

# “双碳”目标下气候变化风险的预估： 从全球到区域

程方圆<sup>1</sup>, 左志燕<sup>1,2,3\*</sup>, 乔梁<sup>1</sup>, 张楷文<sup>1</sup>, 常美玉<sup>1</sup>

1. 复旦大学大气与海洋科学系, 大气科学研究院, 上海 200438
2. 上海市海洋-大气相互作用前沿科学研究基地, 上海 200438
3. 上海长江河口湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 上海 202183

**摘要** 借助国际耦合模式比较计划第6阶段(CMIP6)模式模拟结果, 基于信噪比(SNR)方法系统评估了“双碳”目标下和更高排放情景下气候变化风险的差异。根据不同的SNR阈值, 将气候变化风险量化为“不寻常”(SNR $\geq$ 1)、“不熟悉”(SNR $\geq$ 2)和“不可知”(SNR $\geq$ 3)3种程度。从全球角度来说, 在近期未来, 各排放情景下CO<sub>2</sub>排放差异较小, 因此“双碳”目标下将与更高排放情景几乎同时面临“不寻常”程度的气候变化风险; 而在由CO<sub>2</sub>排放主导气温变化的中期和远期未来, “双碳”政策将使“不熟悉”或“不可知”程度的气候变化风险比更高排放情景晚数十年到来甚至不会到来, 并且使暴露在“不熟悉”或“不可知”程度的气候变化风险下的地表面积比例相较更高排放情景降低30%~60%。区域上, “双碳”目标下, 由于近期未来与更高排放情景下气溶胶(AA)排放区域差异显著, 不同区域面临“不寻常”程度的气温变化风险的时间与更高排放情景差异较大。因此, 结合区域发展特点制定更为合理的CO<sub>2</sub>和AA协同减排政策对于应对气候变化风险意义重大。

**关键词** “双碳”目标; 气候变化风险; 全球变暖; 信噪比; 信号显现时间

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第6次报告(The Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)指出, 自工业化以

来, 全球历经了显著的气候变化, 2011—2020年全球平均气温较工业化之前(1850—1900年)升高1.09°C<sup>[1]</sup>。全球变暖的进一步加剧意味着更严峻的

收稿日期: 2024-01-03; 修回日期: 2024-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42175053, 41822503); 国家重点研发计划项目(2022YFF0801703)

作者简介: 程方圆, 硕士研究生, 研究方向为区域气温变率和气候风险刻画, 电子信箱: 22213020003@m.fudan.edu.cn; 左志燕(通信作者), 教授, 研究方向为陆-气相互作用、气候变化、亚洲季风、东亚气候变异机理、极端天气气候事件, 电子信箱: zuozhy@fudan.edu.cn

引用格式: 程方圆, 左志燕, 乔梁, 等. “双碳”目标下气候变化风险的预估: 从全球到区域[J]. 科技导报, 2024, 42(19): 20-33;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.00239

气候形势和更频繁、更持续并且更严重的极端事件<sup>[2-4]</sup>。观测数据表明由人为因素引起的气候变化使得20世纪50年代以来全球绝大部分地区高温热浪的频率、持续时间的增加速度明显加快<sup>[3]</sup>。Robinson等<sup>[4]</sup>的研究指出2011—2020年间世界上绝大部分陆地区域的极端降水有1/4都是由气候变化引起的。并且,全球变暖也会进一步加剧生物灭绝速度,对地球生物多样性产生巨大威胁<sup>[5]</sup>。这些气候问题给人类生存和社会发展带来巨大的挑战。因此,为减少气候变化带来的影响,国际社会做出了各种努力,2015年《巴黎协定》明确提出了将全球平均气温控制在较工业化前升温低于2℃的目标,并力争实现升温低于1.5℃的目标<sup>[6]</sup>。

全球变暖主要是由人类活动引起的,人为温室气体排放造成了1.0~2.0℃的升温,其中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)带来的温室效应,贡献了约70%的全球变暖效应<sup>[1,7]</sup>。为减少全球变暖带来的影响,国际社会提出全球CO<sub>2</sub>排放需在21世纪30年代前实现碳达峰,21世纪中叶实现碳中和的气候治理目标。中国作为负责任的大国,也积极响应国际政策,习近平主席在第75届联合国大会一般性辩论上宣布:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”<sup>[8]</sup>。“碳达峰”意味着2030年之前中国CO<sub>2</sub>排放总量需达到最大值,在此拐点处波动后则进入下降阶段,“碳中和”则意味着2060年之前中国将通过植树造林、海洋吸收等自然和人为手段使得中国社会产生的CO<sub>2</sub>被吸收和抵消掉,实现中国人类活动CO<sub>2</sub>相对“零排放”<sup>[9]</sup>。

为确保“双碳”目标的实现,21世纪中国将长期采取温室气体低排放发展战略,目前已有不少研究关注“双碳”政策给未来气候变化带来的影响。例如,“双碳”目标下,与CO<sub>2</sub>高排放情景相比,第6次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 6, CMIP6)模式模拟结果表明中国区域极端高温事件和极端水文事件频率和强度会明显减小<sup>[10-12]</sup>。在“碳中和”背景下,减排政策可很好地改善空气质量,提升居民健康水平<sup>[13-14]</sup>。因此,“双碳”目标对于缓解中国气候变化

风险意义重大,但现阶段对“双碳”目标下气候变化风险进行量化的研究十分有限。气候变化信号是气候系统对辐射强迫的总体响应,反映了所面临的气候变化风险的严峻程度。而气候变化信号何时从背景变率中凸显出来的具体时间(time of emergence, ToE)对政府进行气候变化风险评估和决策具有十分重要的指导意义<sup>[15-17]</sup>。现有研究通常使用信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)方法区分气候变化信号和背景变率,SNR越大,气候变化信号则越强<sup>[17-18]</sup>。ToE则被定义为SNR超过某一阈值的时间,超过越高SNR阈值时间越早意味着人类社会将在更早的时间点上面对更严峻的气候变化风险。

本研究采用SNR方法预估ToE,确定气候变化信号的出现时间。同时,为减小未来气候预估的不确定性,采用平衡气候敏感度(equilibrium climate sensitivity, ECS)位于较合适范围的气候模式集合进行预估<sup>[19-21]</sup>。考虑到“双碳”目标中CO<sub>2</sub>排放特点与CMIP6中SSP1-2.6情景最为接近<sup>[1, 13, 22]</sup>,通过对比SSP1-2.6情景下(“双碳”目标下)与更高排放情景下模拟地表气温(SAT)变化的不同,对“双碳”目标下未来气候变化风险进行综合评估。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

使用来自伯克利地表气温观测气温数据集(BEST)的1850—2014年月平均SAT数据<sup>[23]</sup>,CMIP6历史气候模拟试验(historical)的1850—2014年月平均SAT模拟数据,工业革命前参照试验(piControl)的月平均SAT模拟结果,以及未来不同排放情景下(即SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0和SSP5-8.5情景)2015—2100年CO<sub>2</sub>浓度数据和月平均SAT的模拟结果<sup>[24]</sup>。研究中所用数据涉及模式的具体信息列于表1中。

根据IPCC第6次报告<sup>[1]</sup>,piControl试验是将所有外强迫作用(包括温室气体、太阳辐射、气溶胶、土地利用等)均维持在1850年的水平下驱动气候模式进行模拟,可用于计算气候模式的内部变率。为了统一各模式间的数据时间跨度,本研究统一采

表1 本研究中使用的CMIP6模式的基本信息

模式	piControl	Historical	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	ECS
ACCESS-CM2	1	1	1	1	1	1	4.72
ACCESS-ESM1-5	1	1	1	1	1	1	3.87
AWI-CM-1-1-MR	1	1	1	1	1	1	3.16
BCC-CSM2-MR	1	1	1	1	1	1	3.04
CanESM5	1	1	1	1	—	1	5.62
CESM2	1	1	—	1	—	—	5.16
CESM2-WACCM	1	1	1	1	1	1	4.75
CMCC-CM2-SR5	1	1	1	1	1	1	3.52
CMCC-ESM2	1	1	1	1	1	1	3.36
E3SM-1-0	1	1	—	—	—	1	5.32
EC-Earth3-AerChem	1	1	—	—	1	—	3.87
EC-Earth3-CC	1	1	—	1	—	1	4.23
EC-Earth3	1	1	1	1	1	1	4.3
EC-Earth3-Veg-LR	1	1	1	1	1	1	4.23
EC-Earth3-Veg	1	1	1	1	1	1	4.31
FGOALS-f3-L	1	1	1	1	1	1	3.00
FGOALS-g3	1	1	1	1	—	1	2.88
FIO-ESM-2-0	1	1	1	1	—	1	4.26
INM-CM4-8	1	1	1	1	1	1	1.83
INM-CM5-0	1	1	1	1	1	1	1.92
IPSL-CM6A-LR	1	1	1	1	1	1	4.56
MIROC6	1	1	1	1	1	1	2.61
MPI-ESM1-2-HR	1	1	1	1	1	—	2.98
MPI-ESM1-2-LR	1	1	1	1	1	1	3.00
MRI-ESM2-0	1	1	1	1	1	1	3.15
NESM3	1	1	1	1	—	1	4.72
NorESM2-LM	1	1	1	1	1	1	2.54
NorESM2-MM	1	1	1	1	1	1	2.50
TaiESM1	1	1	1	1	1	1	4.31
总数	29	29	25	27	22	26	—

注:—表示无数值。

用了原始数据的前500年的部分。Historical 试验则是由基于观测的、随时间变化的所有外强迫因素驱动下进行的1850—2014年的历史气候模拟。未来各个排放情景中,SSP1-2.6情景为低排放情景,人为温室气体(anthropogenic greenhouse gases, GHG)的净排放到2050年左右降为0,之后为负值,人为气溶胶(anthropogenic aerosols, AA)的排放2050年之前呈快速下降趋势,随后维持在较低水平,该排放情景可用于把全球升温控制在较工业化前水平2°C以内的目标研究;SSP2-4.5情景为中等排放情景,直到21世纪中叶GHG排放维持在与当前排放相当的水平,该情景下AA和土地利用变化

均处于中等水平,AA的排放到21世纪一直呈下降趋势,不过下降速率比SSP1-2.6情景下小很多,到21世纪末AA的排放量大概为当前的1/4~1/3;SSP3-7.0情景为高排放情景,GHG排放量到2010年相比当前增加1倍,AA的排放到21世纪中叶几乎保持不变,之后则呈轻微的下趋势,是所有排放情景中AA下降最慢的,不过该情景下土地利用变化则是可持续的;SSP5-8.5情景为极高排放情景,GHG排放量到2050年相比当前翻1倍,AA的排放变化与SSP2-4.5情景下比较类似,不过2050年之后速率则比SSP2-4.5情景下稍慢。

## 1.2 方法

气候敏感性用于评估气候系统对辐射强迫的响应,现有研究中一般采用全球平均地表气温的变化作为气候响应的指标<sup>[1]</sup>。*ECS*是指CO<sub>2</sub>浓度突变为工业化前2倍的情况下,气候系统重新达到新的平衡态时,全球平均地表气温相比工业化之前的变化。*ECS*的大小直接影响着当前模式气候模拟和预估的不确定性大小,也对未来预估的气候变化程度大小起决定作用,因此选取合适*ECS*范围的模式来对未来气候进行预估可以很大程度上减少不确定性。根据IPCC第6次报告<sup>[1]</sup>,本研究根据*ECS*大小将模式分为3组,*ECS*位于2~5之间的模式气候敏感性中等(包括ACCESS-CM2、ACCESS-ESM1-5、AWI-CM-1-1-MR、BCC-CSM2-MR、CESM2-WACCM、CMCC-CM2-SR5、CMCC-ESM2、EC-Earth3-AerChem、EC-Earth3-CC、EC-Earth3、EC-Earth3-Veg-LR、EC-Earth3-Veg、FGOALS-f3-L、FGOALS-g3、FIO-ESM-2-0、IPSL-CM6A-LR、MIROC6、MPI-ESM1-2-HR、MPI-ESM1-2-LR、MRI-ESM2-0、NESM3、NorESM2-LM、NorESM2-MM和TaiESM1模式),*ECS*小于2的模式气候敏感性过低(包括INM-CM4-8和INM-CM5-0模式),*ECS*大于5的模式气候敏感性过高(包括CanESM5、CESM2和E3SM-1-0模式)。本研究将位于不同*ECS*范围的模式集合模拟的历史时期全球平均气温(GSAT,本研究中取60°S~75°N范围平均值)相对于1951—1980年异常的时间序列与观测进行对比,以观测超过多模式模拟结果最大值的比例、低于多模式模拟结果最小值的比例和位于多模式模拟中心范围(位于12.5~87.5百分位数区间范围)的比例作为指标<sup>[25]</sup>,系统评估了位于不同*ECS*范围的多模式对全球平均气温的模拟表现,然后选取出模拟表现最好的多模式平均结果对未来气候变化风险进行评估。

本研究中的信号(S)定义为未来某一年气温相对于1995—2014年气温平均值的异常,噪音(N)则为对应模式piControl试验年平均气温的年际标准差,每个模式先单独计算信号和噪音,最后取多模式平均值<sup>[26]</sup>。*SNR*则为信号与噪音的比值,越大的*SNR*意味着越严峻的气候变化<sup>[17, 27]</sup>。根据Frame

等<sup>[26]</sup>和Hawkins等<sup>[27]</sup>的定义,当*SNR*超过1时,气候状况由“熟悉”变为“不寻常”程度;超过2时,变为“不熟悉”程度;超过3时,变为“不可知”程度;超过5时,变为“难以想象”程度。气候变化信号的出现时间(ToE)则是指*SNR*超过某一给定阈值的年份,越早的年份超过越大的*SNR*意味着越严峻的气候变化情况。并且本研究中气温变化*SNR*的计算均基于每个模式的r1i1p1f1试验。

同时本研究对南北半球中纬度人口密集区的气候变化风险进行了区域评估,主要涉及以下7个区域:(1)东亚EAS(25°N~45°N,105°E~135°E),主要是中国东部;(2)北美洲南部NAM(25°N~45°N,75°W~125°W),主要是美国;(3)地中海地区MED(25°N~45°N,0°E~40°E),主要是地中海周围;(4)南亚SAS(10°N~35°N,65°E~90°E),主要是印度;(5)非洲南部SAF(15°S~35°S,10°E~40°E);(6)澳洲AUS(15°S~35°S,110°E~155°E),主要是澳大利亚;(7)南美洲南部SAM(15°S~35°S,40°W~80°W)。

## 2 结果与分析

### 2.1 历史模拟评估

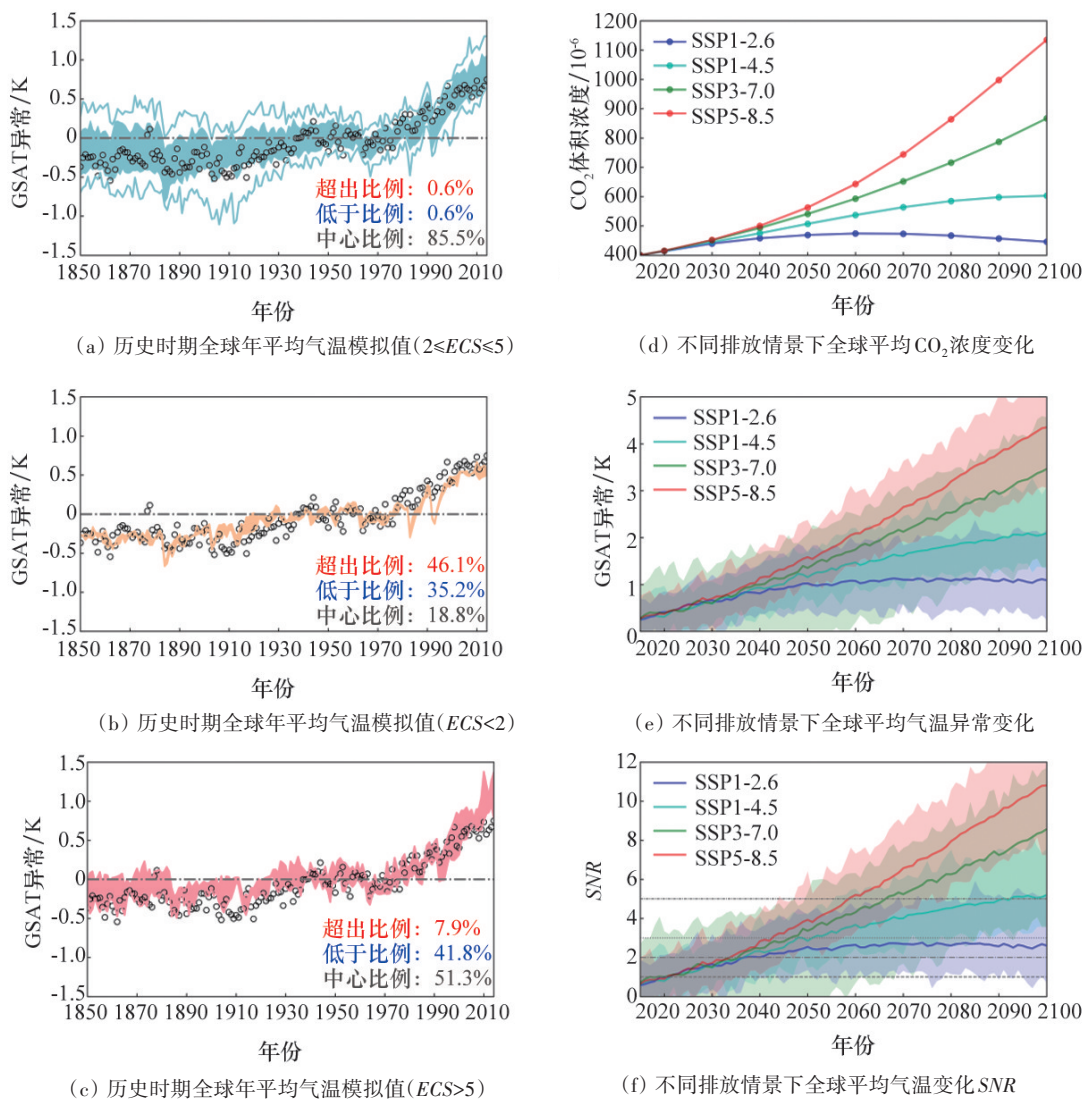
多模式平均可以减小模式间响应的不确定性,可较好地模拟外强迫作用,故本研究将基于多模式平均模拟结果对气候变化进行模拟与预估<sup>[1]</sup>。同时为减小预估未来不同排放情景下气候变化的不确定性,图1(a)~(c)基于观测资料依次对位于中等、偏低和偏高*ECS*范围模式对历史时期(1850—2014年间)GSAT变化特点的模拟能力进行了评估。从图1(a)可以看到,在整个历史时期,位于中等*ECS*范围的多模式平均模拟结果与观测资料变化均较为一致,观测位于多模式模拟中心75 th范围内的比例占85.5%,超过多模式模拟的最大值和低于多模式模拟的最小值的比例则均只有0.6%,可见位于中等*ECS*范围的模式可以较好地刻画历史时期外强迫作用和气温变化特点。而位于偏低和偏高*ECS*范围的模式对历史时期全球气温变化的模拟则分别存在明显的低估和高估现象:位于偏低*ECS*范围模式20世纪70年代之前模拟GSAT高于或低

于观测的情况均存在,70年代之后则相对观测明显低估,统计指标也表明观测超过模式模拟的最大值的比例比低于模式模拟的最小值的比例多大约10%(图1(b));位于偏高ECS范围的模式在20世纪50年代之前的模拟结果相比观测略微高估,而21世纪以来则明显高估,其中观测低于多模式模拟的最小值的比例占总数的41.8%(图1(c))。同时需要指出的是,由于本研究中对历史时期的模拟参考时期选择的是1951—1980年,故这期间模式

模拟结果与观测差异并不明显。综合以上分析,位于中等ECS的多模式模拟结果可以较好地刻画历史时期外强迫作用,因此,本研究将选取这些模式的多模式平均模拟结果对未来不同排放情景下气候变化风险进行评估。

### 2.2 “双碳”目标下全球气候变化风险的预估

未来不同排放情景下的排放特点决定了各排放情景下气温变化特点。图1(d)给出了2015—2100年不同排放情景下CO<sub>2</sub>浓度的时间序列,可以



(a)~(c)中黑色空心圆为1850—2014年全球年平均气温异常观测值,浅蓝色、浅橙色和红色分别为中等、偏低和偏高气候敏感度范围模式模拟结果,参考时期为1951—1980年,其中实线为模式模拟的最大值和最小值,阴影部分为模式模拟中心75 th分位数范围(即12.5 th到87.5 th范围),灰色百分比代表观测位于模式模拟中心75 th范围内的比例,红色百分比代表观测超过模式模拟的最大值,蓝色百分比代表观测低于模式模拟的最小值;(d)中CO<sub>2</sub>浓度数据源自IPCC第六次报告<sup>[1]</sup>;(e)中阴影部分为不同情景下所有模式模拟结果的范围

图1 CMIP6模式历史模拟评估及未来预估结果

看到,在与“双碳”目标最为接近的情景——SSP1-2.6情景下,CO<sub>2</sub>浓度在2060年之前仍呈上升趋势,2060—2070年几乎不变,2070年之后呈下降趋势;而在中等辐射强迫情景——SSP2-4.5情景下,整个21世纪CO<sub>2</sub>浓度一直呈增加趋势,不过21世纪后半叶增加速度有所减小;在SSP3-7.0情景下,CO<sub>2</sub>浓度几乎呈线性增加趋势,到21世纪末CO<sub>2</sub>体积浓度将达到接近900×10<sup>6</sup>;在SSP5-8.5情景下,CO<sub>2</sub>体积浓度增加速度比SSP3-7.0情景下更快,到21世纪末CO<sub>2</sub>体积浓度将达到近1200×10<sup>6</sup>。整体来看,2030年之前不同排放情景下CO<sub>2</sub>浓度变化几乎相同,2030—2040年开始出现微小差异,2040—2060年期间差异逐渐增大,2060年之后各排放情景间的差异越来越明显,到21世纪末,SSP5-8.5、SSP3-7.0和SSP2-4.5排放情景下CO<sub>2</sub>浓度分别达到了SSP1-2.6情景下CO<sub>2</sub>浓度的约2.54倍、1.94倍和1.35倍。而不同排放情景下CO<sub>2</sub>浓度变化特点的不同将会给全球气候变化带来完全不同的影响。

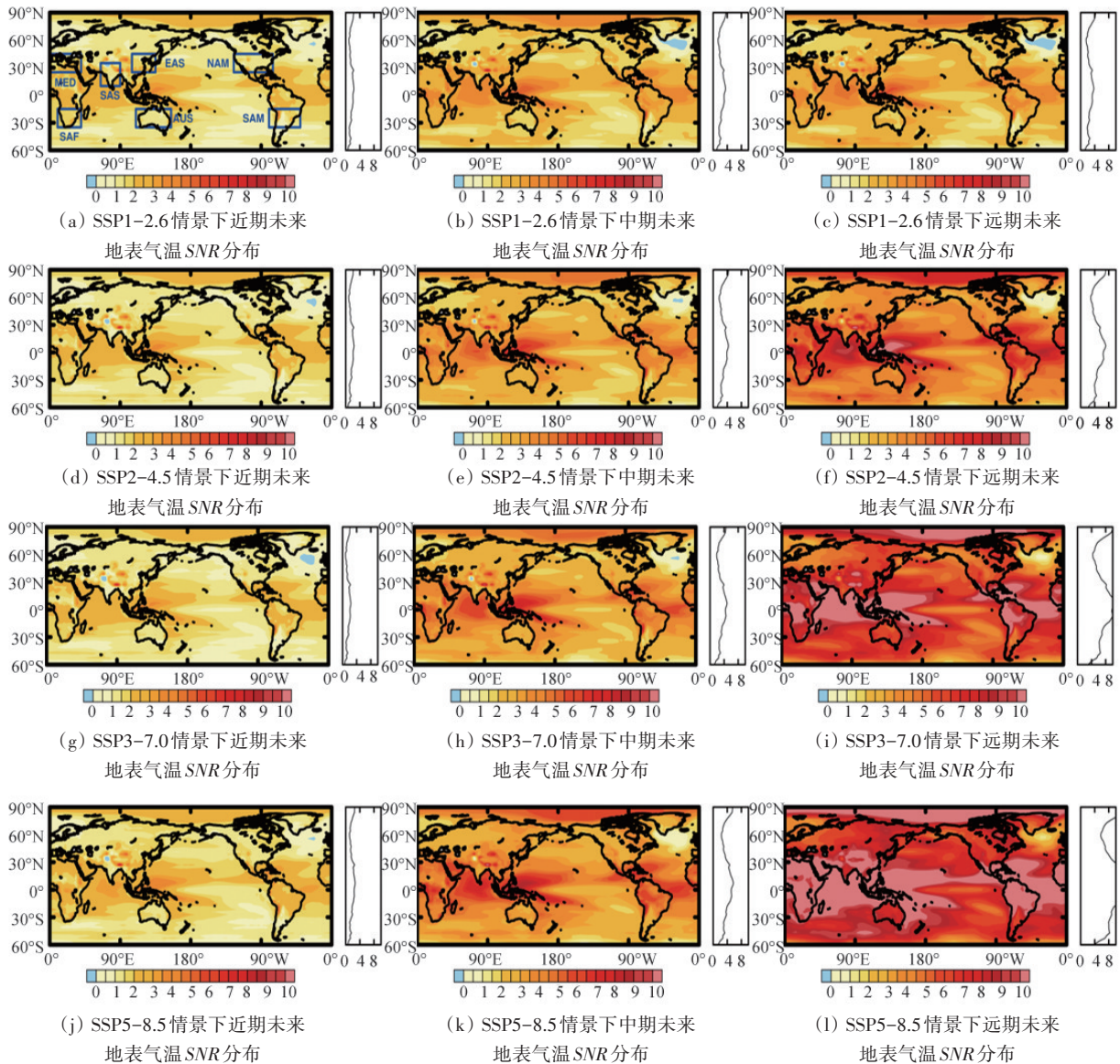
图1(e)为2015—2100年不同排放情景下GSAT相对于1995—2014年异常的时间序列。整体来看,各排放情景下GSAT与CO<sub>2</sub>浓度变化情况比较一致。在低排放情景下(SSP1-2.6情景),2050年之前GSAT呈上升趋势,2050年之后则几乎不变,维持在1.1 K左右的水平;其余排放情景下,GSAT则一直呈上升趋势,并且随着排放情景由低到高,GSAT的增加速度变得越来越快,在SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下,21世纪末GSAT可分别增加2.09 K、3.46 K和4.35 K。需要注意的是,不同排放情景下模式模拟结果的范围也是比较大的,这意味着未来气候预估中仍存在一定不确定性。图1(f)采用了SNR方法进一步量化不同排放情景下GSAT变化的程度,也得到了较为一致的结论。在所有的排放情景下,GSAT变化的SNR均在2020年左右超过1,2030—2040年期间超过2,但低排放情景下超过2的时间略晚于高排放情景。在SSP1-2.6情景下,21世纪中叶SNR达到2和3之间,之后便不再变化,这意味着该排放情景下将面临“不熟悉”程度的气候变化风险,可见即使是在“双碳”目标下,历史时期人类活动对地球气候系统

产生的影响也将是无法消除的<sup>[1]</sup>;在SSP2-4.5情景下,SNR将于2050年左右超过3,2090年左右超过5,意味着气候状态将变为“难以想象”程度;在SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下,SNR超过3的时间分别比SSP2-4.5情景下早5年和10年左右,超过5的时间则分别早20多年和30多年,到21世纪末,SSP3-7.0情景下SNR将超过8,SSP5-8.5情景下SNR则将超过10,这说明越高排放情景下气温变化情况将更为严峻。GSAT仅是表征气候变化程度的一个方面,接下来本研究将对各排放情景下气温变化程度的空间分布特点做进一步分析。

图2为不同排放情景下近期(2021—2040年)、中期(2041—2060年)及远期未来(2081—2100年)地表气温变化SNR的多模式平均空间分布和纬向平均曲线。在近期未来,由于各排放情景间较小的排放差异,SNR空间分布特征比较类似,热带地区和北极地区SNR(纬向平均值约为3)高于中纬度地区(纬向平均值介于1和2之间),这可能与热带地区相比中高纬度较小的背景变率<sup>[17,27-28]</sup>和北极增暖放大效应引起的强的气温变化信号有关<sup>[13,17]</sup>(图2(a)、(d)、(g)、(j))。其中热带SNR较高的地区主要集中在热带印度洋、热带太平洋西部及热带大西洋西部这些海洋区域,以及非洲北部及中部、东南亚以及南美洲北部这些陆地区域。并且在近期未来,SSP1-2.6排放情景下气温变化SNR纬向平均值相比SSP2-4.5、SSP5-8.5和SSP3-7.0排放情景依次偏高,考虑到该时期各排放情景下CO<sub>2</sub>排放差异并不明显,这种现象可能与SSP1-2.6情景下AA减少带来最明显的增暖效应有关<sup>[13]</sup>。同时可以注意到的是,各排放情景下,印度中北部和北大西洋地区的SNR相比其他地区明显偏弱,Zhang等<sup>[29]</sup>将印度中北部地区明显偏弱的SNR归于该地区较弱的外强迫作用和较强的内部变率,Ma等<sup>[13]</sup>则指出北大西洋地区明显偏弱的气温变化信号很可能与AA减少有关,而SSP3-7.0情景下北大西洋地区偏强的SNR可能是由于该排放情景下AA排放的下降速率最慢(图1(g))。同时,中国西南地区(尤其是青藏高原地区)和西北地区SNR相比其他陆地区域明显偏强,表明这些区域将面临更大的气候风险。

青藏高原地区偏强的SNR可能与其明显高于全球的升温速率有关<sup>[30-33]</sup>,该地区的变暖会对当地自然生态系统乃至整个亚洲水资源平衡和安全产生巨大影响<sup>[30-33]</sup>。而西北地区明显偏强的SNR可能与全球变暖背景下其气候“暖湿化”趋势有关<sup>[34-38]</sup>,该地区的气候变化会直接对“一带一路”倡议实施中的水资源、生态和环境安全产生影响<sup>[34-38]</sup>,因此对中国西南和西北地区较强的气候风险需给予充分关注。

而在中期和远期未来,各排放情景间排放差异逐渐增加,气温变化SNR分布特征也开始出现差异。相比近期未来,中期和远期未来气温变化SNR主要分布特征并未出现大的变化,但量级较之前有所增加。SSP1-2.6排放情景下,中期和远期未来(图2(b)和(c))热带和北极地区气温变化SNR纬向平均值达到了接近4的水平,中纬度地区则为2左右,并且热带和北极地区SNR大值区域有所扩



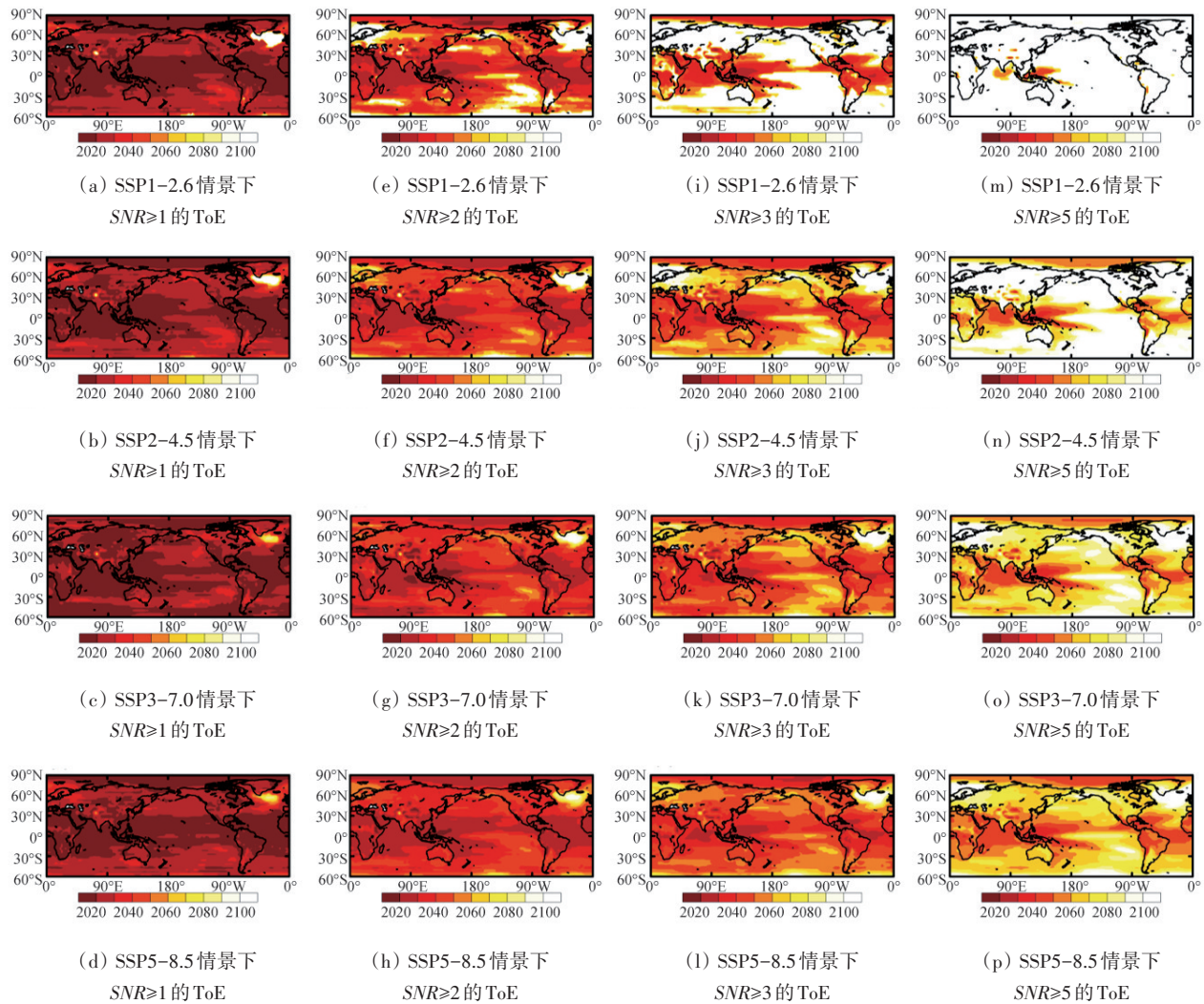
(a) 中蓝色方框为本研究关注的7个区域(东亚EAS、北美洲南部NAM、地中海地区MED、南亚SAS、非洲南部SAF、澳洲AUS、南美洲南部SAM)。底图基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1611号标准地图制作,底图边界无修改。

图2 CMIP6模式预估的未来不同排放情景下近期(2021—2040年)、中期(2041—2060年)及远期未来(2081—2100年)年平均地表气温变化信噪比(SNR)多模式平均空间分布和纬向平均值

大;更高排放情景下,中期和远期未来气温变化SNR量级相较低排放情景下继续增大,这一时期各排放情景下AA减少速度差异已不再明显,其所带来的增暖效应差异也不再明显,GHG排放变化对气温变化起主导作用。并且印度中北部地区和北大西洋地区较弱的SNR特征在低排放情景下仍维持,北大西洋地区SNR低值范围将进一步扩大,这与Ma等<sup>[13]</sup>研究结果一致;而在更高排放情景下则有所减弱,并且随着排放情景的增加,减弱现象越明显。同时,中国西南地区 and 西北地区较强的SNR特征在低排放情景下仍很明显,在更高排放情景下强度进一步加强,SNR高值范围也有所增加,这意味着更高排放情景下中国西南地区和西北地区的

气候风险将进一步加剧,这与孟雅丽等<sup>[33]</sup>和丁一汇等<sup>[37]</sup>的预估结果一致,因此,对这2个气候敏感区的气候变化特征需持续关注且根据区域特点制定相关的应对措施。总体而言,在“双碳”目标下,与更高排放情景相比,气候变化风险将在中期和远期未来大大降低,这对人类社会可持续发展意义深远。

图3给出了未来不同排放情景下超过不同SNR阈值的ToE分布。整体来说,未来不同排放情景下ToE的空间分布与SNR较为一致。与中纬度大部分地区相比,热带、北极地区以及中国西南地区和西北地区将更早地面对相同程度的气候变化风险(SNR值),并且随着SNR阈值的增大,超过时间(ToE)也将逐渐变晚。具体而言,在低排放情景



底图基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1611号标准地图制作,边界无修改

图3 CMIP6模式预估的未来不同排放情景下气温变化不同SNR阈值的信号显现时间

(“双碳”目标)下,热带和北极大部分地区以及中国西南和西北地区的  $SNR$  将在 2020 年之前超过 1, 2030 年之前超过 2, 2040 年左右超过 3; 而中纬度其他地区达到相同等级的信号则会更晚一些, 依次晚 10 年 ( $SNR \geq 1$ )、20 年 ( $SNR \geq 2$ ), 甚至在 21 世纪末都不会超过 3。更高排放情景下,  $SNR$  达到 1 的时间分布特征与 SSP1-2.6 情景一致, 但热带和北极地区的范围有所缩小, 这很可能与低排放情景下 AA 减少引起明显的增暖效应有关<sup>[13]</sup>; 而  $SNR$  达到 2、3 时的时间与 SSP1-2.6 情景相比则会更早, 范围也在扩大。随着排放的增加, 热带和北极大部分地区以及中国西南和西北地区的  $SNR$  将在 2040 年左右超过 3, 中纬度其他地区则将依次在 21 世纪末 (SSP2-4.5)、2060 年左右 (SSP3-7.0)、2050 年左右 (SSP5-8.5) 超过 3。

而对于  $SNR$  超过 5 (难以想象的气候状况) 的 ToE 分布特征, 各排放情景间差异最为明显。低排放情景下, 仅有热带太平洋及印度洋部分地区以及

中国西北和西南小部分地区  $SNR$  于 2060 年左右超过 5; 更高排放情景下, 相比低排放情景, 热带地区以及中国西北和西南地区  $SNR$  超过 5 的范围随排放增加而增大, 并且 ToE 也越早, 北极和中纬度大部分地区  $SNR$  将分别于 21 世纪中叶 (所有更高排放情景) 和 21 世纪末 (仅高排放情景) 超过 5。

总的来说, “双碳”目标下,  $SNR$  超过高阈值的范围相比更高排放情景会明显减小, 这说明随着排放的增加, 气候变化风险将会越大, 也进一步表明了“双碳”目标下的减排政策对于缓解人类活动引起的气候变化风险的重大意义。值得注意的是, 在高排放情景下, 与其他区域相比, 印度中北部、北大西洋以及欧洲北部地区在 21 世纪末才达到较高的  $SNR$  阈值 ( $\sim 3$ ), 这或许与这些地区独特的信号或噪音特征有关<sup>[13, 29]</sup>。

为进一步量化不同排放情景下全球气候变化风险的不同, 图 4 统计了不同排放情景下超过不同  $SNR$  阈值的地表面积累计比例。

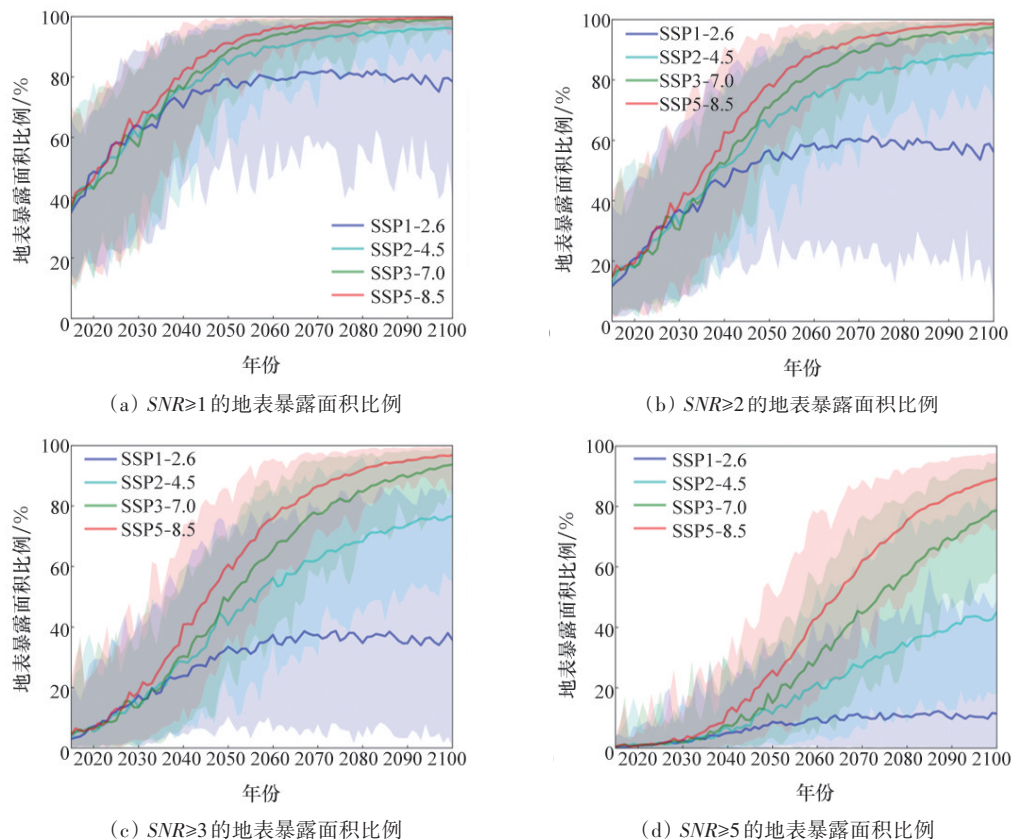


图 4 CMIP6 模式预估的不同排放情景下超过不同气温变化信噪比阈值的地表面积累计比例

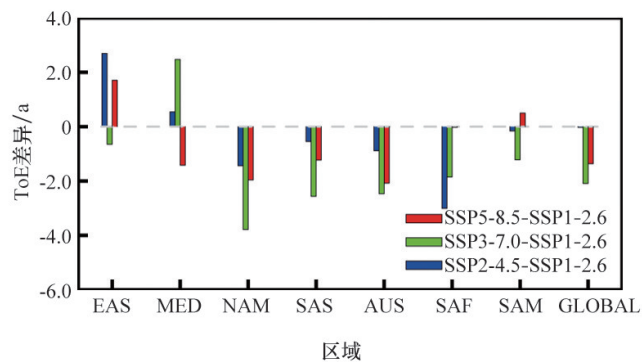
总体来看,2040年之前所有排放情景下超过不同 $SNR$ 阈值的地表面积累计比例差异并不明显,2040年之后 $SSP1-2.6$ 情景下的地表面积累计比例与其他排放情景出现明显区别,并且当超过的 $SNR$ 阈值越大时, $SSP1-2.6$ 情景与其他排放情景间的差异越明显。低排放情景下, $SNR$ 超过1的地表面积累计比例从2015年(约40%)开始持续上升,直到2050年达到约80%后便保持稳定。更高排放情景下, $SNR$ 超过1的地表面积累计比例在2040年之前的演变特征与低排放情景类似,2040—2060年间则与低排放情景间的 $SNR$ 差异越来越大,到21世纪末地表面积暴露比例均超过了95%,其中 $SSP3-7.0$ 和 $SSP5-8.5$ 情景下更是超过了99%。

随着 $SNR$ 阈值的增加,研究阶段早期地表暴露面积比例越低,同时低排放情景与更高排放情景间的差异也越大。低排放情景下,气温变化 $SNR$ 超过2和3的地表面积暴露比例在21世纪末可分别达到约60%和35%,比更高排放情景低30~60%;对于

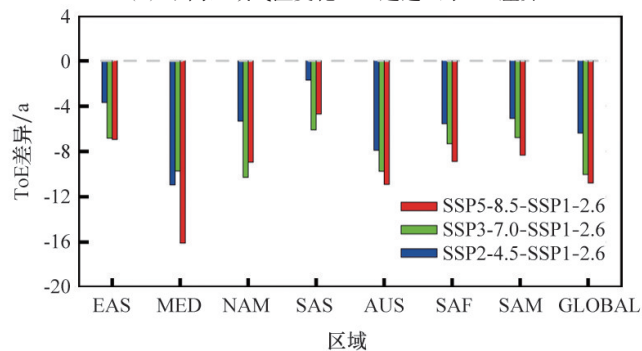
$SNR$ 超过5的情况低排放情景下的暴露比仅为10%左右,而更高排放情景下的暴露比可分别达到低排放情景下的4倍( $SSP2-4.5$ )、8倍( $SSP3-7.0$ )和9倍( $SSP5-8.5$ )。总的来说,“双碳”目标下气温变化超过不同 $SNR$ 阈值的地表暴露比例相比其他排放情景明显偏低,并且阈值越高,偏低的程度越大。

### 2.3 “双碳”目标下区域气候变化风险的预估

图5选取了南北半球中纬度7个人口密集区,并比较了这些区域在“双碳”目标下与其他高排放情景下气候变化风险的差异。对于 $SNR$ 超过1的情况,从全球平均来看,低排放情景下 $SNR$ 超过1的ToE与中等排放情景接近,但比高排放和极高排放情景下分别晚2.09和1.36 a。区域上,北美洲中部、南亚和澳洲地区不同排放情景下 $SNR$ 超过1的时间差异与全球平均水平比较一致,其他地区低排放情景与更高排放情景下的ToE差异则较大。与全球平均相比,低排放情景下,东亚地区 $SNR$ 超过1的时间比中等和极高排放情景依次早2.69和



(a) 不同区域气温变化 $SNR$ 超过1的ToE差异



(b) 不同区域气温变化 $SNR$ 超过2的ToE差异

图5 CMIP6模式预估的不同区域在 $SSP1-2.6$ 情景下与其他高排放情景下气温变化 $SNR$ 超过不同阈值的ToE差异

1.71 a;地中海地区  $SNR$  超过 1 的时间比高排放情景(SSP3-7.0)早 2.47 a;非洲南部  $SNR$  超过 1 的时间比中等排放情景下晚 3.01 a,而与极高排放情景的差异则不明显;南美洲中部  $SNR$  超过 1 的时间比极高排放情景下则早 0.50 a。这些区域间的差异很大可能与不同排放情景下区域 AA 排放和土地利用政策的不同有关。

对于  $SNR$  超过 2 的情况,从全球平均来看,“双碳”目标下,  $SNR$  超过 2 的时间比更高排放情景下则依次晚 6.38 a(SSP2-4.5)、10.03 a(SSP3-7.0)和 10.78 a(SSP5-8.5),不同区域特征与全球平均类似但略有差异。北半球中纬度 4 个区域中,地中海地区 SSP1-2.6 情景与更高排放情景间的差异最大,其次是北美洲中部,然后是东亚地区,最后为南亚地区;南半球中纬度 3 个区域的 ToE 差异则几乎都接近全球平均水平。

基于以上分析可以得出,各个区域在低排放情景下与更高排放情景下  $SNR$  超过 2 的 ToE 差异并不明显,主要原因可能是这种情况下  $CO_2$  排放变化将会对气温变化起主导作用;而  $SNR$  超过 1 时区域间明显的 ToE 差异,则很大程度上与区域 AA 排放减少差异所带来增暖效应的不同以及土地利用政策的不同有关。这对于规避区域气候变化风险政策的制定具有一定的启示意义,需要根据不同区域各自的气温变化特点进行风险评估与政策制定,例如,东亚人口密集区近年来频发的极端高温事件对当地居民健康和生产生活产生了巨大负面影响,未来气候变暖将使这种高温事件更频繁、更极端,当地政府应进一步提升高温监测预报预警业务能力,并完善应对高温天气相关政策;同时,在近期未来需对 AA 减少所带来的增暖效应引起足够重视, Hong 等<sup>[39]</sup>指出 AA 减少会使中国东部地区空气质量相关的死亡人数大大减少,但与此同时,AA 减少也在中国东部地区引起一定增暖,从而导致该地区热相关死亡人数有一定上升(远小于 AA 减少所能避免的空气质量问题相关的死亡人数),因此进一步规避 AA 减少带来的热相关死亡对于区域减排政策效益最大化十分重要。

### 3 结论

对 CMIP6 中位于不同 ECS 范围内的模式对历史时期 GSAT 的模拟表现进行了评估,选取了位于中等 ECS 范围的多模式平均结果预估未来不同排放情景下气候变化风险。通过对比“双碳”目标与更高排放情景下气温变化  $SNR$  及 ToE 预估结果的不同,本研究明确了“双碳”目标指导下的减排政策对于降低未来全球及区域气候变化风险的重要意义。

合适的气候敏感度对降低模式模拟与预估的不确定性十分重要。本研究通过比较 CMIP6 中位于不同 ECS 范围内的模式对历史时期 GSAT 的模拟结果和 BEST 观测资料,发现位于中等 ECS 范围的模式可以更好地刻画历史时期外强迫作用和 GSAT 变化特点。因此,本研究对未来不同排放情景下气候变化风险的评估将基于位于中等 ECS 范围的多模式平均模拟结果。

总的来说,在“双碳”目标指引下,近期未来将与其他高排放情景几乎同时面临“不寻常”程度的气候变化风险;而在中期和远期未来,  $CO_2$  排放将主导气温变化,“双碳”政策将使全球气候变化风险大大降低。具体来说,减排政策将使低排放情景下面临“不熟悉”或“不可知”程度的气候变化风险时间比更高排放情景晚数十年,并且低排放情景下暴露在“不熟悉”或“不可知”程度的气候变化风险下的地表面积相比较更高排放情景会降低 30%~60%。同时,本研究也指出,在近期未来,政策制定者需要对“双碳”政策下 AA 减少所带来的增暖作用引起重视,应采取更为合理的 GHG 与 AA 协同减排政策来减缓气候变化,这与 Hong 等<sup>[39]</sup>和 Ma 等<sup>[13]</sup>有关 AA 减少效应的研究结果相一致。从区域角度来说,近期未来不同排放情景下区域 AA 排放特点明显的不同将使不同区域面临“不寻常”程度的气温变化风险时间存在较大差异,而在由 GHG 和  $CO_2$  主导气温变化的中期和远期未来,不同区域在“双碳”目标下面临“不熟悉”程度的气温变化风险时间将比其他高排放情景晚十余年。

在未来不断升高的年平均气温给生态系统和

人类社会带来愈发严重影响的情况下<sup>[40]</sup>，“双碳”目标下缓和的气候变化风险对于区域可持续发展意义重大，尤其是对位于热带的一些经济相对落后但又面临着更大气候变化风险的国家（东南亚、非洲中部以及拉美等地区的国家）<sup>[26-27]</sup>，这些国家历史累积碳排放本就很低，但遭受着GHG增暖所带来的最严重的损害，“双碳”政策的实施可以使这些国家所面临的气候风险大大降低。值得注意的是，中国西南地区（尤其是青藏高原地区）和西北地区在各种排放情景下面临着比其他区域更大的气候风险，这种更大的气候风险与这2个区域在全球变暖背景下独特的气候响应特征有关<sup>[30-38]</sup>，鉴于中国西南地区和西北地区生态系统和社会经济状况的相对脆弱性，国家应给予这2个地区更多的政策关注与经济支持。总之，应对气候变化风险需要结合区域气候变化特征和区域发展特点制定因地制宜的气候风险应对政策，并给予脆弱地区和脆弱群体最大限度的关注和支持。

本研究对未来不同排放情景下全球和区域气候变化风险进行了定量评估，相比Frame等<sup>[26]</sup>基于CMIP5模式对全球SNR分布特征的分析，本研究采用位于中等ECS范围的CMIP6多模式平均结果，更全面地分析了全球气候变化风险总体特征并对7个人口密集区的气候变化风险进行了量化分析，同时简要探讨了这一气候风险分布特征的成因，为应对气候风险政策的制定提供了一定理论基础。但本研究并未进一步明确近期、中期及远期未来AA和GHG变化对气温变化的具体贡献，同时本研究也未深入探究北大西洋、印度中北部及欧洲北部等地区在未来排放情景下将面临较小的气候变化风险的原因，以及中国西南地区和西北地区在不同排放情景下相比其他地区面临更大的气候变化风险更具体的原因，这些都值得在未来做进一步研究。同时，本研究也存在一些不足，一方面，本研究直接使用了与“双碳”目标中CO<sub>2</sub>排放特点最为接近的SSP1-2.6情景下的模拟结果来对未来气候变化风险进行评估，而SSP1-2.6情景为理想试验，其GHG和AA减少情况与实际“双碳”目标下世界各国的减排政策有所不同<sup>[41]</sup>。另一方面，现有模式在AA

模拟方面存在很大不同<sup>[42]</sup>也会给模式模拟结果带来较大不确定性。而在未来，这些不足随着模式对AA模拟能力的增强是可以克服的，这将进一步减小对气候变化风险模拟与预估的不确定性。

## 参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis [J]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. Science, 2004, 305(5686): 994-997.
- [3] Perkins-Kirkpatrick S E, Lewis S C. Increasing trends in regional heatwaves[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3357.
- [4] Robinson A, Lehmann J, Barriopedro D, et al. Increasing heat and rainfall extremes now far outside the historical climate[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2021, 4: 45.
- [5] Trisos C H, Merow C, Pigot A L. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change[J]. Nature, 2020, 580: 496-501.
- [6] Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C[J]. Nature, 2016, 534: 631-639.
- [7] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434.
- [8] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(1).
- [9] 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”? [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-113.
- [10] Qiao L, Zuo Z Y, Zhang R H, et al. Soil moisture-atmosphere coupling accelerates global warming[J]. Nature Communications, 2023, 14: 4908.
- [11] Hua W J, Dai A G, Qin M H, et al. How unexpected was the 2022 summertime heat extremes in the middle reaches of the Yangtze River? [J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(16): e2023GL104269.
- [12] 杨晨辉, 王艳君, 苏布达, 等. SSP“双碳”路径下赣江流域径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(2): 177-187.
- [13] Ma X F, Huang G, Cao J J. The significant roles of anthropogenic aerosols on surface temperature under carbon neutrality[J]. Science Bulletin, 2022, 67(5): 470-473.
- [14] 徐北瑶, 王体健, 李树, 等. “双碳”目标对我国未来空

- 气污染和气候变化的影响评估[J]. 科学通报, 2022, 67(8): 784-794.
- [15] Giorgi F, Bi X Q. Time of emergence (ToE) of GHG-forced precipitation change hot-spots[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(6): L06709.
- [16] Mahlstein I, Knutti R, Solomon S, et al. Early onset of significant local warming in low latitude countries[J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(3): 034009.
- [17] Hawkins E, Sutton R. Time of emergence of climate signals[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(1): L01702.
- [18] Deng X, Perkins-Kirkpatrick S E, Alexander L V, et al. Projected changes and time of emergence of temperature extremes over Australia in CMIP5 and CMIP6[J]. Earth's Future, 2022, 10(9): e2021EF002645.
- [19] 张华, 王菲, 赵树云, 等. IPCC AR6 报告解读: 地球能量收支、气候反馈和气候敏感度[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 691-698.
- [20] 周天军, 陈晓龙, 左萌, 等. 地球气候敏感度研究的现状和未来[J]. 第四纪研究, 2023, 43(2): 604-624.
- [21] 周天军, 陈梓明, 陈晓龙, 等. IPCC AR6 报告解读: 未来的全球气候: 基于情景的预估和近期信息[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 652-663.
- [22] 邓荔, 朱欢欢, 江志红. 不同情景达到碳中和下中国区域气候变化的预估[J]. 大气科学学报, 2022, 45(3): 364-375.
- [23] Rohde R A, Hausfather Z. The Berkeley earth land/ocean temperature record[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 3469-3479.
- [24] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [25] Suarez-Gutierrez L, Milinski S, Maher N. Exploiting large ensembles for a better yet simpler climate model evaluation[J]. Climate Dynamics, 2021, 57(9): 2557-2580.
- [26] Frame D, Joshi M, Hawkins E, et al. Population-based emergence of unfamiliar climates[J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 407-411.
- [27] Hawkins E, Frame D, Harrington L, et al. Observed emergence of the climate change signal: From the familiar to the unknown[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(6): 86259.
- [28] King A D, Donat M G, Fischer E M, et al. The timing of anthropogenic emergence in simulated climate extremes[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(9): 094015.
- [29] Zhang K W, Zuo Z Y, Zhang R H, et al. Constrained emergence of air temperature change signal in northern-central India from background variations[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(10): e2022GL097736.
- [30] Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(14): L14702.
- [31] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3023-3035.
- [32] Yao T D, Xue Y K, Chen D L, et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.
- [33] 孟雅丽, 段克勤, 尚激, 等. 基于 CMIP6 模式数据的 1961—2100 年青藏高原地表气温时空变化分析[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 24-33.
- [34] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [35] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [36] Zhang Q, Yang J H, Wang W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 113-127.
- [37] 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 3(6): 551-562.
- [38] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1814-1828.
- [39] Hong C P, Zhang Q, Zhang Y, et al. Weakening aerosol direct radiative effects mitigate climate penalty on Chinese air quality[J]. Nature Climate Change, 2020, 10: 845-850.
- [40] Kotz M, Levermann A, Wenz L. The economic commitment of climate change[J]. Nature, 2024, 628: 551-557.
- [41] Emissions gap report 2020[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2020.
- [42] Bellouin N, Quaas J, Gryspeerdt E, et al. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change[J]. Reviews of Geophysics, 2020, 58(1): e2019RG000660.

## Projection of climate change risk under carbon peaking and carbon neutrality goals: From global level to regional level

CHENG Fangyuan<sup>1</sup>, ZUO Zhiyan<sup>1,2,3\*</sup>, QIAO Liang<sup>1</sup>, ZHANG Kaiwen<sup>1</sup>, CHANG Meiyu<sup>1</sup>

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China
2. Shanghai Frontiers Science Center of Atmosphere–Ocean Interaction, Shanghai 200438, China
3. National Observations and Research Station for Wetland Ecosystems of the Yangtze Estuary, Shanghai 202183, China

**Abstract** To mitigate the negative impacts of global warming, international community has issued policies to accomplish carbon emission peak and carbon neutrality by 2030s and mid-21st century, respectively. Using projections from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, this study compares differences of future climate change risks between under carbon peaking and carbon neutrality goals and under higher scenarios based on the signal-to-noise (SNR) method. By the level of climate change risks, the respective climate conditions can be sorted as "unusual" ( $SNR \geq 1$ ), "unfamiliar" ( $SNR \geq 2$ ) and "unknown" ( $SNR \geq 3$ ). Under the low emission scenario, in the near-term future most regions of the earth will face "unusual" climate conditions, nearly simultaneously comparable with higher scenarios due to minor differences in CO<sub>2</sub> emissions between different scenarios, except in some regions where reductions of aerosol emissions will dominate on the local surface air temperature (SAT) change. However, in the mid-term and long-term future, for the fast decrease in CO<sub>2</sub> emission under carbon emission peaking and neutrality goals, almost all the globe will be exposed to an "unfamiliar" or "unusual" climate condition several decades later even beyond 2100 than under higher scenarios. In addition, mitigation will make the percentage of surface area exposed to higher climate change risks 30~60% lower than those under higher emission scenarios. Therefore, decision-makers should attach more importance to the climate penalty induced by decreased aerosols and take regional characteristics of climate change into consideration for developing more effective adaptation and mitigation strategies.

**Keywords** carbon peaking and carbon neutrality goals; climate change risk; global warming; signal-to-noise ratio (SNR); time of emergence (ToE) ●



(责任编辑 徐丽娇)