

理想模拟的温带气旋中冷暖输送带特征分析

王迪^{1,2,3}, 张熠¹, 储可宽¹, 王新敏^{2,3}

1 南京大学大气科学学院, 中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210093

2 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003

3 河南省气象台, 郑州 450003

摘要 本文利用 WRF 理想斜压波模式模拟了理想湿大气中温带气旋的快速发展过程, 采用拉格朗日轨迹筛选方法识别了气旋内部冷、暖输送带结构, 分析了沿着输送带轨迹的物理量演变特征, 探究了输送带气流对气旋降水结构的影响。本文在再现前人研究结论的基础上, 发现了更精细的输送带结构特征, 尤其是对冷输送带特征有了进一步认识。研究表明, 根据相对气旋中心运动特征可将暖输送带划分为“前倾上升”和“后倾上升”两支。两支气流均起始于对流层低层冷锋前暖区内, 旋转上升到对流层中高层出流区后分别向气旋中心的下游和上游运动, 并在中高层产生负位涡扰动, 促进高空系统发展。同时, 暖输送带向上层输送水汽, 影响锋面附近降水中心的形成和维持。在对冷输送带的研究中, 本文证实了前人研究描述的上升类和低层运动类特征, 而且发现其可以更精细地呈现出四支气流结构。“前倾上升”和“后倾上升”两支气流的初始位置靠近暖锋, 上升运动到对流层中层后分别向气旋中心的下游和上游运动, 利于促进暖锋附近降水形成; 而“环气旋前倾”和“环气旋后倾”两支气流始终在对流层低层运动, 初始远离暖锋朝向气旋中心运动, 水汽含量增加, 随后环绕气旋中心缓慢上升运动到气旋西侧后分别向气旋下游和上游下沉, 这两支气流导致了气旋西北侧弱降水的发生。

关键词 暖输送带; 冷输送带; 温带气旋; 结构特征; 理想模拟

文章编号

中图分类号

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.20190

Characteristic Analysis of the Cold and Warm Conveyor Belts in an Idealized Extratropical Cyclone Simulation

WANG Di^{1,2,3}, ZHANG Yi^{1*}, CHU KeKuan¹, WANG Xinmin^{2,3}

1 Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 CMA • Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China

3 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003, China

收稿日期 2020-08-06; 网络预出版日期

作者简介 王迪, 男, 1991 年出生, 工程师, 主要从事灾害性天气研究和预报。E-mail: Wdimail@126.com

通讯作者 张熠, E-mail: yizhang@nju.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41775057 41675053, 国家重点研发计划 2017YFC1501601

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 4177505 41675053), National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1501601)

Abstract The idealized moist baroclinic wave simulation was performed to describe the rapid development of extratropical cyclone. Then the warm and cold conveyor belts were identified with the use of Lagrangian trajectory selection method and physical quantities along their trajectories were diagnosed, followed by the analysis of their impacts on the precipitation. The study reappraises the previous conclusions of conveyor belts and finds some more refined structures, especially for the cold conveyor belts. As the result shows that, the warm conveyor belts could generally split into “forward-sloping ascent” and “rearward-sloping ascent” branches. They originate in the warm sector ahead the cold front and low-level, and move respectively forward and rearward relative to the cyclone center when they spiral upward to the upper and middle level, generating negative PV disturbance upon the outflow region and promoting the development of upper system. They also transport abundant moisture upward and influence significantly the formation and maintenance of the precipitation extremum around the front. The cold conveyor belts are confirmed to represent two branches of ascent and remaining low-level as described by the previous researches, and then could be classified finely into four branches. The “forward-sloping ascent” and “rearward-sloping ascent” branches originate near the warm front and curve separately forward and rearward relative to the cyclone center when rising upon the middle level, benefiting to the rainfalls around the warm front. While the branches of “wrapping around the cyclone and forward-sloping” and “wrapping around the cyclone and rearward-sloping”, always staying in the lower level, move from east of the surface cyclone far from the warm front toward the cyclone center whenever their vapor content increases, and then descend respectively anticlockwise and clockwise to the downstream and upstream of the cyclone after travelling slowly upward west of the cyclone around the center, inducing the little precipitation northwest of the cyclone.

Keywords Warm conveyor belt; Cold conveyor belt; Extratropical cyclone; Structure characteristics; Idealized simulation

1 引言

温带气旋是中纬度地区非常典型的高影响天气系统,它的出现极易引起风暴潮、狂风、暴雨、沙尘暴等灾害性天气(赵琳娜和赵思雄, 2004; 赵兵科等, 2008; 刘宁微等, 2009; 赵思雄等, 2018; Fu et al., 2020), 对当地及下游地区的天气和气候产生重大影响。尽管针对温带气旋的研究由来已久, 不过随着观测手段和数值模拟精细化水平的不断提升, 在当下探究温带气旋的精细结构仍具有重要意义。

以往的研究(如 Shaw and Lempfert, 1906; Bjerknes, 1919; Bjerknes and Solberg, 1922; Carlson, 1980; Browning and Pardoe, 1973; Young et al., 1987; Wernli, 1997; 熊秋芬等, 2013; Smart and Browning, 2014; Catto et al., 2015; 赵宇等, 2018) 表明, 输送带气流是温带气旋中引发灾害性天气的重要结构, 特别是冷、暖两类输送带。提升对输送带特征的认识, 对于准确把握气旋产生的灾害性天气, 深入理解中纬度天气系统(Dacre et al., 2019), 甚至改进数值模式预报性能(Gray et al., 2014) 都非常有价值。

暖输送带(Warm Conveyor Belt)是从对流层低层低纬度向极地运动且具有上升特性的暖湿气流, 对气旋云系和降水的形成影响显著(Harrold, 1973; Browning, 1986; Browning, 1990; Eckhardt et al., 2004; Flaounas et al., 2018)。它在上升过程中可以将低层水汽、动量以及边界层内污染物等输送到自由大气(Sinclair et al., 2008), 同时上升气流中位涡的非绝热变化也会对高空脊区的发展、罗斯贝波传播以及下游天气过程产生重要影响(Methven, 2015)。Carlson(1980)认为暖输送带是在暖区中平行冷锋向北运动并且在暖锋上方反气旋式运动到对流层上层的气流。Browning(1986)把暖输送带划分为“相对冷锋后倾上升”和“相对冷锋前倾上升”两支气流。随后的研究(Browning and Roberts, 1994; Browning, 1997; Martínez-Alvarado et al., 2014)又依据暖输送带上升位置的不同及对气旋云系形成的重要性, 将其归纳为主暖输送带(WCB1)和次暖输送带(WCB2), WCB1 沿着冷锋反气旋式运动到对流层顶, 而 WCB2 绕着气旋中心气旋式运动到对流层中层。而 Schemm et al.(2013)发现在理想湿斜压波发展过程中暖输送带主要在后弯暖锋区(bent-back front)附近上升。

冷输送带(Cold Conveyor Belt)是从气旋低压东部冷区向低压中心运动的气

流带,是逗点云系的重要组成部分(Carlson, 1980),有利于气旋尾部强阵风的出现(Smart and Browning, 2014; Coronel et al., 2016),而且它的温湿特性影响着地面降水相态和强度(Schultz, 2001)。对于冷输送带结构, Carlson (1980)认为它从地面低压东侧的高压区后部出发,反气旋式运动并且在低压中心附近迅速上升到对流层中高层。Browning (1986)指出它也可能环绕低压中心气旋式下沉。Mass and Schultz (1993)识别的冷输送带在对流层低层从暖锋北侧气旋式运动到冷锋区。Shultz (2001)的研究也分析出在对流层低层呈气旋式运动的冷输送带,并且认为 Carlson(1980)识别的冷输送带应该是介于气旋式冷输送带和暖输送带之间的变换形态。Ziv et al. (2010)对地中海地区 8 次冬季气旋内冷输送带结构的研究发现,所有的气旋都存在始终在低层运动的冷输送带,而有一半不具有反气旋式上升气流带。Schemm and Wernli (2014)认为冷输送带上升运动较弱,主要在对流层低层沿着后弯暖锋气旋式运动。

前人的研究工作都认识到输送带的重要作用,并从不同角度进行了探究分析,但是对于其结构特征的认知还是有所不同。为了进一步探究冷、暖输送带气流的精细结构特征,考虑到理想试验能够较好再现气旋典型结构并能有效消除地形、个例特殊性等因素的影响(Schemm et al., 2013),本文采用 WRF 理想斜压波模式模拟湿过程中温带气旋的发展演变过程,并在此基础上识别并探究冷、暖输送带的结构特征。本文第 2 节主要阐述数值模式及模拟方案的设计,第 3 节着重分析湿过程中理想温带气旋的演变特征,第 4 节侧重探究输送带结构和物理特征,最后是结论和展望。

2 数值模式和试验设计

本文采用 WRF-ARW V3.5.1 模式对湿物理过程中的理想斜压波进行数值模拟,参数化方案选用 Kessler 暖云微物理方案(Kessler, 1969)叠加 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案(Kain and Fritsch, 1990,1993),同时关闭地面通量交换、摩擦和辐射等不影响气旋结构的物理过程,使得构造的模式大气更“干净”,从而突出斜压和非绝热加热对气旋发展的作用。模式假定在 f 平面下,科氏参数取常数 $f=10^{-4}s^{-1}$,模式层顶设为 16 km,采用通量形式的完全可压缩非静力方程作为控制方程组。垂直方向采用地形跟随坐标系,均匀划分为 64 层,分辨率为 250 m。水平方向采用 Arakawa-C 网格,模拟的矩形区域网格分辨率为 20 km,东西方向

长 14000km，采用周期性边界，南北方向宽 8000km，设为对称性边界。

为使模拟的斜压波得到快速增长，研究参考 Tan et al. (2004)、张熠和谈哲敏(2007) 改进了 WRF 理想斜压波模式的初始场，采用位涡反演方法由二维位涡场反演得到东西向均匀的二维准地转平衡的斜压基本气流场。然后根据位涡发展理论 (Hoskins et al.,1985)，加入三维温度扰动异常破坏二维平衡场的稳定性，从而触发斜压波扰动发展过程。温度扰动的振幅为 2K，水平半径为 1000km，垂直半径为 8km，扰动中心大体位于模拟区域内东西方向 900km、南北方向 4100km 且垂直方向 8km 处。这样构造的初始场具有强烈的斜压性，在局地热力不稳定的触发下非常有利于气旋的快速发展。图 1 显示模式初始场的南北方向垂直剖面，在对流层顶附近存在中心值超过 65 m/s 的西风急流，急流中心随着高度增加向南倾斜，急流中心区等位温线密集，对流层顶折叠明显。初始温湿场呈现“南暖北冷”、“南湿北干”的结构，在对流层低层更明显，与实际大气特征基本一致。

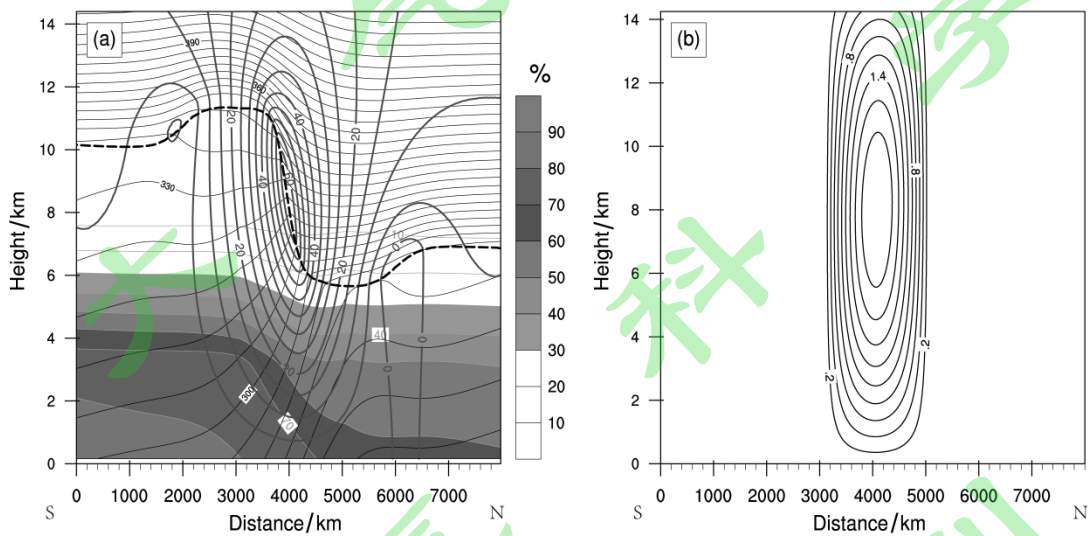


图 1 模式初始基本场(a)和温度扰动(b)的垂直剖面。图(a)中粗实线为纬向风速等值线（间隔 5 m/s），细实线表征位温（间隔 6 K），粗虚线为对流层顶（1.5 PVU 的等位涡线），填色表示相对湿度（间隔 10 %），而图(b)中等值线表示温度扰动（间隔 0.2 K）。

Fig.1 Vertical profile of initial basic field(a) and temperature perturbation(b) in the numerical model. The thick solid lines indicate the zonal wind speed(every 5 m/s), thin solid lines show potential temperature(every 6 K), and thick dash line represents the 1.5 PVU tropopause with relative humidity shaded (every 10%) in (a) while solid lines are temperature perturbation(every 0.2K) in (b).

3 理想斜压波发展过程

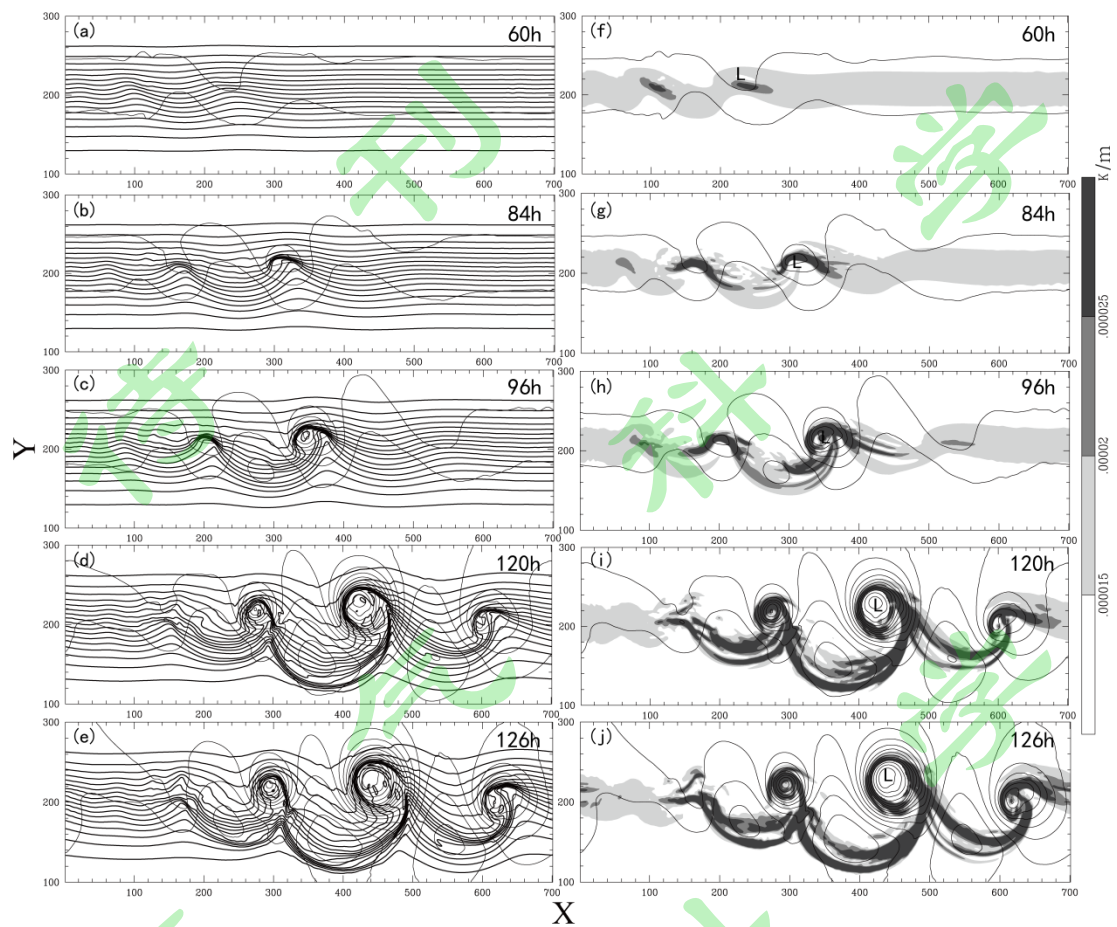


图2 锋面气旋在对流层低层 925hPa 的发展演变特征。图(a)-(e)中细实线表征等高线（间隔 50gpm），粗实线为等位温线（间隔 2K）；图(f)-(j)中细实线为等高线（间隔 50gpm），符号 L 标识主气旋的中心，填色表示水平位温梯度（间隔 0.5K/100km）。

Fig.2 The development evolution of frontal cyclone in the lower troposphere of 925 hPa. Thin and thick lines respectively indicate height (every 50gpm) and potential temperature(every 2K) in Fig.(a)-(e). Thin lines indicate height (every 50gpm) and Symbol “L” denotes the primary cyclone centre while the horizontal potential temperature gradient shaded(every 0.5K/100km).

图2 为模拟的斜压波在低层 925hPa 的演变特征。模式积分至 60 h，模拟区域内温压场扰动明显，出现一条宽广的斜压带，形成深厚低压槽（标识“L”），若以水平位温梯度超过 2.5K/100km 的区域代表锋区，低槽附近出现西北-东南向的暖锋区，而冷锋锋生相对较弱。至 84 h，低槽发展为闭合低压中心（主气旋），同时在其上下游均出现新的低压扰动，气旋中心附近等位温线更加密集，冷、暖锋锋生作用加强，暖锋环绕气旋中心弯曲延伸，形成典型“后弯”结构(bent-back)。

96 h 以后冷锋显著增强，近乎与暖锋正交，形成“T 状”锋区（T-bone zone），同时暖空气进一步收缩成一条伸向气旋中心的暖舌。120 h 时，暖舌断裂形成孤立暖心（warm seclusion），锋面锢囚，此时主气旋达到成熟阶段。126 h 以后冷锋逐渐远离暖锋，主气旋趋于消亡（图略）。尽管与以往的研究（张熠和谈哲敏, 2007; Schemm et al., 2013; Schemm and Wernli, 2014）采用不同的数值模式和初始场构造，但是模拟的气旋演变结果却非常类似，均符合 Shapiro-Keyser 气旋模型（Shapiro and Keyser, 1990）主要特征，大体都经历了初生、增强、锢囚、衰亡四个阶段，呈现出典型的暖锋“后弯”、“T 状”锋区以及孤立暖心结构。这说明本试验设计合理，捕捉到了温带气旋发展的主要特征，可用于分析温带气旋的结构。

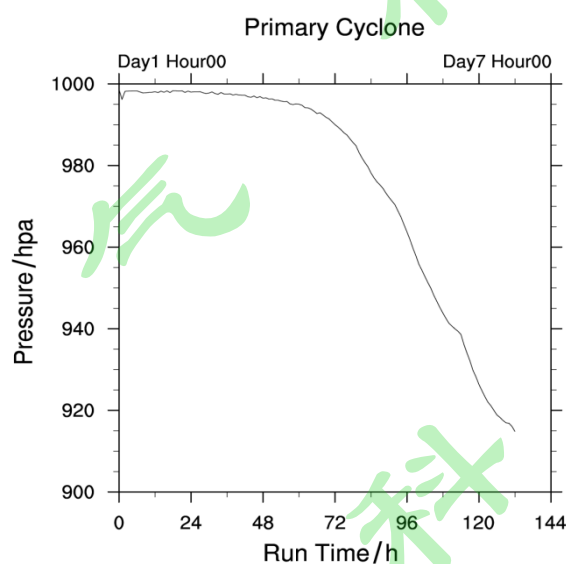


图3 主气旋中心气压时间演变特征，图中纵轴表示海平面气压（单位：hPa），横轴为模拟时间（单位：h）。

Fig.3 Temporal evolution of central pressure values of the primary cyclone, where the vertical axis represents sea level pressure(units: hPa) and the horizontal is the run time (units: h).

从主气旋中心气压变化特征来看（图3），模式运行前48 h内气旋发展缓慢，此后随着高低空系统的相互作用，气旋进入快速发展阶段（Zhang et al., 2016），中心气压迅速下降，在96-120 h时段内中心气压递减率达到37 hPa/24 h，满足爆发性气旋的强度标准（Sanders and Gyakum, 1980）。下文将选取这一时段来分析气旋内部的输送带结构特征。

4 理想温带气旋的三维输送带结构

由于以往研究对输送带的定义多是定性描述，在客观分析输送带时需要将定性描述转化为定量指标，不过目前尚未形成统一的定量筛选标准。Wernli and

Davies (1997) 将输送带定义为连贯的轨迹束, 并运用拉格朗日方法进行识别追踪。首先通过后向或前向追踪计算一定时段内大量空气块的运动轨迹, 然后设定一种或多种物理特征筛选标准 (如运动到高层时位涡超过 2 PUV、运动过程中比湿下降超过 10 g/kg 等) 来识别输送带。本文借鉴这种思路, 利用 WRF 后处理软件 RIP (Read/Interpolate/Plot) 进行轨迹计算及绘图, 该软件提供的轨迹计算模块主要利用速度场(u,v,w)采用线性插值方法计算轨迹, 详细说明参见软件说明书第 6 节 (<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/ripug.htm>)。本文分析了主气旋锋面附近大量格点气块从 96 h 到 120 h 的前向运动轨迹, 然后根据物理特性不同设定相应标准筛选输送带, 并通过轨迹相对气旋中心运动的结构特征归纳分类。为使分析的气块轨迹既具有气象学统计意义又保持样本数目一致性, 对各类输送带均选取特征最明显的 30 条轨迹进行合成分析。

4.1 暖输送带

在前人的描述中, 暖输送带一般始于对流层低层暖区内且具有明显上升特性。Schemm et al.(2013)采用 48 小时内上升高度超过 600hPa 筛选主气旋中暖输送带, 采用 48 小时内上升高度超过 525hPa 筛选下游气旋中暖输送带。参照此标准, 本文假定暖输送带 96 h 时刻从 925 hPa 冷锋前暖区内出发, 24 小时内上升到 500 hPa 以上。

图 4 所示为筛选的暖输送带在 96-120h 内相对气旋中心的运动轨迹, 依据轨迹的运动形态可划分为两支气流。一支暖输送带起初在暖区内一直向北运动, 随后在暖锋附近上升, 当到达对流层上层时逐渐顺时针向气旋下游运动。与 Schemm et al.(2013)一样, 可定义为“前倾上升”暖输送带 (简称 fWCB)。从沿着暖输送带轨迹各物理量及其平均值随时间变化特征来看 (图 5), fWCB 在 102 h 之前垂直速度近乎为零, 向北水平运动过程中逐渐趋于饱和, 比湿、位温及位涡保持守恒。102-112 h 内 fWCB 在暖锋附近快速上升, 平均垂直速度最大达 0.6 m/s, 最终到达 330 hPa 高度层附近。在 105 h 之前, 气流柱垂直拉伸, 相对涡度始终为正 ($AVO > 1f$, f 为地转涡度特征值, 取常数 $10^{-4} s^{-1}$, 下同)。在水汽相变加热作用下, 位涡平均从 0.3 PVU 增加到 0.8 PVU。此后 fWCB 向下游运动进入高压脊区, 相对涡度逐渐转为负值, 同时凝结潜热释放减弱, 导致位涡逐渐减小到零值附近, 在高层出流区形成明显负位涡异常, 有利于高空高压脊加强, 从而促进高

层槽脊系统发展 (Hoskins, 2015)。上升过程中水汽饱和凝结, 比湿迅速下降, 产生大量降水。图 6 (a) 给出 102-108h 内累计降水和 fWCB 水平轨迹分布, 降水呈“逗点”状分布在冷、暖锋附近, 气旋东侧及西北侧均出现降水极值中心区, 以东侧降水最强。此时段内 fWCB 正位于气旋东侧降水极值区上空, 从气旋南侧暖区向西北方向旋转上升, 6h 内比湿平均减少 6.5 g/kg 以上 (图 5)。为了更清晰地展示暖输送带与降水落区的配置, 图 6 (b) 分析了 106h 沿着 fWCB 经过降水中心时轨迹大致位置的垂直剖面, 此时对流层 400hPa 以下均为饱和大湿度区, 在 600hPa 左右出现南北两个垂直速度大值中心, fWCB 出现在两个速度中心区内, 上升速度均超过 0.4 m/s, 最高可达 1.26 m/s, 绝对涡度平均是地转涡度的 1.6 倍 (图 5)。112h 以后气流带主要向着气旋下游水平运动, 在对流层高层略有下沉, 位温基本保持 312K。整个运动过程中 fWCB 相当位温基本守恒, 近乎湿绝热变化。

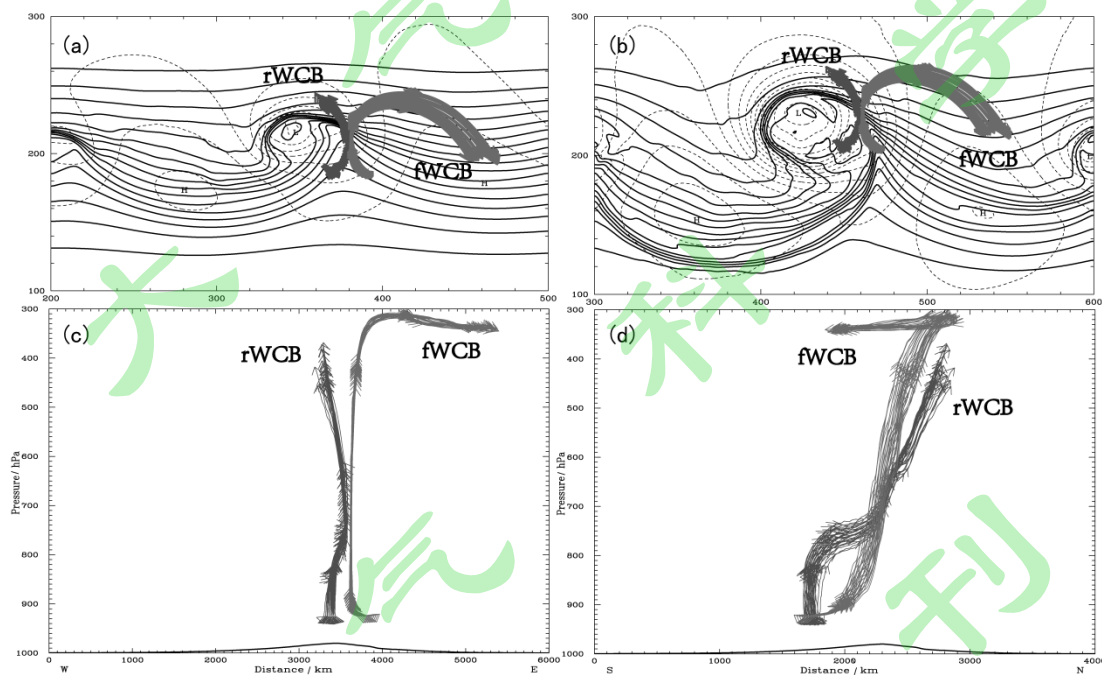


图 4 暖输送带在 96-120 h 内相对气旋中心运动轨迹的示意图。图中灰色轨迹矢为“前倾上升”支 (fWCB), 黑色轨迹矢为“后倾上升”支 (rWCB), 箭头间隔 6 h。图(a)为暖输送带轨迹的水平投影, 叠加 96 h 的 925 hPa 等位温线和等高线; 图(b)与(a)同, 但背景叠加的是 120 h 的温压场; 而图(c)和图(d)分别为轨迹在东西方向和南北方向的垂直投影。

Fig.4 Trajectories of warm conveyor belts relative to the cyclone motion during 96-120 h. The gray streamlines are “forward-sloping ascent”(fWCB) branches and the black trajectories are “rearward-sloping ascent”(rWCB), where

the arrows are added every 6 h. Shown are horizontal snapshot at (a)96 h and (b)120 h, where solid lines are potential temperature(every 2 K) and dash lines are height(every 50 gpm) at 925 hPa while vertical profile of trajectories are presented in the (c) west-east and (d) north-south direction.

另一支暖输送带从冷锋附近暖区出发沿着冷锋向北倾斜上升,随后沿着后弯暖锋相对气旋中心逆时针后向倾斜上升(图4)。这支气流与前人(Browning, 1986; Schemm et al., 2013)描述的“后倾上升”暖输送带(简称 rWCB)特征大体类似,不过 Browning(1986)和 Schemm et al.(2013)分析的 rWCB 始终沿着冷锋运动,文中分析的 rWCB 却先后沿着冷锋和后弯暖锋,出现两次位置和速率明显不同的上升过程。由图5可知, rWCB 在运动过程中仍是湿绝热变化,相当位温与 fWCB 相差不大。在 96-112 h 内气流沿着冷锋缓慢上升到 740 hPa 左右,比湿减少,位温升高,位涡略有波动,各物理量相比于 fWCB 变化缓慢。112h 以后,气流沿着后弯暖锋爬升,上升幅度平均约为 300 hPa/8h,位温大幅增加,水汽含量迅速递减。类似 fWCB,在 117 h 之前相对涡度迅速增大,平均位涡增加到 0.6 PVU。此后气流相对涡度减小,潜热释放减弱,最终在高层 420hPa 高度位涡不断降低到 0 值附近,同样在高层产生负位涡异常区。rWCB 在上升过程中比湿平均下降 7.5 g/kg,同样产生大量水汽凝结,有利于冷锋前降水 and 气旋东侧降水极值中心区的出现(图略)。总的来说,两支暖输送带初始温湿特性相差不大,均对降水的增强和维持具有重要作用,但 fWCB 垂直上升更旺盛,各物理量变化更强烈。

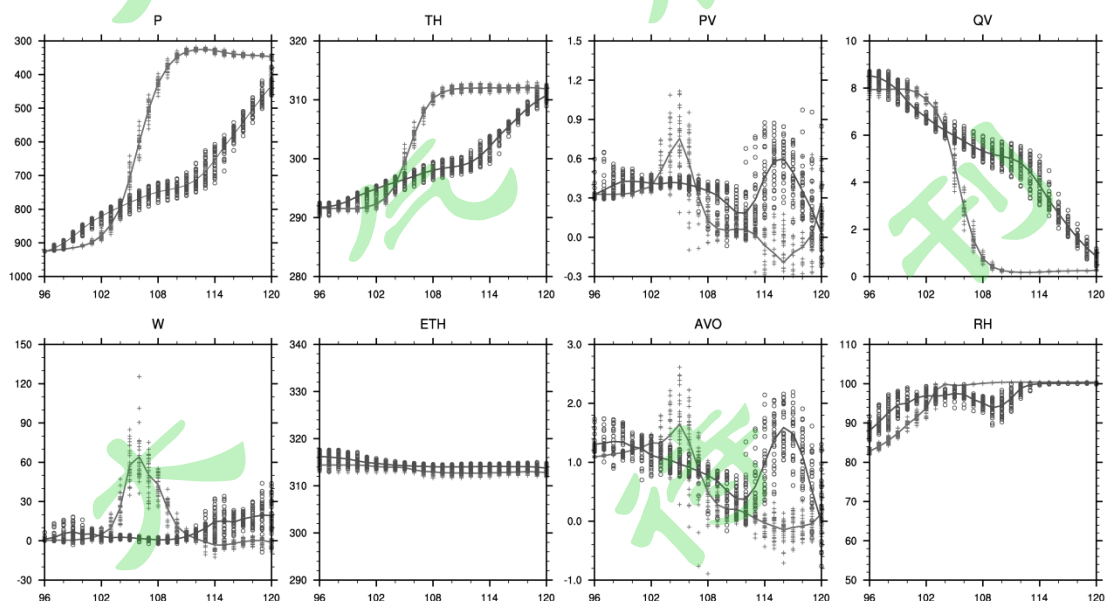


图5 沿暖输送带的物理量随时间演变特征。图中各物理量符号中分别代表: P 气压 (单位: hPa), TH 位温 (单位: K), PV 位涡 (单位: PVU), Qv 比湿 (单位: g/kg), W 垂直速度 (单位: 10^{-2} m/s), ETH 相当位

温（单位：K），AVO 绝对涡度（单位： $1 f$ ， f 为地转涡度），RH 相对湿度（单位：%）。图中横坐标为模拟时刻（单位：h），纵坐标为各物理量的数值；灰色加号和黑色圆圈分别表示不同时刻“前倾上升”（fWCB）

和“后倾上升”（rWCB）支气流轨迹点的特征值，实线为 30 条轨迹上各物理量的平均值。

Fig.5 Temporal evolution of key parameters and average values along the warm conveyor belts, shown as pressure(P, units:hPa), potential temperature(TH, units: K), potential vorticity(PV, units: PVU), specific humidity(Qv, units: g/kg), vertical velocity(W, units: cm/s), equivalent potential temperature(ETH, units: K), absolute vorticity(AVO, units: $1 f$, f denotes geostrophic vorticity), relative humidity(RH, units: %). The horizontal axis is the simulation time(units: h). Gray plus signs and black circles indicate fWCB and rWCB respectively with solid lines representing the average values.

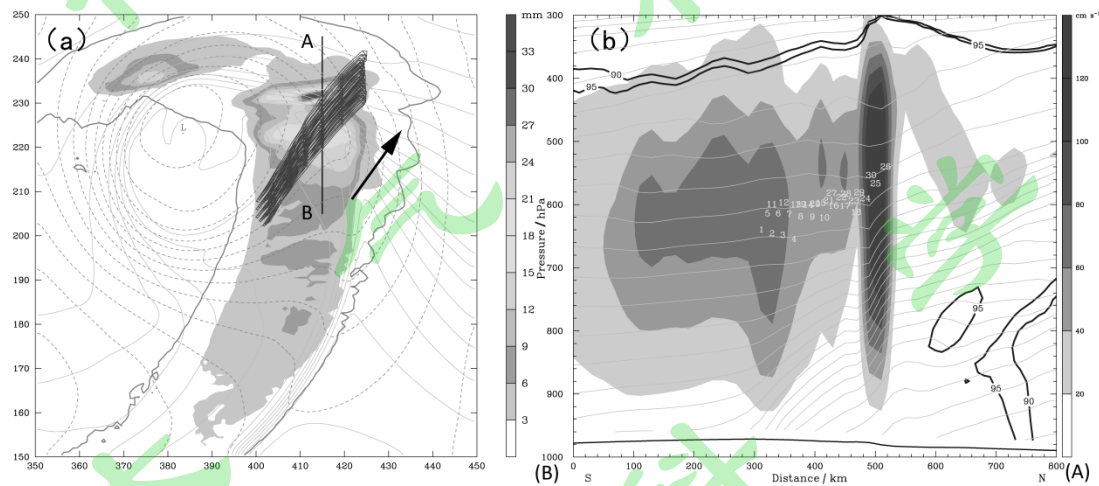


图 6 (a) 108 h 的过去 6 小时累积降水与“前倾上升”暖输送带（fWCB）轨迹的水平分布，其中浅灰色细实线表示等位温线（间隔 2 K），点虚线表示海平面气压，深灰色实线表示降水零值线，填色为降水量（mm），带状实线表示 30 条输送带的轨迹束，箭头指向轨迹运动方向，标志“L”表示气旋中心，线 AB 指示 106h 轨迹的大致位置。(b) 沿 106 h 的 fWCB 轨迹大致位置 AB 的垂直剖面，其中填色表示垂直速度（间隔 20 cm/s），浅灰色实线为等位温线（间隔 2 K），两条粗实线分别对应相对湿度 90 %和 95 %等值线，数字为输送带编号（编号所对应高度即为此刻空气粒子所在高度）。

Fig.6 (a)The distribution of accumulative rainfall and fWCB trajectories in the last 6 hours at 108 h, where thin gray line indicates potential temperature (every 2 K), dot-dash line denotes sea level pressure, thick gray line represents zero line shaded with the rainfall amount, arrow lines denote trajectories with the arrow to the motion direction, symbol “L” is the cyclone center and line AB shows the approximate position of trajectories in 106 h. (b)Vertical profile of fWCB trajectories across the line AB in (a) at 106 h, where the numbers indicate the trajectories, thin gray line is potential temperature(every 2 K), and two thick solid lines represent respectively relative humidity of 90% and 95% with vertical velocity(every 20 cm/s) shaded.

4.2 冷输送带

从对此前冷输送带结构研究的回顾来看,一些学者认为冷输送带从对流层低层出发,存在明显上升特性 (Carlson, 1980; Ziv et al., 2010),而有些学者认为它主要在对流层低层运动 (Mass and Schultz, 1993; Schultz, 2001),可能环绕气旋中心下沉(Browning, 1986),也可能出现弱上升运动 (Schemm and Wernli, 2014)。为更全面探究冷输送带结构,本文结合此前几种描述的共性特征,仅设定冷输送带起始于大气低层 925hPa 气旋低压中心东侧暖锋前的冷区内。筛选出的冷输送带根据分裂位置和运动形态的不同大体可以归纳为四支气流带 (图 7),即“后倾上升”支 (简称 rCCB)、“前倾上升”支 (简称 fCCB)、“环气旋后倾”支 (简称 crCCB) 和“环气旋前倾”支 (简称 cfCCB)。

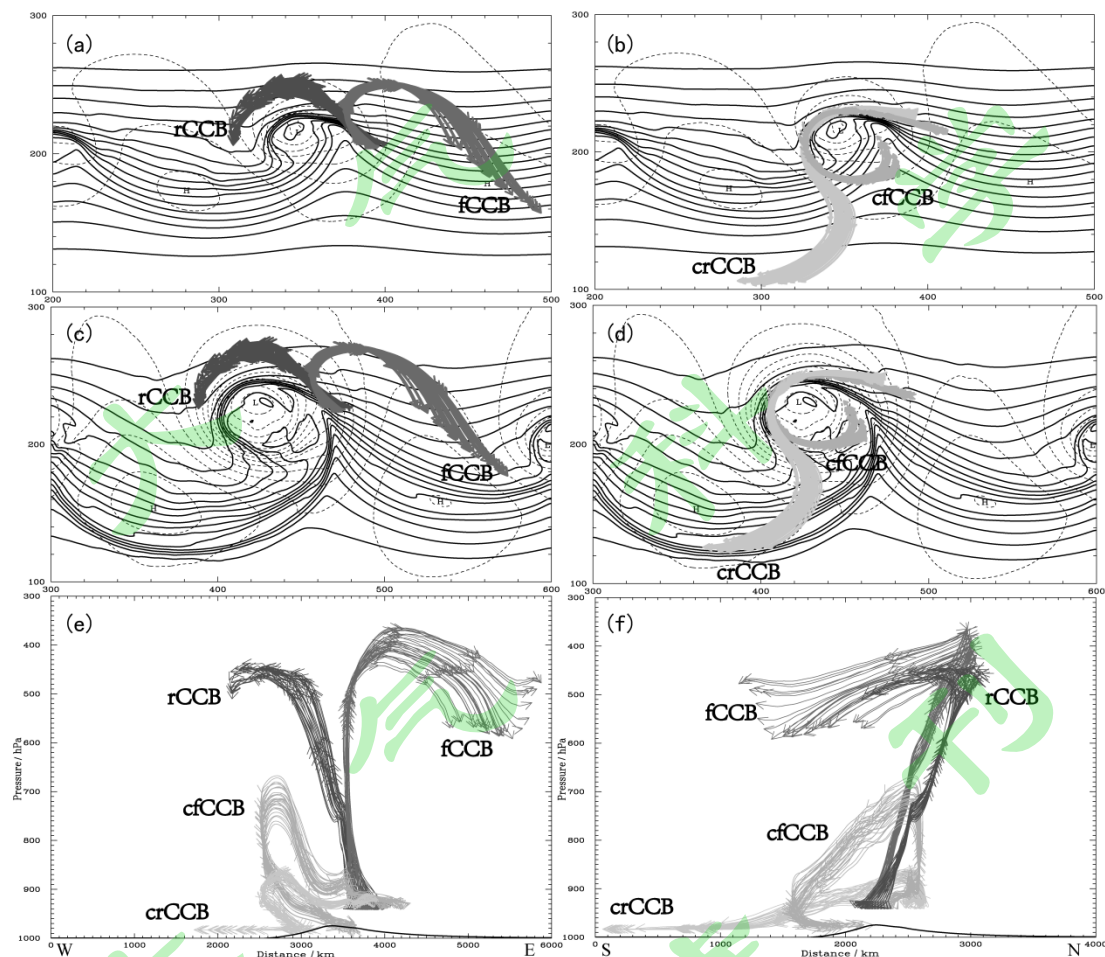


图7 同图4, 但为冷输送带的轨迹示意图。图(a,b)为轨迹水平投影叠加 96 h 的 925hPa 温压场, 图(c,d)为轨迹水平投影叠加 120 h 的 925hPa 温压场, 图(e)为轨迹在东西方向的垂直投影, 图(f)为轨迹在南北方向的垂直投影。图中深灰色、深黑色、淡灰色和灰色轨迹线分别表示“前倾上升”支 (fCCB)、“后倾上升”支 (rCCB)、“环气旋后倾”支 (crCCB) 和“环气旋前倾”支 (cfCCB) 冷输送带。

Fig.7 Same as Fig.4, but for trajectories of cold conveyor belts. Shown are horizontal snapshot at 96 h (a,b) and 120h (c,d), where solid lines are potential temperature(every 2K) and dash lines are height(every 50 gpm) at 925hPa. Vertical profile of trajectories are presented in the (e) west-east and (f) north-south direction. The thick gray trajectories are “forward-sloping ascent” (fCCB) types and the thick black are “rearward-sloping ascent”(rCCB) while the light gray are “wrapping around the cyclone and rearward-sloping”(crCCB) and the gray are “wrapping around the cyclone and forward-sloping” (cfCCB).

rCCB 和 fCCB 这两支气流上升特征明显，起初靠近暖锋，朝向气旋中心在暖锋锋前上升，运动到气旋中心东北侧后出现分裂，rCCB 继续向着气旋中心上游沿着后弯暖锋运动，而 fCCB 则朝向气旋下游运动。图 8 所示为沿着两支轨迹束的物理量变化特征，它们总体性质差异不大，在 96-108 h 内，均表现出旋转上升特征，平均上升到 500hPa 高度以上，期间水汽不断凝结，比湿递减至 0.5 g/kg 以下。两类气流垂直涡度几乎同步变化，先增加后减小，同时由于水汽凝结加热作用随高度变化，位涡也出现类似变化，峰值出现时间略晚于涡度，平均变幅均超过 1 PVU，rCCB 更是高达 2.5 PVU。两支气流在低层 750hPa 左右形成平均超过 2PVU 的位涡峰值，有利于产生正位涡异常区，促进低层系统发展（Hoskins et al., 1985）。由于 fCCB 初始位置更靠近暖锋，温湿特性更显著，相当位温更大，上升运动更强。这两支冷输送带对降水同样有促进作用，图 9(a)所示为 96-102 h 的累积降水和 rCCB 轨迹分布，此时段内 rCCB 轨迹水平方向大体呈东南-西北走向，在气旋东侧降水极值区内旋转上升，比湿平均下降约 3.5 g/kg。从 99h 沿 rCCB 轨迹的垂直剖面（图 9(b)）可见，此时 rCCB 气流位于低层暖锋锋区内，处于饱和状态，垂直速度大多在 0.15 m/s 以上，最大超过 0.5 m/s，同时伴随强烈的涡旋特征，相对涡度平均为 $1.8f$ ，水汽凝结作用强烈，平均位涡达 3 PVU。fCCB 在上升运动过程中与降水落区的配置关系也与此类似（图略）。最后 12h 内，rCCB 在高空槽区缓慢上升到 460hPa 附近，近似湿绝热变化，各物理变化不大；fCCB 在高空脊区内反气旋式旋转下沉，平均降至 550hPa 附近，绝对涡度一度减小到 $-0.2f$ ，下沉过程中可能受下落的凝结水蒸发作用的影响，比湿略有增加。

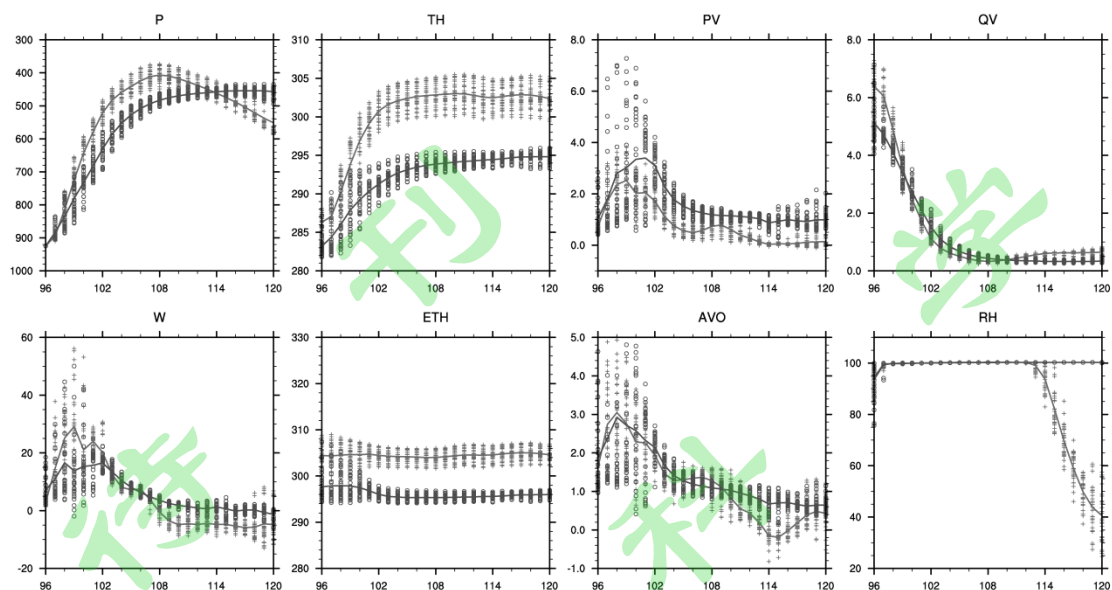


图8 与图5相同，但表示沿图7中“后倾上升”(rCCB，黑色圆圈)和“前倾上升”(fCCB，灰色加号)冷输送带各物理量时间变化。

Fig.8 Same as Fig.5, but black circles and gray plus signs respectively represent rCCB and fCCB in Fig.7.

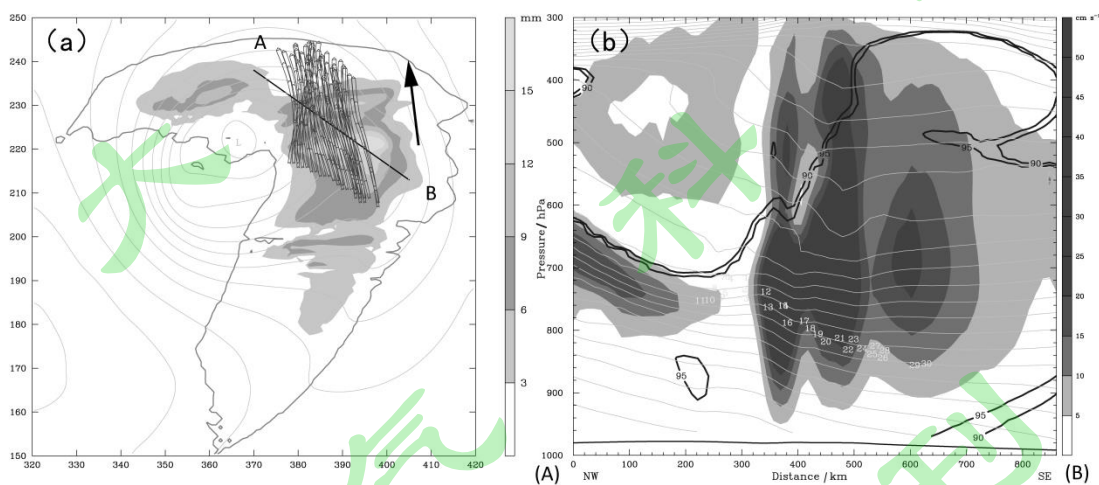


图9 同图6，但为(a)102 h的过去6小时累积降水及“后倾上升”冷输送带(rCCB)轨迹，及(b)沿99 h轨迹大致位置AB的垂直剖面。

Fig.9 Same as Fig.6, but (a)for the accumulative rainfall and rCCB trajectories in the last 6 hour at 102 h, (b)for the rCCBs at 99 h.

结合图7和图10来看，crCCB和cfCCB这两支冷输送带始终在对流层低层运动，均始于远离暖锋的锋前冷区内，水汽含量较少，起初向着气旋中心运动，受高空下落的水凝物蒸发作用的影响，比湿略增加，cfCCB更明显。此后cfCCB

在气旋中心偏北侧环绕气旋中心气旋式旋转上升，平均上升到 720hPa 左右。在弱上升过程中气流物理量特征变化类似 rCCB，平均来看，比湿下降 1.4g/kg，垂直涡度增加 $2f$ ，位涡增加 2PVU，同样在低层气旋中心附近形成正位涡异常区，利于低层系统发展。105hPa 以后 cfCCB 从气旋偏西侧继续环绕气旋中心气旋式下沉到闭合暖心内，在下沉运动前期受到干侵入气流的影响，比湿不断减小，后期在暖心附近水汽含量又略有增加。而 crCCB 在到达气旋中心附近以后先环绕气旋中心上升运动到气旋偏西侧 850hPa 高度以下，102h 以后继续向气旋上游顺时针下沉，最终降至地面附近，进入主气旋后侧的高压区内。在整个运动过程中，crCCB 气流基本以水平运动为主，垂直运动很弱，最大垂直速度不超过 0.15m/s，除湿度参量外各物理量变化幅度不大。cfCCB 和 crCCB 这两支气流虽然一直在对流层低层运动，但其环气旋中心的弱上升运动也利于气旋中心西北侧暖锋弯背处产生弱降水，本文因篇幅所限未给出分析图。

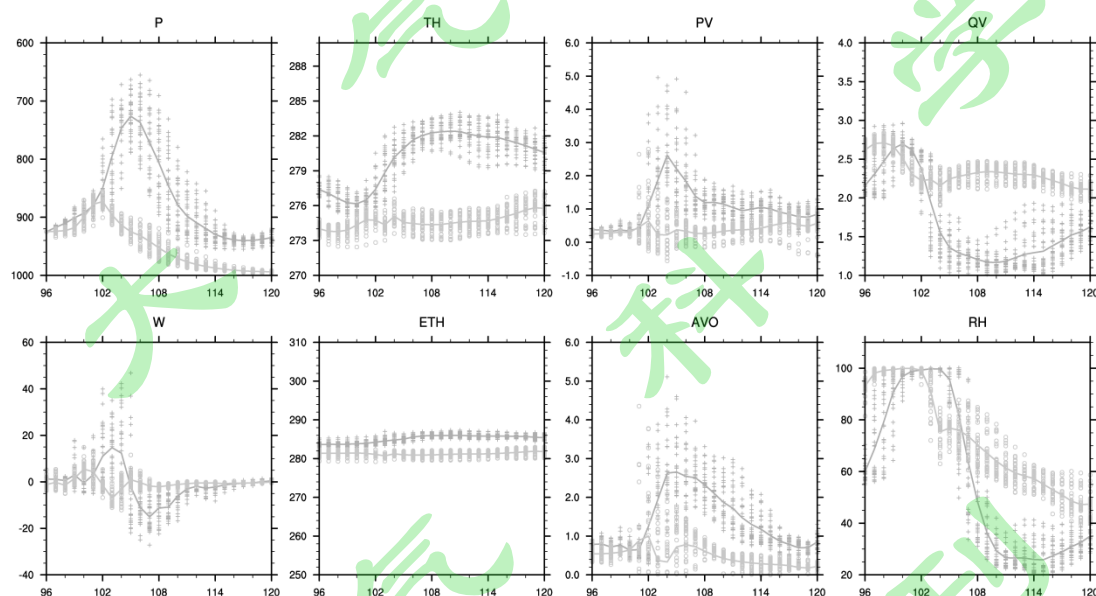


图 10 与图 5 相同，但为沿图 7 中“环气旋前倾”（cfCCB，灰色加号）和“环气旋后倾”（crCCB，淡灰色圆圈）冷输送带的物理量时间变化。

Fig.10 Same as Fig.5, but gray plus signs and light gray circles respectively represent cfCCB and crCCB in Fig.7.

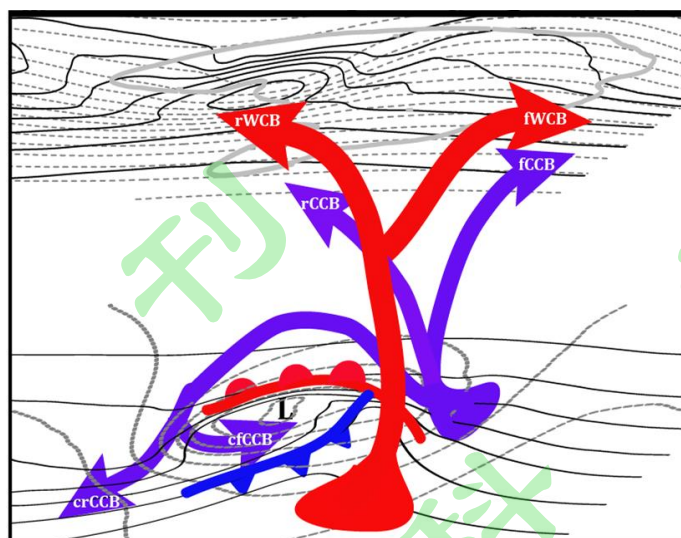


图 11 理想温带气旋内部冷、暖输送带示意图。图中上下两层分别为 400 hPa 和 925 hPa 高度层，实线表示等位温线（间距 2 K），虚线代表等高线（间距 50 gpm），粗灰实线为过去 6 h 降水零线。标志 L 指示气旋低压中心，锋面用传统符号表示，红蓝实线分别表示暖、冷输送带。

Fig.11 Conceptual model of cold and warm conveyor belts in the idealized extratropical cyclone, where the upper is the height of 400 hPa and the lower is 925 hPa, solid lines indicate potential temperature (every 2 K), gray dash lines represent the height (every 50 gpm), thick gray solid line is the zero line of accumulative rainfall in the last 6 h. Symbol "L" is the cyclone center and the front is presented by the conventional symbol with the red and blue arrow lines denoting warm and cold conveyor belt respectively.

5 结论与展望

本文通过拉格朗日轨迹筛选分析方法，详细探究了理想湿过程模拟中温带气旋内部冷、暖输送带的精细结构，对比分析了各类输送带运动过程中物理量演变特征，最终归纳出了新的冷、暖输送带概念模型（图 11）。文章主要得到如下结论：

（1）在本文归纳的输送带概念模型中，根据输送带轨迹相对气旋中心运动特征，可将暖输送带大体划分为“前倾上升”（fWCB）和“后倾上升”（rWCB）两支气流，将冷输送带归纳为“后倾上升”（rCCB）、“前倾上升”（fCCB）、“环气旋前倾”（cfCCB）和“环气旋后倾”（crCCB）四支气流。

（2）尽管与此前的研究（Schemm et al., 2013; Martínez-Alvarado et al., 2014）采用不同的模式构造和输送带阈值判别标准，对暖输送带特征的认识基本一致。两支暖输送带气流均起始于低层冷锋前暖区内，旋转上升运动到对流层中高层，

在高空输送带出流区产生负位涡扰动,影响高层槽脊系统的发展。它们在上升过程中向上输送水汽,对锋面附近降水极值区的形成和维持有显著影响。fWCB 上升运动更强烈,物理特征变化更明显,到达对流层中高层后向气旋中心下游运动,而 rWCB 在对流层中高层朝向气旋中心上游运动。与此前研究明显不同的是,研究发现 rWCB 并非一直在冷锋或后弯暖锋附近上升,而是先沿着冷锋上升随后沿着后弯暖锋上升。至于为何出现这种差异,研究不仅识别出了冷输送带,而且发现这两大类还可以根据分裂位置和运动形态的不同更精细地划分为四支不同特征的气流带

(3) 对于起始于暖锋前冷区的冷输送带,本文研究不仅证实了此前研究描述的上升类和低层运动类特征 (Carlson, 1980; Browning, 1986; Schultz, 2001),而且发现它们可以更精细地呈现出四支气流结构,揭示了更为精细的结构。两支气流具有明显的上升运动特征, rCCB 和 fCCB 这两支冷输送带,性质与暖输送带相似,对暖锋附近降水极值区的形成和维持有显著影响。相比暖输送带,它们虽然初始温湿特征较弱,但是旋转特征更强,位涡变化更剧烈。rCCB 沿着暖锋及“后弯”暖锋向气旋移动方向后侧上升,这支气流在此前研究中尚未提及。fCCB 先在暖锋锋前旋转上升,随后朝向气旋移动方向反气旋式下沉。另两支主要在低层运动的冷输送带前期朝向气旋中心运动,随后环绕气旋中心后向运动,先弱上升到气旋中心偏西侧然后下降,上升过程中也产生少量水汽凝结,有助于气旋偏西北侧暖锋弯背处弱降水极值中心区的形成,尤其是 cfCCB 气流。相比此前的研究,本文发现 cfCCB 和 crCCB 两支气流在运动到气旋南侧后还会出现分裂,分别朝着气旋运动方向下游和上游缓慢下沉。

研究对冷、暖输送带进行了较为细致的归纳分析,也发现了一些有别于以往研究的结构特征,但是本文工作仍存在一些局限性。首先对轨迹筛选标准和样本数的选择具有一定的主观性,这难免会对定量分析结果产生影响。而且,研究虽然发现了一些与以往不同的结构特征,但对出现这种结构特征差异的原因和不同形态输送带的形成机理还需要进一步揭示,同时也需要选用更多实际样本来佐证模型的合理性。这些都值得今后进一步研究分析。

致谢 感谢南京大学谈哲敏教授在模式初始场构造中的帮助和指导,感谢宾夕法尼亚州立大学的 Fuqing Zhang 教授生前和 Junhong Wei 博士在理想试验模拟方面

的建议。感谢两位匿名审稿人对本文提出的宝贵建议。

参考文献 (References)

- Bjerknes J. 1919. On the structure of moving cyclones[J]. *Geophys. Publ.*, 1(2): 1–8.
- Bjerknes J, Solberg H. 1922. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation[J]. *Geophys. Publ.*, 3(1): 3–18.
- Browning K A, Pardoe C W. 1973. Structure of low-level jet streams ahead of mid-latitude cold fronts[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 99(422): 619-638.
- Browning K A. 1986. Conceptual models of precipitation systems[J]. *Wea. Forecasting*, 1(1): 23-41.
- Browning K A. 1990. Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones[J]. *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume*, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., American Meteorological Society, 129–154.
- Browning K A, Roberts N M. 1994. Structure of a frontal cyclone[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120(520): 1535-1557.
- Browning K A. 1997. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone[J]. *Meteorol. Appl.*, 4(4): 317-324.
- Carlson T N. 1980. Airflow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108(10): 1498-1509.
- Catto J L, Madonna E, Joos H, et al. 2015. Global relationship between fronts and warm conveyor belts and the impact on extreme precipitation[J]. *J. Climate*, 28(21): 8411-8429.
- Coronel B, Ricard D, Rivière G, et al. 2016. Cold-conveyor-belt jet, sting jet and slantwise circulations in idealized simulations of extratropical cyclones[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142(697): 1781-1796.
- Dacre H F, Martínez-Alvarado O, Mbengue C O. 2019. Linking atmospheric rivers and warm conveyor belt airflows[J]. *J. Hydrometeorol.*, 20(6): 1183-1196.
- Eckhardt S, Stohl A, Wernli H, et al. 2004. A 15-year climatology of warm conveyor belts[J]. *J. Climate*, 17(1): 218-237.
- Flaounas E, Kotroni V, Lagouvardos K, et al. 2018. Heavy rainfall in Mediterranean cyclones. Part

I: contribution of deep convection and warm conveyor belt[J]. *Clim. Dynam.*, 50(7-8): 2935-2949.

Harrold T. 1973. Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbances[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 99(420): 232-251.

Fu G, Sun Y, Sun J, et al. 2020. A 38-year climatology of explosive cyclones over the Northern Hemisphere[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 37(2): 143-159.

Gray S L, Dunning C M, Methven J, et al. 2014. Systematic model forecast error in Rossby wave structure[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 41(8): 2979-2987.

Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111(470): 877-946.

Hoskins B. 2015. Potential vorticity and the PV perspective[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(1): 2-9.

Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization[J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2784-2802.

Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models[M], K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., Amer. Meteor. Soc., 246 pp.

Kessler E. 1969. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation[M]. *Meteor. Monogr.*, No. 32, Amer. Meteor. Soc., 84pp.

Martínez-Alvarado O, Joos H, Chagnon J, et al. 2014. The dichotomous structure of the warm conveyor belt[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140(683): 1809-1824.

Mass C F, Schultz D M. 1993. The structure and evolution of a simulated midlatitude cyclone over land[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121(4): 889-917.

Methven J. 2015. Potential vorticity in warm conveyor belt outflow[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141(689): 1065-1071.

Sanders F, Gyakum J R, 1980. Synoptic-dynamic climatology of the “Bomb” [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108(10): 1589-1606.

Schemm S, Wernli H, Papritz L. 2013. Warm conveyor belts in idealized moist baroclinic wave simulations[J]. *J. Atmos. Sci.*, 70(2): 627-652.

Schemm S, Wernli H. 2014. The linkage between the warm and the cold conveyor belts in an idealized extratropical cyclone[J]. *J. Atmos. Sci.*, 71(4): 1443-1459.

Schultz D M. 2001. Reexamining the cold conveyor belt[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(9): 2205-2225.

- Shapiro M A, Keyser D A. 1990. Fronts, jet streams, and the tropopause[J]. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Wave Propagation Laboratory.
- Shaw W N, Lempfert R G K. 1906. The life history of surface air currents: A study of the surface trajectories of moving air[J]. Meteor. Office Memoir No.174, reprinted in Selected Meteorological papers of Sir Napier Shaw, Macdonald, 1955, 15-131.
- Sinclair V A, Gray S L, Belcher S E. 2008. Boundary-layer ventilation by baroclinic life cycles[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 134, 1409–1424.
- Smart D J, Browning K A. 2014. Attribution of strong winds to a cold conveyor belt and sting jet[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140(679): 595-610.
- Tan Z, Zhang F, Rotunno R, et al. 2004. Mesoscale predictability of moist baroclinic waves: Experiments with parameterized convection[J]. J. Atmos. Sci., 61, 1794-1804.
- Wernli H, Davies H C. 1997. A Lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. I: The method and some applications[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 123(538): 467-489.
- Wernli H. 1997. A Lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. II: A detailed case-study[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 123(542): 1677–1706.
- Young M, Monk G, Browning K. 1987. Interpretation of satellite imagery of a rapidly deepening cyclone[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 113(478): 1089-1115.
- Zhang Y, Tan Z, Chu K. 2016. Effects of surface drag on upper-level frontogenesis within a developing baroclinic wave[J]. J. Meteor. Res., 30(5): 706-718.
- Ziv B, Saaroni H, Romem M, et al. 2010. Analysis of conveyor belts in winter Mediterranean cyclones[J]. Theor. Appl. Climatol., 99(3-4): 441-455.
- 刘宁微, 齐琳琳, 韩江文. 2009. 北上低涡引发辽宁历史罕见暴雪天气过程的分析[J]. 大气科学, 33(2): 275-284. Liu Ningwei, Qi Linlin, Han Jiangwen. 2009. The analyses of an unusual snowstorm caused by the northbound vortex over Liaoning Province in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(2): 275-284.
- 熊秋芬, 牛宁, 章丽娜. 2013. 陆地上爆发性温带气旋的暖锋后弯结构分析[J]. 气象学报, 71(2): 239-249. Xiong Qiufen, Niu Ning, Zhang Lina. 2013. Analysis of the back-bent warm front structure associated with an explosive extratropical cyclone over land[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(2): 239-249.

张熠, 谈哲敏. 2007. 地表拖曳对斜压波地面锋生的影响[J]. 中国科学: D 辑, 36(11): 1052-1067.

Zhang Yi, Tan Zhemin. 2007. Effects of surface drag on low-level frontogenesis within baroclinic waves[J]. Science China (Series D: Earth Sciences) (in Chinese), 36(11) : 1052-1067.

赵兵科, 吴国雄, 姚秀萍. 2008. 2003 年夏季梅雨期一次强气旋发展的位涡诊断分析[J]. 大气科学, 32(6): 1241-1255. Zhao Bingke, Wu Guoxiong, Yao Xiuping. 2008. A diagnostic analysis of potential vorticity associated with development of a strong cyclone during the Meiyu period of 2003[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(6): 1241-1255.

赵琳娜, 赵思雄. 2004. 一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究[J]. 大气科学, 28(5): 722-735. Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2004. A diagnostic study of rapid developing cyclone in North China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(5): 722-735.

赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 傅慎明. 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象, 44(3): 351-360. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Lu Rong, Fu Shenming. 2018. Analysis of the 20 July 2016 Unusual Heavy Rainfall in North China and Beijing[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(3): 351-360.

赵宇, 蓝欣, 杨成芳. 2018. 一次冬季江淮气旋逗点云区的雷达回波和气流结构分析[J]. 气象学报, 76(5): 726-741. Zhao Yu, Lan Xin, Yang Chengfang. 2018. Radar echo and airmass structure of the comma head within a Jiang-Huai cyclone in winter[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 76(5): 726-741.