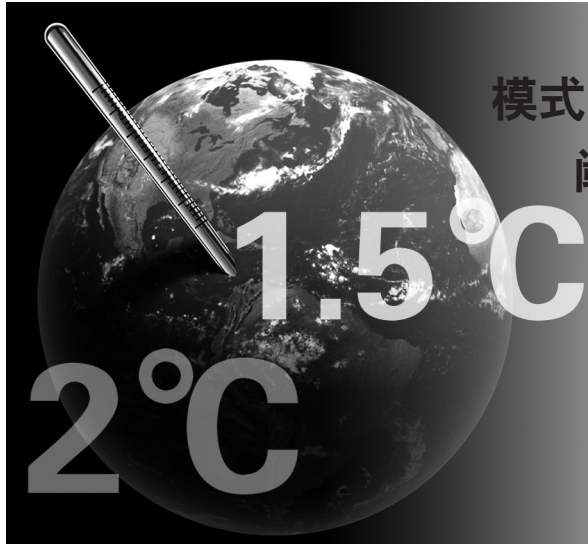


DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2018.157

季涤非, 刘利, 李立娟, 等. 模式内部变率引起的 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值出现时间模拟的不确定性研究 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (4): 343-351

Ji D F, Liu L, Li L J, *et al.* Uncertainties in the simulation of 1.5 °C and 2 °C warming threshold-crossing time arising from model internal variability based on CMIP5 models [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (4): 343-351

模式内部变率引起的 1.5 °C 和 2 °C 升温 阈值出现时间模拟的不确定性研究

季涤非¹, 刘利¹, 李立娟², 孙超¹,
于馨竹¹, 李锐喆¹, 张诚¹, 王斌^{1,2}1 清华大学地球系统科学系, 北京 100084;
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

摘要: 模式内部变率是模拟结果不确定性的重要来源, 然而它对于 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值出现时间不确定性的影响尚不清楚。因此, 基于耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 的多模式数据研究了模式内部变率对 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值出现时间不确定性的影响以及对未来排放情景的敏感性。结果表明, 模式内部变率对升温阈值出现时间模拟的影响与外强迫的影响相当, 单个模式内部不同成员达到全球平均 1.5 °C 或 2 °C 增温的年份相差 2 ~ 12 年, 其影响具有明显的空间差异, 影响极大值出现在欧亚大陆以北洋面、白令海峡周围区域、北美东北部及其与格陵兰岛之间的海域、南半球高纬地区等; 低排放情景下模式内部变率的影响大于高排放情景。

关键词: CMIP5; 1.5 °C 和 2 °C 升温; 出现时间; 模式内部变率

引言

自 20 世纪以来, 以变暖为主要特征的气候变化^[1]正严重影响着全球生态系统和人类的生产生活环境。为了避免气候变化带来的严峻风险, 国际社会希望达成一个明确的全球平均地表温度上升控制目标, 其中讨论最为广泛的是将相对于工业革命前的全球平均增温控制在 2 °C 以内, 而这一温升控制目标最初由欧盟于 1996 年提出, 其后被 2009 年的《联合国气候变化框架公约》第 15 次缔约方会议所采纳^[2-3]。2015 年在巴黎气候变化大会上通过

的《巴黎协定》进一步提出将相对于工业化前的全球平均地表温度升高控制在 1.5 °C 以内。

近年来, 对于升温阈值这一焦点问题, 很多学者基于不同排放情景、采用不同耦合模式完成了一系列气候预估试验, 并取得了一系列研究进展^[4-7]。然而由于气候系统本身的复杂性和当前模式发展的局限性, 未来气候变化预估还存在较大不确定性。未来气候变化预估的不确定性主要来源于外强迫的不确定性、模式的不确定性和内部变率等^[8]。外部强迫的不确定性主要指人类活动引起的温室气体未来排放路径和土地利用等的不确定性。模式的不确

收稿日期: 2018-11-09; 修回日期: 2019-01-03

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1501903)

作者简介: 季涤非, 女, 硕士研究生; 刘利 (通信作者), 男, 副教授, liuli-cess@mail.tsinghua.edu.cn

定性来自模式自身结构,如动力框架、物理参数化过程和初始条件。内部变率是指在外部强迫变化情况下气候系统内部的自然演变过程,是由气候系统自身的特性决定的^[9-10]。外强迫和模式的不确定性对于升温阈值模拟的影响已经得到了广泛的关注和研究,而内部变率的影响却未得到足够的重视和研究。

一系列研究工作表明内部变率对其他不同气候指标都有非常重要的影响。例如, Wittenberg^[11]基于美国地球物理流体动力学实验室(GFDL)的气候系统模式(CM2.1)开展了2220年的工业革命前参照试验(PI-control试验,采用给定的1860年太阳辐射、地表覆盖和大气成分等),并分析了后2000年Niño3区(150°~90°W, 5°S~5°N)的海表温度时间序列,发现在不同模拟时间段厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)的振幅会出现明显差异,而这一差异正是体现了内部变率的影响。除了利用单次长时间PI-control试验识别模式内部变率外,更为常用的识别方法是比较单个模式不同初值集成员模拟结果之间的差异^[9,12-19]。例如Deser等^[9]利用CCSM3多样本和CMIP3多模式数据发现对于欧亚大陆(尤其是欧洲和中西伯利亚)、北美西部和南极洲等地2005—2060年地表温度年平均趋势的模拟,内部变率引起的不确定性甚至超过了不同模式间模拟结果的差异。Hawkins等^[20]基于CMIP3多模式发现内部变率是2010年之前全球平均气温年代际变化预测不确定性的最主要来源。除温度外,内部变率对全球/区域季节平均降水的年代际预测也有重要的影响^[8];并且内部变率在区域尺度上的影响更加明显^[13]。

然而,作为气候模拟不确定性的重要来源,内部变率对升温阈值模拟的影响尚未引起足够重视。已有的研究工作主要集中在外强迫和模式不确定性对升温阈值模拟的影响。例如,张莉等^[21]评估了耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)模式对21世纪全球和中国年平均地表温度变化和2℃升温的模拟情况,认为在长期气候预估中,排放情景设计的不确定性

大于模式本身的不确定性,而在同一种排放情景下,模式增温模拟结果的差异可能是因为不同模式对温室气体辐射强迫的敏感度不同。敏感度是指全球平均地表温度对相对于工业化前水平CO₂浓度加倍的平衡响应,而敏感度不同其实就是模式的不确定性的显示。因此本文将着重探讨内部变率引起的达到1.5℃和2℃升温阈值时间的不确定性,并分析其在全球及不同区域的不确定性是否相同,最后还探讨了内部变率引起的不确定性对排放情景的敏感性。

1 数据和方法

1.1 数据

本研究使用来自于CMIP5多模式的历史试验和21世纪气候预估试验的逐月地表气温数据。历史试验的积分时间为1850年1月—2005年12月,其中MIROC5模式积分到2012年12月。21世纪气候预估试验共有4种不同排放情景,分别为RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5,积分时间是2006年1月—2100年12月。同一模式各试验集成员仅在初始场上有区别^①,而外强迫场等条件相同,因此集成员结果之间的差异可在一定程度上刻画模式内部变率引起的不确定性。本研究选取历史试验和未来排放情景试验中集成员数不低于3的7个模式(表1)。这里需要特别说明的是,由于

表1 所用模式和成员数目

Table 1 Model descriptions and simulation members

模式名称	历史试验	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
CanESM2	5	5	5	0	5
CCSM4	6	6	6	6	6
CSIRO-Mk3-6-0	10	10	10	10	10
FIO-ESM	3	3	3	3	3
IPSL-CM5A-LR	6	4	4	0	4
MIROC5	5	3	3	3	3
MPI-ESM-LR	3	3	3	0	3

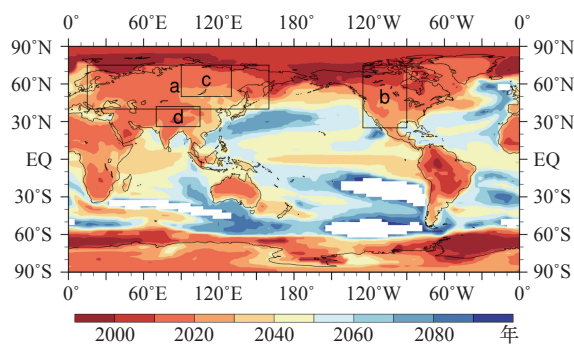
① <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>.

本文所采用的 CMIP5 提供数据的限制 (每个模式可提供的成员数量较少), 内部变率的影响可能会有所低估。同时为了保持一致性, 每个模式输出数据都用双线性插值方法插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬网格。

1.2 方法

因为国际上广泛讨论的升温阈值是相对于工业革命前, 这里选取 1850—1900 年全球平均地表温度作为增温的基准值^[1]。考虑到气温变化序列具有明显的年际变化, 因此对其作了 9 a 滑动平均, 并将地表增温超过 1.5 °C (2 °C) 的第一年定义为 1.5 °C (2 °C) 增温的出现时间^[22-24]。在考察单个模式内部的增温时间模拟受内部变率的影响时, 计算了该模式所有成员 1.5 °C (2 °C) 升温阈值出现年份的标准差, 标准差越大表示内部变率引起的不确定性越大。

除全球平均外, 本文还在区域尺度上考察了地表温度相对于 1850—1900 年的升温时间, 特别是考察了未来地表温度变化预估对内部变率比较敏感的北极、南极、欧亚大陆北部、北美西部、中西伯利亚等区域^[9-10,13], 以及青藏高原 (图 1), 各区域具体范围见表 2。



注: 白色区域表示到 2100 年模式仍未达到 2 °C 增温;
a: 欧亚大陆北部, b: 北美西部, c: 中西伯利亚, d: 青藏高原。

图 1 CanESM2 模式 (所有成员的平均值) 在 RCP4.5 排放情景下 2 °C 增温出现时间的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of 2 °C warming threshold-crossing time under RCP4.5 for CanESM2 (the average of all members.

a: northern Eurasia, b: western North America, c: Central Siberia, d: Tibet plateau)

表 2 区域名称及范围

Table 2 Regions and their scopes

区域名称	范围
全球	90°S ~ 90°N
北极	60° ~ 90°N
南极	60° ~ 90°S
欧亚大陆北部	40° ~ 75°N, 15° ~ 160°E
北美西部	25° ~ 75°N, 90° ~ 125°W
中西伯利亚	50° ~ 75°N, 90° ~ 130°E
青藏高原	26° ~ 42°N, 70° ~ 105°E

2 内部变率对达到 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值时间模拟不确定性的影响

表 3 给出 RCP4.5 情景下单个模式所有成员在全球及不同区域最早、最晚达到 1.5 °C 增温的年份以及标准差。标准差的大小表征了内部变率引起的不确定性对单个模式预测增温年份的影响。从表中可以看出, 标准差的数值普遍比较大, 部分模式在某些地区的标准差 >10, 这表明同一模式不同成员的预测增温年份之间有数年到数十年的跨度。从全球尺度来看, 大部分模式内部不同成员之间达到 1.5 °C 增温的年份相差 10 年以内。其中 CSIRO-Mk3-6-0 模式的不确定性稍大一些, 在该模式所有成员中, 最早在 2030 年达到 1.5 °C 增温, 最晚在 2042 年。从区域尺度来看, 单个模式内部所有成员在 6 个区域达到 1.5 °C 增温年份的标准差普遍都大于全球, 其中南极和中西伯利亚高原的不确定性较大。有 3 个模式南极区域的标准差 >10, 其中 MIROC5 模式的标准差最大 (22.19)。在南极 MIROC5 模式所有成员中最早在 2057 年就达到了 1.5 °C 增温, 但是也有成员在 21 世纪末增温都未达到 1.5 °C。MPI-ESM-LR 模式所有成员的南极区域 1.5 °C 增温最早和最晚出现时间分别是 2027 年和 2061 年, 相差 34 年。

表 4 是在 RCP4.5 情景下单个模式所有成员在全球及不同区域最早、最晚达到 2 °C 增温的年份以及标准差, 与表 3 的总体特征类似, 内部变率引起

表 3 RCP4.5 情景下单个模式所有成员在不同区域最早、最晚达到 1.5 °C 增温的年份以及标准差
Table 3 The earliest and latest year to reach 1.5 °C warming and standard deviation of all members for each model under RCP4.5 in different regions

模式名称	全球		北极		南极		欧亚大陆		北美西部		中西伯利亚		青藏高原	
	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚
CanESM2	1.00	2016 2018	6.31	1998 2010	6.31	1998 2010	1.10	2010 2012	0.00	2010 2010	0.89	2010 2012	4.02	2001 2010
CCSM4	2.42	2014 2020	3.06	1975 1984	6.02	1996 2010	4.13	1989 2000	1.83	1997 2001	6.03	1982 1998	4.80	1982 1998
CSIRO-Mk3-6-0	3.07	2030 2042	6.06	1998 2020	4.54	2010 2025	6.46	2011 2030	3.18	2020 2032	6.62	2012 2033	3.77	2013 2024
FIO-ESM	3.61	2028 2035	3.79	1984 1991	3.79	2013 2020	11.85	1997 2018	7.57	1999 2013	9.87	1992 2010	8.89	1997 2014
IPSL-CM5A-LR	2.63	2010 2015	7.79	1982 1998	16.98	2010 2046	5.74	1998 2010	1.29	1997 2000	9.83	1988 2010	4.11	1987 1997
MIROC5	3.21	2034 2040	2.52	1996 2001	22.19	2057 N	4.62	2010 2018	1.15	2011 2013	2.31	2010 2014	4.93	2015 2024
MPI-ESM-LR	2.08	2021 2025	4.93	1977 1986	17.09	2027 2061	9.29	1981 1998	6.24	1998 2010	18.68	1961 1998	6.35	1999 2010

注：“N”表示在 2100 年以前没有达到 1.5 °C 增温。

表 4 RCP4.5 情景下单个模式所有成员在不同区域最早、最晚达到 2 °C 增温的年份以及标准差
Table 4 The earliest and latest year to reach 2 °C warming and standard deviation of all members for each model under RCP4.5 in different regions

模式名称	全球		北极		南极		欧亚大陆		北美西部		中西伯利亚		青藏高原	
	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚	标准差	最早 最晚
CanESM2	2.45	2016 2018	1.34	2010 2013	2.61	2019 2026	1.92	2013 2018	2.35	2014 2020	2.07	2012 2017	5.81	2010 2023
CCSM4	2.42	2014 2020	4.55	1988 2000	1.63	2013 2017	4.81	2001 2016	3.72	2010 2018	7.70	1990 2010	5.27	2014 2030
CSIRO-Mk3-6-0	3.22	2046 2056	7.10	2010 2034	4.34	2025 2039	4.88	2028 2045	2.54	2031 2039	5.21	2029 2045	3.27	2029 2041
FIO-ESM	N	N	15.18	2001 2031	1.00	2030 2032	13.32	2017 2043	11.72	2014 2036	12.50	1998 2023	6.08	2024 2035
IPSL-CM5A-LR	1.73	2029 2033	10.50	1989 2010	11.00	2052 2075	2.00	2010 2014	4.79	2011 2022	1.00	2010 2012	3.50	2010 2017
MIROC5	3.21	2062 2068	5.20	2001 2010	N	N	4.04	2023 2031	1.00	2022 2024	13.00	2011 2034	3.21	2030 2036
MPI-ESM-LR	3.61	2039 2046	7.57	1986 2000	5.20	2092 N	13.86	1986 2010	2.31	2010 2014	14.05	1982 2010	7.23	2011 2024

注：“N”表示在 2100 年以前没有达到 2 °C 增温。

的区域尺度达到 2 °C 增温年份的不确定性普遍大于全球平均, 其中北极和中西伯利亚高原的不确定性较大。综合模式预估 1.5 °C 和 2 °C 增温的情况来看, 内部变率引起的区域尺度达到升温阈值时间的不确定性普遍大于全球平均, 其中极地和中西伯利亚高原增温出现时间的不确定性较大。单个模式不同成员达到全球平均 1.5 °C 或 2 °C 增温的时间最大相差 10 年左右, 虽然小于不同模式之间的差异, 但是和已有研究中不同排放情景下的差异相当^[21,23-24], 例如, Jiang 等^[23]基于 CMIP5 的 39 个模式数据得出在 RCP4.5 情景下不同模式最早出现全球平均 2 °C 增温的时间是 2017 年, 有 5 个模式在该情景下的全球平均增温并未达到 2 °C; RCP4.5 和 RCP8.5 情景下达到全球平均 2 °C 增温的时间分别是 2054 年和 2042 年。周梦子等^[24]利用 CMIP5 的 27 个模式研究表明在 RCP4.5 情景下 90% 信度区间内, 不同模式最早达到全球平均 1.5 °C 增温的时间是 2012 年, 最晚是 2041 年; 在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下基于多模式集合平均结果的全球平均 1.5 °C 增温出现时间分别是 2029、2028 和 2025 年, RCP4.5 和 RCP8.5 情景下达到全球平均 2 °C 增温的时间则分别是 2048 和 2040 年。此外, 由于 CMIP5 数据提供的每个模式的模拟样本数量较少, 内部变率的影响很可能会被低估, 如果能获取更多的模拟成员, 单个模式内部不同成员 1.5 °C 或 2 °C 增温出现时间的差异可能还会进一步扩大。

3 内部变率对达到 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值时间不确定性影响的空间分布

内部变率引起的 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值出现时间的不确定性在某些区域尺度上远大于全球平均的影响, 为进一步考察其影响的空间分布, 图 2 给出了 7 个模式所有成员在 RCP4.5 排放情景下达到 1.5 °C 增温年份的标准差的空间分布。CanESM2 模式所有成员达到 1.5 °C 增温年份的标准差的大值区分布在南北半球高纬, 主要是北极和南极。CCSM4 模式的大值区域分布在北半球高纬的白令海峡周围海域, 北极圈附近的巴伦支海、挪威

海、格陵兰海以及南半球环南极大陆周边海域。CSIRO-Mk3-6-0 模式的标准差大值区域在南北半球都明显扩大了一些, 在北半球有 3 个大值区, 比 CCSM4 模式增加了北美东北与格陵兰岛之间海域的大值区域, 在南半球高纬则呈带状分布。FIO-ESM 模式的大值区域主要分布在北半球阿拉斯加及其周围海域和南极玛丽伯德地沿海。IPSL-CM5A-LR 模式在北半球的标准差数值比其他模式都要小一些。MIROC5 和 MPI-ESM-LR 模式的大值区也分布在北半球中高纬和南半球高纬地区, 此外, 这两个模式的南半球中纬海洋在 RCP4.5 排放情景下没有达到 1.5 °C 增温。总体来看, 这 7 个模式所有成员达到 1.5 °C 增温年份的标准差的空间分布模态比较接近, 单个模式内部成员之间的不确定性呈现极向增大的趋势, 大值区主要出现在北半球欧亚大陆北部洋面、北冰洋与太平洋交界区域、北美东北部及其与格陵兰岛之间的海域, 以及南半球高纬。这一空间分布形态与模式引起的不确定性的结果相近, Wang 等^[25]使用 CMIP5 的 39 个模式数据分析 4 °C 增温的全球空间分布时发现模式之间的不确定性也主要出现在北半球高纬海洋和南极海岸附近。

7 个模式在 RCP4.5 排放情景下达到 2 °C 增温年份的标准差的空间分布模态与 1.5 °C 增温的情况相近, 大值分布在南、北半球高纬, 但是标准差的数值减小, 内部变率引起的不确定性小于 1.5 °C 增温的情况。Zhao 等^[26]基于 CMIP5 模式发现 2006—2100 年地表温度年代际趋势模式之间不确定性最大的区域也是在北极、南极和其他北半球高纬度地区。

4 内部变率引起的不确定性对排放情景的敏感性

为更全面考察内部变率引起的不确定性对排放情景的敏感性, 表 5 给出了 CMIP5 中 7 个模式内部所有成员在 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下全球平均地表温度达到 1.5 °C 增温年份的标准差和极差, 除了 CCSM4、IPSL-CM5A-LR

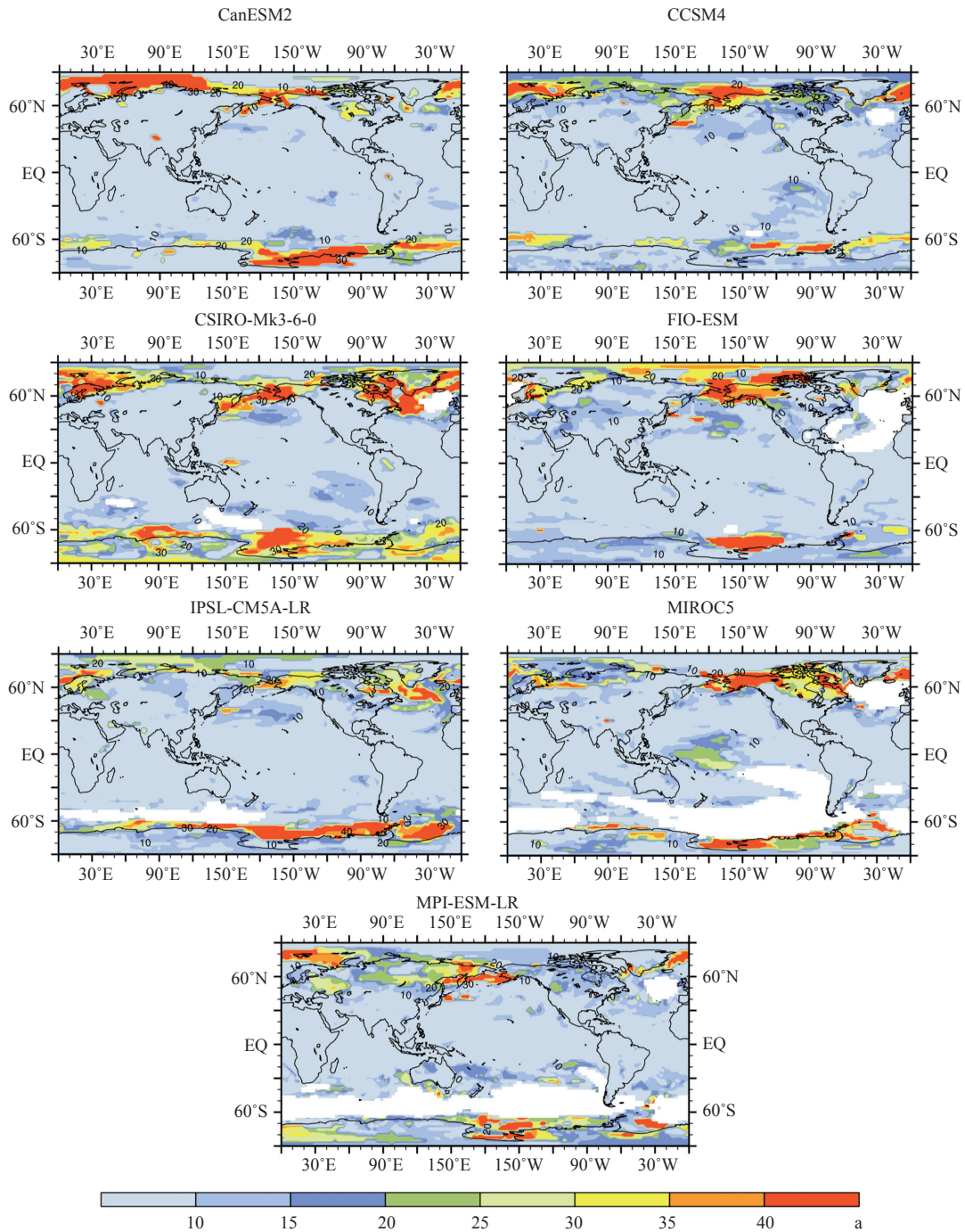


图 2 CMIP5 的 7 个模式所有成员在 RCP4.5 排放情景下达到 1.5℃ 增温年份的标准差的空间分布
 Fig. 2 The spatial distribution for the standard deviation of 1.5℃ warming threshold-crossing time among all members for each model under RCP4.5

和 MIROC5 模式，其余模式的最大标准差都出现在 RCP2.6 情景下。CSIRO-Mk3-6-0 模式的极差，即最晚和最早达到 1.5℃ 增温年份之差，在 4 个排

放情景下都是 12 年，但是 RCP2.6 情景下的标准差最大。另外，在 RCP6.0 情景下有数据的 4 个模式的标准差和极差都比 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下

表 5 模式所有成员在 4 个排放情景下达到全球 1.5 °C 增温年份的标准差和极差

Table 5 Standard deviation and range of 1.5 °C global warming threshold-crossing time among all members for each model under four emission scenarios

模式名称	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
CanESM2	1.87/4	1.00/2		1.00/2
CCSM4	3.08/9	2.42/6	3.15/9	1.37/4
CSIRO-Mk3-6-0	4.10/12	3.07/12	3.75/12	3.53/12
FIO-ESM	32.91/57	3.61/7	7.57/14	2.31/4
IPSL-CM5A-LR	1.63/4	2.63/5		2.83/6
MIROC5	1.53/2	3.21/6	5.86/11	2.31/4
MPI-ESM-LR	3.21/6	2.08/4		2.08/4

注: 值的含义为标准差 / 极差, 空白表示没有数据, 下同。

大。在 2 °C 增温时间的模拟结果中 (表 6), 除了 4 个模式在 RCP2.6 情景下未出现 2 °C 增温, CSIRO-Mk3-6-0 和 IPSL-CM5A-LR 模式的极大标准差和极差都出现在 RCP2.6 情景下, 且随着排放情景增强而减小; CanESM2 模式在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下的标准差和极差大于 RCP8.5 情景。这一现象类似于模式不确定性对升温阈值出现时间模拟的影响, 如 Chen 等^[22] 基于 CMIP5 模式分析了 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下中国出现 2 °C 增温的

表 6 模式所有成员在 4 个排放情景下达到全球 2 °C 增温年份的标准差和极差

Table 6 Standard deviation and range of 2 °C global warming threshold-crossing time among all members for each model under four emission scenarios

模式名称	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
CanESM2	2.41/6	2.45/6		0.89/2
CCSM4	N	2.42/7	4.45/11	2.42/7
CSIRO-Mk3-6-0	9.34/29	3.22/10	2.17/6	1.99/7
FIO-ESM	N	N	5.29/10	1.00/2
IPSL-CM5A-LR	3.11/7	1.73/4		1.41/3
MIROC5	N	3.21/6	2.08/5	2.08/4
MPI-ESM-LR	N	3.61/7		1.73/3

注: “N” 表示在 2100 年以前没有达到 2 °C 增温。

时间, 发现在 RCP4.5 情景下的模式不确定性大于 RCP8.5 情景。

5 结论和讨论

为定量研究内部变率对升温阈值出现时间的影响, 本文选取历史试验和未来排放情景试验的集合成员不低于 3 的 7 个 CMIP5 模式, 分析内部变率引起的 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值相关模拟的不确定性, 主要结论如下。

(1) 内部变率对 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值出现时间的影响不可忽略, 与外强迫的影响相当。单个模式内部不同成员达到全球平均 1.5 °C 或 2 °C 增温的年份最大相差 10 年左右。内部变率引起的区域尺度达到 1.5 °C 或 2.0 °C 增温年份的不确定性普遍大于全球平均, 其中极地和中西伯利亚高原的不确定性最大。

(2) CanESM2、CCSM4、CSIRO-Mk3-6-0、FIO-ESM、IPSL-CM5A-LR、MIROC5 和 MPI-ESM-LR 7 个模式由内部变率引起的达到 1.5 °C 或 2 °C 升温阈值时间不确定性的空间分布相似, 大值分布在北半球欧亚大陆以北洋面、北冰洋与太平洋交界区域、北美东北部及其与格陵兰岛之间的海域, 以及南极海岸附近。

(3) 内部变率引起的不确定性与排放情景强度密切相关, 7 个模式达到 1.5 °C 和 2 °C 升温时间的最大标准差和极差大多出现在 RCP2.6 情景下, 而最小标准差和极差几乎都出现在 RCP8.5 情景下。这表明排放越少, 内部变率引起的不确定性越大, 因此在设计不同排放情景试验时要更多地考虑到内部变率引起的不确定性。

内部变率对 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值出现时间模拟影响比较大的区域主要集中在南北两极和北半球高纬地区, 与 Dai 等^[10] 利用 CESM1 和 CanESM2 模式的两个大型模拟集合研究内部变率对地表温度年代际趋势影响的空间分布一致, 可能与海冰模拟的变化有关, 而海冰模拟的不确定性可以通过海气耦合过程的通量交换影响大气模拟。此外, 从内部变率引起的不确定性的全球空间分布可以看出,

内部变率引起的达到 2 °C 增温年份的不确定性小于 1.5 °C 增温的情况, 这可能是由于达到 1.5 °C 增温的模拟时间早于 2 °C 增温, 而内部变率在模拟前期的影响更大, 因为随着时间增长, 外强迫对模拟不确定性的贡献占比增加。Hawkins 等^[20] 基于 CMIP3 数据分析发现虽然内部变率的振幅保持不变, 但是内部变率对 21 世纪全球年代际平均地表温度预估不确定性影响的贡献比例在 3 种不确定性来源 (外强迫、模式、内部变率) 中随着时间增加而减小, 而外强迫的贡献比例随时间增加而增大。针对在 RCP2.6 情景下, 内部变率引起的达到 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值年份不确定性最大, 即排放越少的情景不确定性越大的情况, 是否与外强迫的强度等因素有关还需要进一步探讨。Chen 等^[22] 对比了 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下中国 2 °C 增温模拟的不确定性, 结果差异并不大, 不确定性的主要来源是达到 2 °C 增温时的增温速率, 而中等排放情景 RCP4.5 下的增温速率明显小于高等排放情景 RCP8.5。最后需要指出的是, 由于 CMIP5 提供模拟成员数量的限制, 使得本文研究中内部变率的影响有可能会被低估, 未来会基于更大样本量的试验, 例如美国国家大气研究中心 (NCAR) 的大型模拟集合 (CESM LENS)^[27] 和即将发布的 CMIP6 数据, 进一步研究内部变率的影响。■

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [2] UNFCCC. Communications received from parties in relation to the listing in the chapeau of the Copenhagen Accord [EB/OL]. 2010 [2012-07-05]. http://unfccc.int/meetings/cop_accord/items/5276.php
- [3] Randalls S. History of the 2 °C climate target [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 2010, 1 (4): 598-605
- [4] Arora V K, Scinocca J F, Boer G J, *et al.* Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38 (5): 387-404
- [5] Baek H J, Lee J, Lee H S, *et al.* Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways [J]. *Asia-pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 49 (5): 603-618
- [6] Meehl G A, Washington W M, Arblaster J M, *et al.* Climate change projections in CESM1 (CAM5) compared to CCSM4 [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26 (17): 6287-6308
- [7] Wang Z, Lin L, Zhang X, *et al.* Scenario dependence of future changes in climate extremes under 1.5 °C and 2 °C global warming [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 46432
- [8] Hawkins E, Sutton R. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37 (1-2): 407-418
- [9] Deser C, Phillips A, Bourdette V, *et al.* Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability [J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38 (3-4): 527-546
- [10] Dai A, Bloecker C E. Impacts of internal variability on temperature and precipitation trends in large ensemble simulations by two climate models [J]. *Climate Dynamics*, 2018 (365): 1-18
- [11] Wittenberg A T. Are historical records sufficient to constrain ENSO simulations? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36 (12): L12702
- [12] Deser C, Knutti R, Solomon S, *et al.* Communication of the role of natural variability in future North American climate [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2 (11): 775-779
- [13] Deser C, Phillips A S, Alexander M A, *et al.* Projecting North American climate over the next 50 years: uncertainty due to internal variability [J]. *Journal of Climate*, 2013, 27 (6): 2271-2296
- [14] Kang S M, Deser C, Polvani L M. Uncertainty in climate change projections of the hadley circulation: the role of internal variability [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26 (19): 7541-7554
- [15] Shepherd T G. Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7 (10): 703-708
- [16] Schindler A, Toreti A, Scoccimarro E, *et al.* On the internal variability of simulated daily precipitation [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28 (9): 3264-3630
- [17] Woldemeskel F M, Sharma A, Sivakumar B, *et al.* Quantification of precipitation and temperature uncertainties simulated by CMIP3 and CMIP5 models [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 121 (1): 3-17
- [18] Zheng X T, Hui C, Yeh S W. Response of ENSO amplitude to global warming in CESM large ensemble: uncertainty due to internal variability [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50: 1-17
- [19] Sun C, Liu L, Li L, *et al.* Uncertainties in simulated El Niño-Southern Oscillation arising from internal climate variability [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2018, 19: 805
- [20] Hawkins E, Sutton R. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90 (8): 333-337
- [21] 张莉, 丁一汇, 吴统文, 等. CMIP5 模式对 21 世纪全球和中国年平均地表气温变化和 2 °C 升温阈值的预估 [J]. *气象学报*, 2013, 71 (6): 1047-1060. Zhang L, Ding Y H, Wu T W, *et al.* The 21st century annual mean surface air temperature change and the 2 °C warming threshold over the globe and China as projected by the CMIP5 models [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 71 (6): 1047-1060 (in Chinese)
- [22] Chen X, Zhou T. Uncertainty in crossing time of 2 °C warming threshold

- over China [J]. *Science Bulletin*, 2016 (18): 1451-1459
- [23] Jiang D, Sui Y, Lang X. Timing and associated climate change of a 2 °C global warming [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36 (14): 4512-4522
- [24] 周梦子, 周广胜, 吕晓敏, 等. 基于 CMIP5 耦合气候模式的 1.5 °C 和 2 °C 升温阈值出现时间研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14 (3): 221-227. Zhou M Z, Zhou G S, Lyu X M, *et al.* CMIP5-based threshold-crossing times of 1.5 °C and 2 °C global warming above pre-industrial levels [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 14 (3): 221-227 (in Chinese)
- [25] Wang X, Jiang D, Lang X. Climate change of 4 °C global warming above pre-industrial levels [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35 (7): 757-770
- [26] Zhao L, Xu J, Powell A M, *et al.* Uncertainties of the global-to-regional temperature and precipitation simulations in CMIP5 models for past and future 100 years [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2015, 122 (1-2): 259-270
- [27] Kay J E, Deser C, Phillips A, *et al.* The Community Earth System Model (CESM) large ensemble project: a community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96 (8): 1333-1349

Uncertainties in the simulation of 1.5 °C and 2 °C warming threshold-crossing time arising from model internal variability based on CMIP5 models

JI Di-Fei¹, LIU Li¹, LI Li-Juan², SUN Chao¹, YU Xin-Zhu¹, LI Rui-Zhe¹,
ZHANG Cheng¹, WANG Bin^{1,2}

¹ Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

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, China

Abstract: Model internal variability has been recognized as an important source of uncertainties of climate simulation results. However, the impact of model internal variability on the uncertainties in the simulation of 1.5 °C and 2 °C warming threshold-crossing time has not been explored to date. In this paper, such impact and the corresponding sensitivity to different future emission scenarios are investigated based on the outputs of Coupled Model Intercomparison Project Phase5 (CMIP5) models. The results show that the effect of internal variability on uncertainties in the simulation of threshold-crossing time is equivalent to that of external forcing. The difference between the threshold-crossing time of model members reaching 1.5 °C or 2 °C global warming is 2–12 years. The influence of internal variability has a clear spatial distribution. Maximum uncertainties are observed at the ocean northern of Eurasia, the area around the Bering Strait, the northeastern North America and the ocean between it and Greenland, and the high latitudes in the Southern Hemisphere. Model internal variability causes greater uncertainties in the low emission scenario than the high emission scenario.

Keywords: Coupled Model Intercomparison Project Phase5 (CMIP5); 1.5 °C and 2 °C warming; Threshold-crossing time; Model internal variability