Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2026, 15(6), 1257-1272
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2026.156132

基于CMIP6模式对南半球环状模的评估分析

高树栋[1]，陈　峥[1,2,3*]

[1]中国海洋大学海洋与大气学院，山东 青岛
[2]中国海洋大学海洋碳中和中心，山东 青岛
[3]海洋动力－物理环境与智能感知全国重点实验室，山东 青岛

收稿日期：2026年10月6日；录用日期：2026年11月5日；发布日期：2026年11月12日

摘　要

南半球环状模(SAM)作为南半球热带外大气环流的主导模态，其未来演变对区域乃至全球气候具有重要影响。本文利用第六次耦合模式比较计划(CMIP6)的多个全球气候模式模拟数据，系统评估了各模式对SAM空间型态、年代际变率及长期趋势的模拟能力，并与再分析资料进行对比。结果表明，多数CMIP6模式能够合理再现SAM的纬向对称与非对称结构，但模式间对年际变率的刻画能力仍存在显著差异。基于泰勒图的多指标筛选，从29个模式中优选出16个性能优良的模式。在此基础上，通过筛选多模式集合(SMME)分析了SSP5-8.5情景下臭氧损耗期(1980~2000年)、臭氧恢复前期(2001~2050年)及臭氧恢复后期(2051~2100年) SAM的趋势变化，发现SMME在各时段均呈现显著正趋势，而传统多模式集合(MME)在2000年之后的时段缺乏统计显著性。研究结果可为南半球气候变化的机理认知和模式优选提供参考依据。

关键词

南半球环状模，CMIP6，泰勒图，多模式集合筛选

Assessment of the Southern Hemisphere Annular Mode in CMIP6 Models

Shudong Gao[1], Zheng Chen[1,2,3*]

[1]College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong
[2]Center for Ocean Carbon Neutrality, Ocean University of China, Qingdao Shandong
[3]National Key Laboratory of Ocean Dynamics-Physical Environment and Intelligent Perception, Qingdao Shandong

Received: October 6, 2026; accepted: November 5, 2026; published: November 12, 2026

[*]通讯作者。

文章引用: 高树栋, 陈峥. 基于 CMIP6 模式对南半球环状模的评估分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(6): 1257-1272.
DOI: 10.12677/ccrl.2026.156132

Abstract

The Southern Annular Mode (SAM), the leading mode of extratropical atmospheric circulation in the Southern Hemisphere, and its future evolution have important implications for regional and even global climate. Using simulations from multiple global climate models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), this study systematically evaluates the performance of individual models in simulating the spatial pattern, decadal variability, and long-term trend of SAM, and compares the results with reanalysis data. The results indicate that most CMIP6 models can reasonably reproduce the zonal symmetric and asymmetric structures of SAM, but significant inter-model differences remain in capturing interannual variability. Based on multi-metric screening using Taylor diagrams, 16 well-performing models were selected from 29 models. On this basis, changes in SAM trends under the SSP5-8.5 scenario during the ozone depletion period (1980~2000), early ozone recovery period (2001~2050), and late ozone recovery period (2051~2100) were analyzed using a selected multi-model ensemble (SMME). The SMME exhibits significant positive trends in all periods, whereas the traditional multi-model ensemble (MME) does not exhibit statistically significant trends in the post-2000 periods. These results provide a basis for the mechanistic understanding of Southern Hemisphere climate change and for model selection.

Keywords

Southern Hemisphere Annular Mode, CMIP6, Taylor Diagram, Selected Multi-Model Ensemble

Copyright © 2026 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

南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, SAM)，亦称为南极涛动(Antarctic Oscillation, AAO)，是南半球热带外地区大气环流变率的主导模态[1] [2]。SAM 本质上表征了南半球中高纬度之间大气质量的“跷跷板”式振荡，其正位相期间西风带向南极收缩，负位相期间则向赤道方向移动[3]。这种环流变化与涡流－平均流的相互作用密切相关[4]。SAM 不仅主导着南半球热带外地区的气候变率，还通过大气遥相关和海洋－大气耦合过程对南极冰盖、南大洋环流乃至北半球气候产生深远影响[5]。例如，春季 SAM 的异常变化已被证明是预测中国长江流域夏季降水和东亚夏季风强弱的重要前期信号[6]。因此，准确理解和模拟 SAM 的时空演变特征，对于全球气候变化的机理认知和未来预估具有重要意义。

CMIP6 作为最新一代的国际耦合模式比较计划，在 CMIP5 的基础上引入了更完善的物理过程参数化、更高的模式分辨率以及更加真实的臭氧时间演变方案。近年来，已有研究开始利用 CMIP6 模式对 SAM 进行评估。Zhang 等评估了 CMIP6 模式对 SAM 空间型态的季节变化模拟能力，发现多模式集合平均能够捕捉各季节 SAM 的基本空间型态，其中南半球夏季(DJF)的模拟技巧最高，而南半球秋季(MAM)的技巧最低[7]。Morgenstern 分析了 CMIP6 模式中 SAM 的趋势变化，指出南半球夏季 SAM 的增强几乎完全归因于臭氧消耗，而长寿命温室气体的增强效应则被温室气体引起的平流层臭氧增加所抵消[8]。Lee 等[9]和 Coburn 与 Pryor [10]的评估表明，尽管 CMIP6 模式在 SAM 空间型态的模拟上较 CMIP5 有显著改进，但在变率幅度的模拟上仍存在系统性偏差。此外，模式对 SAM 年代际变率的模拟能力仍显不足

[11] [12]，且对南大洋海温的响应模拟也存在较大的模式间差异[13]。最近的研究还强调了平流层极涡动力学在调制 SAM 季节性趋势反转中的关键作用[14]。

基于上述研究背景，本文旨在利用 CMIP6 多模式模拟数据，系统评估各模式对 SAM 空间型态、年代际变率及长期趋势的模拟能力，并与再分析资料进行对比。在此基础上，通过选定多模式集合分析不同阶段下 SAM 的趋势变化，同时评估选定模式在臭氧消耗期(1980~2000 年)和恢复期(2001~2050 年、2051~2100 年)对南半球夏季 SAM 趋势的模拟能力。研究结果以期为南半球气候变化的机理认知和气候模式优选提供科学参考。

2. 数据与方法

2.1. 数据

2.1.1. 再分析资料

本研究所用的逐月位势高度及海平面气压资料取自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的第五代全球大气再分析数据集(ERA5) [15]。该数据集通过降采样方法统一处理为 2.5˚ × 2.5˚的水平分辨率，垂直方向涵盖 1000~10 hPa 共 17 个标准气压层，本文采用 500 hPa 位势高度场。资料时间范围为 1950 年 1 月至 2025 年 12 月。

2.1.2. CMIP6 多模式资料

本研究选用第六次耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)提供的多模式模拟数据。CMIP6 是世界气候研究计划(WCRP)发起的国际耦合模式比较计划，其试验设计旨在为政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)提供科学支撑[16]。

本研究选取各 CMIP6 模式 1950 年 1 月至 2014 年 12 月的 Historical 逐月位势高度场数据，与同期的 ERA5 再分析资料进行对比，以评估各模式对 SAM 的模拟能力。共选用 29 个 CMIP6 模式的位势高度数据，模式名称、所属机构及水平分辨率等信息如表 1 所示。

Table 1. Details of the 29 CMIP6 models used in this paper
表 1. 本文使用的 29 个 CMIP6 模式详细信息

序号	模式名称	机构	垂直分层	分辨率	臭氧强迫方案
1	ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS, Australia	85	192 × 145	离线指定
2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO, Australia	38	192 × 145	离线指定
3	BCC-CSM2-MR	BCC, China	46	320 × 160	离线指定
4	CAMS-CSM1-0	CAMS, China	31	320 × 160	离线指定
5	CanESM5	CCCma, Canada	49	128 × 64	离线指定
6	CanESM5-CanOE	CCCma, Canada	49	128 × 64	离线指定
7	CESM2	NCAR, USA	32	288 × 192	离线指定
8	CESM2-WACCM	NCAR, USA	70	288 × 192	交互式化学
9	CNRM-CM6-1	CNRM-CERFACS, France	91	256 × 128	交互式化学
10	CNRM-CM6-1-HR	CNRM-CERFACS, France	91	720 × 360	交互式化学
11	CNRM-ESM2-1	CNRM-CERFACS, France	91	256 × 128	交互式化学

续表

12	EC-Earth3	EC-Earth Consortium, Europe	91	512 × 256	离线指定
13	EC-Earth3-Veg	EC-Earth Consortium, Europe	91	512 × 256	离线指定
14	FGOALS-f3-L	CAS, China	32	384 × 192	离线指定
15	FGOALS-g3	CAS, China	26	360 × 218	离线指定
16	GFDL-CM4	NOAA-GFDL, USA	33	360 × 180	离线指定
17	INM-CM4-8	INM, Russia	21	180 × 120	离线指定
18	INM-CM5-0	INM, Russia	73	180 × 120	离线指定
19	IPSL-CM6A-LR	IPSL, France	79	144 × 143	离线指定
20	KACE-1-0-G	NIMS-KMA, South Korea	85	192 × 144	离线指定
21	MCM-UA-1-0	UA, USA	14	192 × 80	离线指定
22	MIROC-ES2L	MIROC, Japan	40	128 × 64	离线指定
23	MIROC6	MIROC, Japan	81	256 × 128	离线指定
24	MPI-ESM1-2-HR	MPI-M, Germany	95	384 × 192	离线指定
25	MPI-ESM1-2-LR	MPI-M, Germany	47	192 × 96	离线指定
26	MRI-ESM2-0	MRI, Japan	80	192 × 96	交互式化学
27	NESM3	NUIST, China	47	192 × 96	离线指定
28	NorESM2-LM	NCC, Norway	32	144 × 96	离线指定
29	NorESM2-MM	NCC, Norway	32	288 × 192	离线指定

由于各 CMIP6 模式输出的原始数据网格不尽相同，为便于后续的比较分析和绘图，本研究将所有模式的位势高度数据通过双线性插值方法统一插值到 2.5˚ × 2.5˚的规整经纬度网格。

2.2. 方法

2.2.1. EOF 分解

经验正交函数分解(Empirical Orthogonal Function, EOF)是气候诊断分析中广泛使用的一种统计技术，旨在将气象要素场的时空变化分解为正交的空间型态及其对应的时间系数[2]。该方法通过对变量的协方差矩阵进行特征值分解，提取出按方差贡献大小排列的特征向量(即空间模态)，每个模态所对应的时间序列即为该空间型态随时间演变的主成分(Principal Component, PC)。EOF 分解能够有效提取高维气象数据中的主导变率信号，已被广泛应用于揭示大气环流异常的主要空间结构和时间演变特征。

2.2.2. 泰勒图(Taylor Diagram)

本文采用泰勒图(Taylor diagram)对各 CMIP6 模式模拟的 SAM 空间型态进行定量评估[17]。泰勒图是一种能够将多个统计指标综合显示在同一张极坐标图中的可视化方法，可同时展示参考场与模拟场之间的标准差(Standard Deviation, σ)、相关系数(Correlation Coefficient, R)以及中心化均方根误差(Centered Root Mean Square Difference, CRMSE)，从而直观、全面地反映各模式对空间型态的模拟能力。

在绘制泰勒图之前，需对参考场和所有模式场的标准差进行归一化处理，即统一除以参考场的标准差，使参考点位于横轴上的单位位置。在图中，径向距离表示归一化后的标准差，反映模式模拟场的空间变率幅度；方位角(或余弦值)表示模式与参考场之间的空间相关系数，衡量两者空间分布型态的相似程度；模式点与参考点(即横轴上的“REF”点)之间的距离表示中心化均方根误差，反映两者之间的空间偏差。综合而言，某一模式点在图中距离参考点越近，表明该模式对 SAM 空间型态的模拟能力越强。

2.2.3. 回归分析、相关分析及显著性检验

相关分析通过相关系数衡量两个变量之间线性关联的强弱与方向，其绝对值越接近 1 表示线性关系越强。回归分析则通过建立线性回归方程，利用一个或多个自变量对因变量进行估计或预测，回归系数反映了自变量对因变量的贡献大小及影响方向。由于气候时间序列通常存在自相关性，直接进行显著性检验可能会高估结果的可靠性，因此需采用有效自由度进行修正[18]，以更客观地评估统计关系的可信度。通常以 95%置信水平作为显著性判断的主要标准，部分分析亦涉及 90%和 99%置信水平。

2.2.4. 多模式集合筛选(SMME)

传统多模式集合(Multi-Model Ensemble, MME)通过对所有模式进行算术平均得到，其结果通常优于大多数单个模式。若共有 n 个模式，每个模式记为 $M_i\left(i=1,2,\cdots,n\right)$，则多模式集合的平均值为：

$$\bar{M}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}M_i \tag{1}$$

然而，MME 对所有模式等权平均，未能区分不同模式在特定现象上的模拟性能差异。Zheng 等在此基础上提出了多模式集合筛选(Selected Multi-Model Ensemble, SMME)方法[11]。该方法的核心思想是：以各模式对 SAM 长期趋势的模拟能力作为筛选准则，选取模拟趋势最接近观测值的模式子集进行集合平均，以提升集合结果的可靠性。SMME 的数学表达式为：

$$\overline{\mathrm{SMME}}=\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{n}\delta_i M_i \tag{2}$$

其中，

$$\delta_i=\begin{cases}1, & \text{模式满足筛选条件}\\ 0, & \text{模式不满足筛选条件}\end{cases},\quad s=\sum_{i=1}^{n}\delta_i \tag{3}$$

式中，n 为所有可用模式的总数，s 为满足筛选条件的模式数量，δ_i 为筛选系数。

2.2.5. SAMI 的选取

目前学术界对 SAM 已有多种定量化指数。例如，Thompson 和 Wallace [2]将 SAM 定义为南半球 20˚S 以南位势高度场 EOF 分析的第一主成分；Gong 和 Wang [1]则采用 40˚S 与 65˚S 纬向平均海平面气压差作为南极涛动指数。Nan 和 Li [6]定义的 SAMI，即 40˚S 与 70˚S 纬向平均海平面气压(SLP)的差值：

$$\mathrm{SAMI}=\hat{P}_{40^\circ\mathrm{S}}-\hat{P}_{70^\circ\mathrm{S}} \tag{4}$$

其中 $\hat{P}_{40^\circ\mathrm{S}}$ 和 $\hat{P}_{70^\circ\mathrm{S}}$ 分别为 40˚S 和 70˚S 为纬圈上标准化后的月平均纬向平均海平面气压。该指数物理意义清晰，能够较好刻画 SAM 中高纬度之间大气质量“跷跷板”式振荡的本质特征，且计算简便，已被广泛用于 SAM 相关研究[19]-[21]。同时，鉴于 SAM 在南半球夏季(DJF)的变率最强且模式在该季节的模拟性能相对最优，本文以南半球夏季作为研究时段。

本文使用两种 SAM 指数并分工如下：AAOI 由南半球 20˚S 以南 500 hPa 位势高度距平场 EOF 第一模态的标准化 PC1 定义，与空间模态直接对应，用于第 3.2 节空间型态评估；SAMI 取 40˚S 与 70˚S 标准

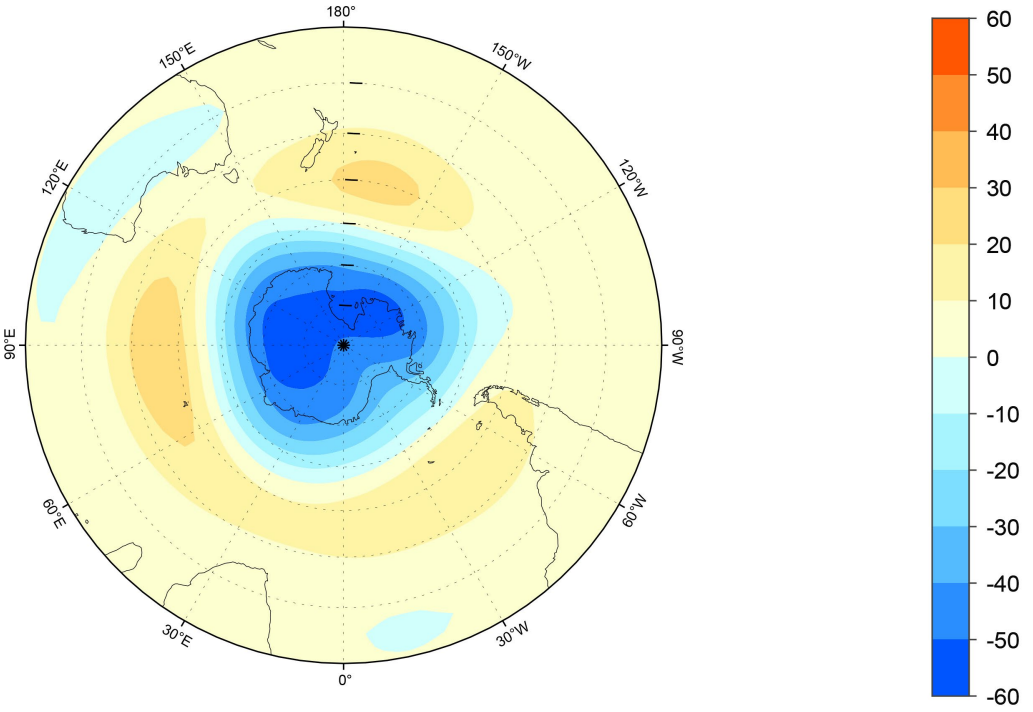
化纬向平均海平面气压差，用于第 3.1、3.3 节时间演变、年代际变率及趋势分析。

基于 ERA5 资料，两指数逐月相关系数为 0.8314 ($p < 0.01$)，9 年高斯滤波后为 0.7628 ($p < 0.01$)；两者均呈显著正趋势，且负、正位相等年代际特征一致。因此，两指数互为验证，分别用于空间型态与时间变率分析是必要且一致的。

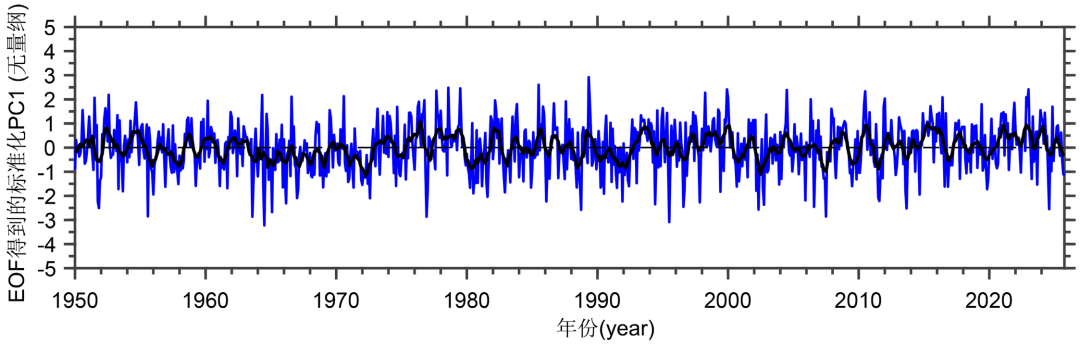
3. 结果与分析

3.1. 观测中 SAM 的时空特征

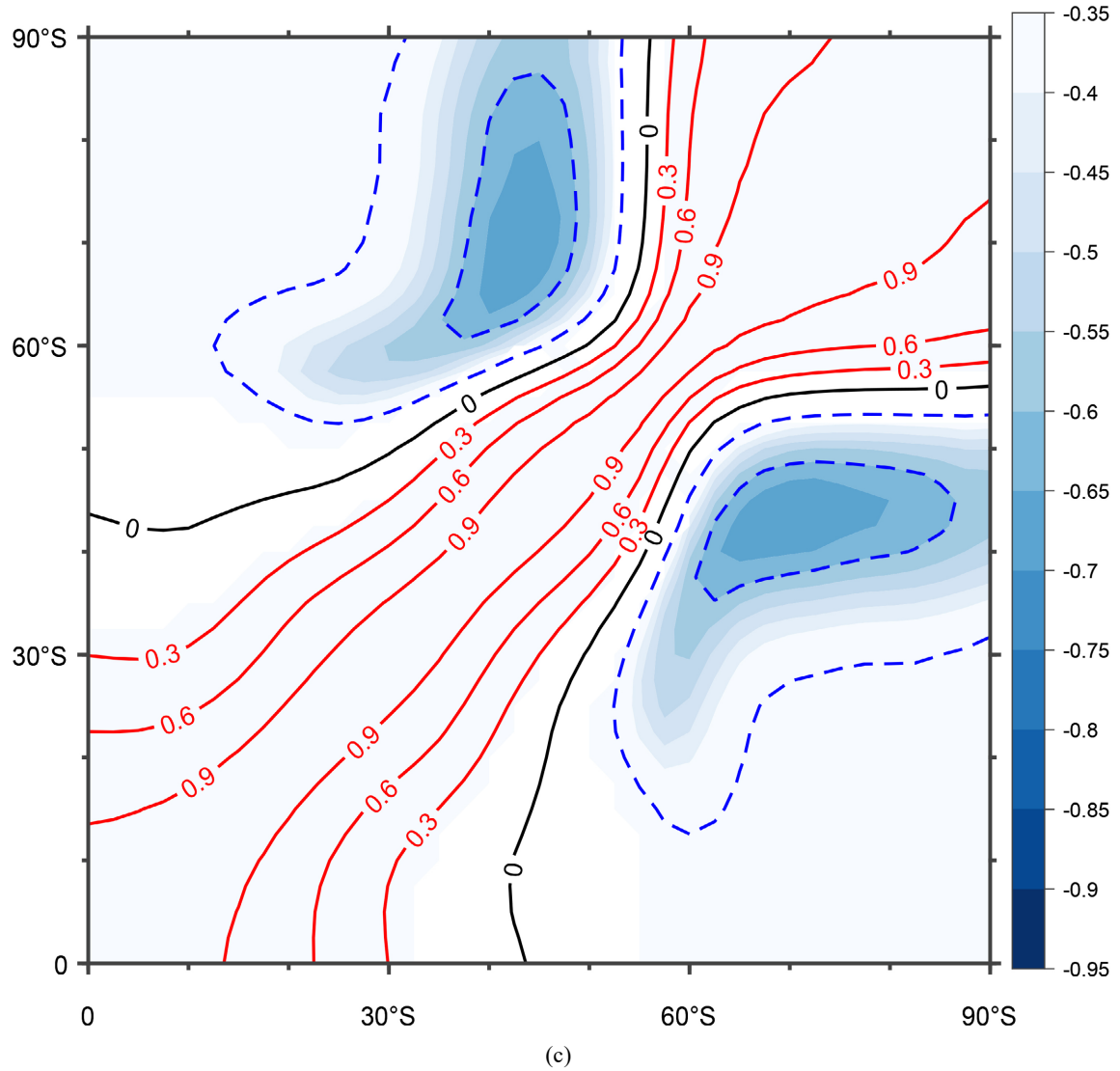
南半球环状模(SAM)是南半球热带外大气环流变率的主导模态，反映了中高纬度之间大气质量的纬向对称性摆动。图 1 展示了基于 ERA5 再分析资料计算的南半球 20˚S 以南 500 hPa 位势高度距平场 EOF 第一模态的空间型态。该模态的解释方差为 35.80%，其空间结构表现为中纬度(约 40˚S~55˚S)与高纬度(约 60˚S~90˚S)之间位势高度的反位相变化：当高纬度地区位势高度降低时，中纬度地区位势高度升高，反之亦然。这种“跷跷板”式的空间结构是 SAM 最典型的特征，与已有研究结果一致[1] [2]。



(a)



(b)



(c)

Figure 1. (a) Spatial pattern of the SAM as the leading EOF mode at 500-hPa geopotential height south of 20˚S from ERA5 reanalysis during 1950~2024, ERA5 35.80% (71); (b) corresponding normalized principal component time series (i.e., SAMI); (c) cross-correlation coefficients between zonal-mean SLP anomalies in the Southern Hemisphere, PC-1. In (c), the contour and shading intervals are 0.3 and 0.05, respectively; solid (dashed) contours indicate positive (negative) values, ERA5. A transition zone between 55˚ and 60˚S is evident, with significant negative correlations between mid- and high latitudes (symmetric about the diagonal)

图 1. (a) 1950~2024 年 ERA5 再分析资料中南半球 20˚S 以南 500 hPa 位势高度距平场 EOF 第一模态的空间型态，ERA5 35.80% (71)；(b) 对应的标准化主成分时间序列(即 SAMI)，PC-1；(c) 南半球纬向平均海平面气压异常的互相关系数，ERA5。在(c)中，等值线和填色间隔分别为 0.3 和 0.05，实线(虚线)表示正(负)值，以 55˚~60˚S 为过渡带，中高纬度呈显著负相关(对称于对角线)

纬向平均海平面气压的互相关系数(图 1)进一步验证了 SAM 的纬向对称特征。以 55˚S~60˚S 为过渡带，中纬度(30˚S~55˚S)与高纬度(60˚S~90˚S)之间的纬向平均海平面气压呈显著负相关，体现了南半球中高纬度之间大气质量在半球尺度上的纬向均匀交换。

图 2 给出了基于 Nan 和 Li [6]定义的 SAMI 自 1950 年以来的逐月演变序列及其线性趋势。由图可见，SAMI 呈现出显著的正趋势，与近几十年来观测到的 SAM 持续增强的结论一致。此外，SAMI 还表现出明显的年代际波动，如 1960 年代以负位相为主，而 1990 年代至 2000 年代则以正位相占优。

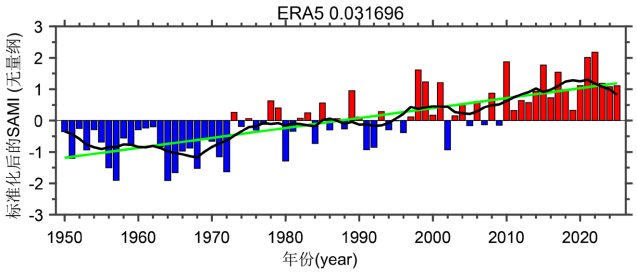


Figure 2. Time series of the SAMI during 1950~2025: monthly values, 9-year Gaussian-type filtered variations (thick black solid line), and linear trend (green solid line)
图 2. 1950~2025 年 SAMI 逐月时间序列、9 年高斯型滤波曲线(粗黑色实线)及其线性趋势(绿色实线)

3.2. CMIP6 模式模拟的 SAM 模态

3.2.1. 模式筛选

本节首先分别计算各 CMIP6 模式在南半球 20˚S 以南区域 500 hPa 位势高度距平场的 EOF 第一模态，获得各模式的 SAM 空间型态。在此基础上结合前文的再分析资料(OBS)，运用泰勒图对各模式的 SAM 空间模拟能力进行定量评估，泰勒图如图 3 所示。

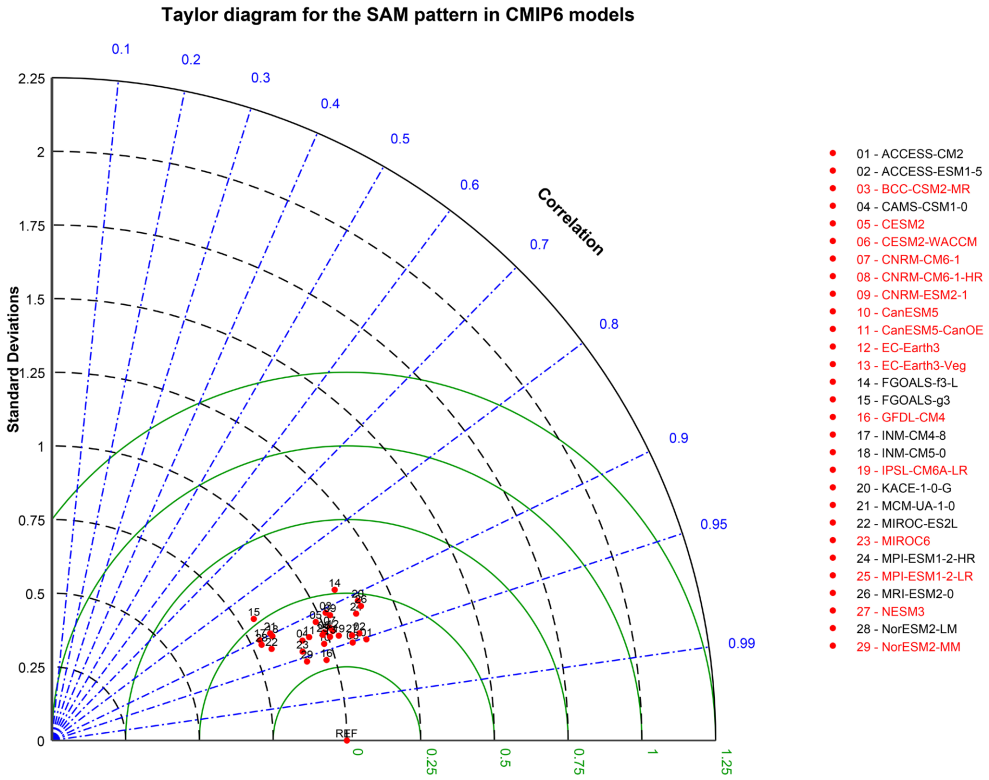


Figure 3. Normalized Taylor diagram of the SAM spatial patterns simulated by the CMIP6 models (the blue dash-dotted line denotes the reference value (REF), black dashed lines denote the numerical reference lines for the correlation coefficient (COR) and normalized standard deviation (STD), and green solid lines denote the numerical reference lines for the normalized centered root-mean-square error (RMSE); REF represents the SAM pattern derived from ERA5 reanalysis; model indices are shown in the legend on the right; the 16 models meeting the selection criteria are marked in red with their indices and names)
图 3. CMIP6 多模式对 SAM 空间模态模拟结果的标准化泰勒图(蓝色点划线代表 REF 参考值，黑色虚线代表相关系数 COR 和归一化标准差 STD 的数值参照线，绿色实线代表归一化中心化均方根误差 RMSE 的数值参照线；REF 代表 ERA5 再分析资料所得空间模态；各模式序号见右侧图例；满足筛选标准的 16 个模式序号及名称标记为红色)

图 3 中，蓝色点划线与黑色虚线分别代表参考值(REF，即 OBS 的标准差)以及各模式与 REF 之间的相关系数(COR)和归一化标准差(STD)的数值参照线，绿色实线表示归一化中心化均方根误差(RMSE)的参照线。归一化处理采用各模式及 OBS 的标准差统一除以 OBS 的标准差的方式。综合而言，某一模式点在图中的位置越靠近 REF 点，表明该模式在标准差、相关系数和均方根误差三个指标上的综合表现越优。

从标准化标准差的分布来看，多数模式的归一化标准差介于 0.9 至 1.1 之间，表明 CMIP6 模式对 SAM 空间型态的变率幅度总体模拟较为合理，未出现系统性的显著高估或低估。少数模式(如 FGOALS-g3)的归一化标准差偏离 1.0，反映出其对 SAM 空间振幅的再现能力相对较弱。

为客观筛选性能优良的模式，设定如下三项筛选标准：相关系数 COR > 0.9、归一化标准差 STD 介于 0.9 与 1.1 之间、归一化中心化均方根误差 RMSE < 0.5。同时满足上述三项标准的模式共计 16 个，这些模式在图 3 中以红色标记。

3.2.2. 筛选后各模式模拟的空间型

图 4 展示了经泰勒图筛选后的 16 个 CMIP6 模式所模拟的 SAM 空间型态(对应图 1)。各模式中 SAM 作为南半球热带外地区位势高度场主导模态的解释方差介于 30%至 40%之间，多数模式集中在 32%~38%区间。与 Zheng 等报告[11]中 CMIP5 模式普遍夸大解释方差(部分模式高达 63%~79%)的现象相比，所选 CMIP6 模式的解释方差整体更为收敛，且与 ERA5 再分析结果(35.80%)的偏差明显减小，表明 CMIP6 模式在 SAM 空间型态的解释方差模拟方面较 CMIP5 有较大改进。

为进一步评估筛选后各模式对 SAM 纬向对称特征的再现能力，图 5 给出了各模式中纬向平均海平面气压异常在南半球的互相关系数。与观测(图 1)相比，绝大多数筛选出的模式能够较好地再现中纬度与高纬度之间的负相关结构，过渡带位置亦基本位于 55˚S~60˚S 附近，与观测一致。然而，个别模式(如 IPSL-CM6A-LR)中高纬度之间的负相关强度明显强于观测，表明该模式放大了与 SAM 相关的环流变率，这与图 4 中该模式解释方差偏高的特征相一致。总体而言，筛选后的 16 个模式在 SAM 空间型态和纬向对称性结构方面均表现出与观测较为接近的模拟能力。

除纬向对称分量外，SAM 空间型态中还包含显著的纬向非对称分量。本文进一步考察了筛选后的 16 个 CMIP6 模式对 SAM 非对称结构的模拟能力，重点关注两个典型的异常活动中心：南极洲西北部上空的气旋式中心和南印度洋上空的反气旋式中心。

图 6 展示了各筛选模式中上述两个异常中心的位置分布。总体而言，所有筛选模式均能再现西北南极洲上空的气旋式中心以及南印度洋上空的反气旋式中心，表明各模式对 SAM 非对称结构的基本空间分布具有较好的模拟能力。然而，各模式在异常中心的定位精度上存在一定差异。对于南印度洋上空的强反气旋中心，各模式模拟的经度位置较为分散，分布范围较宽，而纬度位置的模拟相对集中，表现出纬度模拟优于经度的特点。对于西北南极上空的强气旋中心，各模式模拟的位置整体较为集中，经度和纬度的模拟均较为准确，但仍呈现出纬度精度优于经度的趋势。总体而言，筛选后的 CMIP6 模式能够合理再现 SAM 的纬向非对称分量，其中高纬度气旋中心的模拟优于中纬度反气旋中心。

3.3. 评估模式模拟的 SAM 时间变率

本文进一步评估筛选后的 16 个 CMIP6 模式对 SAM 时间变率的再现能力。图 7 给出了各模式模拟的 SAMI 自 1950 年以来的演变序列。与观测相比，全部 16 个模式均能合理再现近几十年来 SAM 呈现的长期正趋势，反映出 CMIP6 模式在时间变率模拟方面的基本能力。在年代际尺度上，参考观测中 1960 年代以负位相为主、1990 年代至 2000 年代以正位相占优的典型时段，绝大多数筛选模式均能较好地捕捉上述年代际位相转换特征。仅 EC-Earth3-Veg 一个模式对选定年代际位相的模拟存在明显偏差，未能

准确再现观测中的位相转换。与 Zheng 等[11]基于 CMIP5 模式的评估结果(仅半数模式能捕捉年代际位相)相比，筛选后的 CMIP6 模式在年代际变率的模拟上表现出明显改进。

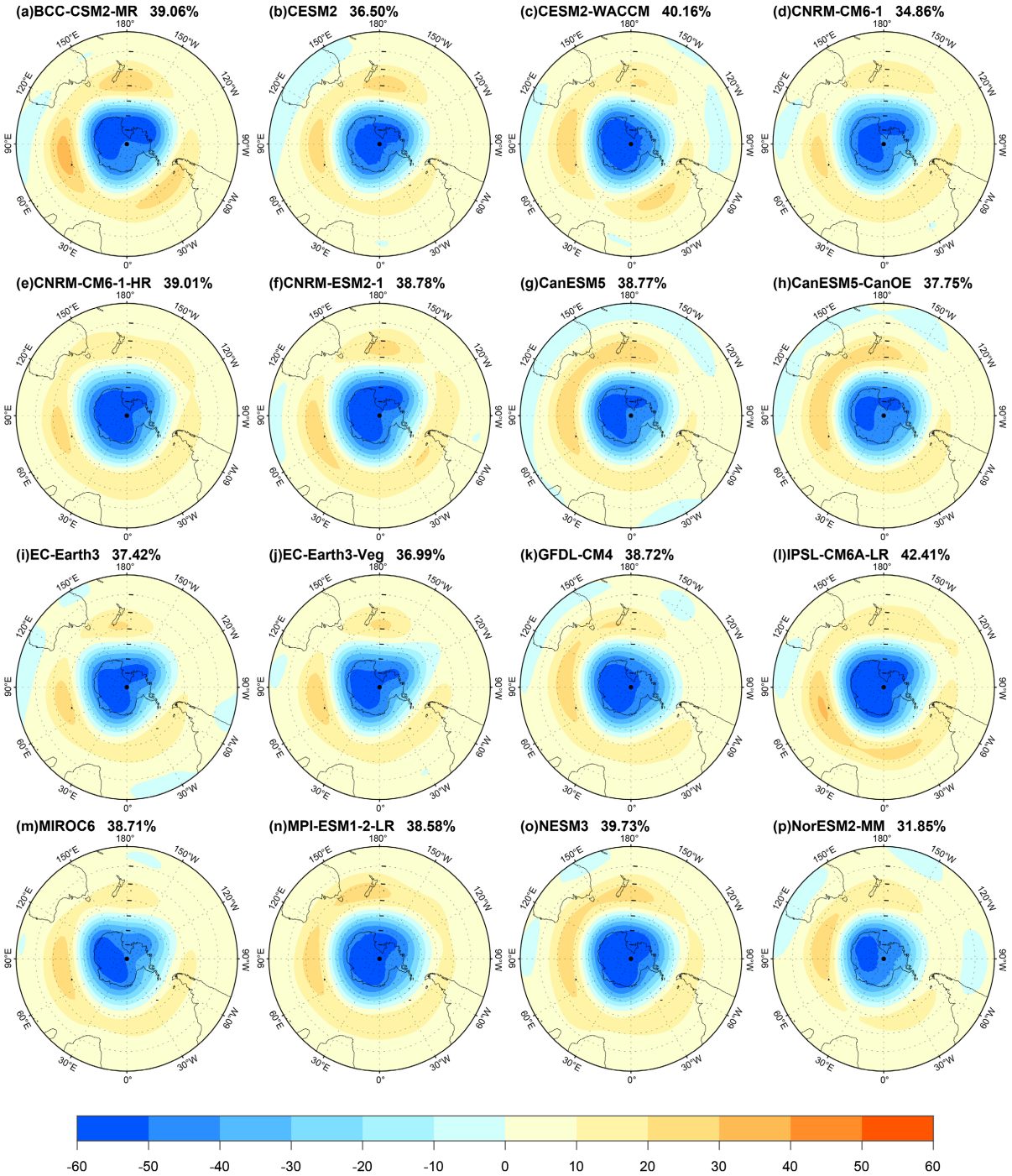


Figure 4. As in Figure 1(a), but for the leading EOF modes of 500-hPa geopotential height anomalies south of 20˚S simulated by the 16 CMIP6 models selected via the Taylor diagram (the red numbers in each subpanel indicate the percentage of explained variance)

图 4. 同图 1(a)，但为经泰勒图筛选后的 16 个 CMIP6 模式所模拟的南半球 20˚S 以南 500 hPa 位势高度距平场 EOF 第一模态空间型态(各子图右上角红色数字表示解释方差百分比)

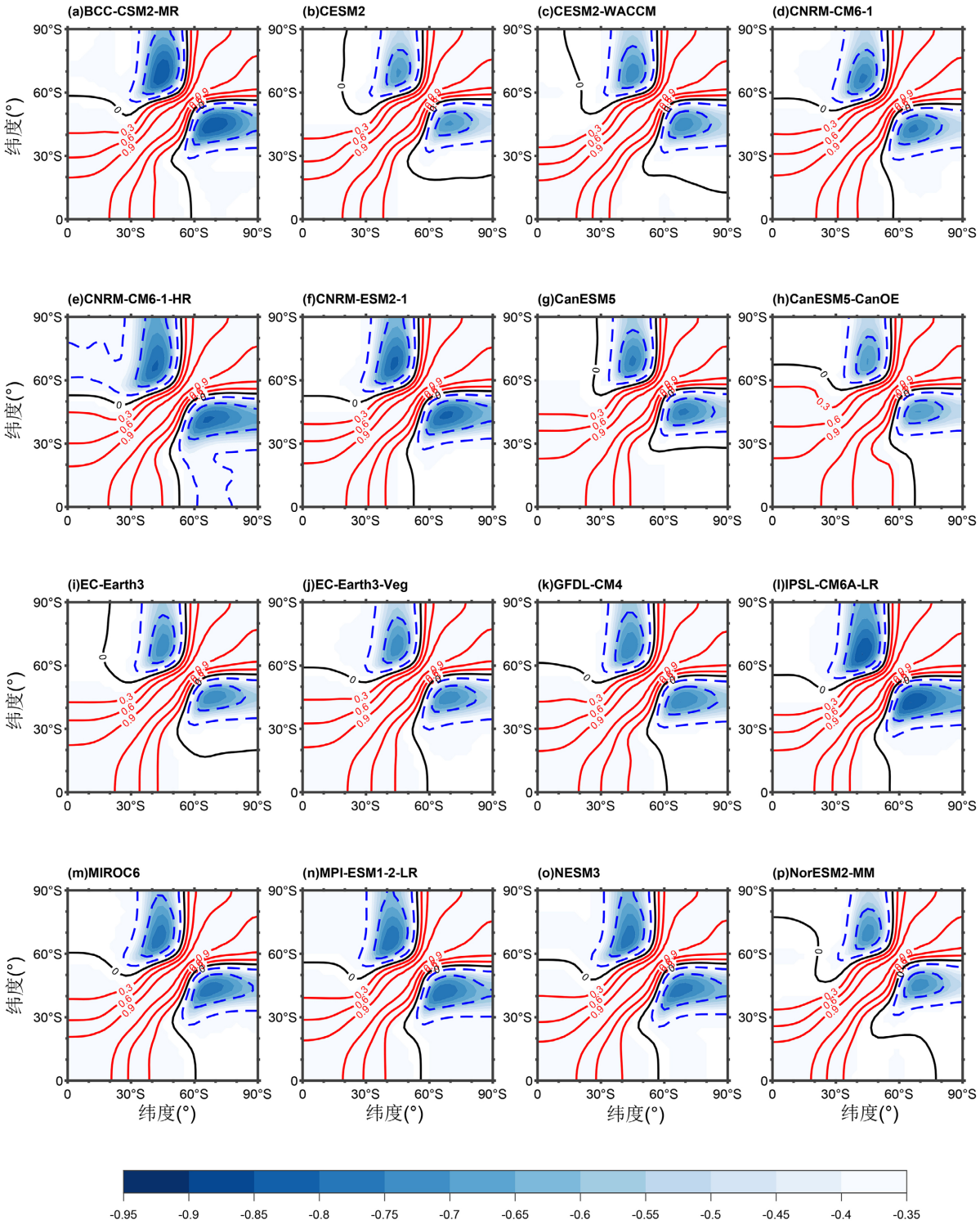


Figure 5. As in Figure 1(c), but for the cross-correlation coefficients of zonal-mean sea level pressure anomalies in the Southern Hemisphere simulated by the 16 selected CMIP6 models (contour and shading intervals are 0.3 and 0.05, respectively; solid/dashed contours denote positive/negative correlations; a transition zone between 55˚ and 60˚S is evident with negative correlations between mid- and high latitudes)

图 5. 同图 1(c)，但为经泰勒图筛选后的 16 个 CMIP6 模式所模拟的南半球纬向平均海平面气压异常的互相关系数(等值线和填色间隔分别为 0.3 和 0.05，实线/虚线分别表示正/负相关；以 55˚~60˚S 为过渡带，中高纬度呈负相关)

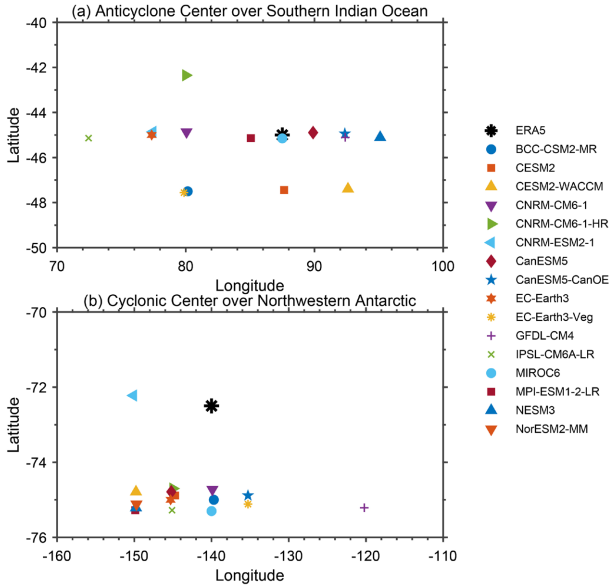


Figure 6. Asymmetric components of the SAM simulated by the 16 selected CMIP6 models: (a) positions of the cyclonic center over northwestern Antarctica; (b) positions of the anticyclonic center over the southern Indian Ocean

图 6. 筛选后的 16 个 CMIP6 模式模拟的 SAM 非对称结构：(a) 南印度洋上空反气旋式中心位置分布；(b) 西北南极洲上空气旋式中心位置分布

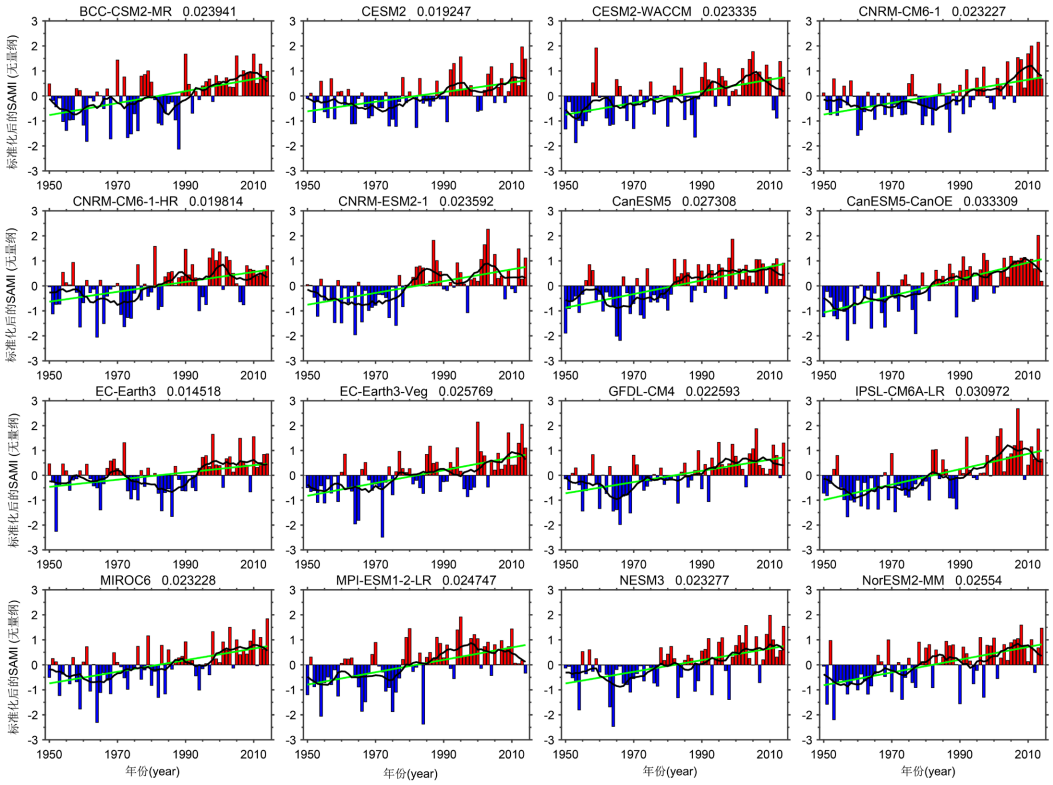


Figure 7. Time series of the SAMI simulated by the 16 selected CMIP6 models, 9-year Gaussian-type filtered variations (thick black solid lines), and linear trends (green solid lines). The shaded areas mark two typical decadal epochs: negative phase in the 1960s and positive phase from the 1990s to the 2000s

图 7. 筛选后的 16 个 CMIP6 模式模拟的 SAMI 时间序列、9 年高斯型滤波曲线(粗黑色实线)及其线性趋势(绿色实线)；阴影区域标注了 1960 年代负位相与 1990~2000 年代正位相两个典型年代际时段

图 8 进一步量化了各模式对 SAMI 趋势及去趋势后变率的模拟能力。就长期趋势而言，大多数模式的 SAMI 趋势值落在 ERA5 趋势的 95%置信区间内，其中 CNRM-ESM2-1、MIROC6 和 NESM3 的趋势最为接近观测值；而个别模式(如 EC-Earth3)的趋势显著弱于观测。在去趋势后的年际－年代际变率方面，横轴显示各模式 SAMI 与 ERA5 去趋势 SAMI 之间的相关系数普遍较低，仅有 CESM2、MPI-ESM1-2-LR、EC-Earth3 和 GFDL-CM4 四个模式达到统计显著水平，表明模式对 SAM 年际变率的模拟仍存在较大不确定性，且观测与模拟之间的关联在一定程度上受长期线性趋势的贡献。综合长期趋势和去趋势变率两方面的表现，CESM2、GFDL-CM4 和 MPI-ESM1-2-LR 三个模式在再现 SAM 时间变率方面表现最优，因此选取这三个模式构成选定多模式集合并用于后续趋势分析。

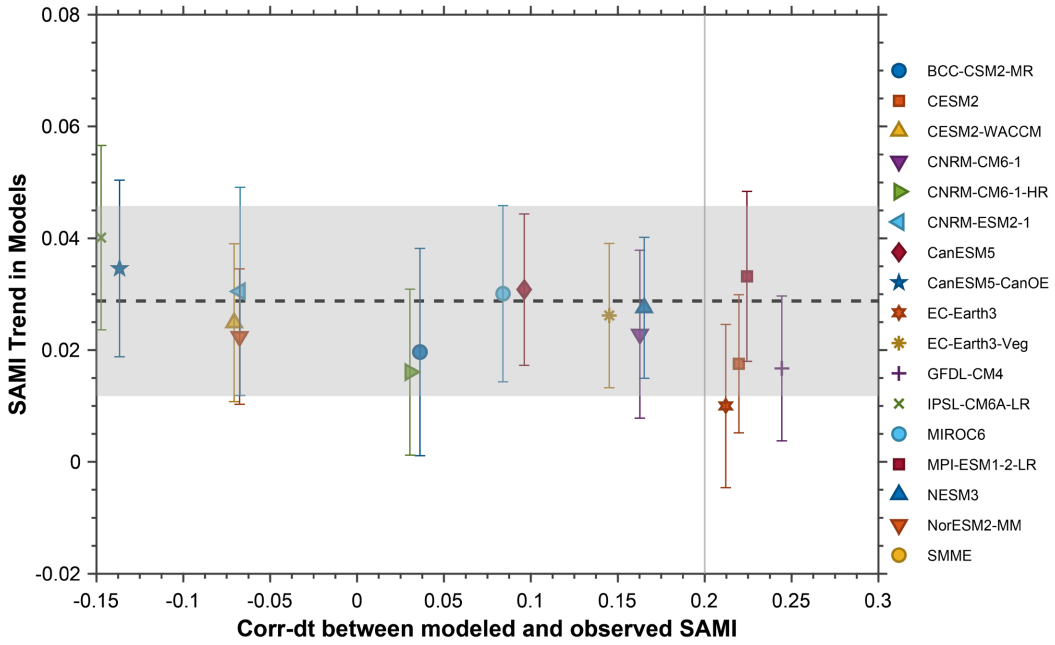


Figure 8. Scatterplot of the correlation coefficients between the detrended SAMI from each CMIP6 model and ERA5 versus the linear trend of the model SAMI. The long dashed line indicates the SAMI trend from ERA5; the shaded area denotes the 95% confidence interval of the ERA5 trend; error bars represent the 95% confidence interval for each model trend

图 8. 各 CMIP6 模式 SAMI 与 ERA5 去趋势 SAMI 相关系数与模式 SAMI 线性趋势的散点图(长虚线表示 ERA5 的 SAMI 趋势值；阴影区域表示 ERA5 趋势的 95%置信区间；误差棒表示各模式趋势的 95%置信区间)

图 9 给出了 SSP5-8.5 情景下 SAMI 在不同阶段的线性趋势。划分为三个子阶段：臭氧损耗期(1980~2000 年)、臭氧恢复前期(2001~2050 年)及臭氧恢复后期(2051~2100 年)。在臭氧损耗期内，绝大多数模式显示出较强的正趋势，该时段正值南极平流层臭氧急剧损耗的阶段，与观测事实一致。在臭氧恢复前期，各模式趋势的正负和显著性存在分歧，反映出臭氧恢复与温室气体增加的相反效应在此阶段处于此消彼长的竞争状态。进入臭氧恢复后期，随着温室气体强迫的持续增强而臭氧强迫趋于稳定，大多数模式显示出显著的正趋势。值得注意的是，SMME 在三个时段内均呈现出统计上显著的正趋势，且趋势值在各时段均大于 MME 结果；而 MME 的结果仅在臭氧损耗期显著，在 2000 年之后的两个时段均缺乏统计显著性。这说明基于 SMME 方法能够有效提升信号的信噪比，凸显出温室气体强迫对 SAM 长期变化的贡献。总体而言，在 SSP5-8.5 高排放情景下，由于温室气体的大量持续增加，16 个模式中的大多数均产生一致的 SAM 正趋势。尽管臭氧强迫在二十一世纪中叶以后逐渐趋于零，但持续上升的温室气体浓度仍足以使 SAM 趋势达到与近期观测相当的幅度，且预计 2050 年之后的 SAMI 趋势将强于近期历史时期。

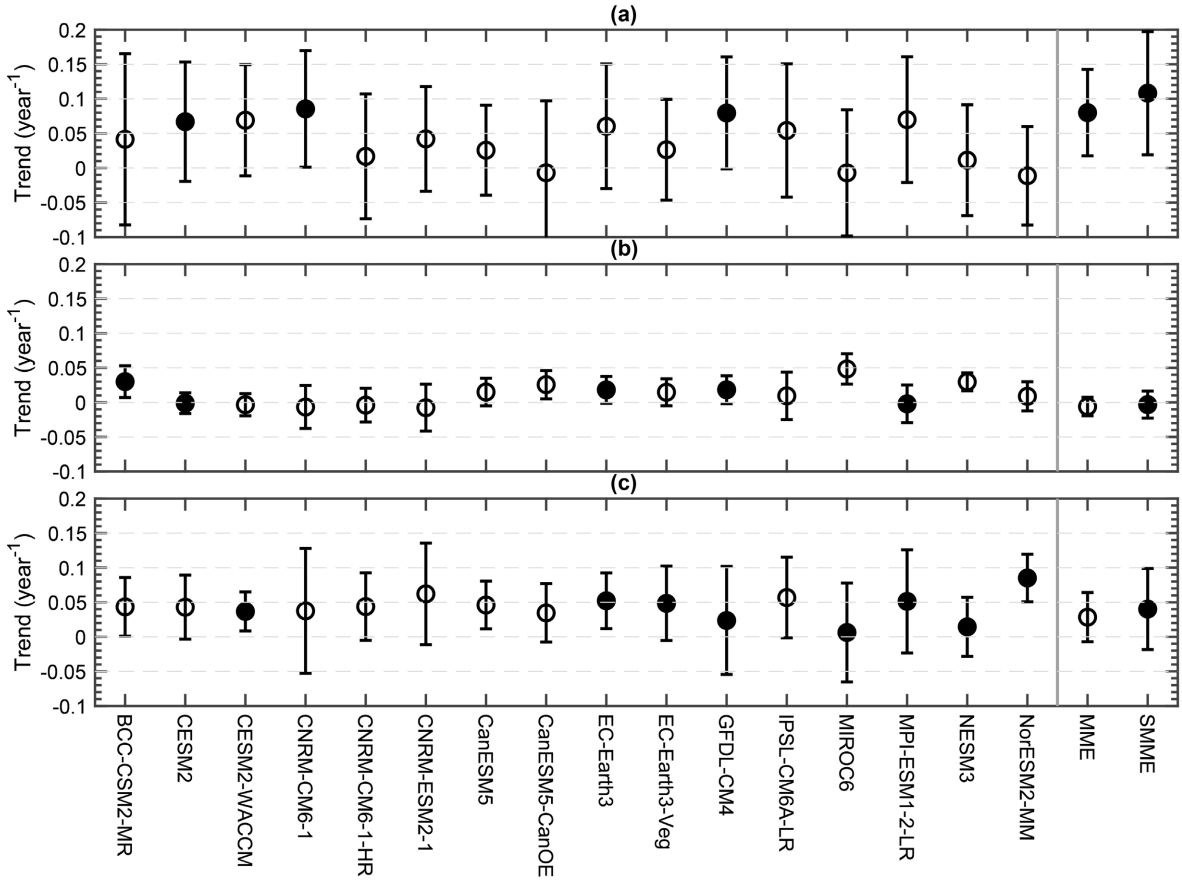


Figure 9. Linear trends of the SAMI during (a) 1980~2000, (b) 2001~2050, and (c) 2051~2100. Solid (open) circles denote trends significant (insignificant) at the 95% confidence level; error bars represent the 95% confidence intervals for each model trend

图 9. SAMI 在(a) 1980~2000 年、(b) 2001~2050 年、(c) 2051~2100 年三个时段的线性趋势(实心/空心圆表示在 95%置信水平下显著/不显著；误差棒表示各模式趋势的 95%置信区间

需要指出的是，本文 SMME 均采用离线指定臭氧场。离线指定方案缺少臭氧–辐射–动力反馈，可能低估臭氧损耗期 SAM 的增强幅度；然而，SMME 在臭氧恢复期仍呈现显著正趋势，表明温室气体强迫对 SAM 长期变化的贡献在离线指定方案下依然稳健。交互式化学模式未入选 SMME，可能与其对历史 SAM 趋势的模拟偏差有关，这值得后续研究进一步探讨。

4. 结论与讨论

本文利用 CMIP6 多模式模拟数据，系统评估了各模式对南半球环状模(SAM)空间型态及时间变率的模拟能力，并基于 SMME 方法分析了 SAM 在臭氧损耗期与恢复期的变化特征。主要结论如下：

1) 基于泰勒图的空间评估表明，多数 CMIP6 模式能够合理再现 SAM 的纬向对称与非对称结构。经严格筛选(COR > 0.9, 0.9 < STD < 1.1, RMSE < 0.5)，从 29 个模式中筛选 16 个性能优良的模式。整体来看，CMIP6 模式对 SAM 空间型态解释方差的模拟较收敛，与观测偏差较小，对纬向对称结构的刻画也较接近观测。

2) 对 SAM 时间变率的评估显示，16 个筛选模式均能再现近几十年来 SAM 的长期正趋势，且在年代际位相模拟方面总体表现良好，仅 EC-Earth3-Veg 模式未能准确捕捉观测中的年代际位相转换。综合趋势与去趋势变率表现，CESM2、GFDL-CM4 和 MPI-ESM1-2-LR 三个模式在再现 SAM 时间变率方面

表现最优。

3) SSP5-8.5 情景下的趋势分析表明，SMME 在臭氧损耗期、恢复前期和恢复后期均呈现显著正趋势，且各时段趋势值均大于 MME；而 MME 在 2000 年之后缺乏统计显著性。SMME 所选三个模式均采用离线指定臭氧场，其显著正趋势说明温室气体强迫对 SAM 长期变化的贡献不依赖于交互式化学反馈，进一步支持 SMME 能有效提升信号信噪比的结论。

基金项目

国家自然科学基金项目(42006017)，山东省自然科学基金项目(ZR2019ZD12, ZR2019BD038)资助。

参考文献

[1] Gong, D. and Wang, S. (1999) Definition of Antarctic Oscillation Index. *Geophysical Research Letters*, **26**, 459-462. https://doi.org/10.1029/1999gl900003

[2] Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M. (2000) Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. *Journal of Climate*, **13**, 1000-1016. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:amitec>2.0.co;2

[3] Li, J. and Wang, J.X.L. (2003) A Modified Zonal Index and Its Physical Sense. *Geophysical Research Letters*, **30**. https://doi.org/10.1029/2003gl017441

[4] Lorenz, D.J. and Hartmann, D.L. (2001) Eddy-Zonal Flow Feedback in the Southern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 3312-3327. https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<3312:ezffit>2.0.co;2

[5] Fogt, R.L. and Marshall, G.J. (2020) The Southern Annular Mode: Variability, Trends, and Climate Impacts across the Southern Hemisphere. *WIREs Climate Change*, **11**, e652. https://doi.org/10.1002/wcc.652

[6] Nan, S. and Li, J. (2003) The Relationship between the Summer Precipitation in the Yangtze River Valley and the Boreal Spring Southern Hemisphere Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, **30**. https://doi.org/10.1029/2003gl018381

[7] Zhang, X., He, B., Liu, Y., Bao, Q., Zheng, F., Li, J., *et al*. (2021) Evaluation of the Seasonality and Spatial Aspects of the Southern Annular Mode in CMIP6 Models. *International Journal of Climatology*, **42**, 3820-3837. https://doi.org/10.1002/joc.7447

[8] Morgenstern, O. (2021) The Southern Annular Mode in 6th Coupled Model Intercomparison Project Models. *Journal of Geophysical Research*: *Atmospheres*, **126**, e2020JD034161. https://doi.org/10.1029/2020jd034161

[9] Lee, J., Sperber, K.R., Gleckler, P.J., Taylor, K.E. and Bonfils, C.J.W. (2021) Benchmarking Performance Changes in the Simulation of Extratropical Modes of Variability across CMIP Generations. *Journal of Climate*, **34**, 6945-6969. https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0832.1

[10] Coburn, J. and Pryor, S.C. (2021) Differential Credibility of Climate Modes in CMIP6. *Journal of Climate*, **34**, 8145-8164. https://doi.org/10.1175/jcli-d-21-0359.1

[11] Zheng, F., Li, J., Clark, R.T. and Nnamchi, H.C. (2013) Simulation and Projection of the Southern Hemisphere Annular Mode in CMIP5 Models. *Journal of Climate*, **26**, 9860-9879. https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00204.1

[12] Fogt, R.L., Perlwitz, J., Monaghan, A.J., Bromwich, D.H., Jones, J.M. and Marshall, G.J. (2009) Historical SAM Variability. Part II: Twentieth-Century Variability and Trends from Reconstructions, Observations, and the IPCC AR4 Models. *Journal of Climate*, **22**, 5346-5365. https://doi.org/10.1175/2009jcli2786.1

[13] Hu, Y., Tian, W., Dong, Y. and Zhang, J. (2024) Evaluating the Seasonal Responses of Southern Ocean Sea Surface Temperature to Southern Annular Mode in CMIP6 Models. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2024GL108782. https://doi.org/10.1029/2024gl108782

[14] Boschat, G., Lim, E., Mindlin, J., Breul, P., Butler, A.H., Karpechko, A.Y., *et al*. (2026) CMIP6 Model Biases in Antarctic Stratospheric Vortex Dynamics and Their Implications for Southern Hemisphere Circulation Projections. *Journal of Climate*, **39**, 4561-4577. https://doi.org/10.1175/jcli-d-26-0097.1

[15] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., *et al*. (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

[16] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., *et al*. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization. *Geoscientific Model Development*, **9**, 1937-1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

[17] Taylor, K.E. (2001) Summarizing Multiple Aspects of Model Performance in a Single Diagram. *Journal of Geophysical*

Research: *Atmospheres*, **106**, 7183-7192. https://doi.org/10.1029/2000jd900719

[18] Pyper, B.J. and Peterman, R.M. (1998) Comparison of Methods to Account for Autocorrelation in Correlation Analyses of Fish Data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **55**, 2127-2140. https://doi.org/10.1139/f98-104

[19] Wu, Z., Li, J., He, J. and Jiang, Z. (2006) Occurrence of Droughts and Floods during the Normal Summer Monsoons in the Mid- and Lower Reaches of the Yangtze River. *Geophysical Research Letters*, **33**, L05813. https://doi.org/10.1029/2005gl024487

[20] Feng, J., Li, J. and Li, Y. (2010) Is There a Relationship between the SAM and Southwest Western Australian Winter Rainfall? *Journal of Climate*, **23**, 6082-6089. https://doi.org/10.1175/2010jcli3667.1

[21] Feng, J., Li, J. and Xu, H. (2013) Increased Summer Rainfall in Northwest Australia Linked to Southern Indian Ocean Climate Variability. *Journal of Geophysical Research*: *Atmospheres*, **118**, 467-480. https://doi.org/10.1029/2012jd018323