



# 读书笔记：全球变暖背景下 热带太平洋次表层冷却的成因

危国锐 516021910080

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** Ju et al. (2022) 研究了历史上和 SSP2-4.5 模拟中热带太平洋的次表层温度趋势, 由耦合模式相互比较项目第六阶段 (CMIP6) 的 14 个模型进行。研究发现, 1950-2100 年期间, 热带太平洋近赤道区域两侧存在对称的次表层冷却趋势 ( $2-8^{\circ}\text{N/S}$ , 100-200 m)。冷却趋势主要由两个因素导致: 温跃层的抬升 (Thermocline Heaving) 和湿度 (Spiciness) 的负趋势, 即固定等密度面上温度的降低。研究表明, 这两个因素的贡献比例相当。首先, 由于南北太平洋近赤道风应力旋度出现显著变化趋势, 引起 Ekman 抽吸使温跃层抬升, 导致下层冷水向次表层流动。另一方面, 全球变暖背景下海水温度不断升高使海洋表层的等密线 (露头线) 持续向极移动, 因此高纬度较冷的海水可以通过潜沉作用直接到达副热带东部区域; 与此同时, 沿等密度面的异常平流作用也促进了海水降温。这两个过程使南北太平洋副热带东部次表层的等密度面上产生显著的冷趋势。此信号沿地转流线传播到近赤道次表层海洋, 对此区域的冷却产生重要贡献。该研究强调了沿等密面的物理过程引起海水温度变化的重要性, 有助于进一步理解海洋三维温度的变化机理。



# Subsurface Cooling in the Tropical Pacific Under a Warming Climate

Guorui Wei 516021910080

*(School of Electronic Information and Electrical Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)*

**Abstract:** Ju et al. (2022) investigates the subsurface temperature trend in the tropical Pacific in historical and SSP2-4.5 simulation by 14 models from Coupled Model Intercomparison Project Phase 6. Robust cooling trends exist between 100 and 200 m in the off-equatorial region ( $2^{\circ}$ – $8^{\circ}$ N/S) of both the North and South Pacific during 1950–2100. Both spiciness variation and thermocline heave are important in driving this off-equatorial subsurface cooling at a fixed level. The cooling spiciness trends in the off-equatorial region originates from the eastern subtropical Pacific along isopycnal streamlines. Besides, the contribution of the thermocline heave to the cooling is governed by the large wind stress curl trend. Furthermore, the maximum negative spiciness trends occur in the eastern subtropics of both the North and South Pacific. The consistently poleward migration of outcropping lines makes cooler subducting water at higher latitudes directly flow into the subtropical subsurface, which induces the negative spiciness trends here. The generation of the negative spiciness trends is also partly attributed to the anomalous advection process on distinct isopycnal surfaces. These two processes both contribute to the generation of spiciness variation in both the North and South Pacific. The generation region is partly covered by the outcropping region, thus, the strong vertical mixing within the mixed layer may weaken the effect of the subduction and advection. This study mainly highlights the significance of the spiciness variation in the projection of the subsurface temperature trend on a longer time scale under global warming.



# 目 录

摘要 .....	i
Abstract.....	ii
目 录 .....	iii
1 引言 .....	1
2 数据和方法 .....	2
2.1 CMIP6.....	2
2.2 Objective Analysis and Reanalysis Data.....	2
2.3 方法.....	2
5 讨论和结论 .....	4
参考文献 .....	5

# 1 引言

由于温室气体 (GHG) 浓度的增加, 加上海洋反应时间长、热容量大, 大量进入地球气候系统的全球变暖热量被带到海洋, 主要储存在海洋上层 (Johnson & Lyman, [2020](#); Levitus et al., [2005](#), [2012](#))。海洋温度变化是与温室气体浓度增加有关的海洋变暖的主要衡量标准。热带地区的温度变化是最重要的问题之一, 它对其他一些区域或全球气候变量的变化有着至关重要的影响, 如降水、大尺度环流 (Ma & Xie, [2013](#); Shin & Sardeshmukh, [2011](#); Tokinaga et al., [2012](#); Xie et al., [2010](#)), 甚至气候反馈 (Andrews & Webb, [2018](#))。次表层温度是海洋上层的主要部分。它的变化可以影响上层海洋的热力结构, 调节热带地区的海气耦合过程 (Kakatkhar et al., [2020](#))。此外, 以前的一些研究表明, 次表层海洋温度在预测大气变量 (热带气旋、空气温度等) 的季节、年际和十年时间尺度上具有重要作用 (Bratcher & Giese, [2002](#); Schneider et al., [1999a](#), [1999b](#); Sparks & Toumi, [2020](#))。因此, 随着温室气体浓度的增加, 更好地了解热带次表层温度的长期趋势具有重要的科学价值。

事实证明, 在所有合理的情况下, 全球海洋热含量至少会增加到 2300 (Bindoff, [2019](#); Palmer et al., [2018](#))。然而, 以前的一些研究表明, 基于不同的二氧化碳增加实验的耦合气候模型, 热带太平洋的次表层冷却 (Du & Xie, [2008](#); Luo et al., [2011](#), [2018](#))。这种在变暖的海洋中的次表层冷却引起了人们的注意。Yang ([2009](#)) 显示, 在瞬时和平衡二氧化碳实验中, 沿赤道温线的升温比表面的升温要弱, 并指出亚热带细胞 (STC) 的减速是赤道西太平洋次表层温度降温的重要因素。Luo ([2018](#)) 显示了太平洋西赤道温跃层对二氧化碳四倍的反应同时出现了降温信号, 并认为赤道东风的减弱和直接辐射强迫排放共同决定了赤道的次表层温度结构。Luo ([2011](#), [2018](#)) 也发现, 相对次表层冷却的最大值似乎在纬度  $5^{\circ}$  左右, 并认为风应力变化引起的上涌和热层浅化是决定这种赤道外冷却的关键。然而, 关于这种热带太平洋次表层冷却的研究是有限的, 而且其机制仍不清楚。因此, 本研究将基于新的 CMIP6 多模式集合, 详细探讨热带太平洋次表层温度的长期趋势和相关机制。

首先, 热层翻腾是导致海洋内部固定水平温度变化的原始过程, 另一个影响因素是湿度变化 (Arbic & Owens, [2001](#); Bindoff & McDougall, [1994](#); Nagura et al., [2018](#))。热层起伏是平均热层的垂直位移, 伴随着垂直密度结构的变化, 由绝热过程 (风强迫变化) 或绝热热通量发散引起 (Häkkinen et al., [2016](#))。在数十年的时间尺度上, 水平平流是造成起伏的主要原因, 而低频的海洋动力学, 如涡流的加强变化, 也可能造成起伏 (Church et al., [1991](#); Häkkinen et al., [2016](#))。Munk ([1981](#)) 将湿度定义为温度和盐度的密度补偿异常, 因此不影响密度分布。湿度异常可以通过气海相互作用和异常俯冲在露头区产生 (Johnson, [2006](#))。在露头区之外, 异常也可以通过对流混合和跨越辐合锋的等温线平流产生 (Kolodziejczyk & Gaillard, [2013](#); Li & Wang, [2015](#); Schneider, [2000](#); Wang & Luo, [2020](#); Yeager & Large, [2004](#))。在十年/多年的时间尺度上, 热带外的湿度异常可以通过风力驱动的海洋环流迁移到热带地区, 并影响热带气候变率 (Gu & Philander, [1997](#); McCreary & Lu, [1994](#))。

Ju et al. (2022) 在 CMIP6 的基础上研究了南北太平洋的低频起伏和湿度变化及其对热带次表层太平洋的影响。本文的结构如下。第 2 节介绍了 Ju et al. (2022) 使用的数据和方法。第 3 节简要展示了 CMIP6 模型的性能, 并总结了太平洋离赤道次表层冷却的情况。第 4 节研究了这种冷却的机制, 介绍了湿度异常的传播和产生, 以及翻腾过程。第 5 节为结论和讨论。

## 2 数据和方法

### 2.1 CMIP6

Ju et al. (2022) 采用 CMIP6 档案中的历史(1950-2014)和共享社会经济途径 2-4.5(SSP2-4.5) 模拟(2015-2100) (Eyring et al., 2016)。包括 14 个气候模型, 以获得基于历史和 SSP2-4.5 模拟的集合趋势(BCC-CSM2-MR、CESM2-WACCM、CIESM、CNRM-CM6-1、CNRM-ESM2-1、CanESM5、EC-Earth3-Veg、EC-Earth3、FGOALS-f3-L、FIO-ESM-2-0、INM-CM4-8、IPSL-CM6A-LR、MIROC6、UKESM1-0-L)。这些模型包含了需要的变量(温度、盐度、速度等)的直接输出, 可以很好地模拟它们的气候模式。只使用每个模型的一个数字运行(r1i1p1), 所有的变量, 被内插到  $1^\circ \times 1^\circ$  的共同网格上。此外, 为了消除 1950-2100 年长期趋势中的高频信号, Ju et al. (2022) 对时间序列进行了 11 年的低通滤波。

### 2.2 Objective Analysis and Reanalysis Data

部分历史和未来情景的模拟与 Argo 观测数据进行了比较, 以评估模型的平均垂直模式的性能。Ju et al. (2022) 使用 2004 年 1 月至 2020 年 12 月 Roemmich-Gilson (RG) Argo 气候学的现有温度和盐度全球网格化数据。RG Argo 气候学使用加权最小二乘法拟合, 以获得给定月份内最近的 100 个 Argo 剖面来估计平均场 (Roemmich & Gilson, 2009)。

两个客观分析产品 (EN4, Ishii data set) 和一个再分析产品 (the Institute of Atmospheric Physics ocean gridded product, IAP) 也被用来确认 CMIP6 模型中温度趋势的准确性。EN4.2.1 是英国气象局 Hadley 中心的次表层温度和盐度数据集, 时间跨度为 1900 年至今的月度时间步长。分析文件具有  $1^\circ \times 1^\circ$  的水平分辨率, 在南纬  $83^\circ$  到北纬  $90^\circ$  有 42 个不规则间隔的深度层 (Good et al., 2013)。IAP 数据集的特点是覆盖全球海洋, 水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 垂直深度为 1-2,000 米, 月度分辨率为 1940 年至今 (Cheng & Zhu, 2016)。Ishii 数据是 1945 年至 2012 年开始的每月客观分析的上层 1500 米的次表层温度和盐度, 水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  (Ishii et al., 2005)。本研究使用 1950-2020 年的 EN4 和 IAP 温度场以及 1945-2012 年的 Ishii 数据, 与 CMIP6 的输出结果进行比较。

### 2.3 方法

在固定压力下温度的时间变化可以分解为来自湿度变化和温跃层的贡献 (Arbic & Owens, 2001)。为了估计次表层温度趋势的产生和传播机制, Ju et al. (2022) 计算这两个部分:

$$\left. \frac{d\theta}{dt} \right|_p = \left. \frac{d\theta}{dt} \right|_n - \left. \frac{dp}{dt} \right|_n \frac{\partial \theta}{\partial p}, \quad (1)$$

其中  $\theta$  和  $p$  表示位温和压强。下标  $p$  和  $n$  分别表示等压面和等温面。右手边 (RHS) 的第一项代表由于湿度变化而产生的温度变化, 在这里被称为湿度项。RHS 的第二项是由于温跃层引起的, 被称为跃层项 (Nagura & Kouketsu, 2018)。Ju et al. (2022) 将  $d\theta/dt|_n$  和  $dp/dt|_n$  计算为等温线温度和压力的长期 (1950-2100 年) 趋势。温度的垂直梯度  $\partial\theta/\partial p$  是按 1950-2100 年的平均值计算的。

为了更详细地研究热带太平洋地带性海流的长期趋势, Ju et al. (2022) 评估了它们的传输变化 (Chen et al., 2016), 其定义为:



$$T(x, t) = \int_S^N \bar{u}(x, y, t) dy, \quad (2)$$

其中，N (S) 代表表层带状海流的最北 (最南) 纬度， $\bar{u}(x, y, t)$  是整合到上层海洋 0-300 米的带状速度， $y$  是带状速度的纬度位置。在调查北赤道流 (North Equatorial Current, NEC) 时，如果是向东，则设置为零；在调查北赤道逆流 (North Equatorial Countercurrent, NECC) 时，则设置为向西。

Ju et al. (2022) 还使用分解法来量化在一个明显的等压面的海洋水平平流：

$$Q_x = -u' \bar{T}_x - \bar{u} T'_x - u' T'_x, \quad (3)$$

$$Q_y = -v' \bar{T}_y - \bar{v} T'_y - v' T'_y, \quad (4)$$

其中  $Q_x$  和  $Q_y$  为纬向和经向平流； $u$  和  $v$  为纬向和经向速度； $\bar{T}_x$  和  $\bar{T}_y$  分别为纬向和经向的温度梯度。上标一横和一撇分布代表气候学平均值和与第一个 20 年平均值 (1951-1970) 的变化。方程 (3) 和 (4) 的 RHS 上的三个项分别表示来自洋流变化、温度梯度变化和非线性项的贡献 (Luo et al., 2018; Yang et al., 2009)。

## 5 讨论和结论

根据 CMIP6 中 14 个模式的调查,在 SSP2-4.5 情景下,热带太平洋近赤道地区 ( $2^{\circ}$ - $8^{\circ}$ N/S) 出现了两个强有力的对称性次表层冷却趋势。固定层的温度趋势可以分解为来自辐合度变化和温跃层的贡献。以前的研究只讨论了温跃层的贡献,即温跃层的加深/回缩,或直接辐射效应 (Luo et al., [2011](#), [2018](#)),而本研究发现,在热带次表层区域,辐合度变化与温跃层回缩同样重要,所以 Ju et al. (2022) 强调辐合度变化的贡献。最大的负湿度趋势出现在北太平洋和南太平洋的东部副热带地区。这些副热带的最大趋势将在十年的时间尺度上沿着某些等温线表面的流线向西和赤道传播到热带地区。次表层辐合趋势可以改变热带地区的垂直温度结构,尽管它对 SST 的影响不大。尽管北太平洋的 NEC/NECC 和南太平洋的 SEC 都在减弱,但降温信号仍然传递到热带地区,这表明由平均环流而不是环流异常输送的冷水是主导因素。当涉及到温跃层的影响时,赤道外地区巨大的风应力卷曲变化和向上的 Ekman 泵导致了热带温跃层的搁浅。

在太平洋地区,结合过去对季节性、年际到十年时间尺度的研究,原始的湿度趋势产生于东亚热带地区 (Kolodziejczyk & Gaillard, [2012](#), [2013](#); Luo et al., [2005](#); Wang & Luo, [2020](#); Yeager & Large, [2004](#))。首先, Ju et al. (2022) 的研究结果表明,在全球变暖的情况下,两个半球的出露线都持续向极地迁移。沿等温线表面的流动直接将较高纬度的表层冷水传送到亚热带内部的温跃层,造成南北太平洋的负湿度趋势 (Laurian et al., [2009](#); Nonaka & Sasaki, [2007](#))。此外,大洋平流也会造成次表层温度异常。东北和东南太平洋的反常经向平流对副热带地区的负湿度趋势有很大贡献。在北太平洋,异常洋流使等温线上的温度锋面移位,诱发冷却趋势;而在南太平洋,异常温度梯度导致冷却趋势。此外,北太平洋和南太平洋湿度最大的副热带地区部分横跨出海口地区。因此,混合层中强烈的垂直混合过程可能在很大程度上损害俯冲和平流的效果。

此外,以前的许多研究表明,注入过程可能是造成南太平洋正湿度异常的主要原因 (Kolodziejczyk & Gaillard, [2012](#); Wang & Luo, [2020](#); Yeager & Large, [2004](#), [2007](#))。然而,尽管注入湿度的意义很大,但事实证明它不能促成负湿度异常的产生 (Kolodziejczyk & Gaillard, [2013](#); Wang & Luo, [2020](#))。



## 参考文献

- Ju, W.-S., Zhang, Y., & Du, Y. (2022). Subsurface Cooling in the Tropical Pacific Under a Warming Climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(5), e2021JC018225.  
<https://doi.org/10.1029/2021JC018225>