

查书瑶, 伊 兰, 赵 平. 2015. 冬季华南准静止锋的结构和类型特征研究 [J]. 大气科学, 39 (3): 513–525, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14123. Zha Shuyao, Yi Lan, Zhao Ping. 2015. Structure and type characteristics of the winter quasi-stationary front in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 513–525.

冬季华南准静止锋的结构和类型特征研究

查书瑶¹ 伊 兰^{2,3} 赵 平¹

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 国家气候中心, 北京 100081

3 中国气象科学研究院北京 100081

摘 要 利用 12 年 (2000~2011 年) 逐日的 FNL (Final Operational Global Analysis) 分析资料和逐日的中国站点降水资料, 定义了一个冬季华南准静止锋强度指数, 并根据该指数挑选出强准静止锋事件, 研究了强事件的结构特征、环流分型及其与降水的关系。结果表明: 冬季强准静止锋事件多发于 1、2 月, 其发生频次在近 12 年里呈现明显上升趋势。强准静止锋锋区表现为等假相当位温线、等温线的密集带, 但是锋区湿度变化不明显, 并有明显逆温, 锋区由南北风辐合构成, 上升气流主要位于锋区上部, 纬向有两个次级环流与锋区相对应, 伴随正相对涡度和水汽通量辐合。根据 850 hPa 风场在锋区的辐合情况, 强准静止锋可分为北风辐合型、南北风辐合型、南风辐合型三种类型。在这三种类型中, 北风辐合型对应的北方冷空气最强, 华南降水最少; 南风辐合型对应的南支槽最活跃, 华南降水最多; 南北风辐合型介于两者之间。冬季华南准静止锋与冬季华南降水有一定相关, 在强准静止锋的背景下, 降水偏多时, 锋区低层的水汽通量辐合和上升运动偏强, 华南处于偏强南支槽前。

关键词 华南准静止锋 环流分型 冬季 华南降水

文章编号 1006-9895(2015)03-0513-13

中图分类号 P441

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14123

Structure and Type Characteristics of the Winter Quasi-stationary Front in South China

ZHA Shuyao¹, YI Lan^{2,3}, and ZHAO Ping¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Climate Center, Beijing 100081

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Using the daily National Centers for Environmental Prediction (NCEP) global final analysis (FNL) data and daily station rainfall data in China for the winters of 2000–2011, we first define an index to measure the strength of the South China quasi-stationary front (SCSF), and strong SCSF cases are then selected. The structure and characteristic circulation of strong SCSFs in relation to winter precipitation over South China are analyzed by composite analysis. The results show that strong SCSFs are nearly west–east oriented, are more common in January and February, and their frequency of occurrence shows a clear upward trend over the past 12 winters. The frontal zone of a strong SCSF is indicated by a dense band of potential pseudo-equivalent temperatures in the lower troposphere, slanting northward with

收稿日期 2014-01-29; **网络预出版日期** 2014-05-07

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430203

作者简介 查书瑶, 女, 1989 年出生, 硕士, 主要从事天气气候诊断, E-mail: shuyaozha@foxmail.com

通讯作者 伊 兰, E-mail: yl@cms1924.org

altitude, with obvious differences across the band in temperature rather than in moisture. In addition, the frontal zone is often associated with a great temperature inversion, positive relative vorticity, and moisture flux convergence of north and south winds. Updrafts mainly appear above the slanted frontal zone, and disturbance zonal circulations with sub-frontal scale updrafts and downdrafts exist at about 850 hPa below the upper-level westerlies. Strong SCSFs can be classified into three types according to their wind convergence patterns in the frontal zone at 850 hPa. Among these three styles, the northerly convergence type is characterized by stronger cold air from the north and less precipitation in South China; the southerly convergence type features strong south winds, a deeper India–Burma trough, and more precipitation in South China; and the northerly and southerly convergence type falls in between these two. Winter rainfall in South China is closely related to a winter SCSF. In the presence of strong SCSFs, stronger moisture flux convergence and an enhanced ascending motion appear in the lower frontal zone over South China, accompanied by a deeper India–Burma trough in the mid troposphere to the west of the SCSF, leading to increased rainfall in South China.

Keywords South China quasi-stationary front, Circulation classification, Winter, Precipitation over South China

1 引言

华南准静止锋是影响我国华南地区的重要天气气候系统,在冬半年(10月至翌年6月)经常出现,是冬季东亚最主要的气候锋(陶祖钰等,2008)。华南准静止锋出现在 $20^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 之间,多停滞于 $22^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间,有80%以上会影响华南,产生降水,是我国冬季南方产生降水的主要系统,由于其锋面坡度平缓,故其降水范围比一般冷锋范围大得多(鹿世瑾,1990)。2008年1月到2月,我国南方地区接连出现四次严重的低温雨雪天气过程,致使南方近20个省(区、市)遭受历史罕见的冰冻灾害。2011年1月到2月,贵州、湖南、广西北部等南方多地出现多次低温雨雪冰冻天气。造成上述两次冰冻雨雪天气的直接天气系统都是华南准静止锋(孙建华和赵思雄,2008;韦晨,2012),可见异常的华南准静止锋会引起南方冬季的极端天气。

为了认识冬季华南准静止锋的结构与环流特征,许多学者从不同角度进行了研究。陶祖钰等(2008)、杨贵名等(2009)以及杜小玲和蓝伟(2010)都考察了2008年1月的华南准静止锋的锋区结构特征,发现华南准静止锋锋面平缓,等 θ_{se} (假相当位温)经向和垂直梯度大,锋区逆温明显,锋生函数分布与等 θ_{se} 线密集区分布一致。陶诗言和卫捷(2008)发现2008年1月雨雪过程中锋生函数出现在400 hPa以下的对流层大气中,其中700~600 hPa的气层中锋生过程最强;钱维宏和符娇兰(2009)发现用相当温度梯度表示的湿大气锋生可以有效地描述2008年1月准静止锋的活动特征及其与降水的关系;池再香等(2010)发现2008年1月贵州境内的锋生强度和冷空气强度有很好的

对应关系。孙建华和赵思雄(2008)和李登文等(2009)重点研究了冻雨形成的层结条件和锋区逆温的垂直结构。Wen et al. (2009)、顾雷等(2008)、李崇银等(2008)和高辉等(2008)分析了导致2008年1月准静止锋异常的大尺度环流形势,为稳定的北脊南槽型阻塞形势并配合异常活跃的南支槽。董海萍等(2009)通过分析2008年1月湘潭地区的准静止锋上的中小尺度系统,发现低层低温、逆温层的存在及充足的水汽是冰冻形成的主要原因。还有研究则发现2008年1月的极端天气与亚洲大气冷源的异常、北大西洋涛动和平流层的异常有关(Nan and Zhao, 2011;谭桂容等,2010)。杜小玲和蓝伟(2010)对2008冻雨过程和2009阴雨天气的锋区结构特征进行了对比分析。郭英莲等(2009)分析对比了2008年1月的华南准静止锋和1998年夏季的梅雨锋。

上述分析表明冬季华南准静止锋及其相关的研究已取得了许多进展,许多学者对冬季华南准静止锋的形成条件、锋区结构、锋生特征、大尺度的环流形势和中小尺度的系统发展等方面进行了研究。但以前的研究大多是针对一些个例开展的,对一些问题认识尚不清楚,例如:在气候学上,冬季华南准静止锋的锋面特征如何?华南准静止锋强度与其大气环流结构和降水的关系如何?运用高分辨率长时间尺度的资料对这些问题的研究也未开展。因此,通过大量样本来深入分析冬季华南准静止锋是有必要的。本文将定义一个冬季华南准静止锋指数,挑选强准静止锋事件,并考察强准静止锋的结构特征、环流类型及其与降水的关系。

2 资料和方法

本文所用的资料为:(1)美国环境预报中心/

美国大气资料中心 (NCEP/NCAR) 提供的 FNL (Final) 分析资料, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向 26 层, 时间分辨率为每 6 h 一次 (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2> [2014-03-24]); (2) 国家气象信息中心提供的 2474 站逐日降水资料。所使用的资料时段为 2000 年冬季至 2011 年冬季, 其中将 12 月和次年 1、2 月称为某年冬季。

本文将采用合成分析方法讨论强华南准静止锋的结构与环流特征。

3 冬季华南准静止锋指数

锋区为密度不同的两个气团之间的过渡带, 主要表现为温度的不同, 有时则表现为温度差异小但水汽差异大。继顾震潮等 (1958) 用假相当位温 (θ_{se}) 图来分析锋面之后, 很多学者发现锋区的基本特征就是对流层中下层的假相当位温水平梯度

密集, 并且等 θ_{se} 线的密集区域与锋生函数大值区对应良好 (Zhao et al, 2004; 郑永光等, 2007; 尹东屏等, 2010; 杨贵名等, 2009; Liu et al., 2012; 杜小玲等, 2014), 因此我们将利用等 θ_{se} 线的密集程度来反应锋面的强度。考虑到华南准静止锋常年呈东西走向的特征, 本文使用 850 hPa 的假相当位温的经向梯度 (即 $\partial\theta_{se}/\partial y$) 来表征华南准静止锋的强度。

从 12 年 (2000~2011 年) 冬季平均的温度和假相当位温剖面图 (图 1a) 可以看到, 冬季华南准静止锋表现为对流层中下层 (700 hPa 以下) 的等 θ_{se} 线密集带, 锋区随高度向北倾斜, 地面锋区位于 $21^\circ \sim 27^\circ \text{N}$, 850 hPa 上的等 θ_{se} 线最为密集, 最密集带位于 25°N 附近。考察 12 年冬季平均的 850 hPa 准静止锋强度 ($\partial\theta_{se}/\partial y$) 的水平分布 (图 1b) 发现, $\partial\theta_{se}/\partial y$ 大值区位于 $23^\circ \sim 27^\circ \text{N}$, 呈东西带状

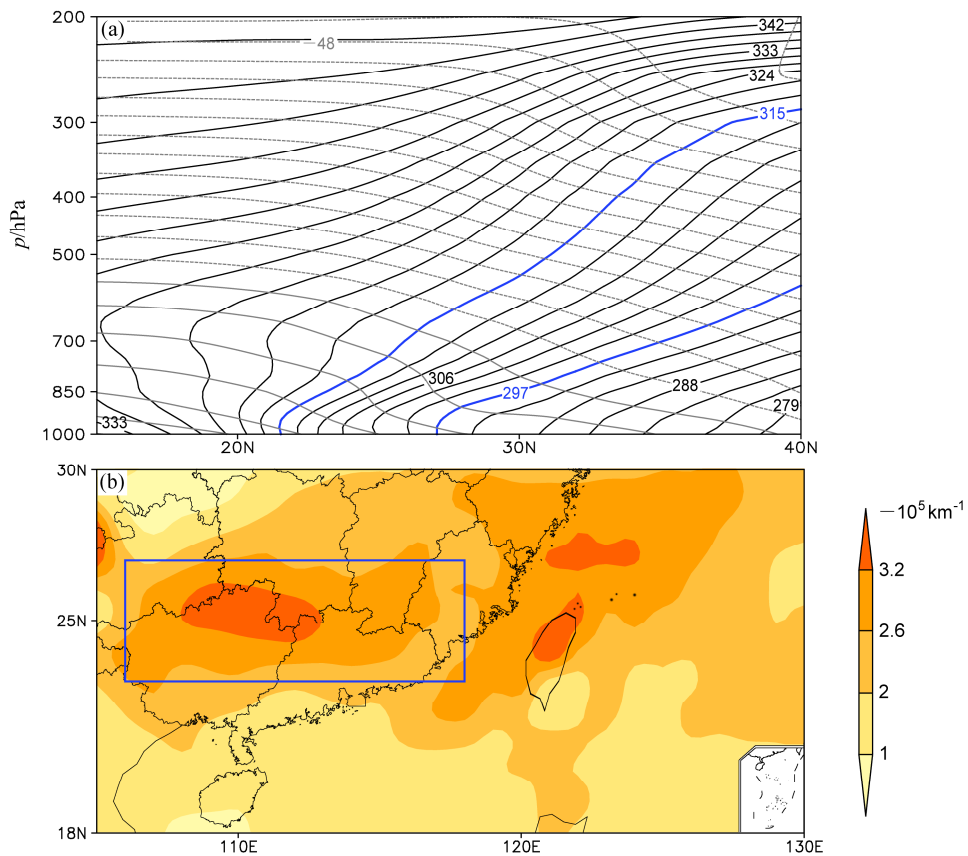


图 1 (a) 2000 年冬季至 2011 年冬季平均的沿 $106^\circ \sim 118^\circ \text{E}$ 平均的高度—纬度垂直结构 [黑色实线为等 θ_{se} (假相当位温) 线, 单位为 K; 蓝色粗实线表示等 θ_{se} 线密集区; 灰色实 (虚) 线为正 (负) 的等温线, 单位为 $^\circ \text{C}$]; (b) 2000 年冬季至 2011 年冬季平均的 850 hPa 上的 $\partial\theta_{se}/\partial y$ (单位为 $-10^{-5} \text{ K m}^{-1}$) 分布图, 蓝色框表示关键区域 ($23^\circ \sim 27^\circ \text{N}$, $106^\circ \sim 118^\circ \text{E}$)

Fig. 1 (a) Climatological (2000–2011) winter mean latitude–height cross sections of θ_{se} (units: K) and temperature (units: $^\circ \text{C}$). The black contours are for θ_{se} ; the grey contours are for temperature; the thick blue contours indicate the area where the θ_{se} contours are dense. (b) Climatological (2000–2011) winter mean distributions of $\partial\theta_{se}/\partial y$ (units: $-10^{-5} \text{ K m}^{-1}$) at 850 hPa. The blue box ($23^\circ \sim 27^\circ \text{N}$, $106^\circ \sim 118^\circ \text{E}$) is selected as the key area

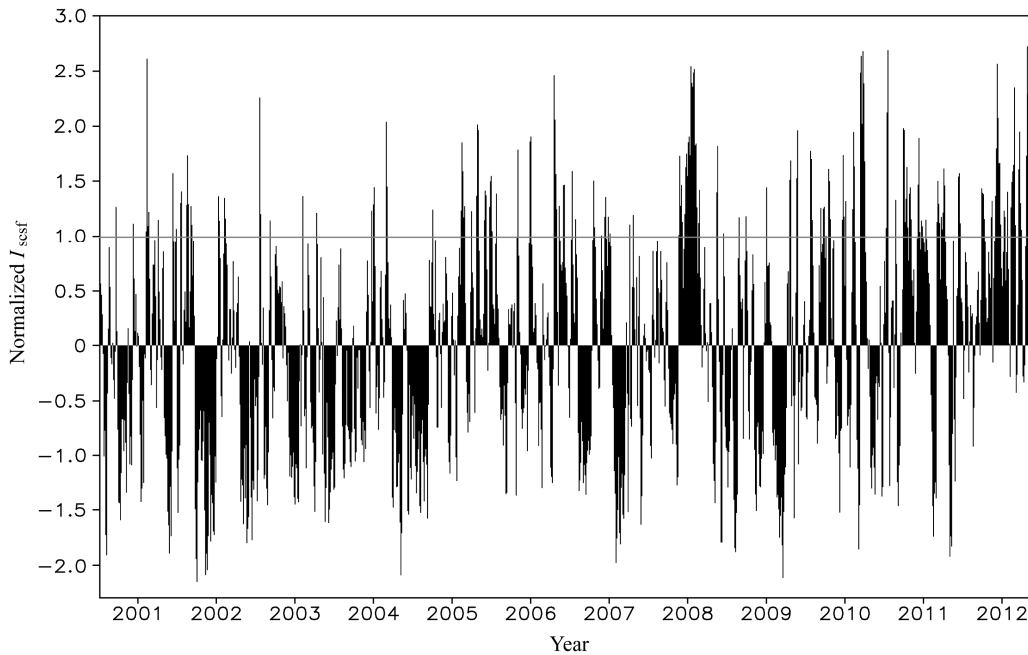


图2 2000年冬季至2011年冬季逐日的标准化准静止锋强度指数 I_{scsf} 的时间序列 (横线为标准化 I_{scsf} 值为1的直线)

Fig. 2 Normalized daily I_{scsf} (Quasi-stationary front index) from December–January–February (DJF) 2000 to DJF 2011, the horizontal line is for values of one standard deviation

分布, 中心位于广西、广东与贵州的交界处。因此选取 ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106\sim 118^{\circ}\text{E}$) 为关键区域 (图1b中蓝框区域), 并定义850 hPa关键区区域平均的 $\partial\theta_{se}/\partial y$ 为准静止锋强度指数, 即

$$I_{scsf} = -\partial\theta_{se} / \partial y. \quad (1)$$

4 华南准静止锋强事件的锋区结构及环流特征分型

4.1 强事件的选取

首先从12年冬季逐6h的标准化准静止锋强度时间序列 (图略) 中挑选出强准静止锋事件 ($I_{scsf} \geq 1$) 733个, 其中发生在00:00 (协调世界时, UTC) 的有183个占25%, 发生在06:00 (UTC) 的有185个占25.2%, 发生在12:00 (UTC) 的有190个占25.9%, 发生在18:00 (UTC) 的有175个占23.9%。四个时刻发生的频率相仿, 说明冬季华南准静止锋发生频次没有明显的日变化特征。因此, 本文接下来针对逐日的华南准静止锋进行分析。

从12年冬季逐日的标准化准静止锋强度时间序列中 (图2), 挑选出188个强事件 ($I_{scsf} \geq 1$)。对这188个强准静止锋事件进行发生频次统计, 从逐月的强事件发生频次统计表中 (表1) 看出: 强准静止锋事件主要发生在1月和2月, 发生频率分

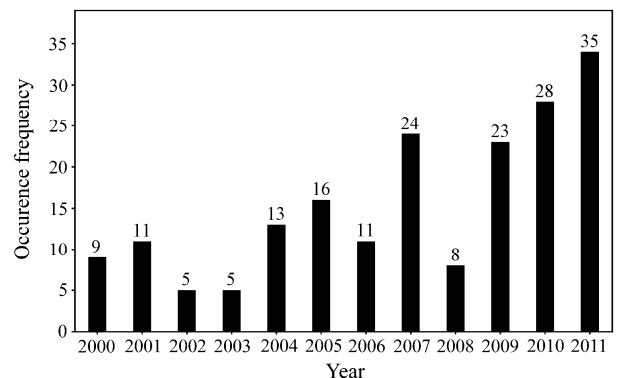


图3 2000年冬季到2011年冬季由逐日标准化 I_{scsf} 确定的各年强准静止锋事件的发生频次统计

Fig. 3 Yearly occurrences of strong front events obtained from daily I_{scsf} from 2000 to 2011

别为44.68%和36.70%, 在12月最少, 发生频率仅为18.72%。从逐年的发生频次图 (图3) 可知: 强事件发生的频次还存在明显的年际差异, 2007年冬、2010年冬以及2011年冬发生强事件的频次偏多, 并且这12年逐年的强事件发生频次呈现出明显的上升趋势, 这与近年来我国南方冬季频发冰冻雨雪灾害的现象一致。

4.2 强事件的锋区特征

图4为188个强准静止锋事件合成的850 hPa

锋区的水平结构。从图 4a 可以看出 850 hPa 上锋区表现为等 θ_{se} 线的密集带,相对湿度在华南区域没有明显梯度,暖湿区(相对湿度大于 90%的区域)位于锋区以南,在广东广西两省的南部。从图 4b 看出等温线在锋区也较为密集,但密集程度没有等 θ_{se} 线的大;锋区内逆温明显,800~900 hPa 的逆温大

值中心位于广西广东和贵州的交界处。锋区内的风场表现为南北风的辐合(图 4c),并伴随着正的相对涡度带。锋区内有明显的水汽辐合(图 4d),水汽主要源自于 95°E 附近的南支槽、南海海域和西太平洋副热带高压的西北端。

图 5 为 188 个强事件合成的锋区垂直环流结

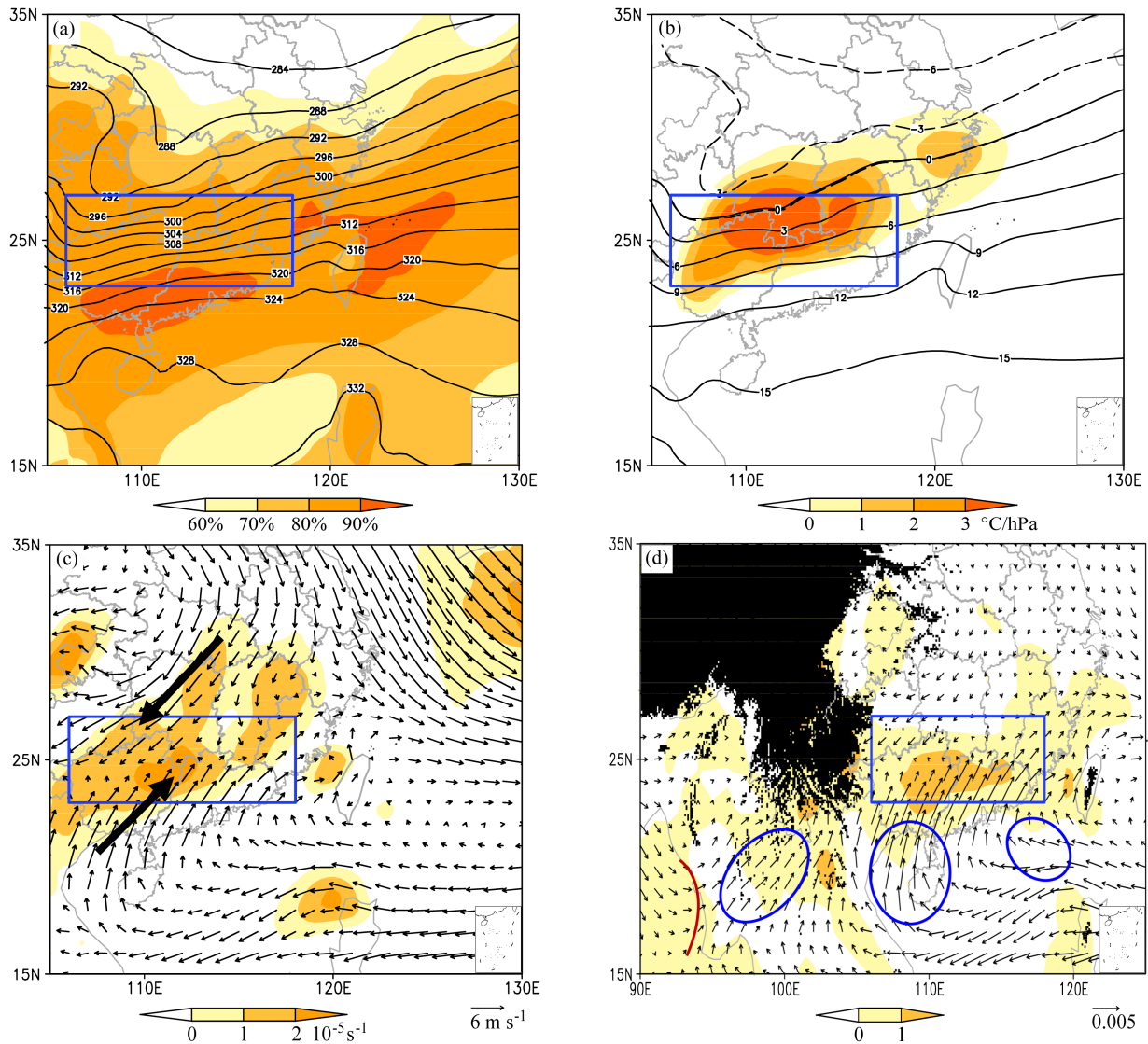


图 4 强准静止锋事件合成的 850 hPa 环流结构: (a) θ_{se} 和相对湿度的水平分布,黑色实线为等 θ_{se} 线(K),填色为相对湿度; (b) 温度和逆温的水平分布,黑色实线为等温线($^{\circ}\text{C}$),填色为 800~900 hPa 的温度之差 $[(T_{800\text{ hPa}} - T_{900\text{ hPa}})/100\text{ hPa}]$ 大于零的区域,即逆温($\Delta T/\Delta p > 0$,单位: $^{\circ}\text{C}/\text{hPa}$); (c) 风场(m s^{-1})及相对涡度(10^{-5} s^{-1})的水平分布; (d) 水汽通量($\text{g s}^{-1}\text{ hPa}^{-1}\text{ cm}^{-1}$)及其散度($-10^{-8}\text{ g s}^{-1}\text{ hPa}^{-1}\text{ cm}^{-2}$)的水平分布,填色为水汽通量散度,矢量箭头为水汽通量,黑色阴影为地形,棕色曲线为槽线,蓝色圆形表示三支水汽来源。图中蓝色框表示关键区域($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)

Fig. 4 Composite horizontal structure and circulations of strong front events at 850 hPa: (a) Horizontal distribution of θ_{se} and relative humidity, the black contours are for θ_{se} (K), the shadows are for relative humidity; (b) horizontal distribution of temperature and inversion, the black contours are for temperature ($^{\circ}\text{C}$), the shadows are for temperature inversion ($^{\circ}\text{C}$) between 800 hPa and 900 hPa; (c) horizontal distribution of winds (m/s) and relative vorticity (10^{-5} s^{-1}); (d) horizontal distribution of water vapor flux ($\text{g s}^{-1}\text{ hPa}^{-1}\text{ cm}^{-1}$) and its divergence ($-10^{-8}\text{ g s}^{-1}\text{ hPa}^{-1}\text{ cm}^{-2}$), the arrows are for the water vapor flux, the shadows are for its divergence, black shadow is for the terrain, brown curve indicates the India–Burma trough, the blue circle represents three moisture sources. The blue box ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$) is the key area

构。从图 5a 可以看出强准静止锋的锋区结构与 12 年冬季平均的 (图 1a) 锋区结构类似, 对流层 700 hPa 以下的等 θ_{se} 线很密集, 伴随着逆温, 但等 θ_{se} 线的密集程度和逆温的大小, 都比 12 年冬季平均的要大得多; 锋区以南 800 hPa 以下存在一个相对湿度大值区。从 $110^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ 平均的经向剖面图 (图 5b) 可以看出锋区与经向风零风速线相吻合, 是由

南北风的辐合构成, 锋区以南 20°N 以北为偏南风, 锋区以北为偏北风, 而上升运动主要在锋前与锋面以上, 上升运动大值区位于中低层 850 hPa 至 600 hPa。同时, 南北风的辐合区也是水汽通量的辐合区域, 在低层 925~850 hPa 水汽通量的辐合最为明显, 在纬度位置上与上升运动大值区相匹配, 说明南方的偏南气流携带水汽沿着锋面上升, 可能形成

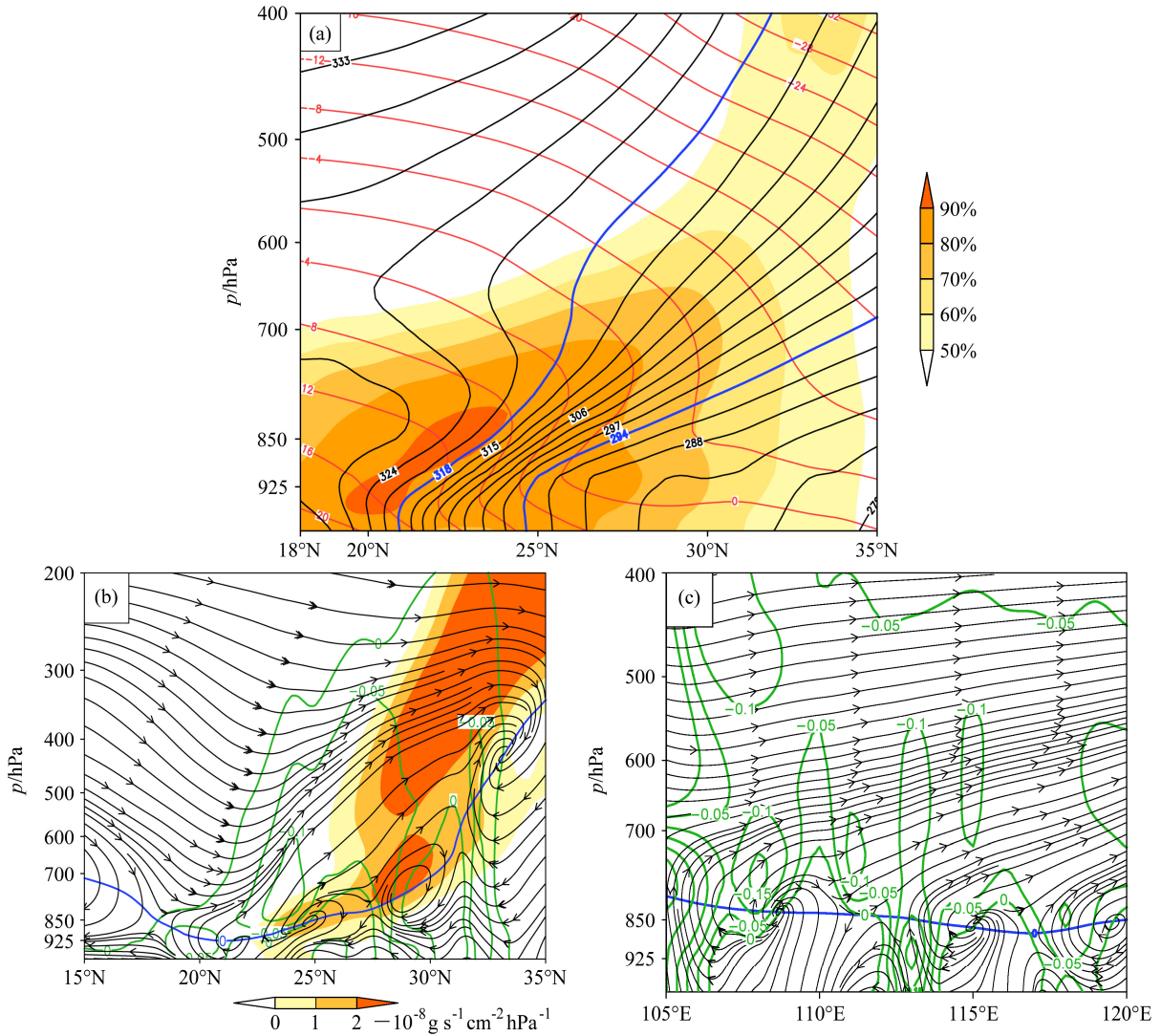


图 5 强准静止锋合成的垂直结构和环流: (a) $110^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ 平均的温度和湿度纬度高度剖面图, 黑实线为等 θ_{se} 线 (K), 红实线为等温线 ($^{\circ}\text{C}$), 填充阴影为相对湿度, 蓝色粗实线表示等 θ_{se} 线密集区; (b) $110^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ 平均的经向剖面图, 填充阴影为水汽通量散度 ($-10^{-8} \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), 黑色流场为经向 (m s^{-1}) 和垂直方向 (-0.02 Pa s^{-1}) 的流场, 绿色实线为垂直速度等值线 (Pa s^{-1}), 蓝色实线为南北风零风速线; (c) $24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 平均的纬向剖面图, 黑色流场为纬向 (m s^{-1}) 和垂直方向 (-0.02 Pa s^{-1}) 的流场, 绿色实线为垂直速度等值线 (Pa s^{-1}), 蓝色实线为东西风零风速线

Fig. 5 Composite vertical structure and circulation of strong front events: (a) Latitude–height cross section of temperature and relative humidity between $110^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$, the black contours are for θ_{se} (K), the red contours are for temperature (K), the shadows are for relative humidity; (b) latitude–height cross section of winds and water vapor flux divergence between $110^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$, the shadows are for water vapor divergence ($-10^{-8} \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), the black streamlines are for the meridional flow (m s^{-1}) and vertical flow (-0.02 Pa s^{-1}), the green contours are for the vertical velocity (Pa s^{-1}), the blue line is for the north–south wind zero-wind line; (c) $24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ average longitude–height cross section of winds between $24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, the black streamlines are for the zonal flow (m s^{-1}) and vertical flow (-0.02 Pa s^{-1}), the green contours are for the vertical velocity (Pa s^{-1}), the blue line is for the east–west wind zero-wind line

表 1 2000 年冬季至 2011 年冬季由逐日标准化 I_{scsf} 确定的各年逐月强准静止锋事件的发生频次统计

Table 1 Monthly occurrences of strong front events obtained from daily I_{scsf} in DJF from 2000 to 2011

	频次			冬季
	12 月	1 月	2 月	
2000 年	1	5	3	9
2001 年	7	4	0	11
2002 年	3	1	1	5
2003 年	0	3	2	5
2004 年	1	3	9	13
2005 年	5	4	7	16
2006 年	2	7	2	11
2007 年	0	18	6	24
2008 年	3	1	4	8
2009 年	6	8	9	23
2010 年	4	15	9	28
2011 年	3	15	17	35
总计	35	84	69	188
频率	18.72%	44.68%	36.70%	1

非常典型的锋面降水。而从 $24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 平均的纬向剖面图 (图 5c) 可以看到在 800 hPa 以上为一致的偏西风, 850 hPa 以下的低层则以偏东风为主。在 850 hPa 对应于锋区的位置上有两个次级环流, 这可能和气流沿着锋面 (等熵面) 作斜升运动时, 在浮力和旋转的共同作用下出现的对称不稳定有关。

4.3 强事件的环流分型

根据 850 hPa 风场在关键区域的辐合情况, 将

188 个强准静止锋事件分为 3 大类, 分别为北风辐合型 (图 6a), 南北风辐合型 (图 6b), 南风辐合型 (图 6c)。北风辐合型的 850 hPa 风场在关键区域全部为偏北风; 南北风辐合型是由东北风和西南风在关键区的辐合构成的; 南风辐合型在关键区域全部为偏南气流。其中, 南北风辐合型的发生频次最多, 有 82 次, 这与上文中强准静止锋的 850 hPa 合成风场在关键区域表现为南北风的辐合相吻合。北风辐合型和南风辐合型的发生频次分别为 34 次和 32 次。需要说明的是, 在 188 个强准静止锋事件中, 除了以上 3 个大类以外, 还有 8 个个例为海上有台风影响, 32 个个例的风场在关键区域没有明显辐合, 在此不作分析。

不同类型的强准静止锋在关键区域有不同的风场辐合, 一定是因为不同的大气环流配置而造成的, 而不同的大气环流也会影响降水的分布。因此我们考察了这 3 种类型的强华南准静止锋对应的大气环流和降水分布。从图 7a 至图 7c 可以看出, 北风辐合型的东亚大槽最为深厚, 位于 120°E 附近, 紧贴欧亚大陆东岸, 华南地区处于槽后的偏北气流控制中, 地面冷高压也最为强盛, 范围已深入我国中部, 这样的环流配置使得来自北方的冷空气特别强盛, 华南区域为北风辐合; 南北风辐合型的东亚大槽已经入海, 位于 140°E 附近, 对华南地区的影响不大, 地面冷高压的大值范围和北风辐合型差不

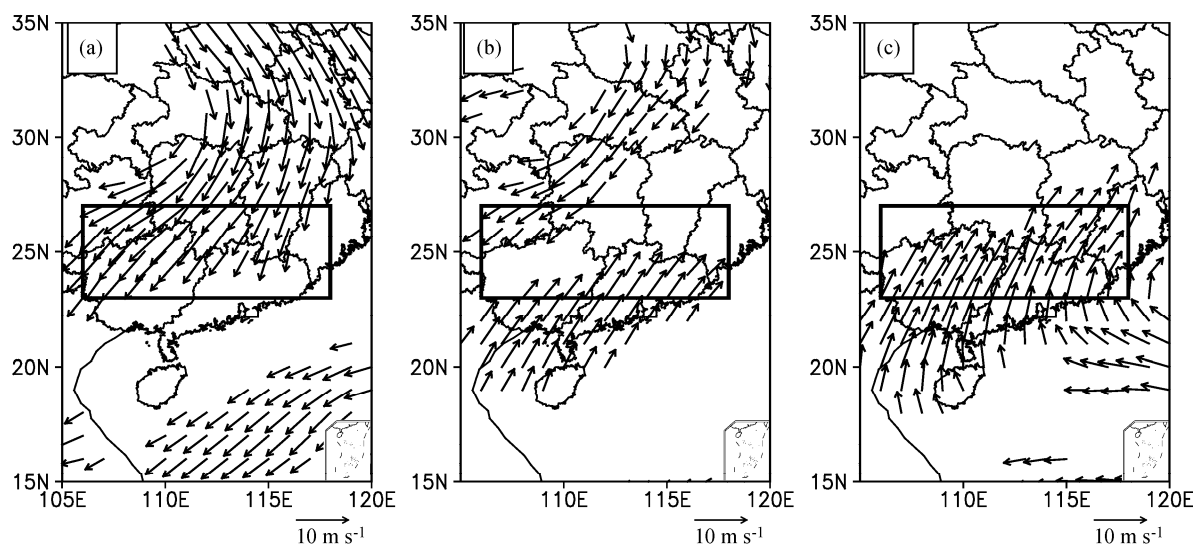


图 6 根据 850 hPa 风场分型的 3 种准静止锋类型图: (a) 北风辐合型, (b) 南北风辐合型, (c) 南风辐合型。图中的风场 (m s^{-1}) 为全风速 $\geq 4 \text{ m s}^{-1}$ 的风场, 矩形框表示关键区域 ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)

Fig. 6 Composite wind fields at 850 hPa of three types of fronts classified according to the wind convergence pattern in the frontal zone at 850 hPa: (a) Northerly convergence type; (b) southerly and northerly convergence type; (c) southerly convergence type. The wind fields are those wind speed is greater than 4 m s^{-1} , the blue box ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$) is the key area

多, 但仅停留在内蒙古附近, 没有继续南下, 可见南北风辐合型的北方冷空气势力要比北风辐合型的偏弱, 因此华南南部的偏南气流可以向北推进, 使得在关键区域的风场为南北风辐合型; 南风辐合型的东亚大槽已位于 140°E 以东, 对华南完全没有影响, 地面冷高压也很弱, 而在 90°E 附近, 15°~25°N 有一南支槽 (图 7c), 使得华南处于南支槽前的偏南气流中, 弱冷空气和偏强槽前气流使得关键区域内的风场为南风辐合型。

从合成的与 12 年平均的高度异常场 (图 7d-f) 中我们也能清楚地看到上述的三种类型的大气环

流的差异。此外, 三种强准静止锋的环流背景也表现出一些相似的地方: 与多年平均相比, 三种强准静止锋对应的 50°N 以北的地面冷高压都偏强, 说明冷空气都较强盛, 只是在我国的深入情况不一, 北风辐合型最强, 南风辐合型最弱; 三种强准静止锋也都处于 500 hPa 的负异常中, 只是强度不一, 北风辐合型所处的负异常最弱, 另两种类型情况相当; 南北风辐合型和南风辐合型在 500 hPa 孟加拉湾附近都为负异常, 说明南支槽偏强, 北风辐合型与 12 年平均的强度相当。总的来说, 与 12 年平均相比, 强准静止锋对应的北方冷空气和南方南支槽

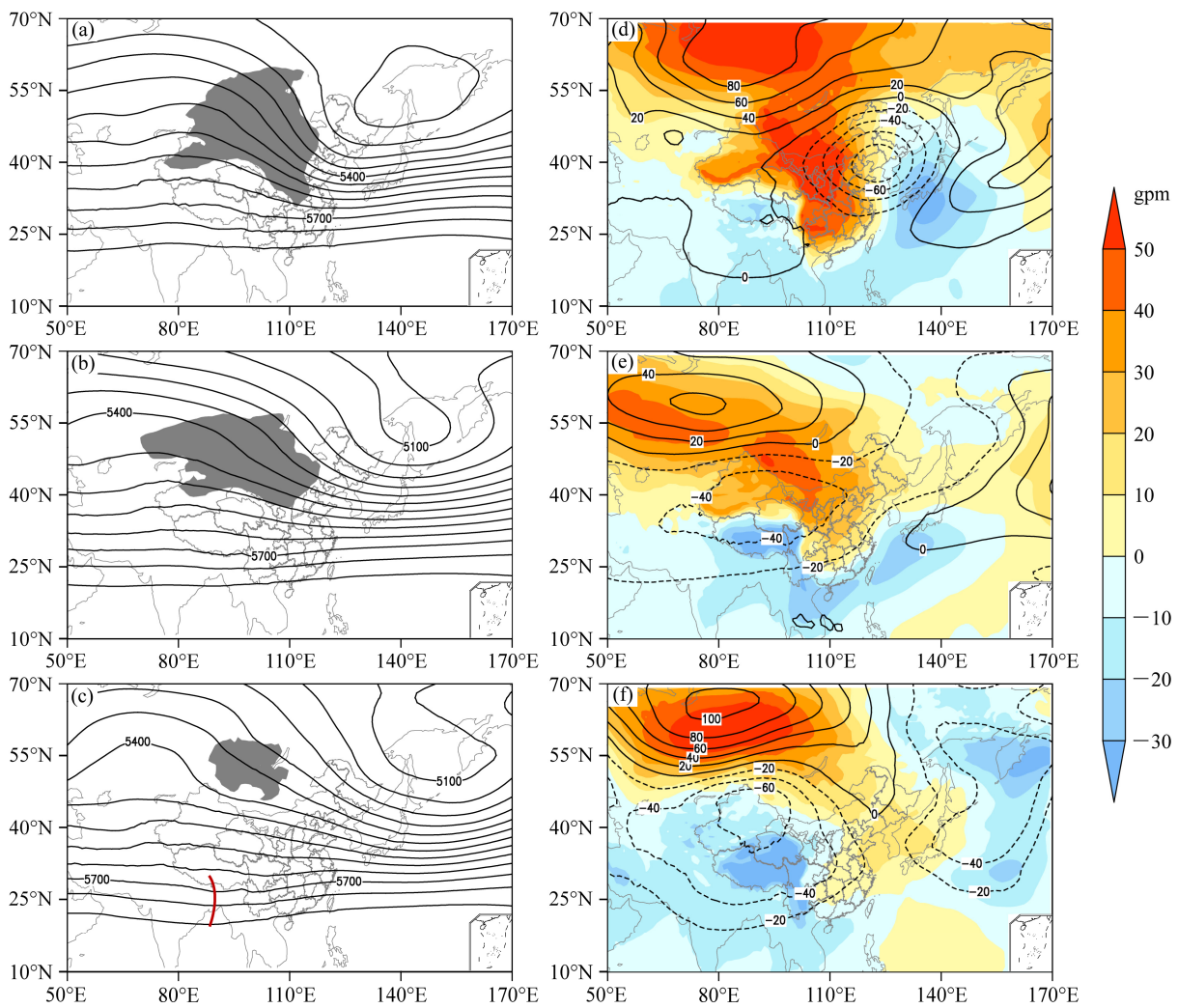


图 7 三种类型准静止锋合成的高度场图: (a) 北风辐合型; (b) 南北风辐合型; (c) 南风辐合型。图中等值线为 500 hPa 的高度场 (gpm), 灰色阴影为 1000 hPa 高度场大于 260 gpm 的区域, (c) 中的棕色曲线为南支槽。三种类型准静止锋合成的高度场图与 12 年冬季平均的差值场: (d) 北风辐合型; (e) 南北风辐合型; (f) 南风辐合型。等值线为 500 hPa 的高度场 (gpm), 填色阴影为 1000 hPa 高度差值场

Fig. 7 Composite geopotential height (gpm) of three types of fronts: (a) Northerly convergence type; (b) southerly and northerly convergence type; (c) southerly convergence type. The contours are for geopotential height (gpm) at 500 hPa; grey shadows are for geopotential height larger than 260 gpm at 1000 hPa; brown curve in Fig. 7c indicates the India-Burma trough. Composite geopotential height (gpm) of three types of fronts from the climatology: (d) Northerly convergence type; (e) southerly and northerly convergence type; (f) southerly convergence type. The contours are for geopotential height (gpm) at 500 hPa; shadows are for geopotential height at 1000 hPa

都偏强,不同类型的准静止锋只是冷空气和南支槽的强度配置不一。

下面,我们再来看一下这三种类型的强准静止锋对应的降水情况。由于北方冷空气强盛,北风辐合型 850 hPa 上的相对湿度大值区(大于 0.9 的区域)位于锋区以南,700 hPa 上锋区北部的上升运动也不明显(图 8a),因此该型在锋区内的降水较少,是三种类型中降水量最小的(图 9a);而受南北方都偏强的系统控制的南北风辐合型的 850 hPa 上相对湿度大值区位于锋区,700 hPa 上锋区内也全部为上升运动区(图 8b),因此该型在锋区内有一条东西向的降水大值带;主要受南支槽控制的南风辐合型 850 hPa 上的相对湿度大值区位于锋区,而且在锋区西南部达到了 0.95,700 hPa 上锋区内也全部为上升运动,数值也比南北风辐合型的要大,因此该型在锋区内有一条降水大值带,降水量比南北风辐合型大,是三种类型中降水量最多的。可以看出 850 hPa 上的水汽条件和 700 hPa 上的上升运动在关键区匹配良好,这与上文的“上升运动主要位于锋区以上”的讨论结果相吻合。

同时,我们也考察了三种强准静止锋类型对应的日降水量与 12 年冬季平均日降水量的异常场。从图 10 可以看出,三种类型的降水距平场在华南区域都为正,说明强准静止锋对应的华南冬季降水是偏强的,而偏强的程度与分布情况与图 9 的合成降水场相仿:北风辐合型在华南区域的降水正异常最少,偏多 2 mm 左右;南风辐合型的降水正异常最多,华南大部分地区降水偏多 5 mm 左右;南北风辐合型则介于两者之间,在华南中东部降水偏多 4 mm 左右。

5 华南准静止锋与华南冬季降水的关系

我们已经从上一节图 10 得出了“三种类型的强准静止锋事件对应的降水场与多年平均相比偏多”的结论,这一节将进一步探讨华南准静止锋与华南冬季降水的关系。首先定义了一个华南降水指数,为关键区域(23°~27°N, 106°~118°E)平均的日降水量标准化处理后的量值,然后计算了 2000 年冬至 2011 年冬逐日的 I_{scsf} 与华南降水指数的相关为 0.42(通过了自由度为 1083,显著性水平 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验)。说明在逐日连续的气候时间尺度上华南准静止锋与华南冬季降水关系

较为密切:准静止锋偏强时,降水偏多。

我们又考察了 188 个强准静止锋指数与其对应的华南降水指数的相关为 0.13,说明在强准静止锋前提下,准静止锋的强度与降水的对应关系不再良好。为了进一步分析强准静止锋背景下华南降水多寡的原因,定义华南降水指数 ≥ 0 的为强降水事件,华南降水指数 < 0 的为弱降水事件,将 188 个强准静止锋事件分为 59 个对应有强降水的事件和 121 个对应有弱降水的事件(188 个强准静止锋事件中受台风影响的 8 个事件已去除)。我们发现强弱降水事件合成的 850 hPa 水汽通量散度(图 11a)和 700 hPa 垂直速度(图 11b),还有为降水提供背景环流的 500 hPa 高度场(图 11c)有显著差异,而其他物理量场并没有显著差异(图略)。可以看出在强准静止锋的背景条件下,降水偏强时,在华南区域低层锋区前部的水汽通量辐合偏大,上升速度偏大,500 hPa 高度场上 100°E 左右的南支槽偏强,华南处于南之槽前,东亚大槽偏弱。

这说明,即使强准静止锋提供了冷暖气团在华南地区相遇的有利降水的大尺度环流场,大量的降水还是需要充足水汽和上升运动的配合。这也说明强准静止锋强度与降水量之间的非线性关系可能是由于强准静止锋的不同种类型所导致的,例如,在上一节我们发现南风型强准静止锋对应的南支槽偏强,水汽和垂直运动也偏强,因此南风型的准静止锋即使在强度不是很大的情况下也可能产生较强的降水。

6 结论与讨论

本文利用了 12 年冬季(2000~2011 年)逐日的 FNL 分析资料研究了冬季华南准静止锋偏强时的锋区特征,环流结构分型,以及准静止锋与华南冬季降水的关系,得到以下结论:

(1) 冬季华南准静止锋表现为对流层低层的 $\partial\theta_{se}/\partial y$ 大值区(即等 θ_{se} 线的密集带),锋面随高度向北倾斜。根据 850 hPa 的区域平均的 $\partial\theta_{se}/\partial y$ 定义了冬季华南准静止锋的强度指数 $I_{scsf} = -\partial\theta_{se}/\partial y|_{850 \text{ hPa}}$ (23°~27°N, 106°~118°E)。

(2) 冬季强准静止锋事件多发于 1、2 月,其发生频次有明显的年际变化,近 12 年呈现明显上升趋势。

(3) 冬季强准静止锋表现为等 θ_{se} 线、等温线的密集带,湿舌位于锋区以南,锋区逆温明显,伴随

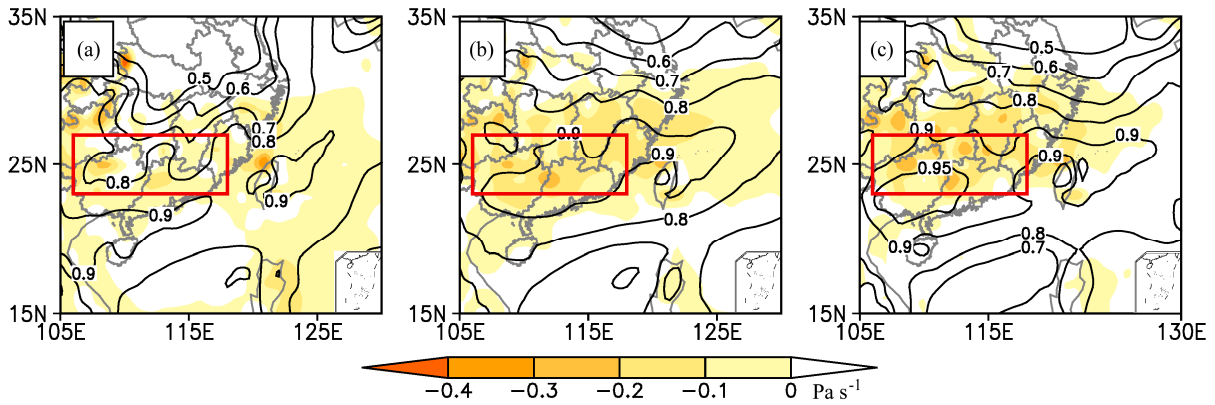


图 8 三种类型准静止锋合成的 850 hPa 相对湿度和 700 hPa 垂直速度图：(a) 北风辐合型；(b) 南北风辐合型；(c) 南风辐合型。图中等值线为相对湿度；填色阴影为垂直速度 (Pa s^{-1})；矩形框表示关键区域 ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)

Fig. 8 Composite relative humidity and vertical velocity at 850 hPa of three types of fronts: (a) Northerly convergence type; (b) southerly and northerly convergence type; (c) southerly convergence type. The contours are for relative humidity; yellow shadows are for vertical velocity (Pa s^{-1}); the blue box ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$) is the key area

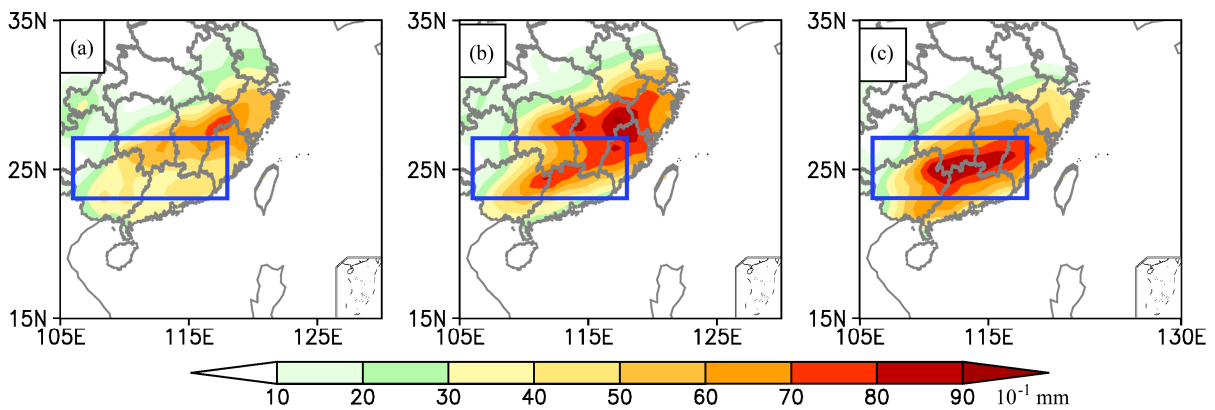


图 9 三种类型准静止锋合成的日降水量 (0.1 mm)：(a) 北风辐合型；(b) 南北风辐合型；(c) 南风辐合型。矩形框表示关键区域 ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)

Fig. 9 Composite daily precipitation (0.1 mm) of three types of fronts: (a) Northerly convergence type; (b) southerly and northerly convergence type; (c) southerly convergence type. The blue box ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$) is the key area

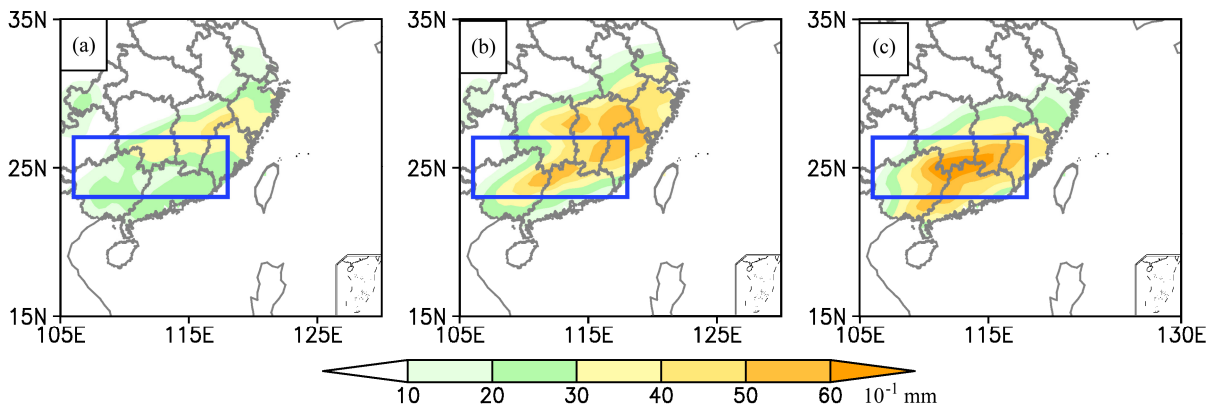


图 10 三种类型准静止锋的日降水量相对于 12 年冬季平均的日降水量的异常场 (0.1 mm)：(a) 北风辐合型；(b) 南北风辐合型；(c) 南风辐合型。矩形框表示关键区域 ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)

Fig. 10 Composite daily precipitation anomaly (0.1 mm) of three types of fronts from the climatology: (a) Northerly convergence type; (b) southerly and northerly convergence type; (c) southerly convergence type. The blue box ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$) is the key area

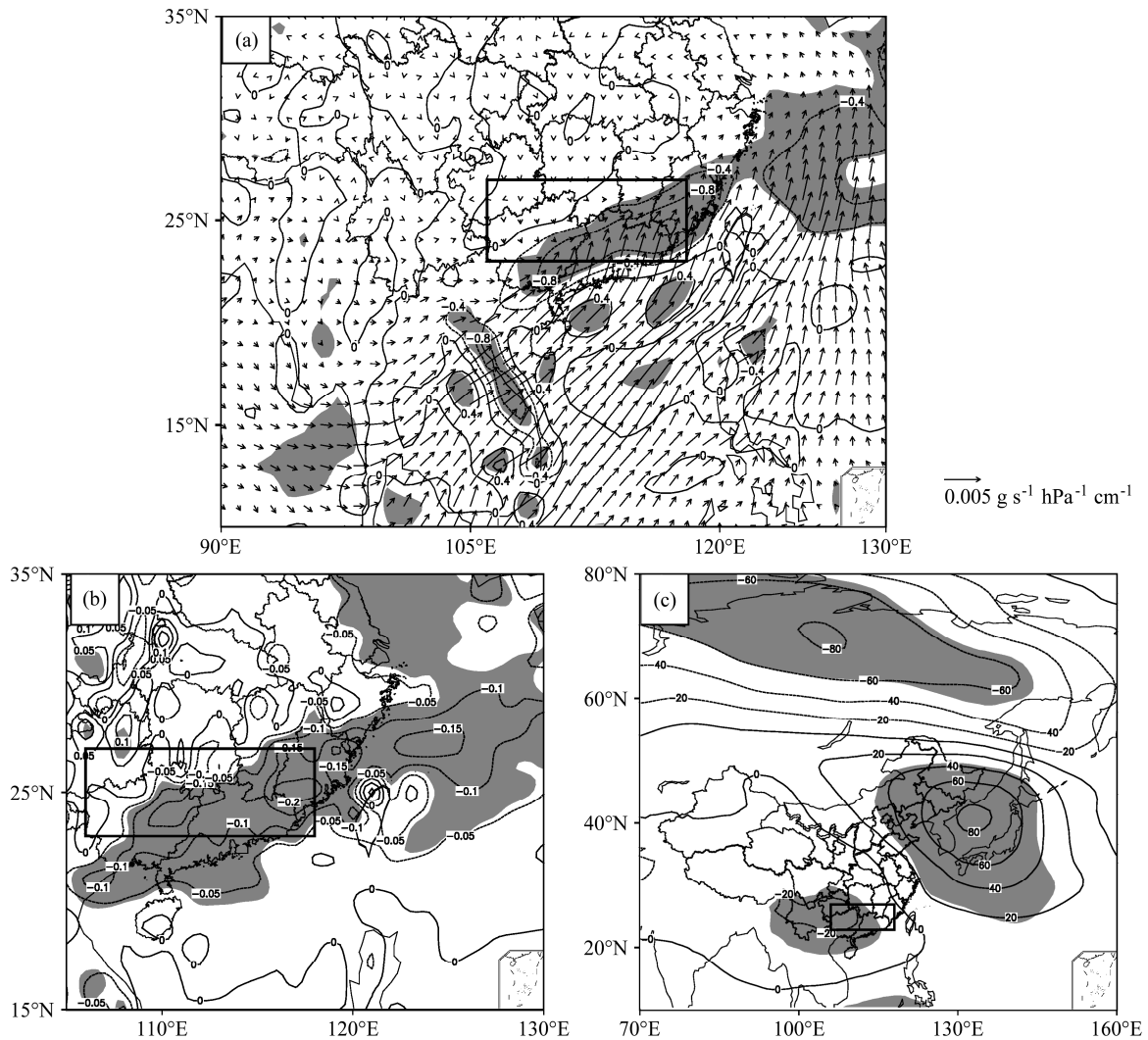


图 11 强、弱降水事件的差值场：(a) 850 hPa 的水汽通量 (单位： $\text{g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) 及其散度 (单位： $-10^{-8} \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)；(b) 700 hPa 的垂直速度 (单位： Pa s^{-1})；(c) 500 hPa 高度场 (gpm)。阴影区为超过 95% 统计置信度水平的区域；矩形框为表征华南准静止锋的关键区 ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)

Fig. 11 Composite differences between strong and weak precipitation events: (a) Water vapor flux ($\text{g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) and its divergence ($-10^{-8} \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) at 850 hPa; (b) vertical velocity (Pa s^{-1}) at 700 hPa; (c) geopotential height (gpm) at 500 hPa. The shaded areas are significant at the 95% confidence level; the box ($23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$) is the key area

正相对涡度和水汽通量辐合，锋区由南北风辐合构成，上升气流主要位于锋区上部，纬向有两个次级环流与锋区相对应。

(4) 根据 850 hPa 的锋区风场辐合情况，可将强华南准静止锋分为 3 种类型：北风辐合型，北风辐合型，南风辐合型，其中北风辐合型发生频次最多。三种类型中，北风辐合型对应的北方冷空气最强盛，水汽和上升运动条件最弱，华南冬季降水最少；南风辐合型对应的南支槽最活跃，北方冷空气最弱，水汽和上升运动条件最强，降水最多；北风辐合型则介于两者之间。

(5) 冬季华南准静止锋与冬季华南降水有一定相关，在强准静止锋的背景下，降水偏多时，华南低层的水汽通量辐合和上升运动偏强，500 hPa 华南处于偏强南支槽前。

要说明的是，本文基于一个简洁的锋强度指数对 12 年冬季的华南准静止锋的低层锋区的结构特征进行了统计研究，但与锋面理论相关的锋生函数、高空锋区等内容尚未涉及。例如，高空急流的加速可以使得高低层之间质量调整而引起锋生 (高守亭和陶诗言, 1991; 李永红和张可苏, 1992)，那么华南冬季多年平均的高空急流与准静止锋

生的关系如何?再例如,我们计算了12年冬季平均的锋生函数水平项(图略),华南区域为锋生,锋生函数大值区与我们选择的关键区域一致。这是因为我们选取的锋强度指数 $\partial\theta_{se}/\partial y$ 包含在锋生函数的水平项中:简化考虑等 θ_{se} 线平行于 x 轴,则 $\partial\theta_{se}/\partial x=0$, $|\nabla\theta_{se}|=-\partial\theta_{se}/\partial y$,化简得到的锋生函数水平项为: $\partial\theta_{se}/[\partial y(\partial v/\partial y)]$,式中包含了 $\partial\theta_{se}/\partial y$ 。那么,华南区域多年冬季平均的锋生函数倾斜项和非绝热加热项对华南准静止锋的贡献是锋生还是锋消呢?水平项中,变形场、散度场和涡度场对锋生的贡献又是如何的?如果用有预报意义的锋生函数指数来研究12年的冬季华南准静止锋结果又是怎样?这些问题都值得深入探讨,我们将在下一步的工作中展开研究。

参考文献 (References)

- 董海萍,倪娜,洪凯,等.2009.MM5模式对2008年1月25~30日我国南方强冰雪过程的数值模拟[J].暴雨灾害,28(1):29-35. Dong Haiping, Ni Na, Hong Kai, et al. 2009. Numerical simulation by mesoscale model MM5 on the severe snow and freezing-rain during 25-30 January of 2008 Over the southern China [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 28 (1): 29-35.
- 杜小玲,高守亭,彭芳.2014.2011年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究[J].大气科学,38(1):61-72. Du Xiaoling, Gao Shouting and Peng Fang. 2014. Study of the 2011 freezing rain and snow storm in Guizhou [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (1): 61-72.
- 杜小玲,蓝伟.2010.两次滇黔准静止锋锋区结构的对比分析[J].高原气象,29(5):1183-1195. Du Xiaolin, Lan Wei. 2010. Contrastive analysis on frontal structure of quasi-stationary front in two precipitation processes of Yunnan-Guizhou [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (5): 1183-1195.
- 池再香,杜正静,龙先菊,等.2010.2008年初贵州冰冻天气锋生场诊断分析[J].气象科技,38(5):558-564. Chi Zaixiang, Du Zhengjing, Long Xianju, et al. Analysis of frontogenesis field for early 2008 frozen weather in Guizhou Province [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 38 (5): 558-564.
- 高辉,陈丽娟,贾小龙,等.2008.2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析II.成因分析[J].气象,34(4):102-106. Gao Hui, Chen Lijuan, Jia Xiaolong. 2008. Amlysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: II. Possible climatic causes [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (4): 102-106.
- 高守亭,陶诗言.1991.高空急流加速与低层锋生[J].大气科学,15(2):11-21. Gao Shouting, Tao Shiyang. 1991. The lower layer frontogenesis induced by the acceleration of upper jet stream [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 15 (2): 11-22.
- 顾雷,魏科,黄荣辉.2008.2008年1月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系[J].气候与环境研究,13(4):405-417. Gu Lei, Wei Ke, Huang Ronghui. 2008. Severe disaster of blizzard, freezing rain and low temperature in January 2008 in China and its association with the anomalies of East Asian Monsoon system [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 405-417.
- 顾震潮,陈雄山,许有丰.1958.锋面假相当位温图和中国寒潮冷锋上界变化分析的应用[J].气象学报,29(1):45-56. Gu Zhengchao, Chen Xiongshan, Xu Youfeng. 1958. Frontal θ_{se} chart and its application to the analysis of upper boundary of cold-wave front in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29 (1): 45-55.
- 郭英莲,王继竹,李才媛,等.2009.2008年冬季准静止锋与1998年夏季梅雨锋的异同[J].暴雨灾害,28(4):349-356. Guo Yinglian, Wang Jizhu, Li Caiyuan, et al. 2009. The similarities and differences between the quasi-stationary front in the winter of 2008 and the Meiyu front in the summer of 1998 [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 28 (4): 349-356.
- 李崇银,杨辉,顾薇.2008.中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析[J].气候与环境研究,13(2):113-122. Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (2): 113-122.
- 李登文,乔琪,魏涛.2009.2008年初我国南方冻雨雪天气环流及垂直结构分析[J].高原气象,28(5):1140-1148. Li Dengwen, Qiao Qi, Wei Tao. 2009. Analyses on the freezing rain and snow weather circulation and vertical structure of southern China in Early 2008 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (5): 1140-1148.
- Liu D N, He J H, Yao Y H, et al. 2012. Characteristics and evolution of atmospheric circulation patterns during Meiyu over the Jianghuai valley [J]. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 48 (2): 145-152.
- 李永红,张可苏.1992.急流加速产生的高空锋生和低空锋生[J].大气科学,16(4):452-463. Li Yonghong, Zhang Kesu. 1992. Upper-level frontogenesis and lower-level frontogenesis forced by jet acceleration [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 16 (4): 452-463.
- 鹿世瑾.1990.华南气候[M].北京:气象出版社,42pp. Lu Shijin. 1990. South China Climate [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 42pp.
- Nan S L, Zhao P. 2011. Snowfall over central-eastern China and Asian atmospheric cold source in January [J]. *Int. J. Climatol.*, 32 (6): 888-899.
- 钱维宏,符娇兰.2009.2008年初江南冻雨过程的湿大气锋生[J].中国科学,39(6):787-798. Qian Weihong, Fu Jiaolan. 2009. Wet frontogenesis during Jiangnan freezing process at the beginning of 2008 [J]. *Science China Earth Sciences (in Chinese)*, 39 (6): 787-798.
- 孙建华,赵思雄.2008.2008年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结构分析[J].气候与环境研究,13(4):368-384. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2008. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over southern China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 368-384.
- 谭桂容,陈海山,孙照渤,等.2010.2008年1月中国低温与北大西洋涛动和平流层异常活动的联系[J].大气科学,34(1):175-183. Tan Guirong, Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2010. Linkage of the cold event in

- January 2008 over China to the North Atlantic Oscillation and stratospheric circulation anomalies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1):175–183.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 337–350. Tao Shiyan, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 337–350.
- 陶祖钰, 郑永光, 张小玲. 2008. 2008 年初冰雪灾害和华南准静止锋 [J]. *气象学报*, 66 (5): 850–854. Tao Zuyu, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling. 2008. Southern China quasi-stationary front during ice-snow disaster of January 2008 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 850–854.
- 韦晨. 2012. 2011 年初广西异常低温冰冻灾害成因分析 [J]. *热带地理*, 32 (1): 38–43, 49. Wei Cheng. 2012. Causes of the abnormal microtherm and frost weather in Guangxi at the beginning of 2011 [J]. *Tropical Geography (in Chinese)*, 32 (1), 38–43, 49.
- Wen M, Yang S, Kumar A, et al. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (3): 1111–1131.
- 杨贵名, 毛冬艳, 孔期. 2009. “低温雨雪冰冻”天气过程锋区特征分析 [J]. *气象学报*, 67(4): 653–665. Yang Guiming, Mao Dongyan, Kong Qi. 2009. Analysis of the frontal characteristics of the cryogenic freezing rain and snow weather. [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (4): 653–665.
- 尹东屏, 张备, 孙燕, 等. 2010. 2003 年和 2006 年梅汛期暴雨的梅雨锋特征分析 [J]. *气象*, 36 (6): 1–6. Yin Dongpin, Zhang Bei, Sun Yan, et al. 2010. Analysis of Meiyu front characters of Huaihe Valley rainstorm [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (6): 1–6.
- Zhao P, Zhang X D, Zhou X J, et al. 2004. The sea ice extent anomaly in the North Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon rainfall [J]. *J. Climate*, 17 (17): 3434–3447.
- 郑永光, 陈炯, 葛国庆, 等. 2007. 梅雨锋的典型结构、多样性和多尺度特征 [J]. *气象学报*, 65 (5): 761–772. Zheng Yongguang, Chen Jiong, Ge Guoqing, et al. 2007. Typical structure, diversity and multi-scale characteristics of Meiyu front [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (5): 761–772.