

中上新世是否存在“永久厄尔尼诺”状态 ——一个耦合模式结果*

张 冉^① 姜大膀^{①②} 田芝平^②

(①中国科学院气候变化研究中心,北京 100029; ②中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心,北京 100029)

摘要 根据中上新世模拟比较计划(PlioMIP)试验设计方案,利用通用气候系统模式(CCSM4)低分辨率版本就该时期是否存在“永久厄尔尼诺”状态给予了数值模拟研究。结果表明,相对于工业革命前期,中上新世海洋表面温度(SST)在赤道太平洋地区东部比西部增温显著,导致赤道太平洋地区东西方向上的SST梯度减弱;然而,模拟的中上新世热带太平洋SST仍然以厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)循环为主,且ENSO循环并未减弱,换言之,试验结果不支持中上新世存在“永久厄尔尼诺”状态。

关键词 中上新世 永久厄尔尼诺 CCSM4 数值模拟

中图分类号 P467, P534.62⁺² **文献标识码** A

古气候模拟是古气候研究中的重要手段,通过数值模拟研究方法可以再现过去气候的时空演化特征,研究不同强迫因子的气候效应,并与地质证据进行相互对比,分析与理解过去气候变化机制,在不断充实我们关于气候系统理论知识与检验气候模式模拟能力的同时,最终为更好地预估未来气候变化提供帮助。到目前为止,科研人员已就过去气候变化开展了大量数值模拟研究工作^[1-7],内容涉及不同时期和多种气候因子的强迫作用。

中上新世暖期(约3.264~3.025Ma)是古气候研究领域的重要时期,此时海陆主体配置与现在相近^[8]。中上新世暖期全球平均气温比工业革命前高出约2~3K,该时期气候状况与气候模式预估的21世纪末期气候有相似性^[9]。鉴于中上新世暖期的重要研究意义,国际古气候模拟比较计划(PMIP)第三阶段已将中上新世暖期作为其研究时段之一,并将子计划命名为中上新世模拟比较计划(PlioMIP)^[10]。美国地质调查局PRISM(Pliocene Research Interpretation and Synoptic Mapping)团队从1990s就开始进行中上新世古环境重建工作^[11],并先后发布过多次PRISM重建数据。最新的重建数据PRISM3于2007年发布,包括中上新世的海洋表面温度(SST)、地形、植被、冰盖范围以及大气CO₂

浓度等数据,相较之前的重建数据均有不同程度的改进^[12]。PRISM边界条件已被多次用于中上新世气候模拟研究,用以探讨中上新世和现在气候的差异^[13-16]、中上新世气候增暖的可能机制^[15,17]以及评估不同模式对中上新世气候的模拟能力。PlioMIP也使用PRISM3为模拟所用的边界条件^[10]。

厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)是当代气候系统中年际尺度上重要的大气-海洋相互作用现象,尽管其中心区域位于赤道太平洋,但ENSO却可以影响到全球许多地区的天气、气候和生态系统,因此,理解和预测ENSO对科学界和公众都具有重要意义^[18]。由于赤道太平洋SST的气候平均态和年际变率间的关系还不确定,对于未来这一年际尺度模态的发展还存在争议^[19]。这一问题的解决不但依赖于气候动力学的发展及耦合气候模式的改进,也可通过研究过去暖期ENSO变化给予启示。中上新世暖期就是研究过去暖期ENSO的重要时段之一。

是否存在“永久厄尔尼诺”状态是中上新世气候研究的核心问题之一。利用Mg/Ca重建的赤道太平洋海洋表面温度(SST)显示赤道太平洋西部比东部地区有更暖且稳定的SST存在^[20],由此认为中上新世一直处于拉尼娜状态。但从相同的钻孔地点,Wara等^[21]研究认为中上新世时期赤道太平洋

第一作者简介:张冉男 32岁 博士后 古气候模拟专业 E-mail:zhangran@mail.iap.ac.cn

*中国科学院战略性先导科技专项项目(批准号:XDB03020602)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KZCX2-EW-QN202)和国家自然科学基金项目(批准号:41175072和41222034)共同资助

东部 SST 异常增暖,而赤道太平洋西部 SST 不变或减小,导致中上新世赤道太平洋东西向 SST 梯度减弱;同时赤道太平洋东部冷舌区变弱或消失^[22],这种状态被称为“永久厄尔尼诺”^[23]。由于海洋沉积记录时间分辨率通常较粗,这些记录只能反映 SST 气候平均状态,而不能给出其季节或年际变化特征,所以这里“永久厄尔尼诺”概念仅指厄尔尼诺式的气候平均态,而不考虑年际尺度变率问题^[24]。厄尔尼诺状态最初是指当代气候背景下赤道中东太平洋 SST 异常升高的现象,并存在 2~7 年的准周期循环,从这个意义上讲,“永久厄尔尼诺”状态应理解为赤道中东太平洋增温强于赤道西太平洋的气候平均态,且 ENSO 循环不存在或明显减弱^[22]。随着中上新世高分辨率地质记录的发现及耦合模式模拟的实现,使得中上新世赤道太平洋 SST 年际变率研究成为可能,所以 ENSO 循环是否减弱也成为衡量“永久厄尔尼诺”状态存在与否的标准之一。

中上新世是否存在“永久厄尔尼诺”状态还存在争议。为了全面分析中上新世热带太平洋 SST 气候态及 ENSO 循环,除了依赖于高分辨率地质记录,还需要进行海气耦合模式的试验研究,从数值模拟方面阐释中上新世是否存在“永久厄尔尼诺”状态。在 PRISM2 边界条件下, Haywood 等^[25]曾利用 HadCM3 海气耦合模式研究发现,中上新世时赤道太平洋 SST 东西向梯度减弱,但模式结果依然表现出明显的 ENSO 循环,且 ENSO 循环并未减弱; Zhang 等^[26]利用 NorESM-L 海气耦合模式在 PRISM3 边界条件下研究得到中上新世也存在显著的 ENSO 循环,但 ENSO 循环明显减弱。所以,从数值模拟的角度,都可模拟出中上新世存在 ENSO 循环,但中上新世 ENSO 循环是否减弱?仍然是需要深入探讨的科学问题^[26]。

到目前为止,利用海气耦合模式对中上新世是否存在“永久厄尔尼诺”状态的研究工作十分有限,对于模拟结果的模式依赖程度尚不明确。基于 PlioMIP,本研究旨在利用新一代的气候系统模式模拟中上新世气候,并重点分析中上新世是否存在“永久厄尔尼诺”状态。

1 模式与试验设计

1.1 模式介绍

本文所用模式为美国国家大气研究中心(NCAR)研发的通用气候系统模式 CCSM4。CCSM4

是一个全球海洋-大气-陆面-海冰耦合的气候模式,是 CCSM 模式的较新版本,此模式在许多方面相对于 CCSM3 都得到了改进^[27]。本文采用的是 CCSM4 的低分辨率版本,大气模式 CAM4 分辨率为 T31 谱动力内核,水平分辨率为 $3.75^\circ \times 3.75^\circ$,垂直方向上为 26 层;陆面模式 CLM4 与 CAM4 使用相同的水平分辨率,每一个格点可包含多种地表类型,对于植被也可同时包含多种植被功能型;海洋模式 POP2 使用近似 $3^\circ \times 3^\circ$ 的水平分辨率,垂直方向包括 60 层,最深达到 5.5km;海冰模式 CICE4 使用与 POP2 相同的水平分辨率。关于 CLM4, CICE4 和 POP2 的模块改进细节及模拟能力的评估请参考文献^[27]及其所引文献。

CCSM4 低分辨率版本对工业革命前的气候模拟评估请参考文献^[28],总体而言,该模式对全球气候具有合理的模拟能力。此外,该模式对东亚现代大尺度气候特征也具有较好的模拟能力^[29]。鉴于海气耦合模拟试验通常需要运行上千年才能达到平衡,低分辨率版本相对高分辨率版本而言需要的计算资源较少,可在较短时间内达到平衡,加之古气候模拟研究对各物理参数化过程细节要求并不高,所以低分辨率版本已经能够满足本项工作的需要。

需要特别指出的是,与以往 CCSM 版本相比,CCSM4 较大地改进了对 ENSO 的模拟^[27]。CCSM4 中对流方案的改进使 ENSO 周期和振幅的模拟更加真实,这些改进也引入到低分辨率版本中,对模式发展具有重要影响。Niño3 区($5^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}$, $150^\circ \sim 90^\circ\text{W}$) SST 模拟结果的谱分析显示,高分辨率版本和 low-resolution 版本模拟的周期均主要分布于 2~6 年,与观测 SST 谱分析结果较为一致,但高分辨率版本模拟的振幅更大^[28]。所以 CCSM4 低分辨率版本可以用来进行中上新世 ENSO 的模拟研究。

1.2 试验设计

本文包括两个试验,一个是工业革命前参照试验(PI),一个是中上新世试验(MP),两个试验使用相同的海陆分布配置。根据 PlioMIP 试验设计方案(http://geology.er.usgs.gov/eespteam/prism/prism_pliomip_data.html),MP 中相对 PI 改变了大气 CO_2 浓度、地表类型和地形高度;MP 中 CO_2 含量为 405ppm,而 PI 中为 280ppm;MP 中地表类型采用中上新世的重建数据^[30];此外,MP 中地形为 PI 中地形加上 PRISM3 提供的中上新世地形^[31]和现在地形^[32]之差;MP 海洋初始场为 PRISM3 提供的中上

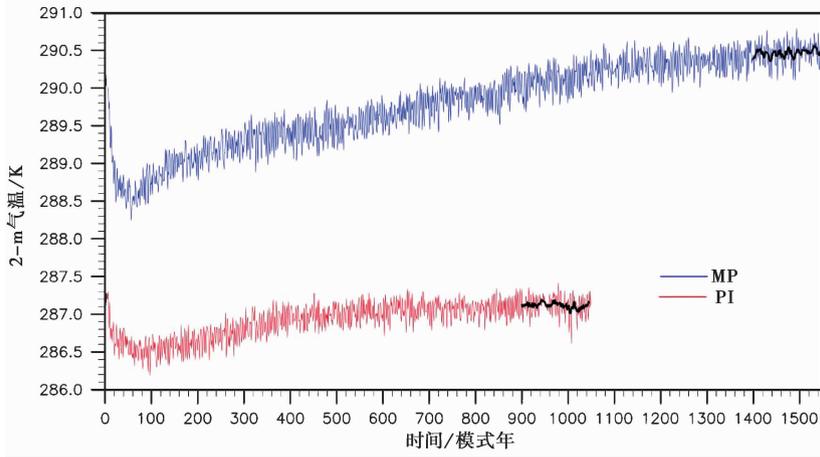


图1 MP与PI模拟的全球年均 T_{2m} 时间演化序列(单位:K)

黑线是9年滑动平均,且为本文分析所用时段

Fig. 1 Time series of global annual mean surface air temperature for MP and PI(units:K), the black line is 9-year running mean

新世深海温度数据^[33]。除了上述更改,两个试验中太阳常数、气溶胶和轨道参数等设置均相同。

MP运行了1550年,PI运行了1050年,两个试验的年均地表气温(T_{2m})时间演变序列请见图1,MP和PI的 T_{2m} 分别从1100年和400年后线性趋势变小,且最后150年 T_{2m} 线性趋势分别为 $0.037\text{K}/100\text{a}$ 和 $-0.026\text{K}/100\text{a}$,趋势均在 $\pm 0.05\text{K}/100\text{a}$ 范围内,所

以可认为两个试验均达到了准平衡态^[34]。这里分别取两个试验的最后150年结果进行下述分析。

2 模拟结果

2.1 SST

相对于PI,MP模拟的年均SST变化表现为整个热带太平洋异常增温(图2e)。赤道太平洋东部

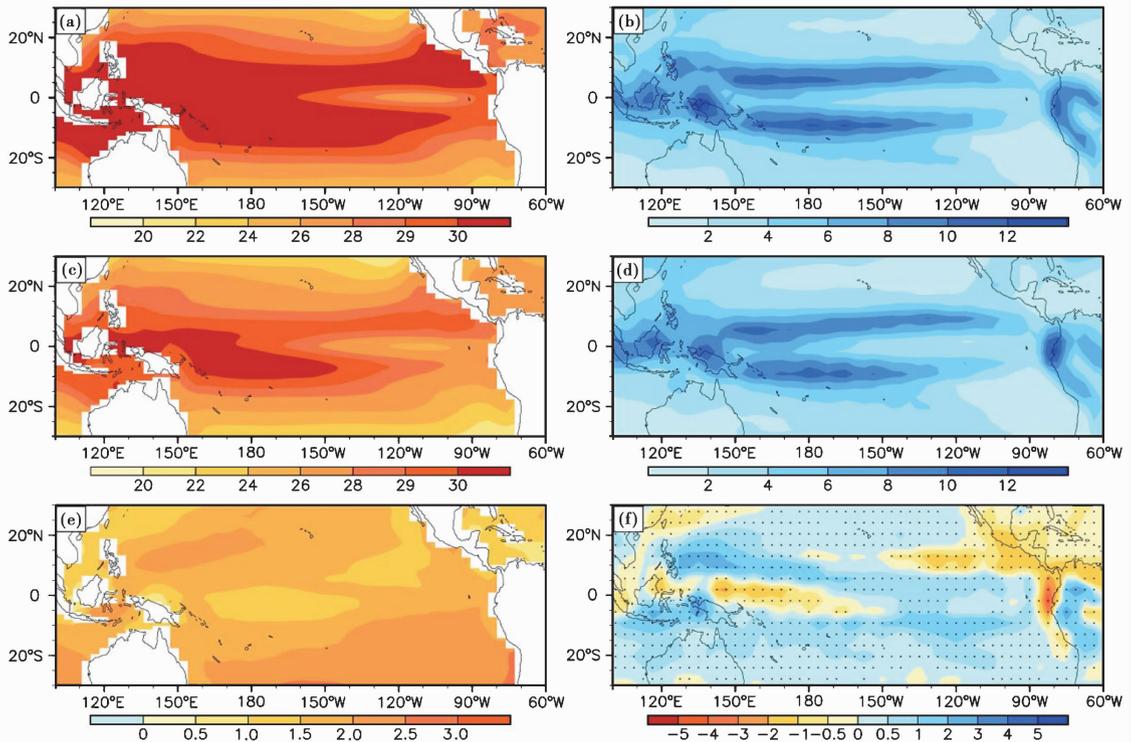


图2 模拟的年均SST(左列,单位:K)和降水(右列,单位:mm/天)

(a,b)为MP结果,(c,d)为PI结果,(e,f)为MP与PI结果之差;(f)的打点区为 t 检验通过95%信度水平的区域

Fig. 2 Annual mean SST(left column,units:K) and precipitation(right column,units:mm/day). (a,b)are for MP, (c,d)are for PI,(e,f)are differences between MP and PI. In (f),areas with confidence level exceeding 95% are dotted

的增温幅度要大于西部的增幅,但 MP 时赤道西太平洋 SST 仍然比赤道东太平洋高(图 2a 和 2c)。因此,MP 时模拟的赤道太平洋东西方向 SST 梯度较 PI 时减弱,但赤道太平洋 SST 西高东低的格局并没有改变。

比较而言,赤道太平洋以南和以北地区的东西方向 SST 梯度变化与赤道地区有所不同,赤道以南地区东西向 SST 梯度减弱幅度要大于赤道地区,而赤道以北地区东西向 SST 梯度却出现增加(图 3),这些与赤道南北两侧降水、地表风应力等气候要素的不同变化密切联系在一起。

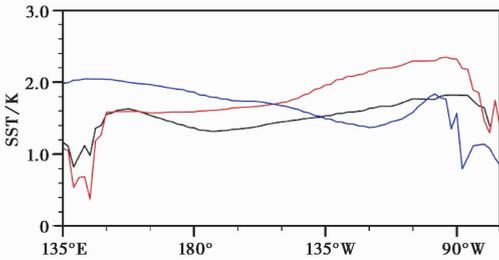


图 3 MP 与 PI 模拟年均 SST 之差的区域经向平均(单位:K),黑线代表 $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ 经向平均,蓝线代表 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}\text{N}$ 经向平均,红线代表 $15^{\circ} \sim 5^{\circ}\text{S}$ 经向平均

Fig. 3 The meridional-averaged annual mean SST differences (units:K) between MP and PI. Black line is within $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, blue line is within $5^{\circ} \sim 15^{\circ}\text{N}$ and red line is within $15^{\circ} \sim 5^{\circ}\text{S}$

2.2 降水和相对湿度

MP 相对 PI 模拟的全球年均降水出现增加。值得注意的是,CCSM4 和之前版本^[35]均模拟出双赤道辐合带(ITCZ),一个出现在赤道以北,一个出现在赤道以南。ITCZ 东部降水高值区范围存在差异,南 ITCZ 降水要比北 ITCZ 弱(图 2d)。在热带太平洋地区,MP 相对 PI 模拟的年均降水变化以增加为主(图 2f),增加区出现在热带太平洋的西北部和东南部,而在热带太平洋中西部和东北部则出现减少。这种变化表明 MP 时热带太平洋东部北 ITCZ 减弱而南 ITCZ 增强,所以 MP 时 ITCZ 相对赤道变的更为对称(图 2b)。

MP 与 PI 模拟的 850hPa 和 500hPa 年均相对湿度变化与年均降水变化有较好的对应关系(图 4a 和 4b)。PI 时 850hPa 和 500hPa 相对湿度在 ITCZ 附近较大(图略)。相对 PI 而言,MP 模拟出现的相对湿度增加区对应于降水增加区,而相对湿度减少区对应于降水减少区(图 2f)。

2.3 地表风应力和垂直速度

MP 相对 PI 模拟的地表风应力也发生显著变化(图 5a 和 5b)。热带太平洋地区地表风应力均以东风为主,在赤道以北为东北信风,在赤道以南为东南

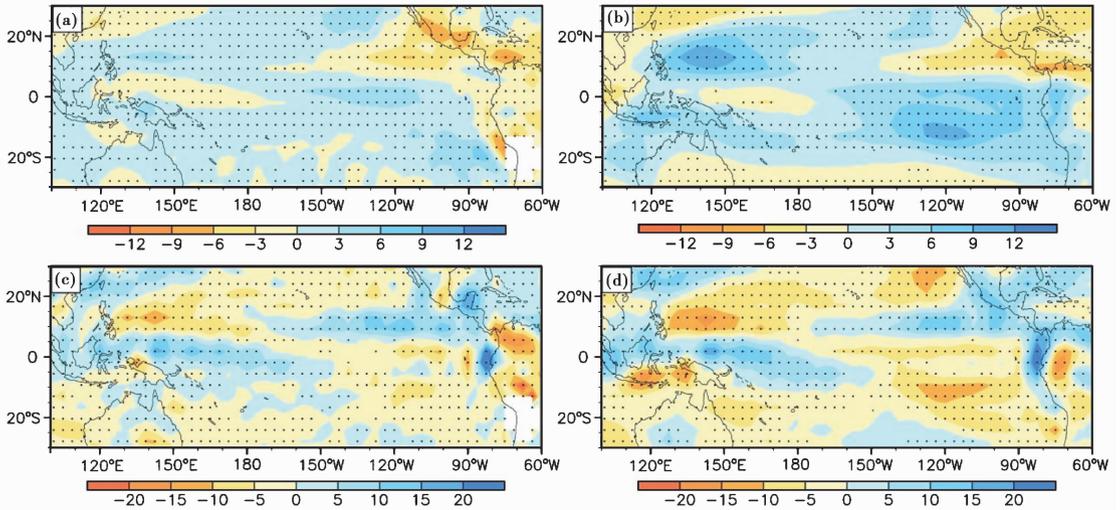


图 4 MP 与 PI 模拟的年均相对湿度(a,b;单位:%)与垂直速度(c,d;单位:mb/天)之差(a,c)为 850hPa,(b,d)为 500hPa;空白区表示地形高度大于 1500m 的地区,垂直速度正值代表向下运动,负值代表向上运动;打点区为 t 检验通过 95% 信度水平的区域

Fig. 4 Annual mean relative humidity (a, b; unit:%) and vertical velocity (c, d; unit: mb/day) between MP and PI. (a, c) are for 850hPa, (b, d) are for 500hPa. In (a, c), the areas where the height is greater than 1500m are left blank. For vertical velocity, the positive values indicate the downward movements and negative values indicate the upward movements. Areas with confidence level exceeding 95% are dotted

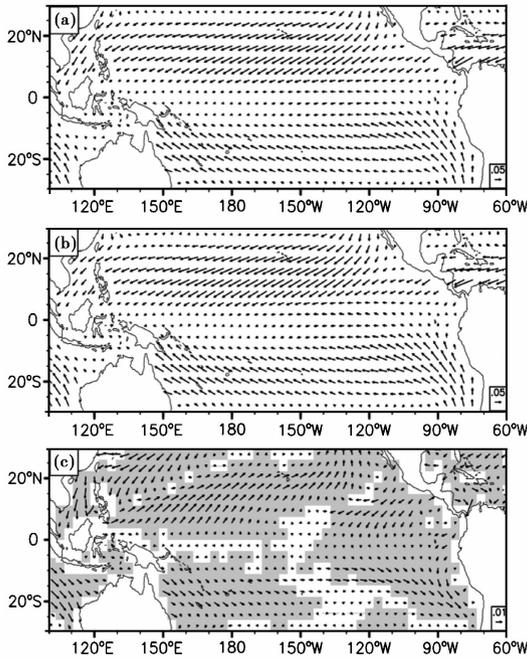


图5 MP(a)与PI(b)模拟的年均地表风应力(单位: N/m^2)及MP与PI模拟的年均地表风应力之差(c)(c)中阴影区为 t 检验通过95%信度水平的区域

Fig. 5 Annual mean surface wind stress (units: N/m^2). (a) is for MP, (b) is for PI, (c) is the difference between MP and PI. In (c), areas with confidence level exceeding 95% are shaded

信风。相对PI,MP在赤道以北中西部东北信风减弱,而在赤道以北东部东北信风加强,相比之下,在赤道以南地区东南信风均以减弱为主(图5c)。

与降水及地表风应力分布相对应,PI模拟的850hPa和500hPa年均垂直运动在ITCZ附近表现为上升运动,而在其他地区表现为下沉运动,且在热带太平洋东部冷舌区下沉运动较明显(图略)。MP相对PI的垂直运动变化与地表风应力变化相对应(图4c和4d),具体表现为:在赤道以北中西部东北信风减弱区出现异常增强的上升运动,赤道以北东部东北信风增强区出现异常增强的下沉运动,而在赤道以南东南信风减弱区异常的上升运动增强,且

在东部异常的上升运动增强更为明显。

总体而言,MP相对PI模拟的热带太平洋地区降水、相对湿度、地表风应力和垂直速度变化之间有良好的对应关系,而且在赤道南北存在要素间的不同变化,与赤道南北地区东西向SST梯度的不同变化密切联系在一起。具体表现为:赤道以南东西向SST梯度减弱(图3),东南信风减弱,太平洋东部出现异常的上升运动,沃克环流减弱,导致赤道太平洋以南东部降水显著增加,出现类似厄尔尼诺现象发生时的状态;相对而言,赤道太平洋以北东西向SST梯度增强(图3),其东部东北信风加强,出现异常的下沉运动,而西部东北信风减弱,出现异常的上升运动,沃克环流增强,降水在赤道太平洋以北中西部增加,而在赤道太平洋以北东部减少,出现类似拉尼娜现象发生时的状态。

2.4 ENSO 循环

为了分析MP相对PI时热带太平洋年际变率的变化,我们对热带太平洋的海洋表面温度距平(SSTA)进行了经验正交函数(EOF)分解,结果表明,MP时热带太平洋SSTA的EOF第一模态的极值中心仍位于赤道中东太平洋,这种模态与厄尔尼诺(拉尼娜)发生时的SSTA特征非常类似(图6),因此MP和PI试验中热带太平洋的主要模态均为ENSO循环。

MP和PI中Niño3区SST各月标准差见图7a。MP与PI各月间SST标准差相同的变化趋势显示MP与PI的ENSO相位一致,也说明这两个时期具有类似的ENSO循环。比较MP与PI各月标准差发现,MP所有月份SST标准差均大于PI,表明MP相对PI有更为剧烈的SST变化,显示中上新世ENSO循环出现增强,并未减弱。此外,Niño3区SST谱分析显示两个试验的谱周期比较接近(图7b),主要分布在2~8年,且最强周期均出现在4~5年附近,所

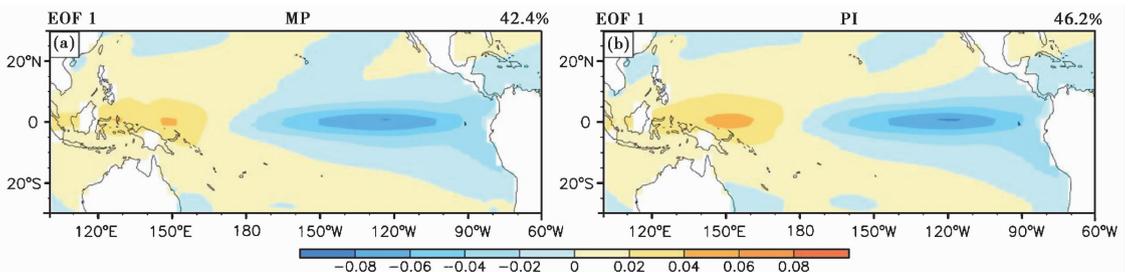


图6 MP(a)和PI(b)模拟的热带太平洋SST距平EOF的第一模态

Fig. 6 The first EOF of SSTA anomalies for MP(a) and PI(b)

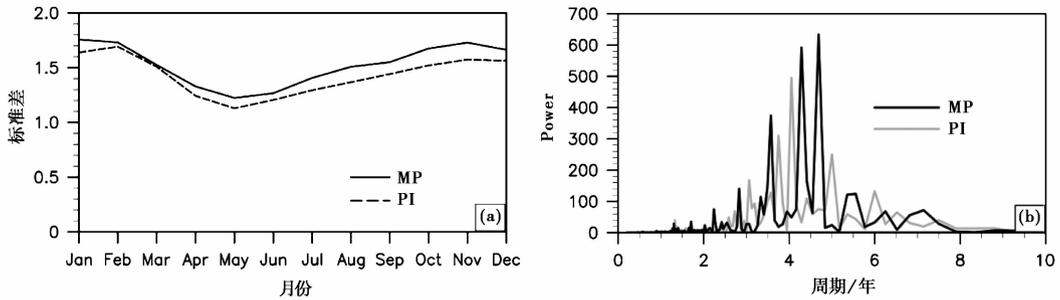


图 7 (a)MP 和 PI 模拟的 Niño3 区 SST 各月标准差, (b)MP 和 PI 模拟的 Niño3 区 SST 谱分析

Fig. 7 (a) Interannual variability of Niño3 SST and (b) spectra of Niño3 SST anomalies for MP and PI

以 MP 相对 PI 周期变化也不明显。由以上分析可见,MP 热带太平洋 SST 仍然以 ENSO 循环为主,且 ENSO 循环并未减弱。

3 讨论

通过对 MP 与 PI 热带太平洋地区气候要素模拟结果的分析发现,该地区各气候要素间的变化相互联系,且在赤道南北存在不同的变化,分析表明这与赤道太平洋南北两侧东西向 SST 梯度的不同变化相联系。由此说明热带太平洋地区东西向 SST 梯度的变化与区域其他气候要素的变化紧密联系在一起,进一步肯定了研究热带太平洋 SST 变化的重要性。

结合以往耦合模式模拟结果发现^[25,26,36],耦合模式对热带太平洋地区的模拟结果具有某些共性:中上新世相对工业革命前,赤道太平洋 SST 普遍增温,且在赤道东太平洋地区增幅要大于赤道西太平洋,表明赤道太平洋 SST 气候态发生了改变。模拟结果均显示中上新世热带太平洋 SST 以 ENSO 循环为主^[25,26]。但上述模拟的 ENSO 循环强度(表现为 Niño3 区 SST 的标准差)确有很大差异。本文结果表明 ENSO 循环出现增强,并未减弱,这与 HadCM3 的模拟结果^[25]相一致。造成上述差异的原因与模式间不同的物理参数化过程有关。为了增加模式结果可信度,仍然需要更多耦合模式模拟结果的支持。

地质记录中是否也指示中上新世存在 ENSO 循环呢?由于以往海洋沉积记录只能记录 SST 气候平均状态,而不能给出其季节或年际变化特征,所以对于中上新世年际尺度变率问题不能给予直接论断。尽管如此,如珊瑚和双壳类等生物体成为研究 SST 年际变化的重要信息载体。最近,从珊瑚记录中得到的上新世氧同位素记录存在明显的约 3.5 年周期,与现代 ENSO 的周期相一致^[37]。同时,赤道东太平洋的浮游有孔虫稳定同位素记录也显示中上新

世暖期存在持续的年际变率^[38]。

ENSO 循环也存在于过去其他暖期中。数值模拟结果显示 ENSO 变率也存在于晚中新世^[39]和始新世^[40]等其他暖期。高分辨率地质记录也显示,过去暖期普遍存在 ENSO 循环。来自北冰洋地区白垩纪时期的沉积记录呈现出强周期性,包括准两年周期、ENSO 循环以及 14 年周期^[41];全球平均温度高于现在约 10K 的早始新世时期的地质记录也存在准两年和 3~6 年周期,与 ENSO 周期一致^[42];晚中新世地中海地区纹泥厚度记录也有显著的年际变化信号,且也存在 ENSO 循环^[39]。以上证据显示,ENSO 循环可能普遍存在于过去暖期,但 ENSO 循环是增强还是减弱目前仍不确定。

4 结论

在 PlioMP 试验框架下,本文利用 CCSM4 对中上新世热带太平洋主要气候要素及上新世时期是否存在“永久厄尔尼诺”状态进行了模拟研究。试验结果显示,MP 相对 PI 时期赤道东太平洋 SST 增温幅度要大于赤道西太平洋,使得赤道东西向 SST 梯度减弱,但由于减弱幅度有限,赤道太平洋 SST 西高东低的格局没有根本性变化。中上新世模拟结果显示热带太平洋 SST 仍然以 ENSO 循环为主,而且 ENSO 循环出现增强,并未减弱,周期变化也不明显。

致谢 感谢审稿老师建设性的修改意见!

参考文献 (References)

- 1 陈隆勋,刘骥平,周秀骥等.青藏高原隆起及海陆分布变化对亚洲大陆气候的影响.第四纪研究,1999,(4):314~329
Chen Longxun, Liu Jiping, Zhou Xiuji, et al. Impact of uplift of Qinghai-Xizang Plateau and change of land-ocean distribution on climate over Asia. *Quaternary Sciences*, 1999, (4): 314~329

- 2 Liu Xiaodong, Yin Zhiyong. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, **183**(3~4): 223~245
- 3 Jin Liya, Chen Fahu, Morrill C *et al.* Causes of Early Holocene desertification in arid Central Asia. *Climate Dynamics*, 2012, **38**(7~8): 1577~1591
- 4 姜大勝. 上新世中期中国气候的数值模拟分析. 第四纪研究, 2009, **29**(6): 1033~1043
Jiang Dabang. Numerical simulation of the Middle Pliocene climate of China. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(6): 1033~1043
- 5 Zhao Yan, Harrison S. Mid-Holocene monsoons: A multi-model analysis of the inter-hemispheric differences in the responses to orbital forcing and ocean feedbacks. *Climate Dynamics*, 2012, **39**(6): 1457~1487
- 6 赵平, 陈隆勋, 周秀骥等. 末次盛冰期东亚气候的数值模拟. 中国科学(D辑), 2003, **33**(6): 557~562
Zhao Ping, Chen Longxun, Zhou Xiujie *et al.* Modeling the East Asian climate during the last glacial maximum. *Science in China (Series D)*, 2003, **33**(6): 557~562
- 7 张仲石, 王会军, 郭正堂. 温盐环流反转及其对新生代气候的影响. 第四纪研究, 2009, **29**(6): 1064~1070
Zhang Zhongshi, Wang Huijun, Guo Zhengtang. Transition of thermohaline circulation modes and its impact on Cenozoic climate. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(6): 1064~1070
- 8 Dowsett H. Faunal re-evaluation of Mid-Pliocene conditions in the western equatorial Pacific. *Micropaleontology*, 2007, **53**(6): 447~456
- 9 Jansen E, Overpeck J, Briffa K R *et al.* Palaeoclimate. In: Solomon S, Qin D, Manning M *et al.* eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007. 434~497
- 10 Haywood A M, Dowsett H J, Robinson M M *et al.* Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP): Experimental design and boundary conditions (Experiment 2). *Geoscientific Model Development*, 2011, **4**(3): 571~577
- 11 Dowsett H J, Thompson R, Barron J *et al.* Joint investigations of the Middle Pliocene climate I: PRISM paleoenvironmental reconstructions. *Global and Planetary Change*, 1994, **9**(3~4): 169~195
- 12 Dowsett H J. The PRISM palaeoclimate reconstruction and Pliocene sea-surface temperature. In: Williams M, Haywood A M, Gregory J *et al.* eds. *Deep-time Perspectives on Climate Change: Marrying the Signal from Computer Models and Biological Proxies*. London: Micropalaeontological Society, Special Publication, 2007. 459~480
- 13 Chandler M, Rind D, Thompson R. Joint investigations of the Middle Pliocene climate II: GISS GCM Northern Hemisphere results. *Global and Planetary Change*, 1994, **9**(3~4): 197~219
- 14 Haywood A M, Valdes P J. Modelling Pliocene warmth: Contribution of atmosphere, oceans and cryosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, **218**(3~4): 363~377
- 15 Jiang Dabang, Wang Huijun, Ding Zhongli *et al.* Modeling the Middle Pliocene climate with a global atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(D14): D14107, doi:10.1029/2004JD005639
- 16 Sloan L C, Crowley T J, Pollard D. Modeling of Middle Pliocene climate with the NCAR GENESIS general circulation model. *Marine Micropaleontology*, 1996, **27**(1~4): 51~61
- 17 Raymo M E, Grant B, Horowitz M *et al.* Mid-Pliocene warmth: Stronger greenhouse and stronger conveyor. *Marine Micropaleontology*, 1996, **27**(1~4): 313~326
- 18 McPhaden M J, Zebiak S E, Glantz M H. ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, 2006, **314**: 1740~1745
- 19 Karnauskas K B, Seager R, Kaplan A *et al.* Observed strengthening of the zonal sea surface temperature gradient across the equatorial Pacific Ocean. *Journal of Climate*, 2009, **22**(16): 4316~4321
- 20 Rickaby R E M, Halloran P. Cool La Niña during the warmth of the Pliocene? *Science*, 2005, **307**: 1948~1952
- 21 Wara M W, Ravelo A C, Delaney M L. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period. *Science*, 2005, **309**: 758~761
- 22 Fedorov A V, Dekens P S, McCarthy M *et al.* The Pliocene paradox (mechanisms for a permanent El Niño). *Science*, 2006, **312**: 1485~1489
- 23 Ravelo A C, Dekens P S, McCarthy M. Evidence for El Niño-like conditions during the Pliocene. *GSA Today*, 2006, **16**(3): doi: 10.1130/1052-5173
- 24 Brierley C M, Fedorov A V. Relative importance of meridional and zonal sea surface temperature gradients for the onset of the ice ages and Pliocene-Pleistocene climate evolution. *Paleoceanography*, 2010, **25**(2): PA2214, doi:10.1029/2009PA001809
- 25 Haywood A M, Valdes P J, Peck V L. A permanent El Niño-like state during the Pliocene? *Paleoceanography*, 2007, **22**(1): PA1213, doi:10.1029/2006PA001323
- 26 Zhang Zhongshi, Yan Qing, Su Jingzhi *et al.* Has the problem of a permanent El Niño been resolved for the mid-Pliocene? *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2012, **5**(6): 445~448
- 27 Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J *et al.* The Community Climate System Model version 4. *Journal of Climate*, 2011, **24**(19): 4973~4991
- 28 Shields C A, Bailey D A, Danabasoglu G *et al.* The low-resolution CCSM 4. *Journal of Climate*, 2012, **25**(12): 3993~4014
- 29 田芝平, 姜大勝, 张冉等. CCSM4.0的长期积分试验及其对东亚和中国气候模拟的评估. 大气科学, 2012, **36**(3): 619~632
Tian Zhiping, Jiang Dabang, Zhang Ran *et al.* Long-term climate simulation of CCSM 4.0 and evaluation of its performance over East Asia and China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, **36**(3): 619~632
- 30 Salzmann U, Haywood A M, Lunt D J *et al.* A new global biome reconstruction and data-model comparison for the Middle Pliocene. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, **17**(3): 432~447
- 31 Sohl L E, Chandler M A, Schmunk R B *et al.* PRISM3/GISS topographic reconstruction. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey

- Data Serie 419, 2009. 1 ~ 6
- 32 Amante C, Eakins B W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model; Procedures, data sources and analysis. Boulder, Colorado; NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC -24, 2009. 1 ~ 19
- 33 Dowsett H J, Robinson M M, Foley K M. Pliocene three-dimensional global ocean temperature reconstruction. *Climate of the Past*, 2009, **5** (4): 769 ~ 783
- 34 Braconnot P, Otto-Bliesner B, Harrison S *et al.* Results of PMIP 2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum-Part 1: Experiments and large-scale features. *Climate of the Past*, 2007, **3**(2): 261 ~ 277
- 35 Hack J, Caron J, Danabasoglu G *et al.* CCSM-CAM3 climate simulation sensitivity to changes in horizontal resolution. *Journal of Climate*, 2006, **19**(11): 2267 ~ 2289
- 36 燕 青, 张仲石, 王会军等. 上新世中期海洋表面温度变化及其与古气候重建数据对比. 科学通报, 2011, **56**(6): 423 ~ 432
Yan Qing, Zhang Zhongshi, Wang Huijun *et al.* Simulation of sea surface temperature changes in the Middle Pliocene warm period and comparison with reconstructions. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56** (9): 890 ~ 899
- 37 Watanabe T, Suzuki A, Minobe S *et al.* Permanent El Niño during the Pliocene warm period not supported by coral evidence. *Nature*, 2011, **471**: 209 ~ 211
- 38 Scropton N, Bonham S G, Rickaby R E M *et al.* Persistent El Niño-Southern Oscillation variation during the Pliocene Epoch. *Paleoceanography*, 2011, **26**(2): doi:10.1029/2010pa002097
- 39 Galeotti S, von der Heydt A, Huber M *et al.* Evidence for active El Niño Southern Oscillation variability in the Late Miocene greenhouse climate. *Geology*, 2010, **38**(5): 419 ~ 422
- 40 Huber M, Caballero R. Eocene El Niño; Evidence for robust tropical dynamics in the “hothouse”. *Science*, 2003, **299**: 877 ~ 881
- 41 Davies A, Kemp A E S, Pälike H. Tropical ocean-atmosphere controls on inter-annual climate variability in the Cretaceous Arctic. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(3): L03706, doi: 10.1029/2010GL046151
- 42 Ivany L C, Brey T, Huber M *et al.* El Niño in the Eocene greenhouse recorded by fossil bivalves and wood from Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(16): L16709, doi: 10.1029/2011GL048635

PERMANENT El Niño-LIKE CONDITIONS DURING THE MIDDLE PLIOCENE? ——A COUPLED MODEL RESULTS

Zhang Ran^① Jiang Dabang^{①②} Tian Zhiping^②

(^①Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; ^②Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

There are still uncertainties for permanent El Niño existing in Middle Pliocene. Based on the Pliocene Model Intercomparison Project, the scientific topic of whether or not permanent El Niño exists in the mid-Pliocene is investigated using the Community Climate System Model version 4 (CCSM4), a coupled ocean-atmosphere general circulation model. Model results show that the sea surface temperature (SST) warming is stronger in the eastern equatorial Pacific than that in the western equatorial Pacific, resulting in a reduced west to east SST gradient in the equatorial Pacific during the mid-Pliocene. Because of limited reduced SST gradient, the pattern with high SST in the western equatorial Pacific and low SST in the eastern equatorial Pacific does not change. Moreover, the regional change of other climate variables is also closely related with the changed west to east SST gradient in equatorial Pacific. Besides, the equatorial Pacific SSTs are also characterized by an El Niño-Southern Oscillation (ENSO) mode in the mid-Pliocene simulation and the ENSO in the mid-Pliocene is not weaker relative to the pre-industrial. In both mid-Pliocene and pre-industrial simulations, the period of ENSO is also similar to each other. In summary, model results show that permanent El Niño conditions do not exist in the mid-Pliocene.

Key words mid-Pliocene, permanent El Niño, CCSM4, numerical simulation