

第八章：海洋环流与海-气相互作用

Jintai Lin 林金泰

Dept. of Atmospheric & Oceanic Sciences, School of Physics

linjt@pku.edu.cn

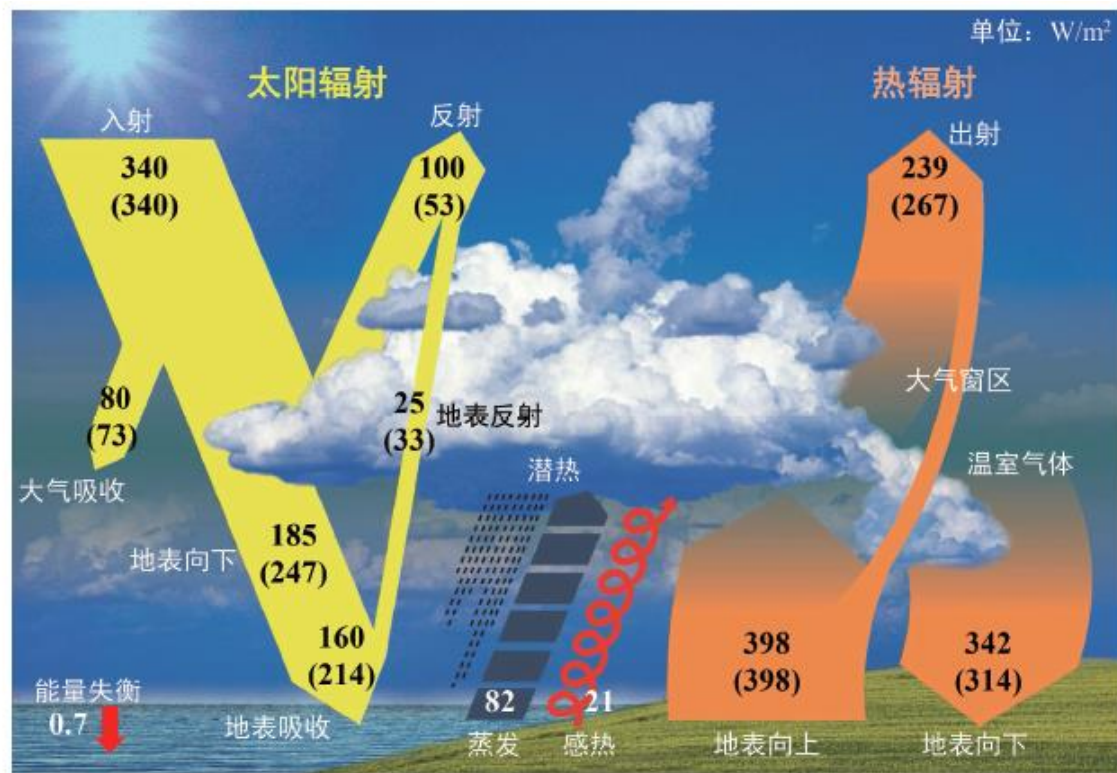
<http://www.pku-atmos-acm.org/>

课件改编自俞妍老师课件



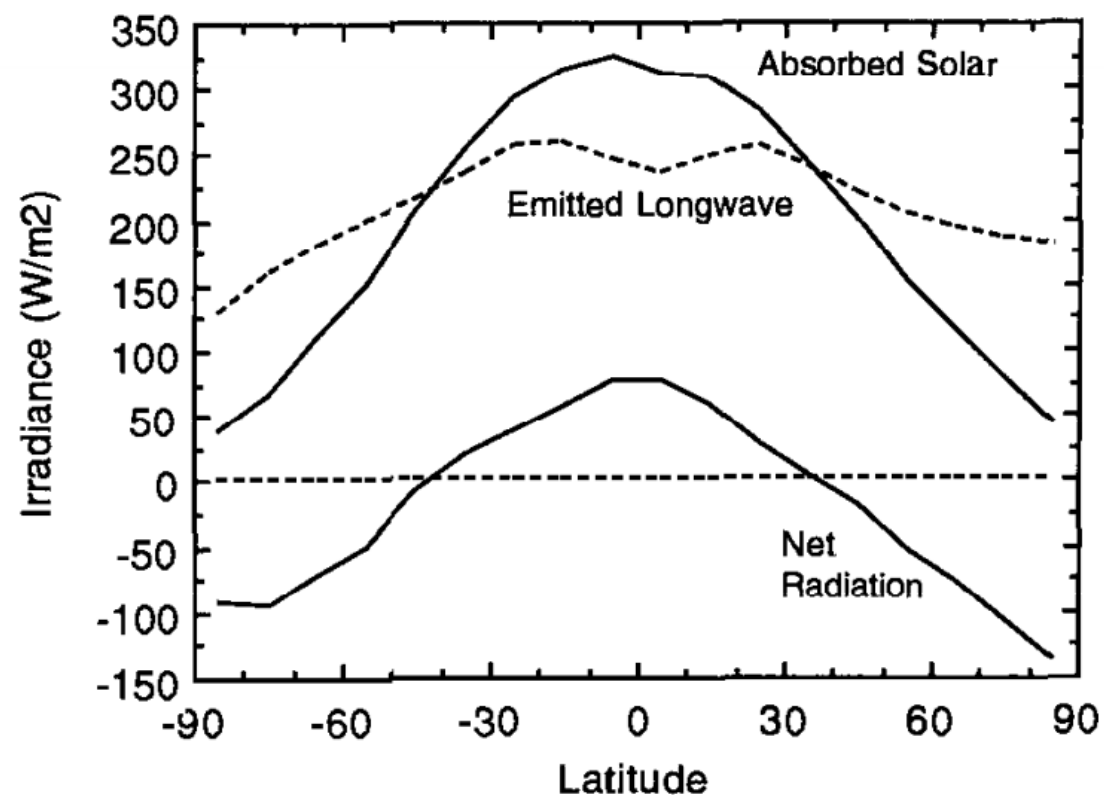
现代地球气候系统的能量收支分布

现代气候系统两箱模型（大气+地表）能量收支

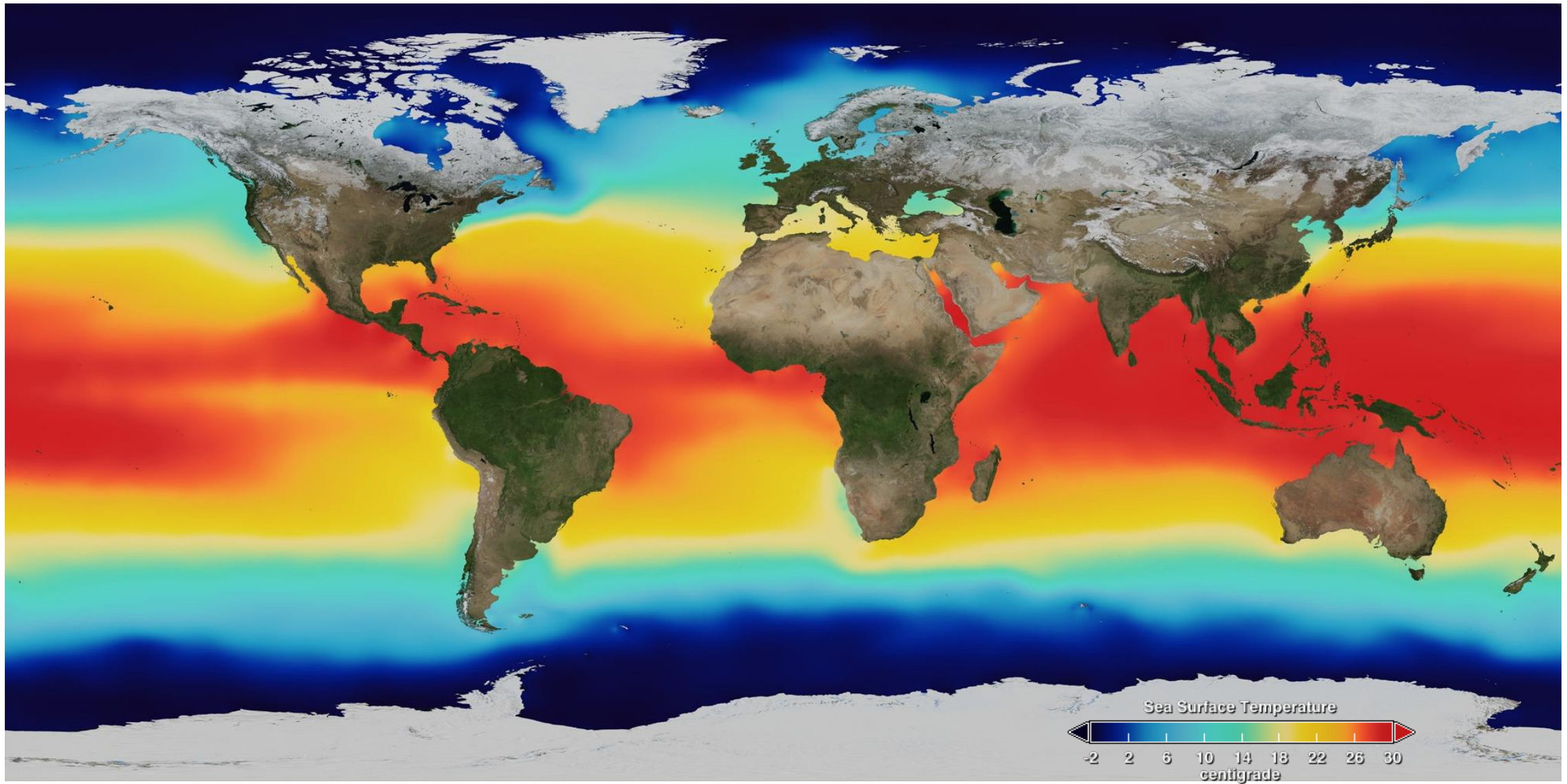


括号内为晴空（无云）条件

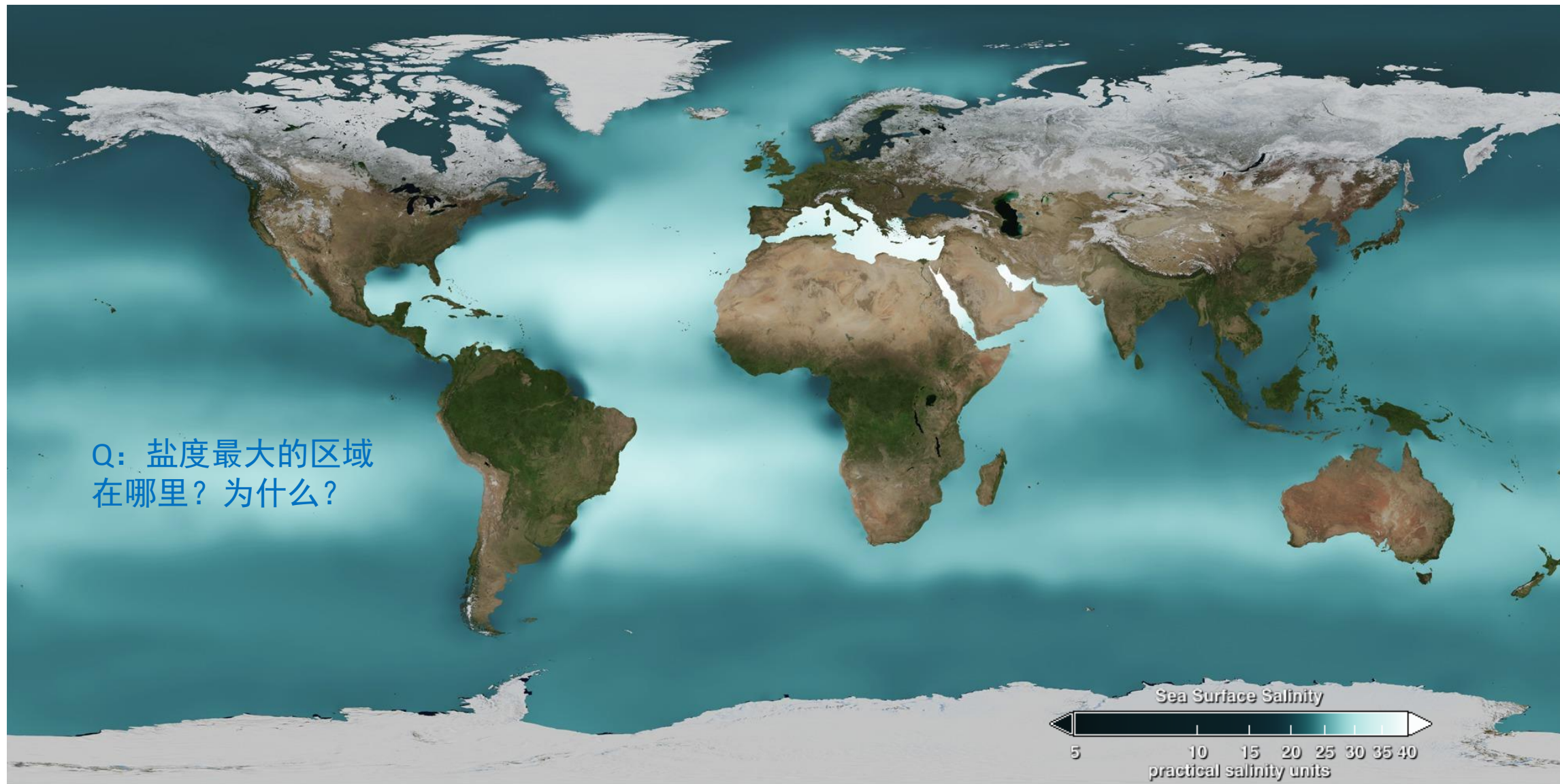
现代气候系统能量收支的经向（南北向）分布



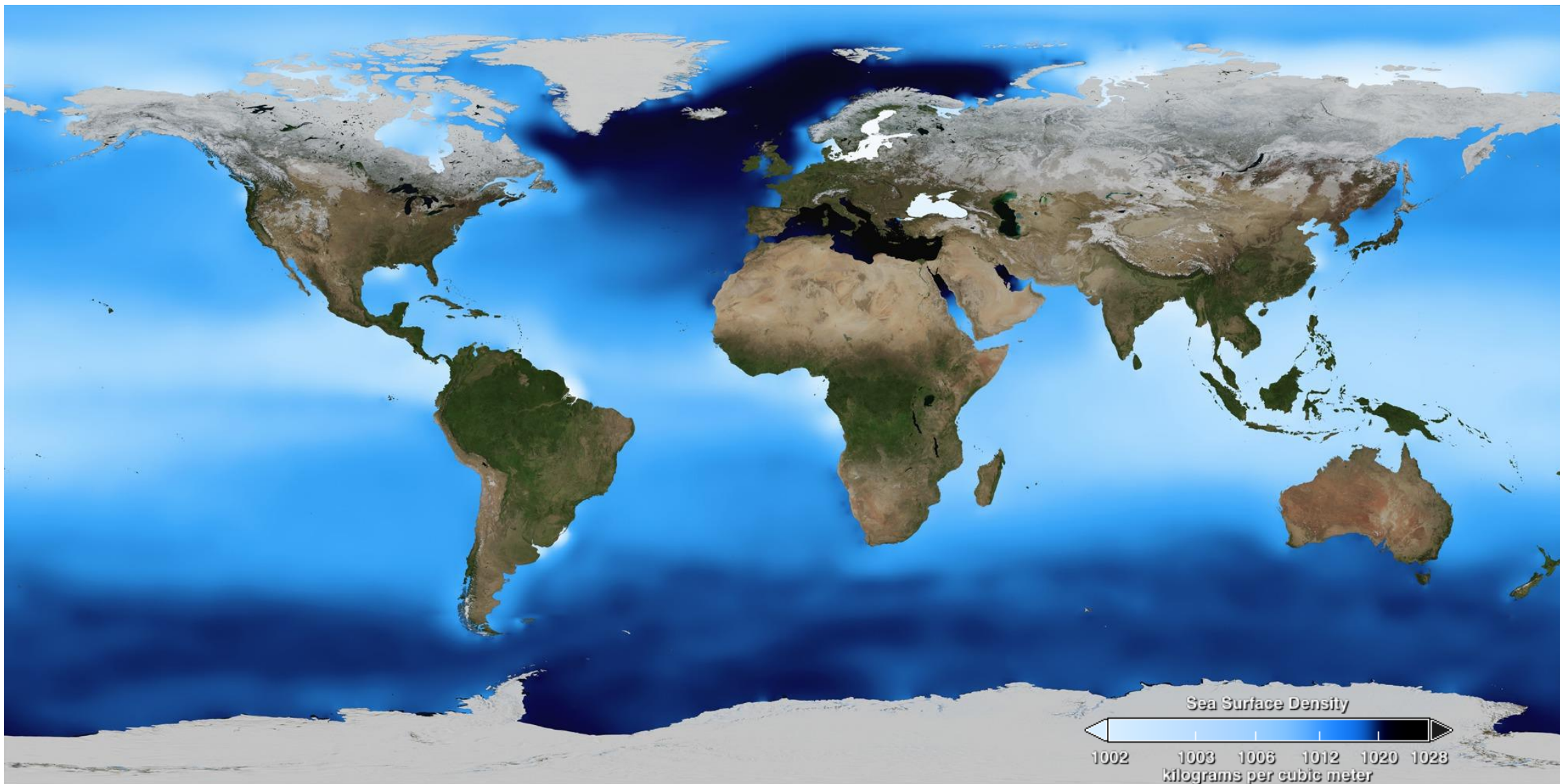
海洋表面温度



海洋表面盐度

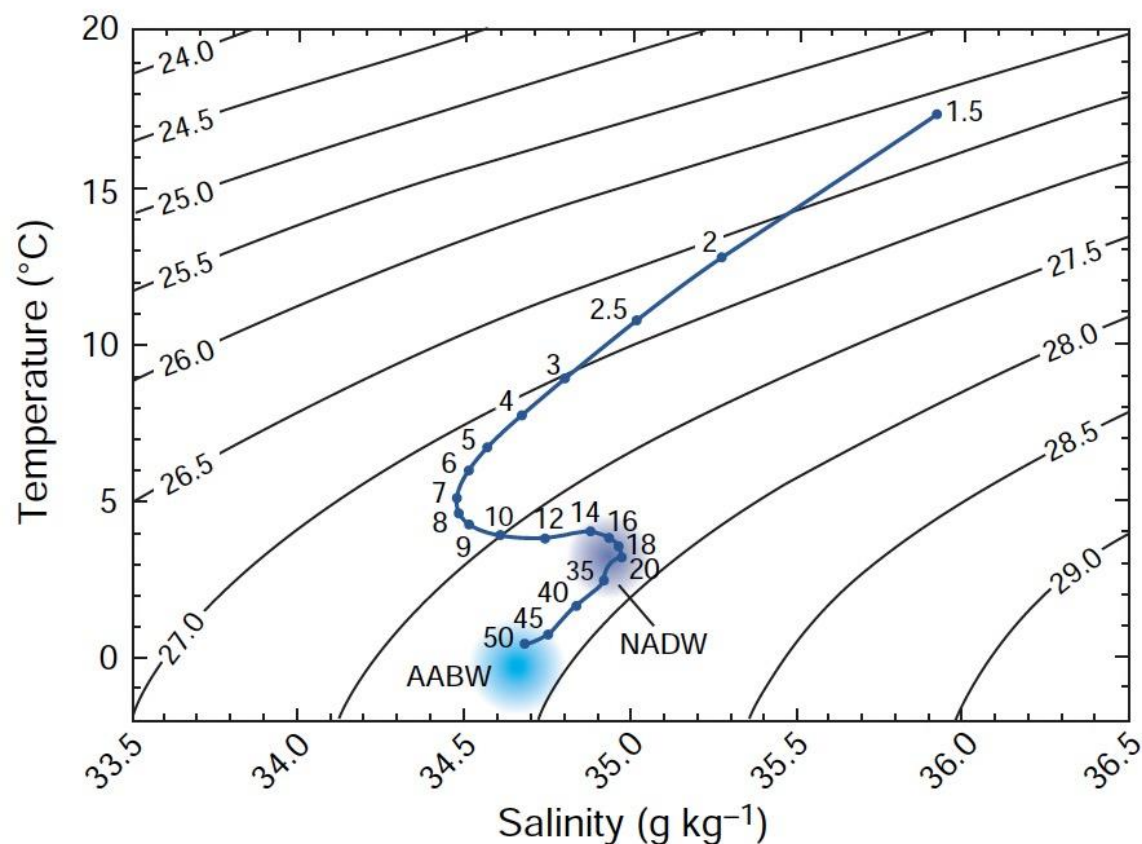


海洋表面密度（由温度和盐度决定）

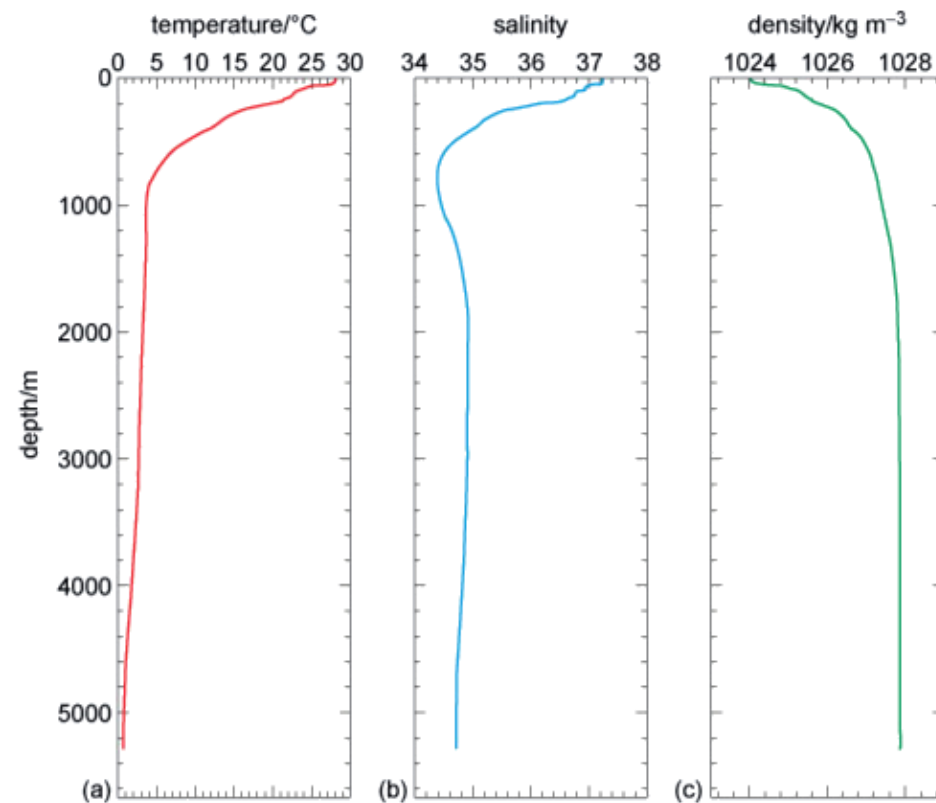


海水密度与温度和盐度的关系

等密度线（数字代表海水密度与纯水之差， kg m^{-3} ）



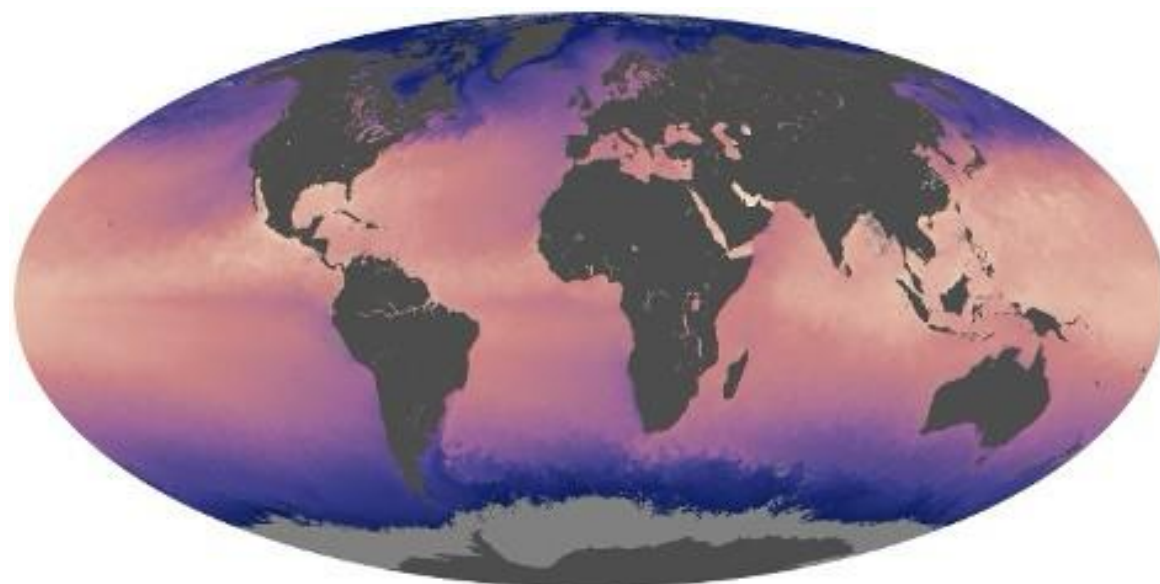
海水温度、盐度、密度的垂直廓线



Q: 比起大气，海洋静力稳定度如何？

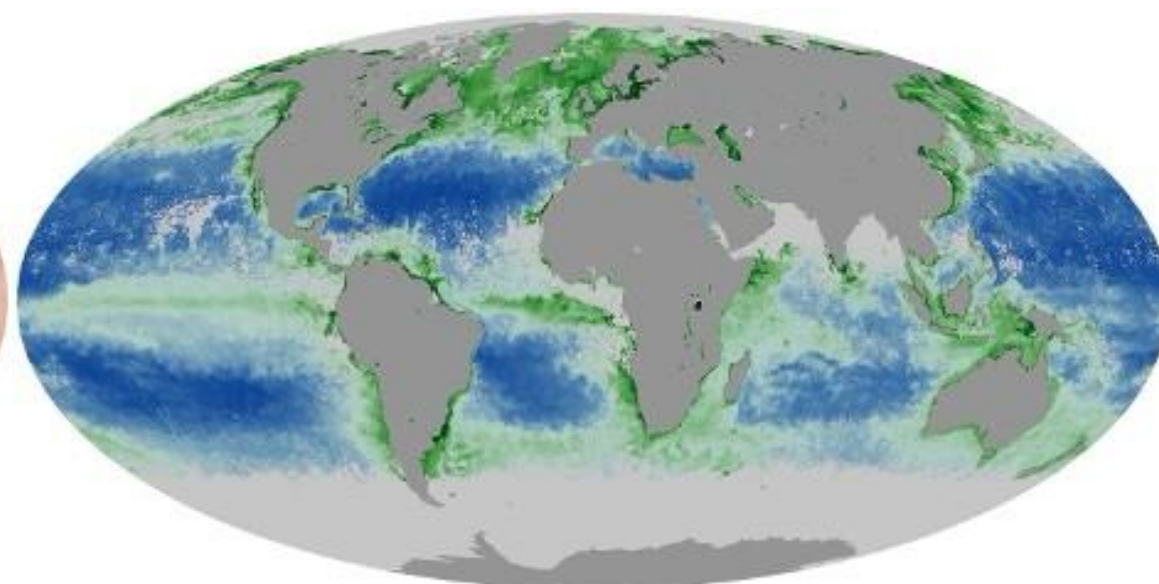
海洋表面温度和海洋初级生产力

海表温度



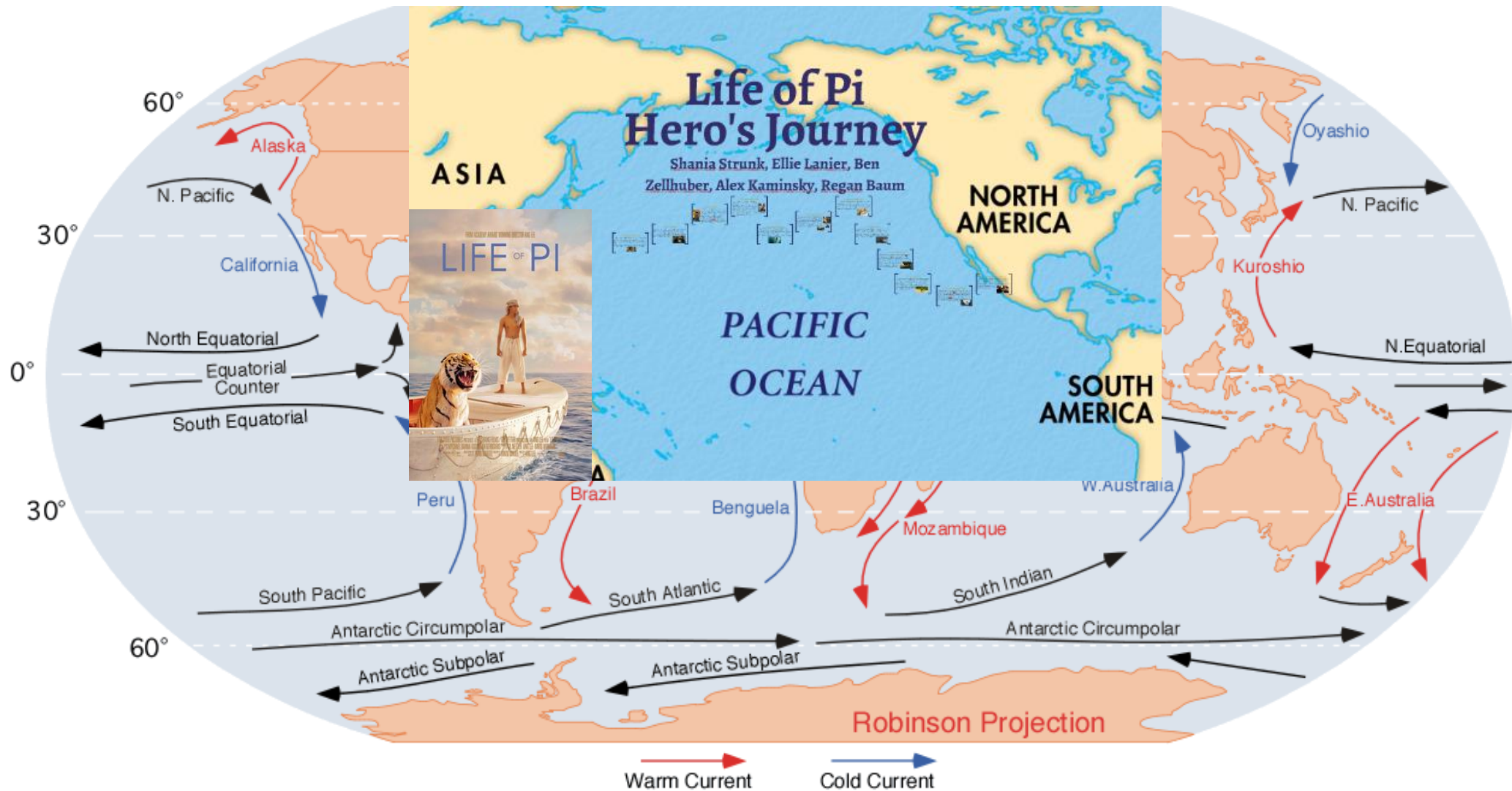
Sea Surface Temperature
°C
-2 35
July 2002

叶绿素浓度

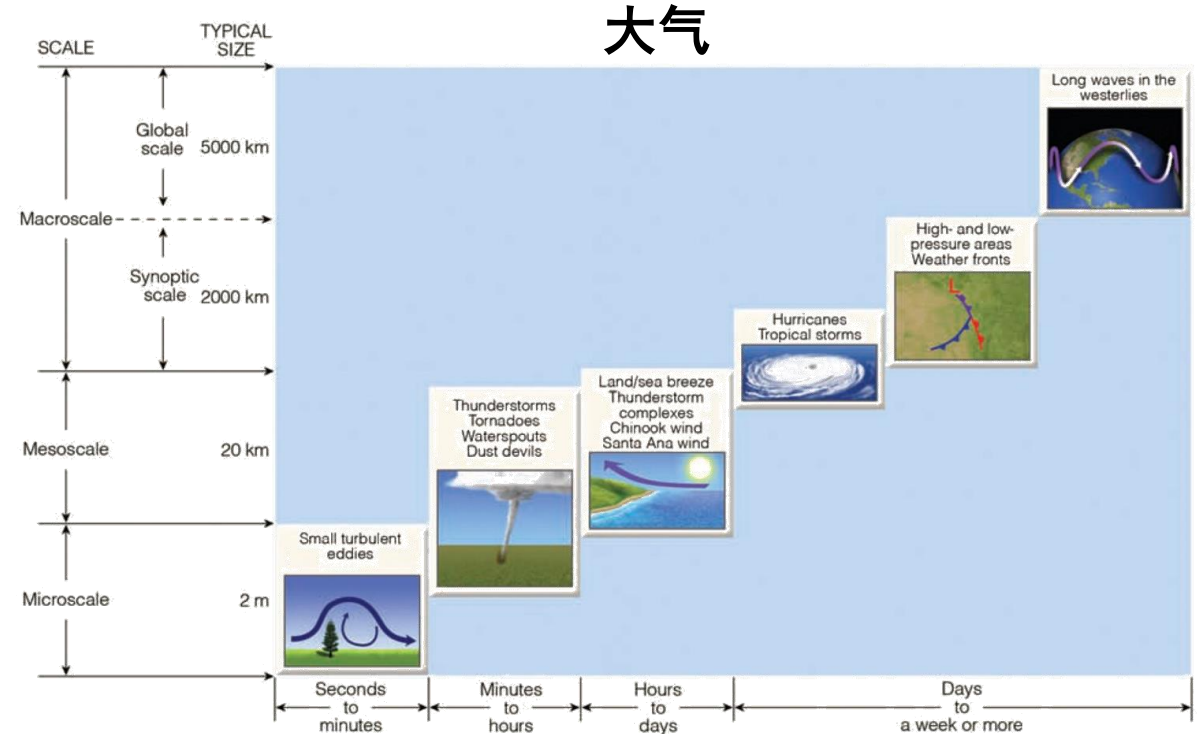
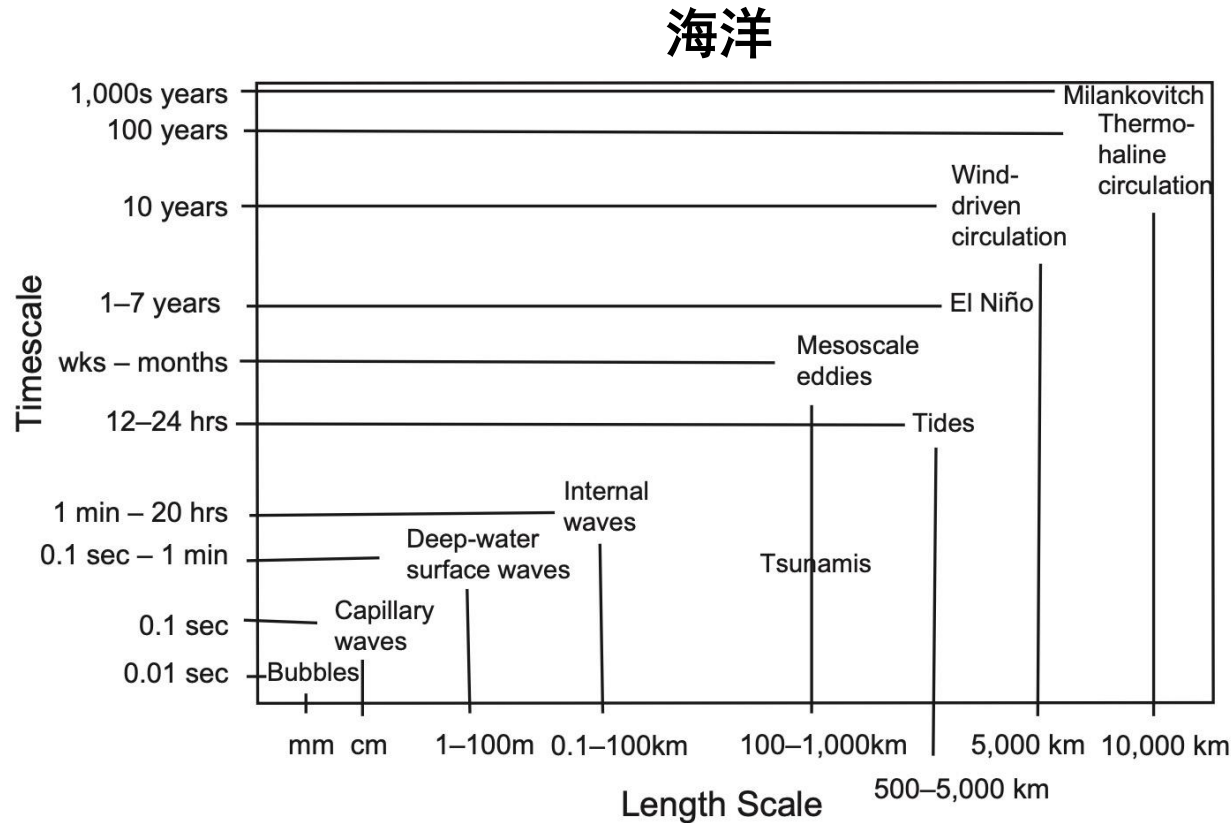


Chlorophyll Concentration
(mg/m³)
0.01 0.15 20
July 2002

洋流

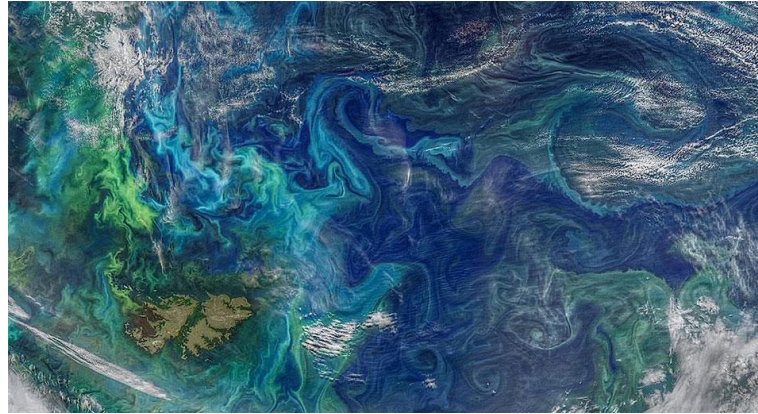
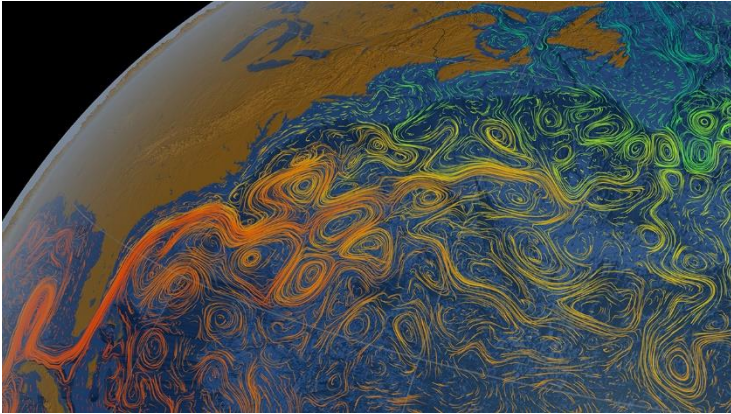


海洋运动的时间和空间尺度



Lynne Talley et al. Descriptive physical oceanography: An Introduction (6th edition)

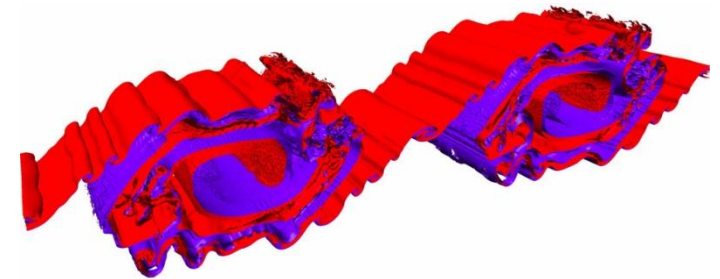
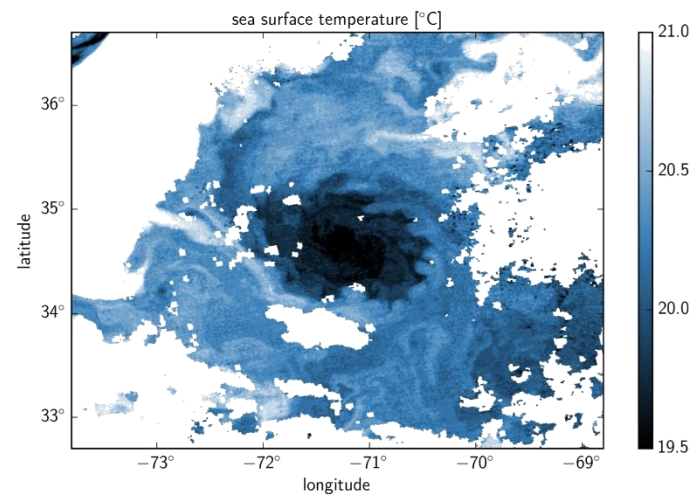
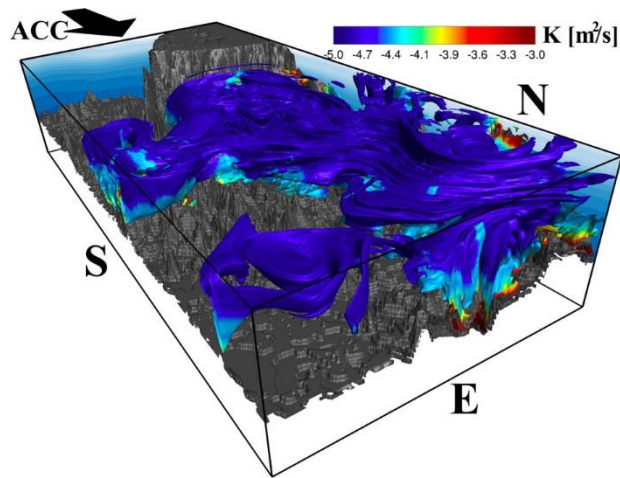
海洋中的涡旋 Eddy



中尺度涡旋（～热带和温带气旋）

次中尺度涡旋（～中尺度对流系统）

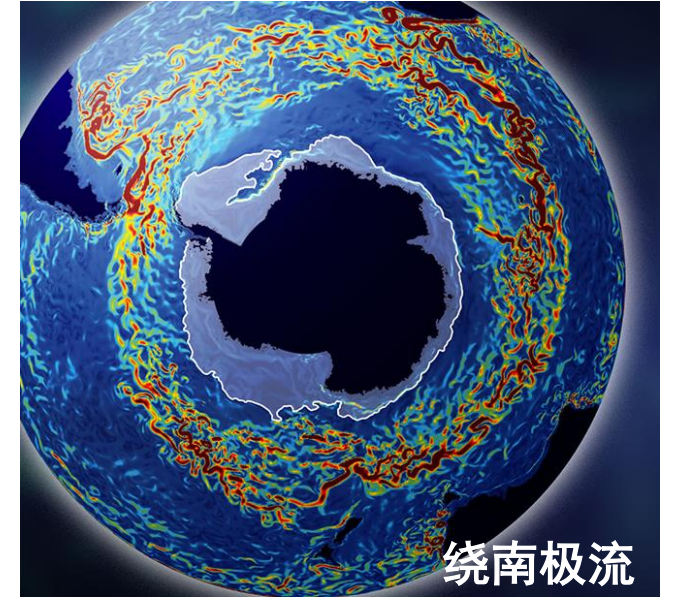
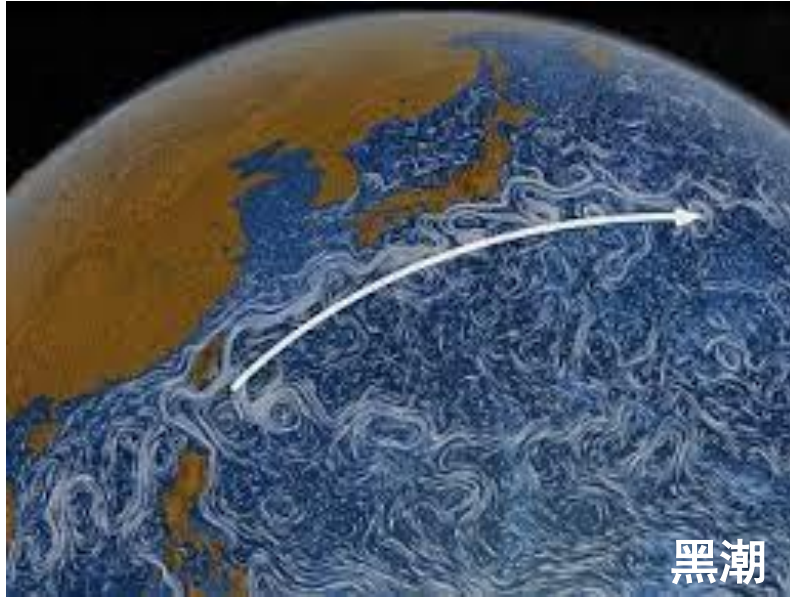
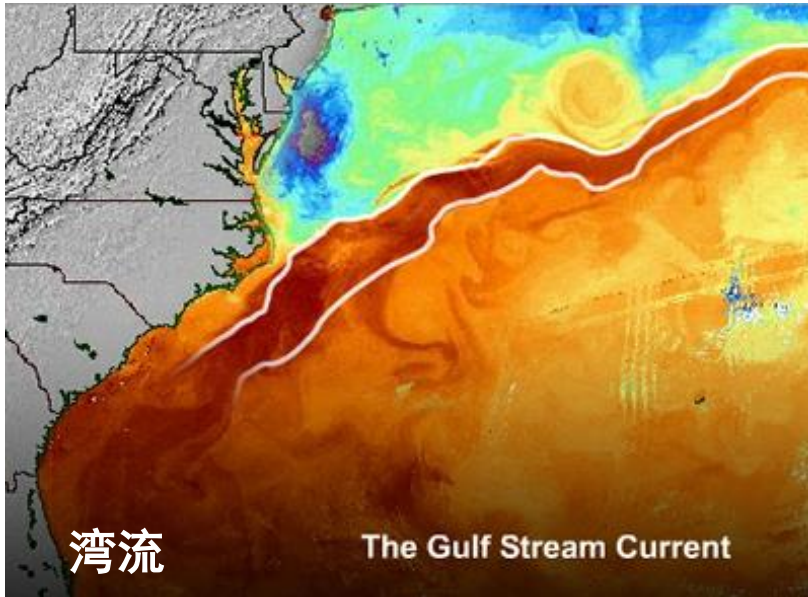
微涡旋（～大气边界层涡）



本章主要内容

1. 风生洋流：艾克曼流、风生环流、南极绕极流
2. 海气耦合和沃克环流
3. 厄尔尼诺和南方涛动
4. 太平洋年代际涛动
5. 大西洋年代际震荡
6. 温盐环流和新仙女木事件

风生洋流

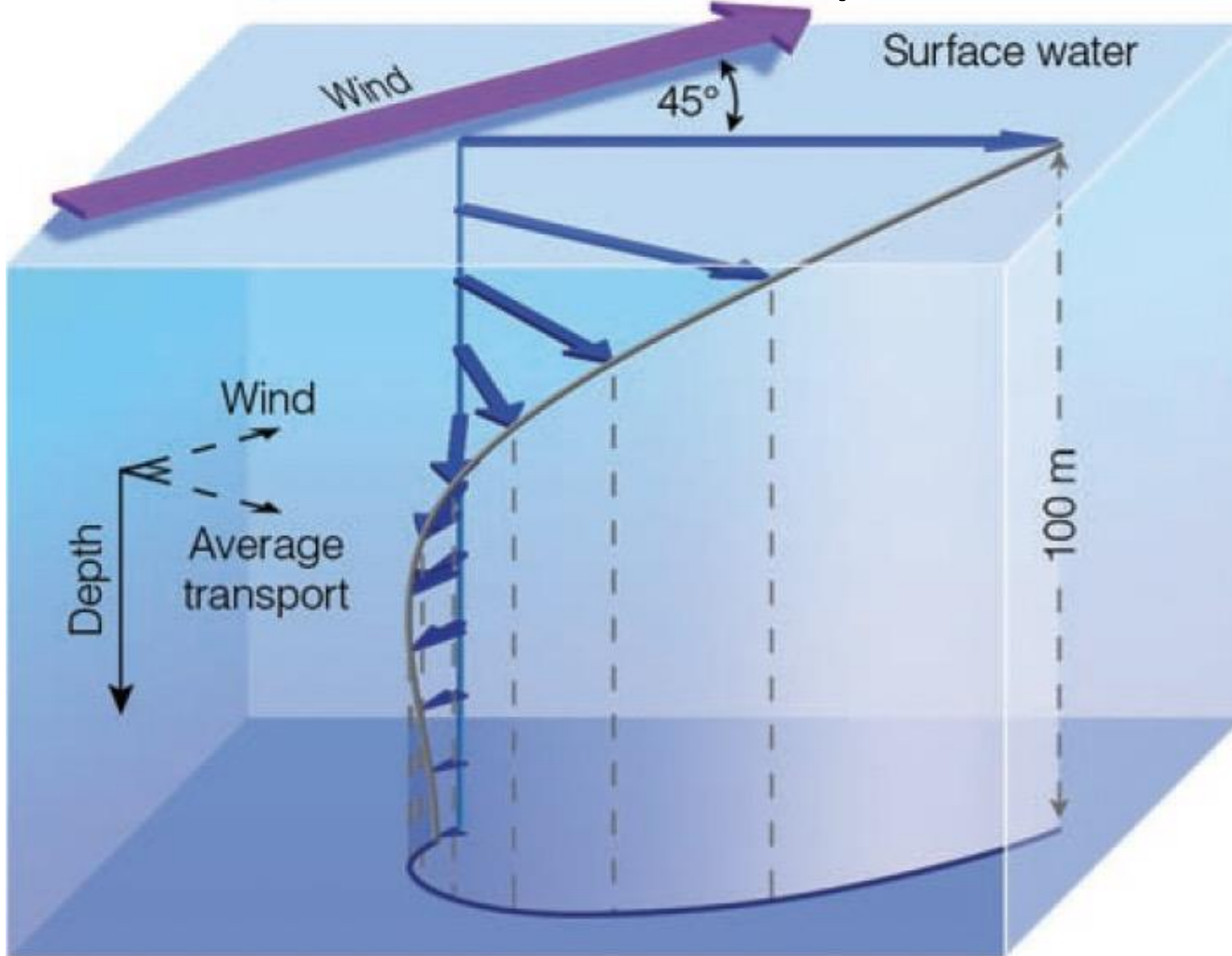


- 大气运动作用在海洋表面上，通过摩擦力（风应力）驱动海水运动，形成风生（驱动）洋流。
- 主要的风生洋流有：北大西洋的湾流（Gulf Stream），北太平洋的黑潮（Kuroshio）、南极绕极洋流（Antarctic circumpolar current, ACC）等。

Q: ACC的方向是顺时针（自西向东）还是逆时针？

风生洋流的基本原理

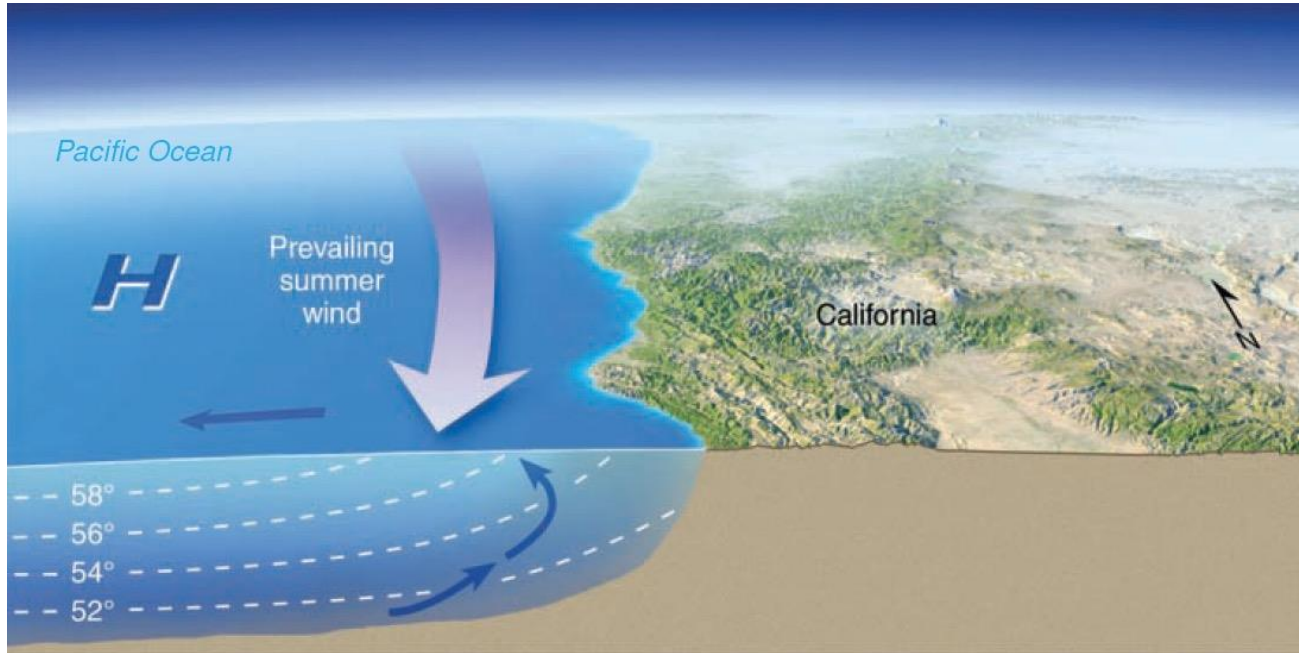
艾克曼螺旋 (Ekman Spiral)



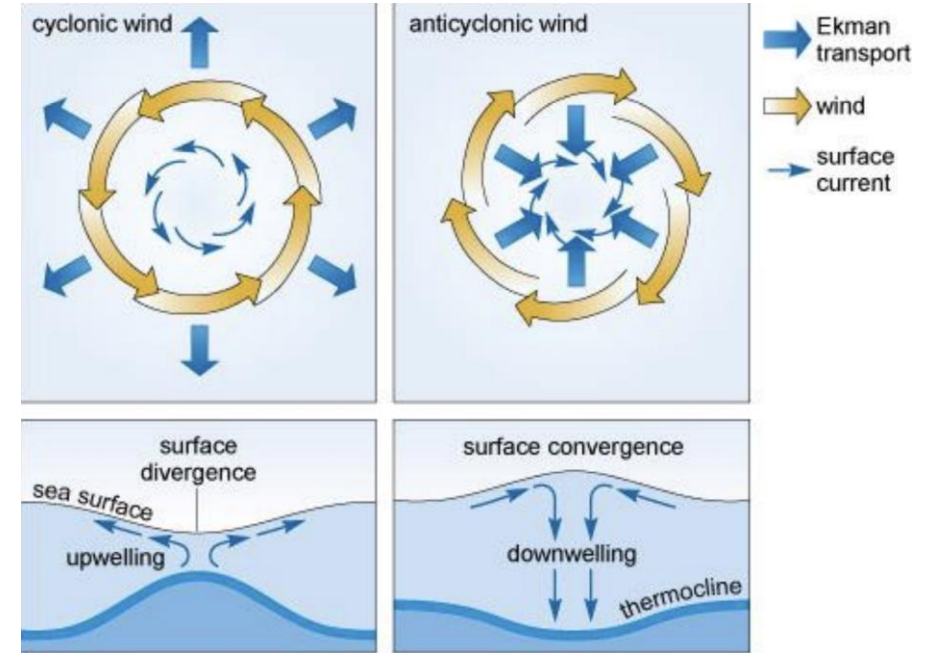
- 风应力作用在洋面上，带动海水沿风吹的方向运动，在科氏力的作用下，表面海水逐渐向右(北半球)偏转形成与风向20-45度的夹角。
- 随着海水深度的加深，运动方向逐渐向右偏转。
- 另外，由于摩擦力的作用，海水运动速度逐渐减弱。
- 一般来说，风生洋流只达到100-300米深。

风生洋流的基本原理

艾克曼输运 (Ekman Transport)



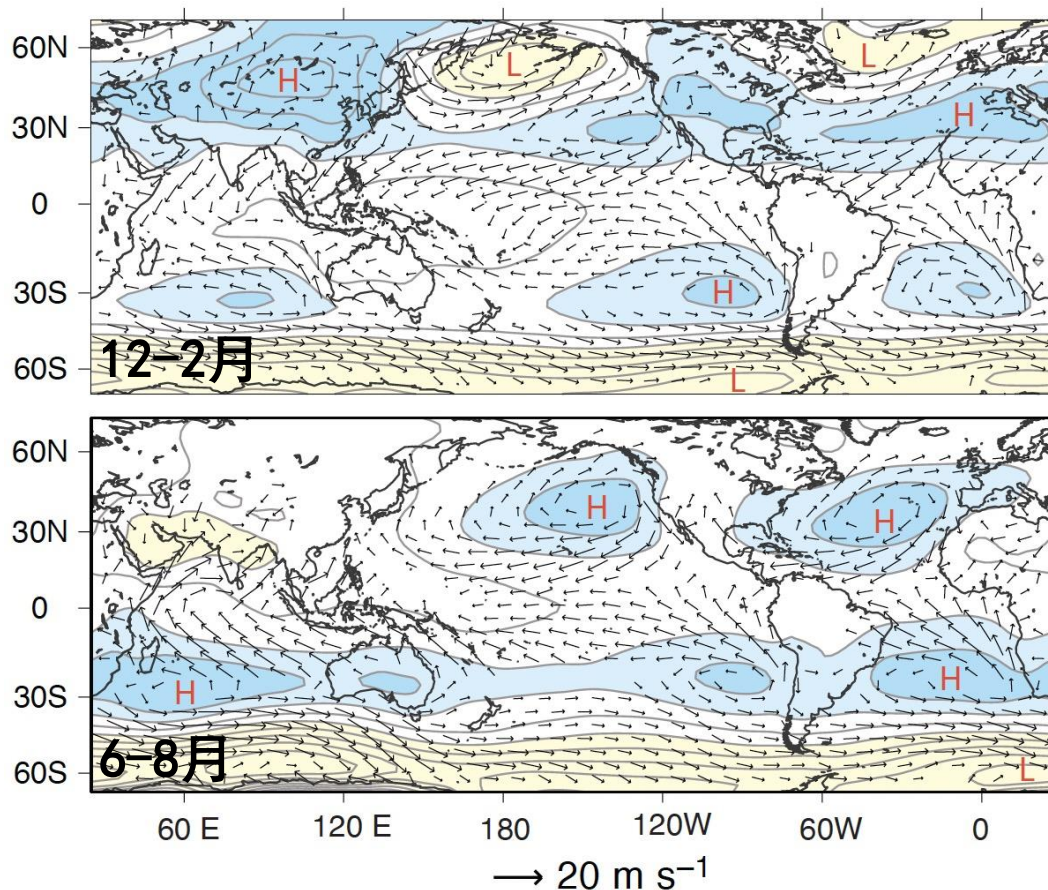
艾克曼泵 (Ekman Pumping)



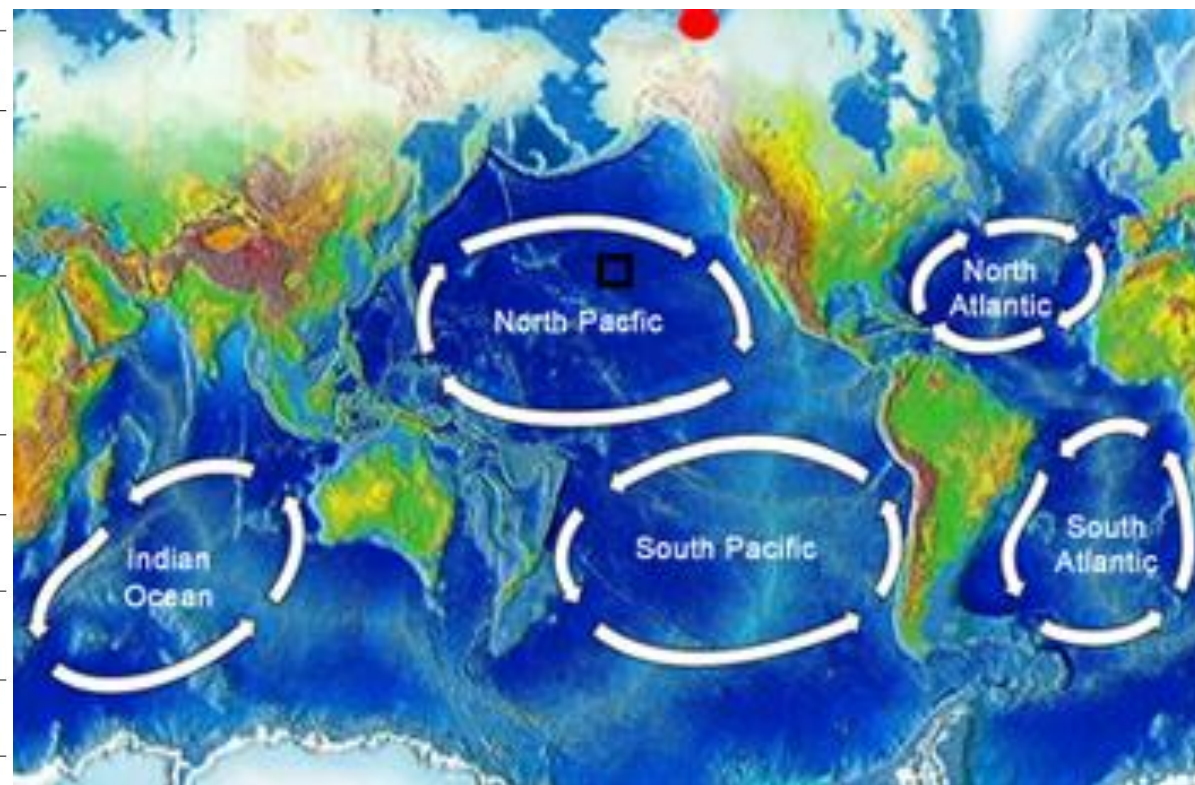
- 艾克曼输运导致辐合或辐散，引起海水的垂直运动。
- 离岸艾克曼输运、气旋性海洋环流、赤道流等都伴随次表层海水上涌。这些地区也是营养盐充足、海洋生态繁荣的地区。

副热带风生环流 Subtropical Ocean Gyre

地表风



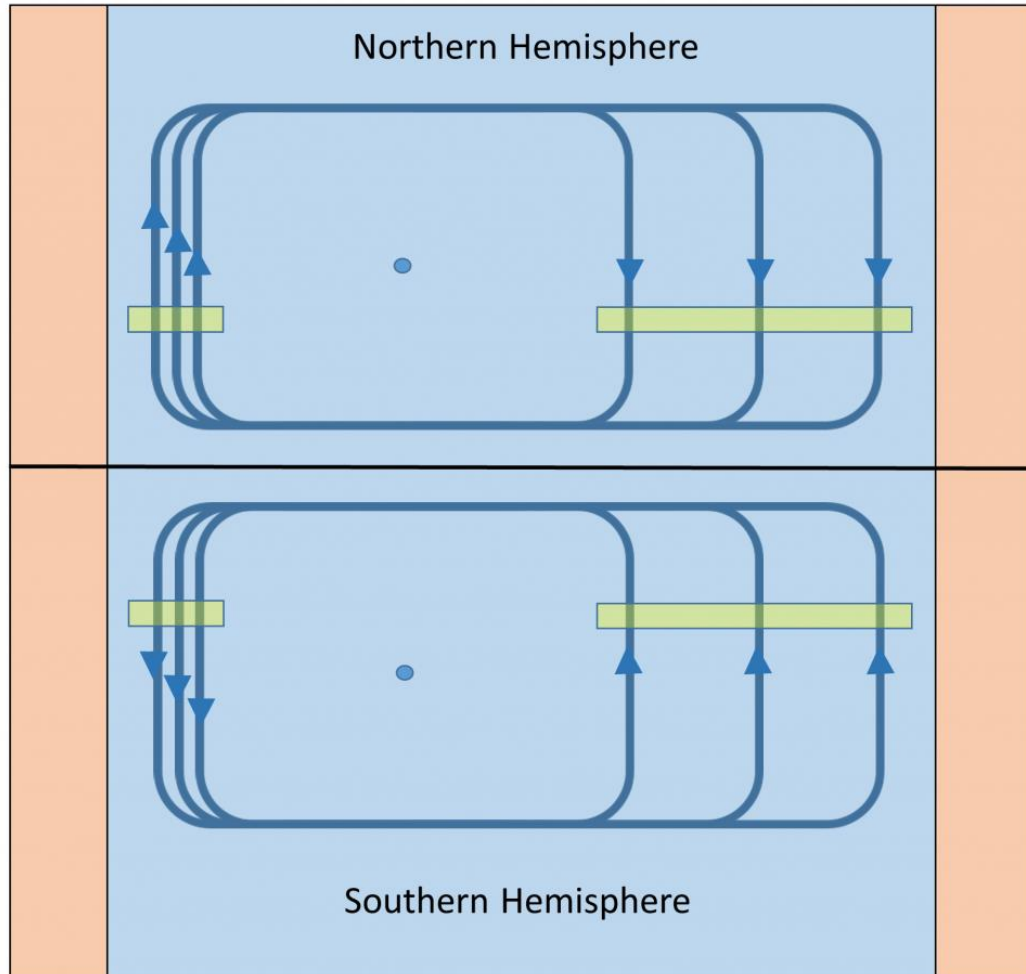
副热带风生环流



中高纬度的西风驱动海水向东运动并逐步向赤道偏转。
热带东风驱动海水向西运动并逐步向极地偏转。 } 它们构成了一个闭合、非对称的环流。

副热带风生环流的不对称性

中高纬度的西风驱动海水向东运动并逐步向赤道偏转。
热带东风驱动海水向西运动并逐步向极地偏转。 } 它们构成了一个闭合、非对称的环流。

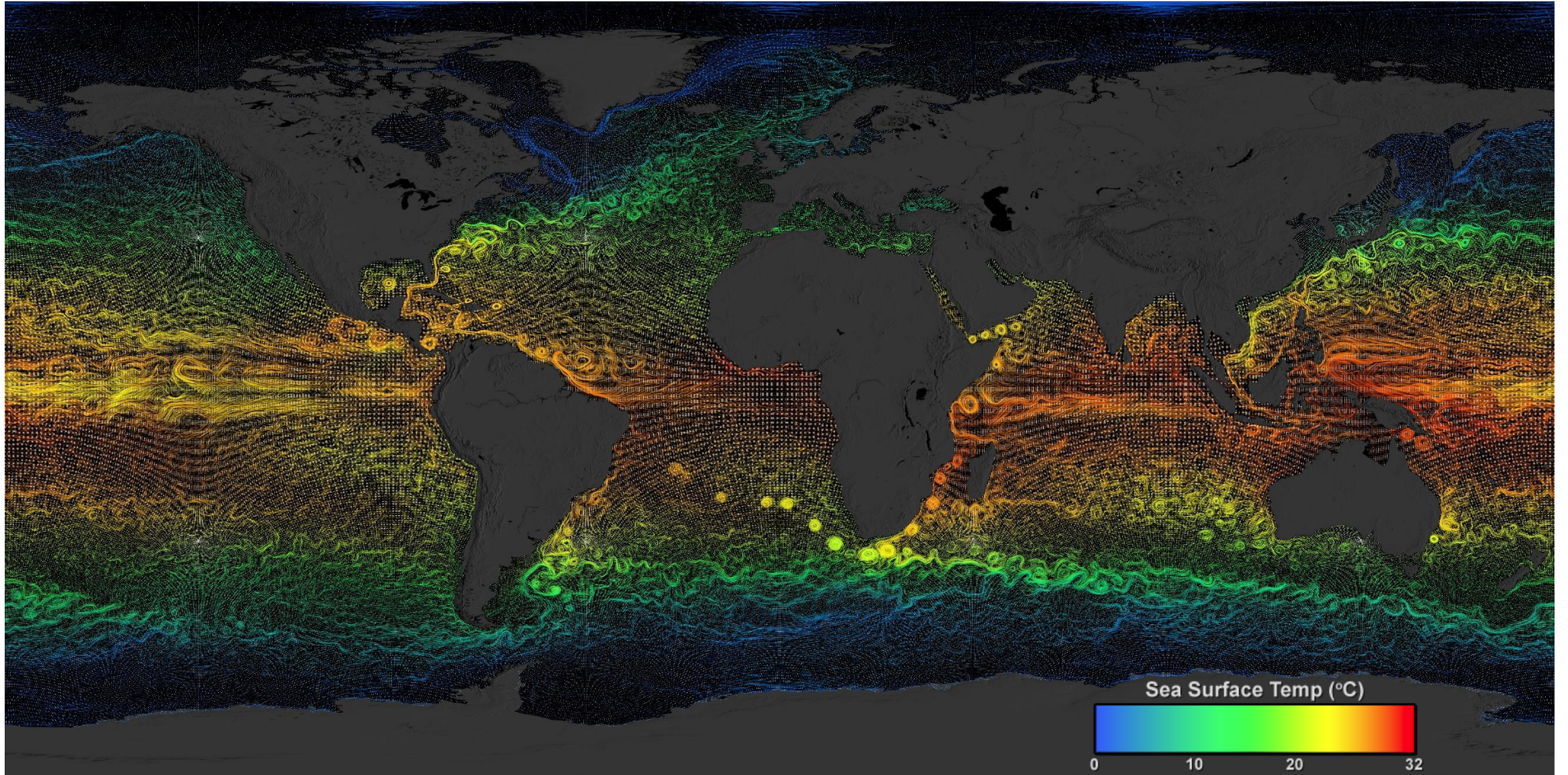


	西边界流	东边界流
流速	$\sim 10 \text{ km day}^{-1}$	$\sim \text{km day}^{-1}$
宽度	$< 100 \text{ km}$	$\sim 1000 \text{ km}$
深度	$\sim 2 \text{ km}$	$\sim 500 \text{ m}$

Q: 西边界流强化产生的原因是什么?

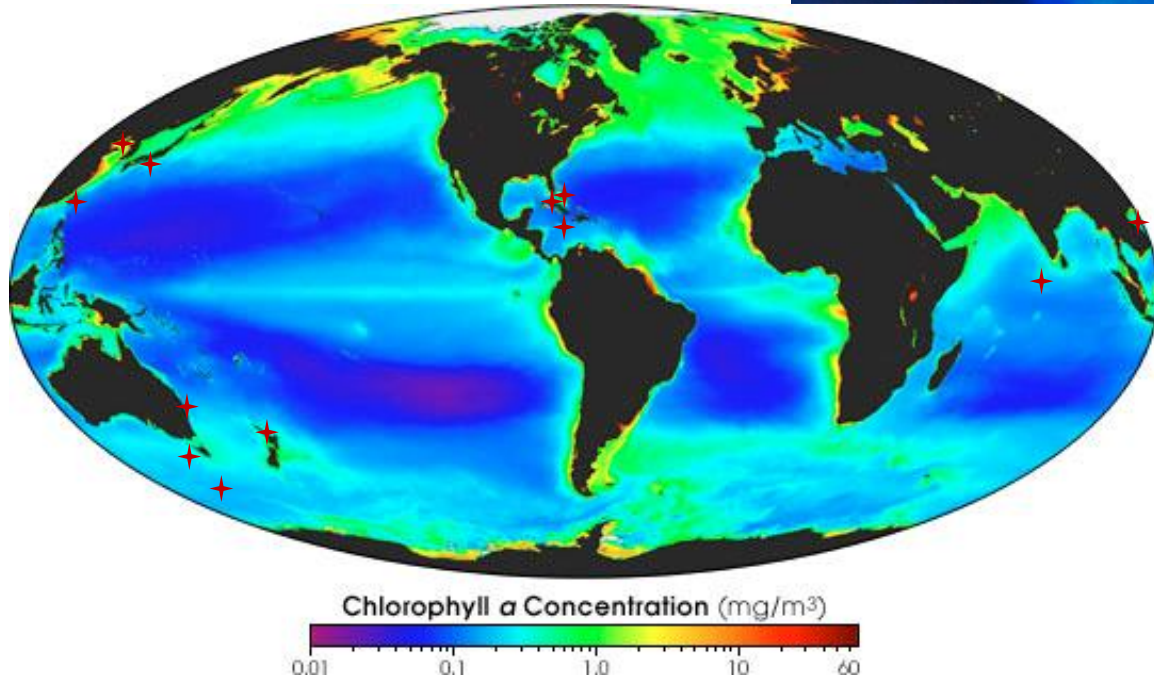
定性理解: 高纬度科氏力更强, 海流更快向赤道偏转, 所以西边界流比东边界流更窄。而东西边界流输运的水量应该相当, 所以西边界流更快、更深。

又快又暖又活跃的西边界流



副热带风生环流产生“海洋上的沙漠”和“垃圾场”

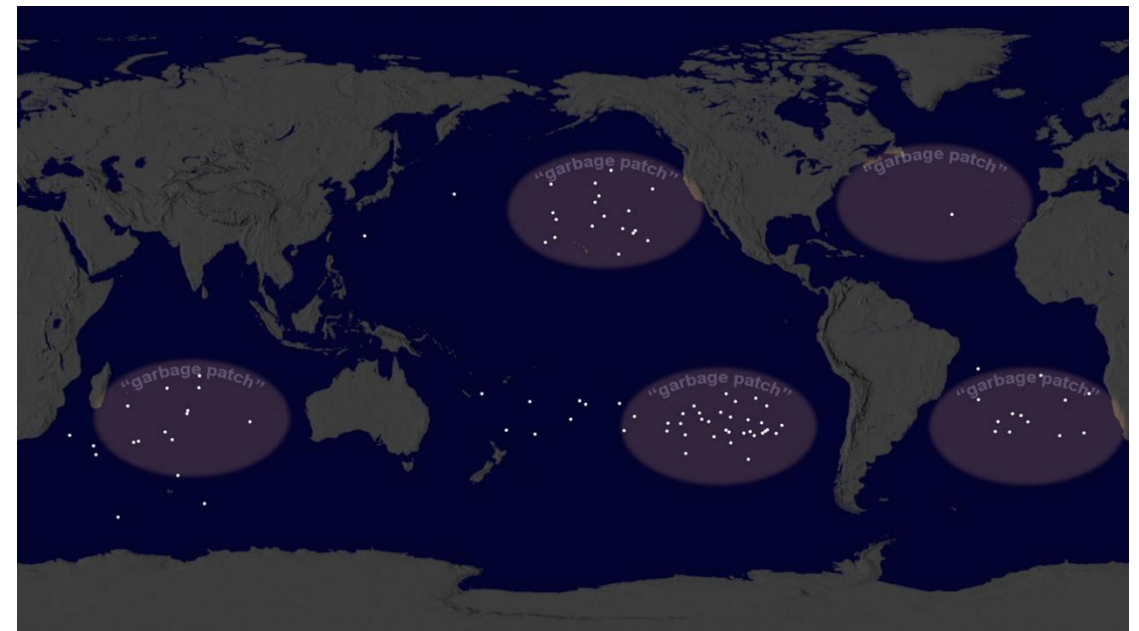
艾克曼输运和艾克曼抽吸导致
叶绿素浓度



波多黎各荧光海

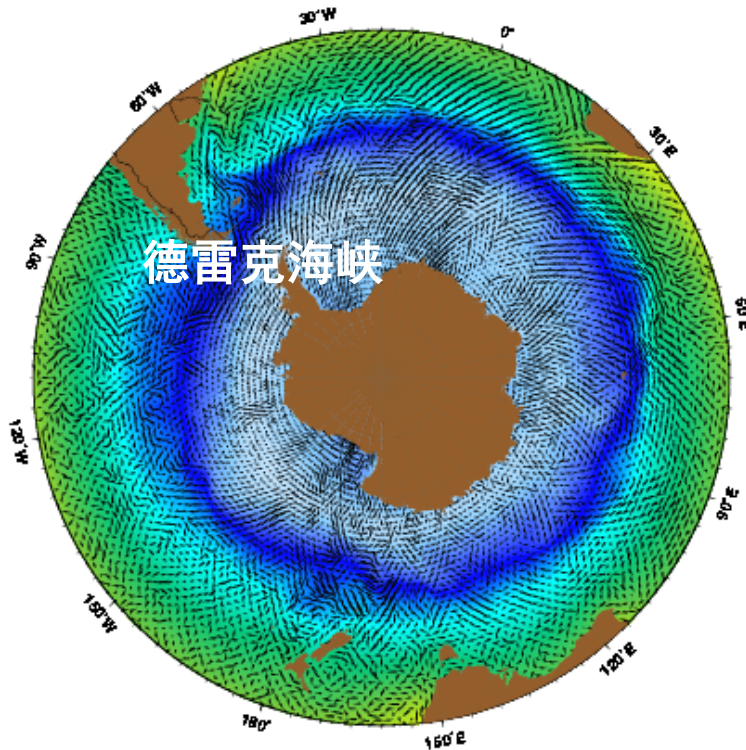


海上浮标聚集

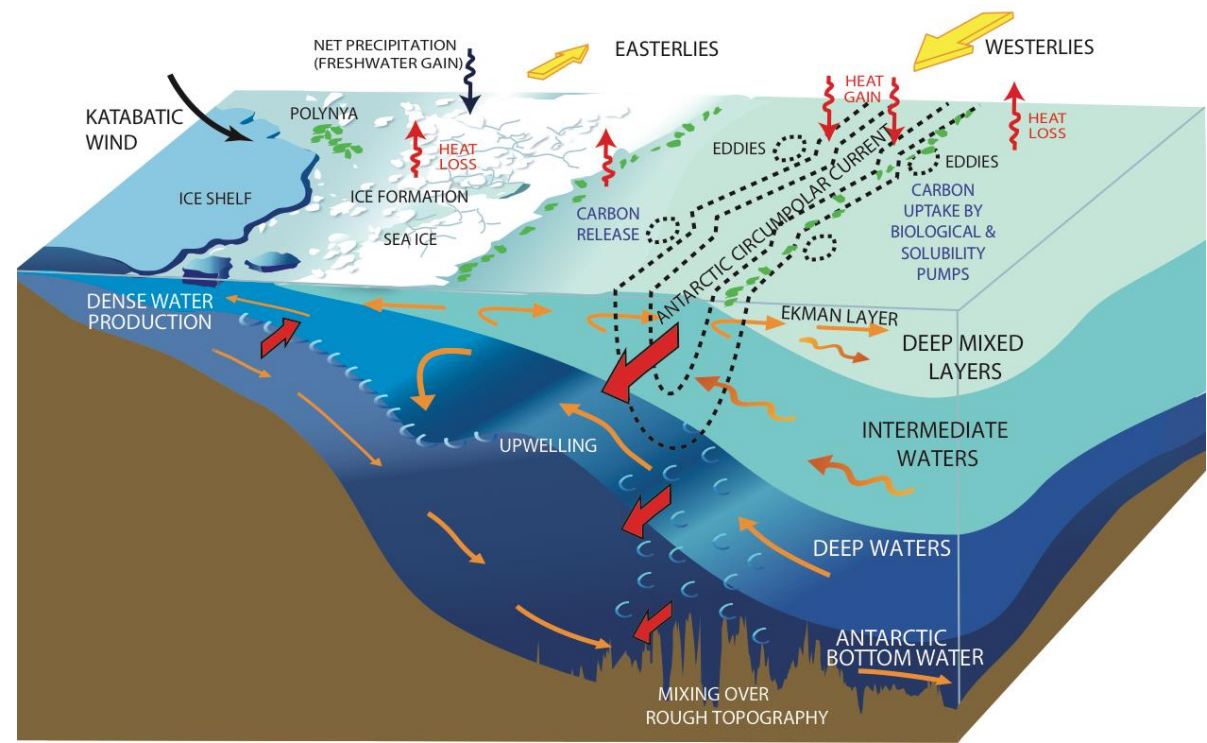


高纬地区风生环流：南极绕极流

洋流的方向和强弱（蓝色最强）

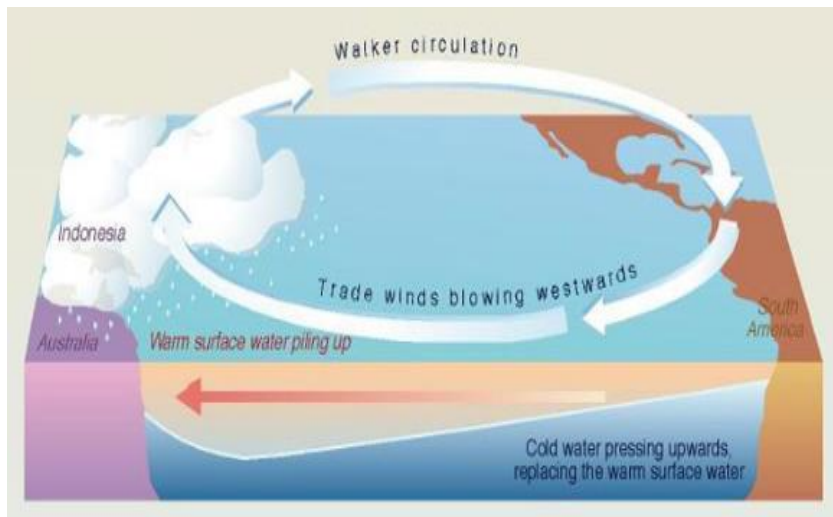
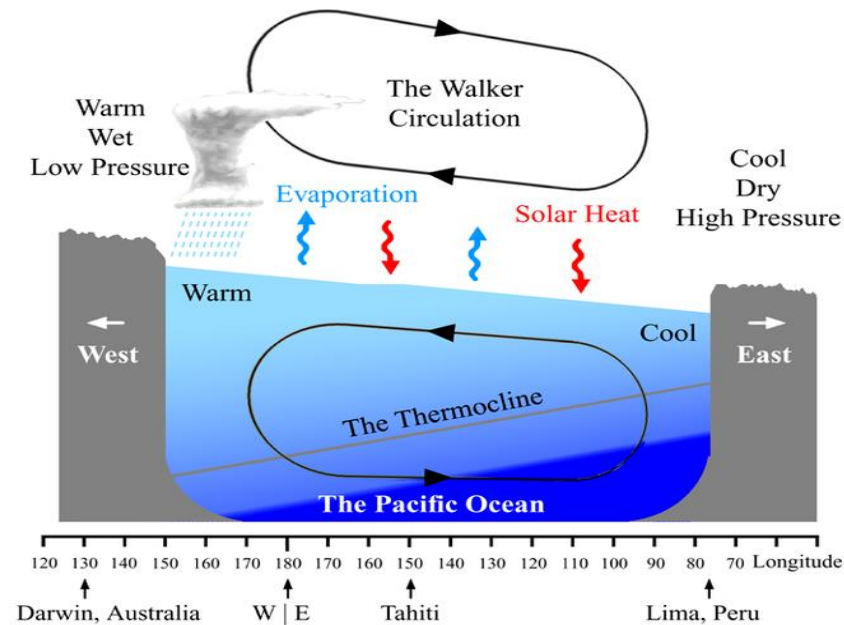


三维流场与生物地球化学过程



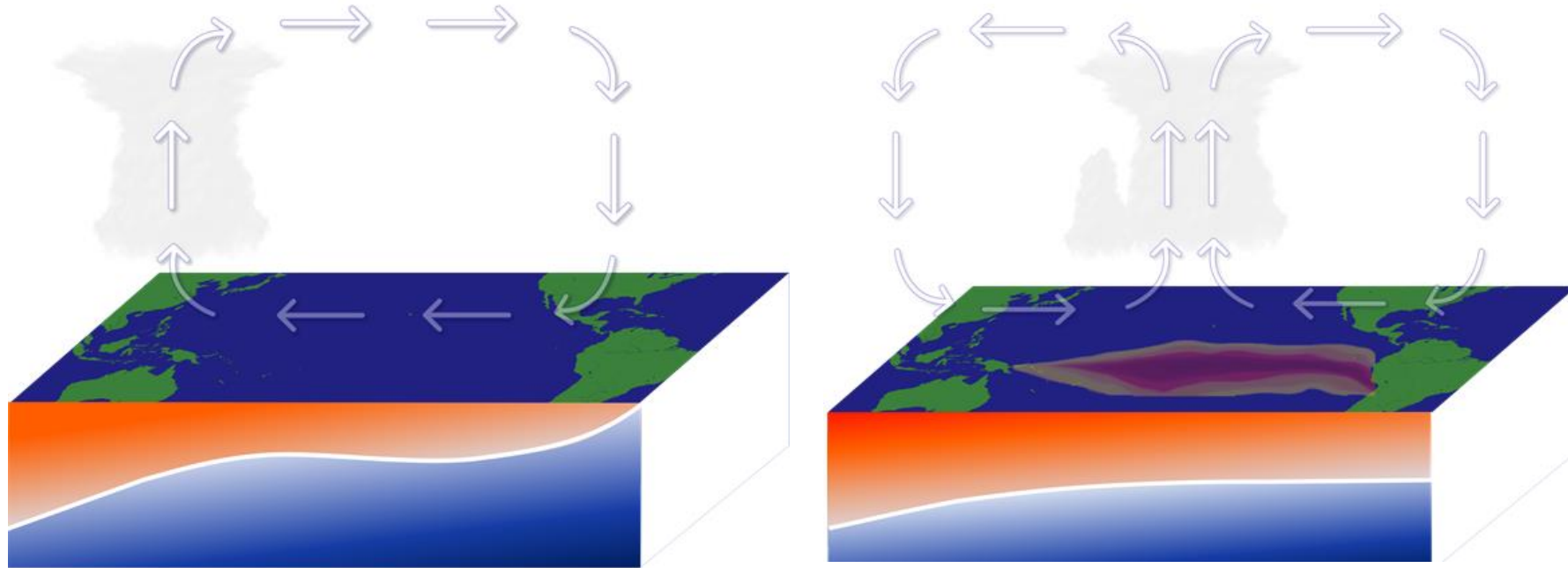
- 南极绕极流，或称为西风漂流、南极环流，为一个环绕南极洲由西向东的洋流。南极绕极流为南冰洋的主要循环系统特征。这令温暖的海水隔离南极洲，令其大陆维持其巨大冰原。
- 南极绕极流在德雷克海峡的总流量估计为135百万立方米/秒（即斯维尔德鲁普，Sv），亦即约为全球河流流量总和的135倍。

海气耦合和沃克环流



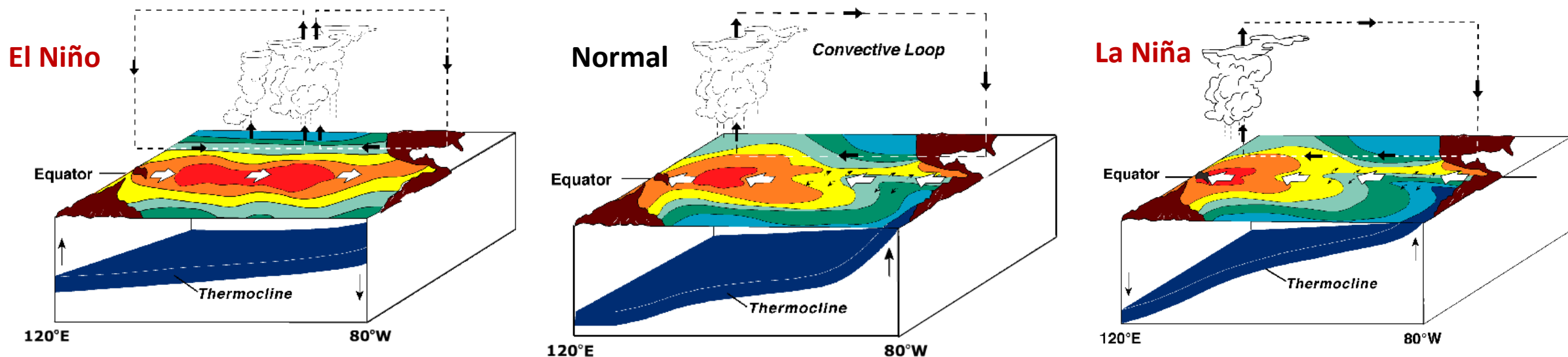
- 信风作用在洋面上，热带东太平洋表层的暖海水被吹向热带西太平洋，导致东太平洋下层冷海水上翻，所以海面温度较低。暖海水在热带西太平洋堆积的结果造成西太平洋海面温度较高。
- 热带西太平洋海面温度较高，空气上升；热带东太平洋海面温度较低，空气下沉；高层西风，海面吹东风，构成沃克环流。
- 海洋和大气之间的耦合不仅表现在动量，也表现在水汽和能量。

南赤道流与与海洋渔业



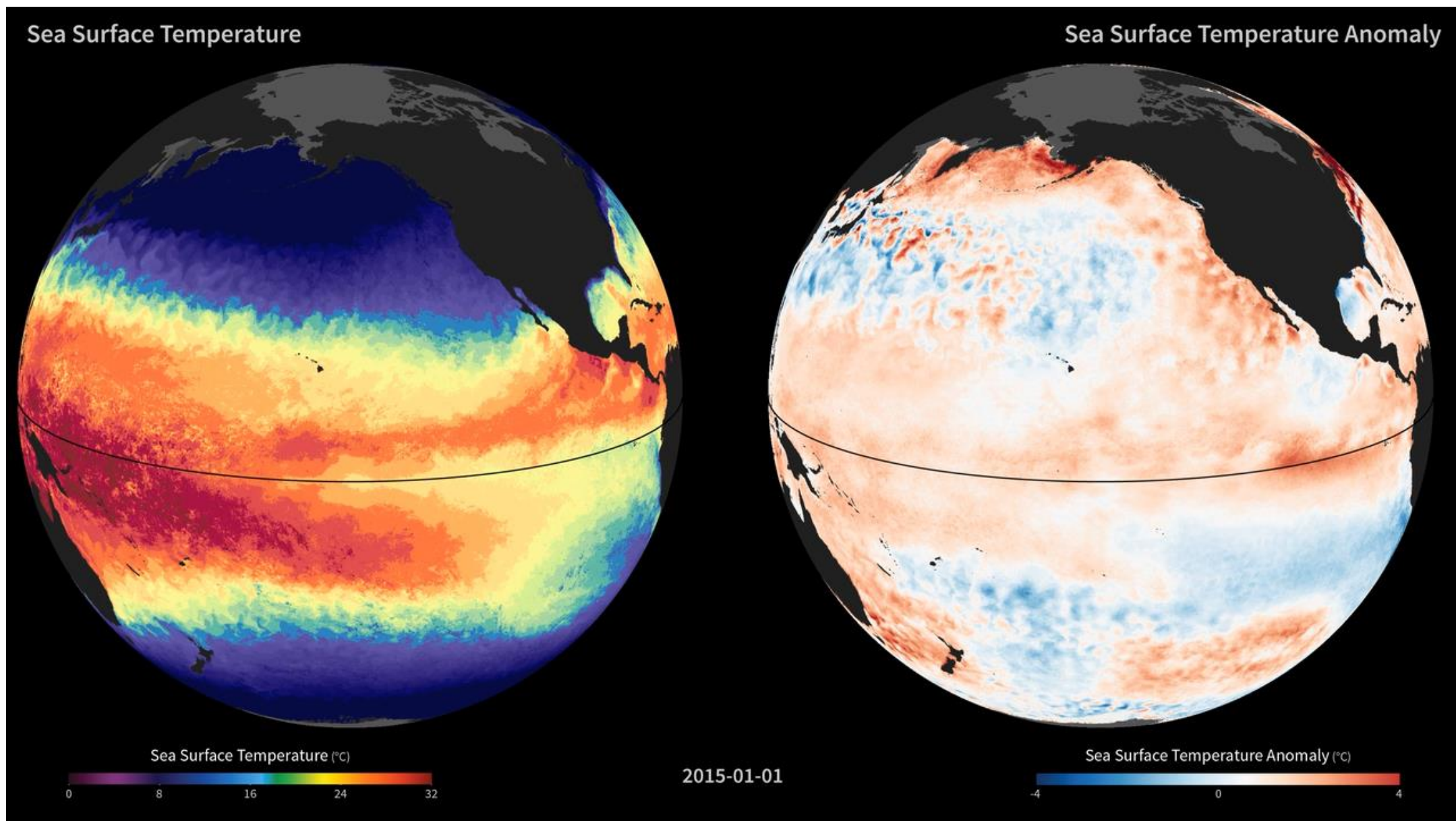
- 在南美洲太平洋沿岸(尤其是秘鲁沿岸)，上升运动把含丰富营养的海水带到海面，丰富的营养导致鱼类和鸟类的大量繁殖。
- 但是, 每年圣诞节前后的2-3个月，信风减弱，赤道附近的贫营养暖海水向南流动并取代秘鲁沿岸的冷水，从而导致鱼类和鸟类的大量死亡，当地人把这一现象称为**厄尔尼诺现象**（El Niño）。在西班牙语里， El Niño是男孩(boy child)的意思，人们把这一现象称为圣诞男孩(Christ child)。
- 这种秘鲁沿岸海水在每年圣诞节前后变暖通常只持续一个月左右，之后，海水变冷，鱼类繁殖恢复正常。

ENSO: 厄尔尼诺、拉尼娜、南方涛动

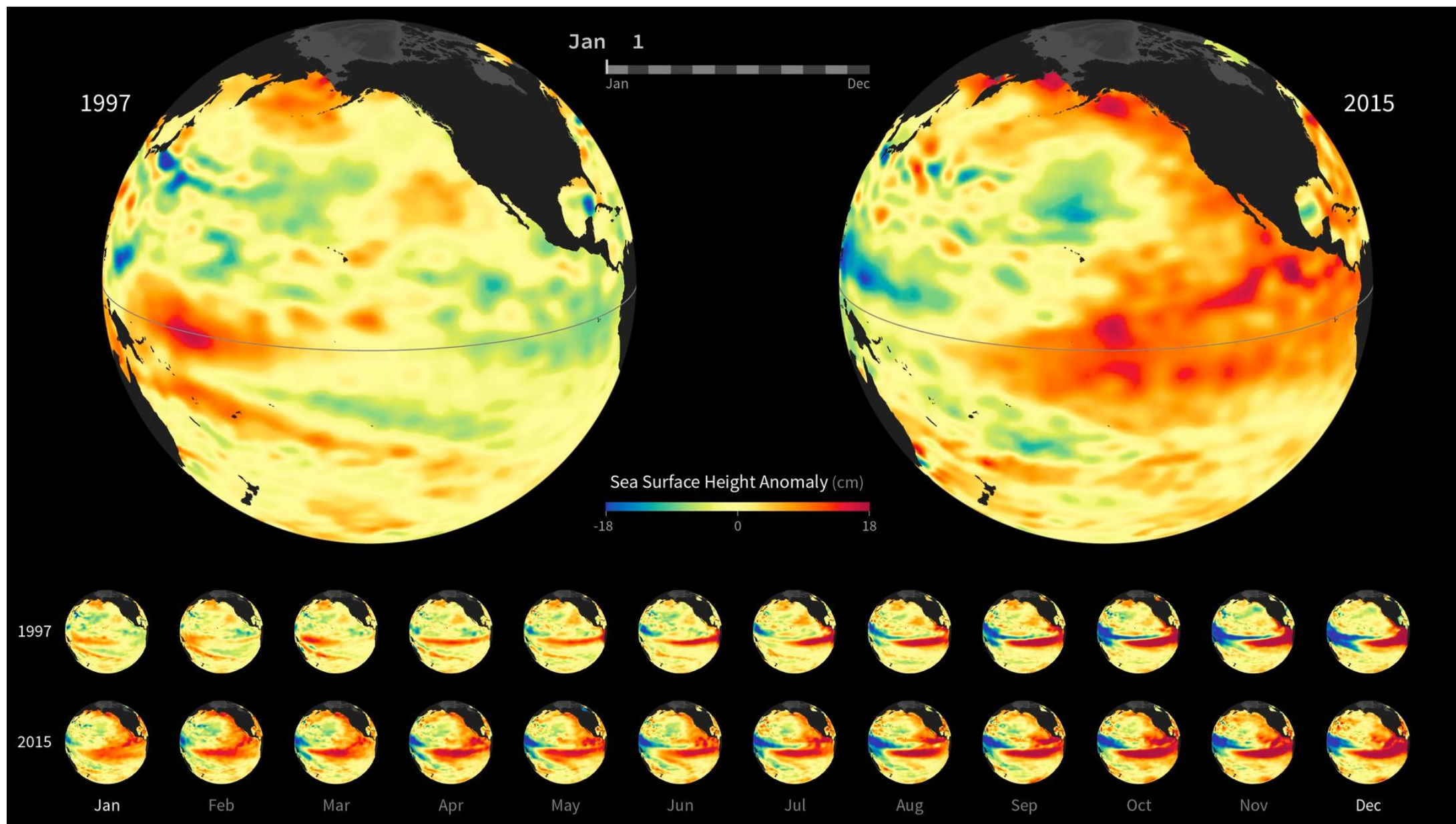


- 每隔2-7年，这种海水变暖的现象便会非常地强,持续时间在半年以上，覆盖的面积也非常大。这种南美洲东太平洋沿岸强的海水变暖现象称为**厄尔尼诺事件**(El Niño)。
- 与El Niño事件相反的情况是异常强劲的信风把暖的海水主要集中在西太平洋,中部和东太平洋的表面海水较冷。这种现象称为**拉尼娜事件**(La Niña)。
- 在El Niño期间,东太平洋上空的空气较通常的轻,而西太平洋上空的空气较通常情况下的空气重。所以,东太平洋的海平面气压较通常的低,而西太平洋的海平面气压较通常的高。这种东西太平洋海平面气压每隔几年的交互变化的现象被称为**南方涛动**(Southern Oscillation)。
- 人们通常把厄尔尼诺和南方涛动一起简称为ENSO。

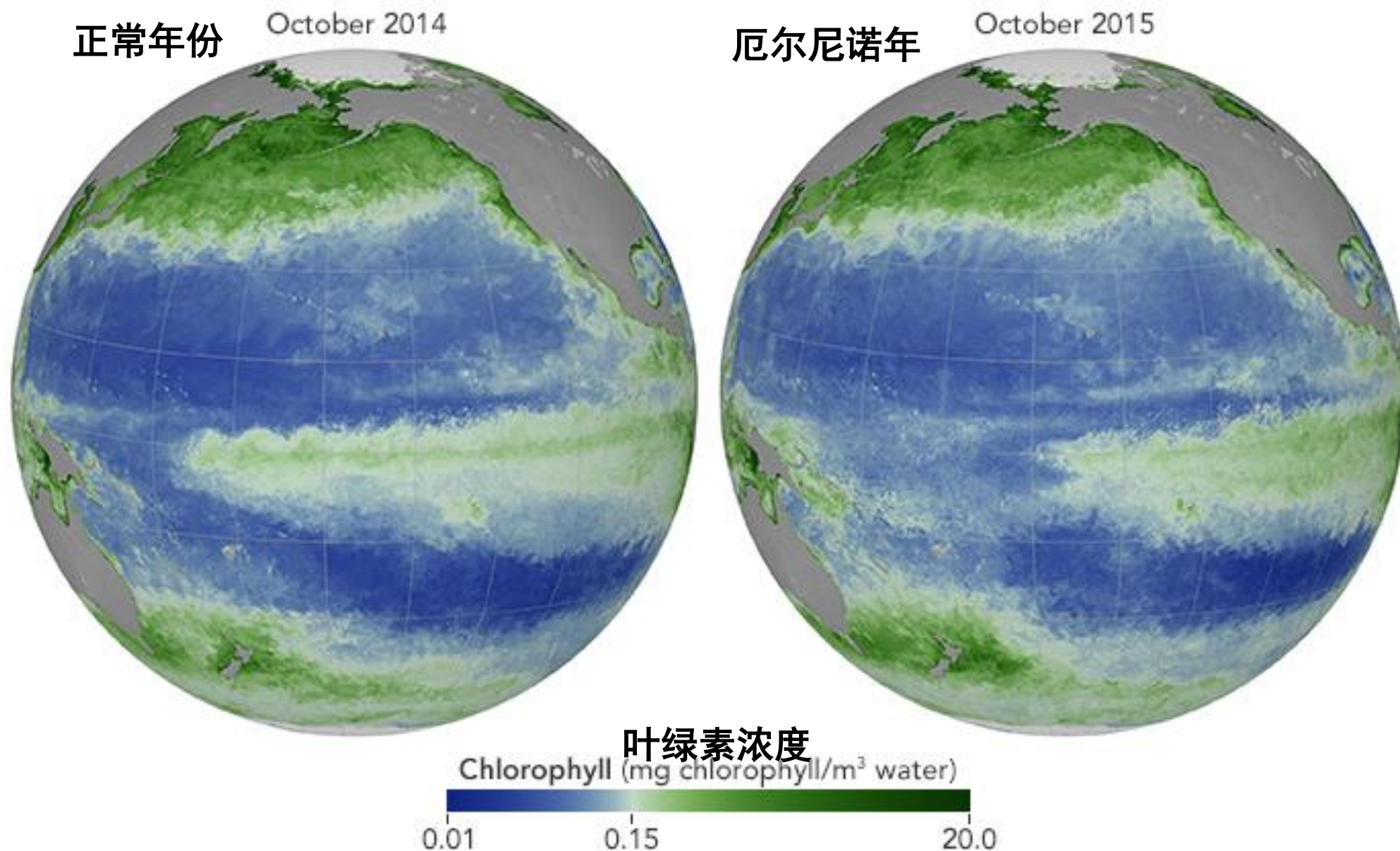
一个典型El Niño年（2015年）的海温与海温异常



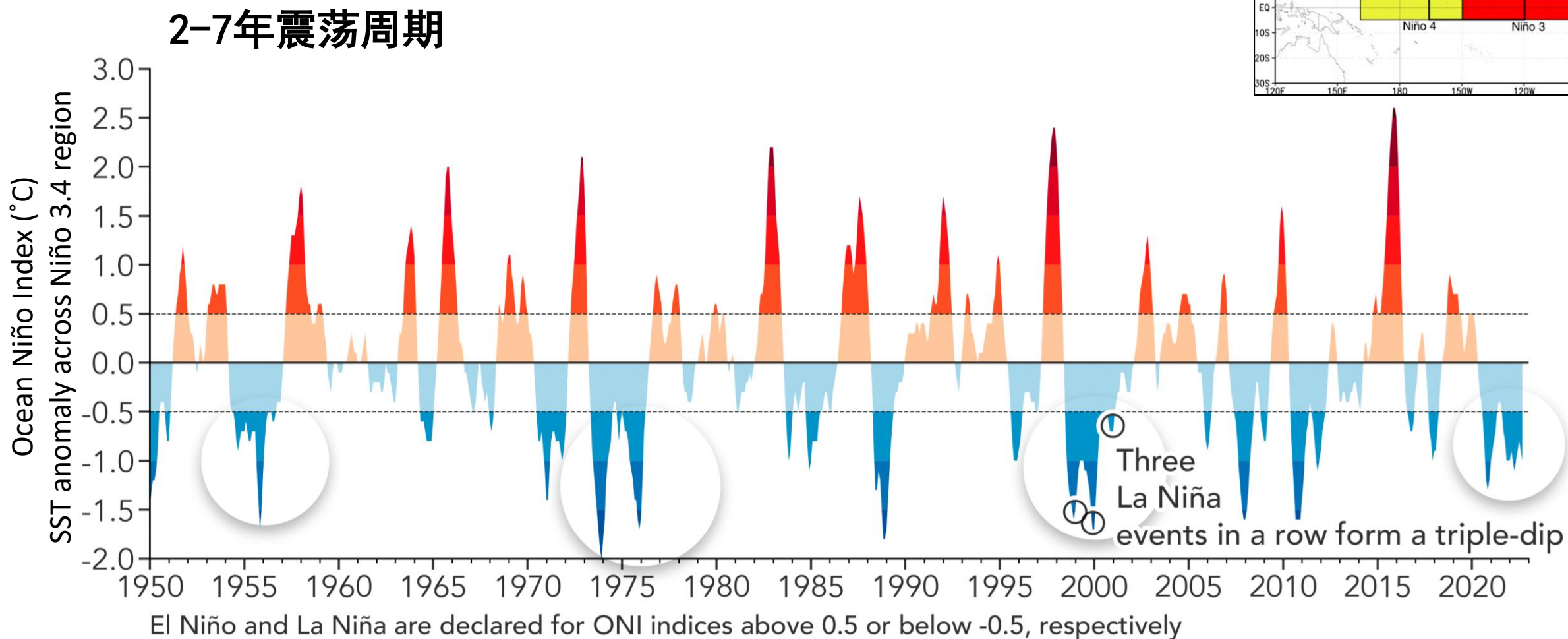
两个典型El Niño年的海平面高度异常



ENSO与海洋初级生产力



历史上的El Niño和La Niña事件



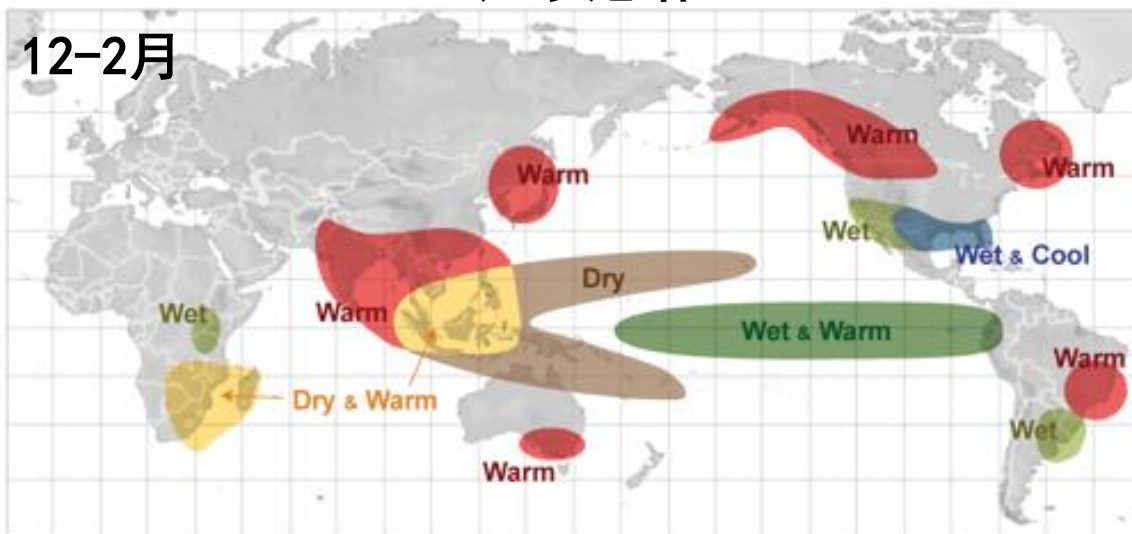
2023：刚结束了三重拉尼娜，热带太平洋海温已经发展出厄尔尼诺。

What El Niño Will do to Earth in 2024 <https://www.youtube.com/watch?v=mggRl80WzbE&t=1s>

ENSO的全球影响

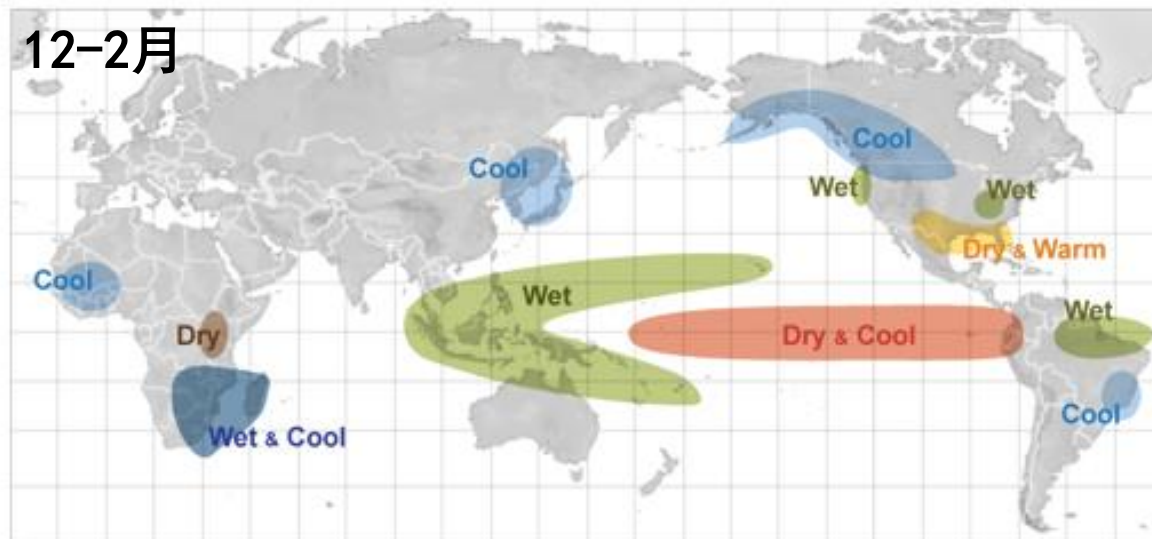
厄尔尼诺

12-2月



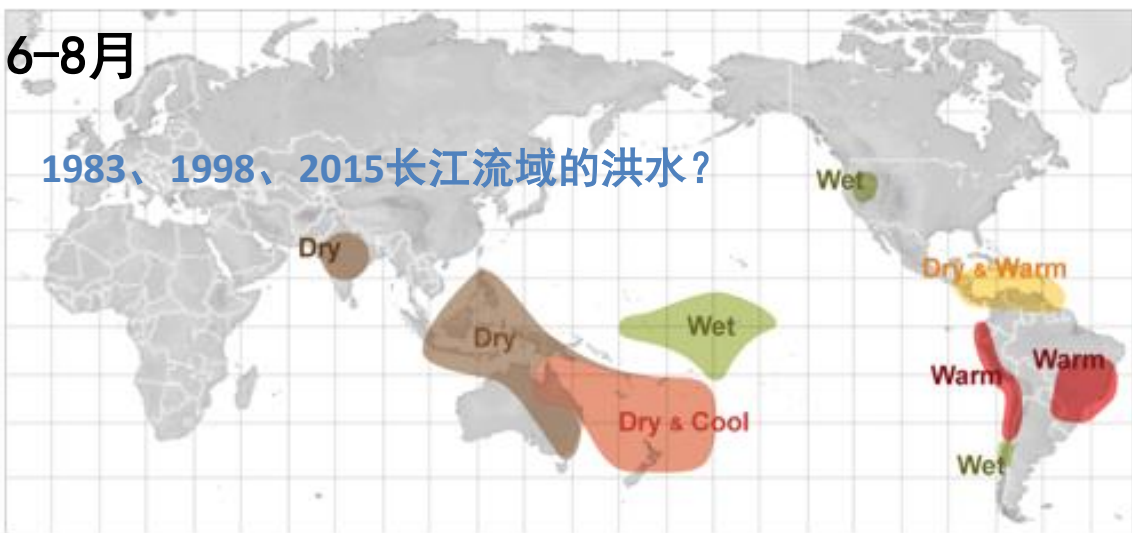
拉尼娜

12-2月

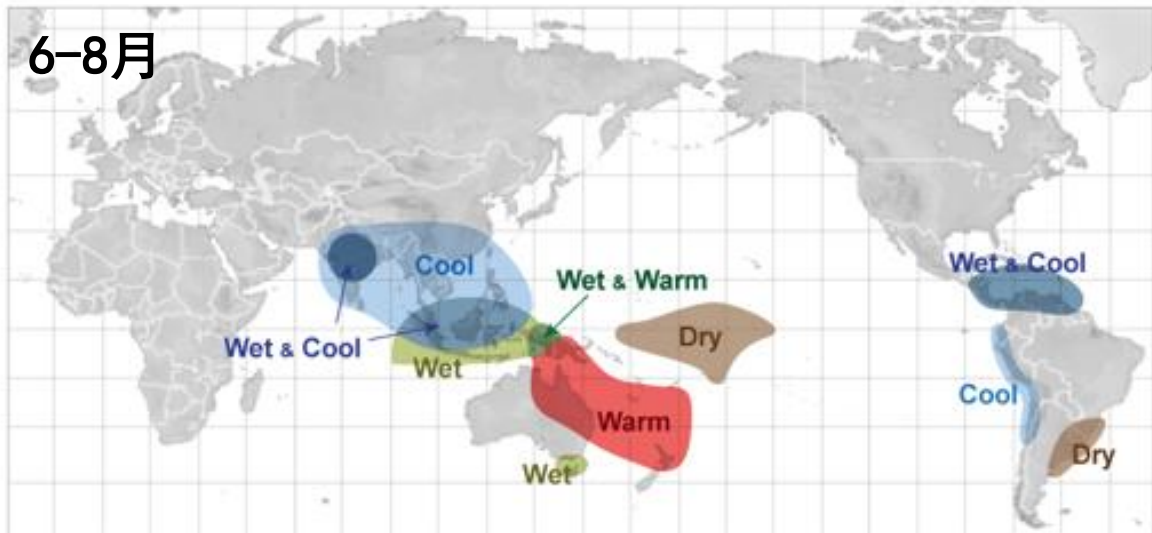


6-8月

1983、1998、2015长江流域的洪水？

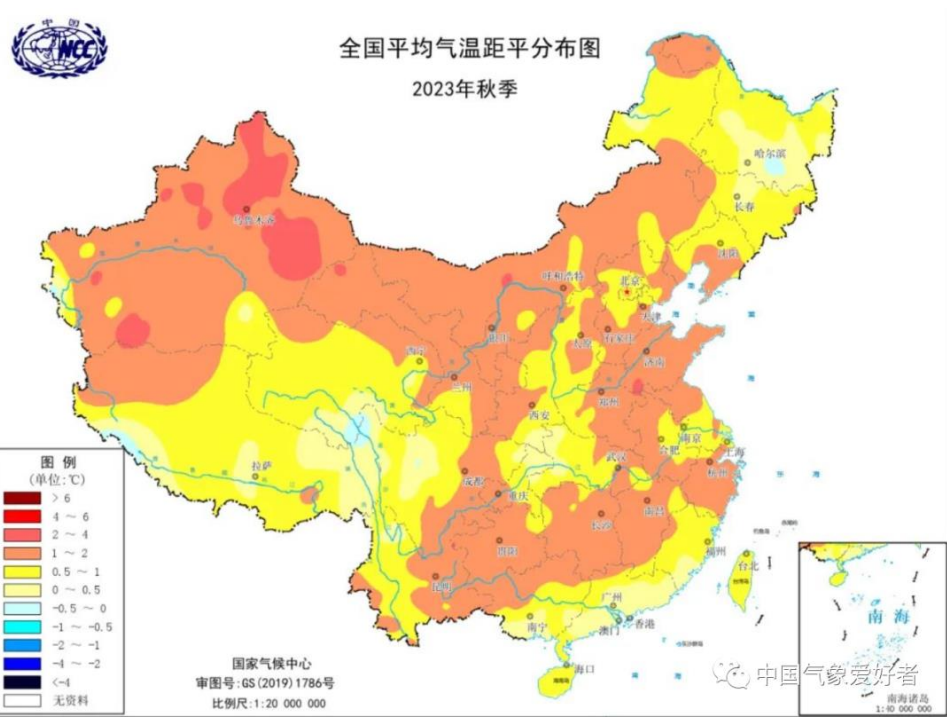
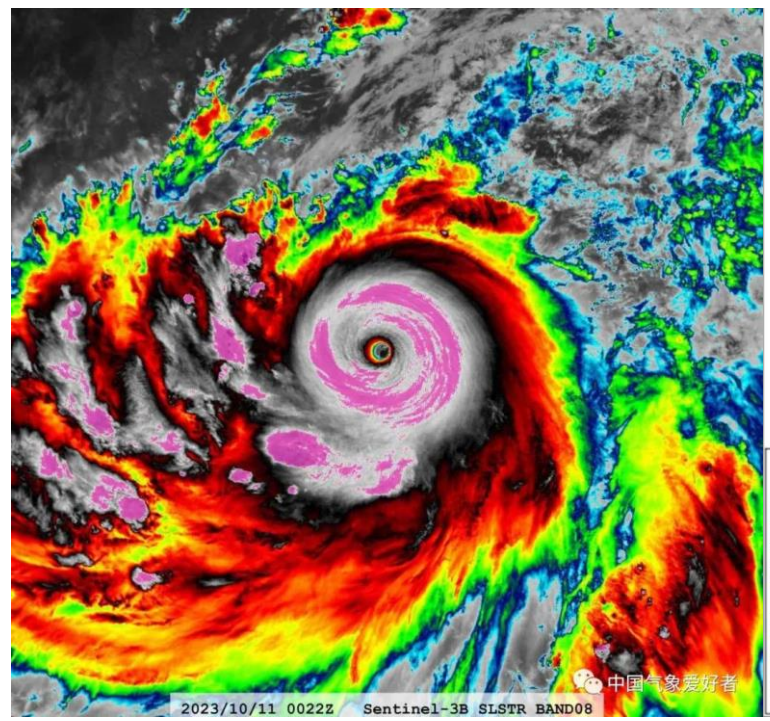
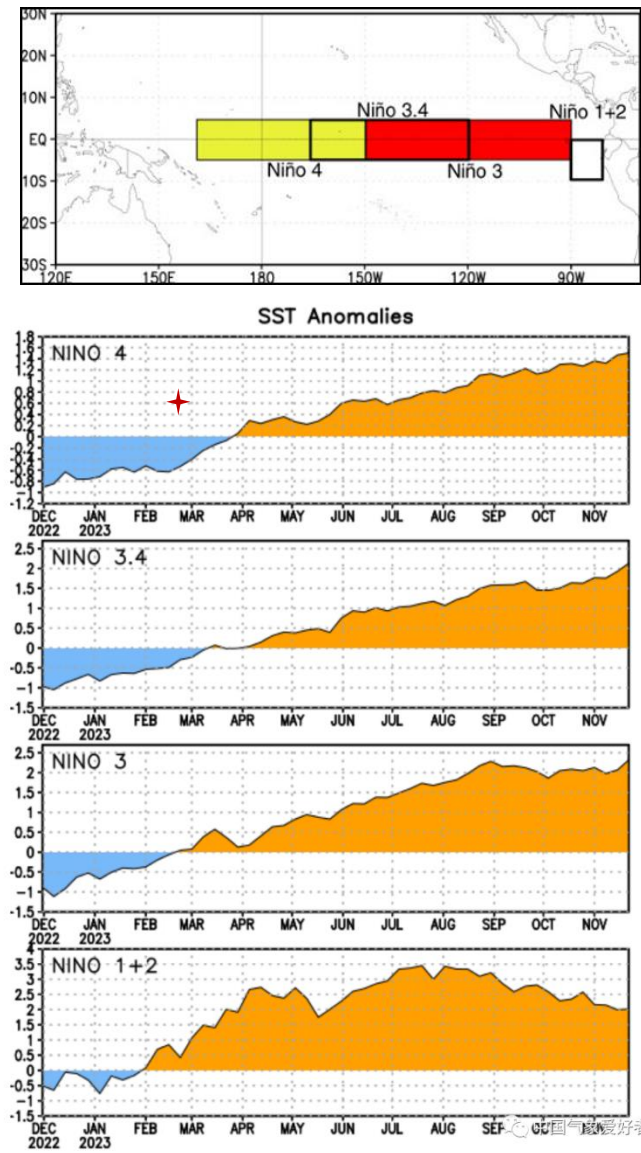


6-8月



2023-2024 El Niño

夏季：更少但更强的台风（？） 秋冬季：平均气温更高但波动更大（？）

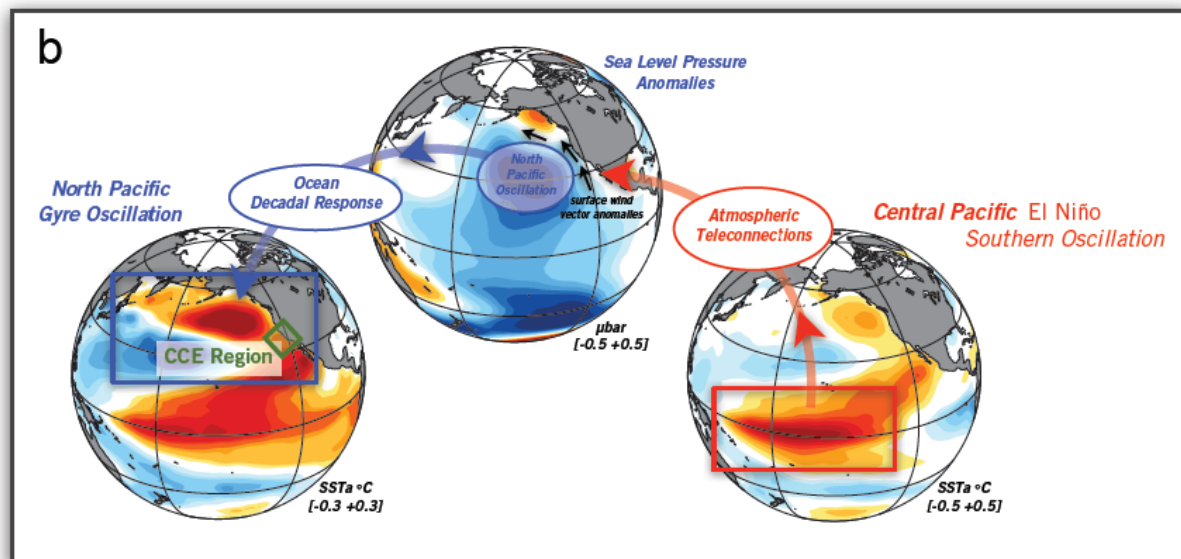
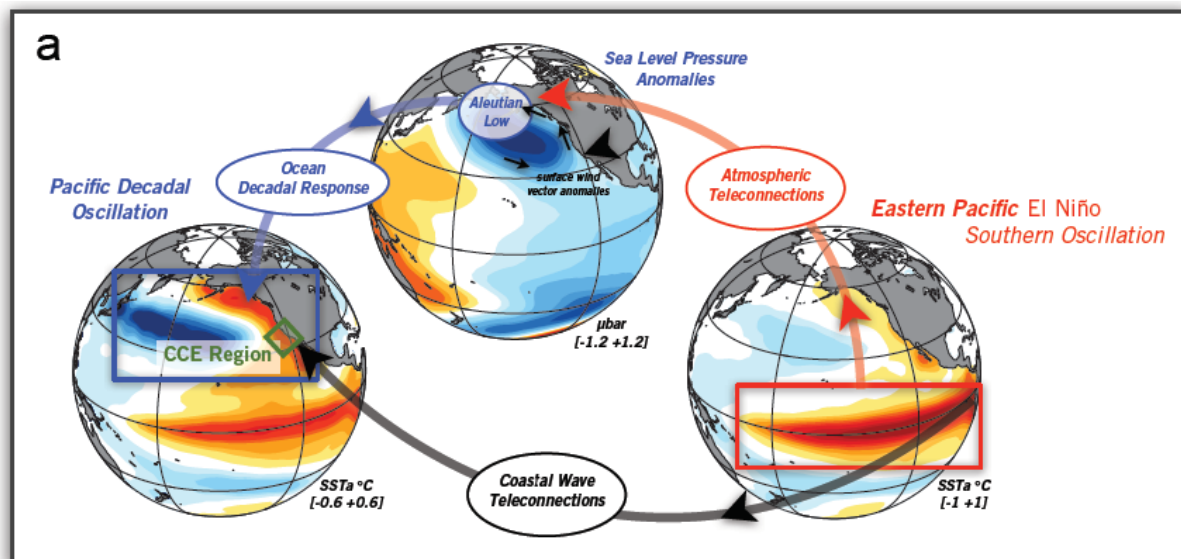


中国气象爱好者 (2023/12/03)
“厄尔尼诺事件来了！这个冬天，要警惕三种天气”

为什么ENSO会有全球影响？

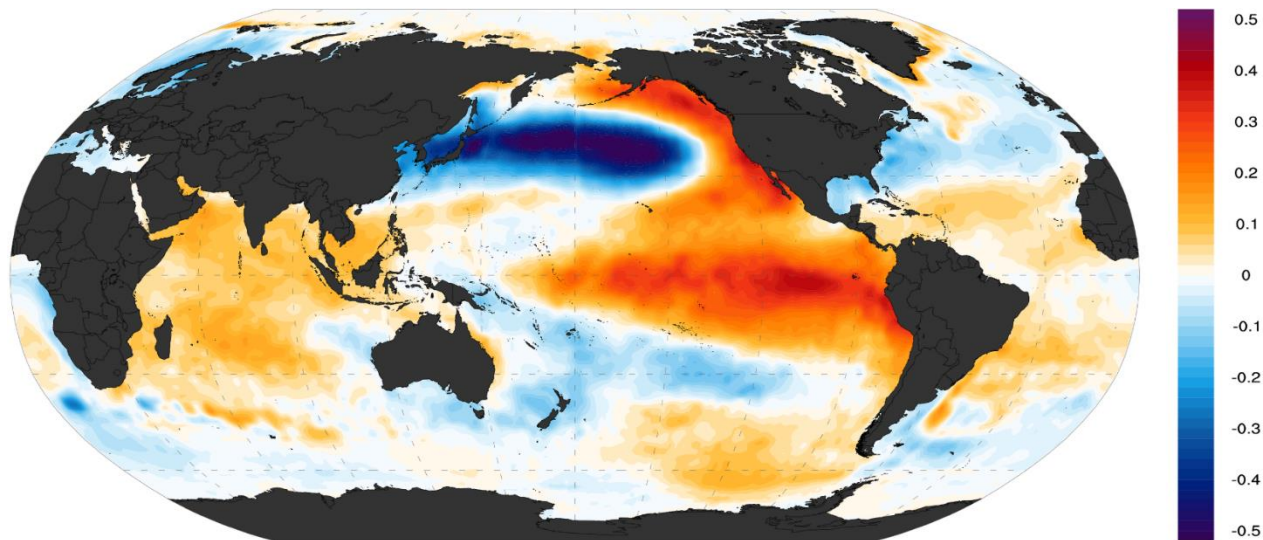
大气遥相关与ENSO的多米诺骨牌效应

- 赤道温度异常引起哈德雷环流变化
- 热带与副热带温度梯度变化导致副热带西风急流变化
- 气压异常通过罗斯贝波（向西）和赤道开尔文波（向东）传播
- 风场异常导致副热带风生环流异常
- 副热带与温带温度梯度变化导致中纬度西风急流变化
- 气压异常引发太平洋年代际震荡
-

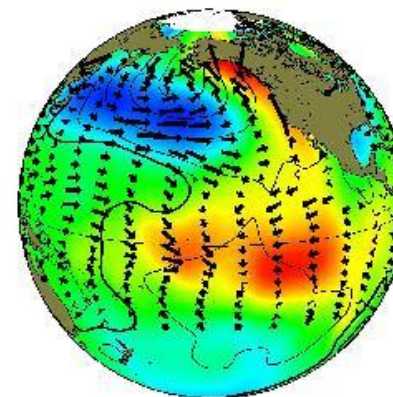


太平洋年代际震荡 Pacific Decadal Oscillation, PDO

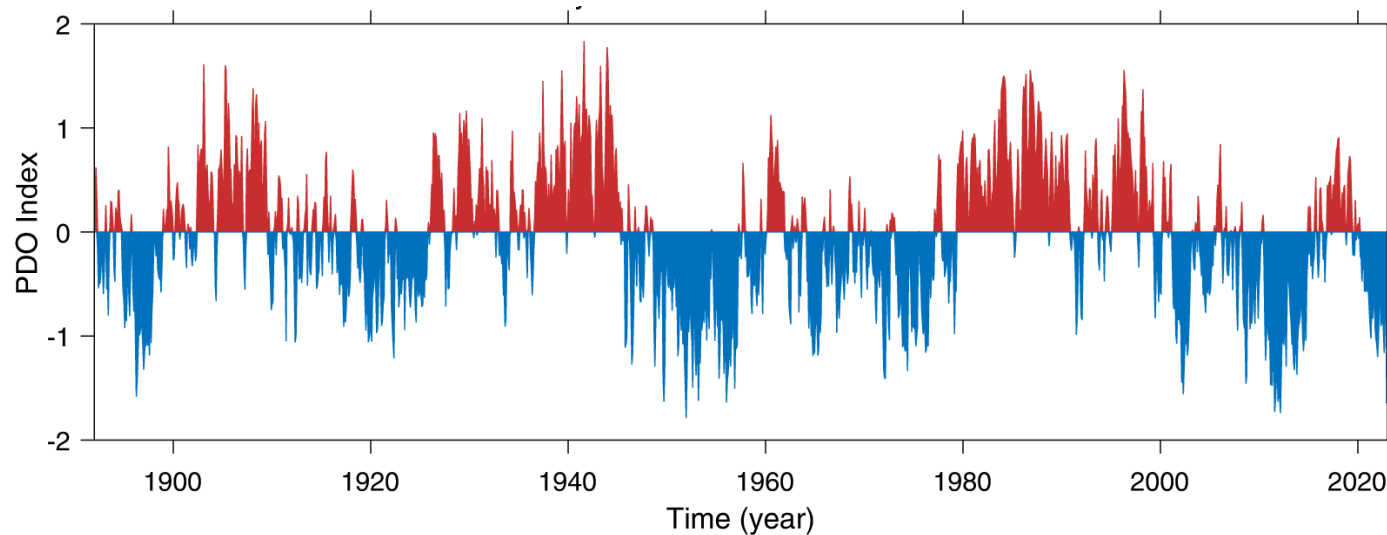
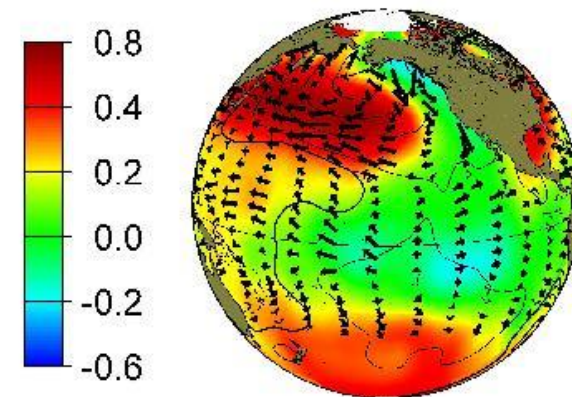
PDO正相位时的冬季海温异常



暖位相



冷位相

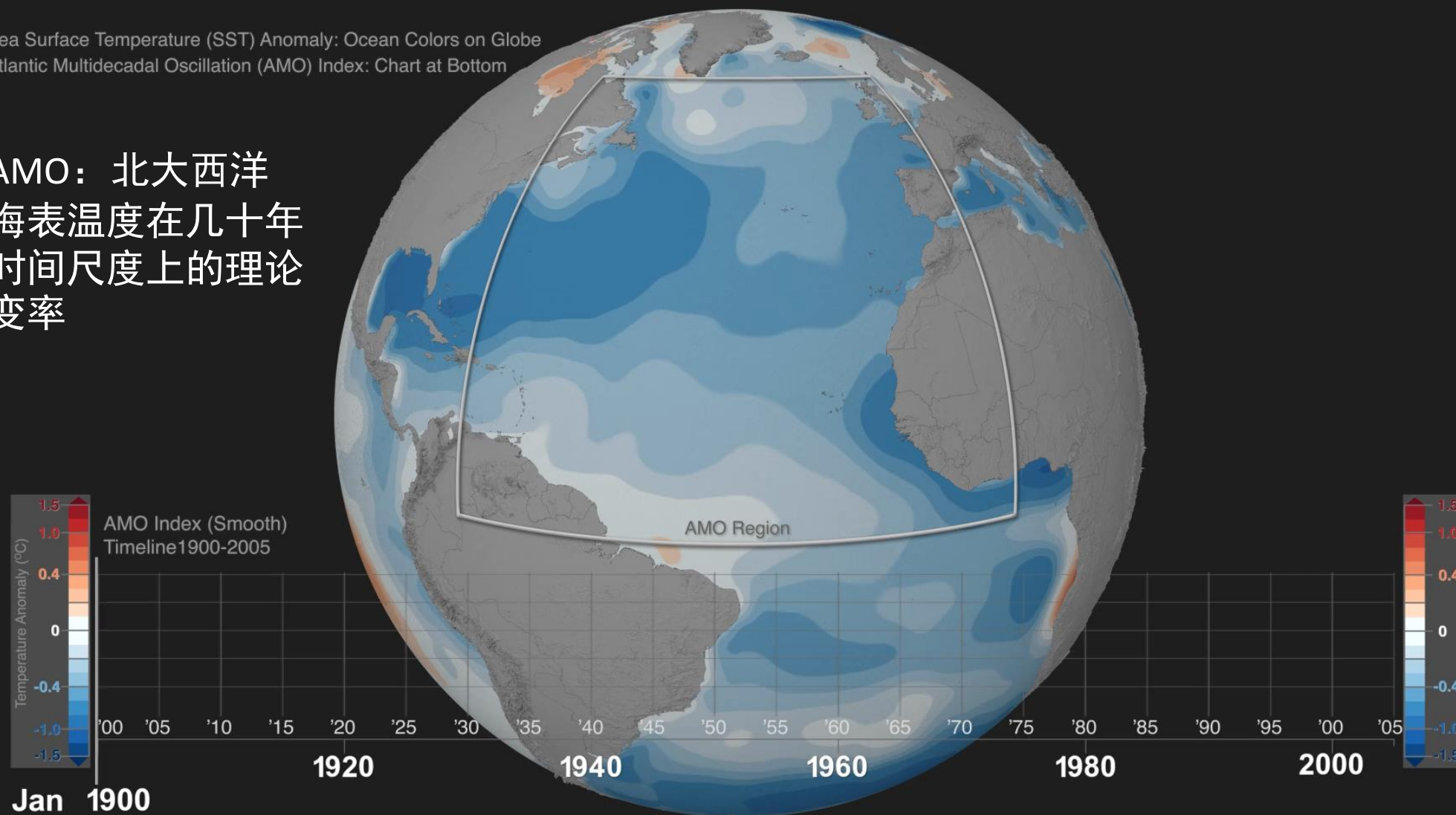


PDO指数是北太平洋（20N以北）区域月平均海表温度距平（SSTA，已减去全球平均SST）EOF第一主分量的标准化序列。

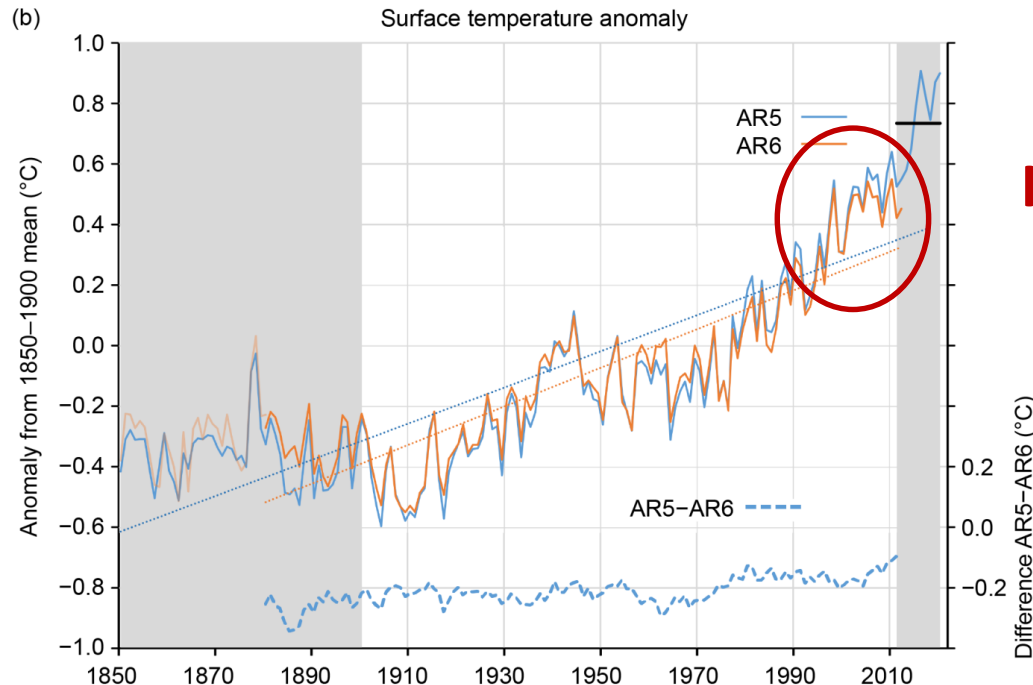
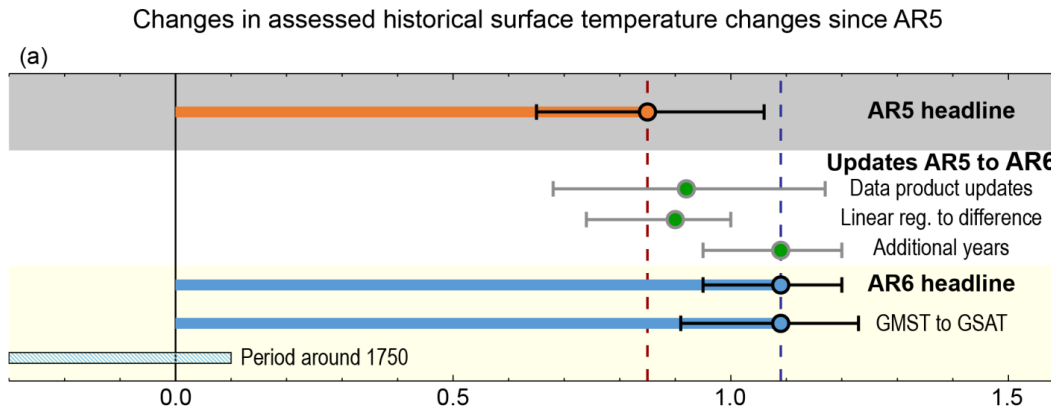
大西洋多年代际震荡 Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO

Sea Surface Temperature (SST) Anomaly: Ocean Colors on Globe
Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) Index: Chart at Bottom

AMO: 北大西洋
海表温度在几十年
时间尺度上的理论
变率



工业时代的气候变暖“停滞” Hiatus与海洋环流有关？



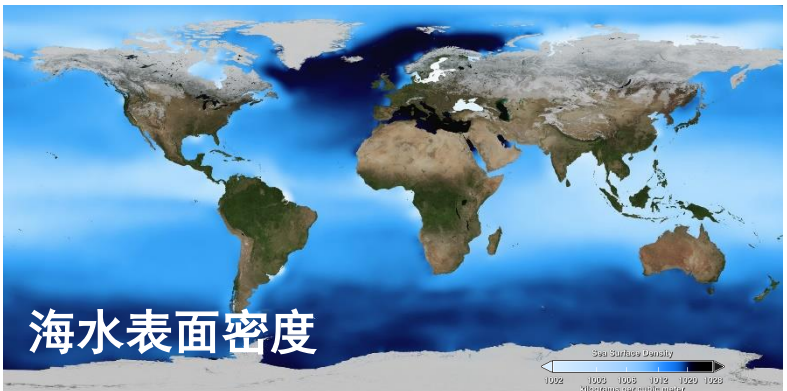
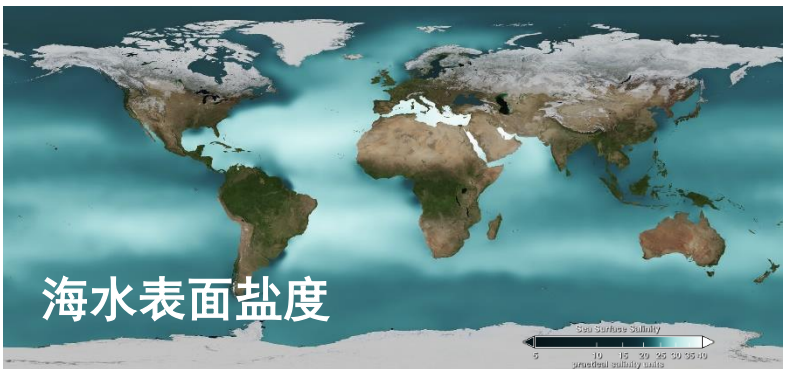
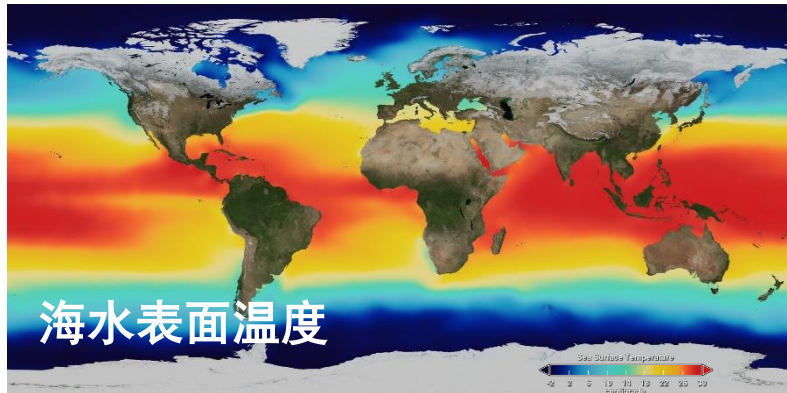
Hiatus

1998-2012年Hiatus原因：

- 观测数据误差、采样偏差？
- 自然因素（火山）？
- 平流层水汽变化？
- 海洋环流（赤道东太平洋表层海水偏冷）？

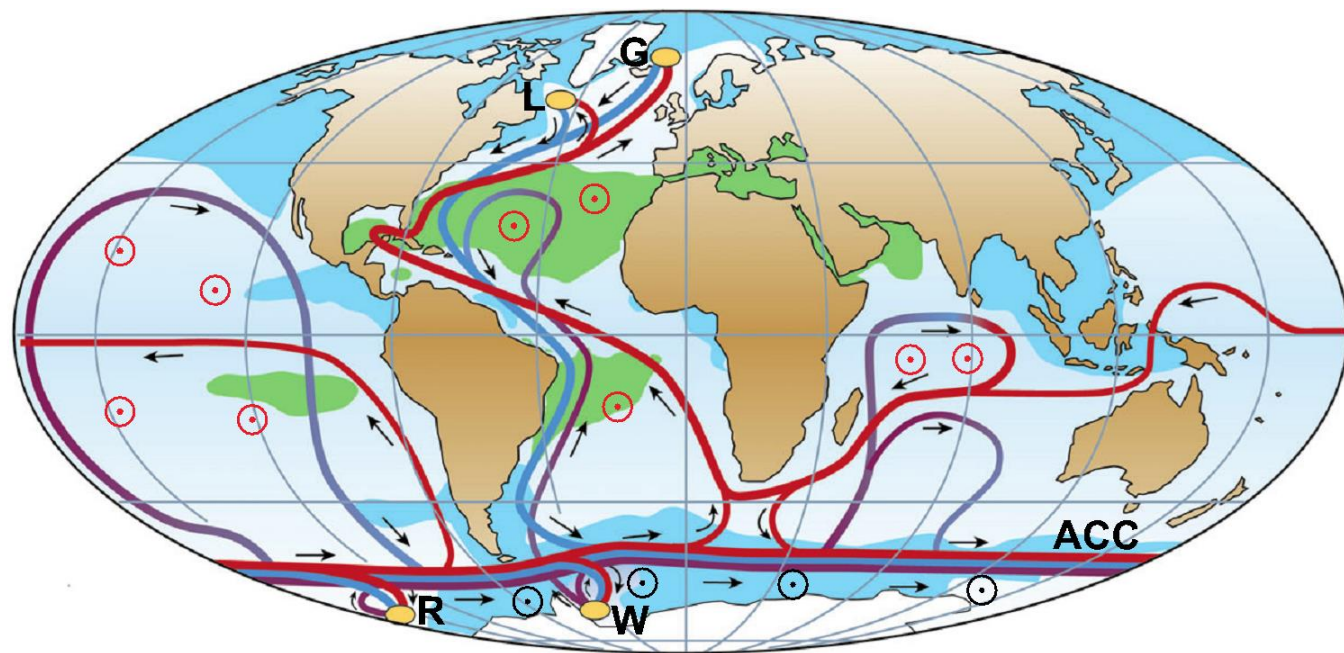
IPCC, 2021

温盐环流 Thermohaline Circulation



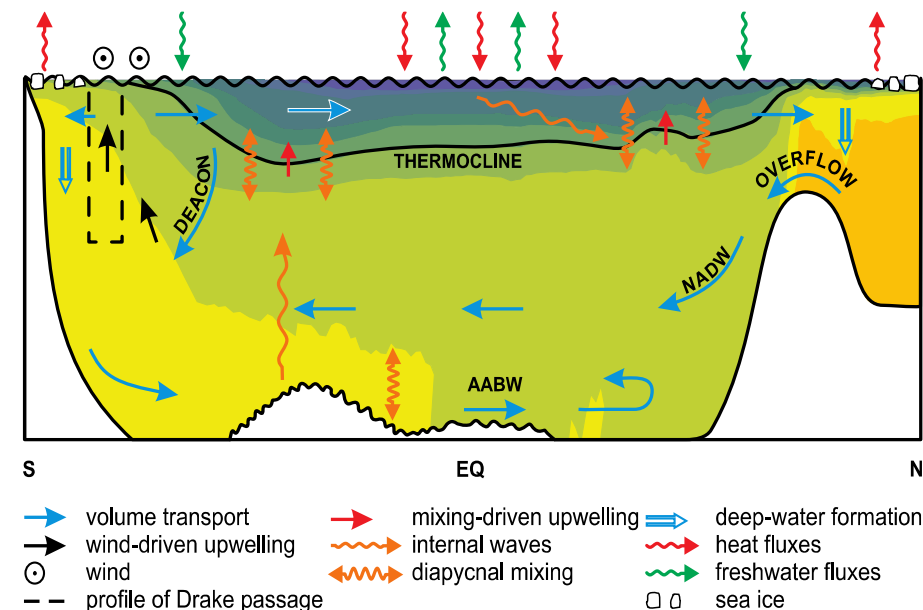
- 前面我们提到了风生洋流只达到100–300米的深度。
- 海水运动还受其层结稳定性的影响，就像大气层结不稳定时，大气会产生垂直对流运动，海水也会层结不稳定而产生对流运动。
- 决定海水层结稳定性的要素除了温度，还有盐度。温度越低、盐度越高，则海水越重。
- 热带海水由于温度高，蒸发大，盐度较高。高纬度温度低，蒸发少，海水盐度低。
- 当热带温度和盐度较高的海水向高纬度运动时，随着温度的降低（盐度变化相对较小），海水密度逐渐变大，产生下沉运动，在海底流向其他地区，并进一步上升，构成闭合的环流。这一环流是由于温度和盐度的变化共同造成的，所以称为温盐环流。
- 温盐环流是全球性、千年尺度的海洋环流。

大西洋的温盐环流：AMOC



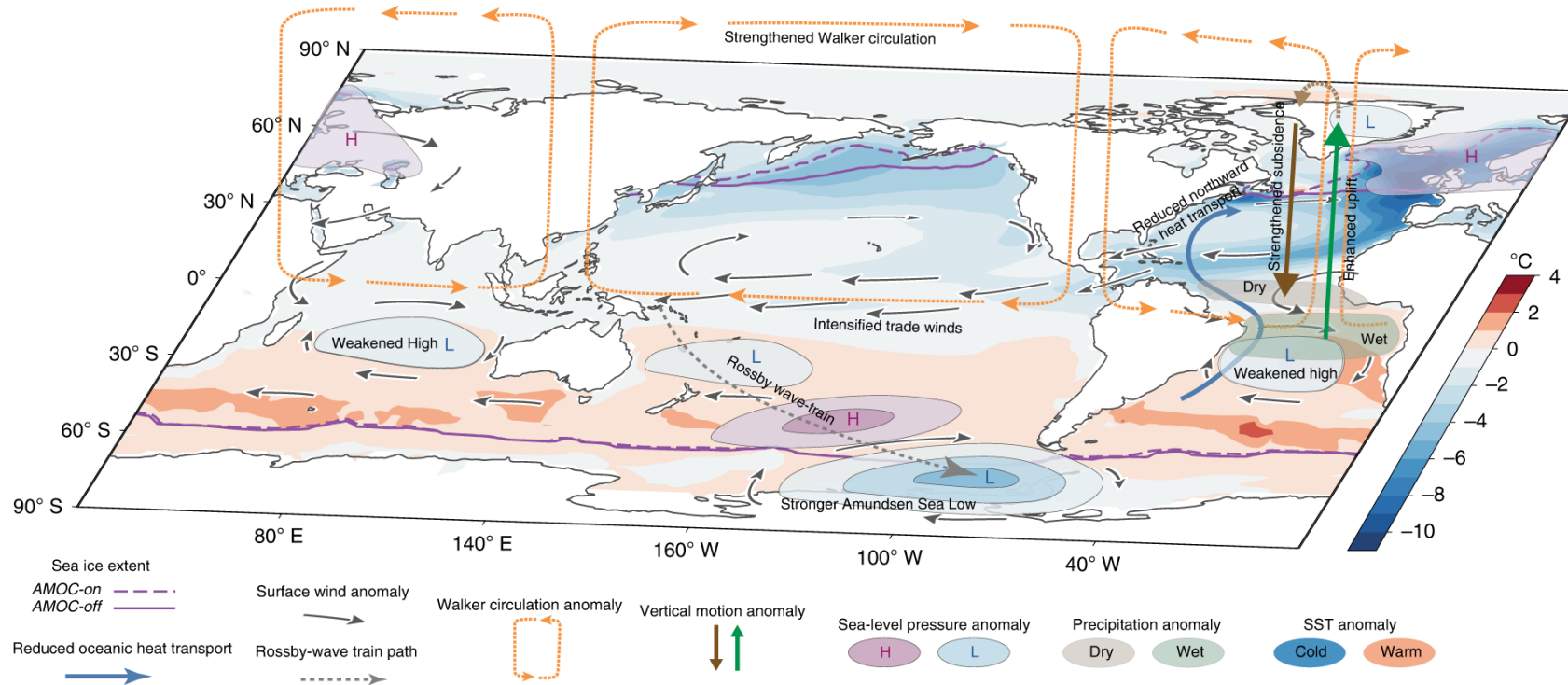
- | | | |
|------------------------|---------------------------|-----------------|
| — Surface flow | ⊙ Wind-driven upwelling | L Labrador Sea |
| — Deep flow | ⊙ Mixing-driven upwelling | G Greenland Sea |
| — Bottom flow | ■ Salinity > 36 ‰ | W Weddell Sea |
| ● Deep Water Formation | ■ Salinity < 34 ‰ | R Ross Sea |

高盐度的热带海水在风的驱动下自热带向北大西洋运动，并在格陵兰岛附近下沉。这些热的海水为北大西洋沿岸提供暖湿的空气，使得这些地方比同纬度的其它地区较暖。



温盐环流以大西洋最为明显，大西洋温盐环流又叫大西洋经向翻转流（Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC）。

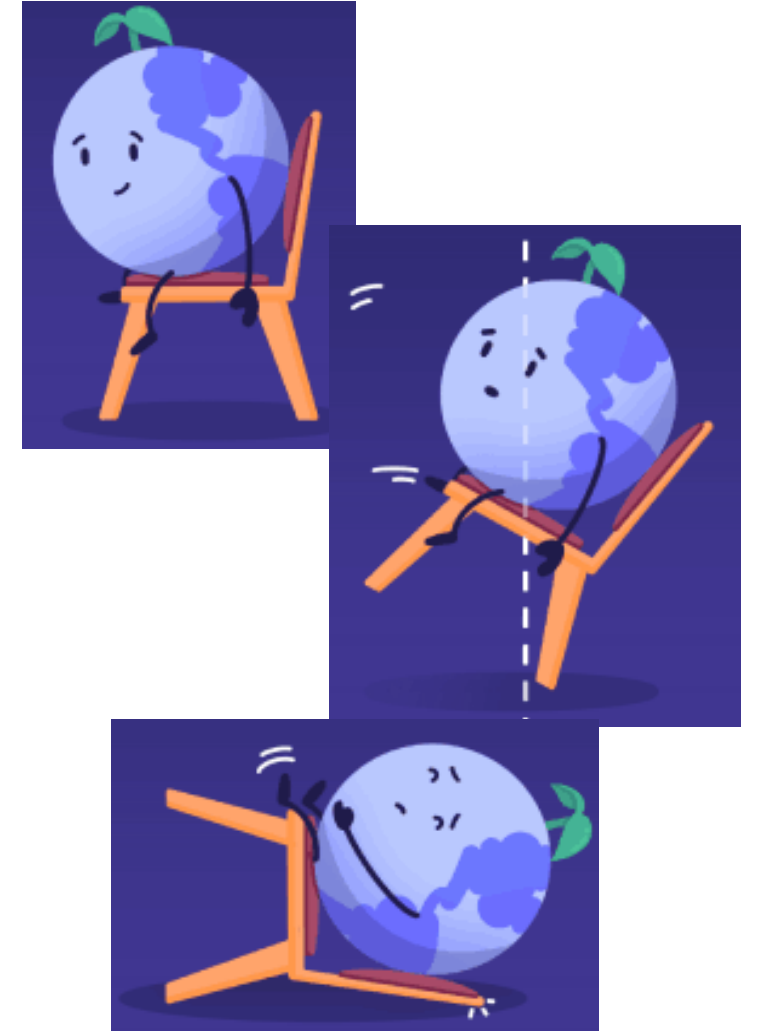
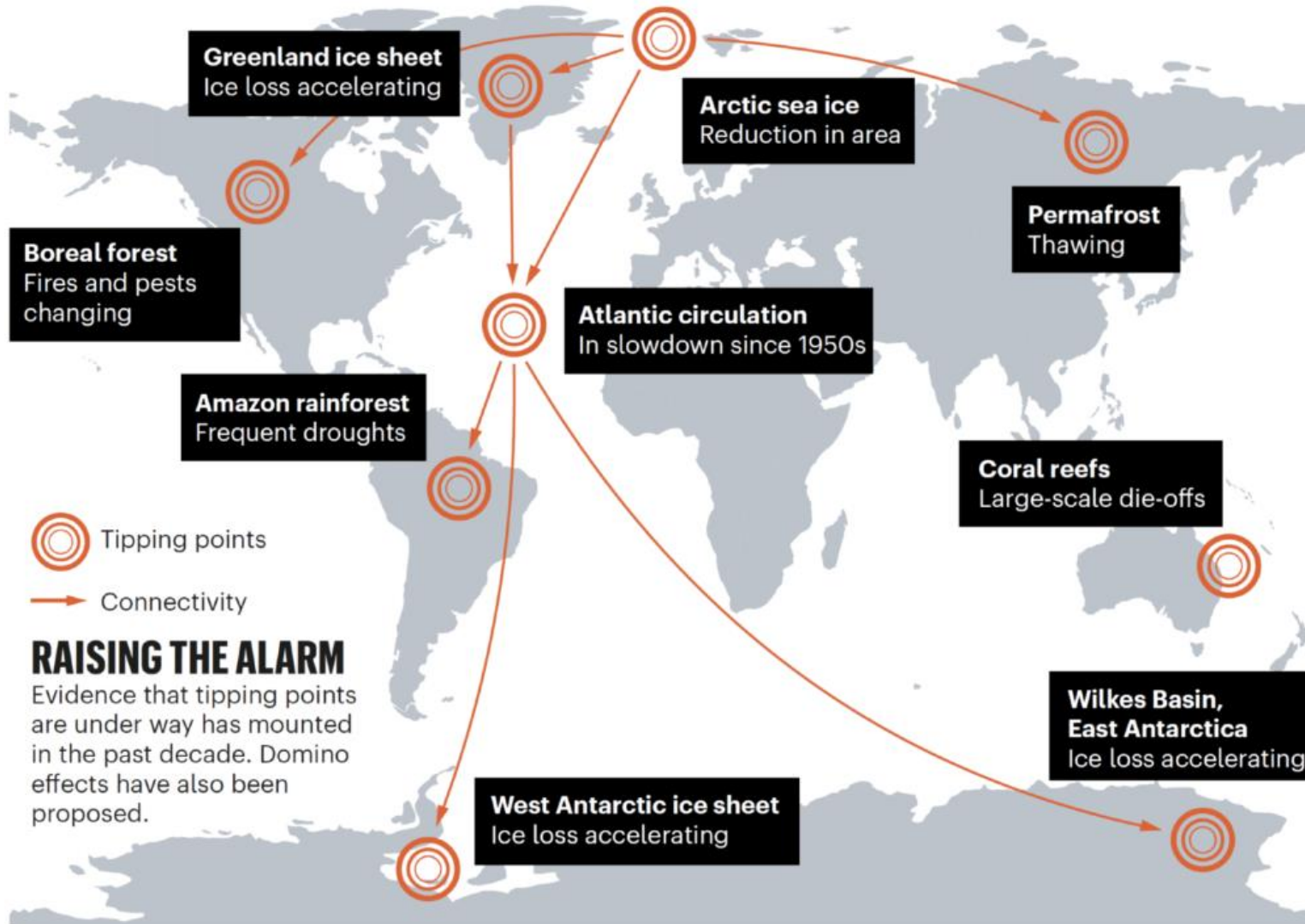
如果温盐环流减弱。。。。



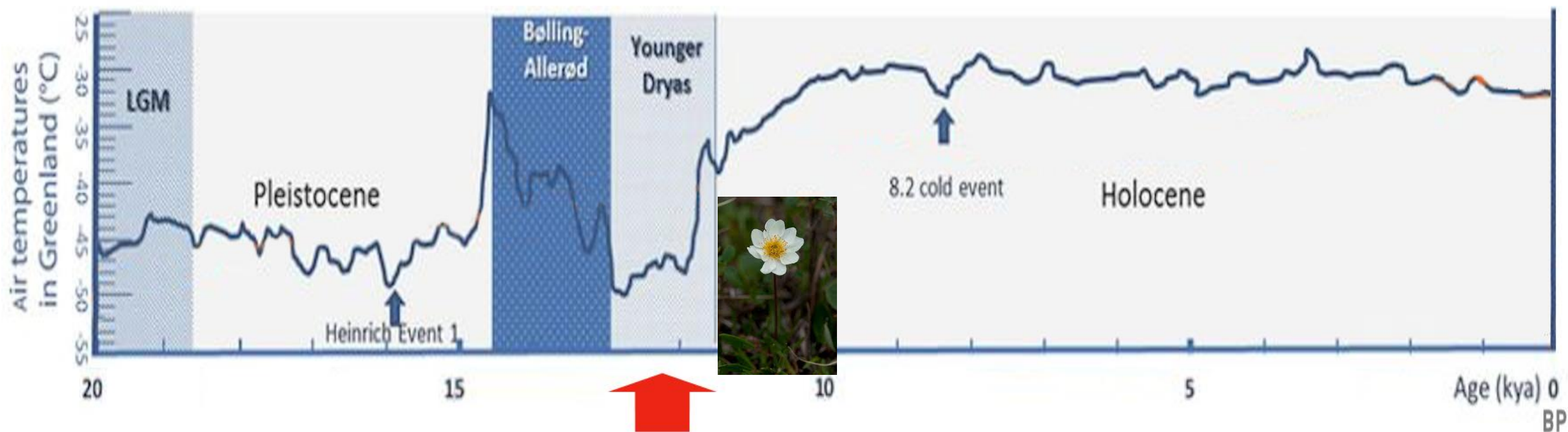
若该洋流减弱，至少北大西洋沿岸将会变冷。数值模拟表明，洋流减弱可导致整个北半球持续数百年的变冷，以及造成一系列全球气候影响。

Q：为什么很多研究者认为全球变暖会导致AMOC减弱？这个数值模拟试验怎么做？

温盐环流减弱与气候转折点 Tipping Point



1-1.2万年前的“新仙女木”事件



- 大约10000-12000年前，AMOC突然减弱，导致北欧和附近地区变冷，且寒冷持续几百年。因为这次变冷事件是从欧洲地区“新仙女木”化石增多发现的，所以，称为“新仙女木”事件。
- “新仙女木”（Younger Dryas）是一种极地寒冷气候下生长的植物，它在欧洲地区的增多，意味着欧洲地区曾经寒冷过。

本章作业 ddl = 2024年5月27日 13:00

1. 艾克曼输运方程, U_E 和 V_E 分别是风生海水运动的垂向积分:

$$U_E = \frac{\tau_y}{\rho_{sea} f}, V_E = -\frac{\tau_x}{\rho_{sea} f}$$

$$\text{切应力 } \boldsymbol{\tau} = (\tau_x, \tau_y) = C_D \rho_{air} |\mathbf{V}_{air}| \mathbf{V}_{air}$$

$$C_D = 2 \times 10^{-3}, \rho_{air} = 1 \text{ kg m}^{-3}, \rho_{sea} = 1020 \text{ kg m}^{-3}$$

$$10\text{m高度处的风 } \mathbf{V}_{air} = (u, v), f = 2\Omega \sin\phi, \phi = \text{latitude}, \Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

假设对于加州(北纬35度)的沿岸风, $u = 0, v = -10 \text{ m s}^{-1}$, 艾克曼理论适用于沿岸宽度为100 km的海水。艾克曼层内质量守恒, 请估算艾克曼输运导致的艾克曼层底上升流速。

2. 什么是风生洋流? 有哪些主要的风生洋流? 简述西边界强化的原理。
3. 什么是温盐环流? 全球变暖下, 温盐环流可能怎么变? 对气候有怎样的反馈作用?