

积云对流参数化方案对厄尔尼诺背景下对流层——平流层 ENSO 温度信号模拟的影响

于超越, 关浩, 王婷

民航吉林空管分局, 吉林 长春 130000

DOI:10.61369/EAE.2026040022

摘 要 : 当前全球处于厄尔尼诺活跃周期, 厄尔尼诺通过海气耦合与对流层-平流层相互作用引发全球大范围温度异常, 提升气候模式对 ENSO 温度信号的模拟能力是季节气候预测的核心前提。为厘清积云对流参数化方案对对流层、平流层 ENSO 温度异常模拟的调控机理, 基于 SAMIL 全球大气环流模式, 分别采用 MNB、TDK 两套积云对流参数化方案开展数值敏感性试验, 结合 GPCP、CMAP 降水资料与多源大气再分析资料, 对比两类方案在厄尔尼诺气候背景下的模拟差异并开展偏差归因。

关 键 词 : 厄尔尼诺; 积云对流参数化; SAMIL 模式; 对流层-平流层相互作用; ENSO 温度信号; 模拟偏差

The Influence of Cumulus Convection Parameterization Scheme on Simulating Tropospheric Stratospheric ENSO Temperature Signals under El Niño Background

Yu Chaoyue, Guan Hao, Wang Ting

Civil Aviation Jilin Air Traffic Control Branch, Changchun, Jilin 130000

Abstract : Currently, the world is in an active El Niño cycle, which triggers large-scale temperature anomalies worldwide through the coupling of air sea and the interaction between the troposphere and stratosphere. Improving the simulation ability of climate models for ENSO temperature signals is the core prerequisite for seasonal climate prediction. To clarify the regulatory mechanism of cumulus convection parameterization schemes for simulating ENSO temperature anomalies in the troposphere and stratosphere, numerical sensitivity experiments were conducted using two sets of cumulus convection parameterization schemes, MNB and TDK, based on the SAMIL global atmospheric circulation model. Combined with GPCP and CMAP precipitation data and multi-source atmospheric reanalysis data, the simulation differences between the two schemes under El Niño climate background were compared and bias attribution was carried out.

Keywords : El Niño; Parameterization of cumulus convection; SAMIL mode; Tropospheric stratospheric interaction; ENSO temperature signal; simulation deviation

引言

厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 是热带太平洋最强的年际海气振荡模态, 厄尔尼诺事件发生时, 赤道中东太平洋海表温度 (SST) 异常偏高, 通过海气热量、水汽交换激发强烈热带对流, 不仅造成全球热带区域旱涝格局反转, 还通过遥相关波列、经圈环流调整、对流层-平流层波流相互作用, 引发全球对流层高低纬、平流层整层温度异常 (黄荣辉等, 2016)。平流层温度异常存在显著的季节内、季节尺度下传效应, 可反向调制对流层环流, 是中高纬冬季寒潮、持续性极端雨雪过程的重要前兆信号 (平流层-对流层相互作用研究课题组, 2022)。当前厄尔尼诺持续发展, 全球极端气候事件频发, 客观评估气候模式对厄尔尼诺背景下全球温度异常的模拟能力, 订正模式系统性偏差, 具有重要的业务预报价值。

全球大气环流模式 (AGCM) 是复现、预判厄尔尼诺气候效应的核心工具, 次网格积云对流活动无法通过模式网格直接解析, 必须依靠积云对流参数化方案进行表征。积云对流参数化直接决定热带对流强度、凝结潜热释放、对流层顶高度、穿透性对流发展程度, 是连接热带海温强迫与全球大气温度异常的核心中间过程 (李建平等, 2018)。在当前厄尔尼诺背景下, 系统对比不同积云对流参数化方案下对流层、平流层 ENSO 温度信号模拟差异, 厘清偏差形成机理, 能够为模式参数优选、系统性偏差订正提供直接支撑。

作者简介: 于超越 (1986.09-) 女, 汉族, 吉林白城人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 航空气象预报、安全管理。

一、研究内容与技术路线

本文以 SAMIL 全球大气环流模式为试验平台，设置 MNB、TDK 两组积云对流参数化敏感性试验，依托 GPCP、CMAP 两套全球降水观测资料与大气再分析资料，开展三项核心研究：（1）定量对比两套参数化方案对流层、平流层 ENSO 温度信号的模拟差异；（2）完整梳理厄尔尼诺驱动对流层—平流层温度异常的动力物理机制；（3）阐明积云对流参数化的调控路径，归因模式共性系统性偏差。

技术路线：模式敏感性试验设计→温度场、环流场、降水场空间分布与纬向平均对比→ENSO 温度异常动力机制诊断→参数化方案调控机理分析→模拟偏差归因→结论与模式优化启示。

二、试验方案、模式与资料方法

（一）SAMIL 模式简介

本文采用中国科学院大气物理研究所研发的 SAMIL 全球大气环流模式，模式具备完整的对流层—平流层垂直框架，可完整刻画积云对流、Hadley 环流、西风急流、行星波上传等关键过程，在东亚季风、热带太平洋海气振荡、对流层平流层相互作用模拟中得到广泛应用。相较于传统 AMIP 模式，SAMIL 模式对 ENSO 型海温外强迫的响应敏感度更高，更适用于厄尔尼诺气候效应模拟研究（周天军等，2019）。

（二）数值试验设计

两组试验采用相同的模式分辨率、辐射方案、边界层方案、陆面过程方案，仅更换积云对流参数化方案，下边界统一采用厄尔尼诺观测海表温度作为外强迫，积分时段覆盖厄尔尼诺冬季（12月—次年2月），保证 ENSO 大气响应充分发展。

试验1（MNB试验）：采用 MNB 积云对流参数化方案，优先表征边界层浅对流、层积云凝结与局地小尺度对流；

试验2（TDK试验）：采用 TDK 积云对流参数化方案，优化热带深对流、穿透性对流参数化过程，放宽深对流触发条件。

（三）观测与再分析资料

（1）大气再分析资料：全球多源再分析数据集，用于校验对流层（850 hPa、700 hPa、300 hPa）、平流层低层（100~200 hPa）温度异常、纬向环流、经圈环流、西风急流的模拟效果；

（2）降水观测资料：GPCP、CMAP 两套全球逐月降水数据集，规避单一观测资料不确定性，校验热带对流降水与凝结潜热释放模拟偏差；

（3）对流层顶表征：以 300 hPa 温度场表征热带对流层顶高度，300 hPa 温度偏高对应对流层顶抬升、对流活动增强。

（四）分析方法

采用合成分析法，合成 El Niño 减去 La Niña 的温度、环流、降水异常场，表征标准化 ENSO 信号；通过空间场合成图、纬向平均高度—纬度剖面图对比模拟差异；基于绝热冷却原理、Kelvin 波东传理论、Hadley 环流动力学开展物理机制诊断。

三、结果分析

（一）两套参数化方案 ENSO 温度信号整体模拟差异

整体来看（图1），SAMIL 两组试验对厄尔尼诺海温异常的响应强度显著优于 AMIP 模式，温度异常空间分布与再分析资料一致性较好，但两套方案存在显著区域分异。从赤道区域 T300 时序变化能够看出，对流层顶高度年际演变和 ENSO 冷暖事件高度对应，TDK 方案对流层顶抬升幅度整体高于 MNB 方案，体现出二者热带对流模拟强度的固有差异。

对流层层面：高纬度对流层区域 TDK 方案模拟效果较 MNB 方案改进明显；北半球副热带纬向平均温度场上，TDK 方案模拟的冷异常振幅更大，整体温度较 MNB 方案偏冷；两组试验在全球热带对流层均表现出一致的系统性偏暖特征。

平流层层面：TDK 方案对热带对流层顶抬升的模拟显著强于 MNB 方案，穿透性对流向上输送冷空气效率更高，最终表现为平流层低层 ENSO 冷信号模拟明显偏强；MNB 方案对流层顶高度更贴近观测结果，平流层温度异常振幅更为适中。

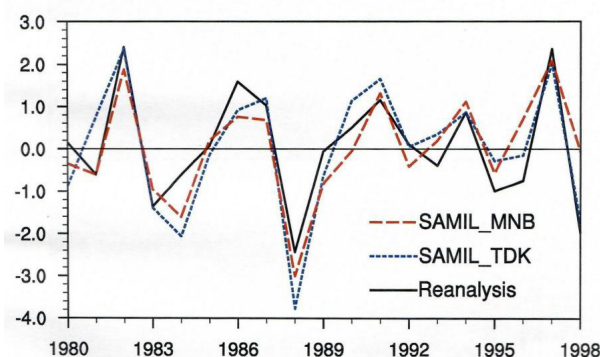


图1 冬季平均赤道东太平洋地区（10° S–10° N，120° W）T300的时间序列

（二）厄尔尼诺驱动对流层—平流层温度异常的完整物理机制

厄尔尼诺期间赤道中东太平洋 SST 异常偏高是全球大气温度异常的初始强迫，温度异常由热带对流层向副热带、中高纬对流层、平流层逐层传导，分为三个完整过程（图2）。

第一，热带对流层整体增暖。赤道中东太平洋海温偏高加剧海气蒸发，赤道辐合带水汽辐合显著增强，旺盛积云对流释放大质量凝结潜热，成为热带大气最主要的加热热源；热带暖异常激发赤道 Kelvin 波，沿赤道快速向东西两侧传播，实现全球热带对流层同步增暖（Graham，1995）。

第二，副热带与中纬度对流层降温。热带大范围加热导致 Hadley 环流形态收缩、经向跨度减小，扰动激发异常经圈环流；在南北半球副热带地区形成大范围异常上升运动，空气上升过程绝热膨胀冷却，绝热冷却效应超过短波加热，造成副热带、中纬度对流层温度显著降低。剖面图直观体现出 TDK 方案模拟的副热带上升运动强度高于 MNB 方案，绝热冷却更强，对应副热带冷偏差更突出。

第三，平流层低层形成冷异常。对流层顶上下大气温度垂直递减率发生反转，热带强穿透对流突破对流层顶，将对流层上层

干冷空气向上输送至平流层低层，冷空气持续堆积形成平流层大范围冷异常；对流层顶抬升幅度越大，冷空气上传通量越高，平流层低层冷异常越强。

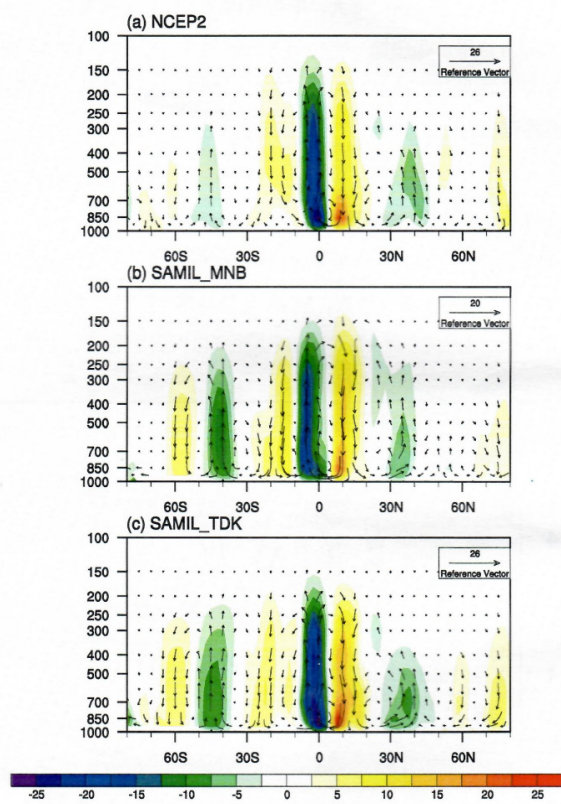


图2 根据 ENSO 事件合成的冬季经向平均垂直速度（单位： 10^{-3}Pas^{-1} ，阴影）与经圈环流异常（经向风，单位： ms^{-1} ，经向平均垂直速度，单位： 10^{-3}Pas^{-1} ，矢量）的高度-纬度剖面图

（三）积云对流参数化方案的双重调控机制

积云对流参数化方案是衔接海温外强迫与大气温度异常的核心物理过程，从对流层、平流层两个圈层形成双重调控路径，高层 200hPa 西风急流分布可直观佐证环流调控机理。

对流层调控路径：参数化方案决定热带对流触发阈值、对流强度与总潜热释放量，同时调制中纬度西风急流强度、副热带异常上升运动幅度，直接决定副热带对流层温度冷异常的模拟精度。TDK 方案深对流触发阈值更低，更容易激发副热带异常上升运动，绝热冷却作用更强，因此北半球副热带对流层温度模拟整体偏冷。

平流层调控路径：两类方案对穿透性对流的表征能力存在本

质差异，直接造成热带对流层顶高度模拟分歧。TDK 方案下赤道西太平洋、拉丁美洲、非洲中部、邻近印度洋等区域对流层顶高度模拟偏高、对流活动偏强，冷空气向平流层低层输送更多，最终导致平流层 ENSO 冷信号模拟偏强。

（四）模式共性系统性偏差及成因解析

两套积云对流参数化试验存在两类共性偏差，无法通过调整积云对流参数化方案完全消除。

其一，热带对流层普遍模拟偏暖。两套方案均显著高估厄尔尼诺冬季赤道中东太平洋降水强度，对流凝结潜热释放总量高于观测值，持续对热带对流层施加异常加热，形成稳定的热带对流层偏暖偏差。

其二，南半球副热带对流层温度显著偏冷。模式扰动激发的异常经圈环流在南半球副热带上升运动整体偏强，绝热冷却过度引发区域性冷异常；相关性检验表明，该冷偏差与 MNB、TDK 两套积云对流参数化方案关联性较弱，说明偏差并非由积云对流单一过程主导，而是 SAMIL 模式动力框架、边界层参数化、长波辐射方案、地形强迫等多物理过程耦合的综合结果。

四、结论

（1）厄尔尼诺气候背景下，SAMIL 模式对 ENSO 海温异常的整体模拟能力优于传统 AMIP 模式；对流层高纬区域 TDK 方案模拟效果更优，北半球副热带纬向平均温度 TDK 方案模拟偏冷，平流层低层 TDK 方案模拟的 ENSO 冷信号振幅显著大于 MNB 方案。

（2）厄尔尼诺通过三级动力过程调制全球温度场：赤道海温异常驱动热带对流潜热释放引发热带对流层增暖；Hadley 环流收缩激发副热带异常上升运动，绝热冷却造成中纬度对流层降温；热带穿透对流向上输送冷空气，在平流层低层形成大范围冷异常。

（3）积云对流参数化方案是影响对流层—平流层 ENSO 温度信号模拟的关键物理过程，一方面通过调控西风急流、副热带异常上升运动改变对流层温度异常分布，另一方面通过改变热带对流层顶高度，调控平流层低层 ENSO 温度异常强度。

（4）模式存在热带对流层偏暖、南半球副热带对流层偏冷的共性系统性偏差；热带偏暖源于赤道中东太平洋降水与潜热释放模拟高估，南半球副热带冷偏差受模式整体物理框架多因子协同控制，仅依靠优化积云对流参数化无法实现完全订正。

参考文献

- [1] Graham N E. Simulation of El Niño–Southern Oscillation with a global atmospheric general circulation model[J]. Journal of Climate, 1995, 8(10):2321–2339.
- [2] 周天军, 吴统文, 宇如聪, 等. SAMIL 大气环流模式研发与应用进展 [J]. 大气科学, 2019, 43(01):1–22.
- [3] 黄荣辉, 陈文. 厄尔尼诺 / 南方涛动 (ENSO) 对全球气候异常的影响及其机理 [J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(01):1–16.
- [4] 李建平, 罗勇. 积云对流参数化方案对 ENSO 模拟影响的综述 [J]. 气象学报, 2018, 76(03):321–336.
- [5] 平流层—对流层相互作用研究课题组. 厄尔尼诺影响平流层环流的动力机制 [J]. 高原气象, 2022, 41(02):289–301.