

平流层大气质量环流脉冲事件与北半球 冬季大陆尺度寒潮低温的次季节尺度预测

虞越越¹ 严睿恺² 蔡鸣³

(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 浙江省气象台, 杭州 310000; 3 佛罗里达州立大学, 塔拉哈希 32306)

摘要: 次季节预测是无缝天气预报气候预测业务的重要环节和难点所在, 丰富次季节尺度预报因子、提高次季节尺度预测水平对防灾减灾工作的决策部署具有重要意义和显著价值。本文着重介绍了北半球冬季大陆尺度寒潮低温事件的次季节尺度预测新因子——平流层大气质量环流脉冲事件。平流层大气质量环流脉冲指数具有一定的次季节尺度可预测性, 与逐个大范围极端温度事件存在物理联系, 实时计算可行, 可搭建以平流层大气质量环流变率为基础、以北半球中纬度地区冬季低温灾害次季节尺度预测为目标的动力-统计预测模型。

关键词: 平流层, 寒潮低温, 次季节预测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.011

Potential Use of Stratospheric Meridional Mass Circulation Signals in the Sub-Seasonal Forecasts of Continental-Scale Cold Events in NH Winter

Yu Yueyue¹, Yan Ruikai², Cai Ming³

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 2 Zhejiang Provincial Meteorological Office, Hangzhou 310000; 3 Florida State University, Tallahassee 32304)

Abstract: Sub-seasonal prediction is the central component but the key bottleneck of the seamless forecasting. Exploring more predictability sources and improving the prediction skills at sub-seasonal range can increase our chance to plan ahead and devise an optimal strategy to minimize the adverse impacts of weather disasters on the socioeconomic wellbeing of the modern society. A new predictor for continental-scale cold events in the mid-latitudes, the pulse signals in the stratospheric meridional mass circulation (PULSE), is introduced in this paper. The PULSE event has sub-seasonal predictability, close physical linkage with the temporal-spatial variations of surface air temperature in mid-latitudes, and can be derived from model forecast output directly. Therefore, the PULSES are used to build a hybrid (dynamical-statistical) paradigm for sub-seasonal forecasts of continental-scale cold events in the mid-latitudes.

Key words: stratosphere, cold air outbreak, sub-seasonal prediction

0 引言

次季节尺度预测介于天气预报和短期气候预测之间, 是搭建无缝隙、一体化气候预测系统的关键与挑战。对于北半球人口较为密集的中纬度大陆地区, 冬季大范围极端温度事件是出现最为频繁、影响最为广泛的极端天气。北半球冬季极端温度事件(尤其是低温事件)次季节尺度预测水平的提升, 可大大提高其衍生、次生灾害的监测预警水平, 为政府机关部署规划防灾减灾各项工作争取充足的时间, 最大程度地避

免或减轻灾害影响, 因而具有重大的社会经济意义。

对于次季节尺度预测, 国内外气象部门多采用动力学和统计预报相结合的方法^[1]。常规的动力学预报方法是通过给定海表温度的大气全球模式或采用海气耦合全球模式从初始条件进行时间积分得到预报结果。一般而言, 动力学预报技巧随预报时间的增加会迅速减小, 预报时效往往局限在1~2周。基于该方法的次季节尺度预报只能提供月平均或季节平均温度、降水等信息, 无法预测逐个异常天气/气候事件发生的具体时间、地点、强度等。统计预报方法则是采用一系列经验统计方法将较低频率的气候变率模态或某气候主导模态的特定相位与地面天气气候异常的统计关系应用到次季节尺度预测中。常用的经验统计方法包

收稿日期: 2020年11月28日; 修回日期: 2020年12月21日
第一作者: 虞越越(1987—), Email: yuyy@nuist.edu.cn
通信作者: 蔡鸣(1957—), Email: mcai@fsu.edu

括典型相关分析 (Canonical Correlation Analysis) [2]、最优气候模态 (Optimum Climate Normal) [3]、回归分析 [4]、集合典型相关分析 [5]、Constructed Analogue [6-7] 等。目前, 次季节尺度统计预测的参考依据主要有以下三种:

(1) 热带季节内变率和海表缓变信号, 包括热带大气年际变率主要模态 El Niño-Southern Oscillation (ENSO) 以及热带大气季节内变率的主要模态 Madden-Julian Oscillation (MJO)。因缓变的特性及其与中高纬度地区天气气候的紧密联系, 这些信号逐渐成为全球次季节尺度预测的主要参考依据 [8-15]。在 ENSO 和 MJO 特定位相下, 地面温度的次季节尺度预测水平往往会得到显著提升 [16]。其缺陷在于, 若低层外强迫异常不显著 (比如非 ENSO 年、MJO 的弱位相和过渡位相), 内部变率会使次季节尺度预报技巧基本丧失。

(2) 地表缓变信号, 土壤湿度的记忆长达几周, 可通过改变蒸发过程、地表能量收支影响模式的次季节尺度预测水平。有研究表明, 以土壤湿度的极端异常作为模式初始条件, 可大大提高模式的次季节预测能力, 但技巧提高的区域主要局限于土壤湿度-大气耦合关系紧密且存在高质量降水观测资料的区域 [17-18]。特别需要指出的是, 经验表明土壤湿度记忆在冬季较弱, 故利用土壤湿度记忆的预报对提高冬季寒潮预报技巧帮助极为有限。也有研究指出, 雪盖和海冰对局地和非局地的大气月尺度和季节尺度变化也存在一定影响 [19-20], 但由于极地观测资料的匮乏, 该影响有多大、是否影响模式次季节尺度预测水平并不清楚。

(3) 平流层缓变信号, 越来越多的研究证明数值天气预报模式对平流层的异常弱极涡事件 (主要包括平流层爆发性增温 (SSW) 和平流层最后增温 (SFV) [21-24])、热带外地区的纬向平均温度、位势高度、风场 [25-27] 等具有一定的次季节尺度预测能力。而平流层-对流层在中高纬度地区的紧密耦合关系 [28-36] 为采用平流层信号进行地面天气气候异常的次季节尺度预测提供了可能。目前关于平流层和地面天气气候关系的研究主要着眼于平流层的缓变信号 (如平流层 NAM 或极涡振荡) 和极端剧烈信号 (如平流层爆发性增温 SSW)。然而这些信号作为地面温度的次季节尺度预报因子仍存在一定的局限性, 基于平流层缓变信号的统计预报虽能改善季节平均地面温度异常和较为低频的振荡模态北极涛动 (AO) 的预报水平 [22, 37-39], 但不能用于预测逐个极端温度事件的发生时间; 而平

流层最为剧烈的异常事件 SSW, 每年冬季最多出现 1~2 次, 基于 SSW 的统计预报无法满足对冬季频繁发生的极端温度事件次季节预测的需求。

目前用于次季节尺度的动力学预报方法和统计预报方法尚存在一定的客观缺陷, 探寻新的次季节尺度预报技巧来源必要而迫切。

1 基于平流层大气质量环流的北半球冬季寒潮低温事件的次季节尺度预测方法

大气经向质量环流是以位温 (或熵) 作为垂直坐标, 用于研究大气环流的分布理论框架 [40-42]。在等熵面上定义的经向质量环流可以更直接、更客观地量化各纬度带内的冷暖空气输送。质量环流的结构是一个半球尺度的单圈环流, 如图 1 所示, 它由热带地区的上升支、高层由赤道向极地的暖支、中高纬度地区的下沉支以及低层由极区向赤道的冷支组成。

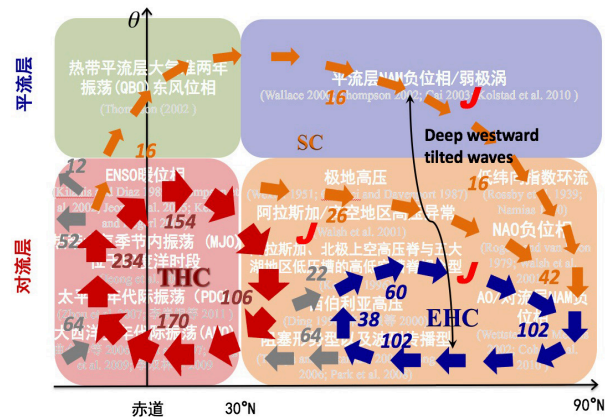


图1 北半球冬季大气经向质量环流结构及其气候平均质量输送量值概念图

(此图为基于 [43] 图一数据所作的概念示意图, 图中所有数字的单位均为 $10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。"THC"、"EHC"、"SC" 分别代表半球尺度大气经向质量环流的三个子环流圈:

"THC" 代表热带哈得来环流 (Tropical Hadley Cell), "EHC" 代表热带外哈得来环流 (Extratropical Hadley Cell), "SC" 代表平流层环流 (Stratospheric Cell))

Fig. 1 A schematic figure of the structure of Northern Hemispheric atmospheric meridional mass circulation and the values of climatological mean meridional mass transport in wintertime [41]

(The values in this figure are based on the data used for deriving figure 1 in [43] and their units are $10^9 \text{ kg} \text{ s}^{-1}$. "THC", "EHC", "SC" indicate the three sub-cells of the hemispheric atmospheric meridional mass circulation: "THC" is the Tropical Hadley Cell, "EHC" is the Extratropical Cell, and "SC" is the Stratospheric Cell.)

驱动和维持大气经向质量环流的机制较为复杂, 包括动力和热力的共同作用。简单来说, 经向质量环流在低纬度和高纬度地区主要受热力强迫, 即热带地区空气受热上升到达高层后向高纬度输送, 高纬度地

区空气受非绝热冷却作用而下沉，在极区堆积的同时向赤道回流；在中纬度地区，向西倾斜的斜压不稳定罗斯贝波，对维持经向质量环流高层的向极暖支以及低层的向赤道冷支起着至关重要的作用。斜压稳定的波动和斜压不稳定的波动所对应的高低层净质量输送情况可通过图2简要说明。对于斜压不稳定波动（图2b），温度场落后于高度场（即西倾系统），温度槽位于高度槽的西部，由于较冷，其对应的等熵面上凸。而在高度槽的东部，温度脊所对应的等熵面下凹。这种等熵面在高度槽两侧由西至东凸凹变化意味着在高度槽西部有更多（少）空气质量位于低（高）

层；而在高度槽的东部则有更多（少）的空气质量位于高（低）层。故在高层，高度槽前（东部）南风所引起的向极质量输送大于槽后（西部）北风引起的向赤道质量输送，从而形成净的向极地质量输送（向极地暖支）；而在低层，槽前南风向极地的质量输送则小于槽后北风引起的向赤道质量输送，从而形成净的向赤道质量输送（向赤道冷支）。

Cai 和 Shin^[43] 进一步强调，在半球尺度单圈环流内部还存在三个子环流圈：平流层质量环流、对流层热带外质量环流以及对流层热带质量环流，三者有机结合在一起（图1）。基于大气经向质量环流理论，Cai 等^[44]提出了针对逐个寒潮低温事件次季节尺度预测的一个潜在的预报因子，即：单位时间内平流层净向极地（60°—90°N）输送的暖空气质量，用于表征平流层大气质量环流在60°N附近的强度（ST60N指数）。ST60N指数有以下三大特性：具有一定的次季节尺度可预测性；与逐个大范围极端温度事件存在联系；实时计算可行。ST60N指数的这三大特性为冬季北半球气温的次季节尺度预测提供了新思路：首先采用动力预测方法获得平流层大气质量环流强事件的发生时间、强度等次季节尺度预测信息（动力模块），然后结合环流强度达到峰值的时间、峰值强度与大陆尺度寒潮低温事件的统计关系（统计模块），得到欧亚大陆和北美大陆中纬度地区寒潮低温事件的次季节尺度概率预报。值得注意的是，在该动力-统计预测模型中，超前信号来自数值预报模式对ST60N指数的次季节尺度可预测性，而不是平流层大气质量环流强事件相对于寒潮低温事件发生时间的超前关系。也就是说，环流与寒潮低温的统计关系只是诊断工具，只要二者之间存在几乎同时、一对一的关系即可。

以下分别针对次季节尺度可预测性（动力模块）、与逐个大范围极端温度事件存在联系（统计模块）的新研究结果、预报模型建立和流程进行进一步阐述。

2 平流层大气质量环流的次季节尺度可预测性

前人工作^[25-27]已经指出，预报模式可以超前2周以上预报环流异常的纬向平均部分。而Zhang 等^[27]进一步指出，纬向平均场实质上对应于中纬度波动的平均振幅，而不是槽脊的具体位置。也就是说，即使模式无法有效预报2周以后槽脊的位置，振幅大小也能够预报。而质量环流恰恰由波动的西倾结构和平均振幅决定，与槽脊的位置无关，此系列研究从侧面反映了平流层大气质量环流（ST60N）的次季节可预报性。

Yu等^[45]的最新研究采用Climate Forecast System version 2.0（CFSv2）模式次季节尺度预测逐日资料，

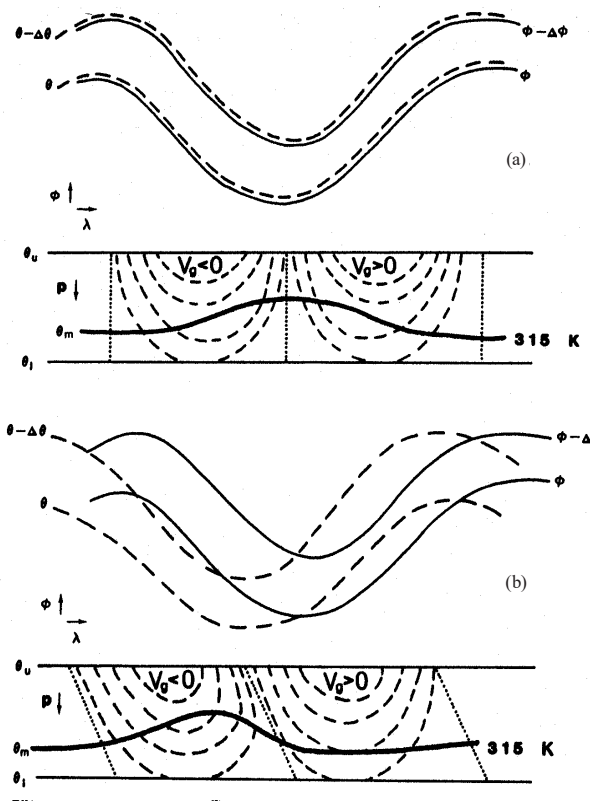


图2 斜压稳定波动 (a) 和斜压不稳定波动 (b) 对应的位势高度、位势温度以及经向风场示意图^[41]

(上图为经度(λ)-纬度(ϕ)剖面, 下图为与其对应的经度(λ)-气压(p)剖面。 V_g 为地转风经向分量, 其风速符号在图中标出, 斜直虚线分隔槽与脊。此处为由低层等熵面 θ_{e_s} 、中层等熵面 θ_{e_m} 以及高层等熵面 θ_{e_u} 组成的两层模型)

Fig. 2 A schematic figure for geopotential height, potential temperature, and meridional wind field for baroclinic stable waves (a) and baroclinic unstable waves (b)

(The upper panel is the longitude-latitude cross-section, and the bottom panel is the corresponding longitude-pressure cross section. V_g is the geostrophic component of meridional wind, and the slanted dashed lines separate the trough and ridge. This is a simple two-layer model composed of lower isentropic surface, middle isentropic surface, and upper isentropic surface.)

对2011—2018年冬季平流层大气质量环流关键指数的次季节预测能力进行了评估。评估手段包括针对时间演变特征的相关系数法以及针对平流层质量环流强脉冲(PULSE)事件是否发生和发生时间是否预报准确的Fuzzy命中率和错报率等多种预报技巧评估指标。研究首先考查了平流层质量环流指数的气候平均和标准差的预报误差,并基于该系统性预报误差设计了一套对平流层大气质量环流次季节模式预测的系统误差校正方案。其次,平流层质量环流季节内变率的预报水平评估显示,其预报极限可延长至20 d,大振幅事件的预报极限更长(图3)。这为通过动力(模式对平流层质量环流信号的次季节预报结果)和统计(平流层质量环流与地面异常低温事件的有机联系)相结合的方法对逐个寒潮事件进行次季节预测提供了重要依据。

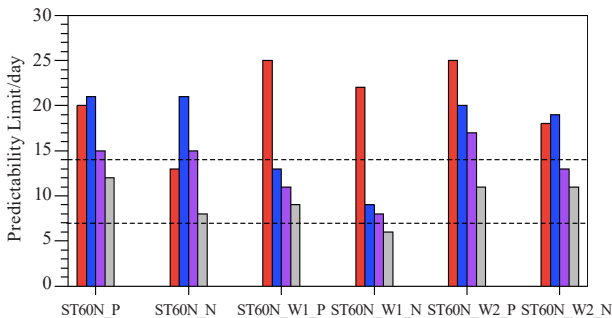


图3 60°N平流层大气质量环流关键指数(如平流层净向极质量通量ST60N及其一波、二波分量ST60N_W1, ST60N_W2)的预报极限(单位:d)^[45]

(红色柱状图表示基于预报与观测相关系数的预报极限(相关系数高于0.3的最长预报时效);蓝色、紫色、灰色柱状图分别表示允许3天、2天、1天预报时间误差的强弱事件预报极限(Fuzzy命中率高于错报率的最长预报时效);“P”表示异常偏大振幅时段或强事件;“N”表示异常偏小振幅时段或弱事件)

Fig. 3 Predictability limit of the ST60N, ST60N_W1, and ST60N_W2 indices in the seven winters (November–March) of 2011–2018 (units: d)^[45]

(red bars indicate the maximum forecast lead time with a correlation score exceeding 0.3. Blue, purple and gray bars indicate the maximum forecast lead time with the fuzzy Probability Of Detection (POD) exceeding the fuzzy False Alarm Rate (FAR) in verification when a three-, two- and one-day time shift is allowed, respectively.)

Yu等^[45]进一步指出,限制CFSv2模式对平流层大气质量环流次季节预测水平的主要原因是模式对表征波动斜压不稳定性的波动西倾角度的预测能力较低,而对行星波振幅的预报可达50 d以上。由此可知,提升模式对波动斜压性的预测能力可进一步提高PULSE的次季节预测水平。

3 北半球冬季平流层大气质量环流脉冲事件(PULSE)与寒潮低温事件的联系

低层极区冷空气的向南净输送(大气经向质量环流低层向赤道冷支)是中纬度寒潮低温事件的根本原因^[46-49]。而60°N大气经向质量环流底层向赤道冷支与大气高层沿等熵面向极的净质量输送(即向极暖支),在天气尺度上由于是同一个西倾波动的产物而高度耦合。

平流层分支与对流层高层分支共同组成向极暖支,大多数情况下由于具有深厚垂直结构的波动的作用,平流层分支与暖支存在紧密正相关,进而与低层向赤道冷支和地面极端温度异常紧密相连。平流层质量环流与北半球冬季中纬度大范围低温事件的统计关系具体如下:60°N平流层质量环流异常偏强(PULSE事件)的前1周内,北半球欧亚大陆异常偏冷、北美大陆偏暖;而在60°N平流层质量环流异常偏强之后的2周内,逐渐转为欧亚大陆偏暖、北美偏冷,此时欧亚大陆出现极端低温事件的概率也较高,但不及北美大陆;平流层质量环流强度越大、持续时间越长,对应的地面温度异常响应越显著^[44]。Yu等^[50-51]进一步考查了PULSE事件的强度、持续时间、所受的波动驱动尺度等关键特征对PULSE事件对应的地面温度异常空间分布的影响。如图4所示,不同波动尺度驱动的PULSE事件所对应的寒潮时空分布特征存在显著差异:一波驱动时,往往在事件发生前/后的2周,欧亚大陆偏冷(暖),而北美大陆偏暖(冷);二波驱动时,往往在事件发生时的1~2周,欧亚大陆和北美大陆均偏冷。这种与大陆尺度寒潮的统计关系随着PULSE事件强度或持续时间的增加而变得更加紧密。我们的研究还发现,PULSE事件中一波主导型和二波主导型所占比例几乎相等,但随着PULSE事件强度的增加,二波驱动型所占比率显著升高,从而使得较弱的PULSE事件所对应的温度分布往往与一波主导型较为一致,而较强的PULSE事件所对应的温度分布与二波主导型较为一致。这一系列工作为基于平流层质量环流PULSE信号的寒潮次季节尺度预测模型的统计模块提供更为全面深入的依据。

PULSE事件与平流层极涡的其他尺度变率(北半球环状模NAM、SSW)也存在物理联系,且与其他尺度变率相比,PULSE在指示大范围寒潮低温事件方面具有一定的优越性。

(1) PULSE与NAM: NAM被认为是北半球对流层—平流层环流低频变率的主导模态,以温度、位势高度、气压/大气质量等变量场在极区和中纬度地区相反位相的纬向带状分布为主要特征。NAM负(正)

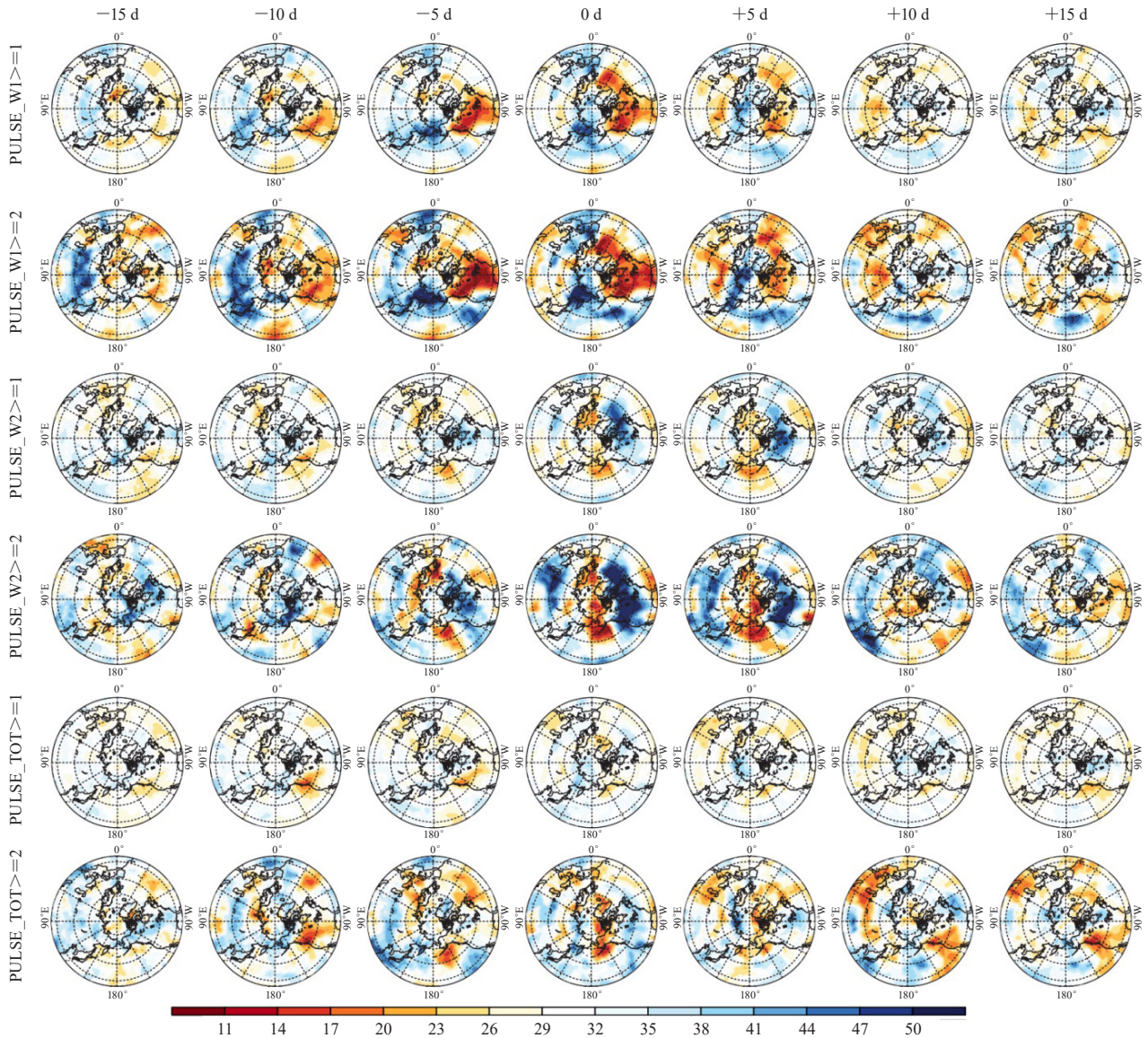


图 4 PULSE事件前后15天地面温度异常低于 -0.5 局地标准差的概率(单位: %)[50]

(第一行为波数一波主导、强度大于1个标准差的PULSE事件 ($PULSE_W1 > 1$), 第二行为波数一波主导、强度大于2个标准差的PULSE事件 ($PULSE_W1 > 2$); 第三和第四行同第一和第二行, 但是为波数二波主导的PULSE事件; 第五和第六行同第一和第二行, 但是为所有PULSE事件)

Fig. 4 Probability map of the occurrence of SATA being less than -0.5 local standard deviation (units: %)[50] (probability on days -15 , -10 , -5 , 0 , 5 , 10 and 15 relative to the peak dates of PULSE_W1 events with a peak intensity threshold of 1.0 SD (first row) and 2.0 SD (second row). The third and fourth rows are the same as first and second rows, but relative to PULSE_W2 events with a peak intensity threshold of 1.0 SD and 2.0 SD. The fifth and sixth rows are the same as the first and second rows, but relative to PULSE_TOT events with a peak intensity threshold of 1.0 SD and 2.0 SD.)

位相往往对应弱(强)极涡, 对北半球冬季天气气候具有重要而广泛的影响, 近年来成为科学界关注的热点问题。而近期工作^[44, 52-53]指出: NAM的正(负)位相本质上是平流层大气质量环流对极区平流层质量收支调控的结果。极区平流层的大气柱总质量(PSM)往往与平流层NAM呈反位相变化, 可有效表征平流层NAM的变率。而PSM犹如一个带孔密闭容器(平流层极区)里的储水情况, 由两部分决定: 一个是绝热

过程引起的向极地平流层的质量通量(ST60N), 类似于向容器加减水; 另一个是非绝热冷却引起的从平流层向对流层的大气质量流失, 类似于容器底部小孔的漏水。非绝热质量通量与极区平流层质量一样, 均为慢信号, 其变化由牛顿冷却过程强度决定, 往往与PSM变化相反, “水”越多, 漏地越快, 帮助PSM恢复到气候平均状态。绝热经向质量通量ST60N的主要周期为2周, 主要由平流层低层的行星波西倾角快速

变化引起，它决定了PSM的日倾向变化；ST60N的一个较慢的变率则由行星波振幅变率所主导，行星波振幅又因波流相互作用与PSM之间存在1/4位相差的耦合关系。绝热经向质量通量的多尺度变率决定了NAM位相变化以及极涡振荡的变率。

(2) PULSE与SSW：平流层爆发性增温(SSW)是指平流层极区几天之内温度突然升高40~50℃的现象，SSW发生时往往对应于NAM负位相。越来越多的研究证明，SSW发生之后的1~2个月内往往会发生大面积的极端低温事件，为地面天气气候异常的次季节-季节尺度预测提供了新的指示因子。Yu等^[51]的最新研究揭示了SSW与PULSE的内在联系，并将二者作为逐个寒潮事件的指示因子的优劣进行了系统评估，指出PULSE事件作为指示因子的普遍性和优越性：PULSE事件发生频率高，冬季平均发生9次；SSW是PULSE的一个特殊子集，SSW多为强度大、持续时间长的PULSE事件中的一小部分，“偏心型”SSW事件往往对应于一波数主导的PULSE事件，而“分裂型”SSW与PULSE事件的主导波动尺度关系并不密切；基于主导波动尺度分类的PULSE事件展现出更为清晰的地面温度异常分布特征，结合其与“分裂型”“偏心型”SSW的关系较好地解释了SSW事件（尤其是分裂型）与地面低温关系的不稳定性；PULSE事件可指示70%的大陆尺度低温事件在其前后一周内发生，错报率为25%，而SSW只能指示6%的大陆尺度寒潮，而错报率却不低（22%）（历年对应情况见图5）。

值得注意的是，PULSE事件指示大陆寒潮低温事件存在25%~30%的漏报率和错报率，这是由平流层-对流层耦合过程的复杂性和多样性决定的。首先，平流层极涡异常信号能够下传至对流层低层的条件较为复杂，与平流层极涡异常的强度^[28]、持续时间^[54]、发生时间^[55]、波动尺度^[56-57]、对流层自身变率^[58-60]有关，这些因素影响平流层-对流层耦合强度的作用并未完全达成共识^[54]。即使在平流层-对流层耦合的情况下，超前时间和影响区域对平流层极涡和相关波动特征也具有较强依赖性。比如，极涡的形态以及驱动其变化的主导波动尺度所对应的异常低温时空分布特征存在显著差异：在极涡偏心型SSW事件发生前（后）2~3周，美国东南部偏暖（冷），欧亚偏冷（暖）；而在极涡分裂型SSW事件发生日期前1个月到后1个月，往往两个大陆均容易发生异常低温^[61-63]。类似地，吸收型和折射型SSW事件^[64]、不同波分量主导驱动的平流层大气质量环流强事件^[50-51]所对应的异常低

温发生和维持时间、出现区域也存在差异。要优化统计模块，需要进一步细化平流层与对流层不同尺度上的耦合过程，明确影响二者耦合的影响因素和前兆因子，同时关注平流层对区域天气气候的影响途径。

4 基于平流层大气质量环流的北半球冬季中纬度地区地面气温次季节尺度动力-统计预测模型

基于平流层大气质量环流的北半球冬季气温次季节尺度动力-统计预测模型具有两个核心模块——动力模块和统计模块。章节2中关于平流层大气质量环流的次季节尺度可预测性及其影响因子的研究成果是构建动力模块的核心依据，章节3中关于北半球冬季平流层大气质量环流与中纬度地区地面气温次季节变化的联系是统计模块的理论基础。

动力模块由三个关键步骤组成。

(1) 平流层质量环流关键指数的计算：首先采用实时次季节预测资料，计算若干平流层大气质量环流关键指数，包括强度、各个波分量引起的净向极区平流层的质量输送（主导波动尺度）、槽前进入/槽后离开极区平流层的总质量、冷暖空气质量输送路径等。

(2) 预测指数序列的误差调整：根据误差分析结果总结的其时间、振幅等信息的预报误差校正方案，去除预测指数序列的系统误差。

(3) 参照集合概率预报的思路检测平流层大气质量环流强事件发生时间：首先检测出不同起报日期（预报时效1~30 d）的预报序列的局地最大值，然后计算各个预报目标日期在不同起报日期成员集中出现局地峰值的概率，侦测出平流层大气质量环流异常信号最可能出现的时间，并提炼出该时间对应的平流层大气质量环流关键特征信息。

统计模块采用Constructed Analogue经验统计方法搭建从平流层大气质量环流异常事件到其伴随的地面气温时空演变或地面气温主要空间模态时间演变的统计模型。

基本预报流程如下。

(1) 自动下载业务模式次季节预测资料（0~60 d），计算平流层大气质量环流关键特征指数集的预报序列。

(2) 将其预报序列进行优化调整。

(3) 优化后的环流关键特征指数集作为预报因子输入统计模块，得到平流层大气质量环流异常事件前后中纬度地区地面气温异常的时空分布信息。

(4) 将年际尺度主导模态ENSO、QBO以及季

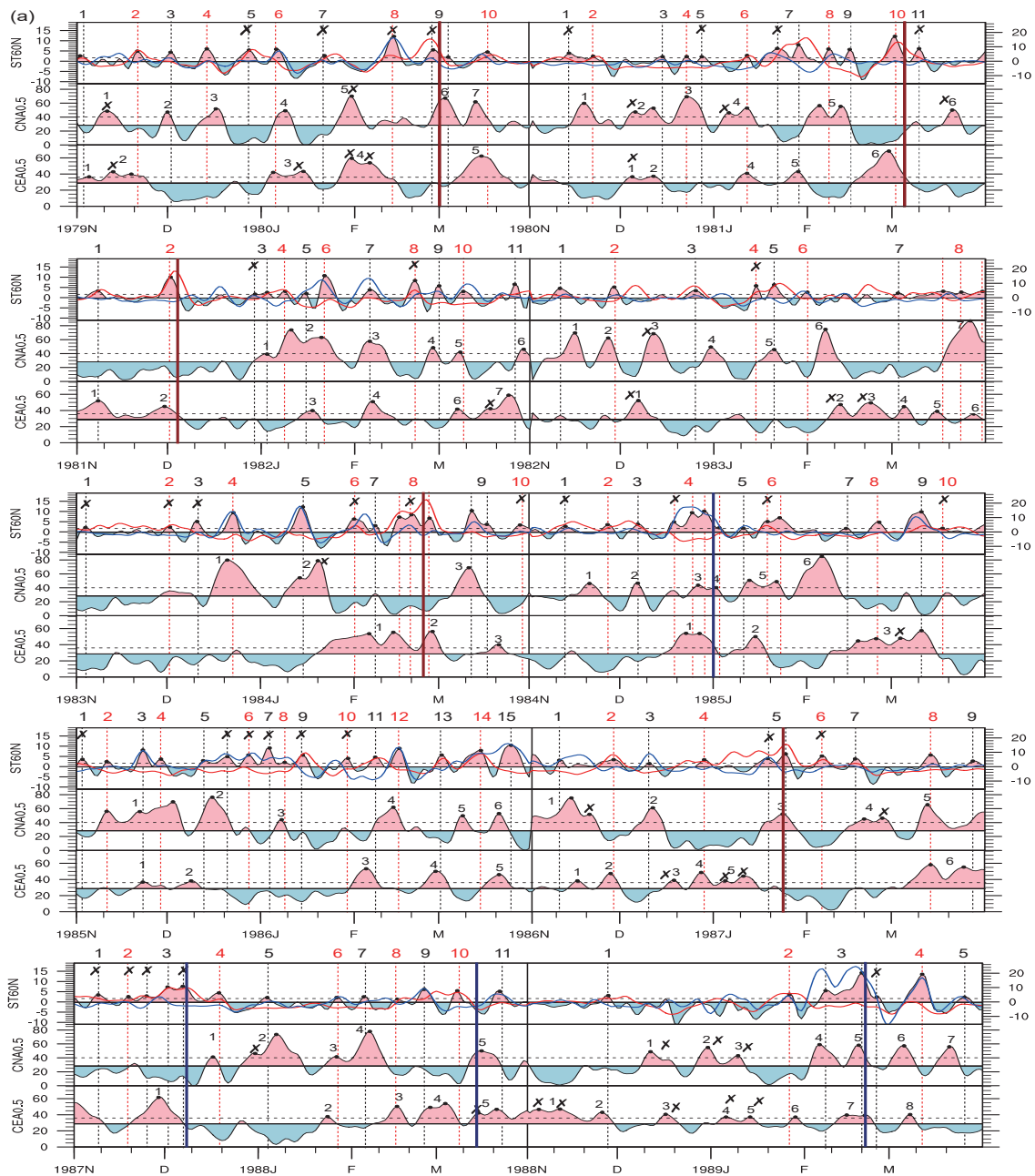


图5 60°N平流层质量环流强度指数与低温面积指数的历年冬季（11月一次年3月）时间序列（a~d）^[51]

（第一行是60°N平流层质量环流强度指数ST60N（黑色）及其一波驱动分量（红色）、二波驱动分量（蓝色）；第二行和第三行分别是北美、欧亚中纬度地区地面温度异常低于-0.5局地标准差的面积指数（CNA0.5和CEA0.5）；水平实横线和虚横线分别表征第50百分位和第70百分位；数字为每年冬季PULSE事件、寒潮低温事件编号；偏心型和分裂型SSW事件分别用红色和蓝色竖实线表示；未在PULSE事件前后一周内发生的寒潮低温事件用叉标出；PULSE事件极值日用竖虚线标出，未有寒潮低温事件在其前后一周内发生的PULSE事件用叉标出）

Fig. 5 Time series of stratospheric mass circulation indices (a~d) (black for ST60N, red for ST60N_W1, and blue for ST60N_W2 in the upper panels), along with time series of cold area indices over mid-latitude North America (CNA0.5 in the middle panels) and over mid-latitude Eurasia (CEA0.5 in the lower panels), in the winters from November 1979 to March 2016^[51] (the horizontal solid lines and dashed lines in each panel represent the 50th and 70th percentiles of ST60N, CNA0.5 and CEA0.5, respectively. The PULSE event, CAO event over North America (CAO_NA), and CAO event over Eurasia, are numbered starting from 1 for each winter. The central dates of “D” – and “S” –type SSW events, listed in Table 1, are marked by red and blue solid vertical lines, respectively. The CAO event peaks that were not paired with a PULSE event peak (allowing 7 days lead/lag) are marked by a cross. The PULSE event peaks are highlighted by vertical dashed lines, and those that were not paired with a CAO event peak (allowing 7 days of lead/lag) are marked by a cross in the upper panels.)

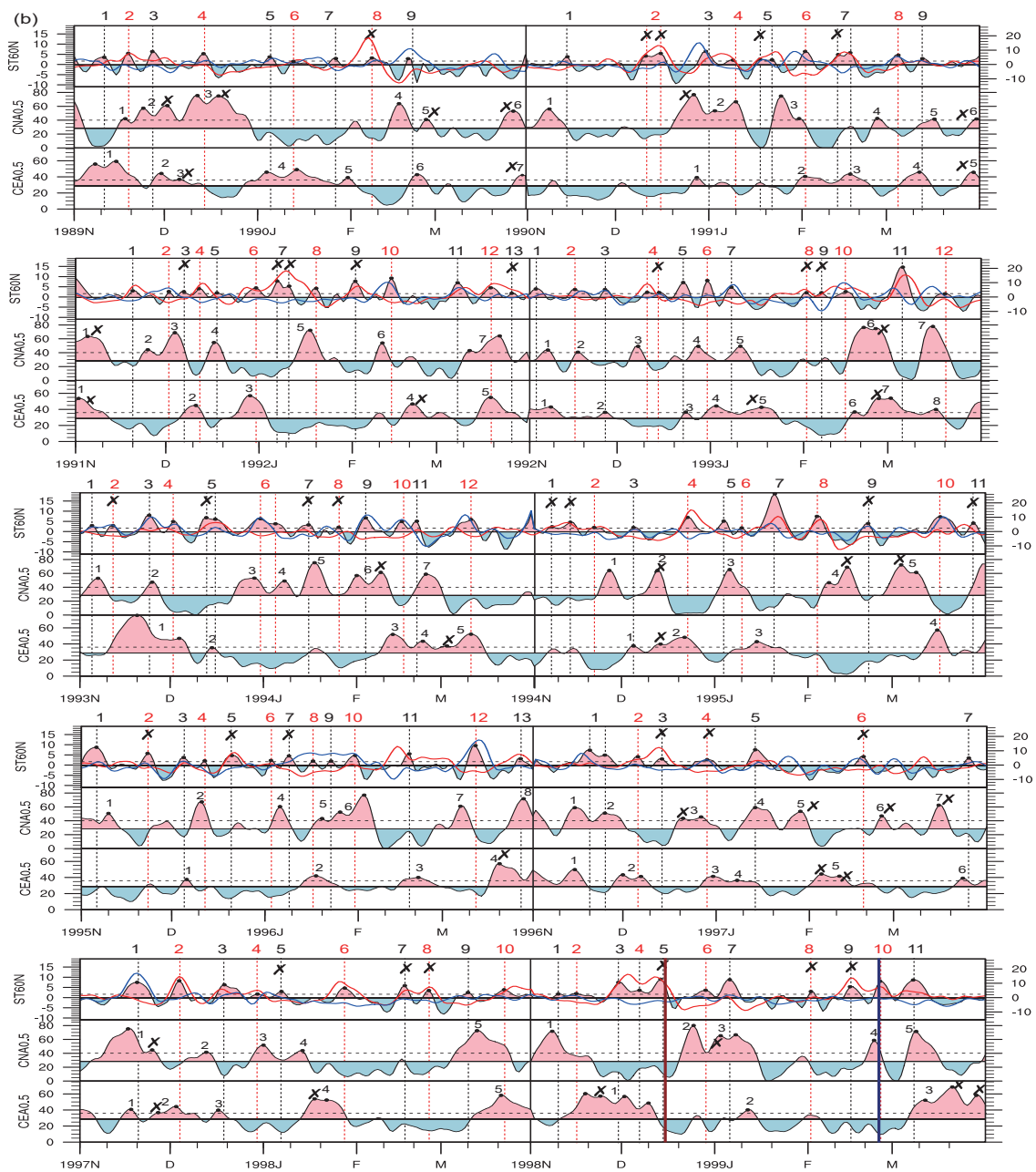


图5 续

节内尺度主导模态MJO特定定位相所对应的时段平均地面气温异常信息叠加到由平流层大气质量环流信号预测得到的逐日变化信息之上，最终得到地面气温异常的次季节尺度（14~60天）预测结果。在地面气温异常的次季节尺度预测结果基础上再叠加其冬季气候态变化，即可得到地面气温的次季节尺度预测结果。

5 结语

次季节预测是无缝天气预测气候预测业务的重要环节之一，在防灾减灾科学决策中起着重要作用。本文着重介绍了北半球冬季大陆尺度寒潮低温事

件的次季节尺度预测新因子——平流层大气质量环流脉冲事件。平流层大气质量环流脉冲事件存在以下三大特性：具有一定的次季节尺度可预测性；与逐个大范围极端温度事件存在联系；实时计算可行。基于该特性，可搭建由动力模块（采用动力预测方法获得平流层大气质量环流强事件的发生时间、强度等次季节尺度预测信息）和统计模块（环流强度达到峰值的时间、峰值强度与大陆尺度寒潮低温事件的统计关系）组成的对欧亚大陆和北美大陆中纬度地区寒潮低温事件的次季节尺度概率预报模型。

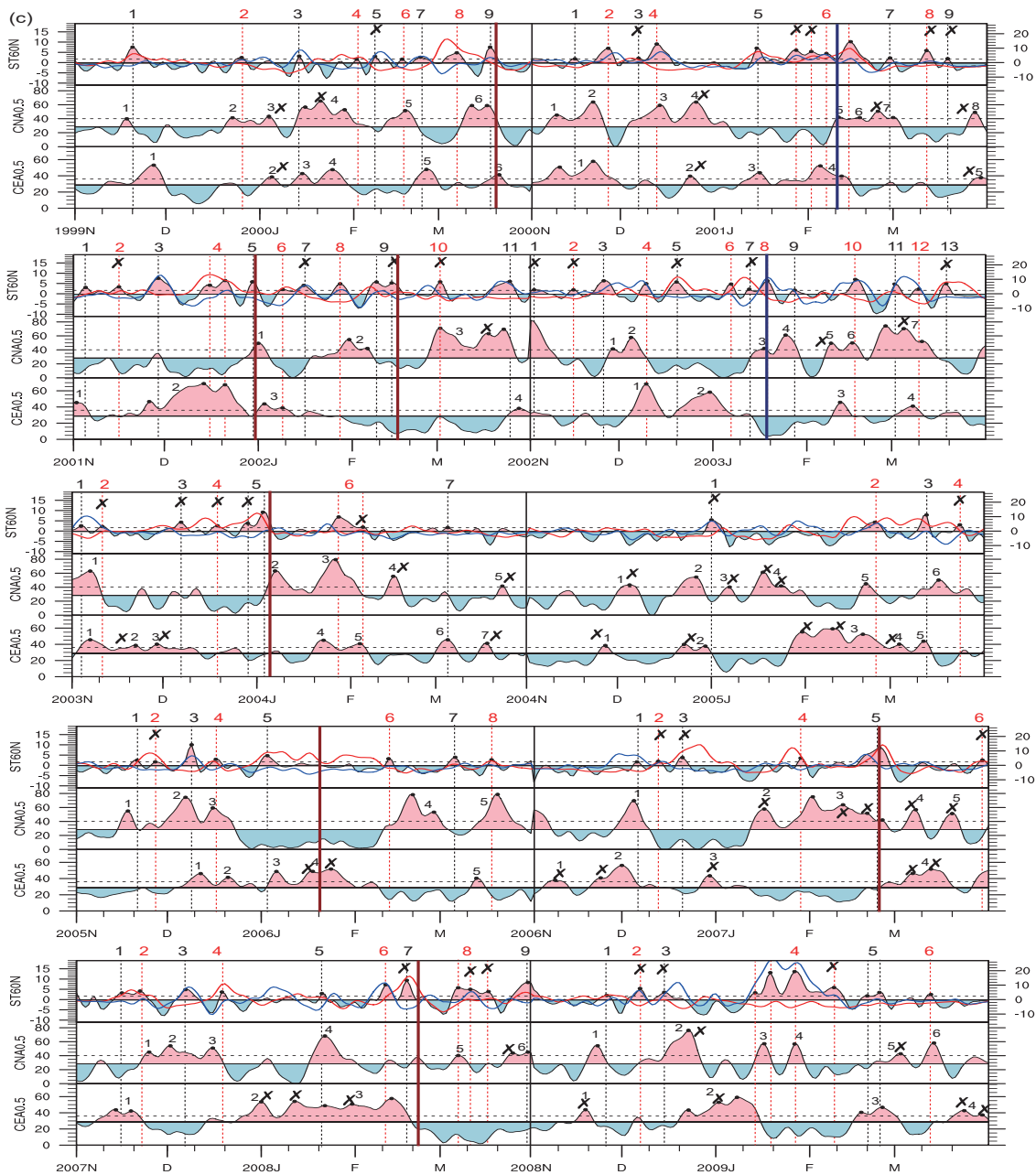


图5 续

但目前的研究距离平流层信号在次季节预测中的广泛业务应用仍存在一定距离。首先,平流层大气质量环流脉冲事件的单模式次季节预测水平还不够理想,多模式集合预报水平如何,是否有较大提升,需要充分利用S2S资料,进一步研究;其次,平流层大气质量环流脉冲事件-对流层中高纬度地面温度异常间的耦合关系还存在多样性和复杂性,重点表现在影响地面温度的时间和区域仍存在较大不确定性,需要从机理方面进行针对性攻艰研究。

参考文献

- [1] 贾小龙,陈丽娟,高辉,等.我国短期气候预测技术进展.应用气象学报,2013,24: 641-655.
- [2] Barnston A. Linear statistical short-term climate predictive skill in the Northern Hemisphere. Journal of Climate, 1994, 7: 1513-1564.
- [3] Huang J, Van den Dool H, Barnston A. Longlead seasonal temperature prediction using optimal climate normals. Journal of Climate, 1996, 9: 809-817.
- [4] Unger D. Long lead climate prediction using screening multiple linear regression. Proc. 20th Annual Climate Diagnostics Workshop, Seattle, WA, NOAA/Climate Prediction Center, 1995, 425-428.
- [5] Mo K. Ensemble canonical correlation prediction of surface temperature over the United States. Journal of Climate, 2003, 16:1665-1683.

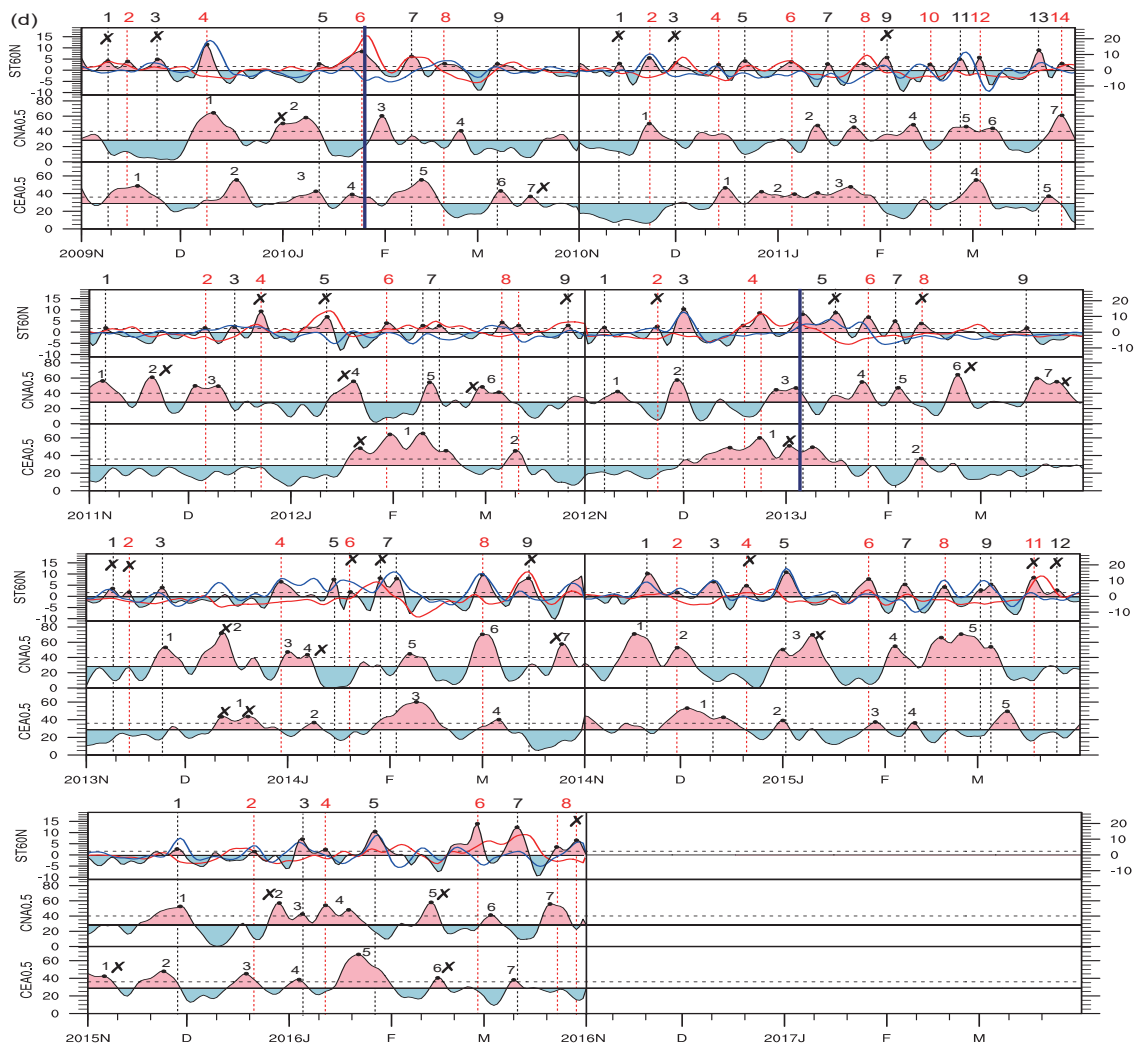


图5 续

- [6] Van den Dool H. Searching for analogues, how long must one wait? *Tellus Series A*, 1994, 46: 314-324.
- [7] Van den Dool H, Huang J, Fan Y. Performance and analysis of the constructed analogue method applied to U.S. soil moisture over 1981–2001. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108: 8617.
- [8] Kiladis G, Diaz H. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 1989, 2: 1069-1090.
- [9] 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. *大气科学*, 2002, 26: 595-610.
- [10] Thompson D, Baldwin M, Wallace J. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. *Journal of Climate*, 2002, 15: 1421-1428.
- [11] Kenyon J, Hegerl G. Influence of modes of climate variability on global temperature extremes. *Journal of Climate*, 2008, 21: 3872-3889.
- [12] Jeong J, Ho C, Kim B, et al. Influence of the Madden-Julian oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D11104.
- [13] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸预报试验. *大气科学*, 2012, 36: 102-116.
- [14] Ko K, Chiu P. ISO-Modulating effects on the East Asian summer monsoon circulation patterns associated with Southern Taiwan's monsoon rainfall. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 3163-3177.
- [15] 任宏利, 吴捷, 赵崇博, 等. MJO 预报研究进展. *应用气象学报*, 2015, 26: 658-668.
- [16] Johnson N, Collins D, Feldstein S, et al. Skillful wintertime North American temperature forecasts out to 4 weeks based on the state of ENSO and the MJO. *Weather and Forecasting*, 2014, 29: 23-38.
- [17] Koster R, Mahanama S, Livneh B, et al. Skill in streamflow forecasts derived from large-scale estimates of soil moisture and snow. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 613-616.
- [18] Koster R, Mahanama S, Yamada T, et al. The second phase of the global land-atmosphere coupling experiment: Soil moisture contributions to subseasonal forecast skill. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12: 805-822.
- [19] Yang F, Kumar A, Wang W, et al. Snow-albedo feedback and seasonal climate variability over North America. *Journal of Climate*, 2001, 14: 4245-4248.
- [20] Lin H, Wu Z. Contribution of the autumn Tibetan Plateau snow cover to seasonal prediction of North American winter temperature. *Journal of Climate*, 2011, 24: 2801-2813.
- [21] Tripathi O, Baldwin M, Charlton-Perez A, et al. The predictability of the extratropical stratosphere on monthly time-scales and its impact on the skill of tropospheric forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141: 987-1003.
- [22] Christiansen B. Downward propagation and statistical forecast of

- the near-surface weather. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D14104.
- [23] Charlton A, Polvani L. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks. *Journal of Climate*, 2007, 20: 449-469.
- [24] Yoden S, Ishioka K, Durran D, et al. Theoretical aspects of variability and predictability in weather and climate systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95: 1101-1104.
- [25] Stan C, Straus D. Stratospheric predictability and sudden stratospheric warming events. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D12103.
- [26] Li J P, Ding R Q. Temporal-spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical analogs. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 3265-3283.
- [27] Zhang Q, Shin C, Van den Dool H, et al. CFSv2 prediction skill of stratospheric temperature anomalies. *Climate Dynamics*, 2013, 41: 2231-2249.
- [28] Baldwin M, Dunkerton T. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 30937-30946.
- [29] Baldwin M, Dunkerton T. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 2001, 294: 581-584.
- [30] 胡永云. 关于平流层异常影响对流层天气系统的研究进展. *地球科学进展*, 2006, 21: 713-720.
- [31] Cai M, Ren R. 40-70 day meridional propagation of global circulation anomalies. *Geophysical Research Letter*, 2006, 33: L06818.
- [32] Cai M, Ren R. Meridional and downward propagation of atmospheric circulation anomalies. Part I: Northern Hemisphere cold season variability. *Journal of Atmospheric Science*, 2007, 64: 1880-1901.
- [33] Ren R, Cai M. Meridional and vertical out-of-phase relationships of temperature anomalies associated with the Northern Annular Mode variability. *Geophysical Research Letter*, 2007, 34: L07704.
- [34] Ren R, Cai M. Meridional and downward propagation of atmospheric circulation anomalies. Part II: Southern Hemisphere cold season variability. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 65: 2343-2359.
- [35] 吕达仁, 陈泽宇, 卞建春, 等. 平流层-对流层相互作用的多尺度过程特征及其与天气气候关系—研究进展. *大气科学*, 2008, 32: 782-793.
- [36] 陆春晖, 丁一汇. 平流层与对流层相互作用的研究进展. *气象科技进展*, 2013, 3: 6-21.
- [37] Baldwin M, Stephenson D, Thompson D, et al. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. *Science*, 2003, 301: 636-640.
- [38] Sigmond M, Scinocca J, Kharin V, et al. Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 98-102.
- [39] Karpechko A. Improvements in statistical for forecasts of monthly and two-monthly surface air temperatures using a stratospheric predictor. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2015, 141: 2444-2456.
- [40] Townsend R, Johnson D. A diagnostic study of the isentropic zonally averaged mass circulation during the first GARP global experiment. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1985, 42: 1565-1579.
- [41] Johnson D. The forcing and maintenance of global monsoonal circulations: An isentropic analysis. *Advances in Geophysics*, 1989, 31: 43-316.
- [42] Held I, Schneider T. The surface branch of the zonally averaged mass transport circulation in the troposphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 56: 1688-1697.
- [43] Cai M, Shin C. A total flow perspective of atmospheric mass and angular momentum circulations: Boreal winter mean state. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 71: 2244-2263.
- [44] Cai M, Yu Y, Deng Y, et al. Feeling the pulse of the stratosphere: An emerging opportunity for predicting continental-scale cold air outbreaks one month in advance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97: 1475-1489.
- [45] Yu Y, Cai M, Shi C, et al. Sub-seasonal prediction skill for the stratospheric meridional mass circulation variability in CFSv2. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 631-650.
- [46] Yu Y, Cai M, Ren R et al. Relationship between warm air mass transport into upper polar atmosphere and cold air outbreaks in winter. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 72: 349-368.
- [47] Yu Y, Ren R, Cai M. Dynamical linkage between cold air outbreaks and intensity variations of the meridional mass circulation. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 72: 3214-3232.
- [48] Iwasaki T, Mochizuki Y. Mass-weighted isentropic zonal mean equatorward flow in the Northern Hemispheric winter. *SOLA*, 2012, 8: 115-118.
- [49] Iwasaki T, Shoji T, Kanno Y, et al. Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the Northern Hemispheric winter. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 71: 2230-2243.
- [50] Yu Y, Cai M, Ren R, et al. A closer look at the relationships between meridional mass circulation pulses in the stratosphere and cold air outbreak patterns in Northern Hemispheric winter. *Climate Dynamics*, 2018, 51: 3125-3143.
- [51] Yu Y, Cai M, Shi C, et al. On the linkage among strong stratospheric mass circulation, stratospheric sudden warming, and cold weather events. *Monthly Weather Review*, 2018, 146: 2717-2739.
- [52] Yu Y, Ren R, Hu J, et al. A mass budget analysis on the interannual variability of the polar surface pressure in winter season. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 71: 3539-3553.
- [53] Yu Y, Cai M, Ren R. A stochastic model with a low-frequency amplification feedback for the stratospheric northern annular mode. *Climate Dynamics*, 2018, 50: 3757-3773.
- [54] Runde T, Dameris M, Garny H, et al. Classification of stratospheric extreme events according to their downward propagation to the troposphere. *Geophysical Research Letter*, 2016, 43: 6665-6672.
- [55] Kodera K, Kuroda Y. Tropospheric and stratospheric aspects of the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letter*, 2000, 27: 3349-3352.
- [56] Yoden S, Yamaga T, Pawson S, et al. A composite analysis of the stratospheric sudden warmings simulated in a perpetual January integration of the Berlin TSM GCM. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1999, 77: 431-445.
- [57] Perlwitz J, Graf H. Troposphere-stratosphere dynamic coupling under strong and weak polar vortex conditions. *Geophysical Research Letter*, 2001, 28: 271-274.
- [58] Zhou S, Miller A, Wang J. Downward propagating temperature anomalies in the preconditioned polar stratosphere. *Journal of Climate*, 2002, 15: 781-792.
- [59] Yu Y, Ren R. Understanding the variation of stratosphere-troposphere coupling during stratospheric northern annular mode events from a mass circulation perspective. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 5141-5164.
- [60] Zhang G, Gao Y, Cai W, et al. Seesaw haze pollution in North China modulated by the sub-seasonal variability of atmospheric circulation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 565-576.
- [61] Mitchell D, Gray L, Anstey J, et al. The influence of stratospheric vortex displacements and splits on surface climate. *Journal of Climate*, 2013, 26: 2668-2682.
- [62] Kidston J, Scaife A, Hardiman S, et al. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 433-440.
- [63] Lehtonen I, Karpechko A. Observed and modeled tropospheric cold anomalies associated with sudden stratospheric warmings. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121: 1591-1610.
- [64] Kodera K, Mukougawa H, Maury P, et al. Absorbing and reflecting sudden stratospheric warming events and their relationship with tropospheric circulation. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121: 80-94.