

基于ERA5和CMIP6资料平流层爆发性增温现象研究

刘昭宇, 胡 芬, 王炳赞

成都信息工程大学, 大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2021年11月25日; 录用日期: 2021年12月24日; 发布日期: 2021年12月31日

摘 要

本文以ERA5再分析数据下的结果为参考, 对比并评估了CMIP6中6个模式(CESM2-WACCM、BCC-ESM1、MRI-ESM2-0、EC-Earth3、CanESM5和NorESM2-MM) Historical实验下无强迫逐日数据对两类SSW (偏移型和分裂型)的基本统计特征的模拟能力。首先, 与ERA5下的结果相比, 模式数据总是会低估SSW事件的发生频率, 尤其是对于分裂型, 大部分模式模拟出的频率甚至不到参考值的一半。其次, SSW事件主要发生在1~3月份, 而模式对SSW发生月份的模拟则表现出向晚冬(2~3月)的偏移。此外, 发生在12月和1月的SSW往往具有更大的振幅, 模式对此的模拟效果整体较好。

关键词

平流层爆发性增温, 极涡分类, CMIP6, 统计特征

The Study of Stratospheric Sudden Warming Based on ERA5 and CMIP6 Models

Zhaoyu Liu, Qin Hu, Bingyun Wang

College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 25th, 2021; accepted: Dec. 24th, 2021; published: Dec. 31st, 2021

Abstract

Simulations of vortex displacement and split stratospheric sudden warmings (SSWs) are evaluated for six models' daily outputs (CESM2-WACCM, BCC-ESM1, MRI-ESM2-0, EC-Earth3, CanESM5 and NorESM2-MM) from phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) with the

ERA5 reanalysis as a baseline. Statistical characteristics are mainly evaluated. Compared with nearly six SSWs per decade in ERA5, all models underestimate the SSWs frequency, especially for split SSWs (only a half of baseline). SSWs mainly appear in midwinter in ERA5, but one-month climate drift is simulated in the models. Besides, the SSWs in December and January have a larger amplitude, which is well reproduced by most models.

Keywords

Sudden Stratospheric Warming, Polar Vortex Classification, CMIP6, Statistical Characteristic

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人们对于平流层大气的研究在近些年开始逐渐受到重视。而平流层爆发性增温作为平流层大气环流的一大主要特征，则成为了平流层中主要的研究对象之一。平流层爆发性增温(Stratospheric Sudden Warming, SSW)是指在冬季和初春时，位于极地附近的平流层大气温度急剧升高的现象。平流层爆发性增温主要发生在北半球[1]，只有两次在南半球被卫星探测到[2]。当 SSW 发生时，极区与中纬度地区的温度梯度会反转，并且位于极地上空的冷性低涡(极涡)会迅速减弱，变形甚至分裂[2]，同时极涡周围的西风环流也将明显减弱，强烈时会出现反向的东风环流[3]。并且这种发生在平流层的环流异常会向低层传播[4]，从而引起对流层甚至近地面温度场和环流场的变化。当这种异常向下传播到对流层时，西风系统会随之减弱，导致亚欧大陆缺少暖湿气流。而高空急流的减弱会导致被极圈以北的冷空气易南下。所以，在 SSW 发生时，亚欧大陆易发生大规模寒潮天气，严重影响人类的生产生活。

正是因为 SSW 有着如此重要的影响，对其的预测和模拟则将会对寒潮等极端天气的预报有着重要作用。并且通过研究 SSW 发生前后的环流异常与行星波活动[5]，北极涛动(AO) [6]，海冰融化[7]等因素的相互关联，可以提高我们对气候变化及其动力学机制的理解。由此可见，对 SSW 的研究意义重大。国内外研究人员已经针对 SSW 各个方面做了大量的相关研究，主要包括 SSW 的形成、分类、对近地面天气和气候的影响、和不同数据对其的模拟等[8] [9] [10] [11]。

到目前为止，前人有用不同数据对 SSW 进行了模拟研究。其中，不同的再分析资料对 SSW 模拟效果大致相同[12]，但不同的模式资料则表现出了很大的差异，这主要是由于模式不同的边界条件与强迫条件导致的。有研究表明，模式的水平分辨率对 SSW 的模拟效果影响不大，而模式的垂直分辨率则起了更为重要的作用[13]。除此之外，模式的顶层高度对 SSW 的模拟效果也有着很大的影响。大部分低顶模式总是会低估 SSW 的发生频率[13]，但也有研究表明低顶模式也可模拟出很合理的 SSW 频率，如 CNRM-CM5 模式。总体来说，目前的模式资料依然不能精准地模拟出 SSW 的相关特征。

在上述背景和研究现状下，欧洲中心最新的再分析资料 ERA5 以及世界气候研究计划“耦合模拟工作组”组织的第六次国际耦合模式比较计划 CMIP6 模式资料为我们提供了新的数据基础。本文中，我们以 ERA5 再分析数据结果为参考，对比评估 6 种最新 CMIP6 模式模拟的 SSW 事件的开始日期，发生频率，极涡分类，月分布等主要特征。这可以为之后进一步改进模式对平流层的模拟效果提供良好的理论与数据基础。

2. 资料与方法

2.1. 所用资料

最新一轮国际耦合模式比较计划 CMIP6 目前正在进行, 共有来自 33 个研发机构的总计 112 个模式参与了该次比较计划, 是历次中提供的模式数量最多, 实验设计最为全面的一次。该次比较计划的特色是除了传统必做的核心 Deck 实验, 以及第二级 Historical 实验外, 本次计划额外批准了 23 个由专家自行组织的子计划, 其目的是覆盖当前环境下主要的热点问题, 比如气溶胶和化学模式比较、二氧化碳移除模式比较、云反馈模式比较计划、年代记气候预测计划等, 如此可以更有针对性的对海量的模式资料进行比较和应用[14]。

本文中挑选了 CMIP6 中 6 种最新版本的地球系统模式, 分别为 CESM2-WACCM, BCC-ESM1, MRI-ESM2-0, EC-Earth3, CanESM5, 和 NorESM2-MM 模式, 具体信息如表 1 所示。6 种模式基本覆盖了参与该次比较计划的主要国家, 且层数、顶层高度、水平分辨率等参数各有差异, 因此可以较为全面地对不同模式进行比较与评估。本次研究的具体数据选自这 6 个模式中运行的无强迫 Historical 实验产出的逐日数据, 变量包括纬向风、经向风、位势高度和气温, 时间范围从 1970~2014 共计 45 年。但因为 CMIP6 模式中可下载的逐日数据只包括 8 层(10 hPa、50 hPa、100 hPa、250 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa、1000 hPa), 因此, 这本身就一定程度上限制了平流层相关特征的模拟效果。

Table 1. The basic information of CMIP6 models

表 1. CMIP6 中六种地球系统模式的相关信息

| 模式名称 | 机构与国家 | 层数 | 顶层高度 | 水平分辨率(经度 × 纬度) |
|-------------|------------------------------|----|--------------------------|----------------|
| CESM2-WACCM | NCAR (美国) | 70 | 4.5×10^{-6} hPa | 288 × 192 |
| BCC-ESM1 | BCC (中国) | 26 | 2.19 hPa | 128 × 64 |
| MRI-ESM2-0 | MRI (日本) | 80 | 0.01 hPa | 320 × 160 |
| EC-Earth3 | EC-Earth-Consortium (欧洲各国联合) | 91 | 0.01 hPa | 512 × 256 |
| CanESM5 | CCCma (加拿大) | 49 | 1 hPa | 128 × 64 |
| NorESM2-MM | NCC (挪威) | 32 | 3 hPa | 288 × 192 |

ERA5 再分析数据是 ECMWF 再分析资料的最新版本, 它在上层大气和近地表尽可能的同化了更多的观测数据, 其大气模型与陆地表面模型和波浪模型相耦合。过去对平流层现象的研究大多采用 JRA55 再分析数据[15] [16] [17], 这是因为有研究表明 JRA55 对平流层的模拟效果更为优秀。在这种情况下, 过去采用 EC 系列(如 ERA-40 和 ERA-Interm)对平流层进行研究的情况本就较少, 最新产出的 ERA5 再分析数据对平流层的模拟效果更是尚未得知, 因此, 本次研究将 ERA5 再分析数据模拟出的结果作为参考值, 也是本次研究的一个重点。本文采用 ERA5 逐小时数据, 变量为纬向风 u 、经向风 v 、位势和气温, 并将每个变量每日四个时次(0、6、12、18 世界时)的平均值作为该变量的日数据, 时间选为 1979~2014 年, 与模式资料的结束时间相同, 共计 36 年。

2.2. SSW 事件的定义

不同文献中给出了许多有关 SSW 事件的定义方式(本文研究的对象都默认为强 SSW 事件)。本研究采用比较流行的 Charlton and Polvani [2]给出的对 SSW 的定义: 在 11 月~次年 3 月间, 若 60°N , 10

hPa 上的纬向平均纬向风开始由西风转为东风并持续 5 天以上, 则该日定义为一次 SSW 事件的开始日(第 0 日)。

但需要注意的是, 为了避免重复计算同一次 SSW 事件, 必须保证在定义完一次事件后的 20 天内不得计算新的 SSW 事件。而且还需要排除平流层最终增温现象[18], 所谓平流层最终增温是指随着春夏的临近和太阳的北移, 极地上空的平流层大气会吸收比低纬度地区更多的太阳辐射, 进而导致平流层温度迅速升高, 温度梯度和极涡迅速减弱, 极夜急流自然崩溃(由西风转为东风)的现象。这种现象是季节交替自然产生结果, 因此不能算作一次 SSW 事件。所以, 当发现西风转为东风, 但在 4 月结束之前都没有再转回西风时, 可将此次变暖定为平流层最终升温, 不能计入 SSW 当中。

2.3. SSW 事件的分类

SSW 可按发生时极涡的几何形状分为两类: 偏移型(D)和分裂型(S)。在第一章的国内外研究现状中, 已经详细介绍了通过数学方法模拟极涡几何形状的发展历程, 其本质都是在模拟可以代替极涡的等效椭圆。本文采取 Seviour 等定义的基于 10 hPa 位势高度场的二维涡矩法[19]。但由于该方法是在 Matthewman 等定义的基于等熵面位涡场的二维涡矩法发展而来, 因此, 该方法中具体的数学计算过程大部分都是参考 Matthewman 等发表的著作[20]。两类 SSW 极涡的形状如图 1 所示, 可以看到偏移型 SSW 的极涡中心南移, 整体表现为逗点状而分裂型 SSW 的极涡则明显分裂生成两个子涡。

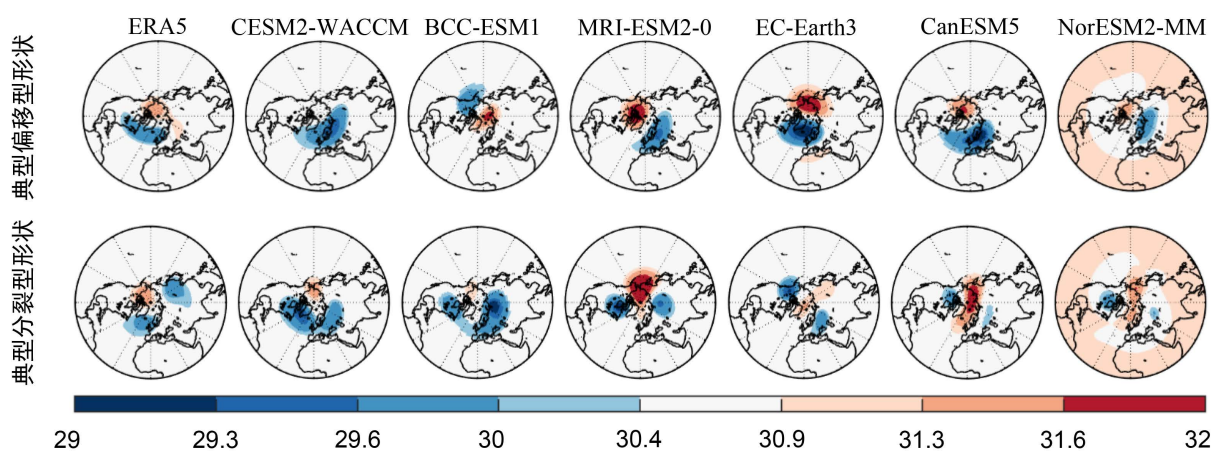


Figure 1. SSW simulations of ERA5 and CMIP6 models

图 1. ERA5 和 CMIP6 各模式模拟 SSW 效果的对比

3. ERA5 再分析数据对 SSW 模拟效果的检验

为了验证将 ERA5 再分析数据作为真值的可行性, 同时检验上文介绍的 SSW 定义及分类方法的效果。首先将 ERA5 模拟出的 SSW 的发生时间与分类结果与 Rao 等[17]利用 JRA55 再分析数据做出的结果作对比, 如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, ERA5 在 36 年中共模拟出 20 次 SSW 事件, 频率为 5.6 次/10 年, 略低于 SSW 事件的标准频率范围 6~8 次/10 年, 其中包括 10 次分裂型与 10 次偏移型 SSW, 两类 SSW 的发生频率较为平均。而 Rao 等使用 JRA55 再分析数据发现 36 年里共发生 23 次 SSW 事件, 频率为 6.4 次/10 年, 略高于 ERA5 模拟出的频率, 属于 SSW 事件的标准频率内, 其中共发生 12 次偏移型与 11 次分裂型 SSW, 两类 SSW 发生频率也较为一致。从带*的情况也可以看到, ERA5 模拟出的 20 次 SSW 事件中, 有 11 次与 JRA55 的模拟结果完全相同, 有 5 次与 JRA55 的结果略有偏差, 其中 1 次属于时间相同但类型不同,

另外 4 次则属于类型相同, 但发生时间不同, 不过时间上依然相差在 20 日之内。只有 4 次 SSW 事件在 JRA55 中没有模拟出来。由此可以基本判断, 虽然 ERA5 再分析数据模拟出的 SSW 频率要略低于标准值, 但是模拟出的 SSW 事件的开始日期与类别都与 JRA55 大致相同, 因此完全可以作为真值对比后续的 CMIP6 模拟结果。

Table 2. Information of SSW simulations between ERA5 and JRA55 [17]

表 2. ERA5 与 JRA55 [17]模拟 SSW 效果的对比

| ERA5 下 SSW 发生日期 | SSW 种类 | JRA55 下 SSW 发生日期 | SSW 种类 |
|-----------------|--------|------------------|--------|
| 1979年2月22日* | 分裂型(S) | 1979年2月22日* | 偏移型(D) |
| 1980年3月17日* | 偏移型(D) | 1980年2月29日* | 偏移型(D) |
| 1984年3月1日 | 偏移型(D) | 1981年2月6日 | 偏移型(D) |
| 1985年1月1日** | 分裂型(S) | 1981年12月4日 | 分裂型(S) |
| 1986年3月19日 | 偏移型(D) | 1985年1月1日** | 分裂型(S) |
| 1987年1月23日** | 偏移型(D) | 1987年1月23日** | 偏移型(D) |
| 1987年12月8日** | 分裂型(S) | 1987年12月8日** | 分裂型(S) |
| 1988年3月18日* | 分裂型(S) | 1988年3月14日* | 分裂型(S) |
| 1989年2月21日** | 分裂型(S) | 1989年2月21日** | 分裂型(S) |
| 1992年3月22日 | 偏移型(D) | 1998年12月15日** | 偏移型(D) |
| 1998年12月15日** | 偏移型(D) | 1999年2月26日** | 分裂型(S) |
| 1999年2月26日** | 分裂型(S) | 2000年3月20日 | 偏移型(D) |
| 2001年2月11日** | 分裂型(S) | 2001年2月11日** | 分裂型(S) |
| 2004年1月5日** | 偏移型(D) | 2001年12月31日 | 偏移型(D) |
| 2005年3月13日 | 偏移型(D) | 2003年1月18日 | 分裂型(S) |
| 2006年1月21日** | 偏移型(D) | 2004年1月5日** | 偏移型(D) |
| 2008年2月22日** | 偏移型(D) | 2006年1月21日** | 偏移型(D) |
| 2009年1月24日** | 分裂型(S) | 2007年2月24日** | 偏移型(D) |
| 2010年2月19日* | 分裂型(S) | 2008年2月22日** | 偏移型(D) |
| 2013年1月11日* | 分裂型(S) | 2009年1月24日** | 分裂型(S) |
| | | 2010年2月9日* | 分裂型(S) |
| | | 2010年3月24日 | 偏移型(D) |
| | | 2013年1月7日* | 分裂型(S) |

注: **表示该次 SSW 被 ERA5 数据与 JRA55 数据都模拟了出来, 且类型与开始日期完全相同; *表示两种数据对该次 SSW 的模拟略有差异, 类型相同但时间相差在 20 天以内, 或者时间相同但类型不同。无*表示此次 SSW 事件在另一种模式中没有模拟出来。

图 2 展示了两类 SSW 发生的前 10 天和后 15 天期间极涡中心的移动规律(由各次 SSW 事件的数据平均而成)。可以看出, 两类 SSW 事件极涡的中心都经历了先向南移动再往北回归的过程。其中, 偏移型 SSW 的极涡中心往往在 SSW 开始的前 8 天便已经开始南移, 于 SSW 开始的前 1 天离开北极圈(66°N), 在 SSW 开始后的第三天达到最南, 之后开始向北返回, 在 SSW 开始后的第 9 天重新进入北极圈, 第 12

天后极涡中心的位置趋于稳定，总周期约为 20 天，其中共有长达 11 天的时间位于北极圈以南；而分裂型 SSW 的极涡中心(本质上是两个子涡中心的中心)往往伴随着 SSW 的开始才开始南移，于第 6 天达到最南端，但基本不会离开北极圈，之后开始向北返回，但在 SSW 开始的第 11 天后又有一次迅速南移的过程。由此可以看出，分裂型 SSW 极涡中心的移动程度没有偏移型 SSW 强，持续时间也没有偏移型 SSW 长，而且具有不稳定性，这有可能是两个子涡位置各自偏移后联合作用的结果。

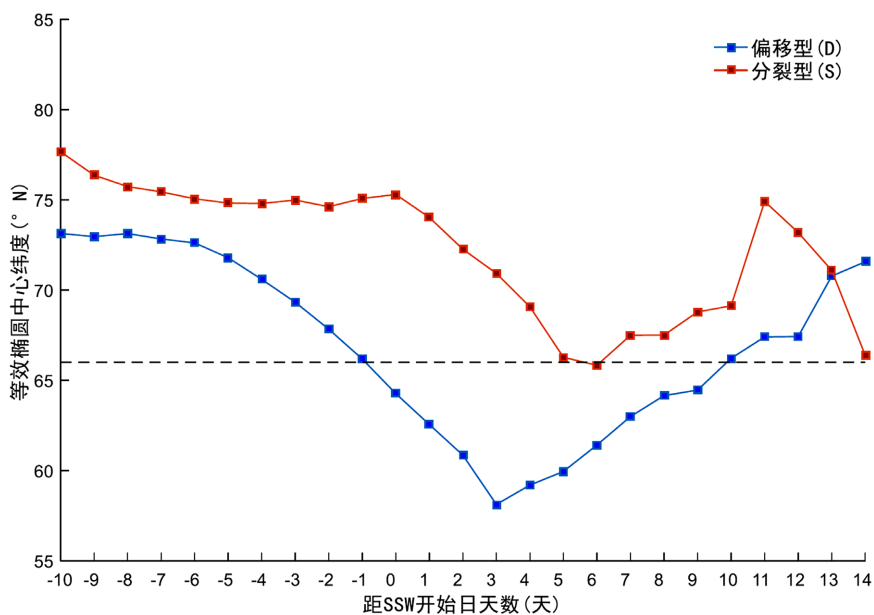


Figure 2. The average movement of the polar vortex center between the start of SSW
图 2. SSW 开始前后极涡中心的平均移动规律图

两类 SSW 的形变规律可以通过等效椭圆的长短轴之比的变化总结而出，如图 3 所示。可以看出，两

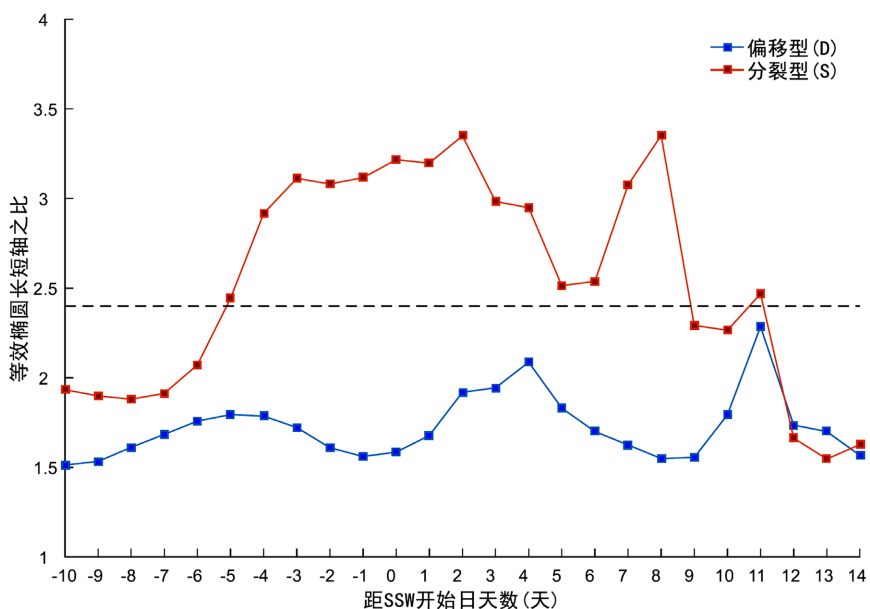


Figure 3. The average variation of the ratio of the long and short axis of the polar vortex between the start of SSW
图 3. SSW 开始前后极涡长短轴之比的平均变化规律图

类 SSW 极涡的长短轴之比在大部分时间内展现出相反的变化规律。其中分裂型 SSW 的极涡往往在 SSW 开始前的第 8 天就开始发生形变,长轴变长,短轴变短,整体开始逐渐变得扁平,之后形变速率加快,于 SSW 开始前的第 5 天已经处于完全分裂状态($r > 2.4$),但从 SSW 开始前的第三天起,极涡的形变开始逐渐平缓,长短轴之比一直维持在 3 左右,其中在第 2 天和第 9 天间有一次波动,第 9 天后两极涡开始正式聚合,长短轴之比迅速降低,直到第 12 日后恢复常规状态,整个周期也为 20 天,其中共有 14 天的时间处于 $r > 2.4$ 的状态;而偏移型 SSW 在整个过程中虽然形变始终不明显(没有达到 $r > 2.4$),但整体的变化趋势却和分裂型 SSW 相反,大约以 10 天为周期进行先拉伸(r 增大)后收缩(r 减小)的形变波动,而这种变化产生的原因可能是偏移型 SSW 的极涡南北移动时,极涡不同区域的移动速率不均衡,这才导致形状上出现反复的拉伸和收缩。

4. CMIP6 各模式数据对 SSW 事件模拟效果的评估

将同样的 SSW 定义及分类方法对选定的 CMIP6 中 6 种模式使用,便可以得到各模式下模拟出的 SSW 事件及其相关特征。

SSW 事件中最重要的统计特征就是其发生频率(次/10 年),具体包括 SSW 的总发生频率以及不同类型 SSW 在不同月份中的发生频率。由图 4 可以看出,6 种模式模拟出的 SSW 事件的发生频率全都小于 ERA5 数据下的结果(5.6 次/10 年),更是小于 SSW 事件的标准发生频率 6~8 次/10 年。其中, CESM1-WACCM 模式与 MRI-ESM2-0 模式模拟出的频率约为 4 次/10 年,是 6 种模式中效果最好的。除此之外, CanESM5 模式与 NorESM2-MM 模式模拟出的频率约为 3.5 次/10 年,而 BCC-ESM1 与 EC-Earth3 模式模拟出的结果仅为 2.5 次/10 年左右,在 6 种模式中效果不太理想。此外, ERA5 再分析数据下偏移型 SSW 与分裂型 SSW 的发生频率都为 2.8 次/10 年,两类 SSW 的发生频率大体一致,而对于 6 种模式数据,虽然偏移型 SSW 的发生频率(2~3.2 次/10 年)与 ERA5 下的结果较为一致,但模拟出的分裂型 SSW 的发生频率却远远低于参考值,这导致同一模式下两类 SSW 的发生极为不均衡,相比之下,只有 MRI-ESM2-0 模式下两类 SSW 的发生频率相对平均,分别为 2.4 次/10 年(偏移型)和 1.8 次/10 年(分裂型),是 6 种模式中效果最好的。

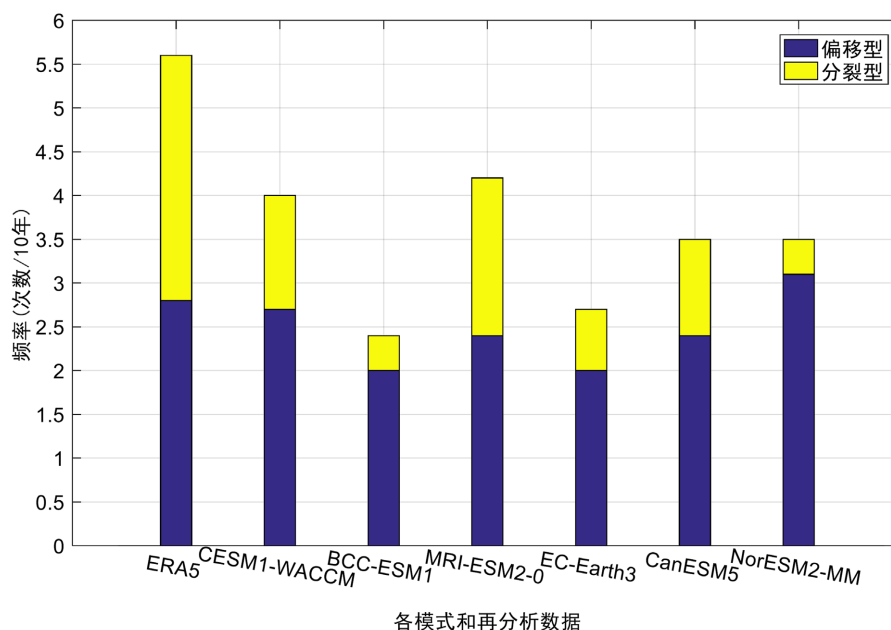


Figure 4. Event frequency of SSW for CMIP6 models
图 4. CMIP6 模式数据下 SSW 事件发生频率图

SSW 事件的月分布情况如图 5 所示。可以看到,并不是所有的月份都会发生 SSW 事件,比如在 ERA5 再分析数据下 11 月份没有发生过 SSW 事件,与 Rao 等用 JRA55 做出的结果相一致[17],但在模式数据下,只有 MRI-ESM2-0 与 EC-Earth3 在 11 月具有相同的结果,其它 4 个模式在 11 月都模拟出了不同程度的 SSW 事件。此外,以 ERA5 数据下的结果为参考,12 月份 SSW 的发生频率一般较低,约为 0.6 次/10 年,而 1 月、2 月和 3 月的发生频率则相对较高且分布均匀,皆为 1.7 次/10 年。而对于 6 种模式数据 CESM2-WACCM 与 BCC-ESM1 模拟出的 SSW 事件集中在 3 月份,分别达到 2.2 次/10 年与 1.8 次/10 年,较符合 ERA5 下的参考值,但 12 月、1 月和 2 月则完全低估了 SSW 的发生频率; EC-Earth3 下的 SSW 则主要集中于 2 月份,高达 2.2 次/10 年,但 12 月、1 月和 3 月则远低于参考值; CanESM5 模式下的 SSW 发生频率呈现出随月份逐渐增长分布规律,但每月都有不同程度的低估; Nor-ESM2-MM 模式除 1 月份模拟出的频率过低之外,其他 4 个月份分布较为平均,都是大约 1 次/10 年左右,因此整体表现为 11 月和 12 月远高于参考值,1~3 月远低于参考值的特征;相比之下, MRI-ESM2-0 的模拟效果相对最好,在 11 月、2 月和 3 月都模拟出了与 ERA5 较为一致的结果,只有在 12 月与 1 月低于参考值。总的来说,6 种模式数据在本该 SSW 事件高发的仲冬时节(1 月和 2 月)模拟效果最不理想,而在 12 月和 3 月则相对较好,其对 SSW 高发月份的模拟表现出了很明显的向晚冬(2 月和 3 月)的偏移。

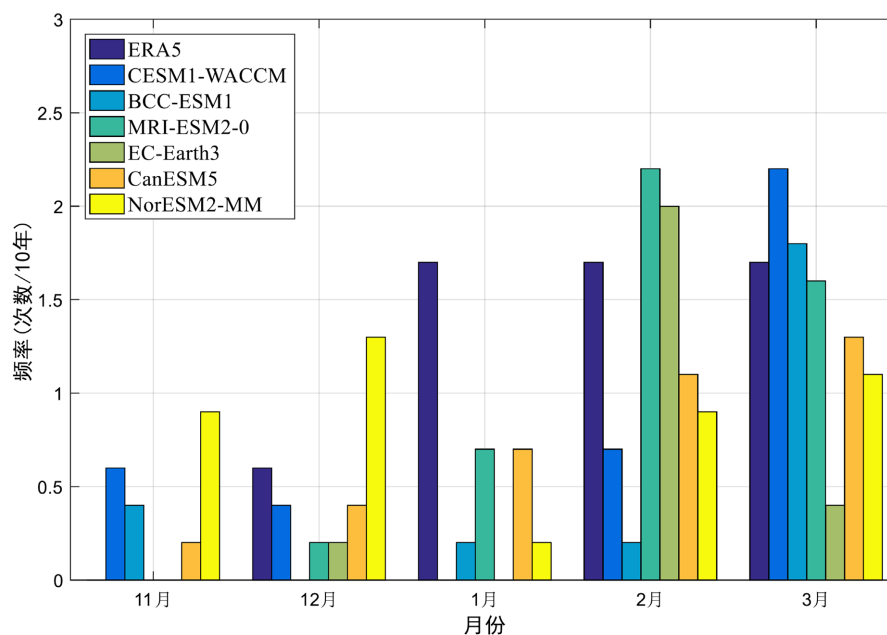


Figure 5. Monthly distribution of SSW frequency for CMIP6 models

图 5. CMIP6 模式数据下 SSW 事件发生频率的月分布图

两类 SSW 事件各自的月分布情况如图 6 所示。由 ERA5 再分析数据模拟出的结果可以看出,两类 SSW 在 12 月与 1 月的发生频率完全相同,其中,12 月两类 SSW 发生频率较低,为 0.3 次/10 年,1 月则相对较高,为 0.8 次/10 年。此外,2 月份主要以分裂型 SSW 为主,发生频率达到 1.4 次/10 年,是分裂型 SSW 事件最频发的时期,而 3 月份情况则完全相反,该月主要发生偏移型 SSW,频率也高达 1.4 次/10 年,是偏移型 SSW 事件最频发的时期。作为比较,从 6 种模式数据下的结果可以看出,对于偏移型 SSW 事件,只有 CESM2-WACCM 与 BCC-ESM1 模拟出了 3 月份发生多 2 月份发生少的特点,其他 4 种模式下的结果都是 2 月份远高于参考值,而 3 月份则远低于参考值,此外,6 种模式都低估了偏移型 SSW 在 1 月的发生频率,这进一步说明了模式数据对 1 月份 SSW 的模拟极为不理想,除 BCC-ESM1 与

NorESM2-MM 外, 其他 4 类模式在 12 月中的结果与参考值较为一致, 效果较好; 而对于分裂型 SSW, 除了 12 月份 CESM2-WACCM、MRI-ESM2-0 和 CanESM5 模拟出了与参考值较为一致的发生频率外, 在 1 月、2 月和 3 月中, 6 种模式的模拟结果都远远低于参考值。因此整体来看, 6 种模式虽然在 1 月份的表现不佳, 但对偏移型 SSW 的模拟效果相对较好, 尤其是 CESM2-WACCM 与 BCC-ESM1 能准确捕捉到偏移型 SSW 的分布特征。而 6 种模式对分裂型 SSW 的模拟效果都极为不理想, 不但频率上无法达到接近, 分布特征也完全无法捕捉到, 因此, 增强模式数据对分裂型 SSW 的模拟效果应成为日后改进的主要方向。

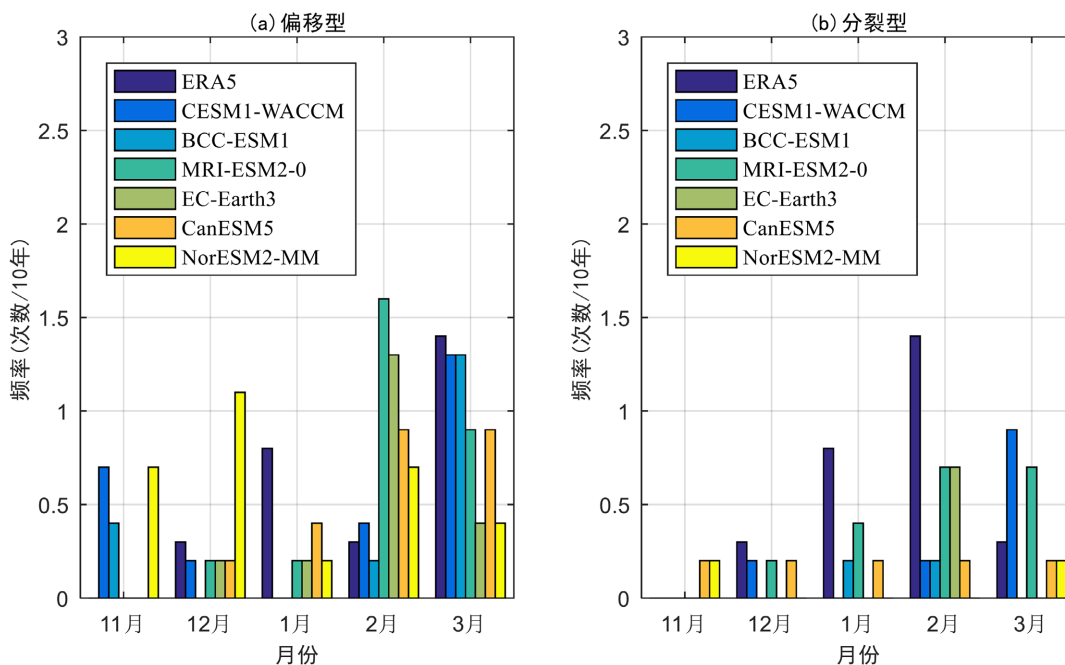


Figure 6. Monthly distribution of frequency of (a) Offset-type and (b) Split-type SSW for CMIP6 models
图 6. CMIP6 模式数据下(a)偏移型和(b)分裂型 SSW 事件发生频率的月分布图

除了 SSW 事件的发生频率及其月分布之外, SSW 的振幅也是一项尤为重要的统计特征。SSW 的振幅可以通过 SSW 开始日前后(一般前 5 日至后 5 日), 极冠区(60°N~90°N)上空 10 hPa 上温度的区域平均距平值来代表, 它能够反映出 SSW 事件发生前后整个极区平流层大气的平均增温幅度, 因此可以粗略代表 SS 的强弱情况。各月发生的偏移型和分裂型 SSW 的振幅如图 7 所示, 可以看到, 在 ERA5 再分析数据模拟的结果下, 除 2 月份外, 12 月、1 月与 3 月间发生的分裂型 SSW 的振幅要普遍高于偏移型 SSW, 这说明平均而言, 分裂型 SSW 事件发生后平流层的增温幅度要更大一些。其中, 对于偏移型 SSW, 12 月至次年 3 月间发生的 SSW 的增温幅度逐月减小, 12 月最大为 22 K, 3 月最小为 13 K; 而对于分裂型 SSW, 12 月与 1 月间发生的 SSW 振幅最大, 达到 24 K 左右, 3 月的振幅次之, 约为 16 K 左右, 2 月份振幅最小, 仅有 11 K。作为对比, 从模式数据的产出结果可以看出, 对于偏移型 SSW, 6 种模式在绝大多数月份下模拟出的 SSW 振幅都比较真实, 这是因为模式结果的误差棒的大部分区域都位于 ERA5 误差范围内, 说明模式产出的结果与 ERA5 产出的结果的分布特征较为一致。尤其是 2 月份, 除了分布特征的一致性, 还可以看到两者在具体数值上也是极为接近, 振幅相差都不超过 5 K。不过值得注意的是, 虽然 CESM2-WACCM 模式在模拟偏移型 SSW 的发生频率时效果较好, 但在模拟振幅时却较为不理想, 模拟出的振幅整体上低于参考值, 误差棒总是位于 ERA5 误差范围之外。此外, EC-Earth3 模拟出的 3 月

份偏移型 SSW 的振幅为负值, 这与真实结果相差较大。而对于分裂型 SSW, 虽然 6 种模式都很难模拟出其合理的发生频率, 但对于被成功模拟出来的少许分裂型 SSW, 其振幅的模拟效果整体较为良好, 其中 12 月与 2 月份的模拟效果最好, 模式结果下的误差棒完全位于 ERA5 结果的误差范围内, 说明二者的分布特征较为一致, 且具体数值相差不大, 但是, 对于发生在 1 月和 3 月的分裂型 SSW, 其振幅的模拟效果相对不佳。因此, 总体来看, 虽然 6 种模式在发生频率的模拟上存在较大问题, 但对 SSW 振幅的模拟整体效果较好, 即使是对很难模拟出的分裂型 SSW, 对其振幅的产出效果依然合理, 不过, 考虑到 6 种模式模拟出的分裂型 SSW 事件过少, 因此, 在样本相对不足的情况下, 统计结果的可信性也相对较低。

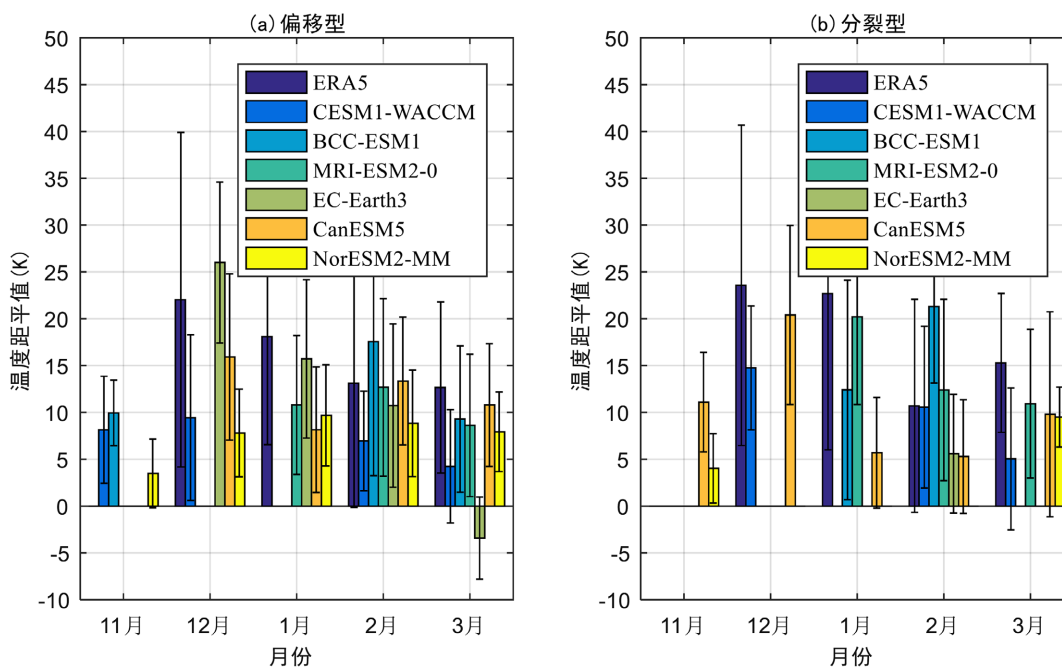


Figure 7. Monthly distribution of (a) Offset-type and (b) Split-type SSW amplitudes for CMIP6 models
图 7. CMIP6 模式数据下(a)偏移型和(b)分裂型 SSW 事件振幅的月分布图

5. 结论

SSW 事件是平流层动力学范畴下最基本的现象之一。本文基于二维涡矩法, 从频率、月变化和整幅这三方面对两类 SSW 事件(偏移型和分裂型)进行了分析, 以 ERA5 再分析数据结果为参考, 评估了 6 种 CMIP6 模式对上述三方面的模拟效果。主要结论如下。

根据 ERA5 数据的结果, 极涡偏移过程与形变过程的开始时间往往早于 SSW 的爆发时间。两种过程的持续周期都为 20 天左右, 但分裂型 SSW 的分裂过程往往发生得更快, 持续时间更久(11 天), 而偏移型 SSW 的偏移过程相对较慢, 持续时间也相对较短(9 天)。SSW 事件的发生频率大约为 5.6 次/10 年, 其中, 偏移型与分裂性 SSW 的频率都为 2.8 次/10 年。6 种模式都能较好地模拟出偏移型 SSW 的发生频率(2~3 次/10 年), 但对分裂型 SSW 的模拟效果却极为不理想, 除 MRI-ESM2-0 模式能模拟出接近 2 次/10 年的频率外, 其它 5 种模式模拟出的频率甚至不到参考值的一半。

对于 SSW 事件的月分布特征, SSW 事件主要发生在 1~3 月, 都为 1.7 次/10 年, 而 12 月发生的频率较低, 11 月则一般不会发生。其中, 偏移型 SSW 主要发生于 1 月和 3 月, 而分裂型 SSW 则主要发生于 1 月和 2 月。整体来说, 6 种模式模拟出的两类 SSW 的发生月份要明显偏向于晚冬(2 月和 3 月), 而远远低估了 1 月份的发生频率, 此外, 各模式对偏移型 SSW 月分布特征的模拟效果要好于分裂型 SSW,

CESM2-WACCM 与 BCC-ESM1 模式可以较为准确地捕捉到偏移型事件 3 月发生多而 2 月发生少的特点, 但对于分裂型 SSW, 所有模式都未能成功捕捉到其特征。

对于 SSW 事件的振幅特征, 在参考值下, 分裂型 SSW 的振幅要明显高于偏移型, 此外, 12 月和 1 月发生的 SSW 往往具有较大的振幅, 而 2 月和 3 月发生的 SSW 往往振幅较小。6 种模式对 SSW 振幅的模拟效果整体较好, 大部分模式的误差棒都在参考值误差范围内, 只有少部分模式(如 EC-Earth3)模拟效果极为不佳, 甚至没能模拟出平流层增温这一特征。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(202010621008), 成都信息工程大学科研项目(KYTZ201812)。

参考文献

- [1] Charlton, A.J. and Polvani, L.M. (2007) A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part I: Climatology and Modeling Benchmarks. *Journal of Climate*, **20**, 449-469. <https://doi.org/10.1175/JCLI3996.1>
- [2] Manney, G.L., Krnney, G., Sabutis, J.L., Sena, S.A. and Pawson, S. (2005) The Remarkable 2003-2004 Winter and Other Recent Warm Winters in the Arctic Stratosphere since the Late 1990s. *Journal of Geophysical Research*, **110**, 583-595. <https://doi.org/10.1029/2004JD005367>
- [3] Andrews, D.G., Holton, J.R. and Leovy, C.B. (1987) Middle Atmospheric Dynamics. Academic Press, Cambridge.
- [4] Baldwin, M.P. and Dunkerton T.J. (2001) Stratospheric Harbingers of Anomalous Weather Regimes. *Science*, **294**, 581-584. <https://doi.org/10.1126/science.1063315>
- [5] Matsuno, T. (1971) A Dynamical Model of the Stratospheric Sudden Warming. *Journal of Atmospheric Science*, **28**, 1479-1494. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2)
- [6] Limpasuvan, V., Thompson, D.W.J. and Hartmann, D.L. (2004) The Life Cycle of the Northern Hemisphere Sudden Stratospheric Warmings. *Journal of Climate*, **17**, 2584-2596. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2584:TLCOTN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2584:TLCOTN>2.0.CO;2)
- [7] Screen, J.A., Deser, C., Smith, D.M., *et al.* (2018) Consistency and Discrepancy in the Atmospheric Response to Arctic Sea-Ice Loss across Climate Models. *Nature Geoscience*, **11**, 155-163. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0059-y>
- [8] Rao, J. and Ren, R. (2018) Varying Stratospheric Responses to Tropical Atlantic SST Forcing from Early to Late Winter. *Climate Dynamic*, **51**, 2079-2096. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3998-x>
- [9] Naito, Y., Taguchi, M. and Yoden, S. (2003) A Parameter Sweep Experiment on the Effects of the Equatorial QBO on Stratospheric Sudden Warming Events. *Journal of Atmospheric Science*, **60**, 1380-1394. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<1380:APSEOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<1380:APSEOT>2.0.CO;2)
- [10] Taguchi, M. and Hartmann, D.L. (2006) Increased Occurrence of Stratospheric Sudden Warmings during El Niño as Simulated by WACCM. *Journal of Climate*, **19**, 324-332. <https://doi.org/10.1175/JCLI3655.1>
- [11] Rao, J. and Ren, R. (2017) Parallel Comparison of the 1982/83, 1997/98 and 2015/16 Super El Niños and Their Effects on the Extratropical Stratosphere. *Advances in Atmospheric Sciences*, **34**, 1121-1133. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6260-x>
- [12] Rao, J., Ren, R.C. and Yang, Y. (2015) Parallel Comparison of the Northern Winter Stratospheric Circulation in Reanalysis and in CMIP5 Models. *Advances in Atmospheric Sciences*, **32**, 952-966. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-4192-2>
- [13] Charlton-Perez, A.J. (2013) On the Lack of Stratospheric Dynamical Variability in Low-Top Versions of the CMIP5 Models. *Journal of Geophysical Research*, **118**, 2494-2505. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50125>
- [14] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456.
- [15] Liu, S.M., Chen, Y.H., Rao, J., Cao, C., Li, S.Y., Ma, M.H. and Wang, Y.B. (2019) Parallel Comparison of Major Sudden Stratospheric Warming Events in CESM1-WACCM and CESM2-WACCM. *Atmosphere*, **10**, 679. <https://doi.org/10.3390/atmos10110679>
- [16] Rao, J., Ren, R.C., Chen, H.S., Liu, X.W., Yu, Y.Y. and Yang, Y. (2019) Sub-Seasonal to Seasonal Hindcasts of Stratospheric Sudden Warming by BCC_CSM1.1(m): A Comparison with ECMWF. *Advances in Atmospheric Sciences*, **36**, 479-494. <https://doi.org/10.1007/s00376-018-8165-8>
- [17] Rao, J., Liu, S.M. and Chen, Y.H. (2021) Northern Hemisphere Sudden Stratospheric Warming and Its Downward

Impact in Four Chinese CMIP6 Models. *Advances in Atmospheric Sciences*, **38**, 187-202.

<https://doi.org/10.1007/s00376-020-0250-0>

- [18] Thiéblemont, R., Ayarzagüena, B., Matthes, K., Bekki, S., Abalichin, J. and Langematz, U. (2019) Drivers and Surface Signal of Interannual Variability of Boreal Stratospheric Final Warmings. *Journal of Geophysical Research*, **124**, 5400-5417. <https://doi.org/10.1029/2018JD029852>
- [19] Seviour, W.J.M., Mitchell, D.M. and Gray, L.J. (2013) A Practical Method to Identify Displaced and Split Stratospheric Polar Vortex Events. *Geophysical Research Letters*, **40**, 5268-5273. <https://doi.org/10.1002/grl.50927>
- [20] Matthewman, N.J., Esler, J.G., Charlton-Perez, A.J. and Polvani, L.M. (2009) A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part 3: Polar Vortex Evolution and Vertical Structure. *Journal of Climate*, **22**, 1566-1585. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2365.1>