

北半球平流层春季最后增温事件爆发日期定义方法的比较分析

刘翔宇¹ 闫柳池^{2,3} 胡景高¹ 邓洁淳¹ 李宗泽¹ 何欢⁴

(1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 南京创蓝科技有限公司, 南京 211135)

摘要: 本文对定义北半球平流层春季最后增温事件 (Stratospheric Final Warming, SFW) 爆发日期的三种不同方法进行了比较分析。三种方法分别为: 1) 基于平流层极夜急流核心纬度带 (60°—75°N) 逐日纬向平均纬向风最后一次由西风转为东风的时间, 简称为逐日风场反转法; 2) 将月平均纬向风场数据线性插值成逐日数据, 然后基于插值后的逐日纬向平均纬向风由西风转为东风的时间, 简称为月均风场插值法; 3) 90°N与60°N之间纬向平均温度经向梯度最后一次由负转正的日期, 简称为温度梯度反转法。结果表明, 由逐日风场反转法和月均风场插值法得到的SFW爆发日期基本一致, 但是当平流层冬末和春初发生爆发性增温时, 两种方法确定的SFW爆发日期易出现较大偏差; 温度梯度反转法确定的SFW爆发日期早于逐日风场反转法确定的SFW爆发日期, 在30 hPa等压面层, 两种方法定义的平均日期相差16 d。由于逐日风场反转法在实际使用时更为常见, 因此, 以该方法为参考, 对温度梯度反转法进行修订, 结果表明, 如果将温度梯度反转法中的阈值由0 K提高为3 K, 以上利用温度和风场确定的SFW爆发日期则基本一致。

关键词: 平流层最后增温事件, 爆发日期, 逐日风场反转, 月均风场插值, 温度梯度反转

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.05.005

Comparison of the Methods in Defining the Onset of Stratospheric Final Warming Event during Boreal Spring

Liu Xiangyu¹, Yan Liuchi^{2,3}, Hu Jinggao¹, Deng Jiechun¹, Li Zongze¹, He Huan⁴

(1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4 Nanjing CLIMBLUE Technology Co. Ltd., Nanjing 211135)

Abstract: This paper compares three methods in defining the onset of the boreal spring stratospheric final warming (SFW) events, which are based on the final reversal of daily circumpolar zonal wind direction (referred to as UD0), the reversal of zonal wind direction linearly interpolated from the monthly data (referred to as UM0), and the reversal of the meridional gradient of zonal-mean temperature between the North Pole and 60°N (referred to as TG0), respectively. The SFW onset date identified by the UM0 method is basically consistent with that by the UD0 method. However, in the presence of major stratospheric sudden warming events in late winter and early spring, considerable discrepancies are discovered between the results of the two methods. The SFW onset date identified by TG0 tends to be earlier than that by UD0. At 30 hPa, The mean date of SFW by the TG0 method is ~16 days earlier than that by the UD0 method. As the UD0 method is more common in practical use, the TG0 method is revised with this method as a reference. The research results show that if the threshold of the TG0 method is lifted from 0 K to 3 K, the SFW onset date in this method has excellent agreement with that by the UD0 method.

收稿日期: 2024年4月8日; 修回日期: 2024年6月21日

第一作者: 刘翔宇(2003—), Email: 202183300730@nuist.edu.cn

通信作者: 胡景高(1985—), Email: jinggao@nuist.edu.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(42361144843, 41975048, 42175069); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202310300032Z)

Keywords: stratospheric final warming event, onset date, daily zonal wind reversal, monthly zonal wind interpolation, meridional temperature gradient reversal

0 引言

平流层高纬度地区冬季盛行西风环流,称为极夜急流。冬季,来自对流层中纬度的行星波会向平流层传播并与热带外平流层纬向基本气流相互作用,这样的过程往往会造成平流层极区的温度升高^[1-2]。强度较强的行星波会造成极区温度的剧烈增加,甚至在一周内能增加40℃,该过程被称为平流层爆发性增温事件,此时,平流层极涡崩溃,绕极西风气流会短暂转变为东风气流^[3-10]。平流层极涡在每年的春季都会彻底崩溃,绕极西风气流彻底转为东风气流,并至秋季不再恢复。由于该过程有时也伴随着和冬季一样的极区剧烈增温现象,因此称为平流层最后增温事件(Stratospheric Final Warming, SFW)^[2, 11-12]。SFW是平流层春季最重要的事件之一,它的发生标志着平流层极区环流由冬季环流型转变为夏季环流型。SFW的爆发日期有着明显的年际变化,这是因为SFW爆发日期不仅与对流层上传的行星波活动有关,而且与平流层前期的环流状态,以及太阳辐射加热有着紧密的联系。

有很多方法可以用来定义SFW事件的爆发,其中之一为极涡追踪诊断法,该方法被认为能更加准确地描述平流层极涡的崩溃过程^[13-17]。该方法首先需要在等熵面上确定平流层极涡的边缘。此时,往往会用某一特定的位涡等值线,或纬向风等值线,或位涡梯度最大值的区域来定义极涡的边缘。SFW爆发日期可以被认为是该特定等值线内包含的极涡面积小于某一阈值的日期或者沿着该特定等值线的风速小于某一阈值的日期。利用该定义, Waugh等^[18]将沿着极涡边缘平均风速 $<15.2\text{ m/s}$ 的第一天定义为SFW爆发日期,但是,该方法会将一些冬季的爆发性增温事件划归为SFW事件,比如1958年1月、1963年2月、1978年2月的冬季增温被其认为是SFW事件。魏科等^[19-20]认为在Waugh等^[18]确定的SFW事件爆发后,平流层极区仍维持着一定程度的西风,将继续允许对流层行星波上传至平流层,因此,这并不是平流层极涡彻底崩溃并转变为夏季环流的时间。

Black等^[11-12]在等压面上确定了SFW事件的爆发,将北半球70°N纬向平均纬向风速 $<0\text{ m/s}$,并且至秋天前不再恢复至西风的第二天定义为SFW爆发日期,期间如果纬向风恢复成西风,则风速不能超过某个阈值,在10 hPa和50 hPa等压面层,该阈值分别为10 m/s和5 m/s。与Waugh等^[14, 18]的方法相比,该方法能更好地描述极涡崩溃的最后阶段,因此,类似的方法在随后的研究中经常被采用^[8, 21-26]。胡景高等^[27]发现在一些年份中,极夜急流在春季转为东风后又恢复的西风虽

然风速较低,但能持续较长时间,因此,限定恢复的西风最多只能维持5 d,否则认为极涡仍然维持;并指出这样的定义能够准确地表征SFW爆发日期^[28-31],但一些研究认为这样的限定条件比较主观。Hardiman等^[32]使用月平均数据定义了南半球SFW爆发日期,首先将月平均纬向风数据线性插值成逐日数据,然后将春季绕极西风转为东风的第一天定义为SFW爆发日期。该方法能客观地处理在一些年份中西风转为东风后,又恢复至弱极涡的问题,因此,在研究北半球SFW事件时也经常被用到^[33-36]。需要指出的是,采用月平均资料插值仅仅是对SFW爆发日期进行识别,对于SFW爆发过程中环流和动力特征的分析仍然是基于逐日数据^[34-35]。这样的方法意味着需要使用的数据量的增加,尤其是利用国际耦合模式比较计划(CMIP)对SFW进行多模式比较分析时,数据量的增加特别明显^[26, 30],进而给研究增加不便。虽然以上两种方法都是定义SFW爆发日期的常用方法,但相比较而言,基于逐日纬向风数据定义SFW爆发日期的方法使用更为普遍^[21-31]。目前,关于这两种方法的具体差异还不太清楚。

除了纬向风场外,气温参量也经常被用来定义SFW爆发日期。Newman^[37]指出80°S与50°S之间温度经向梯度的反转可以用来定义南半球30 hPa等压面层SFW爆发日期。Labitzke等^[6]基于30 hPa等压面层北极点的月平均温度数据确定平流层冬季爆发性增温事件以及春季SFW事件。Haigh等^[38]认为极区平均的逐日温度时间序列二次导数呈现最小值的当天可被确定为SFW爆发日期。基于气温参量定义的SFW爆发日期往往明显早于基于纬向风场定义的SFW爆发日期^[34, 37]。由于目前基于纬向风场定义SFW爆发日期的研究较多,那么,是否可以基于气温参量的定义进行修订,使其与基于纬向风场得到的SFW爆发日期一致?

本文对三种定义SFW爆发日期的方法进行比较,揭示基于逐日纬向风场和基于月平均纬向风场定义的SFW爆发日期之间的异同;同时,希望能找到一个简便的基于气温参量的SFW爆发日期的定义方法,使得到的SFW爆发日期与基于纬向风场得到的结果基本一致。

1 数据与方法

本文使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的第五代再分析数据(ERA5),水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向从1000 hPa到5 hPa,共有18层,时间跨度为1979年1月1日—2020年12月31日。

为了对SFW的定义方法进行比较,关注的时间段

主要为每年的2月下旬—5月上旬。一般而言，平流层冬季爆发性增温和春季的SFW事件是在10 hPa等压面进行定义。胡景高等^[39]发现平流层极区温度经向梯度符号的反转在10 hPa等压面特别频繁，使得在10 hPa层次上确定强度较弱的平流层爆发性增温较为困难，而在30 hPa层次上，该方法比较适用。由于本文将对利用温度经向梯度反转确定SFW爆发日期的方法进行比较，因此，将在30 hPa等压面上定义SFW的爆发。需要指出的是，30 hPa层次上定义的SFW爆发日期与10 hPa层次上定义的爆发日期相差并不大^[27]；并且，Ren等^[40]的研究表明，30 hPa的SFW与对流层天气气候的联系较10 hPa而言可能更加紧密。

本文比较的SFW爆发日期的定义方法具体如下：

1) 根据Hu等^[28-31]的定义方法，将春季 60° — 75° N纬向平均纬向风 ($[U]_{60^{\circ}-75^{\circ}\text{N}}$ ，方括号表示纬向平均，下同) 最后一次由西风转为东风的当天定义为SFW爆发日期，如果西风转为东风后仍会恢复至西风，则恢复的西风风速 ≤ 5 m/s，且持续时间不超过5 d，该方法简称为逐日风场反转法。2) 根据Hardiman等^[33]的定义方法，将月平均纬向风速设为该月第15天的值，然后线性插值成逐日数据，SFW爆发日期定义为插值后的 60° — 75° N纬向平均纬向风 < 0 m/s的当天，该方法简称为月均风场插值法。3) 与Newman^[37]方法类似，将 90° N与 60° N之间纬向平均温度的差值定义为温度经向梯度 ($T_{\text{grad}} = [T]_{90^{\circ}\text{N}} - [T]_{60^{\circ}\text{N}}$ ， T_{grad} 表示温度经向梯度， $[T]_{90^{\circ}\text{N}}$ 和 $[T]_{60^{\circ}\text{N}}$ 分别表示北极点和 60° N的纬向平均温度)，将温度经向梯度的符号最后一次由负转正的日期定义为SFW爆发日期，该方法简称为温度梯度反转法。

2 三种方法确定的SFW爆发日期的比较

图1a给出了由逐日风场反转法和月均风场插值法确定的SFW爆发日期。可以看出，两种方法确定的SFW爆发日期基本一致，相关系数达到0.78。由逐日风场反转法确定的SFW爆发平均时间为4月18日，而月均风场插值法确定的SFW爆发平均时间为4月22日，后者比前者偏晚4 d。这可能是由于月均风场插值法中的线性插值使原本较为快速的SFW爆发过程更加平缓造成的。两种方法确定的1979—2020年SFW爆发日期的标准差是一致的，都为15.5 d。这表明，尽管两种方法结果有一定差别，尤其是在面对平流层极涡崩溃后又恢复的情形时，但两者确定的SFW爆发日期总体上是趋于一致的。逐日风场反转法与月均风场插值法所确定的SFW爆发日期在1999年相差51 d。经过检查发现，这主要是因为1999年2月底发生了一次平流

层强爆发性增温(图2)，导致平流层环极西风急流在3月上旬出现风向反转，此后，平流层极涡恢复，并从3月中下旬开始保持很长时间的弱极涡状态，直到5月初才彻底崩溃。因而，月均风场插值法得到的1999年SFW爆发日期实际上是冬末春初的爆发性增温发生时

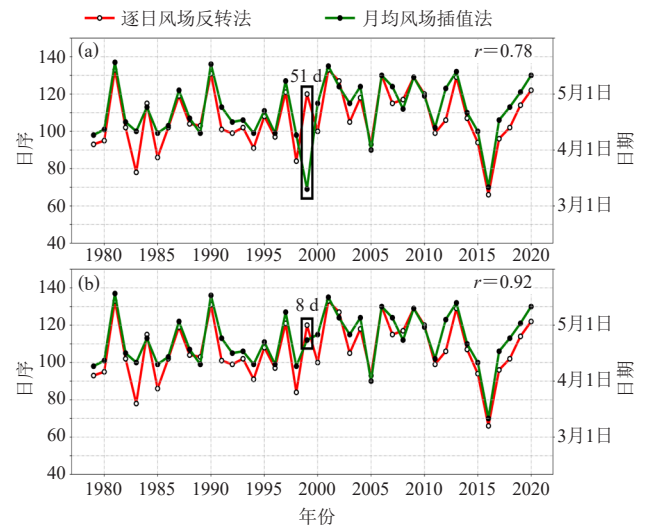


图1 逐日风场反转法和月均风场插值法确定的1979—2020年30 hPa层SFW爆发日期序列(a)；(b)同图1a，但是在月均风场插值法中，SFW爆发日期为环极西风最后一次转为东风的时间(黑框：两种方法确定的1999年SFW爆发日期差值)

Fig. 1 The onset date of SFW determined by the daily zonal wind reversal method and the monthly zonal wind interpolation method at 30 hPa during 1979—2020 (a); (b) same as Fig. 1a, but for the monthly zonal wind interpolation method, the onset date of SFW is the final reversal time that the circumpolar westerly wind turns into easterly wind (the black boxes: the discrepancies between the two methods in 1999; r : the correlation coefficient between the two series)

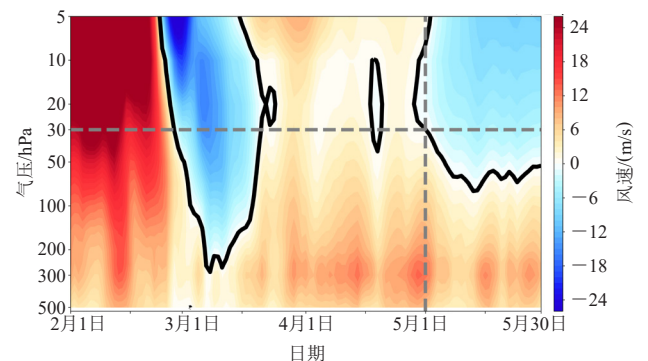


图2 1999年 60° — 75° N纬向平均纬向风的高度-时间演变(黑色等值线：风速零线；灰色横虚线：30 hPa等压面的高度；灰色竖虚线：30 hPa层上SFW爆发日期)

Fig. 2 The height-time evolution of the zonal-mean zonal wind in 60° — 75° N in 1999 (the black contours: the zero contours of wind speed; the gray horizontal and vertical dashed lines: the 30 hPa pressure level and the onset date of SFW at 30 hPa, respectively)

间。为了避免将爆发性增温事件确定为SFW事件，建议在使用月均风场插值法时，明确限定SFW爆发日期为插值后的逐日风场最后一次由正转负的日期。图1b为附加该条件后确定的SFW爆发日期序列，此时，两个方法得到的SFW爆发日期序列的相关系数达0.92，1999年两者的差值缩小至8 d。

这样的改进在10 hPa等压面上也有体现。在没有明确月均风场插值法中SFW爆发日期是否是风场最后一次转为东风时，尽管在大部分年份其与逐日风场反转法确定的SFW爆发日期相差都不大，但在1984年和1999年，两者分别相差47 d和49 d(图3a)。而在明确了SFW爆发日期为风场最后一次转为东风并不再恢复后，1984年和1999年两种方法确定的日期虽然仍分别相差11 d和12 d，但较之前大幅减小(图3b)。SFW爆发日期序列的相关系数也由之前的0.70提高至0.87。

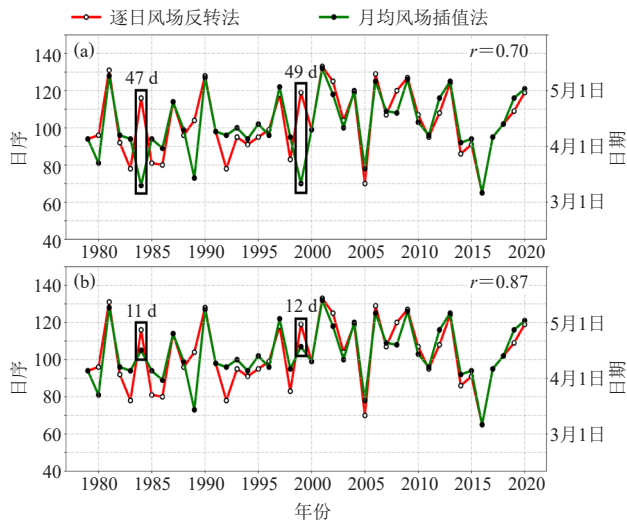


图3 同图1，但为10 hPa的情形(黑框：两种方法确定的1984年和1999年SFW爆发日期差值)

Fig. 3 Same as in Fig. 1, but at 10 hPa (the black boxes: the discrepancies between the two methods in 1984 and 1999, respectively)

由以上分析可以看出，虽然逐日风场反转法与月均风场插值法有所区别，但两者定义的SFW爆发日期在大部分年份是基本一致的，同时，为了避免两种方法在个别年份出现较大偏差，在使用月均风场插值法时，需要规定SFW爆发日期应为插值后的逐日风场中60°—75°N纬向平均纬向风最后一次由西风转为东风的时间。

下面对温度梯度反转法进行比较。图4a给出了由温度梯度反转法和逐日风场反转法确定的SFW爆发日期序列。可以看出，由温度梯度反转法确定的SFW爆发日期比逐日风场反转法确定的SFW爆发日期要明显

偏早。由温度梯度反转法确定的SFW平均爆发日期为4月2日，比逐日风场反转法的结果提前16 d。这表明，温度梯度反转法确定的日期主要描述的是平流层极涡春季崩溃的早期阶段。虽然两条序列的相关系数为0.70，但在很多年份，两种方法确定的SFW爆发日期差较大，其中有6年两者的差值超过了温度梯度反转法确定的SFW爆发日期的一个标准差。1989年和1999年两者分别相差55 d和42 d。另外，由温度梯度反转法确定的SFW爆发日期的标准差为17.6 d，比逐日风场反转法确定的标准差大2 d。

为了进一步比较三种方法之间的差异，图4b和4c分别给出了逐日风场反转法与月均风场插值法，以及逐日风场反转法与温度梯度反转法所确定的SFW爆发日期差值的频次统计。尽管在大部分年份(42年中)有35年)逐日风场反转法确定的SFW爆发日期比月均风场插值法要早，但这两种方法确定的SFW爆发日期总体相差不大，相差不超过6 d的年份占比55%。相比较而言，绝大部分年份逐日风场反转法比温度梯度反转法确定的SFW爆发日期要晚，其中有15年偏晚达15 d以上。

3 对温度梯度反转法的修订

由于两种基于纬向风场的定义所得结果相差不大，而温度梯度反转法与逐日风场反转法所确定的SFW爆发日期有较大差异，尤其是1989年和1999年，那么，是否可以对温度梯度反转法进行修订，使其所得结果与逐日风场反转法趋于一致呢？为此，首先对1989年和1999年进行分析。图5给出了1989年60°—75°N纬向平均纬向风以及1989年和1999年90°N与60°N之间平均温度经向梯度的高度-时间演变。从之前的讨论可以看出，SFW爆发日期有较大差异的年份往往是在冬末春初(2月末—3月初)发生强爆发性增温的年份。1989年，20 hPa及以上的层次约从2月15日开始发生爆发性增温，直到3月20日左右极涡开始恢复，并在4月14日左右绕极西风彻底转为东风，极涡彻底崩溃(图5a)。在30 hPa层次上，爆发性增温主要发生在3月上旬，之后极涡恢复，这种较弱的极涡状态持续了近25 d，SFW爆发日期与10 hPa一致，为4月14日。1999年也类似，平流层各层发生了强爆发性增温后，极涡在3月下旬开始恢复，并维持了1个月以上，最终，30 hPa层次上SFW在5月2日爆发(图2)。由于1999年3月爆发性增温强度太强，使得月平均纬向风表现为负值，导致月均风场插值法确定的SFW爆发日期较逐日风场反转法提前了51 d(图1a)。

1989年和1999年强爆发性增温发生前，温度经向

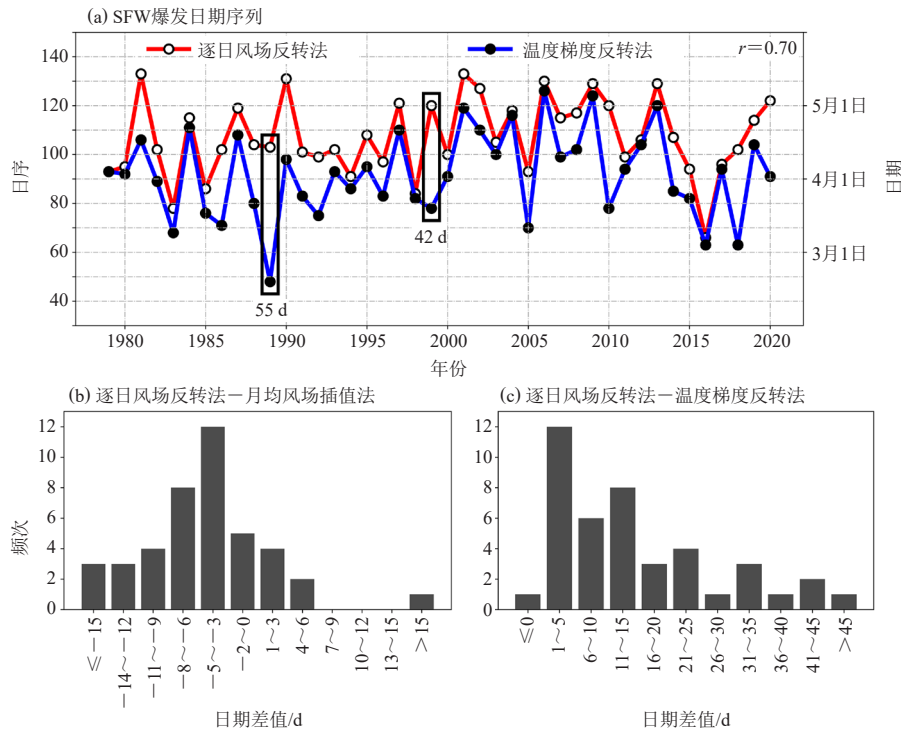


图4 逐日风场反转法和温度梯度反转法确定的1979—2020年30 hPa层次上SFW爆发日期序列 (a, 黑框: 两种方法确定的1989年和1999年SFW爆发日期的差值); 逐日风场反转法与月均风场插值法 (b) 以及逐日风场反转法与温度梯度反转法确定的SFW爆发日期差值的频次统计

Fig. 4 The onset date of SFW determined by the daily zonal wind reversal method and the meridional temperature gradient reversal method at 30 hPa during 1979—2020 (a, the black boxes: the discrepancies between the two methods in 1989 and 1999, respectively); the frequency of the discrepancies of the onset date of SFW between the daily zonal wind reversal method and the the monthly zonal wind interpolation method (b) and between the daily zonal wind reversal method and the meridional temperature gradient reversal method (c)

梯度也出现了由负到正的转变,但在3月上旬,20 hPa及以上层次的温度经向梯度的符号再次反转,与极涡的恢复相对应(图5b、5c)。在30 hPa,稳定的温度经向梯度的反转出现在2月17日和3月20日,因此,被温度梯度反转法确定为SFW爆发日期,但该日期显然不能描述极涡的最后崩溃。通过比较发现,环极西风彻底转为东风的日期与该层次温度经向梯度反转并稳定超过3 K的日期较为接近(图5b、5c中的第二条竖虚线),这给我们以启发,即是否可将温度梯度反转法中的阈值由0 K提高至3 K,并以此确定SFW爆发日期。因此,本文对温度梯度反转法的修订如下:如果90°N与60°N之间纬向平均温度经向梯度由负转正,并持续超过3 K累计达10 d,则超过3 K的第一天被定义为SFW爆发日期。

根据上述方法,本文重新确定了1979—2020年SFW爆发日期。图6给出了由3 K阈值标准以及逐日风场反转法得到的SFW爆发日期序列。两者的相关系数达0.90,超过了0 K阈值标准温度梯度反转法与逐日风

场反转法得到的SFW爆发日期序列的相关系数。3 K阈值标准得到的SFW爆发平均时间为4月14日,仅比逐日风场反转法提前4 d,与月均风场插值法与逐日风场反转法确定的SFW爆发日期之间的差值相当。尽管在1990年和2014年两种方法确定的SFW爆发日期仍有一定差异,但采用3 K阈值标准时,1989年和1999年的差值大幅缩小至10 d以内。

进一步将3 K阈值标准得到的SFW爆发日期序列进行标准化,并将超过1个标准差的年份定义为SFW偏晚年,小于-1个标准差的年份定义为偏早年。图7给出了由所有SFW事件以及SFW偏早年 and 偏晚年合成的60°—75°N纬向平均纬向风异常、60°N以北地区平均温度异常、70°N以北地区平均位势高度异常的高度-时间演变。从图中可以看出,以3 K阈值为标准的温度梯度反转法确定的SFW爆发日期能有效描述SFW爆发过程中主要的环流特征,即无论是所有SFW事件进行合成,还是以SFW偏早年或者偏晚年进行合成,SFW爆发前后,10 hPa以下的平流层都表现出明显的

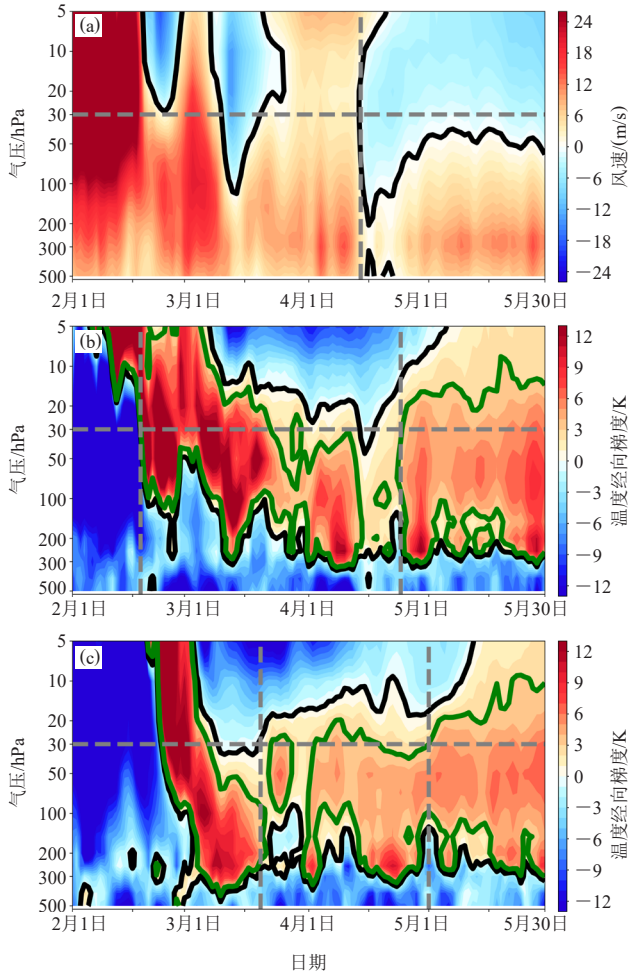


图5 1989年60°—75°N纬向平均纬向风 (a), 以及1989年 (b) 和1999年 (c) 90°N与60°N之间纬向平均温度经向梯度的高度-时间演变 (黑色等值线: 风速或温度经向梯度的0值线; 绿色等值线: 温度经向梯度达到3 K; 灰色横虚线: 30 hPa等压面层; 图5a中灰色竖虚线: SFW爆发时间; 图5b、5c中灰色竖虚线: 左、右分别为30 hPa等压面上温度经向梯度首次由负转正以及稳定达到3 K的时间)

Fig. 5 The height-time evolution of the zonal-mean zonal wind in 60°—75°N in 1989 (a) and of the meridional temperature gradient between the 90°N and 60°N in 1989 (b) and 1999 (c) (the black contours: the zero contours of wind speed or the meridional temperature gradient; the green contours: the value of 3 K of the meridional temperature gradient; the gray vertical dashed lines in Fig. 5a: the onset date of SFW at 30 hPa; the gray vertical dashed lines in Fig. 5b and Fig. 5c: the onset date of SFW at 30 hPa based on the first reversal of the meridional temperature gradient from negative to positive (the left) and the first date from which the meridional temperature gradient maintains above 3 K (the right))

环流异常的反位相, 其中偏早年更为剧烈, 强度更强 (图7b、7e、7h), 偏晚年环流异常的强度则明显偏弱 (图7c、7f、7i)。

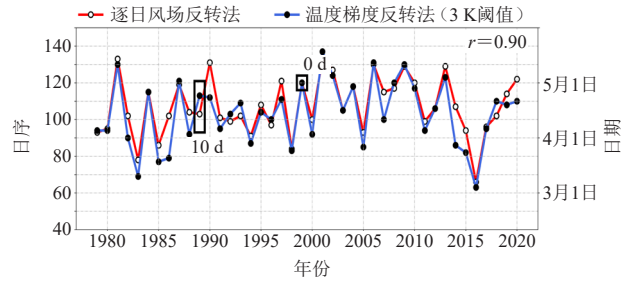


图6 同图4a, 但温度梯度反转法中使用了3 K阈值标准
Fig. 6 Same as in Fig. 4a, but 3 K threshold used for the meridional temperature gradient reversal method

4 结论

本文比较了三种常见的北半球春季平流层SFW爆发日期的定义方法: 利用30 hPa层次上60°—75°N纬向平均纬向风最后一次转变为东风的时间; 将月平均纬向风场线性插值成逐日风场, 插值后的60°—75°N纬向平均纬向风转变为东风的时间; 90°N与60°N之间纬向平均温度经向梯度最后一次由负变正的时间。由于目前研究中, 基于风场反转的方法比基于温度梯度反转的方法更为常见, 同时, 基于逐日纬向风场的方法能更加方便地探讨SFW爆发过程的环流和动力特征, 因此, 本文主要以逐日风场反转法为参照, 将月均风场插值法和温度梯度反转法与其比较, 所得主要结论如下。

逐日风场反转法与月均风场插值法所确定的SFW爆发日期基本一致, 1979—2020年, 两种方法所得的SFW爆发日期序列的标准差都为15.5 d。逐日风场反转法所得的SFW平均爆发日期为4月18日, 比月均风场插值法提前4 d, 其中, 超过一半的年份里, 逐日风场反转法所得的SFW爆发日期与月均风场插值法所得日期相差不超过6 d。但当冬末春初有强爆发性增温发生时, 月均风场插值法会将强爆发性增温事件确定为SFW事件。为了使两种方法结果更加一致, 建议在使用月均风场插值法时, 规定SFW爆发日期为插值后的逐日风场中60°—75°N纬向平均纬向风最后一次由西风转为东风的时间, 这样, 两种利用纬向风定义的SFW爆发日期序列的相关系数能达到0.92。

温度梯度反转法所得SFW爆发日期平均超前于逐日风场反转法16 d, 描述的是春季平流层极涡崩溃的早期阶段。在很多年份, 该方法与逐日风场反转法所得的SFW爆发日期有较大偏差。研究发现, 为了使该方法所得SFW爆发日期与上述两种利用纬向风场定义的SFW爆发日期一致, 可将温度梯度反转法中的阈值由0 K提升到3 K。当使用3 K阈值标准时, 温度梯度反转法较逐日风场反转法确定的SFW平均爆发日期提前

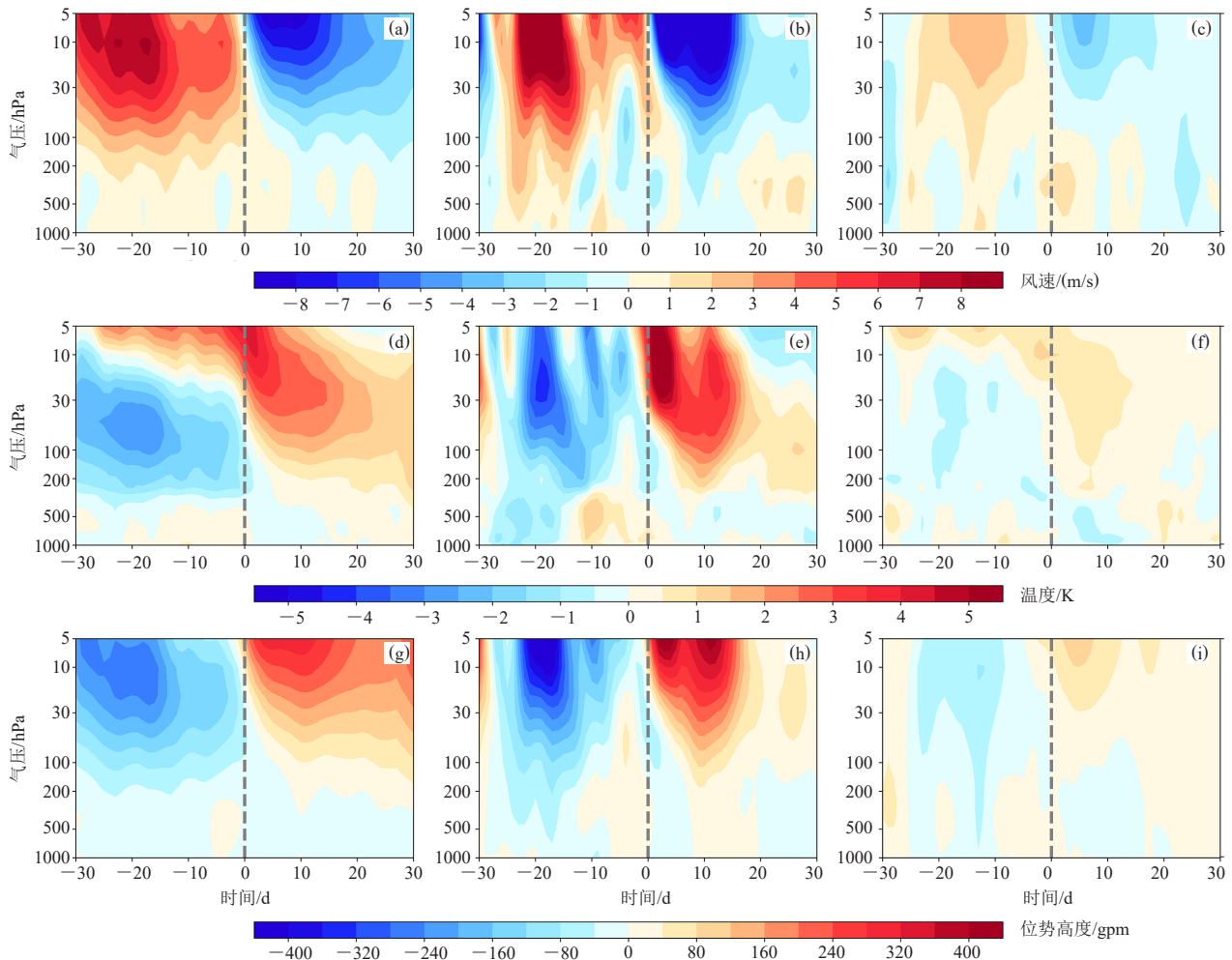


图7 由温度梯度反转法3 K阈值标准所确定的所有SFW事件 (a, d, g) 以及SFW偏早年 (b, e, h) 和偏晚年 (c, f, i) 分别合成的60°—75°N纬向平均纬向风异常 (a~c)、60°N以北地区平均温度异常 (d~f)、70°N以北地区平均位势高度异常 (g~i) 的高度-时间演变 (竖虚线: 第0天, 表示SFW爆发当日)

Fig. 7 The height-time evolution of the zonal-mean zonal wind anomalies in 60°—75°N (a-c), area-mean temperature anomalies poleward of 60°N (d-f) and area-mean geopotential height anomalies poleward of 70°N (g-i) composited for all years (a, d, g), earlier years (b, e, h) and later years (c, f, i) of SFW, respectively, with the onset date of SFW determined by the meridional temperature gradient reversal method with 3 K threshold (vertical dashed lines: the zero day/the onset date of SFW)

时间缩短至4 d, 两种方法确定的SFW爆发日期序列相关系数能达到0.90。调整后, 温度梯度反转法所得的SFW爆发日期能较好地描述SFW爆发前后平流层环流异常符号发生反转的特征。

参考文献

- [1] 陈文, 魏科. 大气准定常行星波异常传播及其在平流层影响东亚冬季气候中的作用[J]. 地球科学进展, 2009, 24(3): 272-285.
- [2] Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. Middle atmosphere dynamics[M]. Orlando: Academic Press, 1987.
- [3] Scherhag R. Die explosionsartige stratosphärenwärmung des spätwinters 1951/52[J]. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, 1952, 6(38): 51-63.
- [4] Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1971, 28(8): 1479-1494.
- [5] Labitzke K. Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern Hemisphere[J]. Monthly Weather Review, 1977, 105(6): 762-770.
- [6] Labitzke K, Naujokat B. The lower arctic stratosphere in winter since 1952[R]. SPARC Newsletter, 2000.
- [7] Limpasuvan V, Thompson D W J, Hartmann D L. The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings[J]. Journal of Climate, 2004, 17(13): 2584-2596.
- [8] Charlton A J, Polani L M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks[J]. Journal of Climate, 2007, 20(3): 449-469.
- [9] Butler A H, Seidel D J, Hardiman S C, et al. Defining sudden stratospheric warmings[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(11): 1913-1928.
- [10] 田文寿, 黄金龙, 鄧锴, 等. 平流层大气环流的典型系统及变化特征综述[J]. 气象科学, 2020, 40(5): 628-638.
- [11] Black R X, McDaniel B A, Robinson W A. Stratosphere-troposphere coupling during spring onset[J]. Journal of Climate, 2006, 19(19): 4891-4901.

- [12] Black R X, McDaniel B A. The dynamics of Northern Hemisphere stratospheric final warming events[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(8): 2932-2946.
- [13] Waugh D W, Randel W J. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(11): 1594-1613.
- [14] Waugh D W, Randel W J, Pawson S, et al. Persistence of the lower stratospheric polar vortices[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D22): 27191-27201.
- [15] Zhou S T, Gelman M E, Miller A J, et al. An inter-hemisphere comparison of the persistent stratospheric polar vortex[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(8): 1123-1126.
- [16] Manney G L, Zurek R W, O'Neill A, et al. Stratospheric warmings during February and March 1993[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(9): 813-816.
- [17] Manney G L, Lawrence Z D. The major stratospheric final warming in 2016: dispersal of vortex air and termination of arctic chemical ozone loss[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(23): 15371-15396.
- [18] Waugh D W, Rong P P. Interannual variability in the decay of lower stratospheric Arctic vortices[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2002, 80(4B): 997-1012.
- [19] 魏科, 陈文, 黄荣辉. 北半球平流层极涡崩溃过程的动力诊断分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(8): 1110-1119.
- [20] 魏科, 陈文, 黄荣辉. 涡动在南北半球平流层极涡崩溃过程中作用的比较[J]. *大气科学*, 2008, 32(2): 206-219.
- [21] Ayarzagüena B, Serrano E. Monthly characterization of the tropospheric circulation over the Euro-Atlantic area in relation with the timing of stratospheric final warmings[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(23): 6313-6324.
- [22] Sun L T, Robinson W A. Downward influence of stratospheric final warming events in an idealized model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(3): L03819.
- [23] Sun L T, Robinson W A, Chen G. The role of planetary waves in the downward influence of stratospheric final warming events[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2011, 68(12): 2826-2843.
- [24] Bancalá S, Krüger K, Giorgetta M. The preconditioning of major sudden stratospheric warmings[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D4): D04101.
- [25] Li L, Li C Y, Pan J, et al. On the differences and climate impacts of early and late stratospheric polar vortex breakup[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(5): 1119-1128.
- [26] Rao J, Garfinkel C I. Projected changes of stratospheric final warmings in the Northern and Southern Hemispheres by CMIP5/6 models[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 56(9): 3353-3371.
- [27] 胡景高, 任荣彩, 虞越越, 等. 北半球春季平流层最后增温过程及其年际和年代际变化特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(2): 333-342.
- [28] Hu J G, Ren R C, Xu H M. Occurrence of winter stratospheric sudden warming events and the seasonal timing of spring stratospheric final warming[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(7): 2319-2334.
- [29] Hu J G, Li T M, Xu H M. Relationship between the North Pacific Gyre Oscillation and the onset of stratospheric final warming in the Northern Hemisphere[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51(7): 3061-3075.
- [30] Hu J G, Liu Z X, Xu H M, et al. On the spring stratospheric final warming in CMIP5 and CMIP6 models[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2023, 66(1): 129-145.
- [31] Hu J G, Xie J C, Deng J C, et al. The impact of boreal spring stratospheric final warming on surface air temperature over Northern Hemisphere in ERA5 and CMIP6 models[J]. *Climate Dynamics*, 2024, 62(5): 3207-3219.
- [32] Hardiman S C, Butchart N, Osprey S M, et al. The climatology of the middle atmosphere in a vertically extended version of the Met Office's climate model. Part I: mean state[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 67(5): 1509-1525.
- [33] Hardiman S C, Butchart N, Charlton-Perez A J, et al. Improved predictability of the troposphere using stratospheric final warmings[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D18): D18113.
- [34] Wilcox L J, Charlton-Perez A J. Final warming of the Southern Hemisphere polar vortex in high- and low-top CMIP5 models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(6): 2535-2546.
- [35] Thiéblemont R, Ayarzagüena B, Matthes K, et al. Drivers and surface signal of interannual variability of boreal stratospheric final warmings[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(10): 5400-5417.
- [36] Kelleher M E, Ayarzagüena B, Screen J A. Interseasonal connections between the timing of the stratospheric final warming and Arctic sea ice[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(8): 3079-3092.
- [37] Newman P A. The final warming and polar vortex disappearance during the Southern Hemisphere spring[J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 13(12): 1228-1231.
- [38] Haigh J D, Roscoe H K. The final warming date of the Antarctic polar vortex and influences on its interannual variability[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(22): 5809-5819.
- [39] 胡景高, 任荣彩, 徐海明, 等. 冬季强、弱平流层增温事件的发生与春季最后增温事件爆发早晚的联系[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(4): 389-401.
- [40] Ren R C, Hu J G. An emerging precursor signal in the stratosphere in recent decades for the Indian summer monsoon onset[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(20): 7391-7396.

(编辑: 郑秋红)