

叶丹, 张耀存. 2014. 冬季东亚副热带急流和温带急流协同变化与我国冷空气活动的关系 [J]. 大气科学, 38 (1): 146–158, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13110. Ye Dan, Zhang Yaocun. 2014. Association of concurrent variation between the East Asian polar front and subtropical jets with winter cold air activity in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 146–158.

冬季东亚副热带急流和温带急流协同变化 与我国冷空气活动的关系

叶丹 张耀存

南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料和地面台站气温观测资料, 分析了冬季东亚副热带急流 (EASJ) 和东亚温带急流 (EAPJ) 强度变化特征及其与我国境内冷空气活动的关系。以 ($45^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 和 ($27.5^{\circ}\text{N}\sim 37.5^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 区域平均的 300 hPa 全风速分别表征冬季 EAPJ 和 EASJ 的强度, 将两支急流的强度变化分为四种情况: EAPJ 和 EASJ 同强 (SS)、同弱 (WW)、以及强弱 (SW)、弱强 (WS)。分析四种急流强度变化情形下中国境内冷空气活动强度、路径、持续时间以及源地的不同特征, 发现当 EAPJ 和 EASJ 均强时, 冷空气从内蒙古中东部入侵, 主要影响华北、东北和东部沿海地区, 强度较弱, 持续时间短, 冷空气源地位于新地岛以东的洋面及陆地上; 当 EAPJ 和 EASJ 均弱时, 冷空气从新疆北部入侵, 影响我国大部分地区, 强度强, 持续时间长, 冷空气源地位于巴尔喀什湖西部; 当 EAPJ 强, EASJ 弱时, 冷空气从我国东北入侵, 主要影响我国东北部, 中国南部降温不明显, 冷空气强度较强, 持续时间短, 冷空气源地位于中、西西伯利亚地带; 当 EAPJ 弱, EASJ 强时, 冷空气从内蒙古中部入侵, 进而影响华北和我国东部地区, 但冷空气强度较弱, 冷空气源地位于贝加尔湖的西侧。进一步分析急流强度四种变化情形下的环流特征发现, EAPJ、EASJ 均弱时, 西伯利亚高压偏强, 阿留申低压偏弱, 东亚大槽偏深, 中国东部的偏北风强, 而 EAPJ 弱、EASJ 强时, 尽管西伯利亚高压和阿留申低压偏强, 东亚大槽偏深, 但中国东部的偏北风并不是很强, 而另两种情况时, 西伯利亚高压较弱, 东亚大槽也较弱, 中国东部的偏北风偏弱。

关键词 温带急流 副热带急流 两支急流协同变化 冷空气活动

文章编号 1006-9895(2014)01-0146-13

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13110

Association of Concurrent Variation between the East Asian Polar Front and Subtropical Jets with Winter Cold Air Activity in China

YE Dan and ZHANG Yaocun

School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract Winter cold air activity was examined in terms of the concurrent intensity variation between the East Asian polar front jet (EAPJ) and subtropical jet (EASJ) using NCEP/NCAR reanalysis dataset and observed daily temperature datasets from stations in China. The regional averages of 300-hPa wind over two domains ($45^{\circ}\text{--}60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{--}110^{\circ}\text{E}$; $27.5^{\circ}\text{--}37.5^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{--}160^{\circ}\text{E}$) were used to measure the strength of the East Asian polar front and subtropical jets. The results were classified into four situations based on jet intensity changes: strong EAPJ corresponding to strong EASJ(SS); weak EAPJ corresponding to weak EASJ (WW); strong EAPJ corresponding to weak EASJ(SW); and weak EAPJ

收稿日期 2013-01-14, 2013-04-21 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 41130963, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201006019, 高等学校博士学科点专项科研基金 20100091110003

作者简介 叶丹, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事东亚大气环流及其与我国气候关系的研究。E-mail: yczhang@nju.edu.cn

corresponding to strong EASJ (WS). Then, the features of the winter cold air activity were analyzed with respect to cold air intensity, route, duration, and origin, taking the jet intensity changes into account. During the SS situation, it was found that relatively weak cold air activity with short duration intrudes into the inland and coastal regions of northeastern China from Inner Mongolia. The genesis of the cold air can be traced back to the region to the east of Novaya Zemlya. During the WW situation, strong cold air activity with long duration intrudes into most parts of China from northern Xinjiang. The genesis of this cold air can be traced back to the west of Lake Balkhash. During the SW situation, relatively strong cold air activity with short duration intrudes into North China from the northeast, with no obvious temperature drop. The genesis of the cold air in this situation can be traced back to western Siberia. During the WS situation, relatively weak cold air activity intrudes from Inner Mongolia, affecting almost all of eastern China. The genesis of this cold air can be traced back to the west of Lake Baikal. Circulation features corresponding to the different jet intensity changes were also analyzed. During the WW situation, the Siberian high and Aleutian low are relatively strong and weak, respectively; moreover, the East Asian trough is relatively deep, and the northerly wind in eastern China is strong. During the WS situation, both the Siberian high and Aleutian low are relatively strong, the East Asian trough is deep, and the northerly wind in eastern China is weak. For the other two situations (WS and SW), the Siberian high is relatively weak, the East Asian trough is shallow, and the northerly wind in eastern China is weak.

Keywords Polar front jet, Subtropical jet, Concurrent variation of two jets, Cold air activity

1 引言

在东亚冬季风盛行期间, 冷空气活动频繁, 达到一定的强度即为寒潮, 这种向南爆发的冷空气会造成中国境内剧烈降温、降雪、大风、霜冻等灾害性天气, 从而对农业、交通和经济活动造成巨大损失。当寒潮爆发时, 高空波动和高空急流存在着明显的相互作用, 引起能量和动量的转换, 导致东亚高空急流强度发生变化 (Chang and Lau, 1980; 高守亭等, 1992), 进而影响冷空气的活动强度和路径。因此, 研究高空急流强度变化与冷空气活动的关系具有重要意义。

对流层高层环绕纬圈的急流带是中纬度大气环流系统中的重要成员之一。观测表明, 冬季东亚地区上空存在两支不同的急流: 东亚副热带西风急流 (EASJ) 和东亚温带急流 (EAPJ) (又称为极锋急流)。已有的研究表明, 东亚副热带急流在 6 月中旬自青藏高原南侧北跳至高原北侧的同时, 东亚温带急流消失; 而东亚副热带急流于 10 月中旬的南撤则伴随着东亚温带急流在高原北侧的出现, 东亚副热带急流位于青藏高原南侧约 $20^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, 并向东北延伸到西北太平洋上空, 东亚温带急流位于高原北侧约 $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 地区上空 (邹进上等, 1990)。副热带急流的形成与 Hadley 环流输送的来自热带地区的大气角动量有关, 温带急流的形成则与中纬度斜压涡旋强迫有着密切关系, 而低层的温度梯度是斜压涡旋产生的重要原因 (Lee and Kim, 2003)。此外, 急流与高空和地面锋区相对应, 锋区内扰动的

发展和风暴的生成会带来强降水、寒潮等极端天气、气候事件 (高守亭和陶诗言, 1991; 丁一汇, 2005)。在以往关于东亚高空急流与冬季风关系的研究方面, Yang et al. (2002) 指出冬季西太平洋急流 ($30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 的异常与整个东亚—太平洋—北美冬季气候异常相关联, 当冬季西太平洋急流增强时, 东亚冬季风加强, 频繁的冷空气活动直接导致东亚地表温度降低。毛睿等 (2007) 指出在年际尺度上, 冬季东亚上空西风急流 ($30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $127.5^{\circ}\text{E}\sim 155^{\circ}\text{E}$, 200 hPa 纬向风) 存在强度的变化和位置的南北移动, 并通过东亚冬季风影响中国的温度和降水分布。冬季自东亚至西太平洋上空的西风急流与东亚温带急流区域的西风有反相变化特征, 并且与东亚冬季风关系密切 (Jhun and Lee, 2004)。此外, 还有研究表明, 东亚副热带急流与冬季风具有正相关关系, 即副热带急流越强, 冬季风越强, 而高纬度的 200 hPa 纬向风和冬季风具有负相关关系, 即高纬度地区纬向风越大, 冬季风越弱 (况雪源等, 2008)。Li and Yang (2010) 利用 200 hPa 纬向风切变表征东亚冬季风的强弱变化。由此可见, 东亚高空急流与东亚冬季风有着密切关系。虽然冬季风强的时候, 对应着频繁的冷空气活动, 但关于高空急流与冷空气活动关系的研究还不多。此外, 过去有关高空急流与东亚季风关系的研究更多的是关注东亚副热带西风急流, 而温带急流作为东亚高空急流整体的一部分, 与副热带急流具有协同变化关系, 这种协同变化关系与冬季风爆发、中国境内冷空气活动等也必然会存在一定的联系, 目前考虑温带急流

和副热带急流的不同强度变化对冬季冷空气活动强度和路径影响的研究尚不多见,因此有必要开展急流协同变化与冷空气活动关系的研究。本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料和地面台站气温观测资料,分析冬季东亚副热带急流(EASJ)和东亚温带急流(EAPJ)强度变化特征及其与影响我国的冷空气活动强度、路径、持续时间以及源地的不同特征,为我国冬季冷空气活动的预报提供新的思路。

2 资料与方法

本文所用资料:(1)中国境内 724 个站的日平均气温观测资料,时间为 1960 年 12 月~2008 年 2 月;(2) NCEP/NCAR 逐日再分析资料(Kalnay et al.,1996),所选要素包括海平面气压场、500 hPa 位势高度场、1000 hPa 风场,时间为 1960 年 1 月~2008 年 12 月,资料水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (格点数为 144×73),垂直方向为 17 层。本文中的冬季定义为 12 月 1 日~2 月 28 日,在分析两支急流的强度变化时,将逐日资料处理成候平均资料。

为了确定温带急流和副热带急流的关键区,本文首先计算中国东部地区 1000 hPa 经向风与 300 hPa 全风速的相关系数,找出相关的显著区域,在此基础上利用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料统计逐日急流发生频数,在急流发生频数高的区域确定急流的强度和关键区。逐日急流发生频数计算方法为:在东亚—太平洋($20^{\circ}\text{N} \sim 70^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E} \sim 170^{\circ}\text{E}$)范围内查找风速大值中心,若该中心满足:(1)中心风速值 $\geq 28 \text{ m s}^{-1}$; (2)该中心周围 8 个格点上的风速值均小于该中心的风速值,则定义该中心为一个急流中心,记下该中心的经纬度位置(张耀存等,2008)。对每年的 12 月、1 月和 2 月的逐日资料重复进行这一过程,最后得到 48 个冬季每个格点上的急流发生频数。

3 温带急流和副热带急流协同变化和冬季冷空气活动的关系

3.1 温带急流和副热带急流关键区的选择

由于在 300 hPa 高度上温带急流最强,副热带急流在 300 hPa 与 200 hPa 高度上的强度相当,本文在 300 hPa 高度上选取副热带急流和温带急流活动的关键区域。因为冷空气南下,经常伴随着大风,所以经向风从某种程度能反映冷空气的活动特征,并且是表征寒潮的一个重要指标。图 1 给出的是中国

东部地区区域($105^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$, $25^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$)冬季平均 1000 hPa 经向风与 300 hPa 全风速的相关图和冬季 300 hPa 全风速分布图。从图中等值线分布可清楚地看到副热带急流中心主要位于 $120^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$ 、 $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$,而温带急流由于具有显著的瞬变特征,强度和位置变动范围较大,在气候平均风场上温带急流仅表现为风速大值区,因此温带急流活动区域不容易确定。从图 1 的相关系数分布(填色图)看到,经向风与副热带急流区和温带急流区的全风速相关系数最高,与温带急流活动区域的风速相关达到 0.7,与副热带急流活动区域的风速相关达到 -0.7,两个高相关区相对独立。从低层经向风与高空风场的相关关系上可以看到,冬季影响中国东部地区的冷空气活动与两支急流强度变化有着密切联系。

为了进一步确定两支急流变化的关键区,图 2 给出了基于逐日资料统计出的 300 hPa 冬季急流发生频数。从图中可以看到,东亚上空 $45^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 为温带急流活动频繁的区域,副热带急流主要活动于 $20^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 地区,并从中国东部地区上空向东北方向延伸,温带急流活动区和副热带急流活动区相对独立。根据低层经向风与高空风场的相关系数和急流发生频数分布图,选取 $45^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$ 范围为温带急流的关键区,选取 $27.5^{\circ}\text{N} \sim 37.5^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$ 范围为副热带急流的关键区。对关键区的全风速进行区域平均,逐候计算 EAPJ 和 EASJ 的强度,然后对每个冬季 18 个候的 EAPJ 和 EASJ 强度进行标准化(即每年共 18 候标准化一次),用标准化后的区域平均风速值分别表征温带急流和副热带急流的强度,由此确定温带急流和副热带急流强度指数。在此基础上,以 ± 0.8 为参考标准,当急流强度指数大于 0.8 (小于 -0.8) 时,分别表示 EAPJ 和 EASJ 强度强(弱)。根据急流的强度变化,挑选出 EAPJ 和 EASJ 两支急流强弱变化的不同配置,得到两支急流强度变化的四种情形。在总共 864 候中,两支急流都强(记为 SS),有 33 次;两支急流都弱(WW),有 31 次;EAPJ 强、EASJ 弱(SW),有 55 次;EAPJ 弱、EASJ 强(WS),有 66 次。

3.2 两支急流不同强度变化下的冷空气活动特征

从以往关于寒潮的研究中(朱乾根等,2000)可知,冷空气入侵我国的路径主要分为四条:(1)西北路径:冷空气自新地岛以西的白海、巴伦支海经西伯利亚、蒙古进入我国;(2)北方路径:冷空

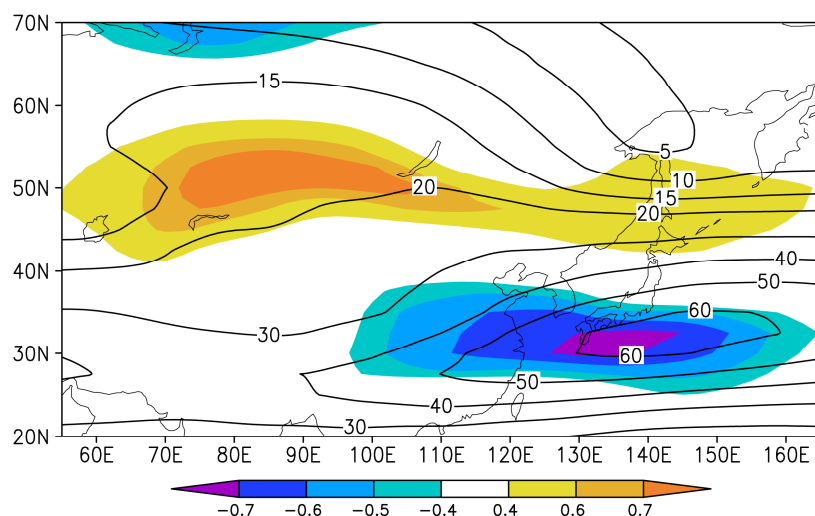


图1 1000 hPa 区域(25°N~50°N, 105°E~120°E)平均经向风与300 hPa全风速的相关(填色图, 信度为95%、99%的阈值分别是0.35、0.45)和300 hPa气候平均风速(等值线, 单位: m s^{-1})

Fig. 1 Geographical distribution of correlations between the regional mean of 1000-hPa meridional wind speed over the domain (25°–50°N, 105°–120°E) and 300-hPa wind speed in each grid over East Asia (shaded, the threshold values at the 95% and 99% confidence levels of significance are 0.35 and 0.45), and climatological means of 300-hPa wind speed (contours, units: m s^{-1})

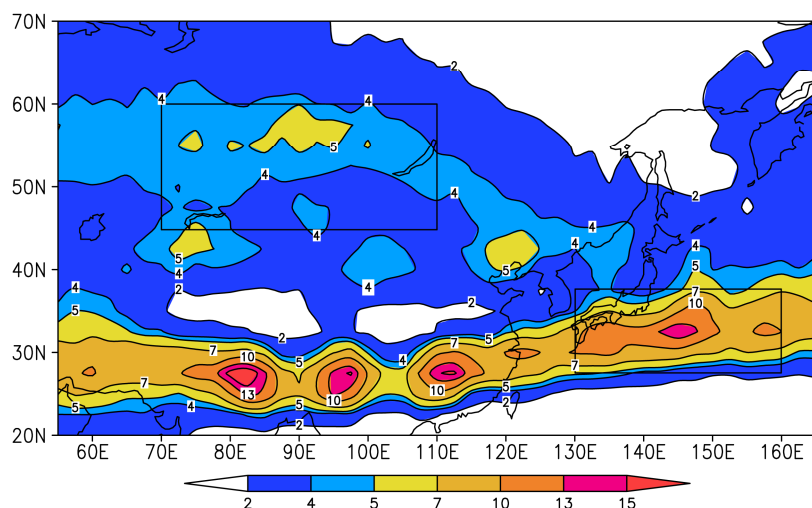


图2 气候平均冬季300 hPa逐日急流发生频数分布

Fig. 2 The climatological winter mean jet-center numbers at 300 hPa

气自新地岛以东喀拉海或新西伯利亚进入亚洲北部, 自北向南经蒙古进入我国; (3) 西方路径: 冷空气在 50°N 以南欧亚大陆自西而东经新疆、蒙古影响我国东部; (4) 东北路径: 冷空气自鄂霍次克海或西伯利亚东部向西南影响我国东北。本文试图探讨副热带急流和温带急流不同强度变化情形下冷空气强度和路径特征, 从高空急流变化的角度寻找影响我国冷空气活动的预报指标。由于地面温度变化可表征冷空气活动强度和路径特征, 下面将分析副热带急流和温带急流不同强度变化情形下对应的地面 24 h 温度变化, 考虑到本文中高空急流强

度变化是以候平均风速表征的, 在高空急流强度变化的一个候里, 冷空气活动影响我国的时间可能会出现在不同的日期, 因此对应四种情况 24 h 变温的起始时间也会不同, 本文给出了冷空气活动影响我国最为显著时段的地面温度变化。图 3 是两支急流均强(SS)情况下 24 h 变温合成图, 从图中可看出最先在我国东北地区出现降温, 之后降温幅度最大区出现在辽东半岛, 冷空气从内蒙古中东部入侵我国, 影响华北、东北及东部沿海地区, 但强度不大, 且影响时间很短, 这种情况与北方路径一致。图 4 是两支急流均弱(WW)情况下 24 h 变温图, 从图

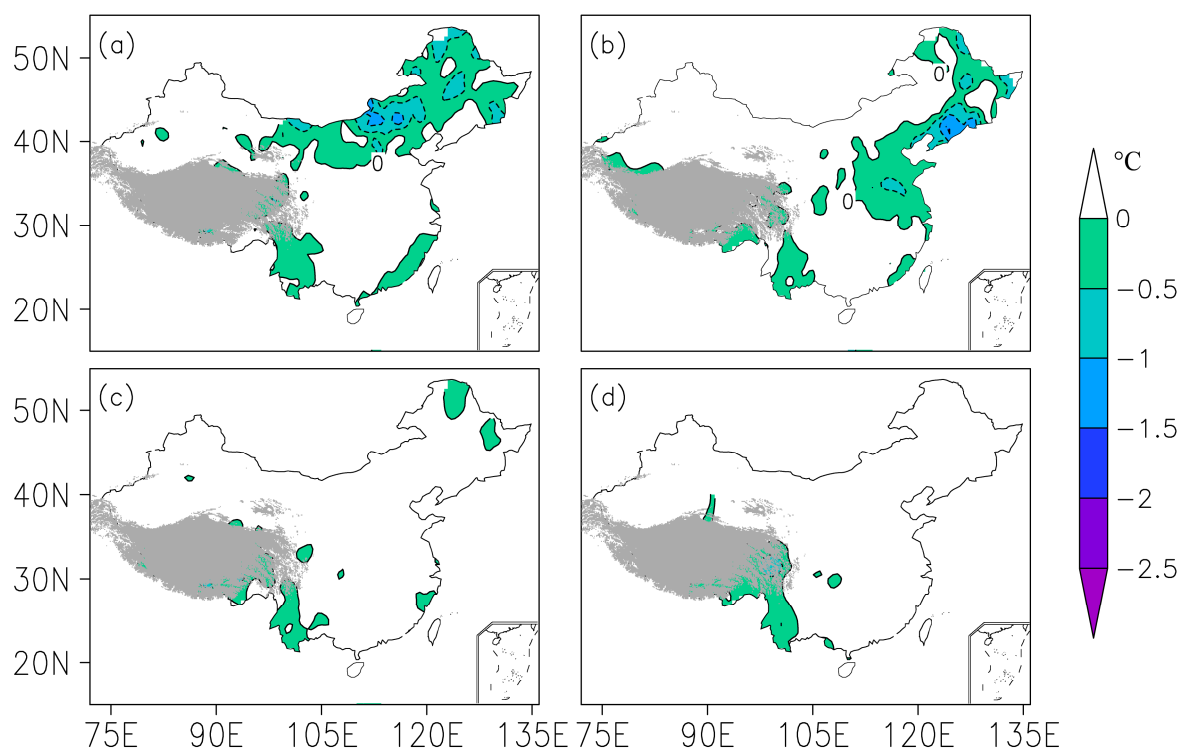


图3 温带急流和副热带急流都强(SS)情况下24 h变温合成图(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a)、(b)、(c)、(d)依次是所在候的第一天与前一天的温度差、第二天与第一天的温度差、第三天与第二天的温度差、第四天与第三天的温度差

Fig. 3 Geographical distribution of 24 h temperature change with the occurrence of strong East Asian Polar Jet (EAPJ) and strong East Asian Subtropical Jet (EASJ) (units: $^{\circ}\text{C}$): (a) Temperature difference between the first day of the current pentad and the last day of the pre-pentad; (b) between the second day and the first day of the current pentad; (c) between the third day and the second day of the current pentad; (d) between the fourth day and the third day of the current pentad

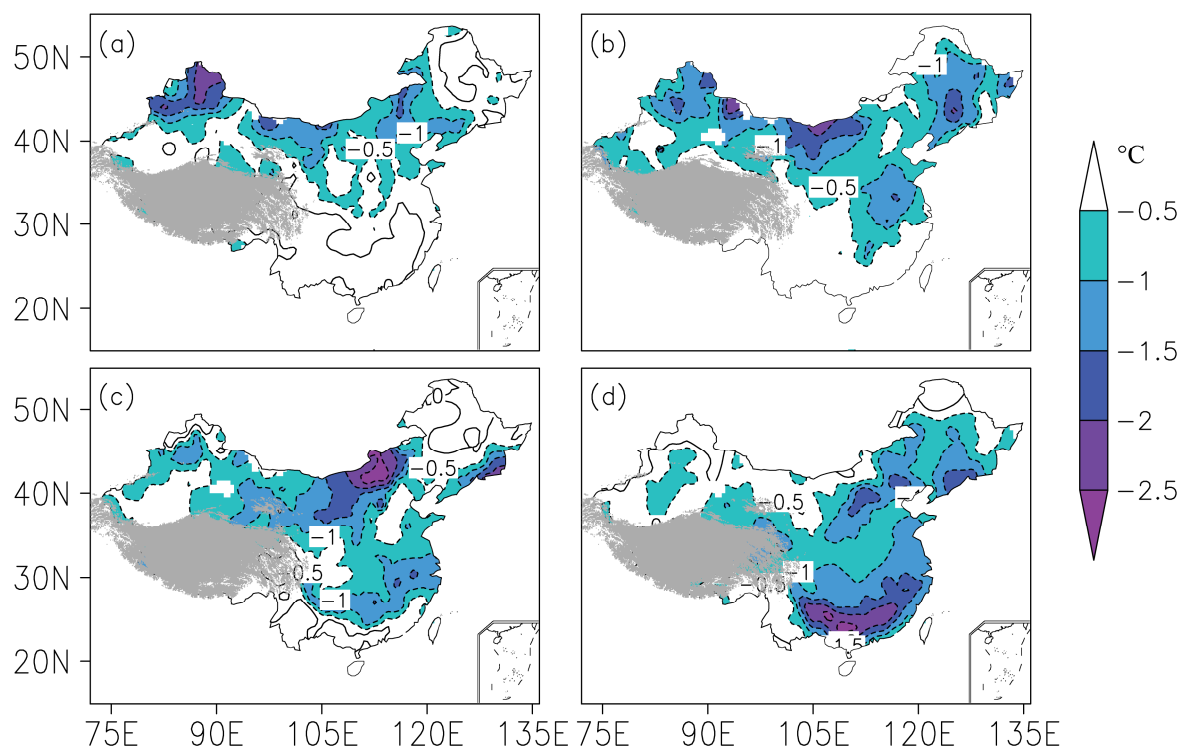


图4 同图3, 但为温带急流和副热带急流均弱(WW)的情况

Fig. 4 The same as in Fig. 3, but for weak EAPJ and weak EASJ

中可看出, 这种情形在新疆北部最先有明显的降温, 之后最大降温区向东北、中国东部移动, 冷空气从新疆北部入侵, 冷空气强度强, 降温幅度大, 且持续时间长, 范围涉及全国大部分地区, 这种情况与西方路径相对应。图 5 是温带急流强、副热带急流弱 (SW) 情况下 24 h 变温图, 从图中可看出降温是从中国东北部开始逐步向中国南部扩展, 主要影响我国东北部, 中国南部降温不明显, 冷空气强度较强, 但持续时间短, 这种情况与东北路径一致。图 6 是温带急流弱、副热带急流强 (WS) 情况下 24 h 变温图, 从图中可看出降温最先出现在内蒙古中部, 进而影响华北和我国东部地区, 降温强度不大, 但影响范围涉及整个中国境内, 这种情况大致与西北方路径相对应。

3.3 冷空气源地特征

为了探讨副热带急流和温带急流强度四种变化情况下影响我国的冷空气源地, 针对上文给出的冷空气活动影响我国最为显著时段分析冷空气影响我国之前 1~2 候 850 hPa 候平均温度和高度距平 (图 7)。图 7a 是 EAPJ 强、EASJ 强 (SS) 时, 冷空气影响我国前两候的温度距平, 从图中可以看出, 最大温度负距平区位于新地岛以东的洋面及陆地上, 中心位于 120°E, 最大温度距平达到 -2°C, 并且与一个位势高度负距平中心对应, 冷空气影响我国前一候时 (图略), 负温度距平扩展到中国上空, 与此相对应, 冷空气的入侵路径位于我国内蒙古中东部地区。由此可知, 两支急流都强时影响我国的冷空气源地在新地岛以东地区, 与北方路径冷空气的源地 (新地岛以东喀拉海或新西伯利亚) 一致。图 7b 是 EAPJ 弱、EASJ 弱 (WW) 时冷空气影响我国前两候的温度距平, 从图中可以看到, 温度负距平的大值区位于巴尔喀什湖的西部, 最大温度距平达到 -1.5°C, 从前一候的温度变化上 (图略) 看到, 最大温度负距平中心东移至巴尔喀什湖, 最大温度距平达到 -3°C, 由此可知, 两支急流均弱时影响我国的冷空气源地位于巴尔喀什湖以西的大陆上, 与从新疆北部入侵我国的冷空气路径一致, 冷空气以西方路径影响我国。图 7c 是 EAPJ 强、EASJ 弱 (SW) 时, 冷空气影响我国前一候的温度距平, 从图中可以看到, 温度负距平的大值区位于西西伯利亚偏东地区, 最大温度距平达到 -2.4°C, 同时存在一个位势高度负距平中心, 表明温带急流强、副热带急流弱时影响我国的冷空气源地位于中

西伯利亚偏西地区, 与东北路径冷空气源地基本一致。图 7d 是 EAPJ 弱、EASJ 强 (WS) 时, 冷空气影响我国前两候的温度距平, 温度负距平的大值区位于巴尔喀什湖, 负距平范围较大, 一直扩展到中国境内, 而欧亚大陆、新地岛以西也存在一个负距平中心, 并且有一个位势高度负距平中心相对应, 与西北路径的冷空气源地基本一致。

3.4 大气环流特征

为了探讨冷空气活动强度和路径变化与两支急流强度变化的关系, 本文接下来分析两支急流不同强度变化的四种情形对应的大气环流特征, 主要分析海平面气压场、500 hPa 位势高度场、反映大气斜压性的 Eady 增长率以及 1000 hPa 矢量风场等不同高度上的环流特征。以下均为候平均的合成场和距平场。

图 8 给出的是急流强度四种变化情形下海平面气压的合成场及其距平场。从图 8 等值线可以看出两支急流不同强度变化情形下西伯利亚高压和阿留申低压中心位置的差异, 两支急流都弱 (WW) 时, 阿留申低压中心位置比其他三种情形偏东, EAPJ 弱、EASJ 强 (WS) 的情况下阿留申低压位置更偏西。对于西伯利亚高压的中心位置, 四种情况差异不大, 当 EAPJ 强的两种情况 (SS 和 SW), 相较于 EAPJ 弱的两种情况 (WW 和 WS), 西伯利亚高压中心位置略偏向西南。分析海平面气压距平值发现, 当温带急流强 (SS 和 SW 这两种情况) 时, 西伯利亚高压为负距平, 较平均态弱, 而两支急流均强时 (SS), 负距平值更大, 西伯利亚高压强度显著减弱; 当温带急流弱 (WW 和 WS 这两种情况) 时, 则刚好相反, 西伯利亚高压为正距平, 强度偏强。当副热带急流强 (SS 和 WS 这两种情况) 时, 阿留申低压均为负距平, 较平均态强, 温带急流弱时 (WS), 负距平值更大, 阿留申低压显著增强; 当副热带急流较弱 (WW 和 SW 这两种情况) 时, 则刚好相反。

图 9 给出了急流强度变化对应的 500 hPa 高度场。寒潮冷空气一般沿着东亚大槽槽后的西北气流运动, 从图中可看出东亚大槽、北美大槽以及欧洲大槽的变化特征。对比急流强度变化四种情形对应的 500 hPa 高度场变化发现, 两支急流均强 (SS) 时, 北美大槽深, 欧洲大槽也较为深厚, 但是东亚大槽弱; 两支急流均弱 (WW) 时, 东亚大槽偏强, 槽线呈现出西南—东北向倾斜形势, 但北美大槽和欧洲大槽相对都较弱; 当温带急流强、副热带急流

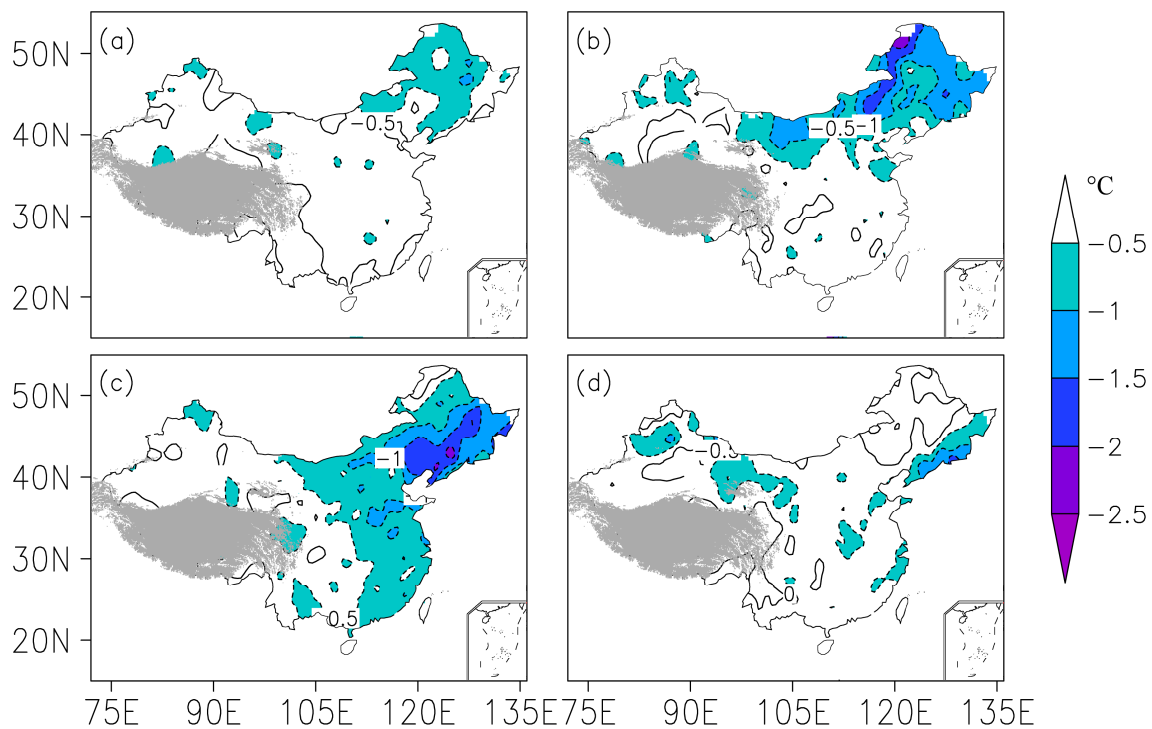


图5 温带急流强、副热带急流弱(SW)情况下24 h变温合成图(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a)、(b)、(c)、(d)依次是所在候第五天与第四天的温度差、下一候的第一天与所在候的第五天的温度差, 依此类推

Fig. 5 Geographical distribution of 24 h temperature change with the occurrence of strong EAPJ and weak EASJ (units: $^{\circ}\text{C}$): (a) Temperature difference between the fifth day and the fourth day of the current pentad; (b) between the fifth day of the current pentad and the first day of the next pentad; (c) between the second day and the first day of the next pentad; (d) between the third day and the second day of the next pentad

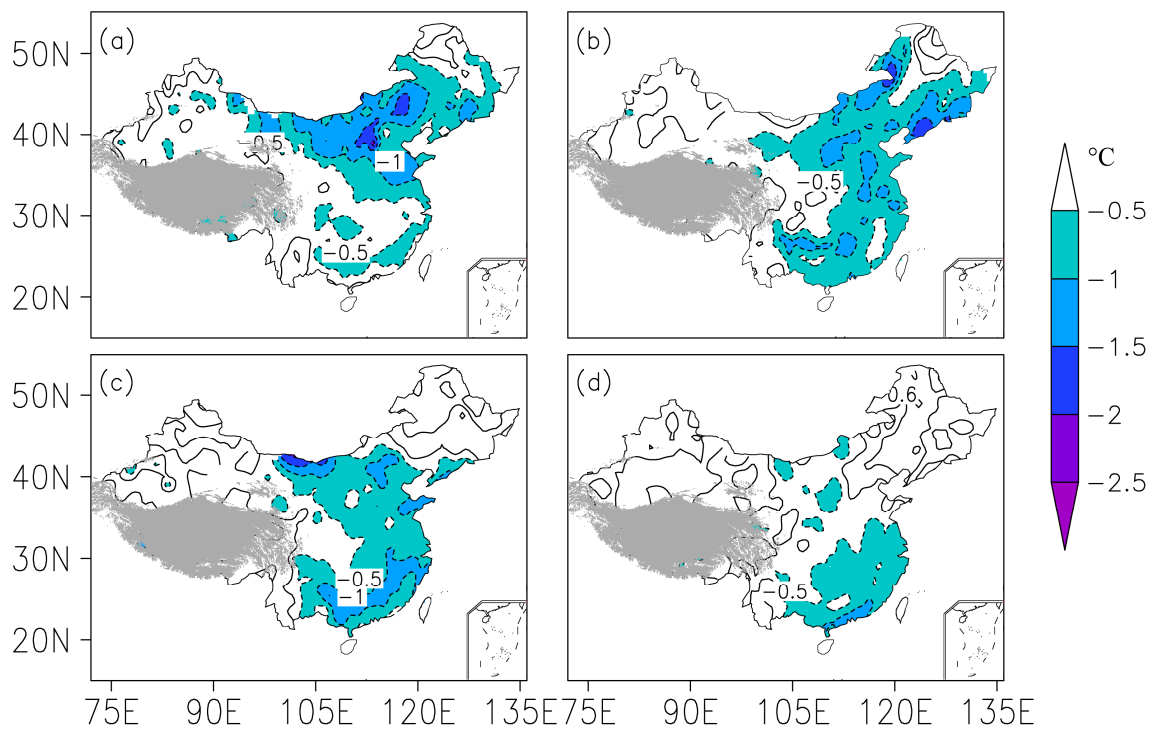


图6 温带急流弱、副热带急流强(WS)情况下24 h变温合成图(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a)、(b)、(c)、(d)依次是前一候的第四天与第三天的温度差、前一候的第五天与第四天的温度差, 依此类推

Fig. 6 Geographical distribution of 24 h temperature change with the occurrences of weak EAPJ and strong EASJ (units: $^{\circ}\text{C}$): (a) Temperature difference between the fourth day and the third day of the pre-pentad; (b) between the fifth day and the fourth day of the pre-pentad; (c) between the first day of the current pentad and the fifth day of the pre-pentad; (d) between the second day and the first day of the current pentad

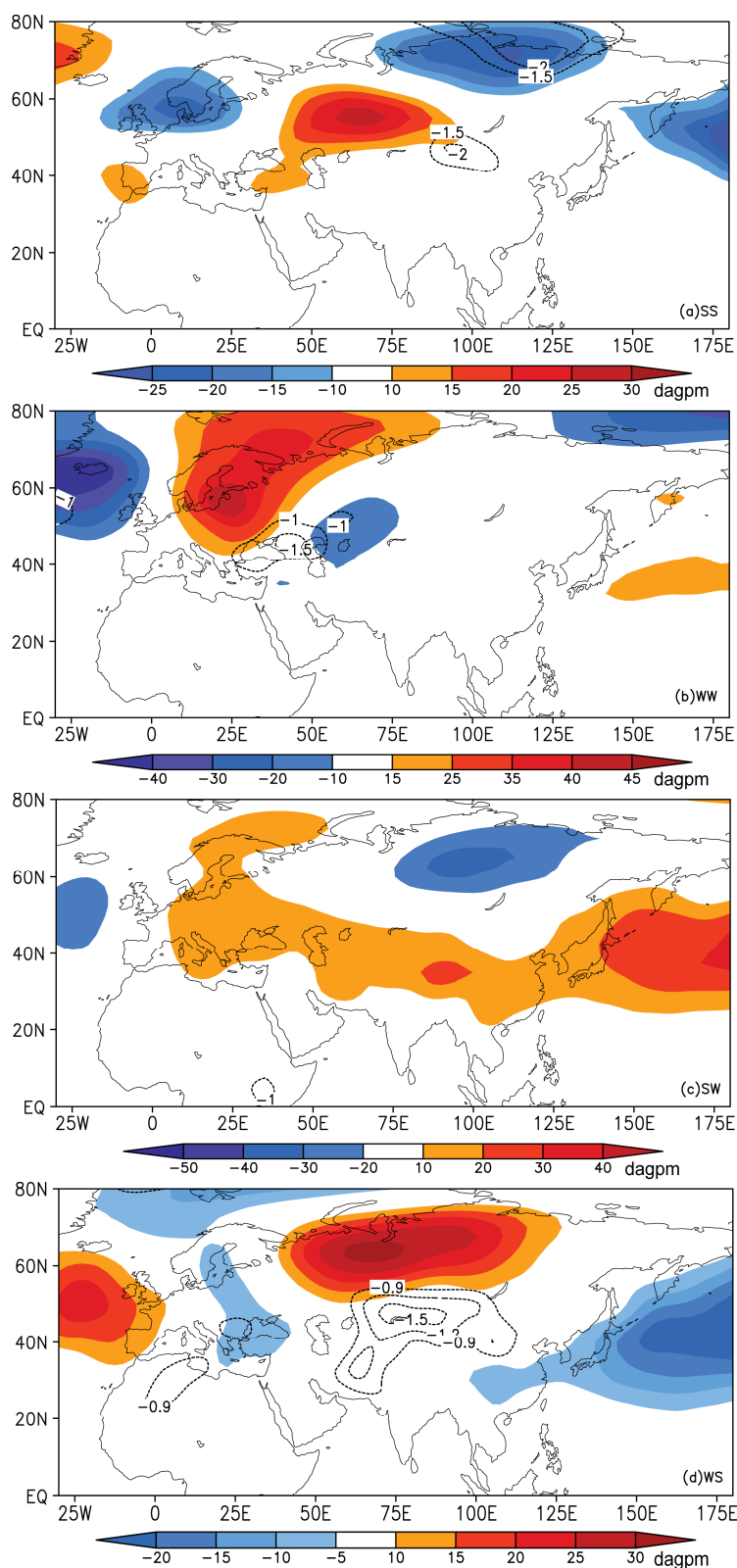


图 7 850 hPa 合成温度距平场 (等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$, 通过 95% 以上的信度检验) 和高度场距平 (填色图, 单位: dagpm): (a) SS 前两候; (b) WW 前两候; (c) SW 前一候; (d) WS 前两候

Fig. 7 Composites of 850-hPa temperature anomaly (contour, units: $^{\circ}\text{C}$) and 850-hPa geopotential height anomaly (shaded, units: dagpm): (a) 2-pentad lead for strong EAPJ and strong EASJ (SS) situation; (b) 2-pentad lead for weak EAPJ and weak EASJ (WW) situation; (c) 1-pentad lead for strong EAPJ and weak EASJ (SW) situation; (d) 2-pentad lead for weak EAPJ and strong EASJ (WS) situation

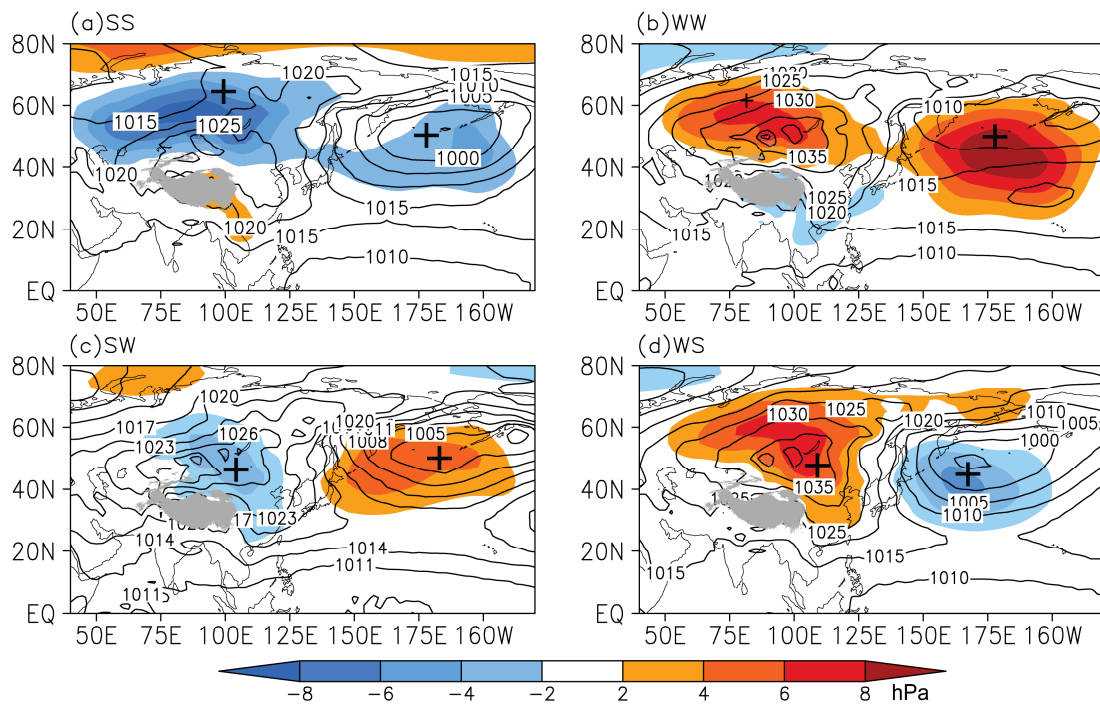


图 8 海平面气压场的合成场（等值线，等值线间隔为 5 hPa）和距平场（填色图，单位：hPa，“+”号区通过 95% 以上的信度检验），图中灰色阴影为海拔高度 3000 m 以上的青藏高原：(a) SS；(b) WW；(c) SW；(d) WS

Fig. 8 Composites (contour, the interval of contour is 5 hPa) and composite anomalies (shaded, “+” indicates the 95% confidence level) of sea level pressure: (a) SS; (b) WW; (c) SW; (d) WS

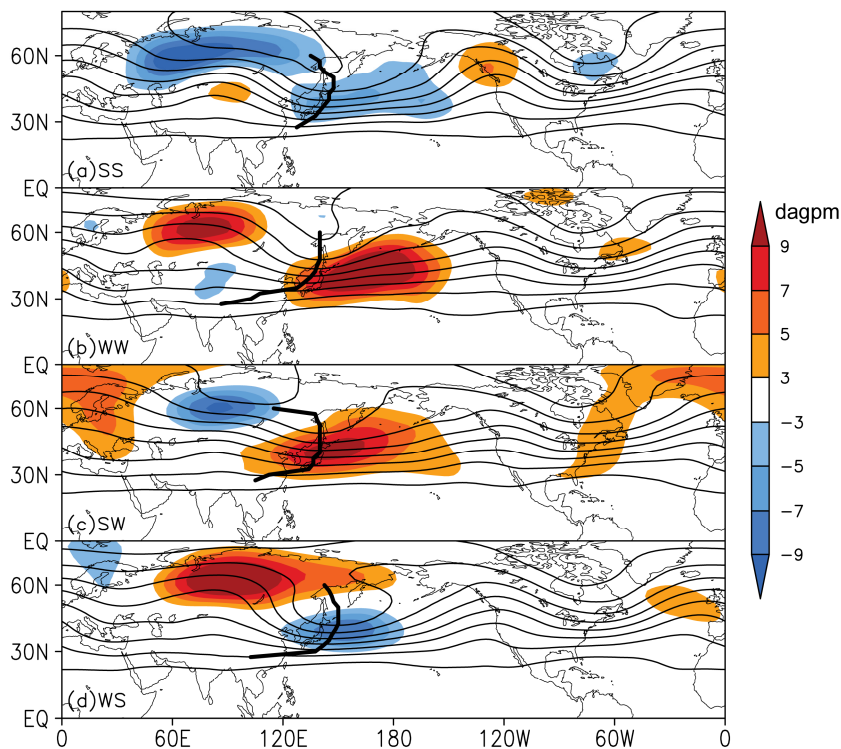


图 9 500 hPa 位势高度合成场（等值线，等值线间隔为 10 dagpm）和距平场（填色图，通过 95% 的信度检验，单位：dagpm）：(a) SS；(b) WW；(c) SW；(d) WS。东亚沿岸地区的粗实线为槽线

Fig. 9 Composites of geopotential height at 500 hPa (contour, the interval of contour is 10 dagpm) and its anomalies (shaded, it reaches the 95% confidence level): (a) SS; (b) WW; (c) SW; (d) WS. The thick solid line is the East Asian trough

弱 (SW) 时, 高度场平直, 欧洲和北美以及东亚大槽均较弱; 当温带急流弱、副热带急流强 (WS) 时, 东亚大槽偏强, 槽线沿南北方向, 北美大槽和欧洲大槽也相对偏强。

中纬度大气斜压性可反映温带急流的强度变化, 本文利用 Eady 增长率表征大气斜压性 (Eady, 1949; Hoskins and Valdes, 1990), Eady 增长率 σ_{BI} 计算方法如下: $\sigma_{BI} = 0.31f(\partial|V|/\partial Z)N^{-1}$, f 是科氏力, N 是 Brunt-Vaisala 频率, V 是时间平均的水平风速, Z 是垂直高度。由于大气斜压性强的区域主要出现在低层, 所以本文主要分析 850 hPa 高度上的 Eady 增长率。图 10 为 850 hPa 高度上 Eady 增长率分布图, 从图中可以看到, 当温带急流弱 (WW 和 WS 这两种情况) 的时候, Eady 增长率的大值区位于贝加尔湖东部, 中心最大值为 0.9; 温带急流强 (SS 和 SW 这两种情况) 的时候, Eady 增长率的大值区位于贝加尔湖西部。由于冷空气活动会引起温度的变化, 进而造成水平温度梯度发生变化, 导致天气尺度瞬变过程的发生, 通过反馈过程, 高空急流的强度变化又会进一步影响冷空气的活动。当冷空气活动的路径不同时, 所引起的低层温度梯度发生变化的位置不同, 对急流强度变化的影响也不同: 当冷空气的南下路径是西方路径, 即冷空气从新疆、内蒙古入侵我国时, 对 45°N 以南的区域带来降温, 而温带急流主要位于 45°N~60°N, 所以

南北的温度梯度减小, 斜压性减弱, 对应的温带急流也减弱。当冷空气的南下路径从我国东北移入, 则对新疆南部影响较小, 温度梯度改变不大, 对温带急流影响不大。东亚大槽的倾斜与中纬度的斜压过程有着密切的联系, Wang et al. (2009) 发现, 当 500 hPa 东亚大槽的槽线呈南北向时, 40°N~60°N 区域的 Eady 增长率大于槽线呈东北—西南向的情形, 而 30°N~45°N 区域的 Eady 增长率小于槽线呈东北—西南向的情形。本文中温带急流强的两种情况下 (SS 和 SW), 槽线呈南北向, 40°N~60°N 区域的 Eady 增长率较大, 而温带急流弱的两种情况下 (WW 和 WS), 槽线呈东北—西南向, 40°N~60°N 区域的 Eady 增长率较小, 这与 Wang et al. (2009) 的结论一致。

通常, 来自于西伯利亚东部地区的强西北风在低层东亚沿岸地区分为两支, 一支向东穿过副热带海洋和太平洋中部, 另一支沿着东亚沿岸进入南海 (Staff Members of the Section of Synoptic and Dynamic Meteorology, 1957; Krishnamurti et al., 1973), 而东亚沿岸上空的偏北风是冬季冷空气活动的一个重要指标。图 11 给出了两支急流强度变化四种情况下的 1000 hPa 矢量风场, 分析发现, 温带急流弱的两种情况 (即 WW 和 WS), 50°N 以北的欧亚大陆上空南风明显强于温带急流强的两种情况 (即 SS 和 SW); 而 EAPJ 弱、EASJ 弱 (WW)

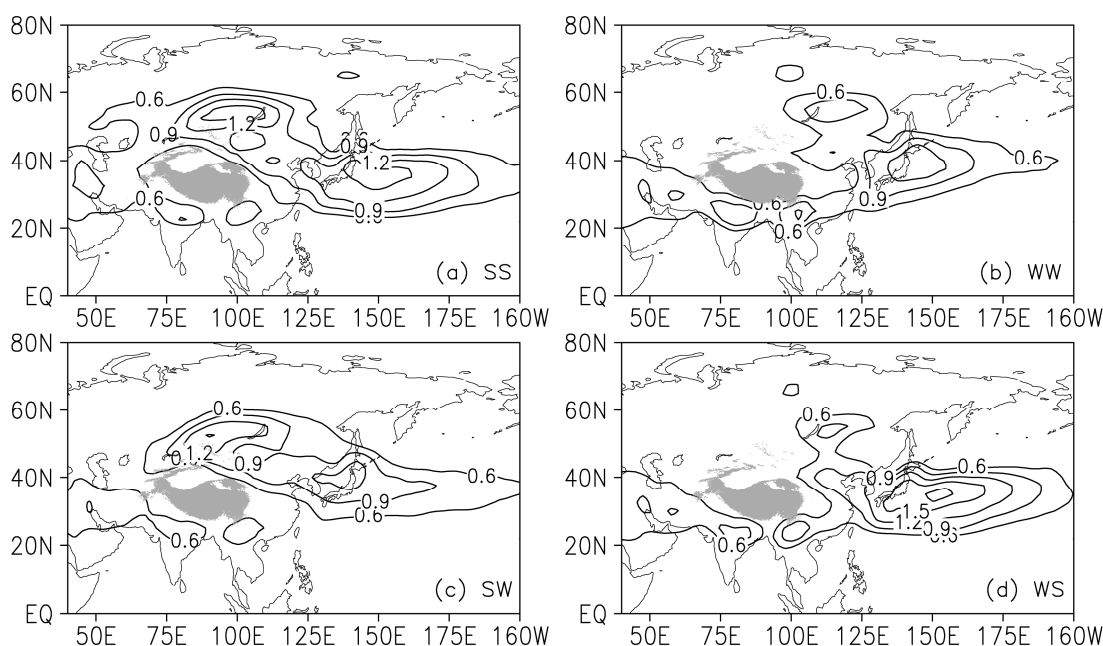


图 10 850-hPa Eady 增长率的合成场 (等值线间隔为 0.3 d⁻¹): (a) SS; (b) WW; (c) SW; (d) WS

Fig. 10 Composites of Eady growth rate at 850 hPa: (a) SS; (b) WW; (c) SW; (d) WS. The interval of contour is 0.3 d⁻¹

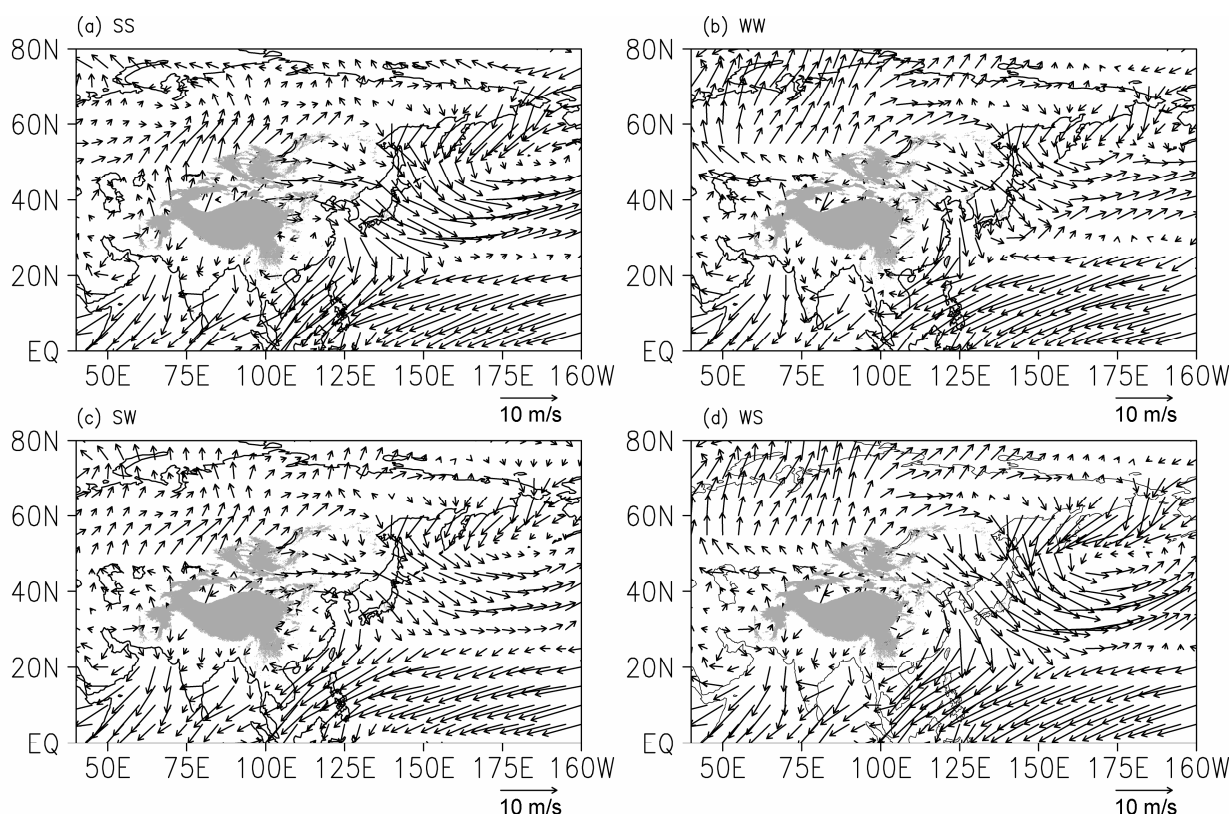


图 11 1000 hPa 矢量风的合成场: (a) SS; (b) WW; (c) SW; (d) WS

Fig. 11 Composites of wind fields at 1000 hPa: (a) SS; (b) WW; (c) SW; (d) WS

的情况下,中国东南部地区有很强的向南海入侵的北风,而其他三种情况几乎没有显著的北风分量,这正好反映了前文提到的两只急流均弱的情况下冷空气活动范围广,强度大;EAPJ 弱 EASJ 强 (WS) 时,来自西伯利亚的西北气流转向太平洋上空的一支很强,而沿中国境内向南的一支较弱。

由于对流层中层的环流系统与冬季风爆发有着直接的关系,朱艳峰 (2008) 定义了反映冬季温度变化的冬季风指数 $U_{500}(25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}) - U_{500}(50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E})$,该指数可表征大气环流的经向度,其值为正时,表示在对流层中层的东亚中高纬度和中低纬度之间的纬向风切变强,东亚地区纬向气流偏弱,有利于中高纬度冷空气向南侵入。分析副热带急流和温带急流不同强度变化情形时发现,两支急流都弱 (WW) 的情况下,反映环流经向度的冬季风指数非常高,达到 13,并且 500 hPa 大槽偏强,槽线向西南—东北方向倾斜,有利于强冷空气南下至中国境内;当 EAPJ 弱、EASJ 强 (WS) 的时候,西伯利亚高压和阿留申低压均偏强,500 hPa 东亚大槽最深,经向度指数也很高,但槽线沿南北方向,所以转向太平洋一支的

经向风非常强,而向中国境内爆发的冷空气强度并不大,因为在西伯利亚高压过于强大的时候,短波槽移动的速度更快,引起的经向扰动比较小 (Zhang et al., 1997);而其他两种情况 (SS 和 SW),西伯利亚高压相对较弱,500 hPa 大槽偏浅,冷空气强度弱,影响范围小,持续时间短,从经向度指数来看,二者值都很小 (−0.4 和 1),不利于冷空气南下。

4 结论和讨论

本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料和中国境内 724 站地面温度观测资料分析了温带急流和副热带急流均强 (SS)、均弱 (WW)、强弱 (SW)、弱强 (WS) 四种情况下,影响我国冬季冷空气活动的强度、路径、持续时间以及源地特征,并对相关联的大尺度环流异常进行了探讨,所得结论如下:

(1) 当 EAPJ 和 EASJ 均强 (SS) 时,影响我国的冷空气源地位于新地岛以东的洋面上,冷空气从内蒙古中东部入侵,主要影响华北、东北和东部沿海地区,强度较弱,持续时间短;当 EAPJ 和 EASJ 均弱 (WW) 时,冷空气源地位于巴尔喀什湖西部,从新疆西北部入侵,影响我国大部分地区,强度高,

持续时间长;当 EAPJ 强, EASJ 弱 (SW) 的情况下, 冷空气的源地位于中西伯利亚, 主要影响我国东北部, 中国南部降温不明显, 冷空气强度较强, 但持续时间短;当 EAPJ 弱, EASJ 强 (WS) 的情况下, 冷空气的源地位于贝加尔湖的西侧, 冷空气从内蒙古中部入侵, 进而影响华北和我国东部地区, 但冷空气强度较弱。为清楚地归纳出上述结论, 表 1 综合给出了温带急流和副热带急流四种强度变化情况下的冷空气活动的源地、侵入点、强度、范围及持续时间。

表 1 SS、WW、SW、WS 情况下的冷空气活动的源地、侵入点、强度、范围及持续时间

Table 1 The origin, route, intensity, and duration of cold air in the four situations, that is SS, WW, SW, and WS

	源地	侵入点	强度	范围	持续时间
SS	新地岛以东地区	内蒙古中东部	弱	华北、东北	2~3 d
WW	巴尔喀什湖以西的大陆	新疆西北部	强	全国	5~6 d
SW	中西伯利亚偏西地区	东北	局部较强	东北部、东部	3~4 d
WS	贝加尔湖的西侧欧亚大陆	内蒙古中部	较弱	华北、中南部	4~5 d

(2) 分析环流特征发现, EAPJ 和 EASJ 均弱 (WW) 时, 西伯利亚高压偏强, 阿留申低压偏弱, 东亚大槽偏深, 槽线向西南—东北方向倾斜, 中国东部的偏北风强, 而 EAPJ 弱、EASJ 强 (WS) 时, 尽管西伯利亚高压和阿留申低压偏强, 东亚大槽偏深, 但槽线沿南北方向, 中国东部的偏北风偏弱, 而另两种情况时, 西伯利亚高压较弱, 东亚大槽也较弱, 中国东部的偏北风偏弱。

本文分析了温带急流和副热带急流的强度变化与影响我国的冷空气活动之间的关系, 除了急流强度变化外, 急流位置变化对大气环流也有重要影响, 因此两支急流位置变化与影响我国的冷空气活动强度和范围之间的关系值得深入研究。另外, 本文只考虑了急流强度的同期变化, 并没有考虑高空急流和冷空气活动之间超前或滞后关系, 研究急流强度和位置变化与冷空气活动之间的超前或滞后关系对冬季气温的预报具有重要应用价值, 值得开展深入的研究。此外, 冷空气活动影响中国的时间通常在几天之内, 本文以候平均的急流来选取个例, 如果冷空气活动恰好发生在两候之间, 不利于分析 24 h 变温, 本文中 24 h 变温合成图的起始时间存在差别, 正是因为冷空气活动没有发生在所在

候的第一天导致的, 这有待于通过分析高空急流的逐日变化来解决。

参考文献 (References)

- Chang C P, Lau K M. 1980. Northeasterly cold surges and near-equatorial disturbances over the winter MONEX area during December 1974. Part II: Planetary-scale aspects [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108: 298–312.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 138–149.
- Ding Yihui. 2005. Advanced Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 138–149.
- Eady E T. 1949. Long waves and cyclone waves [J]. *Tellus*, 1: 133–152.
- 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 15 (2): 11–21.
- 高守亭, 陶诗言, 丁一汇. 1992. 寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用 [J]. *大气科学*, 16 (6): 718–724.
- Gao Shouting, Tao Shiyang, Ding Yihui. 1992. Upper wave–East Asian jet interaction during the period of cold wave outbreak [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 16 (6): 718–724.
- Hoskins B J, Valdes P J. 1990. On the existence of storm-tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 1854–1864.
- Jhun J G, Lee E J. 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (4): 711–726.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–472.
- 况雪源, 张耀存, 刘健. 2008. 对流层上层副热带西风急流与东亚冬季风的关系 [J]. *高原气象*, 27 (4): 701–712.
- Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun, Liu Jian. 2008. Relationship between subtropical upper-tropospheric westerly jet and East Asian winter monsoon [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27 (4): 701–712.
- Krishnamurti T N, Kanamitsu M, Koss W J, et al. 1973. Tropical east-west circulations during the northern winter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 30: 780–787.
- Lee S, Kim H K. 2003. The dynamical relationship between subtropical and eddy-driven jets [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60: 1490–1503.
- Li Y Q, Yang S. 2010. A dynamical index for the East Asian winter monsoon [J]. *J. Climate*, 23: 4255–4262.
- 毛睿, 龚道溢, 房巧敏. 2007. 冬季东亚中纬度西风急流对我国气候的影响 [J]. *应用气象学报*, 18: 137–146.
- Mao Rui, Gong Daoyi, Fang Qiaomin. 2007. Influences of the East Asian jet stream on winter climate in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 18: 137–146.
- Staff Members of the Section of Synoptic and Dynamic Meteorology. Institute of Geophysics and Meteorology, Academia Sinica, Peking. 1957. On the general circulation over eastern Asia. Part I [J]. *Tellus*, 9: 432–446.
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2009. Interannual variations of East Asian trough axis at 500 hPa and its association with the East Asian winter monsoon pathway [J]. *J. Climate*, 22: 600–614.

- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 293–294. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Principles and Methods of Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 993–294.
- Yang S, Lau K M, Kim K M. 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian–Pacific–American winter climate anomalies [J]. *J. Climate*, 15: 306–325.
- Zhang Y, Sperber K R, Boyle J S. 1997. Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979–95 NCEP/NCAR reanalysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125: 2605–2619.
- 张耀存, 王东阡, 任雪娟. 2008. 东亚高空温带急流区经向风的季节变化及其与亚洲季风的关系 [J]. *气象学报*, 66 (5): 707–715. Zhang Yaocun, Wang Dongqian, Ren Xuejuan. 2008. Seasonal variation of the meridional wind in temperate jet stream and its relationship to the Asian monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (5): 707–715.
- 朱艳峰. 2008. 一个适用于描述中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数 [J]. *气象学报*, 66 (5): 781–788. Zhu Yanfeng. 2008. An index of East Asian winter monsoon applied to description the Chinese mainland winter temperature changes [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (5): 781–788.
- 邹进上, 江静, 王梅华. 1990. 高空气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 200–212. Zou Jinshang, Jiang Jing, Wang Meihua. 1990. Aeroclimatology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 200–212.