

ENSO中西风爆发效应的春季障碍: 理论解析、观测检验与事件归因

YANG Haijun (杨海军)¹, HU Jie (胡杰)¹, JIN Yishuai (金亦帅)²

¹Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai China

²State Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, Shandong China



万物皆有频率



SOUND WAVES

SOUND WAVES

RADIO WAVES

INFRARED

VISIBLE LIGHT

ULTRAVIOLET

ULTRAVIOLET

VISIBLE LIGHT

VISIBLE LIGHT

RADIO WAVES

INFRARED

INFRARED

VISIBLE LIGHT

ULTRAVIOLET

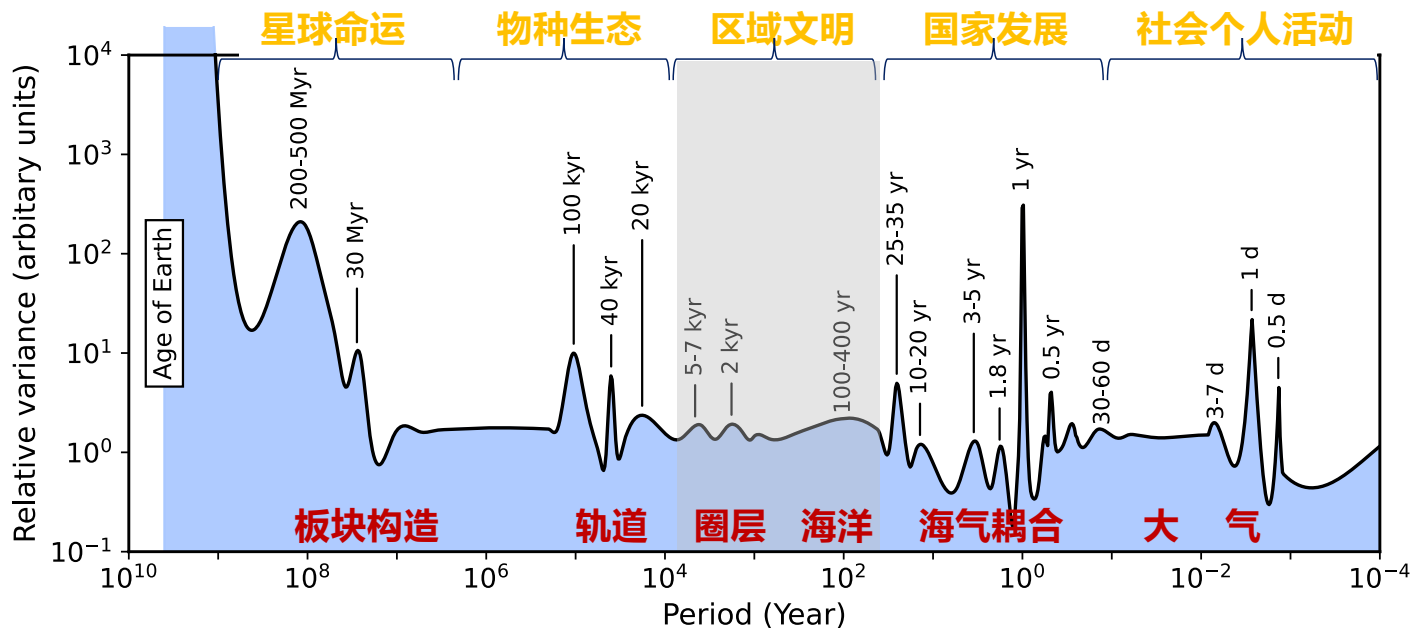
VISIBLE LIGHT

LIGHT

万物皆频率



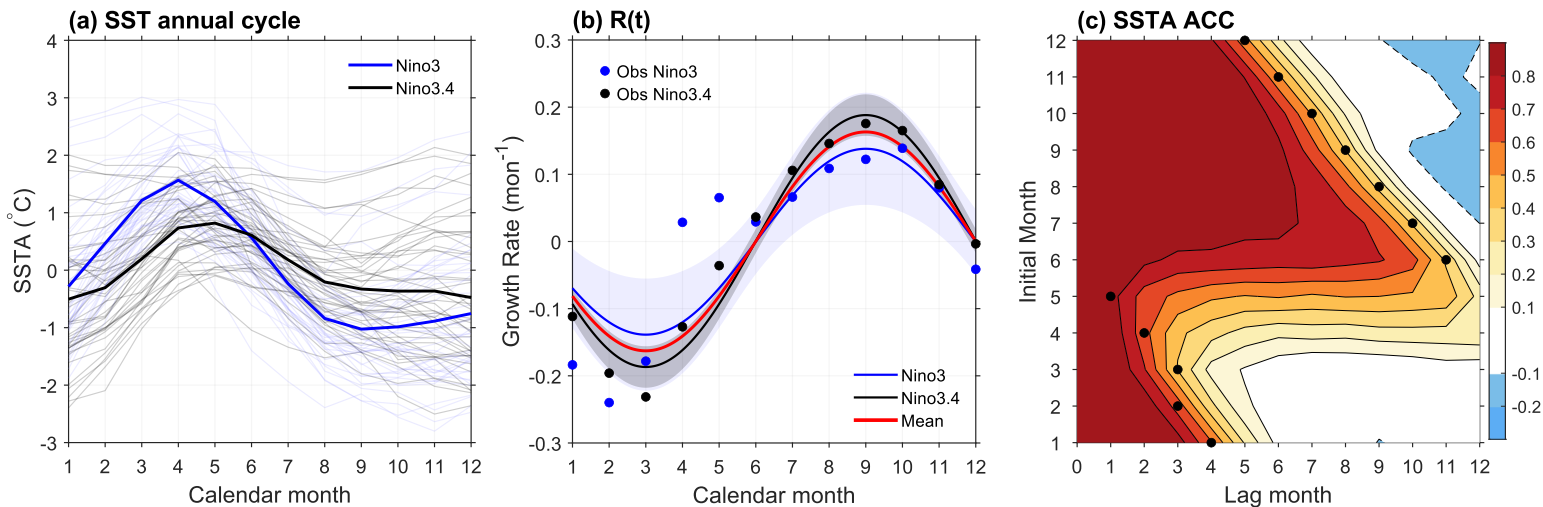
Spectrum of Earth's Climate Variability



Based on multiply sources of “pre-whitened” temperature records

Mitchell, 1976; Stocker and Mysak, 1992; Ghil, 2001; Heydt, 2021;

ENSO春季预报障碍 (SPB) : 观测



$$R(t) = R_0 - R_1 \sin(\omega_1 t + \varphi), \text{ 季节性增长率 (Bjerknes反馈)}$$

Jin's Recharge-Discharge Model

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = R(t)T + \omega_0 h \\ \frac{dh}{dt} = -\omega_0 T \end{cases}$$

$$R(t) = R_0 - R_1 \sin(\omega_1 t + \varphi)$$

$$\ddot{T} - R(t) \cdot \dot{T} + (\omega_0^2 - \dot{R}(t)) \cdot T = 0$$

$$\ddot{h} - R(t) \cdot \dot{h} + \omega_0^2 \cdot h = 0$$

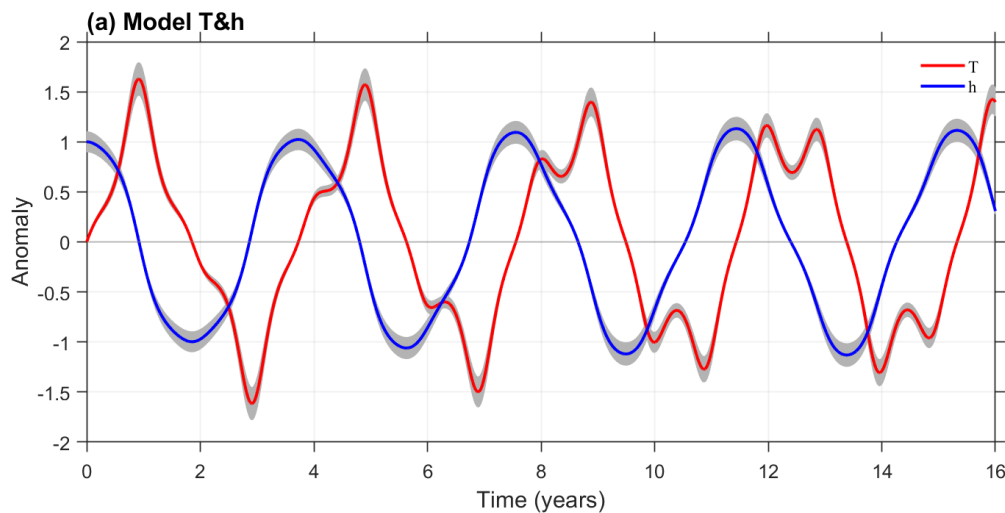
Sandberg (1964)

通过耦合海表温度、海洋热含量来模拟 ENSO 的非线性演化。特别是 ENSO 可预报性问题：季节锁相、春季预报障碍等

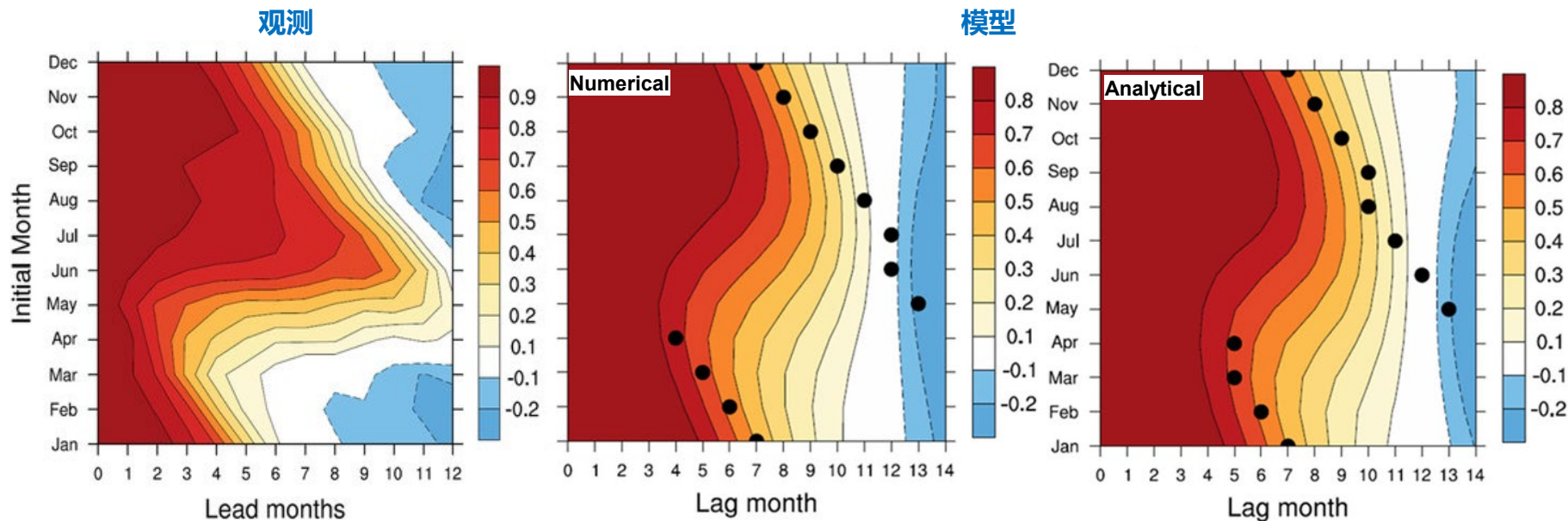
Jin (1997a,b); Stein et al. (2010, 2014); Jin (2021a)

Second-order differential equations with periodic coefficients

ENSO春季预报障碍 (SPB) : Jin's模型结果



ENSO春季预报障碍 (SPB)

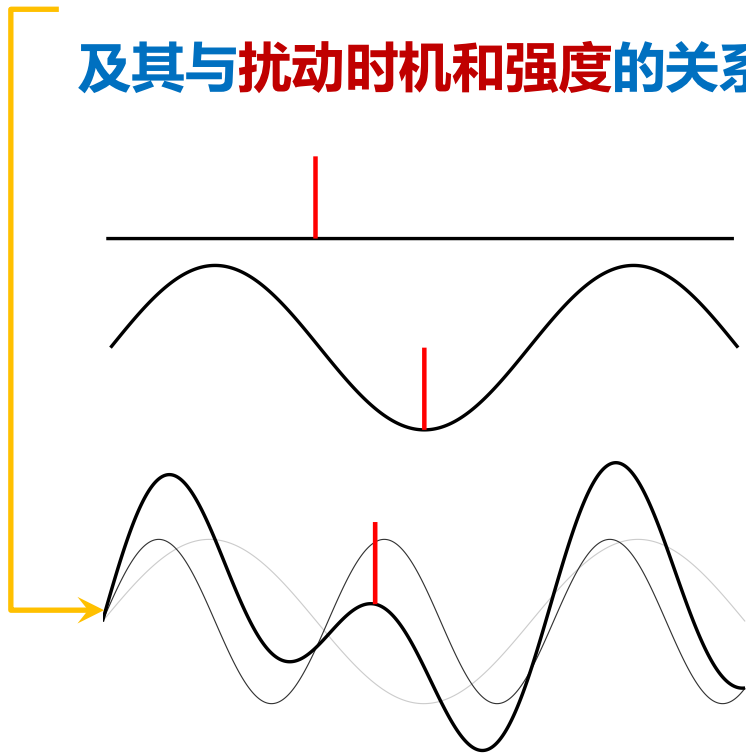


(a) The autocorrelation of Niño-3.4 SST anomalies for 1980–99 showing persistence as a function of start month. (b) numerical solutions (c) analytical solutions of the persistence map (ACF) for $\lambda_\varepsilon = 1/\pi$ and $\omega_0 = (2\pi/48)$ month⁻¹ in the NRO model. The black circles on the persistence map mark the lag month of maximum autocorrelation decline for different initial months.

Jin (2021a, b)

我们的问题

在一个自然振荡系统中，于某一时刻施加**扰动**，系统如何演变
及其与**扰动时机和强度**的关系。



线性系统：稳定振荡，有理论解，
可预测，与扰动时机无关系

非线性系统：振荡行为？有理论解？
可预测？扰动时机有关系？



Jin's Recharge-Discharge Model

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = R(t)T + \omega_0 h + F(t) \\ \frac{dh}{dt} = -\omega_0 T \end{cases}$$

$F(t)$: 西风爆发 (WWB)

WWB如何影响季节锁相、春季预报障碍, 是否有时机效应? 时机与强度哪一个对ENSO更重要?

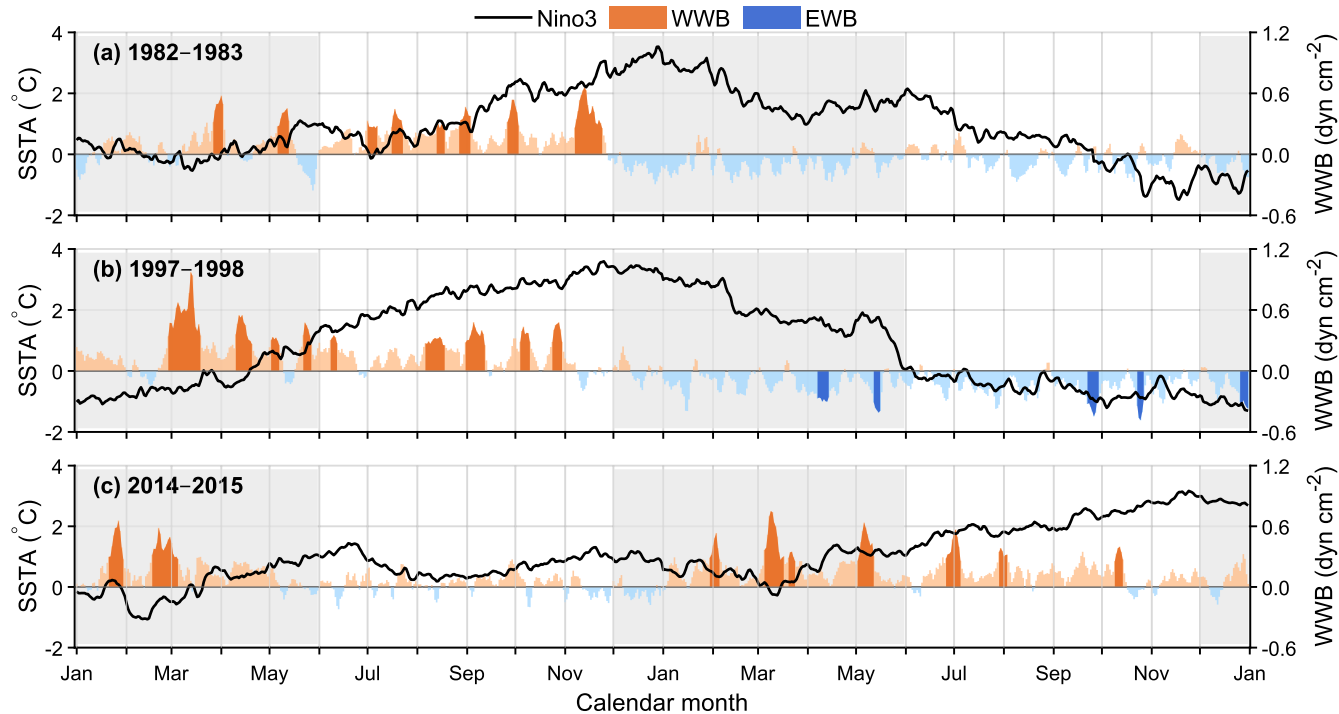
$$R(t) = R_0 - R_1 \sin(\omega_1 t + \varphi)$$

$$F(t) = F_0 \cdot M(t), \quad M(t) = H(t - t_0) \cdot H(t_0 + \Delta t - t)$$

$$H(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ 1, & t \geq t_0 \end{cases}, \quad H(t_0 + \Delta t - t) = \begin{cases} 0, & t > t_0 + \Delta t \\ 1, & t \leq t_0 + \Delta t \end{cases}$$

有很多研究, 但目前缺乏统一的理论解释!

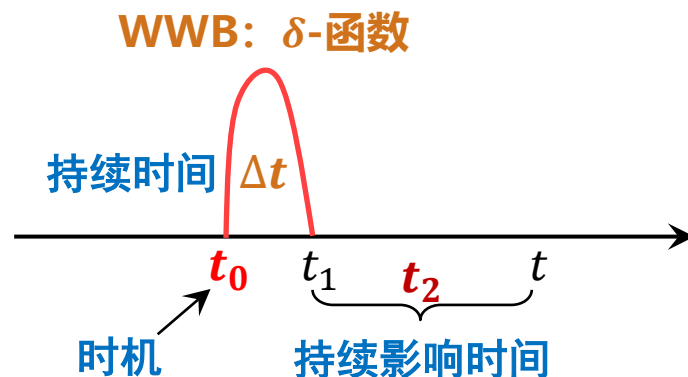
典型ENSO事件与西风爆发(WWB)



WWB引起的响应

$$\frac{dT}{dt} = R(t)T + \omega_0 h \longrightarrow \bar{T}(t_1)$$

$$\frac{dT}{dt} = R(t)T + \omega_0 h + F(t) \longrightarrow T(t_1)$$



瞬时响应: $\Delta T(t_1) = T(t_1) - \bar{T}(t_1)$

调整响应: $\Delta T(t_1 + t_2) = T(t_1 + t_2) - \bar{T}(t_1 + t_2)$

理论求解

西风爆发引起的瞬时响应

$$\Delta T(t_0 + \Delta t) = \frac{F_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 \Delta t) + \frac{R_1 F_0}{2\omega_0} \left[A \sin(\Omega_1 \Delta t + \Phi) - B \sin(\Omega_2 \Delta t + \Phi) \right. \\ \left. - (A - B) \sin(\Phi) \cos(\omega_0 \Delta t) - \left(\frac{\Omega_1}{\omega_0} A - \frac{\Omega_2}{\omega_0} B \right) \cos(\Phi) \sin(\omega_0 \Delta t) \right]$$

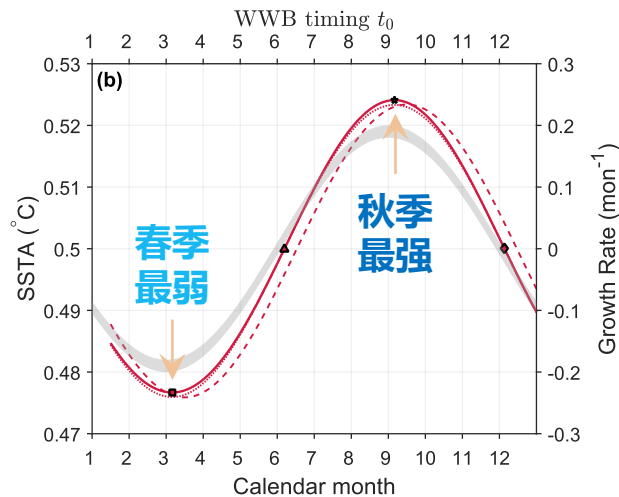
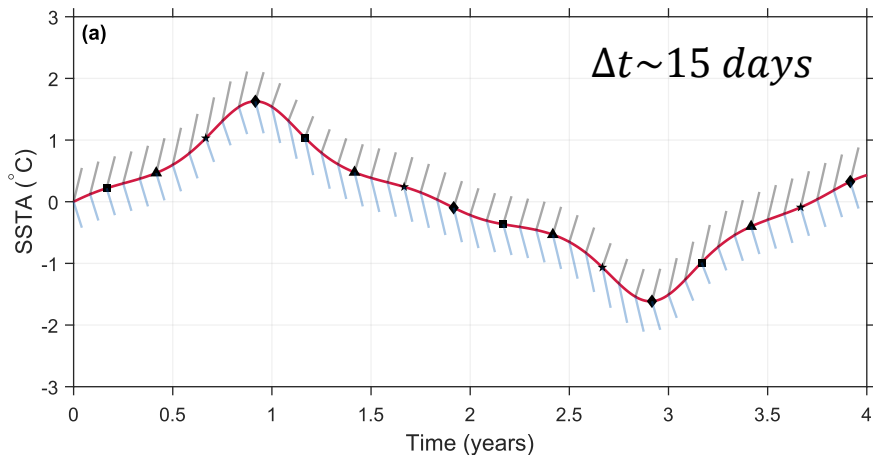
$$\Omega_1 = \omega_1 - \omega_0, \Omega_2 = \omega_1 + \omega_0, \Phi = \omega_1 t_0 + \varphi, A = \frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_0^2 - (\omega_1 - \omega_0)^2}, B = \frac{\omega_1 + \omega_0}{\omega_0^2 - (\omega_1 + \omega_0)^2}$$

Hu et al. (2026a)

西风爆发引起的瞬时响应

$$\Delta T(t_0 + \Delta t) \approx F_0 \Delta t \cdot \left(1 + \frac{1}{2} R(t_0) \Delta t \right)$$

If $\Delta t \ll 1/\omega_1$



$F_0 \Delta t$: 对 F_0 的线性响应, 随 Δt 增加而线性增长;

WWB效应春季障碍!!!

$\frac{1}{2} F_0 R(t_0) \Delta t^2$: 完全决定于WWB时刻背景增长率 $R(t_0)$ 的强弱

西风爆发引起的调整（延迟）响应

$$\begin{aligned}\Delta T(t_1 + t_2) &\approx \Delta T_0(t_2) + R_1 \Delta T_1(t_2) \\ &= R_c \cos(\omega_0 t_2 - \psi) + R_1 M(\theta) \cos(\omega_0 t_2 - \psi - \gamma(\theta))\end{aligned}$$

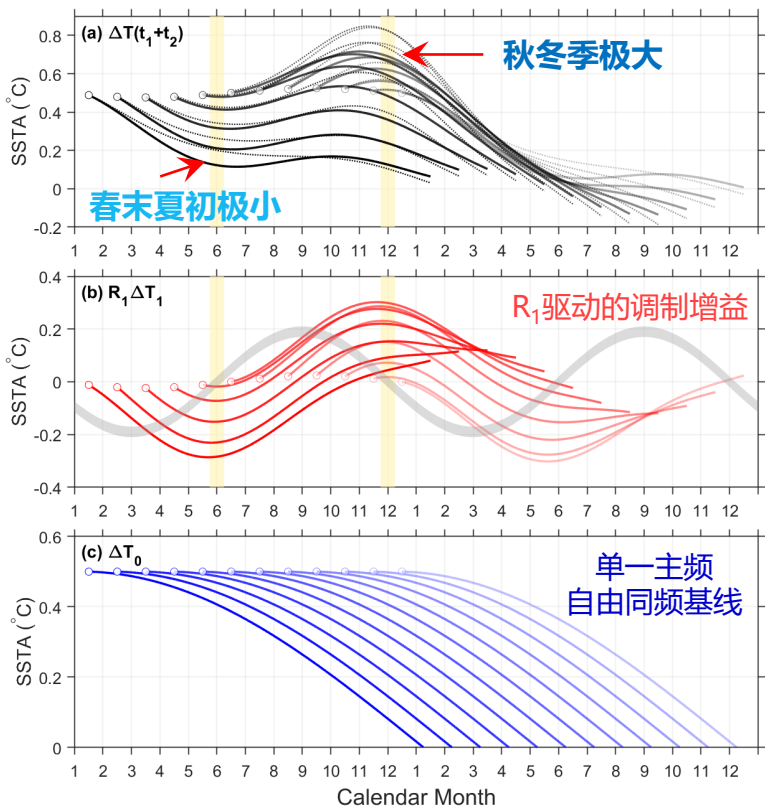
$R_c = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$, $C_1 = F_0 \Delta t$, $C_2 = -\frac{1}{2} F_0 \omega_0 \Delta t^2$, $\psi = \text{atan2}(C_2, C_1)$, $\theta = \omega_1(t_1 + t_2) + \varphi$ 为季节位相

- $\Delta T_0(t_2)$: 同频直接响应 (free same-frequency response)。由ENSO本征频率 ω_0 对滞后时间 t_2 的相位推进而来，反映WWB导致的瞬时SST响应在后续的自由推进，不依赖 R_1 ，其振幅 R_c 只由WWB的强度和持续时间决定。
- $\Delta T_1(t_2)$: 季节调制下的调整响应 (seasonally-modulated adjustment)。反映了WWB后，系统在 R_1 调制下，经Bjerknes反馈的持续演化，相当于海洋温跃层调整与季节增长率的卷积。其幅度 $M(\theta)$ 与相位偏移 $\gamma(\theta)$ 显式依赖季节位相 θ ，体现了对WWB时机的敏感性。

Hu et al. (2026a)



WWB效应的春季障碍及季节性锁相



- ① 无论WWB时机如何, SSTA均在秋冬季(11-12)达到极大值, 反映ENSO发展季节性锁相; 在春末夏初(5-6月)响应被明显钳制, 对应SST发展春季障碍
- ② WWB时机决定了它能否跨越春季障碍并在夏秋窗口被放大; 这是ENSO“季节性锁相”与“春季可预报障碍”在“事件级外强迫”上的具体体现



西风爆发引起的调整（延迟）响应

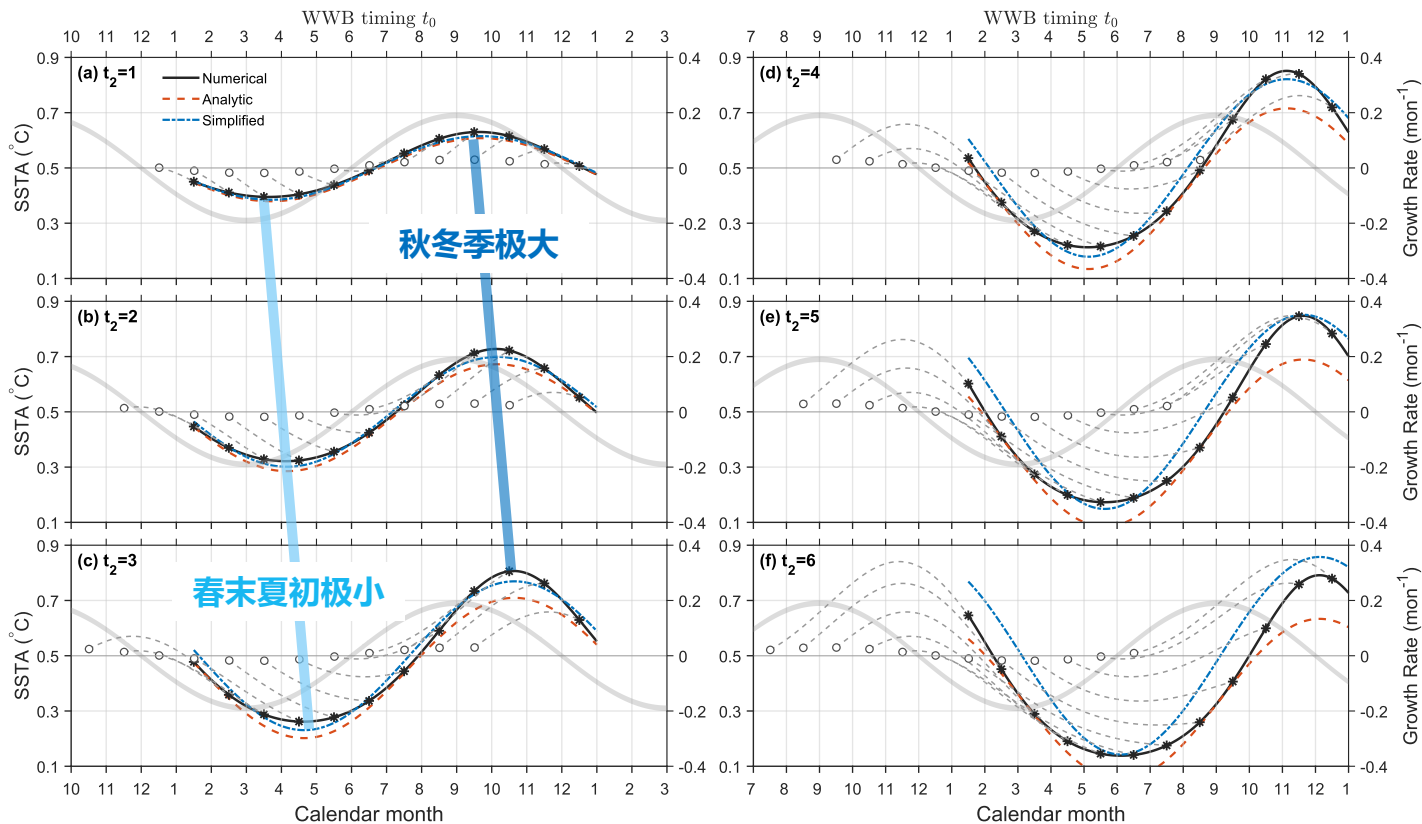
$$\Delta T(t_1 + t_2) \approx F_0 \Delta t \cdot \left[1 + \frac{1}{2} R(t_0) \Delta t + \int_{t_1}^{t_1+t_2} R(\tau) d\tau \right]$$

if $t_2 \ll 1/\omega_0$

零阶近似下的调整响应决定于 $R(t)$ 在 t_2 期间的累积效应，与 ENSO 本征频率 ω_0 无关

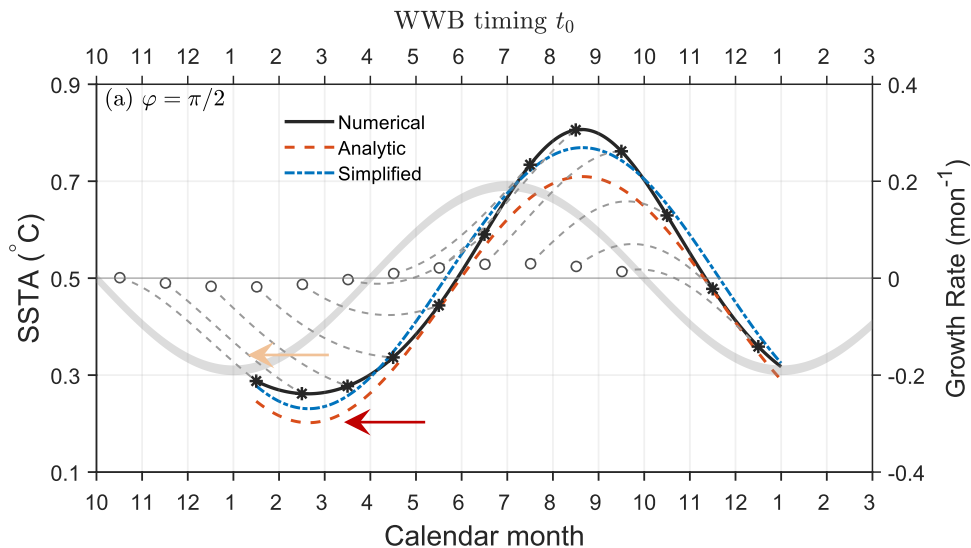
Hu et al. (2026a)

WWB效应的春季障碍及季节性锁相



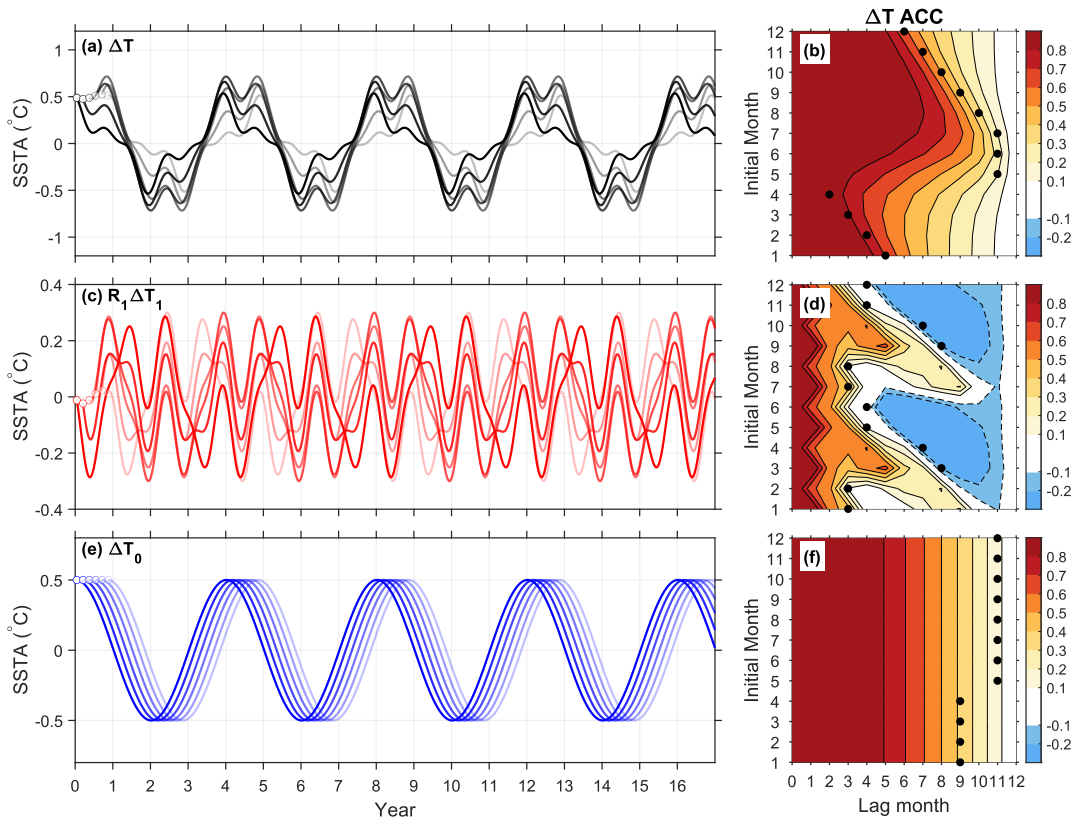
谁决定了春季障碍及季节性锁相？

$$R(t) \sim -R_1 \sin(\omega_1 t + \varphi)$$



初始位相 φ 决定ENSO可预报性障碍和锁相发生的具体季节

WWB效应的动力学框架



ΔT (总响应)

||

$R_1 \Delta T_1$ (幅度门控)

+

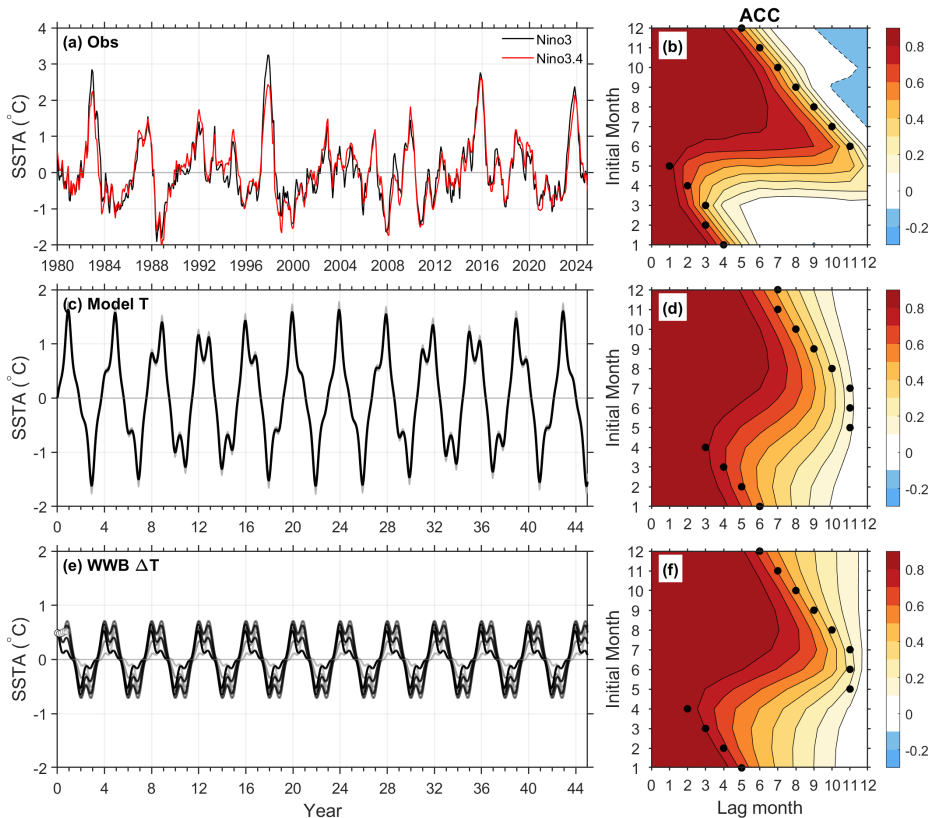
ΔT_0 (相位骨架)

对骨架进行修饰。“修剪”春季振幅导致SPB，“放大”夏秋振幅，强行将不同时间触发的事件锁定到冬初达到峰值

维持系统惯性推进，确保事件具有跨年持续性



ACC: 观测、理论与模式

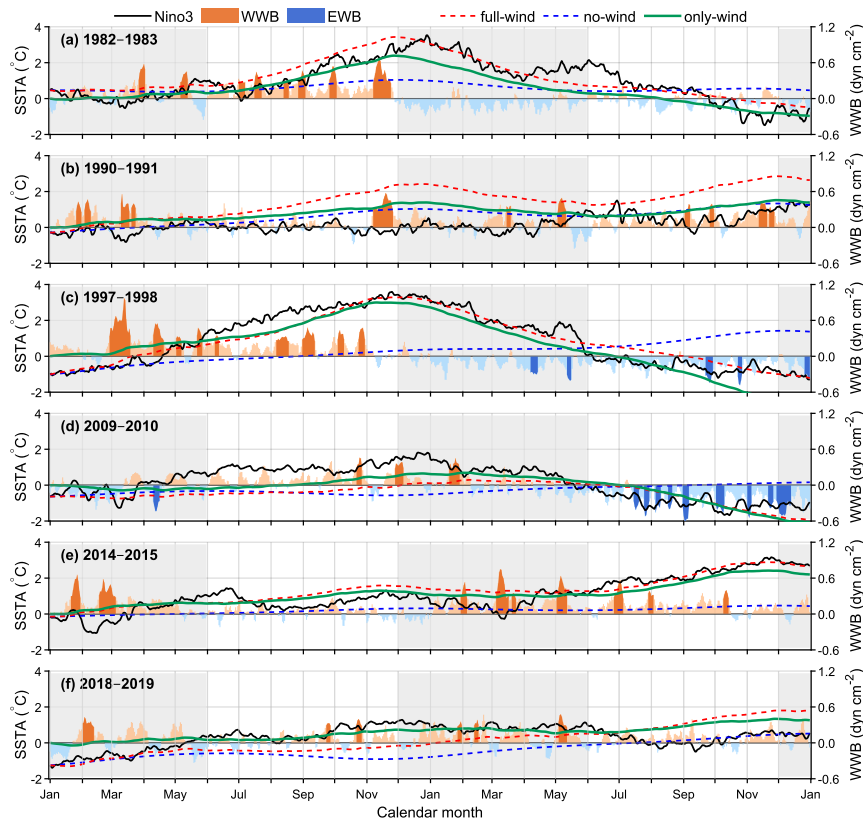


- ① 季节性增长率对 ENSO 的可预报性施加了刚性动力学约束：无论外界如何扰动对热带海气耦合系统，两个基本特征都可能保持。
- ② WWB 只是众多扰动形式中的一种；对于其他类似脉冲型的外部强迫，理论上也应得到相同结论。

Hu et al. (2026a)

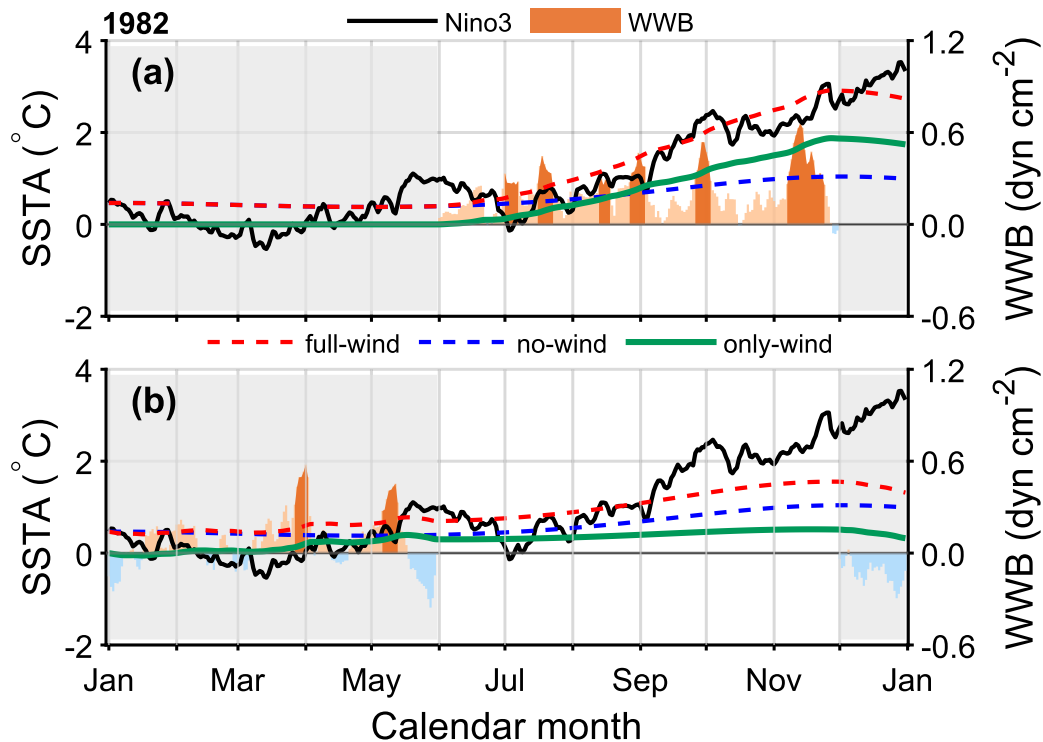


典型ENSO事件与WWB：观测与模拟对比

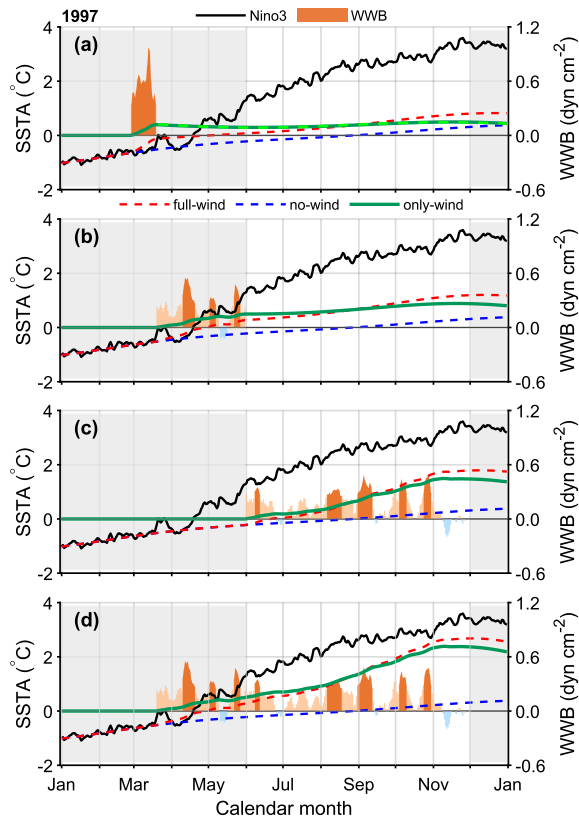


Hu et al. (2026b)

1982-83年ENSO事件：夏秋季WWB主导

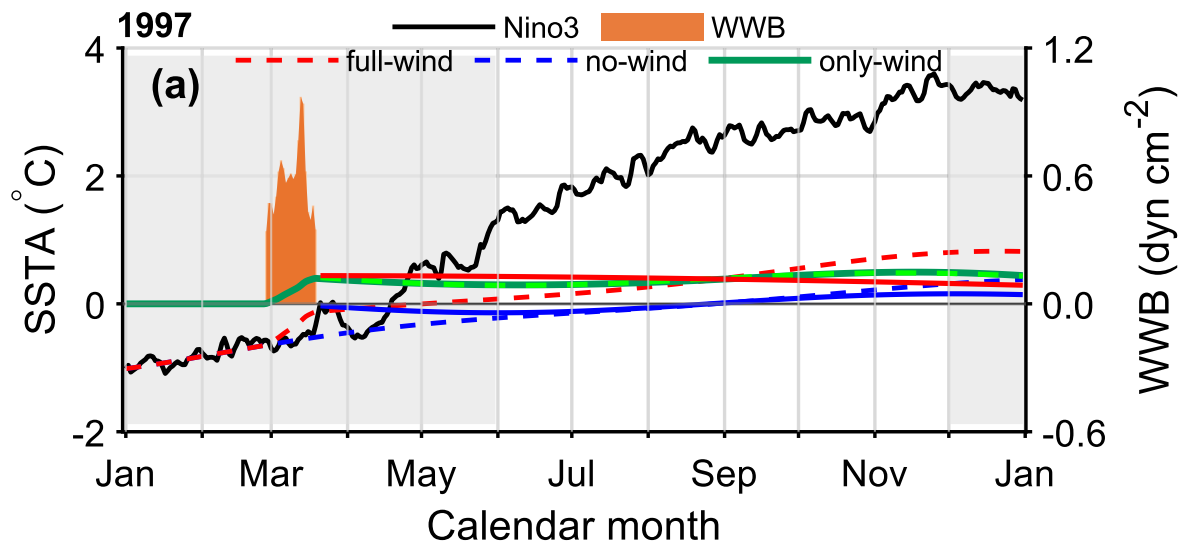


1997-98年ENSO事件：夏秋季WWB主导

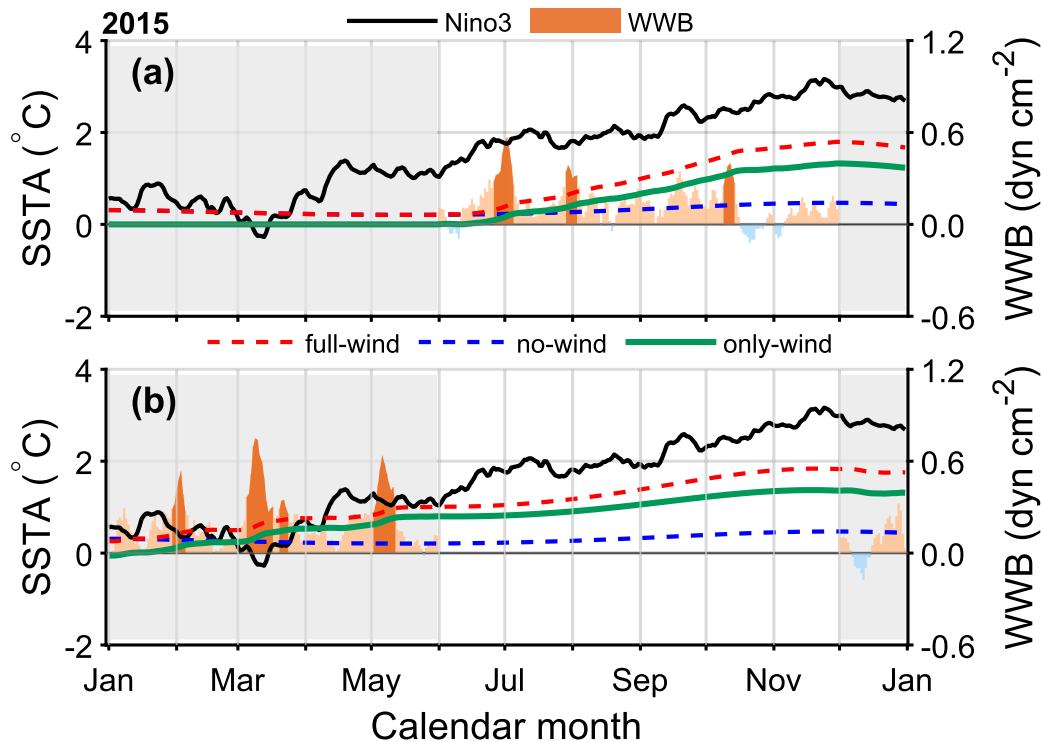


- ① 1997年3月有很强的 WWB
- ② 但 SST 几乎没有持续增长
- ③ 真正决定事件的是 夏秋 WWB
- ④ 季节增长率决定WWB效应

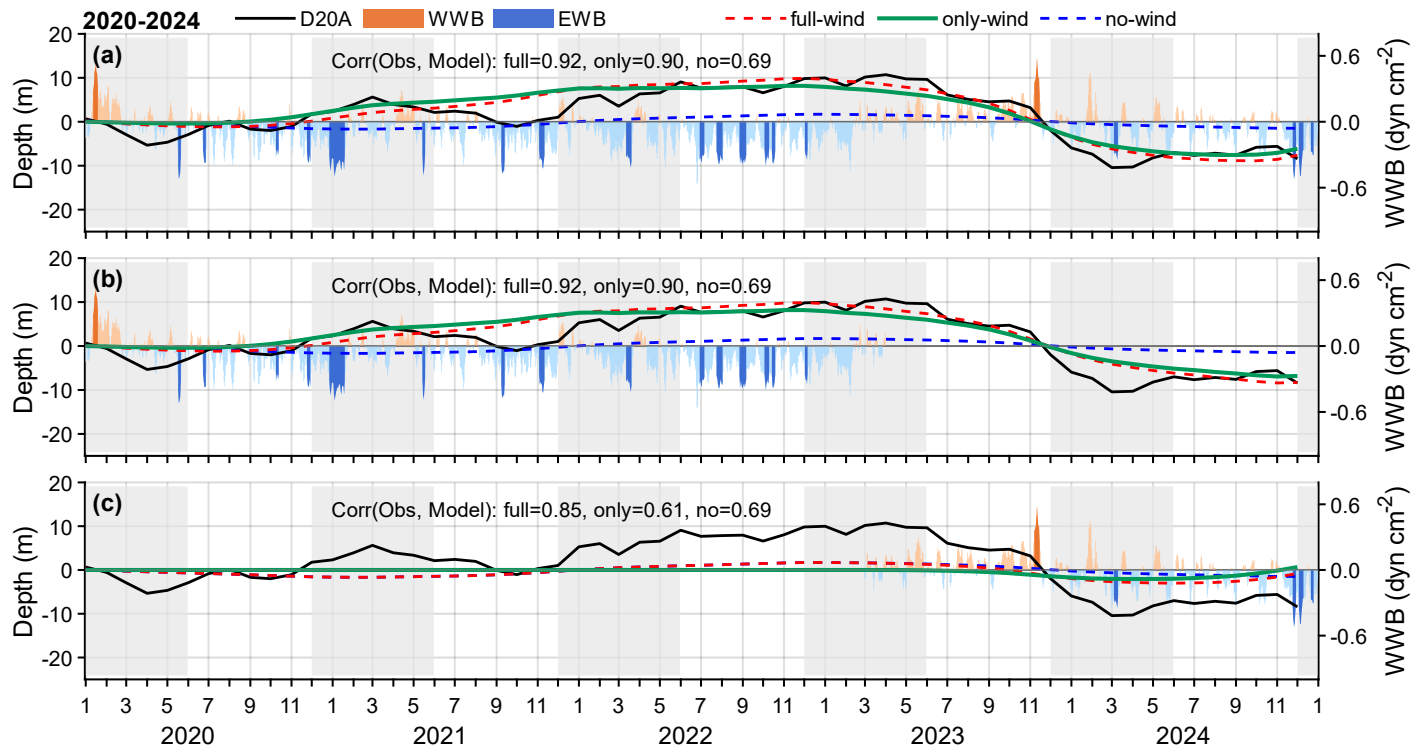
1997-98年ENSO事件：夏秋季WWB主导



2015年ENSO事件：夏秋季WWB主导+春季配合

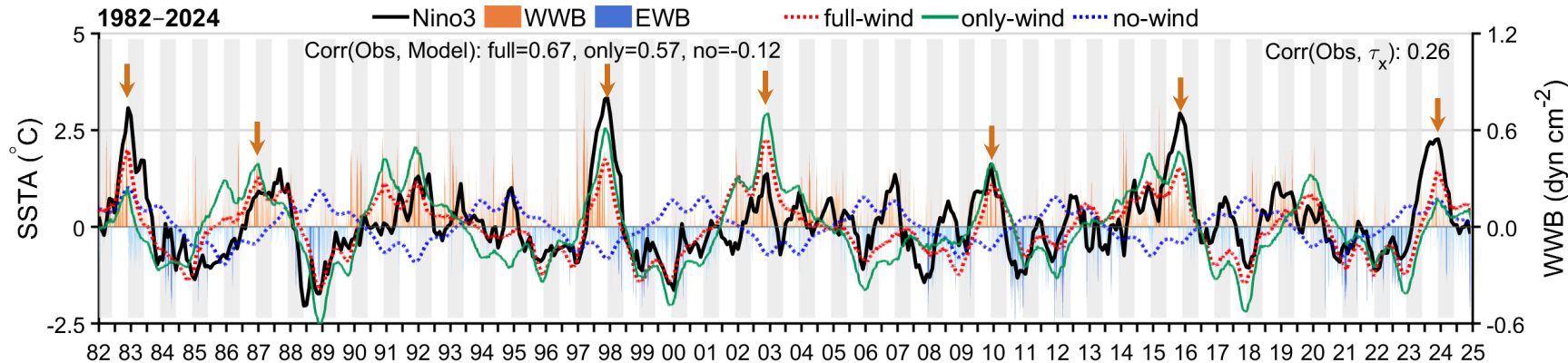


2020-24年ENSO事件：本征频率推动转向



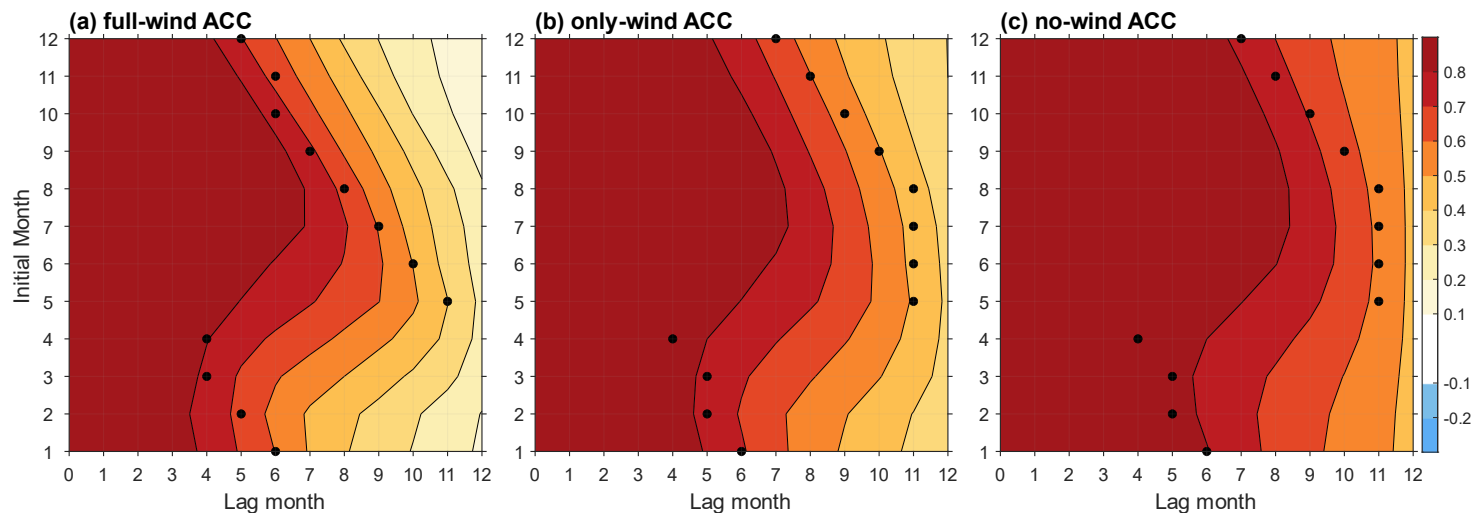
1982-2024年ENSO连续模拟

风爆发 + 本征振荡 → ENSO演变



一个极简概念模型，居然能再现过去40年主要ENSO事件

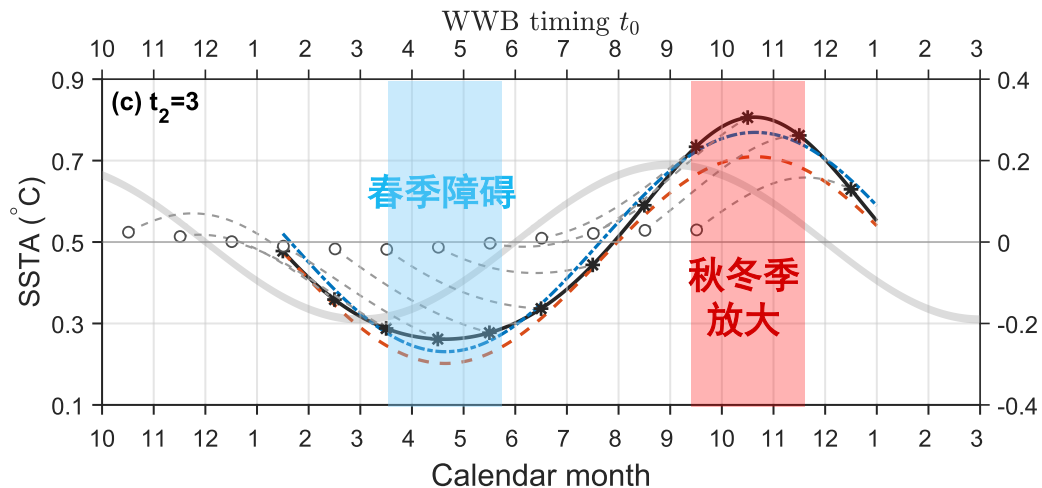
ACC的刚性约束：季节性增长率



季节性增长率对 ENSO 的可预报性施加了刚性动力学约束：无论外界如何对热带海气耦合系统施加扰动，这两个基本特征都可能保持。

总结：WWB效应的季节依赖性

机制： $\Delta T = \Delta T_0$ （本征频率）+ $R_1 \Delta T_1$ （季节调制）



时机并不会创造ENSO事件，但决定了外部强迫能否被系统放大



LaCOAS

Thanks



参考文献

Hu, J., **H. Yang** and Y. Jin, 2026a: WWB Spring barrier in ENSO – Part I: A theoretical framework. *J. Climate*, submitted.

Hu, J., **H. Yang** and Y. Jin, 2026b: WWB Spring barrier in ENSO – Part II: Observations and Event-level attribution. *J. Climate*, submitted.



回顾历史

Über Schwingungskreise mit langsam pulsierender Dämpfung (Zur Theorie des Pendelrückkopplungsempfängers)

题目：关于具有缓慢脉动阻尼的振荡回路（基于摆反馈接收器的理论）

主要研究：超再生接收机 (super-regenerative receiver) 的理论基础与特性

$$\frac{d(LI)}{dt} + RI + \int \frac{I}{C} dt = E, R(t) = R_0 + R_1 \varphi(\alpha t) \quad (1)$$

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R(t)}{L} \frac{dI}{dt} + \left[\frac{1}{CL} + \frac{d}{dt} \left(\frac{R(t)}{L} \right) \right] I = \frac{1}{L} \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

Substitute $E = 0, L = 1, C = \frac{1}{\omega_0^2}, R(t) = \lambda(t)$ (3)

Get $\ddot{T} + \lambda(t) \cdot \dot{T} + (\omega_0^2 + \dot{\lambda}(t)) \cdot T = 0$ (4)

A. Erdelyi (1935)

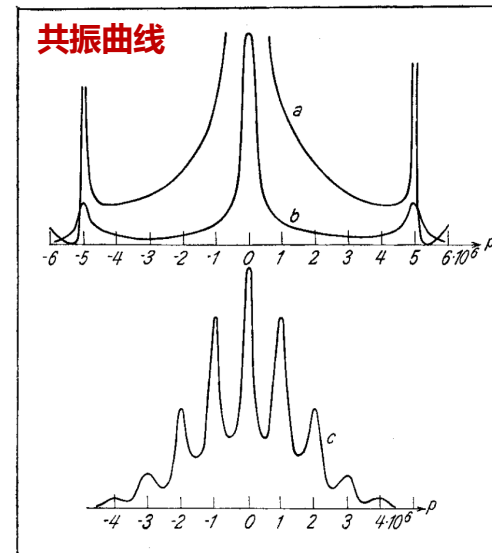


Fig. 1. Resonanzkurven.

- a) $\alpha = 5 \cdot 10^3, \delta_0 = 0, \delta_1 = 2 \cdot 10^3$
- b) $\alpha = 5 \cdot 10^3, \delta_0 = 10^3, \delta_1 = 5 \cdot 10^3$
- c) $\alpha = 10^6, \delta_0 = 10^5, \delta_1 = 5 \cdot 10^5$

方程变换

$$\ddot{T} + \lambda(t) \cdot \dot{T} + (\omega_0^2 + \dot{\lambda}(t)) \cdot T = 0$$

A. Erdelyi (1935)

Define: $T(t) = e^{-\int_0^t \frac{\lambda(z)}{2} dz} \cdot y(t)$

Get: $\ddot{y} + [k + \Phi(t)] \cdot y = 0$

Hill equation

GW Hill (1886)

$$k = \omega_0^2 - \delta_0^2 - \frac{\delta_1^2}{2}, \delta_0 = \frac{R_0}{2}, \delta_1 = \frac{R_1}{2}$$

$$\Phi(t) = \delta_1 \sqrt{\omega_1^2 + 4\delta_0^2} \cos\left(\omega_1 t - \tan^{-1}\left(\frac{2\delta_0}{\omega_1}\right)\right) + \frac{\delta_1^2}{2} \cos(2\omega_1 t)$$

When $R_1 \gg 1$

$$k = -\frac{\delta_1^2}{2}, \delta_1 = \frac{R_1}{2}$$

$$\Phi(t) \approx -k \cos(2\omega_1 t)$$

Mathieu equation

É. Mathieu (1868)

