 月 2 日 11:10(a,b)和 11:30(c,d)从雷达中心沿 82°方位角的反射率(a,c)和径向速度剖面图(b,d)

Fig. 8　Radar reflectivity (a, c) and radial velocity profile (b, d) along 82° azimuth from the radar center at 1110 UTC (a, b) and 1130 UTC (c, d) 2 August 2012

辐合场，图 8a 和 8c 回波所示）。螺旋云带垂直辐合结构的外倾可能造成了区域 b 中 TREC 风辐合与地面辐合的偏差。20 min 后（图 9b），在两个区域内仍有气旋性辐合维持，但辐合形态、位置和地面辐合场均存在一定的偏差。由于 TREC 风表征的是区域回波运动矢量风，加上反演风场本身的误差，在客观上存在一定的不确定性。而地面风场受海陆地形的影响较大，这也会进一步导致中小尺度辐合空间上的差异。但从一定程度上仍能显示出在更高层（3 km）的关键区附近也存在相应辐合，辐合的发展较为深厚，也进一步验证了图 6 的中尺度滤波结果。

从整个过程的辐合演变可见，10 时起，区域 a 内 121.2°E 附近（图 10a）存在一宽约 20 km 的中尺度辐合带，起初辐合强度较为稳定。11:10 左右，辐合增强到最强约 -1.2×10^{-4} s^{-1} 以上。从螺旋云带反射率演变看，当其西移靠近区域 a 时，强度有所增强。当其位于 121.2°E 附近时强度达到最强，最大反射率达 50 dBz 以上。之后螺旋云带有所减弱，辐合强度也减弱至 -6×10^{-5} s^{-1}。区域 b 内 120.8°E 附近（图10b）同样存在一宽约20 km的中

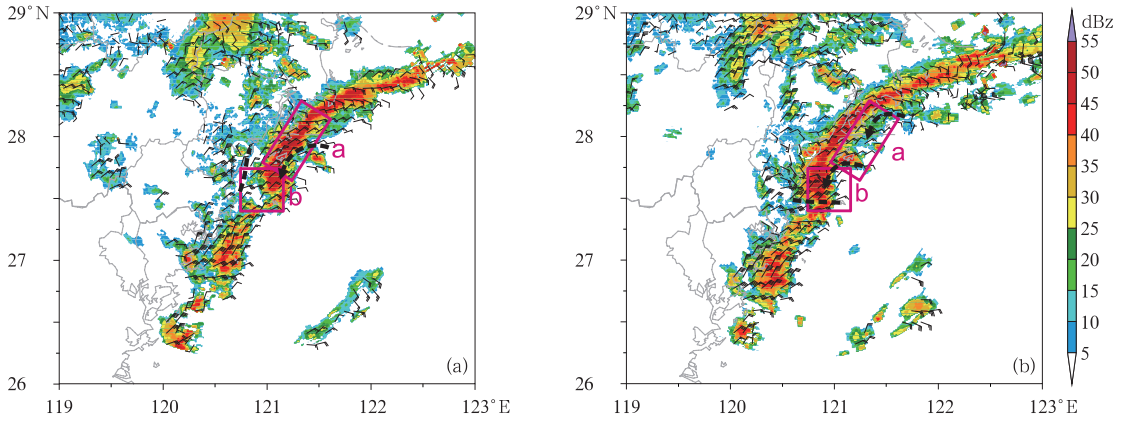

图 9 2012 年 8 月 2 日 11:10(a)和 11:30(b)3 km 高度的雷达反射率（填色）和反演的 TREC 风场（单位：m·s^{-1}）

（图中虚线表示辐合线）

Fig. 9 Radar reflectivity (shaded area) and TREC wind (unit: m·s^{-1}) at 3 km at 1110 UTC (a) and 1130 UTC (b) 2 August 2012

(dashed line: convergence line)

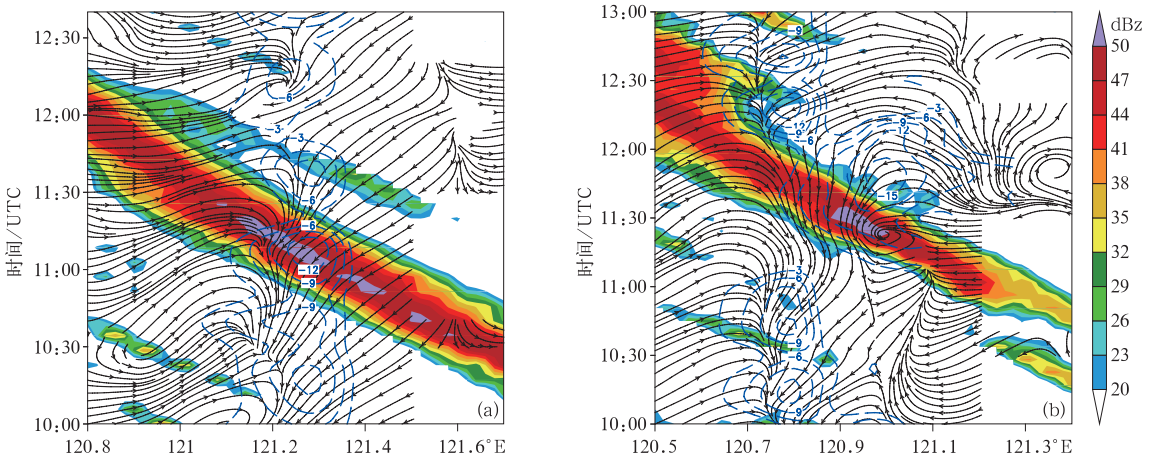

图 10 沿 28°N(a)和 27.6°N(b) 的温州 0.5°仰角雷达反射率（填色）、滤波后地面风场和滤波后地面散度场（等值线，单位：10^{-5} s^{-1}）的时间剖面图

Fig. 10 Time profile of Wenzhou 0.5° radar reflectivity (shaded area), filtering surface flow and filtering surface divergence field (contour, unit: $10^{-5}s^{-1}$) along 28°N (a) and 27.6°N (b)

尺度辐合带。11:30 左右，辐合达最强约 $-1.5\times10^{-4}\ s^{-1}$ 以上，并存在一中尺度涡旋。当螺旋云带西移靠近区域 b 时，螺旋云带发展最强达 50 dBz 以上。之后，辐合带和螺旋云带逐渐减弱。因此在两个关键区内，中尺度辐合带和螺旋云带增强的时间和范围均相互对应，中尺度辐合带对螺旋云带强度的增强有着一定的正反馈作用。

4　结论与讨论

本文采用多种资料、多种技术方法分析"苏拉"台前强螺旋云带爆发式发展的辐合场特征。主要结论如下：

(1) 从中尺度滤波场、变风场以及风场分解后的辐散风可见，"苏拉"台前螺旋云带形成于浙东南沿海中低层大范围辐合背景下。此外，垂直风切变所表征出的不同高度上的风场配置有利于辐合抬升运动的发展。

(2) 在低层，旋转风是水平动能输入的主要贡献者(最大位于 900 hPa)，它加强了低层动量堆积，辐散风则加强了风场水平辐合；在高层，辐散风是动能输出的主要贡献者(最大位于 300 hPa)，辐散风的增强，加强了高空辐散。旋转风和辐散风的不同配置形成了强上升运动，从而促进了强螺旋云带的发展。

(3) 对地面风场进行中尺度滤波后，在选取的两个关键区内可见明显的中尺度辐合或涡旋，且辐合在更高层仍有一定的反映。中小尺度辐合与螺旋云带中对流云团的发展相互对应、相互反馈。

由于实况资料时间和空间分辨率的限制，本文对"苏拉"台前螺旋云带爆发式发展的辐合特征只进行了初步分析。今后还需利用中尺度数值模式进行高分辨率数值模拟，并通过适当的敏感性试验来深入研究该螺旋云带形成、演变及其辐合特征。

参考文献

陈海燕，严洌娜，娄伟平，等，2011. 热带气旋致灾因子综合影响强度评估指标研究[J]. 热带气象学报，27(1)：139-144.

程正泉，陈联寿，李英，2012. 登陆热带气旋海马(0421)变性加强的诊断研究[J]. 气象学报，70(4)：628-641.

邓涤菲，周玉淑，2011. 无旋转风分量在台风"桑美"急剧增强和急剧减弱过程中的分析和应用[J]. 高原气象，30(2)：406-415.

冀春晓，赵放，高守亭，等，2012. 登陆台风 Matsa(麦莎)中尺度扰动特征分析[J]. 大气科学，36(3)：551-563.

沈杭锋，高天赤，周春雨，等，2014. 台风海葵引发浙西山区大暴雨的成因[J]. 气象，40(6)：733-743.

余贞寿，冀春晓，董美莹，等，2017. 浙江时间多尺度台风暴雨增幅特征的统计研究[J]. 气象，43(12)：1496-1506.

章国材，矫梅燕，李延香，2007. 现代天气预报技术和方法[M]. 北京：气象出版社：140-143.

赵坤，周仲岛，胡东明，等，2007. 派比安台风(0606)登陆期间雨带中尺度结构的双多普勒雷达分析[J]. 南京大学学报(自然科学版)，43(6)：606-620.

周福，钱燕珍，方艳莹，等，2016. "灿鸿"台风造成浙江东北部大暴雨成因分析[J]. 气象，42(3)：305-313.

周海光，2010. 罗莎(0716)台风外围螺旋雨带中尺度结构的双多普勒雷达试验研究[J]. 气象，36(3)：54-61.

周玲丽，翟国庆，王东海，等，2011. 0713 号"韦帕"台风暴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.

周玉淑，邓涤菲，李建通，2014. 登陆热带气旋 Bilis(0604)暴雨增幅与风场结构变化[J]. 大气科学，38(3)：563-576.

Akter N，Tsuboki K，2012. Numerical simulation of cyclone sidr using a cloud-resolving model：characteristics and formation process of an outer rainband[J]. Mon Wea Rev，140(3)：789-810.

Chen Lianshou，Li Ying，Cheng Zhengquan，2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. Adv Atmos Sci，27(5)：967-976.

Johnson J T，MacKeen P L，Witt A，et al，1998. The storm cell identification and tracking algorithm：an enhanced WSR-88D algorithm[J]. Wea Forecasting，13(2)：263-276.

Li Qingqing，Wang Yuqing，2012. A comparison of inner and outer spiral rainbands in a numerically simulated tropical cyclone[J]. Mon Wea Rev，140(9)：2782-2805.

Tuttle J，Gall R，1999. A single-radar technique for estimating the winds in tropical cyclones[J]. Bull Am Meteor Soc，80(4)：653-668.

Yamasaki M，2005. A study of the mesoscale structure of typhoon Flo (T9019)：a case of COMPARE model intercomparison[J]. J Meteor Soc Japan，83(6)：1057-1084.

Zhou Lingli，Zhai Guoqing，He Bin，2011. Numerical study of the mesoscale systems in the spiral rainband of 0509 typhoon Matsa [J]. Adv Atmos Sci，28(1)：118-128.