第八章：海洋环流与海–气相互作用

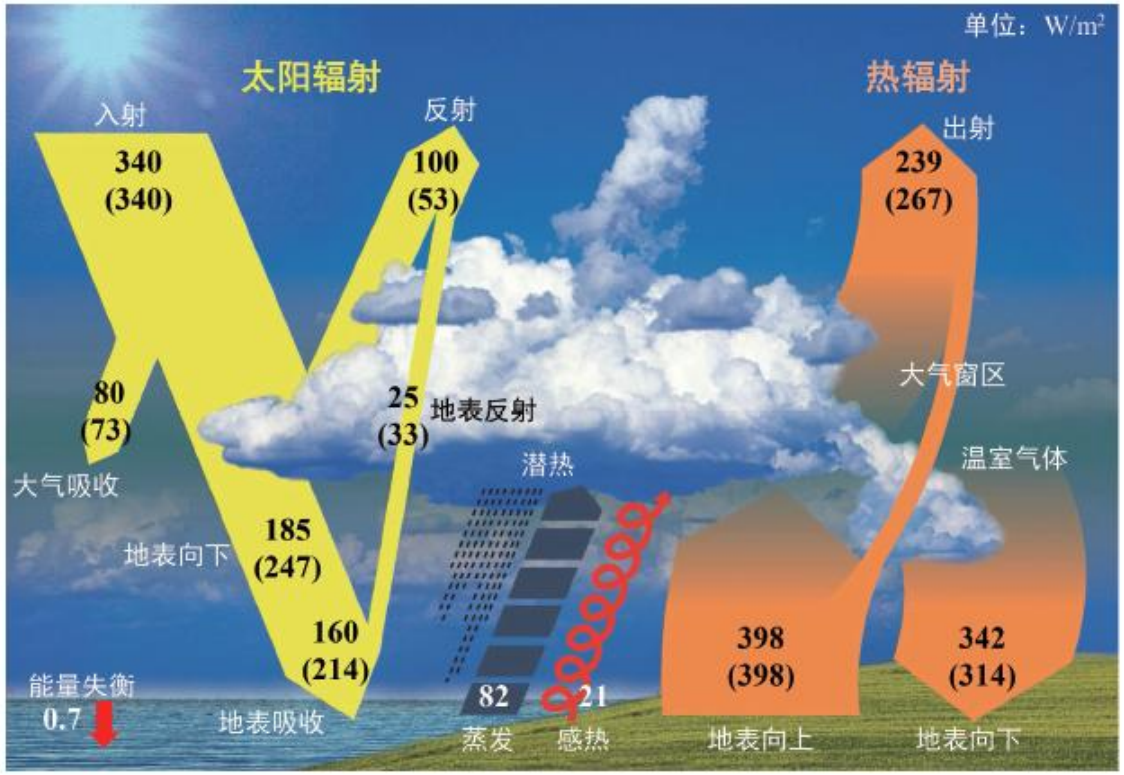
Jintai Lin 林金泰
Dept. of Atmospheric & Oceanic Sciences, School of Physics

linjt@pku.edu.cn
https://www.pku-atmos-acm.org/

课件改编自俞妍老师课件

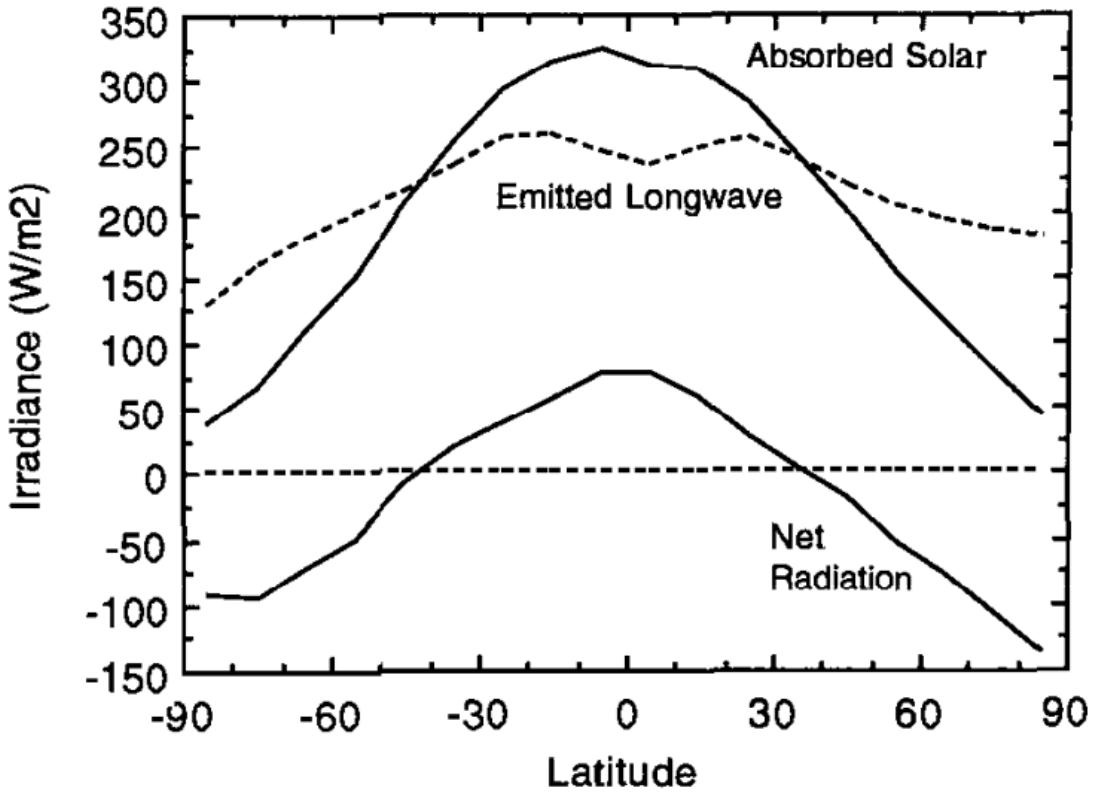
现代地球气候系统的能量收支分布

现代气候系统两箱模型（大气+地表）能量收支

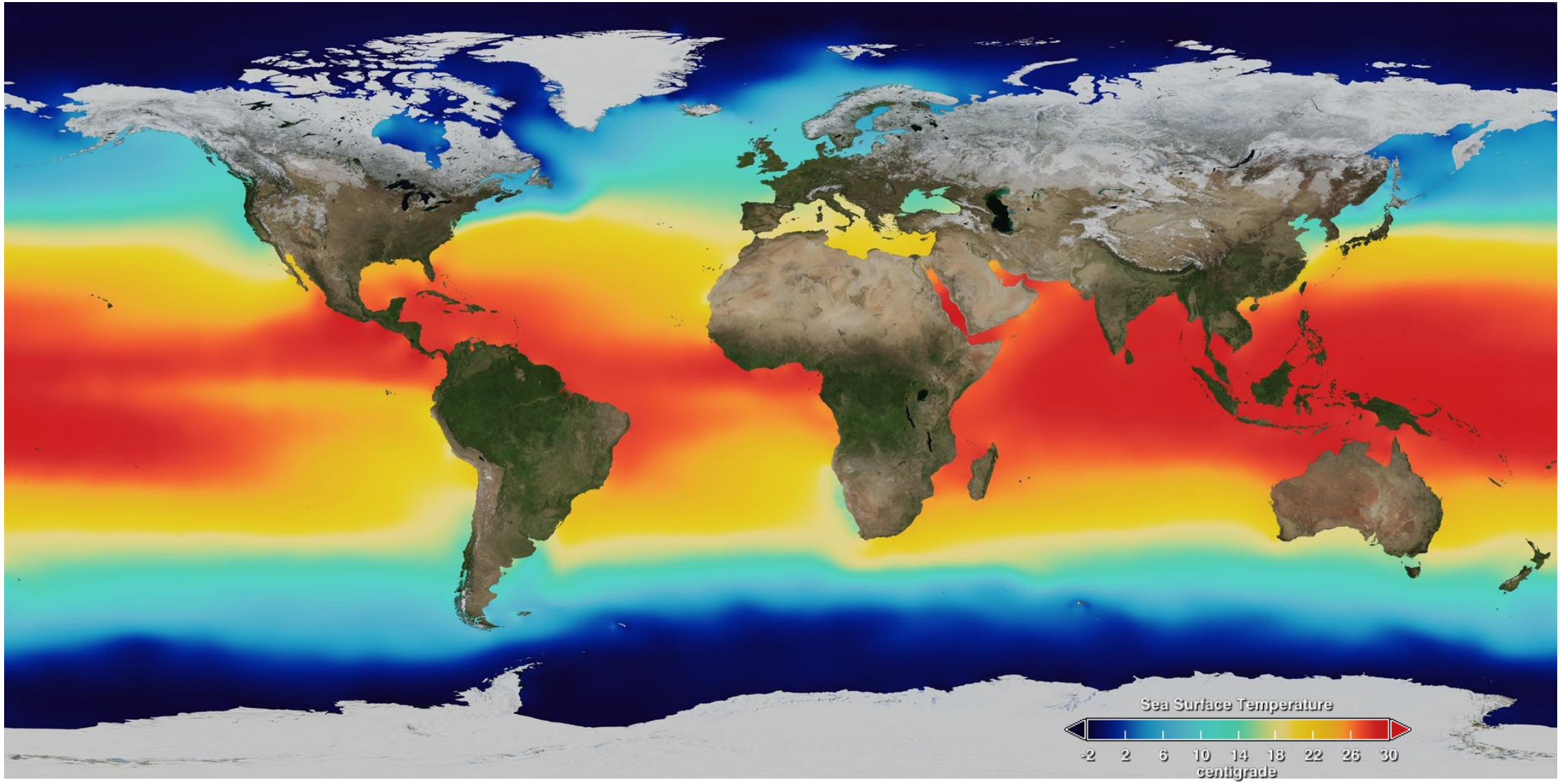


括号内为晴空（无云）条件

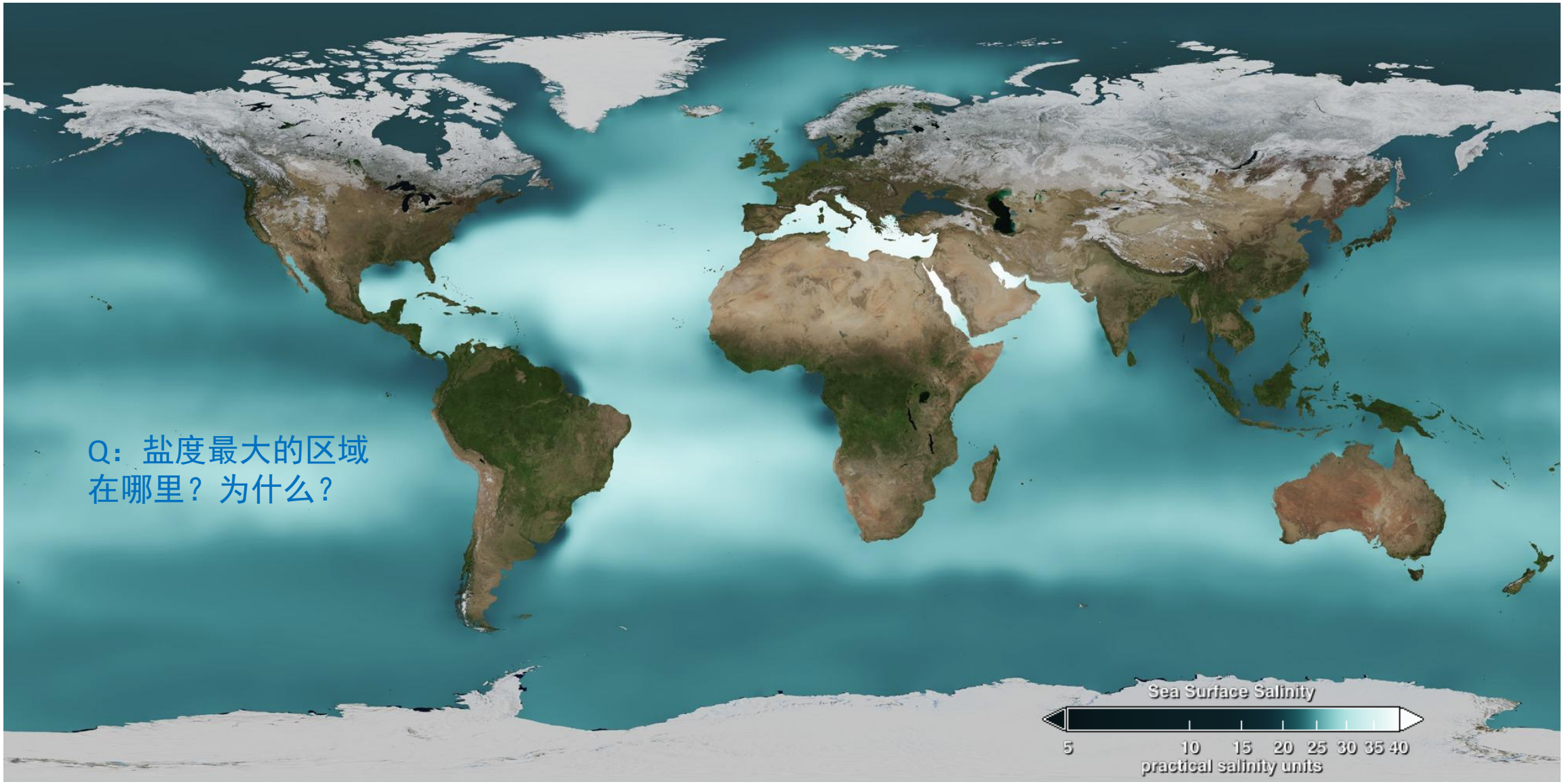
现代气候系统能量收支的经向（南北向）分布



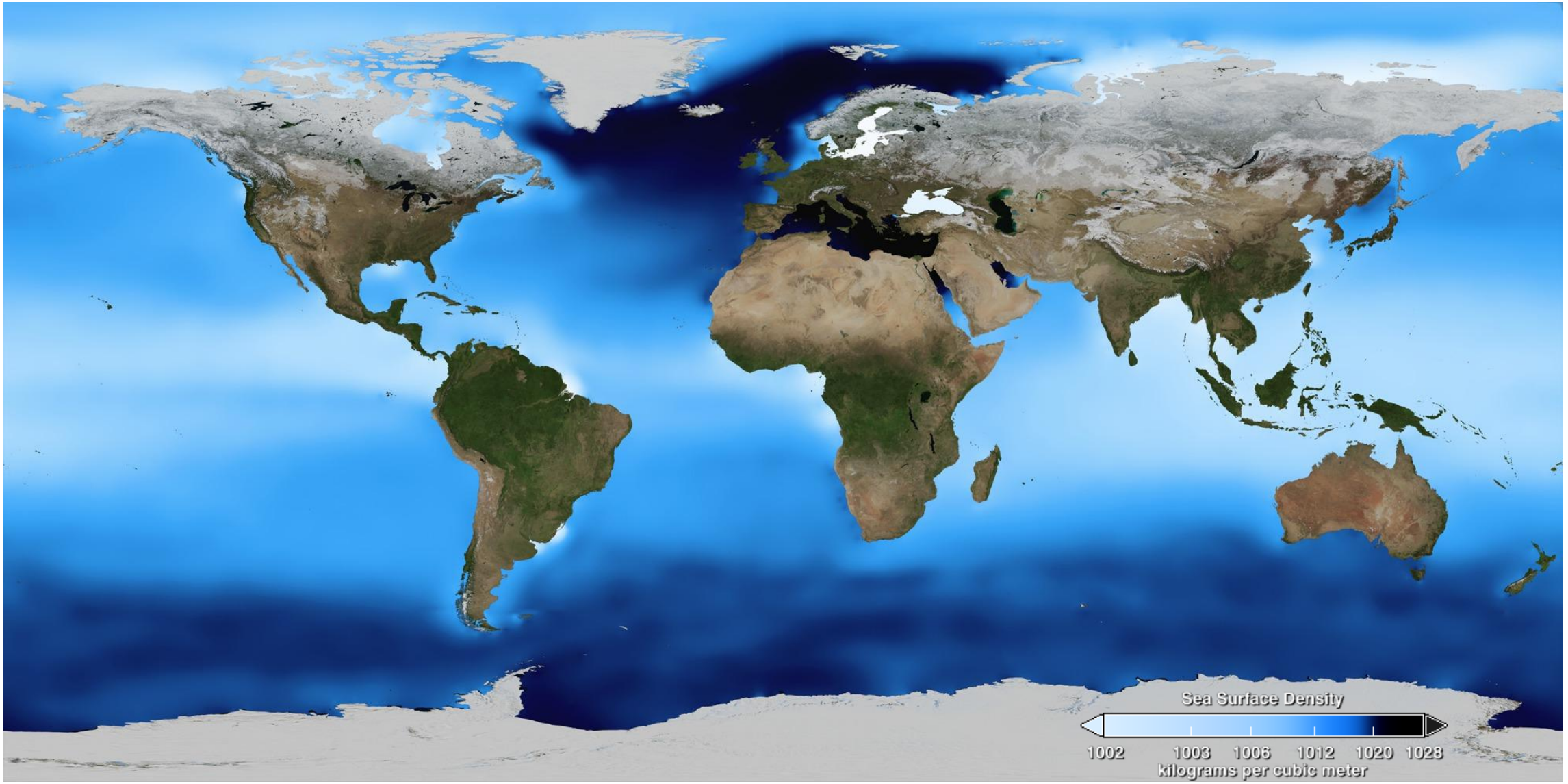
海洋表面温度



海洋表面盐度

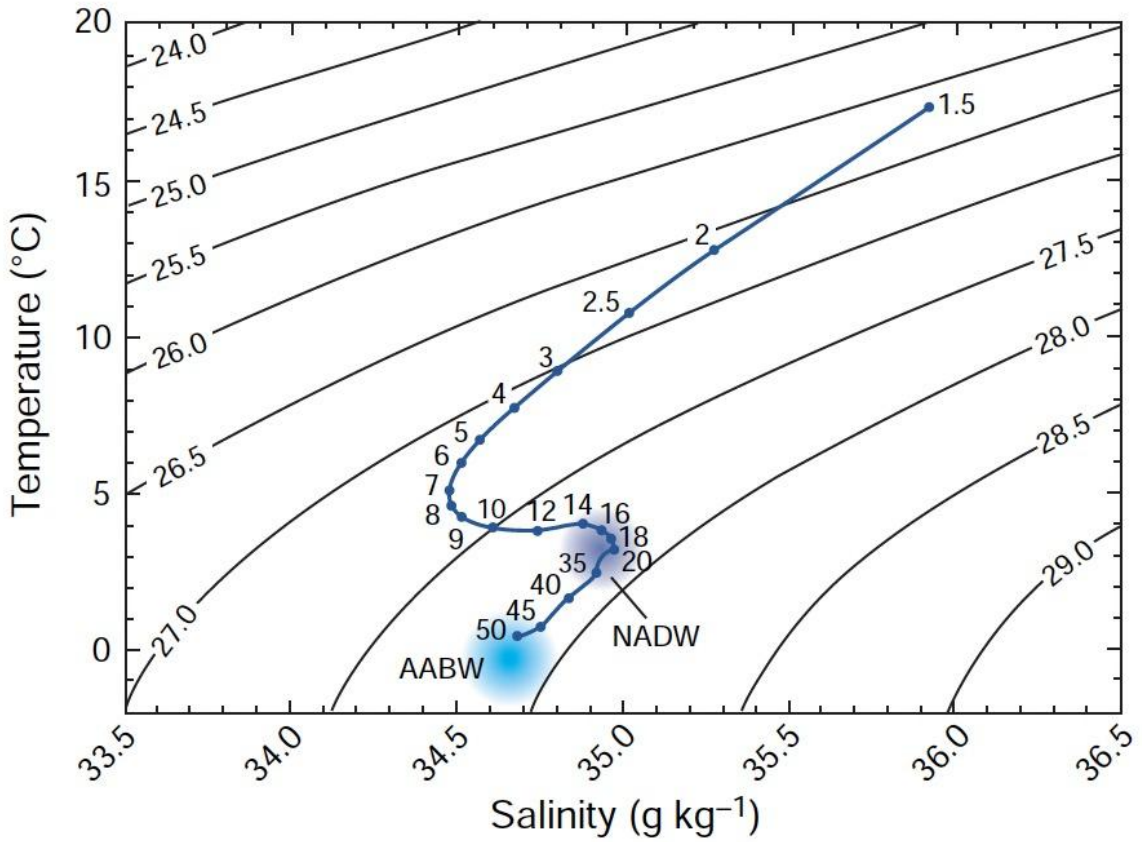

Q：盐度最大的区域
在哪里？为什么？
Sea Surface Salinity
5 10 15 20 25 30 35 40
practical salinity units

海洋表面密度（由温度和盐度决定）

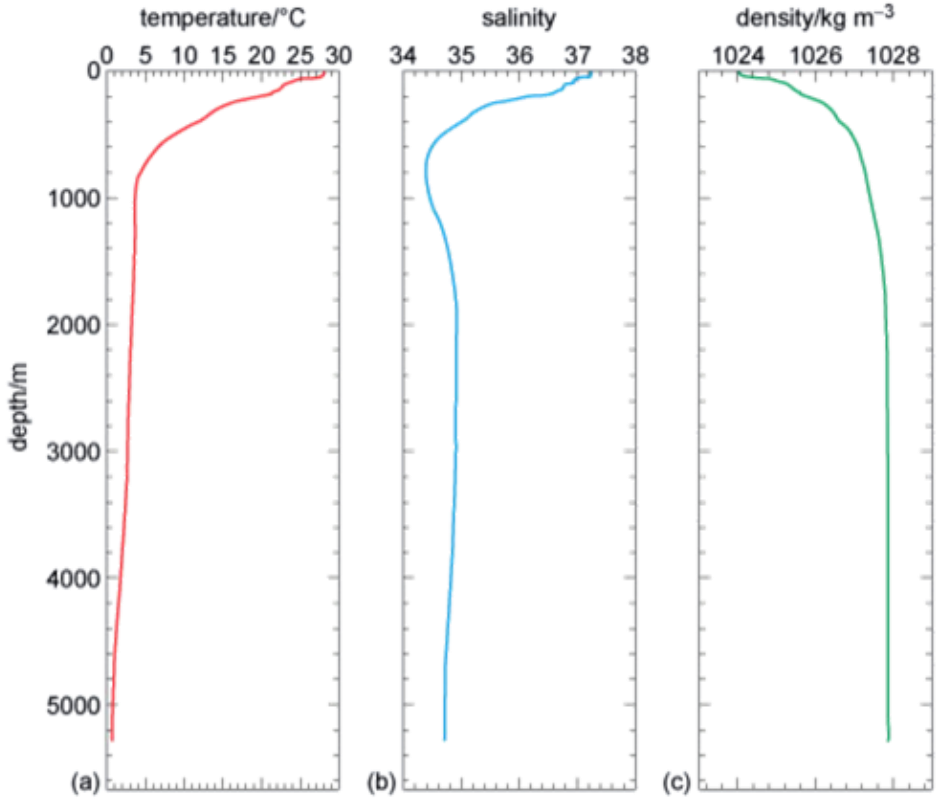


海水密度与温度和盐度的关系

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

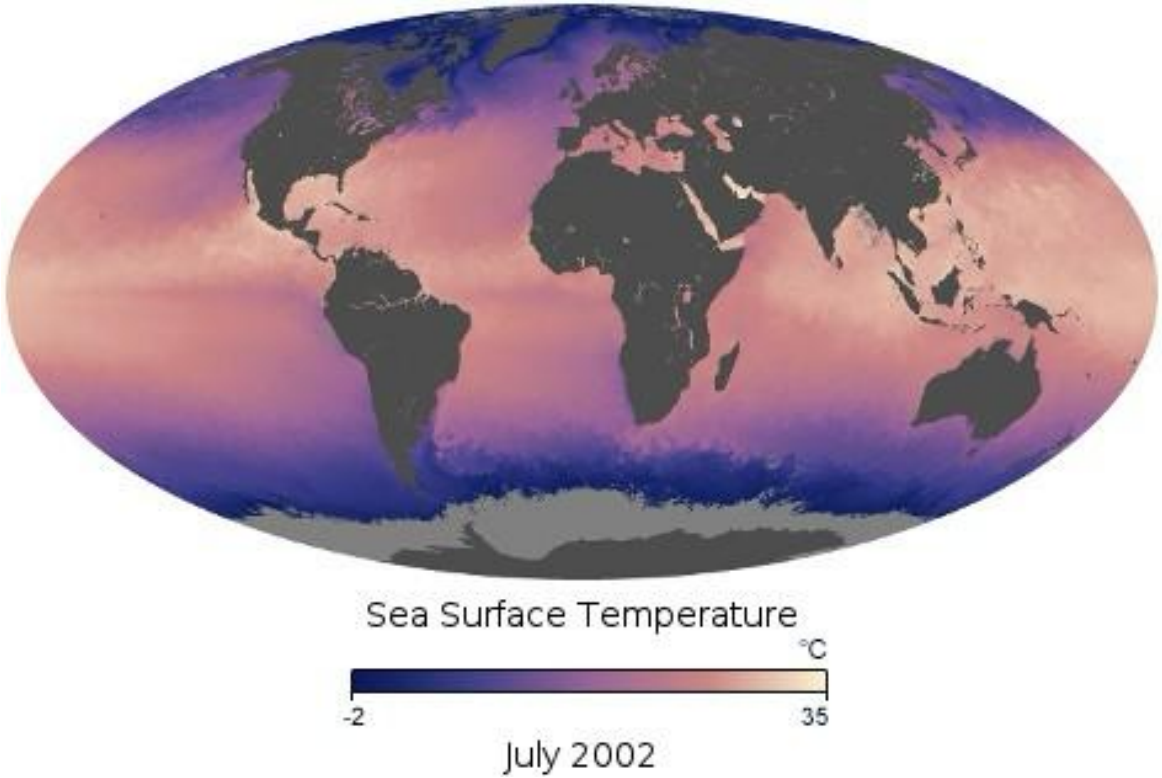


Q：比起大气，海洋静力稳定度如何?

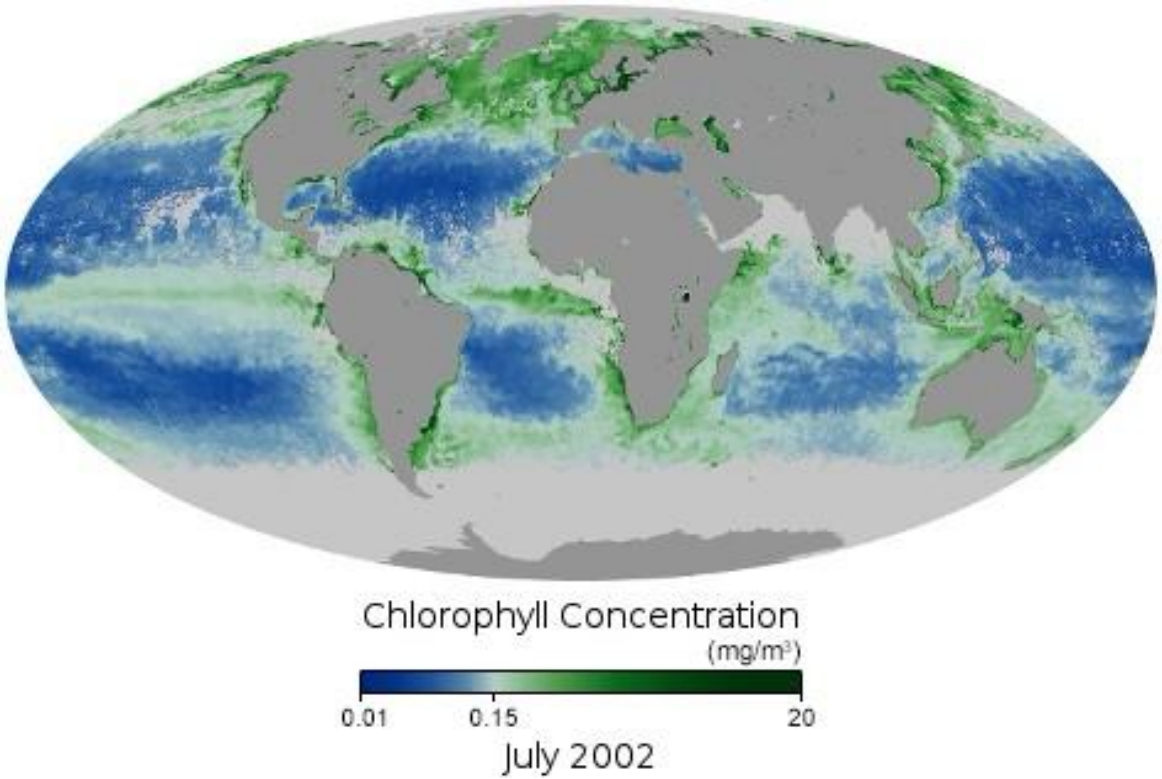
AABW： Antarctic bottom water
NADW： North Atlantic deep water

海洋表面温度和海洋初级生产力

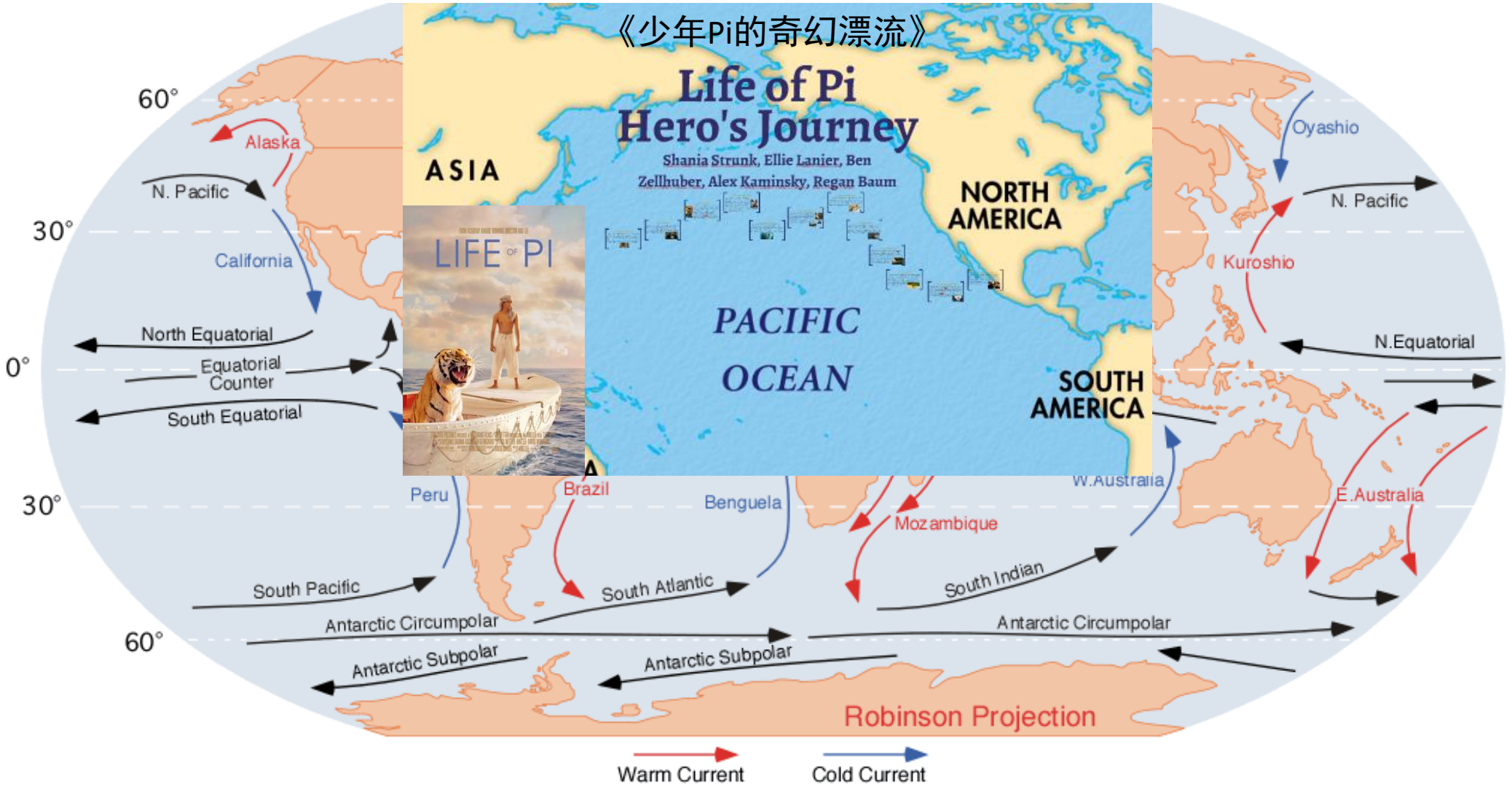
海表温度



叶绿素浓度

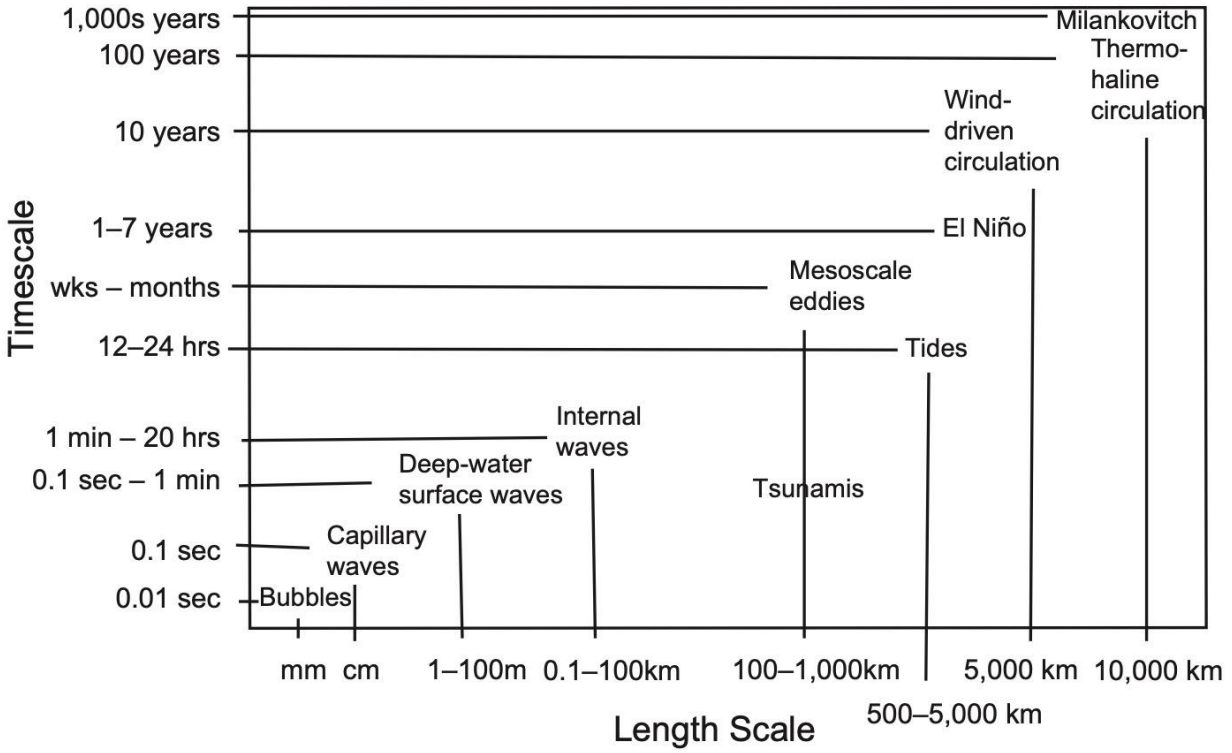


洋流

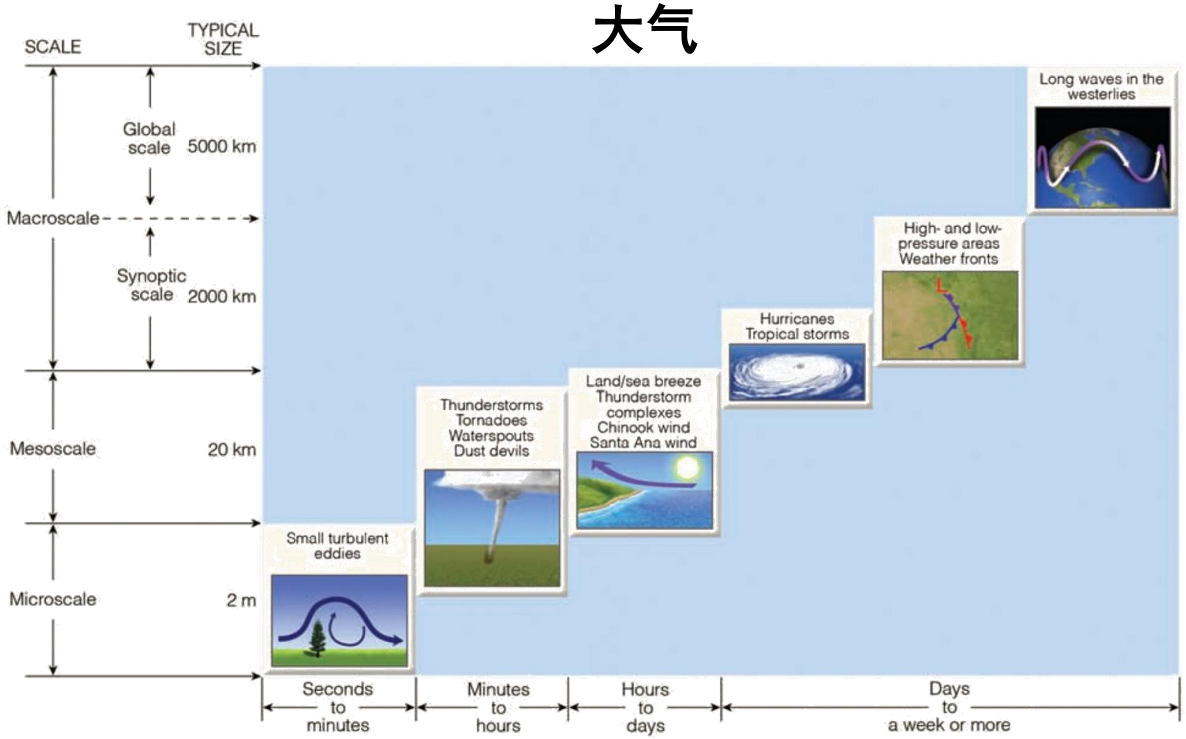

《少年Pi的奇幻漂流》
Life of Pi
Hero's Journey
Shania Strunk, Ellie Lanier, Ben Zellhuber, Alex Kaminsky, Regan Baum
ASIA
NORTH AMERICA
PACIFIC OCEAN
SOUTH AMERICA
LIFE OF PI
60°
30°
0°
30°
60°
Alaska
N. Pacific
California
North Equatorial
Equatorial Counter
South Equatorial
Peru
Brazil
Benguela
Mozambique
W.Australia
E.Australia
Oyashio
N. Pacific
Kuroshio
N.Equatorial
South Pacific
South Atlantic
South Indian
Antarctic Circumpolar
Antarctic Circumpolar
Antarctic Subpolar
Antarctic Subpolar
Robinson Projection
Warm Current
Cold Current

海洋运动的时间和空间尺度

海洋

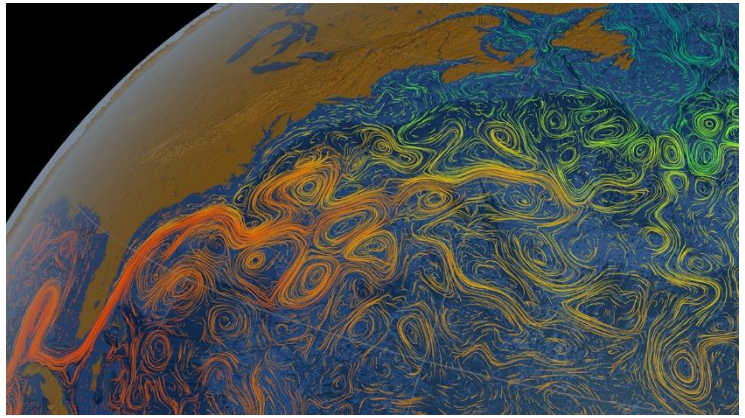


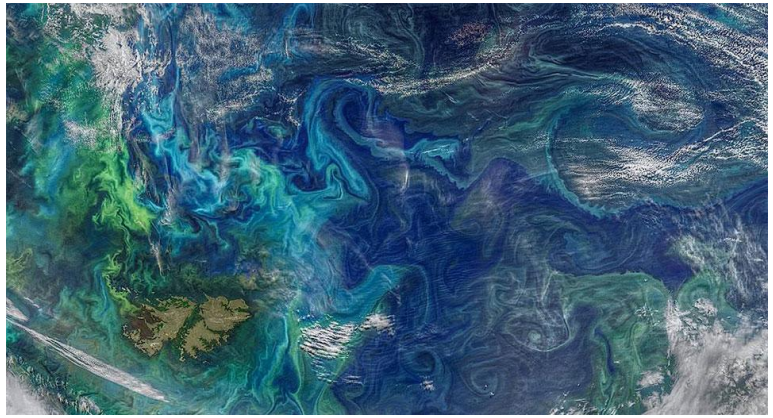
大气



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

海洋中的涡旋 Eddy



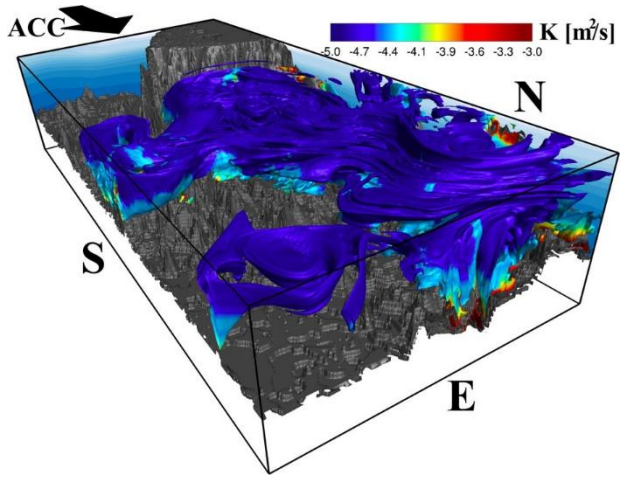


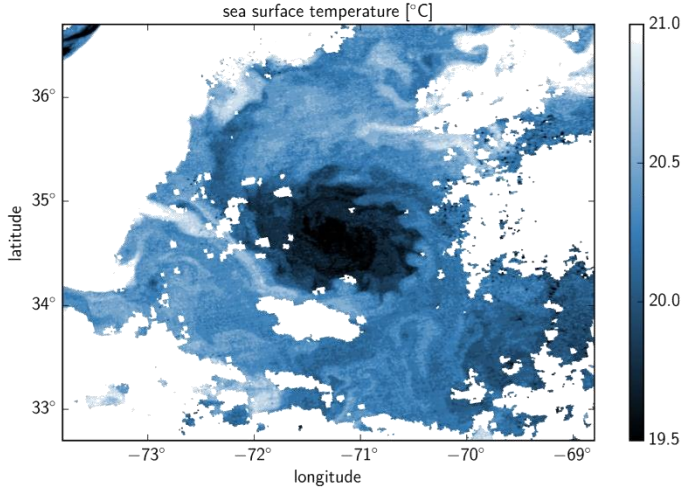


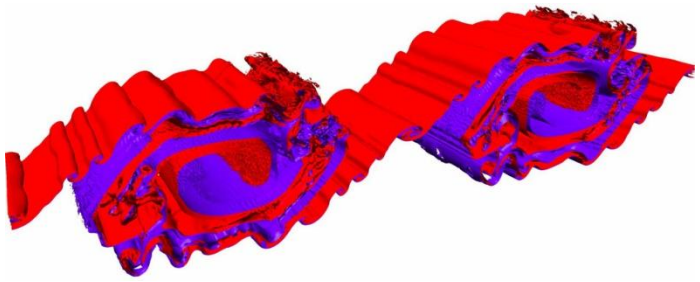
中尺度涡旋（～热带和温带气旋）

次中尺度涡旋（～中尺度对流系统）

微涡旋（～大气边界层涡）



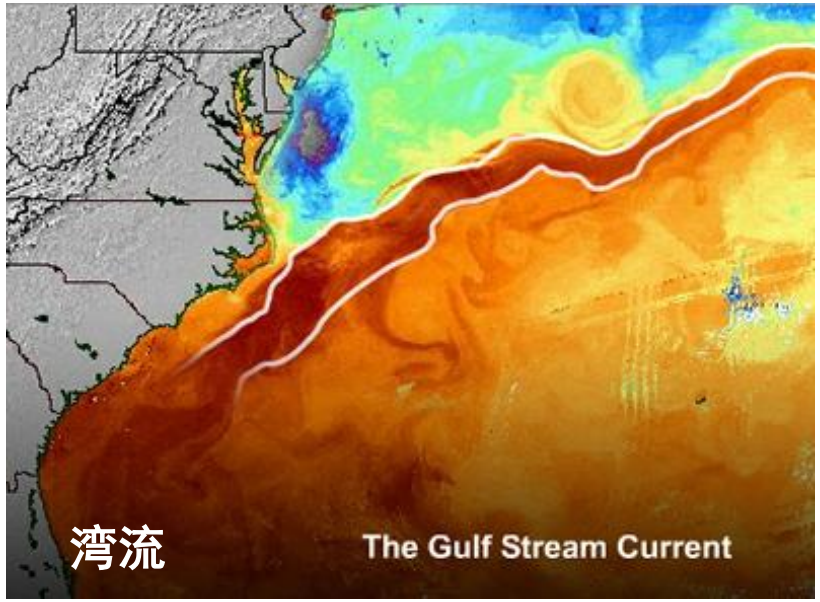


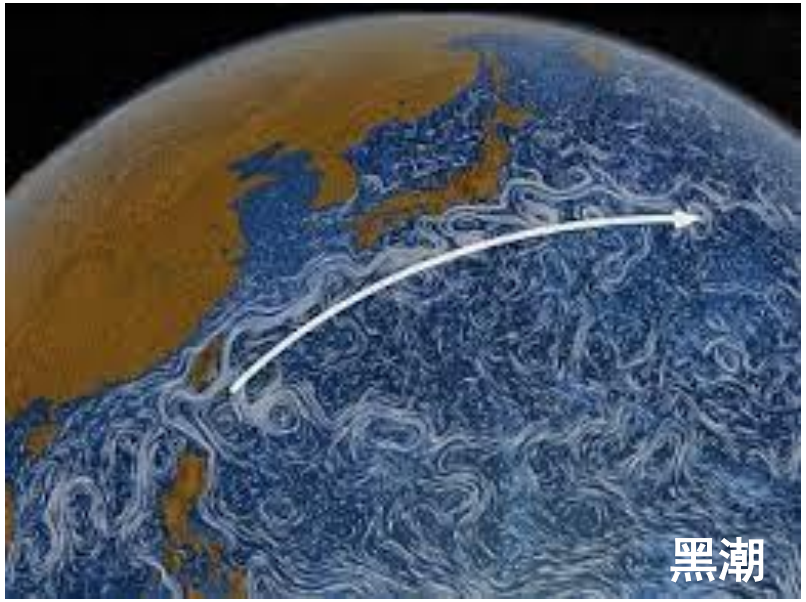


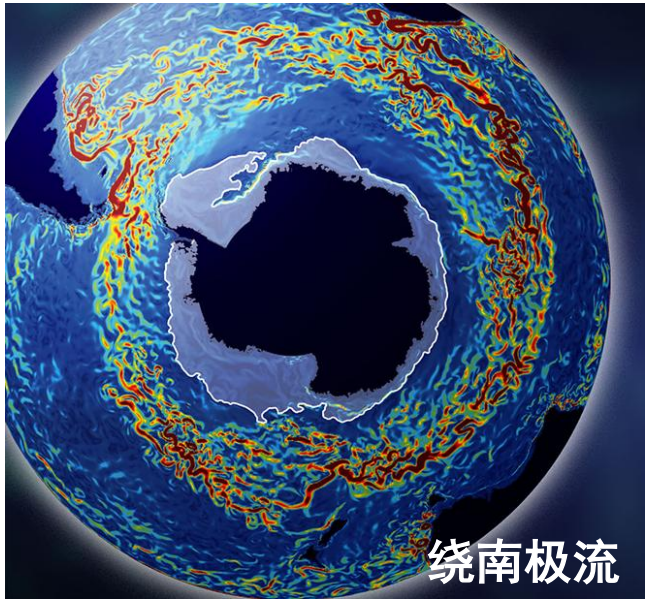
本章主要内容

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. 大西洋多年代际震荡
6. 温盐环流和新仙女木事件

风生洋流





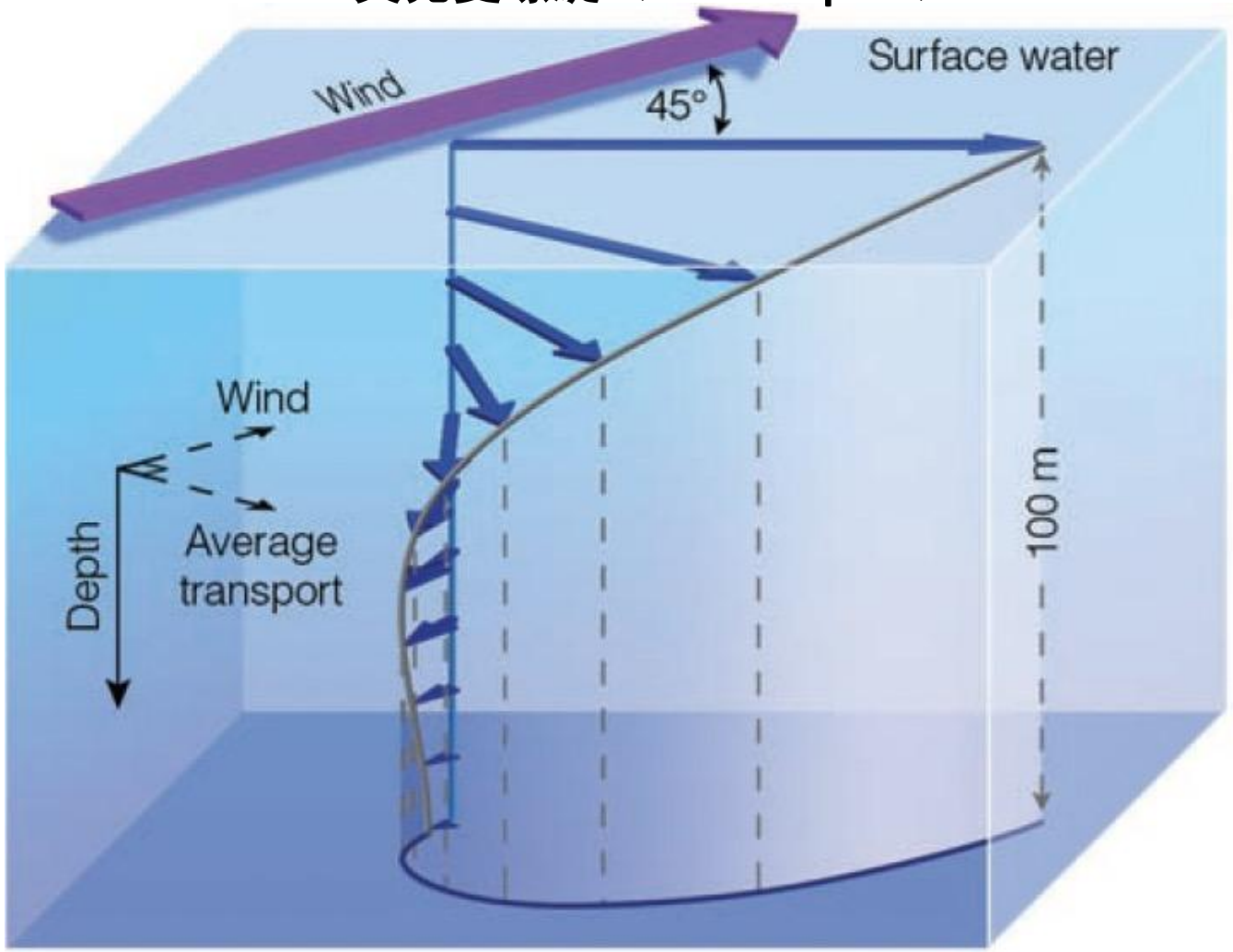


- 大气运动作用在海洋表面上，通过摩擦力（风应力）驱动海水运动，形成风生（驱动）洋流。
- 主要的风生洋流有：北大西洋的湾流（Gulf Stream），北太平洋的黑潮（Kuroshio）、南极绕极洋流（Antarctic circumpolar current, ACC）等。

Q：从南极上空俯瞰，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

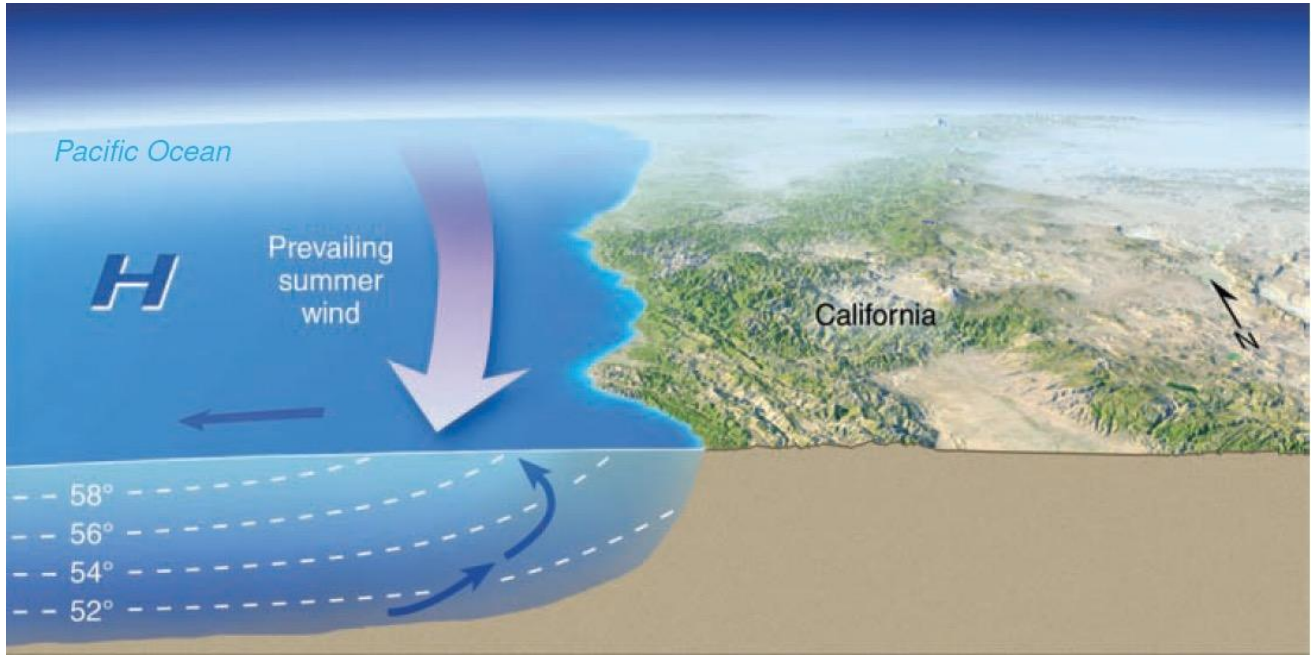
艾克曼螺旋（Ekman Spiral）



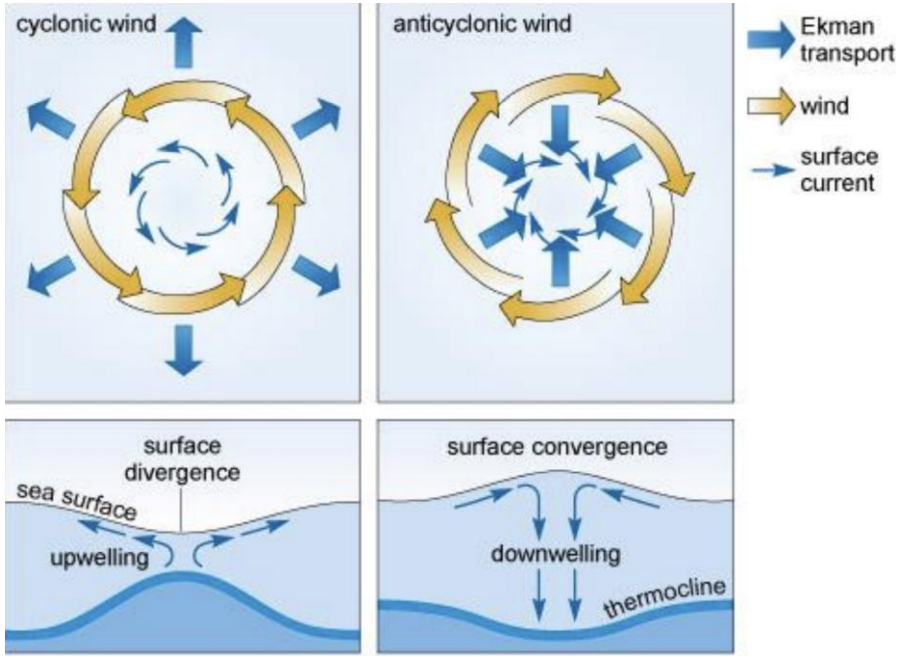
- 风应力作用在洋面上，带动海水沿风吹的方向运动，在科氏力的作用下，表面海水逐渐向右（北半球）偏转形成与风向20–45度的夹角。
- 随着海水深度的加深，运动方向逐渐向右偏转。
- 另外，由于摩擦力的作用，海水运动速度逐渐减弱。
- 一般来说，风生洋流只达到100–300米深。

风生洋流的基本原理

艾克曼输运（Ekman Transport）



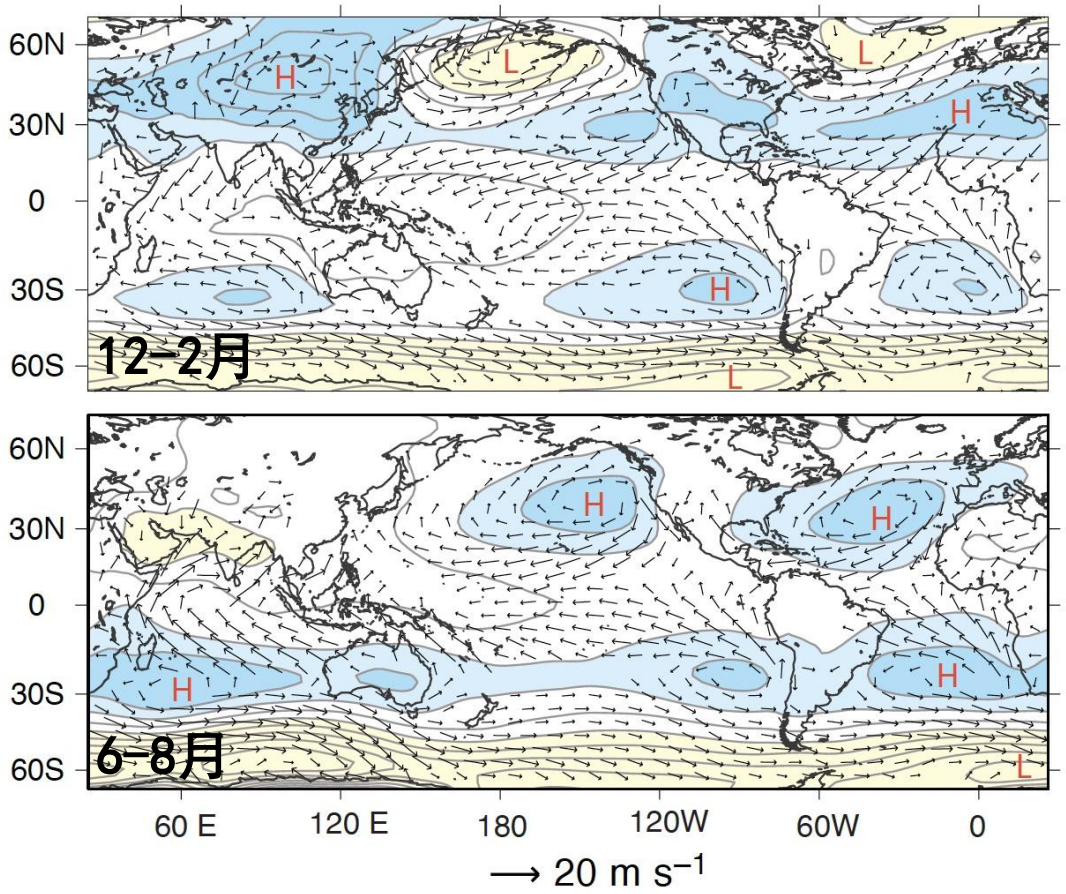
艾克曼泵（Ekman Pumping）



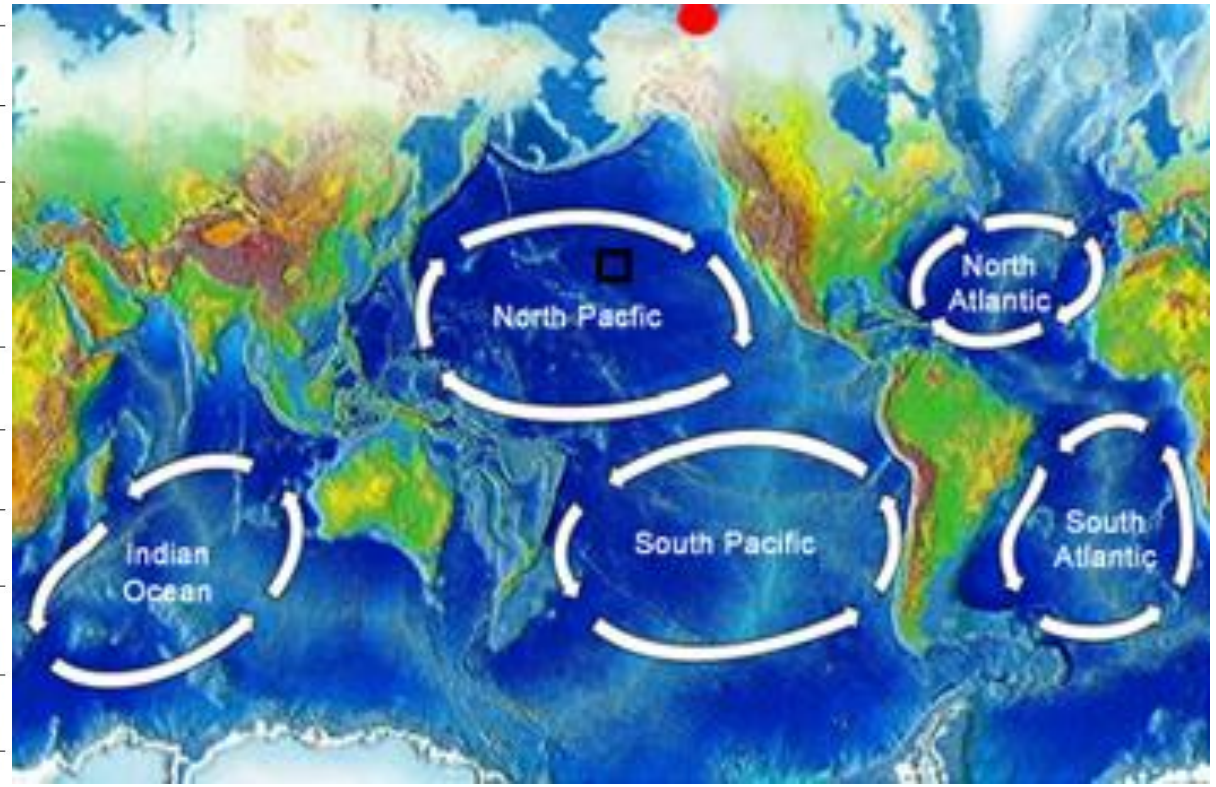
- 艾克曼输运导致辐合或辐散，引起海水的垂直运动。
- 离岸艾克曼输运、气旋性海洋环流、赤道流等都伴随次表层海水上涌。这些地区也是营养盐充足、海洋生态繁荣的地区。

副热带风生环流 Subtropical Ocean Gyre

地表风



副热带风生环流



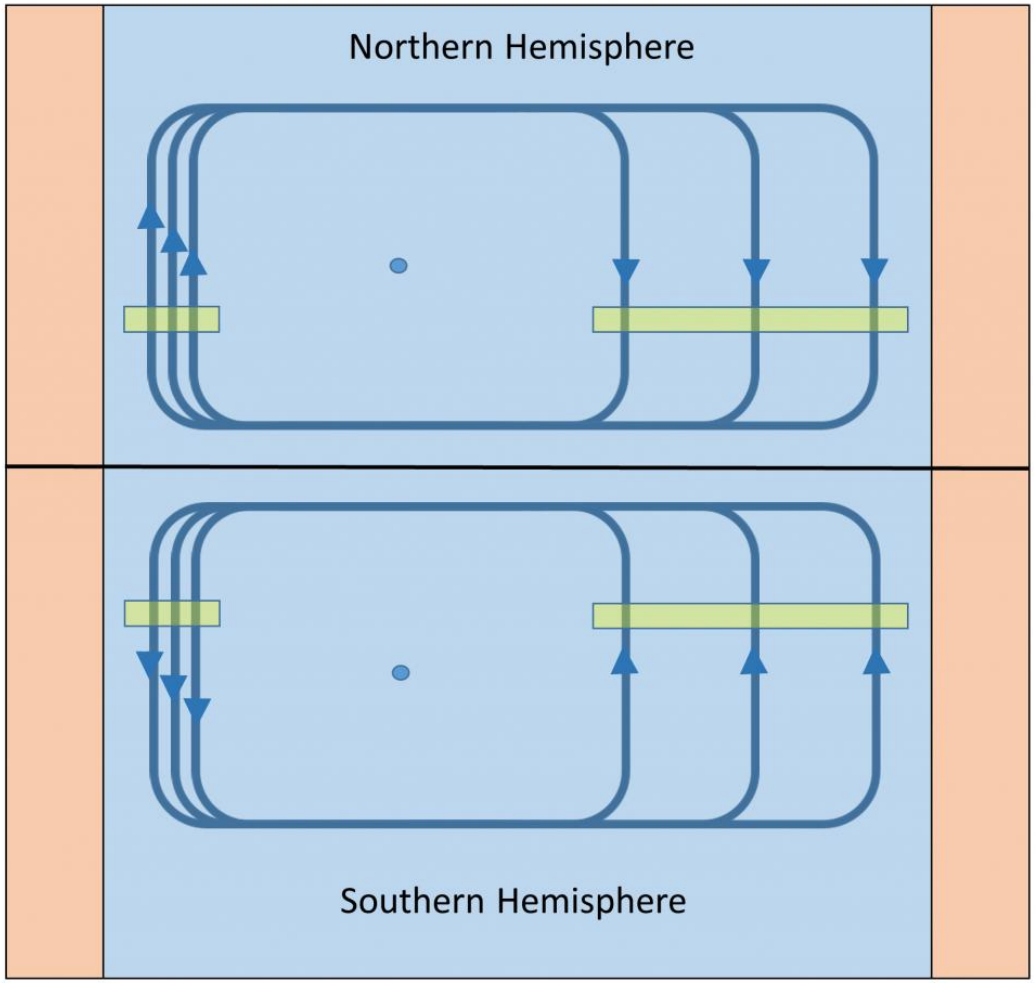
中高纬度的西风驱动海水向东运动并逐步向赤道偏转。
热带东风驱动海水向西运动并逐步向极地偏转。

} 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。



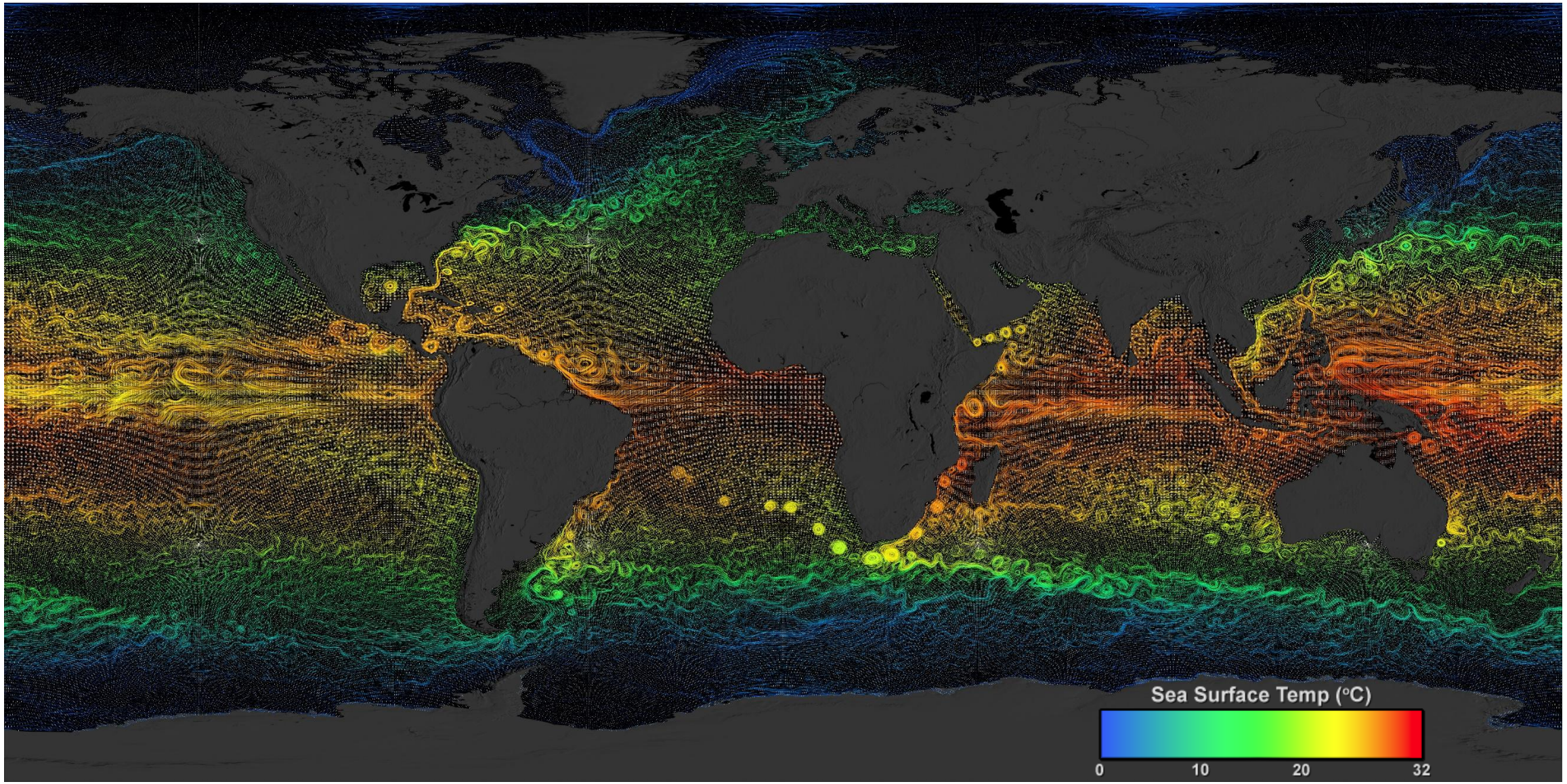
	西边界流	东边界流
流速	~ 10 km day^{-1}	~ km day^{-1}
宽度	< 100 km	~ 1000 km
深度	~ 2 km	~ 500 m

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。

Stommel (1948)

又快又暖又活跃的西边界流

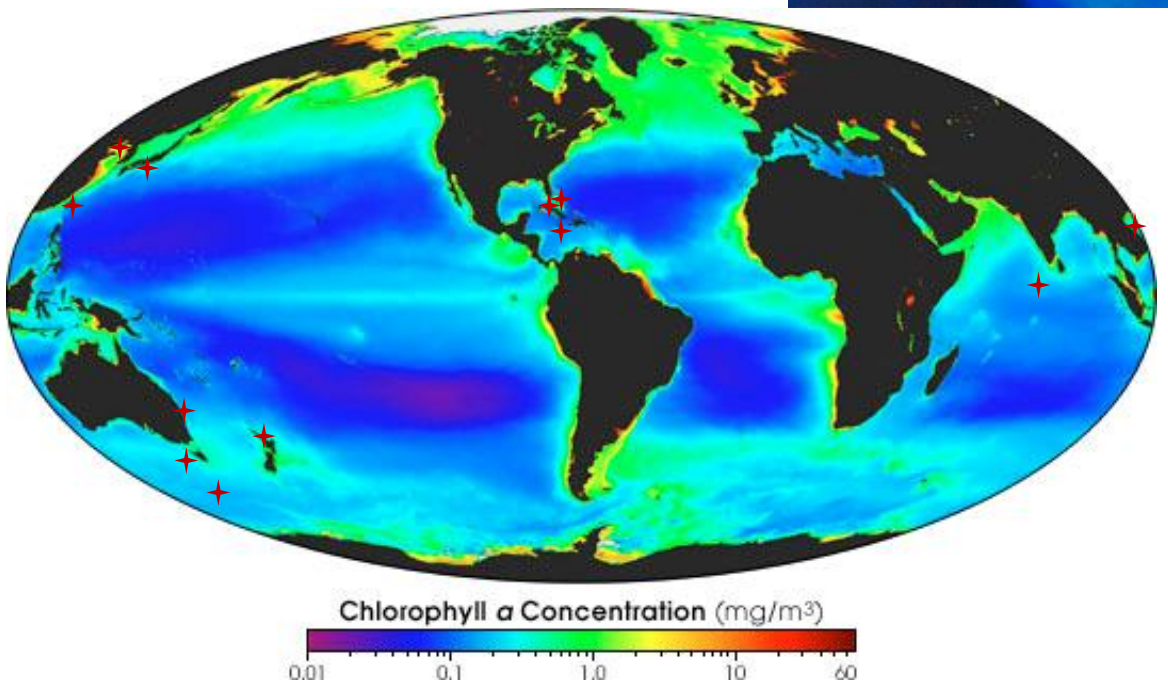


副热带风生环流产生“海洋上的沙漠”和“垃圾场”

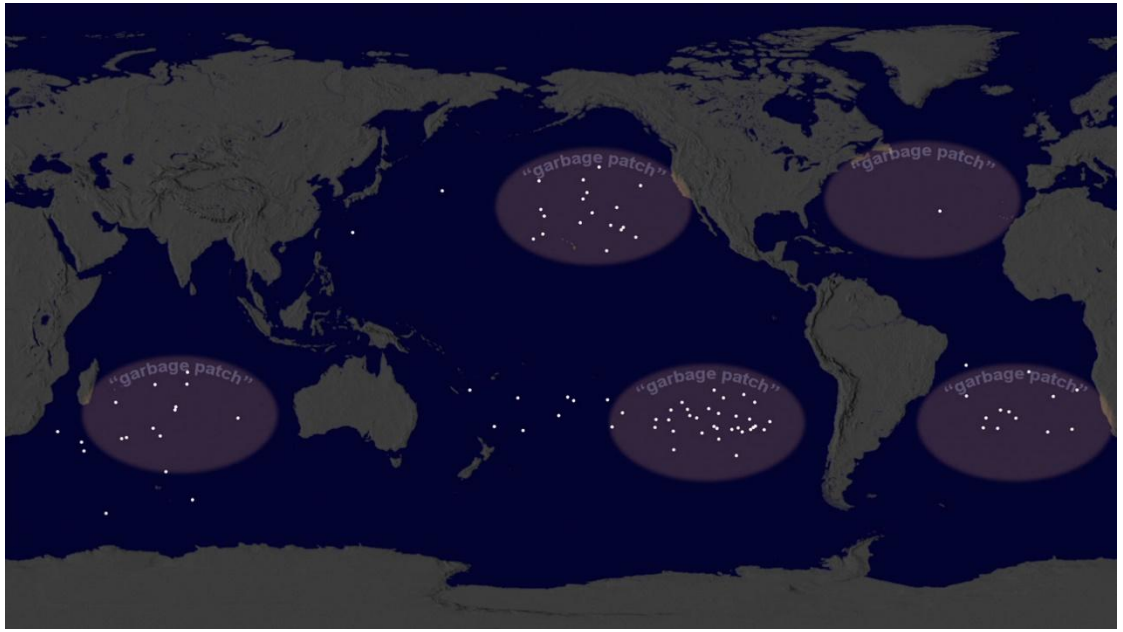
艾克曼输运和艾克曼抽吸导致



叶绿素浓度

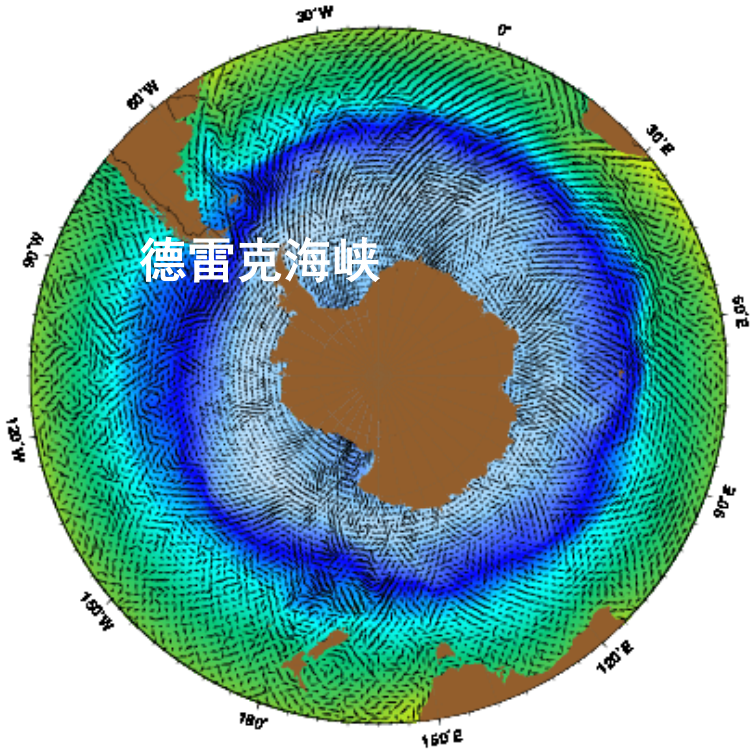


海上浮标聚集

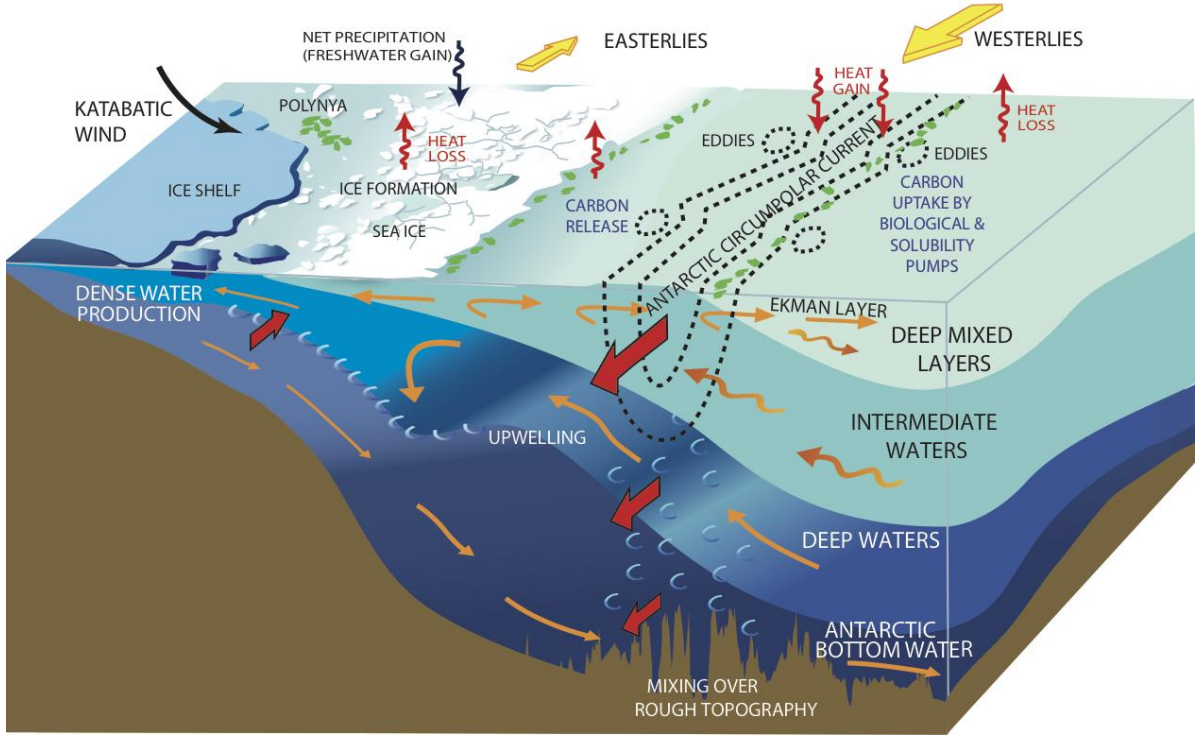


高纬地区风生环流：南极绕极流

洋流的方向和强弱（蓝色最强）

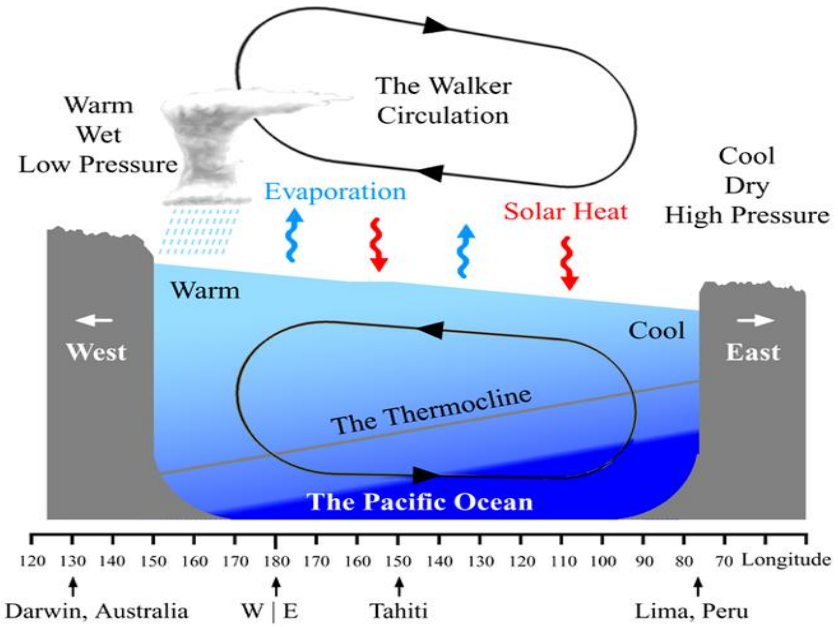


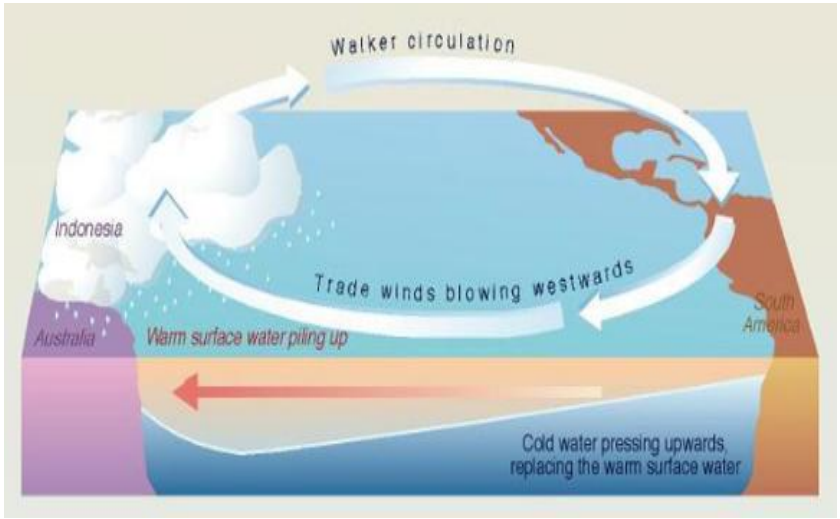
三维流场与生物地球化学过程



- 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。

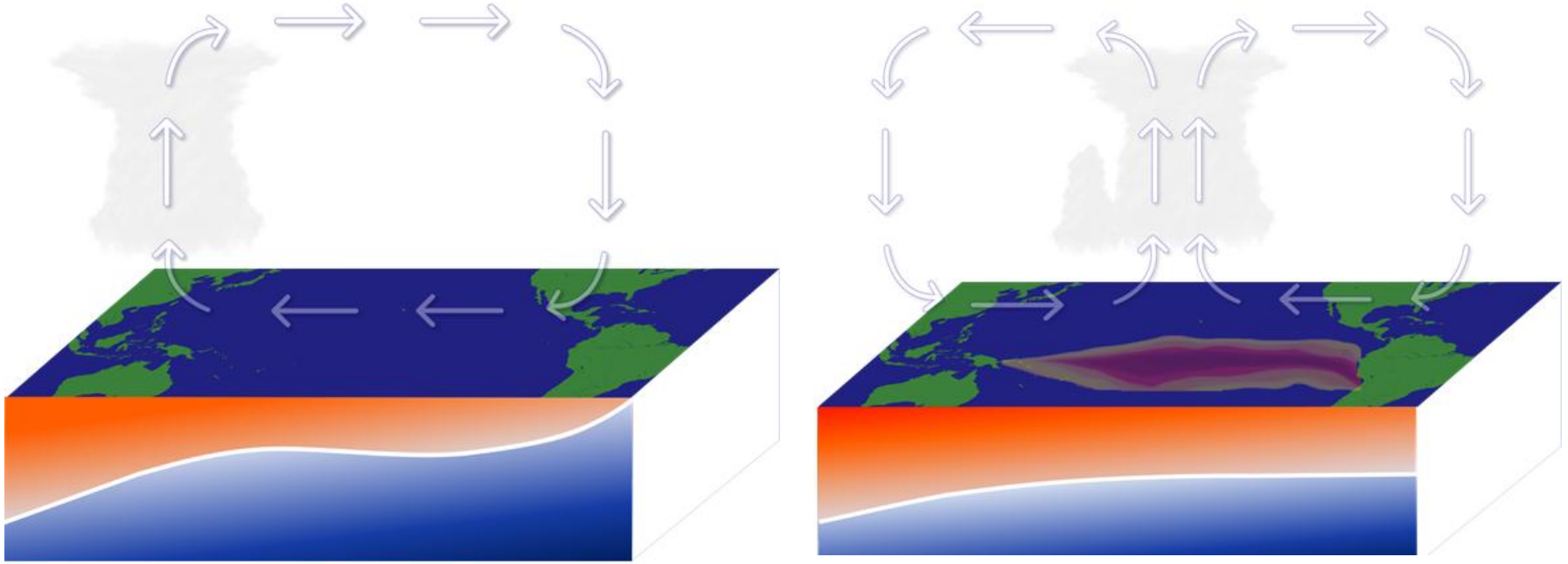
海气耦合和沃克环流





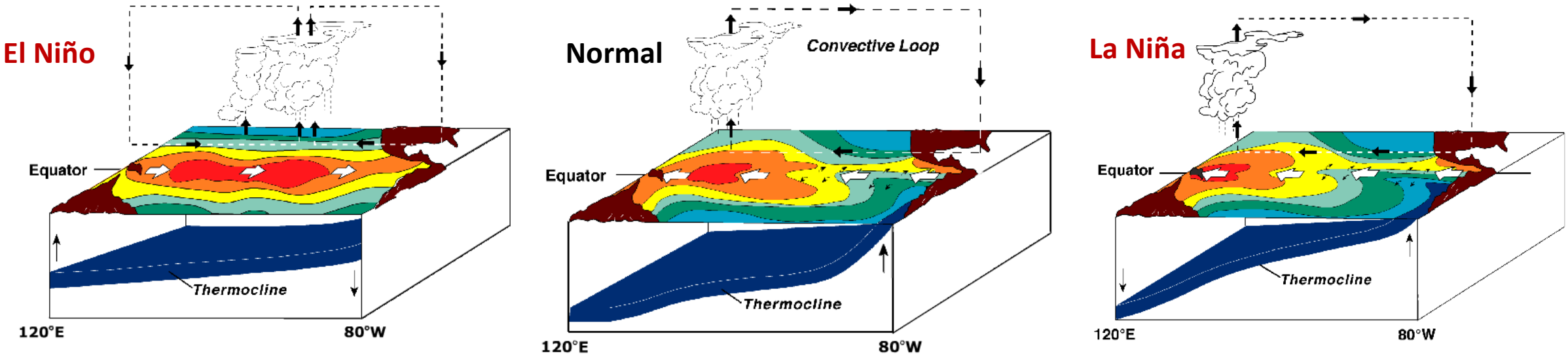
- 信风作用在洋面上，热带东太平洋表层的暖海水被吹向热带西太平洋，导致东太平洋下层冷海水上翻，所以海面温度较低。暖海水在热带西太平洋堆积的结果造成西太平洋海面温度较高。
- 热带西太平洋海面温度较高，空气上升；热带东太平洋海面温度较低，空气下沉；高层西风，海面吹东风，构成沃克环流。
- 海洋和大气之间的耦合不仅表现在动量，也表现在水汽和能量。

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 phenomenon)。在西班牙语里， El Niño的意思是男孩(boy child)，人们把该现象称为圣诞男孩(Christ child)。
- 这种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。

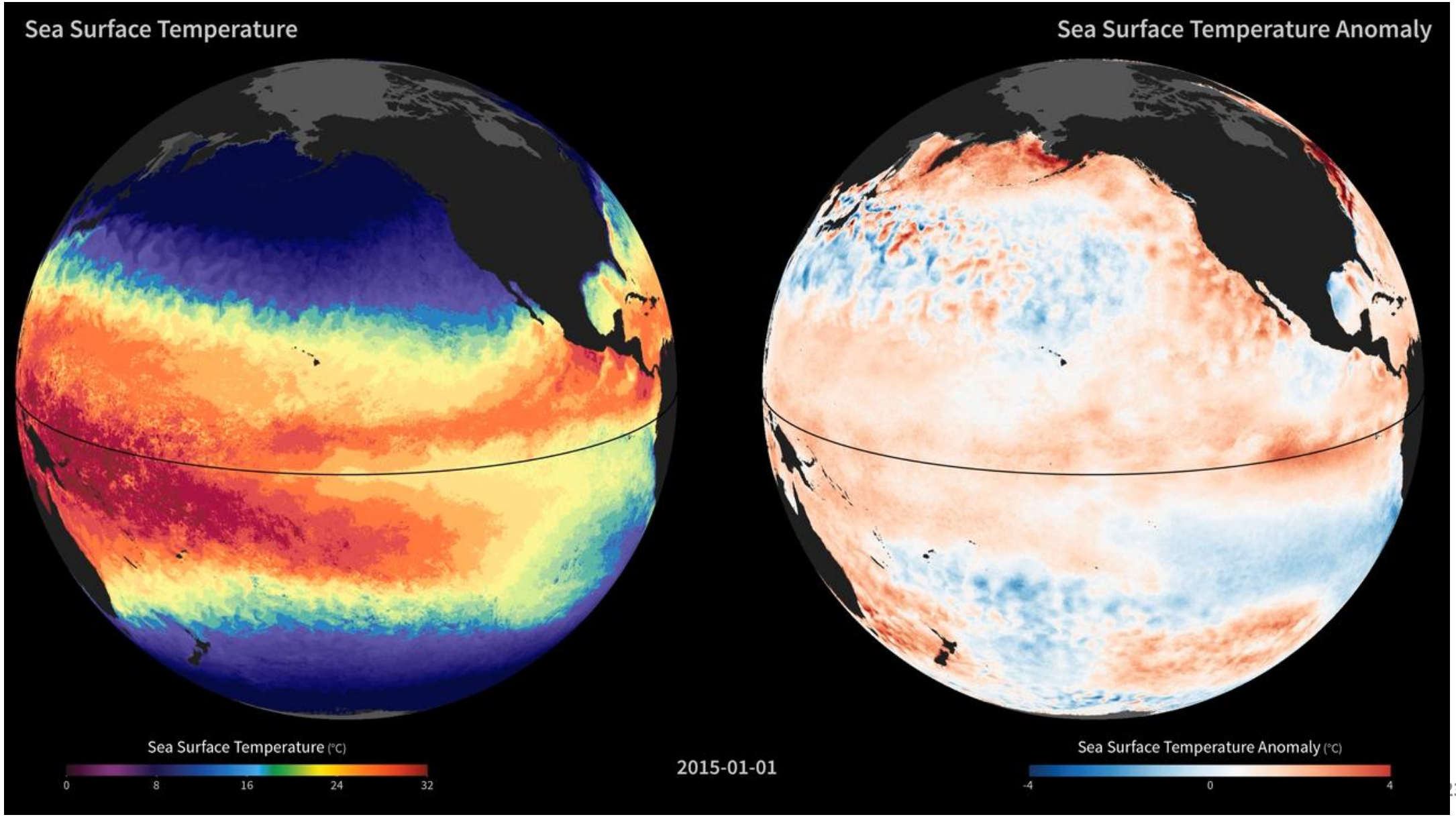
ENSO：厄尔尼诺、拉尼娜、南方涛动



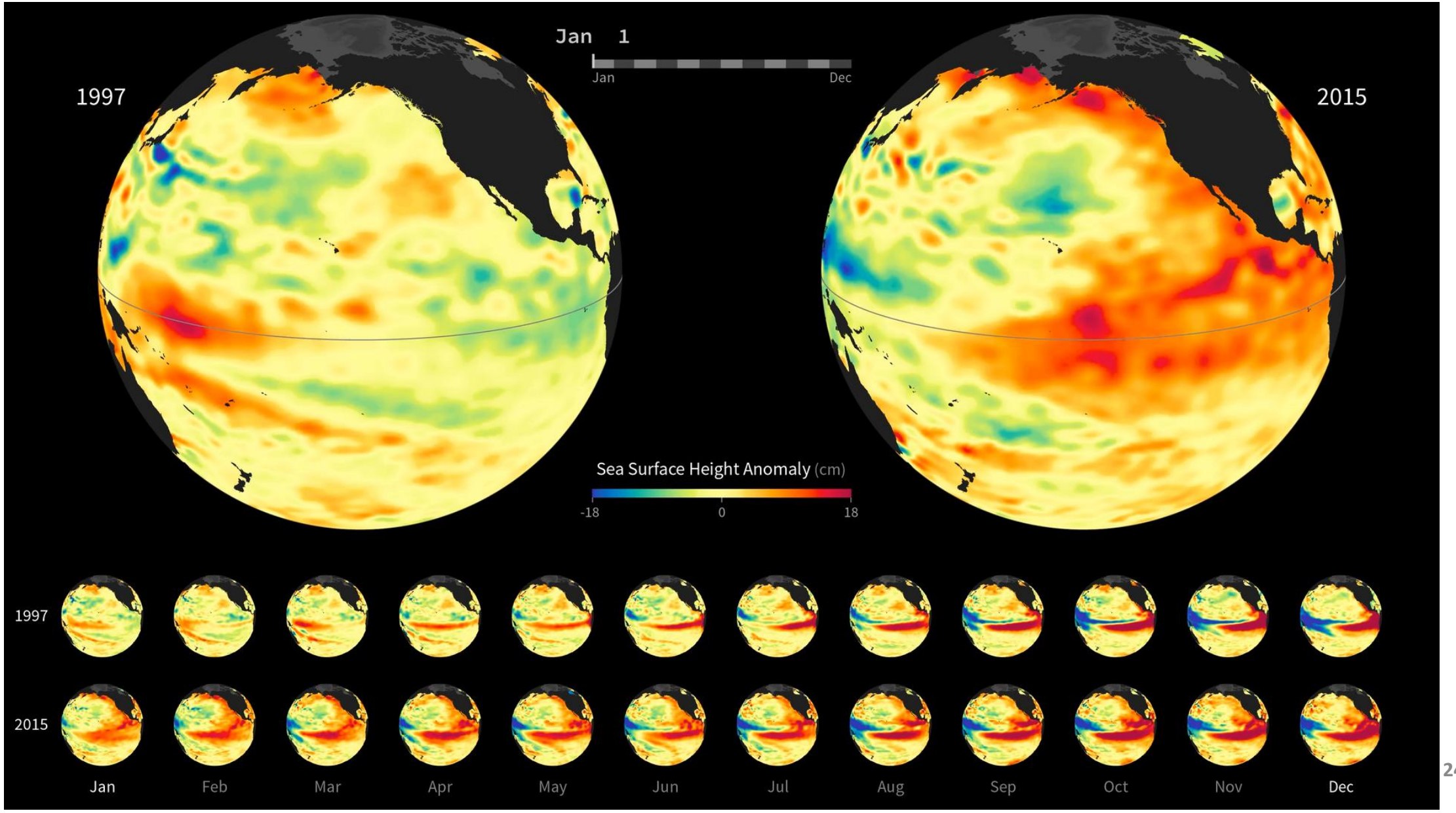
- 每隔2-7年，这种海水变暖的现象便会非常地强，持续时间在半年以上，覆盖的面积也非常大。这种南美洲东太平洋沿岸强的海水变暖现象称为厄尔尼诺事件(El Niño event)。
- 与El Niño事件相反的情况是异常强劲的信风把暖的海水主要集中在西太平洋，中部和东太平洋的表面海水较冷。这种现象称为拉尼娜事件(La Niña event)。
- 在El Niño期间，东太平洋上空的空气较通常的轻，而西太平洋上空的空气较通常情况下的空气重。所以，东太平洋的海平面气压较通常的低，而西太平洋的海平面气压较通常的高。这种东西太平洋海平面气压每隔几年的交互变化的现象被称为南方涛动(Southern Oscillation)。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

22

一个典型El Niño年（2015年）的海温与海温异常

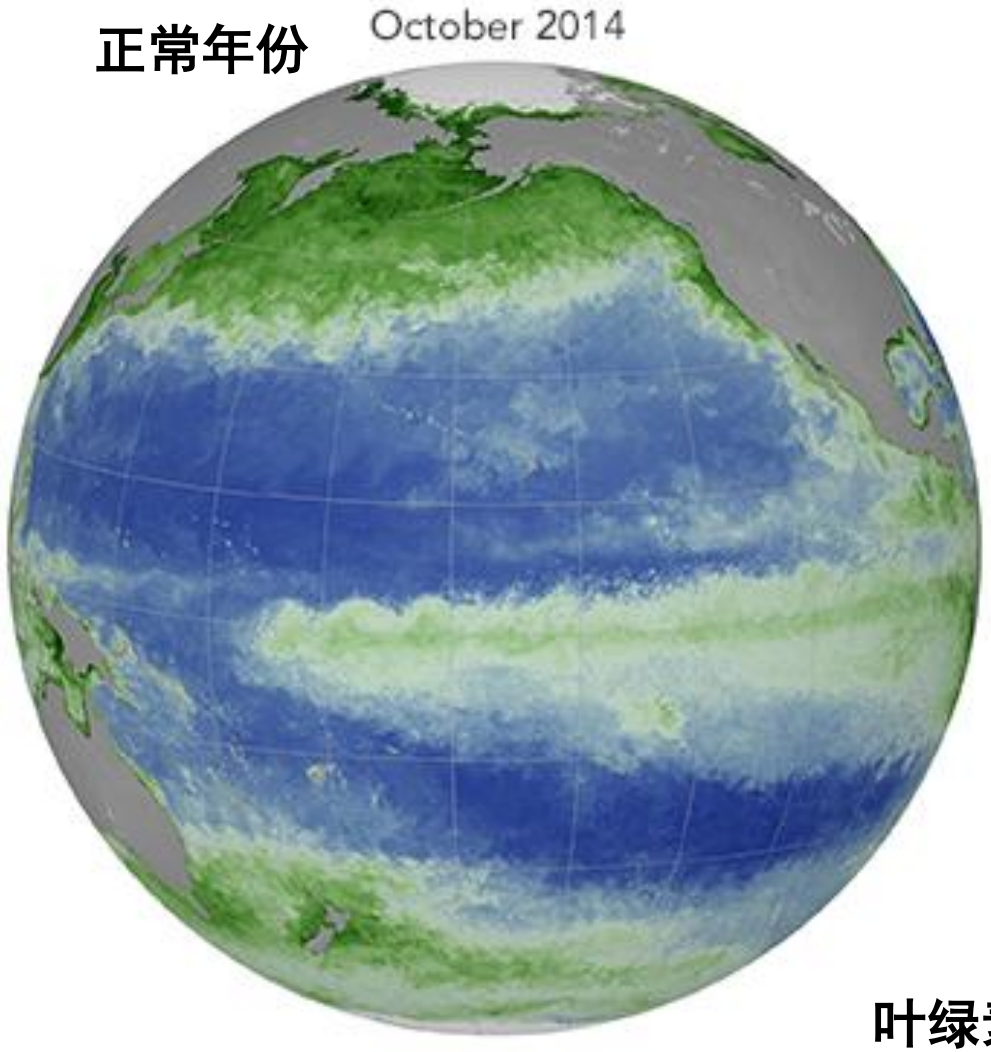


两个典型El Niño年的海平面高度异常

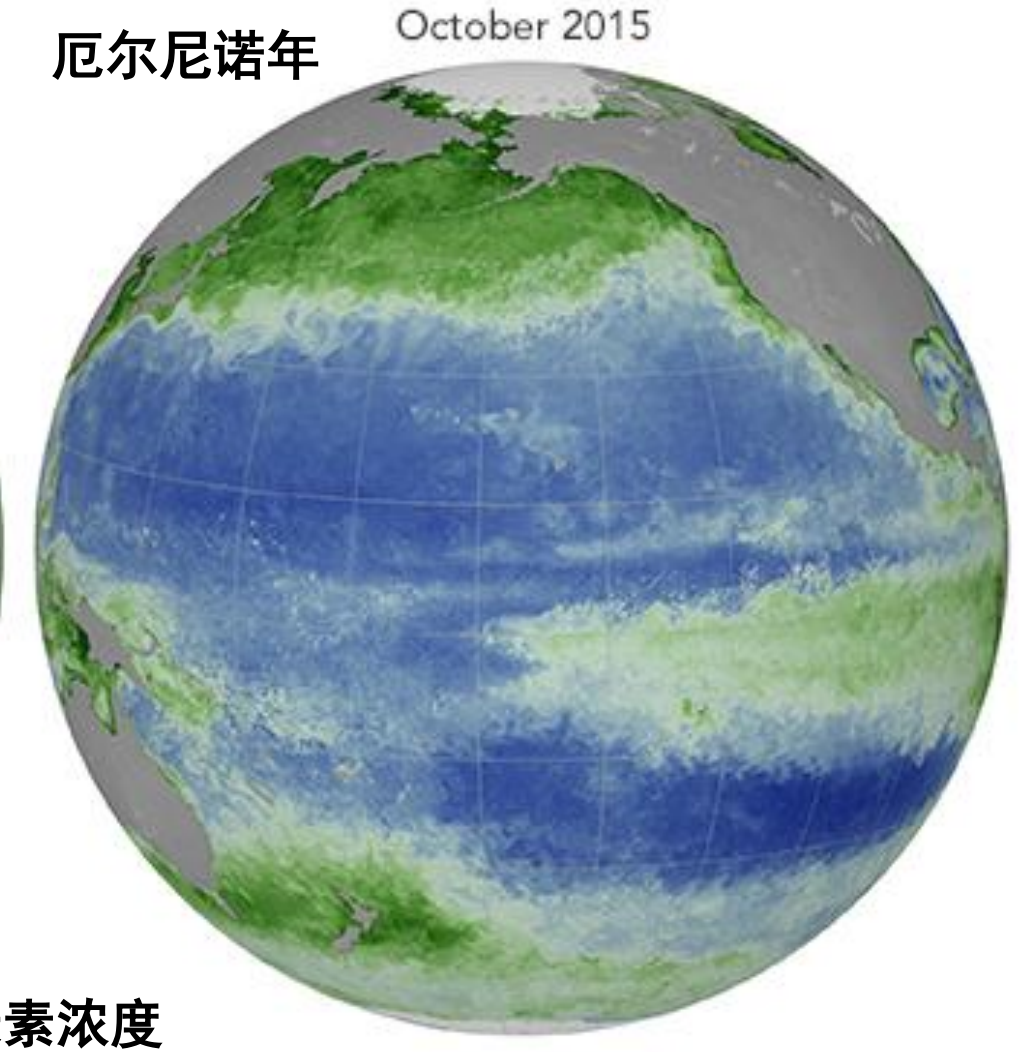


ENSO与海洋初级生产力

正常年份



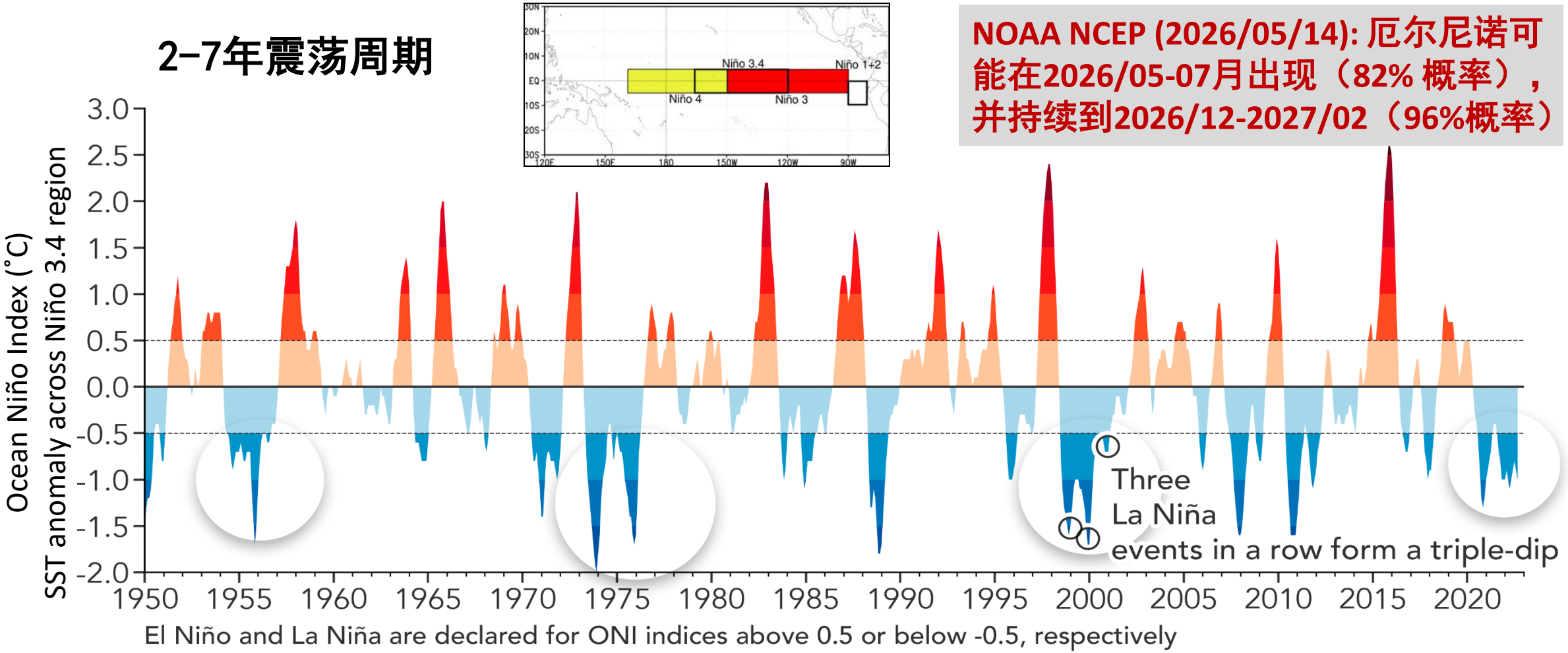
厄尔尼诺年



叶绿素浓度



历史上的El Niño和La Niña事件

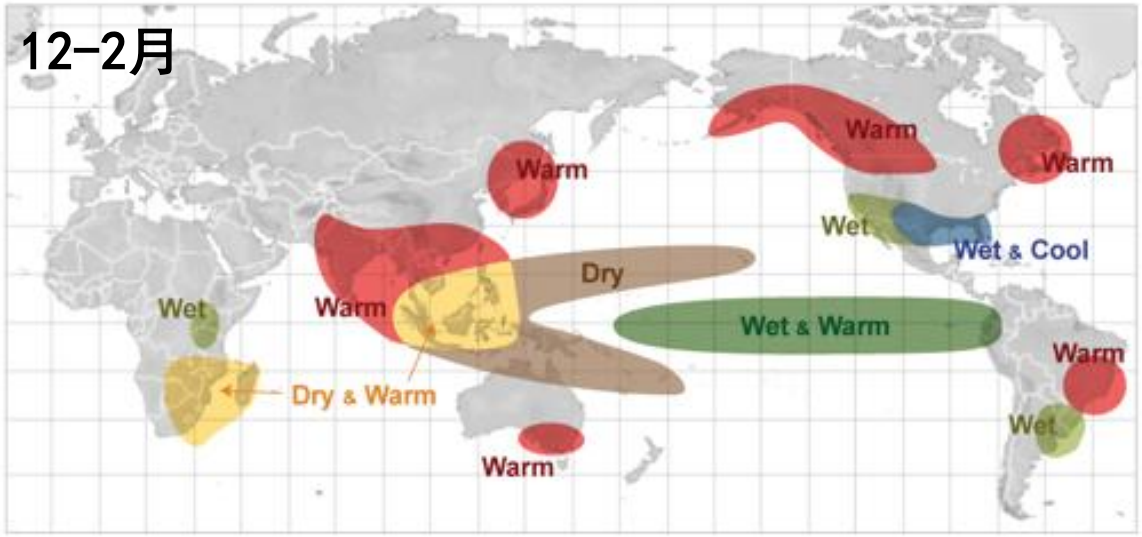


2023：刚结束了三重拉尼娜，热带太平洋海温已经发展出厄尔尼诺。

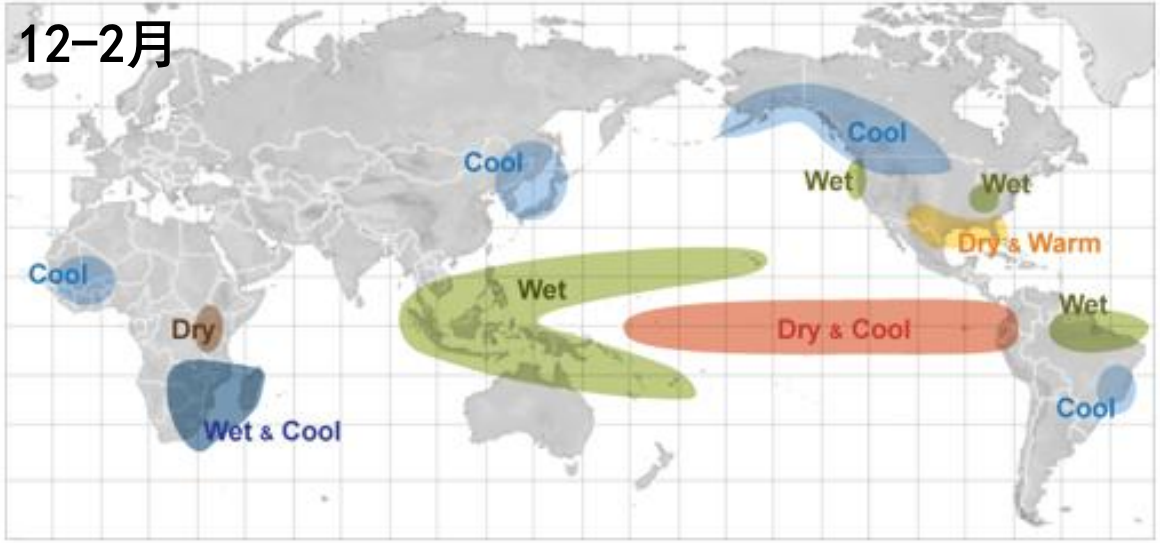
What El Niño Will do to Earth in 2024 https://www.youtube.com/watch?v=mggRl80WzbE&t=1s

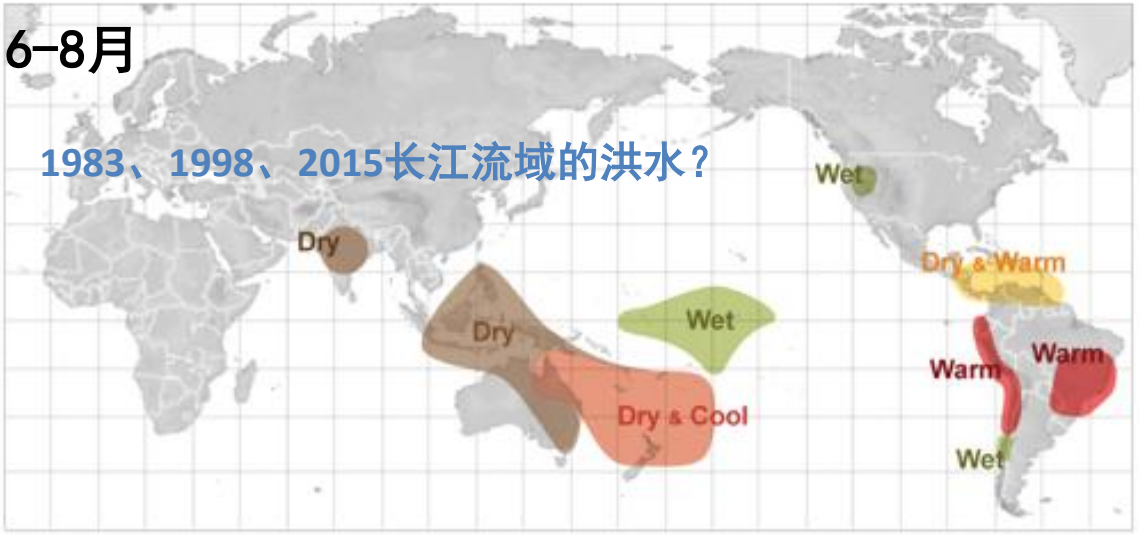
ENSO的全球影响

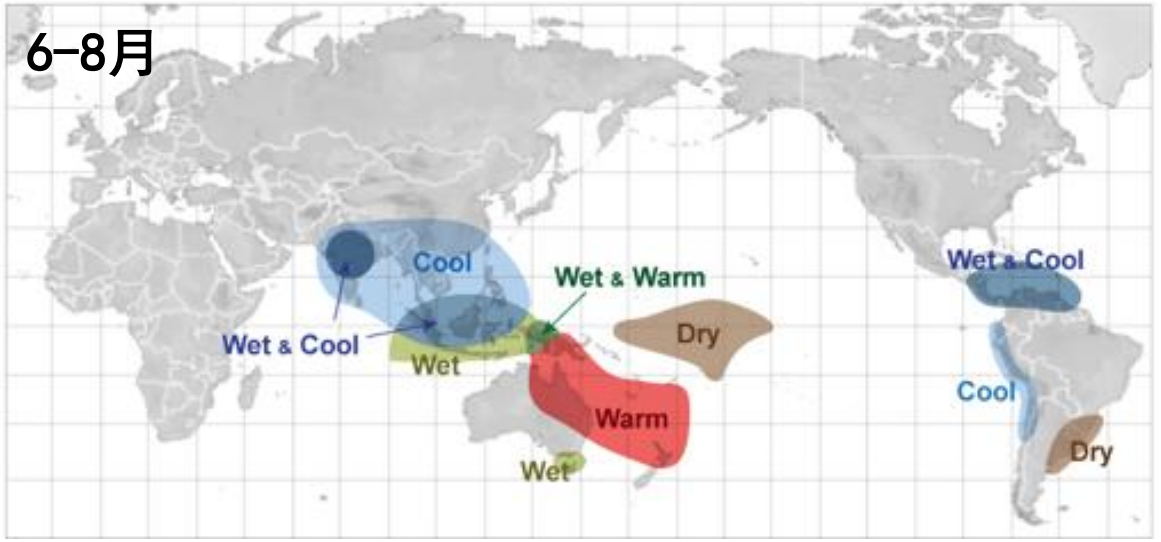
厄尔尼诺



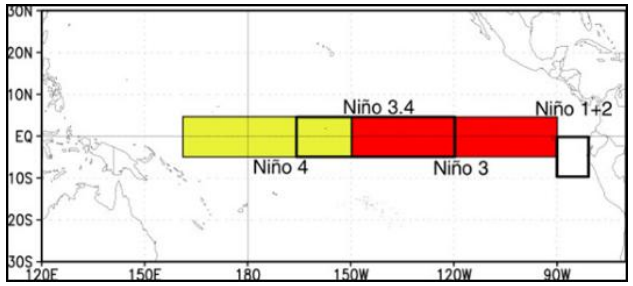
拉尼娜

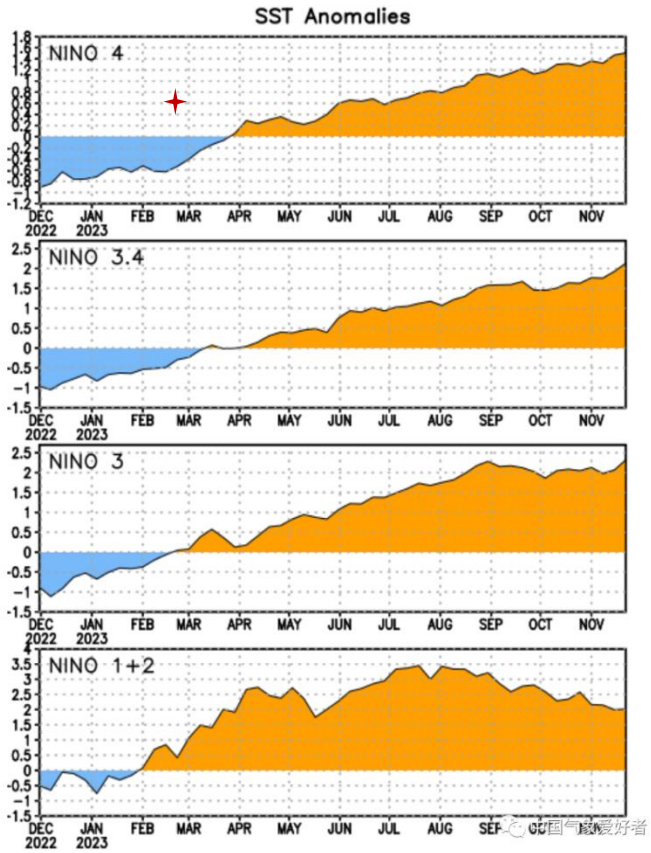




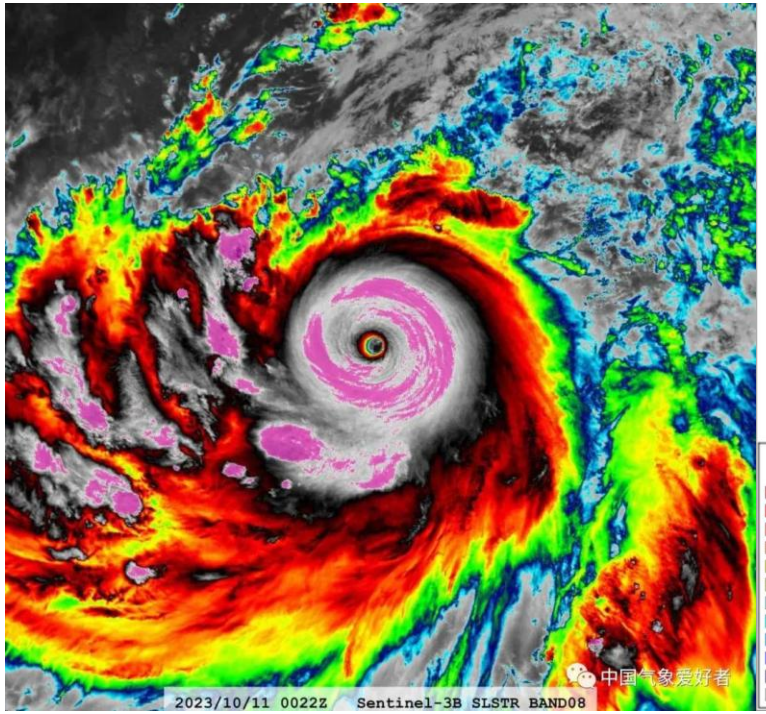


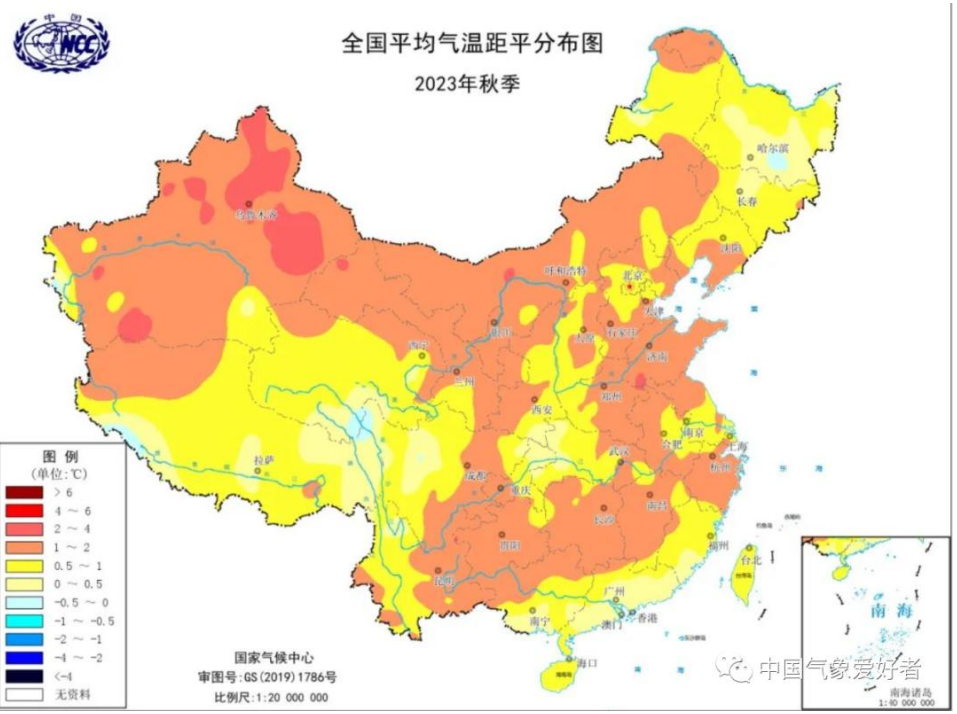
2023-2024 El Niño





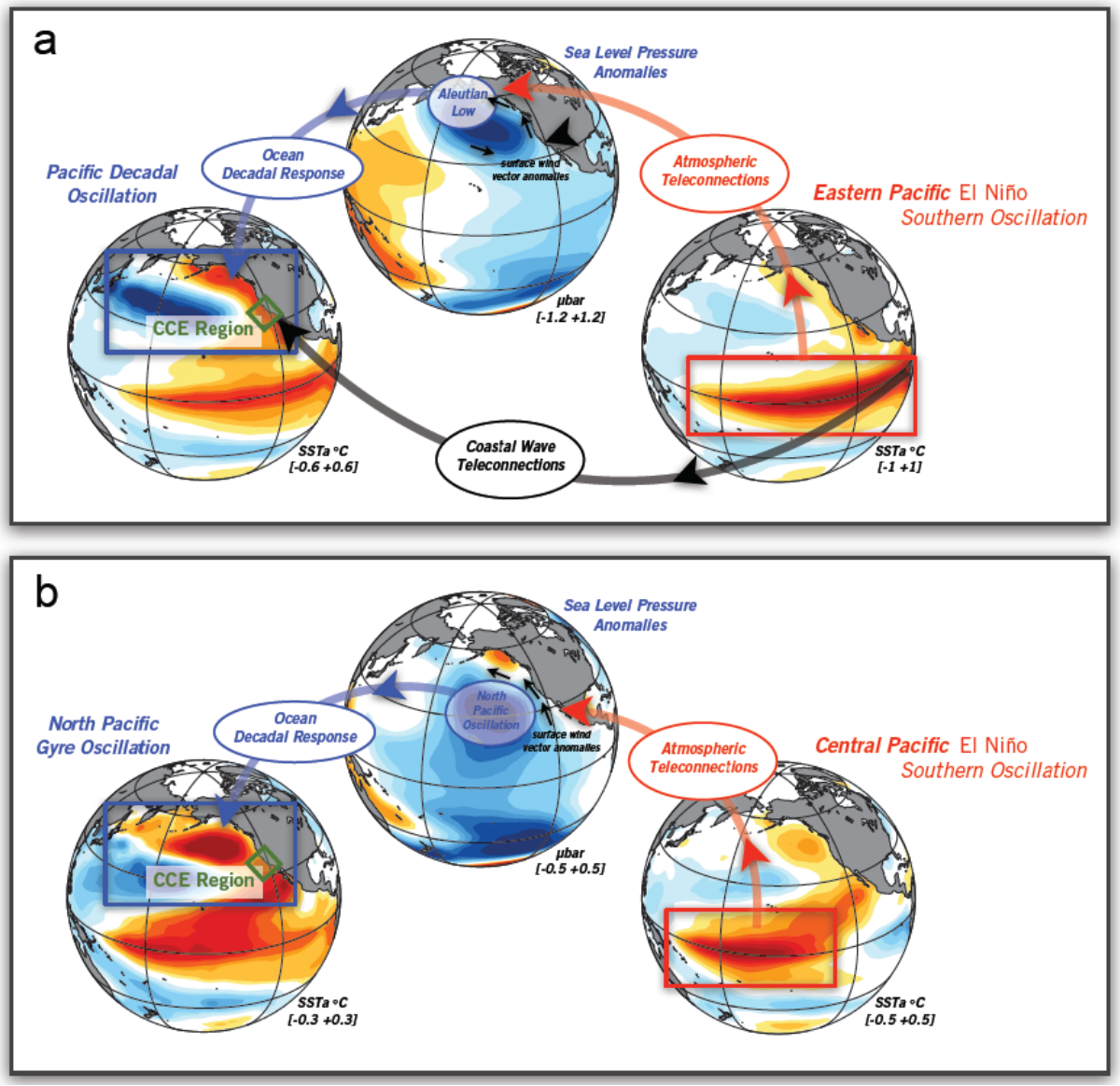
夏季：更少但更强的台风（？） 秋冬季：平均气温更高但波动更大（？）





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？

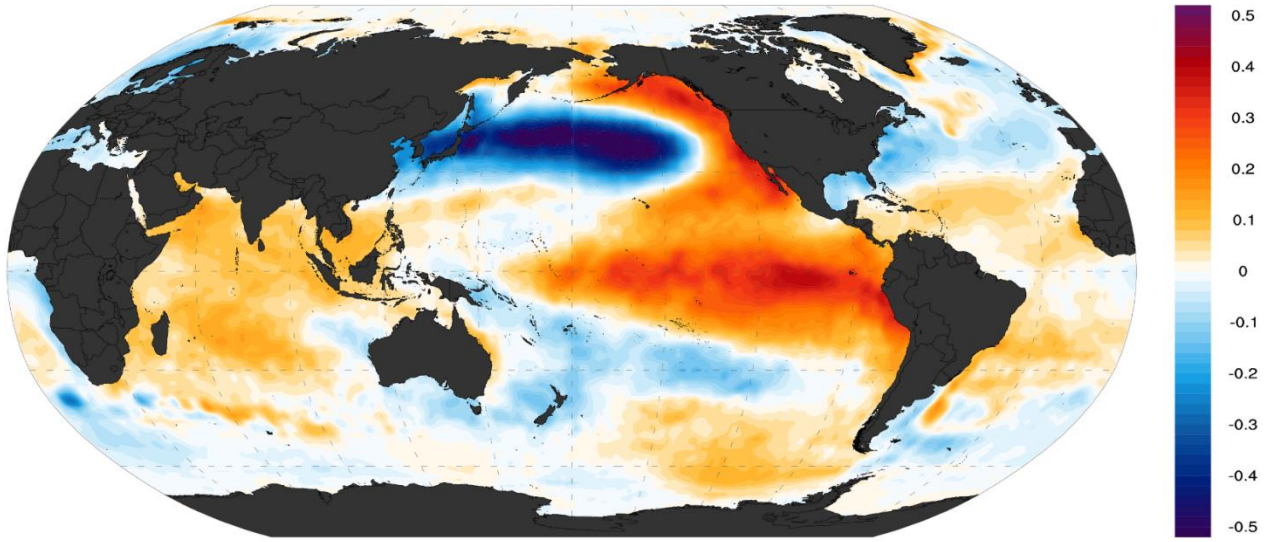


大气遥相关与ENSO的多米诺骨牌效应

- 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
- ……

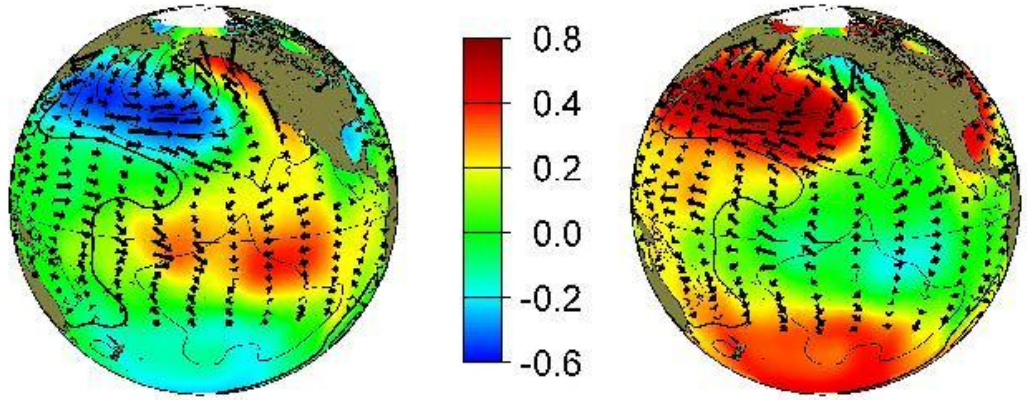
太平洋年代际震荡 Pacific Decadal Oscillation, PDO

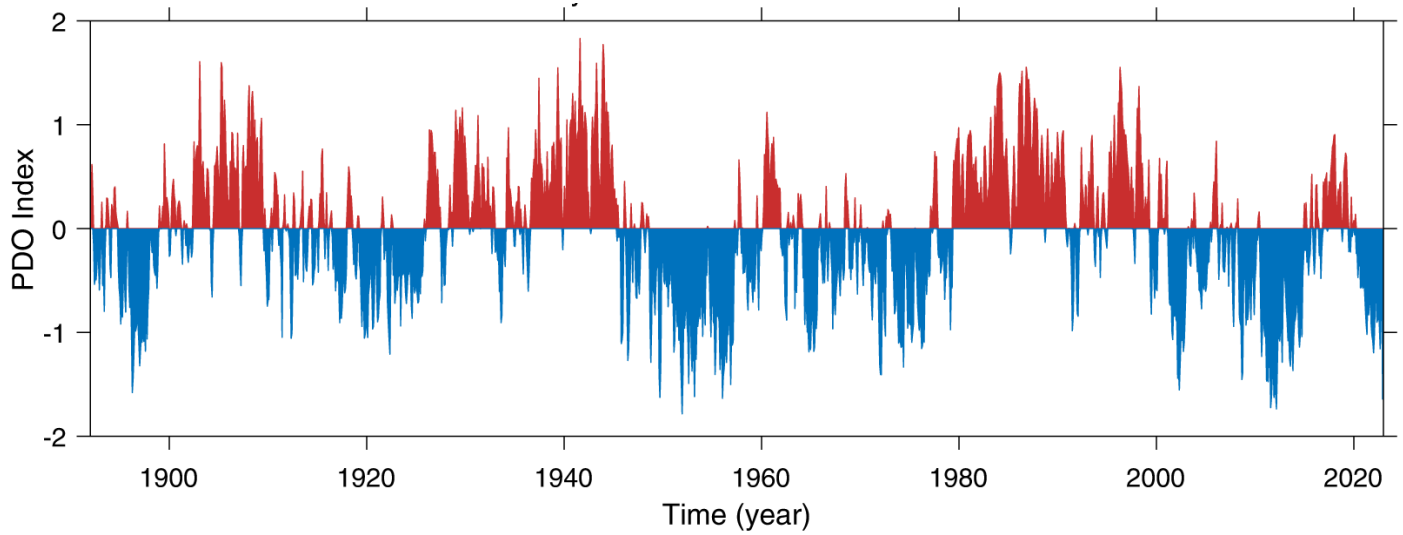
PDO正相位时的冬季海温异常



暖位相

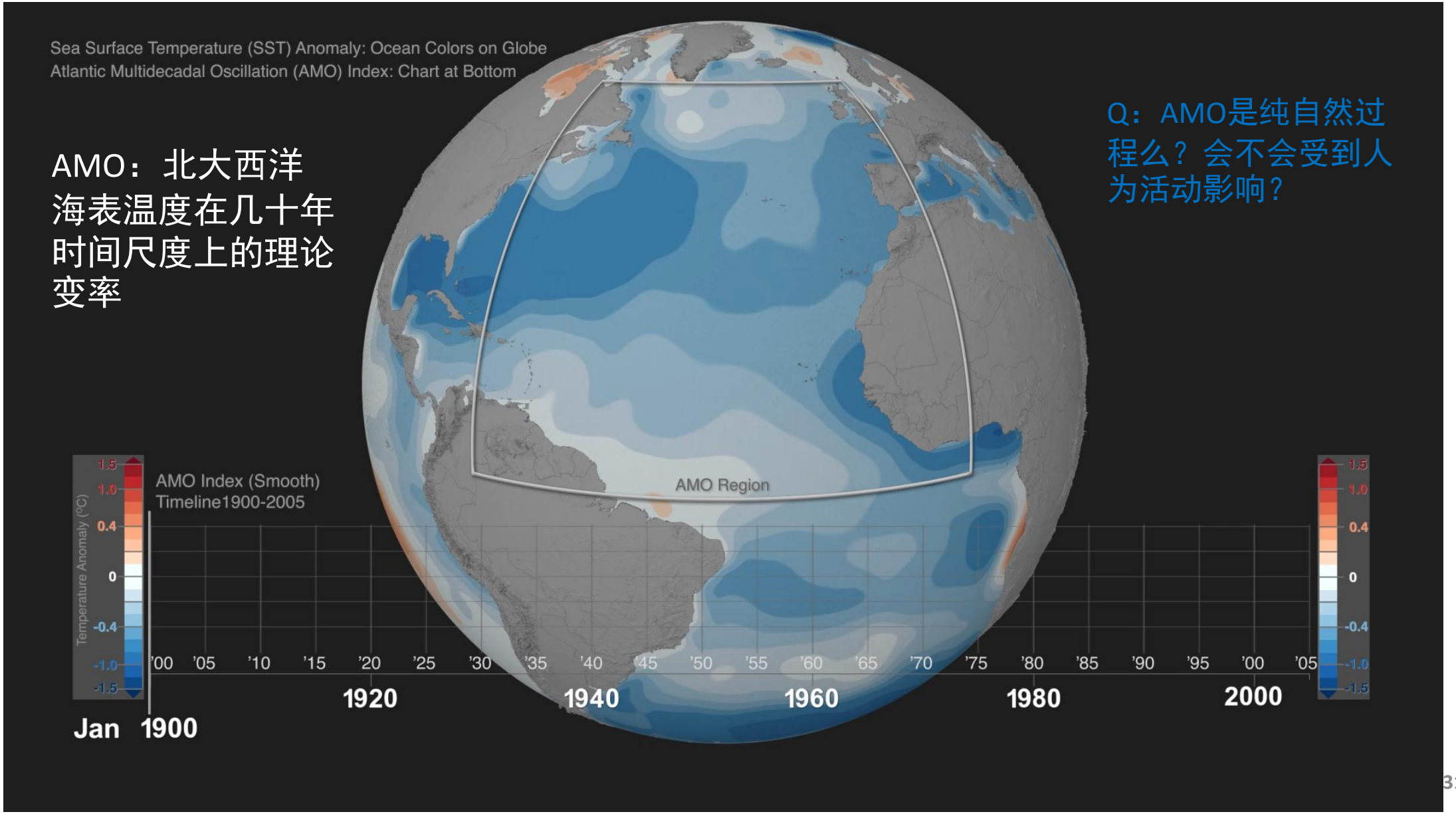
冷位相



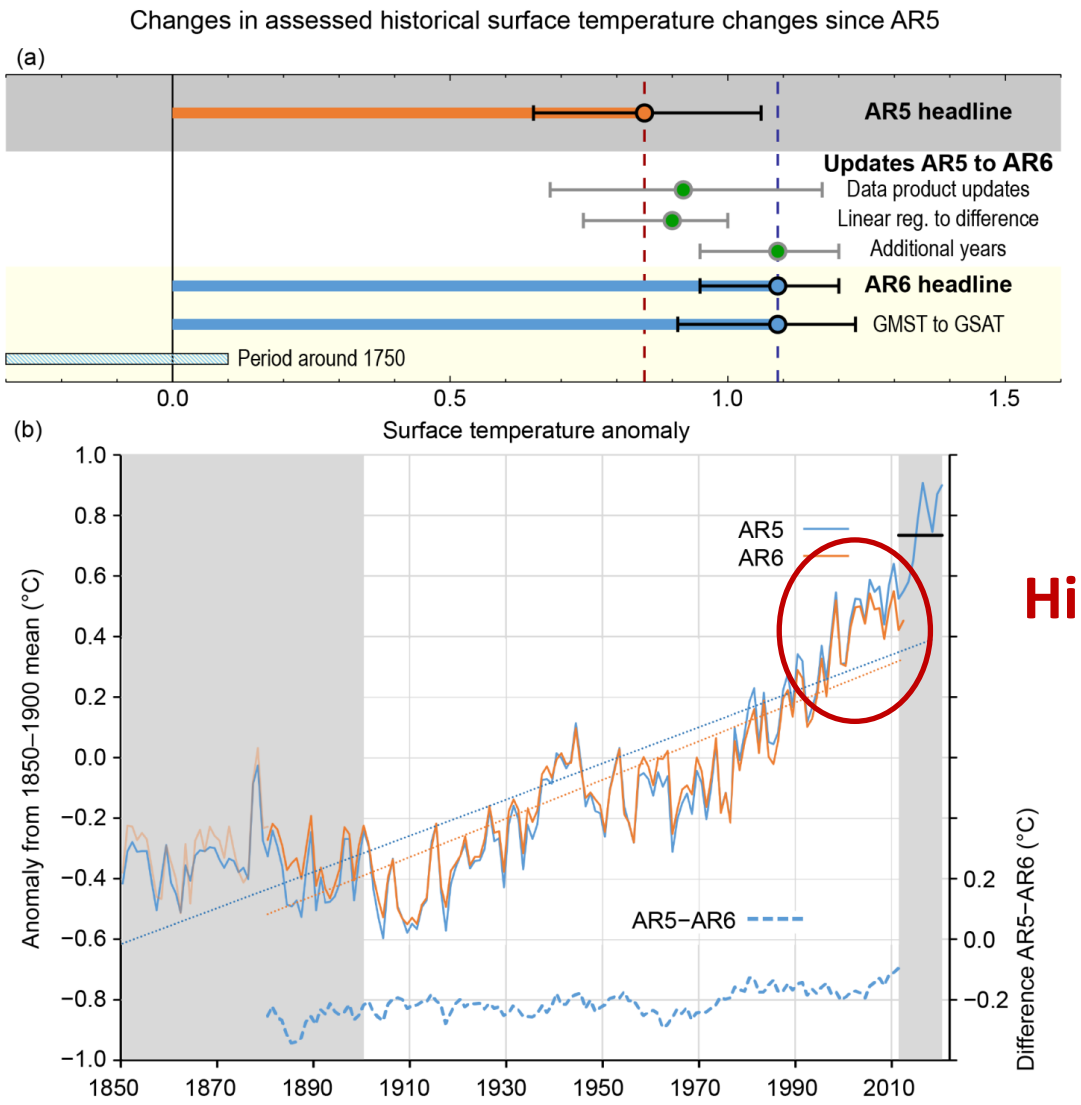


PDO指数是北太平洋（20N以北）区域月平均海表温度距平（SSTA，已减去全球平均SST）EOF第一主分量的标准化序列。

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



工业时代的气候变暖“停滞”Hiatus与海洋环流有关？



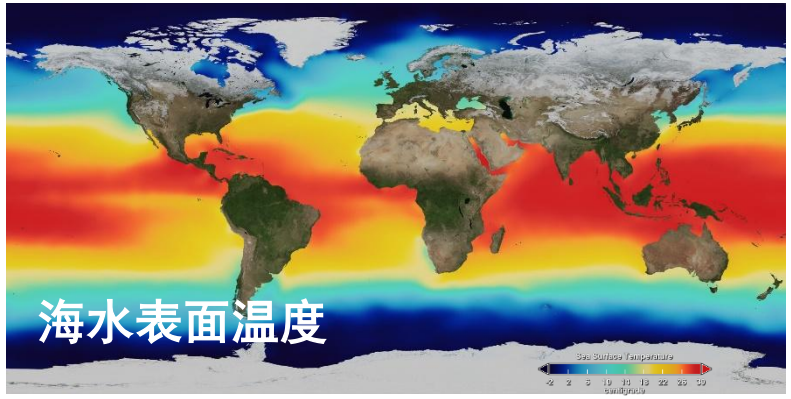
IPCC, 2021

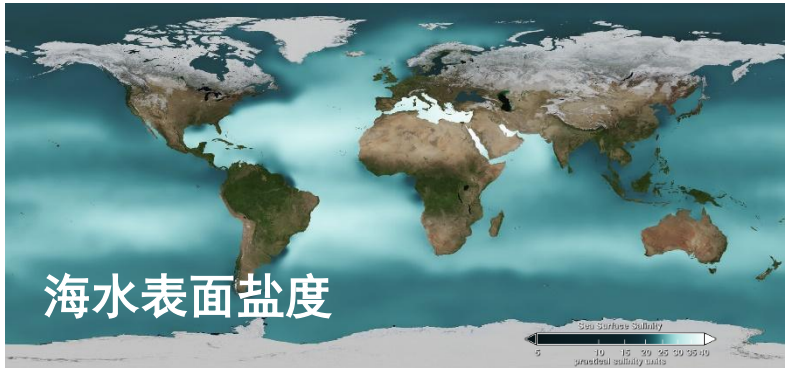
Hiatus

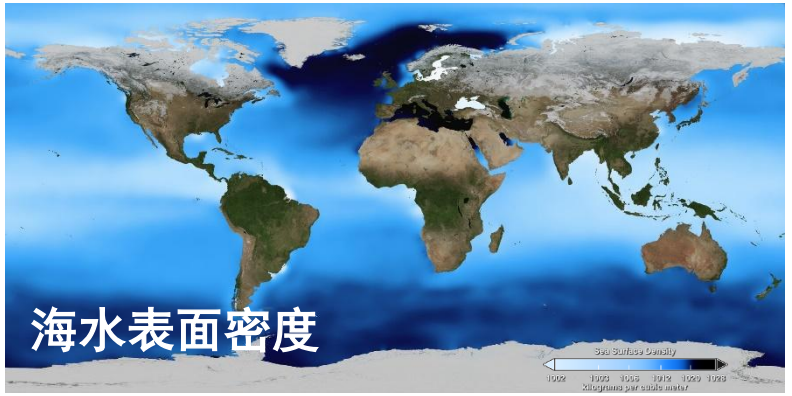
1998-2012年Hiatus原因：

- 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）？

温盐环流 Thermohaline Circulation

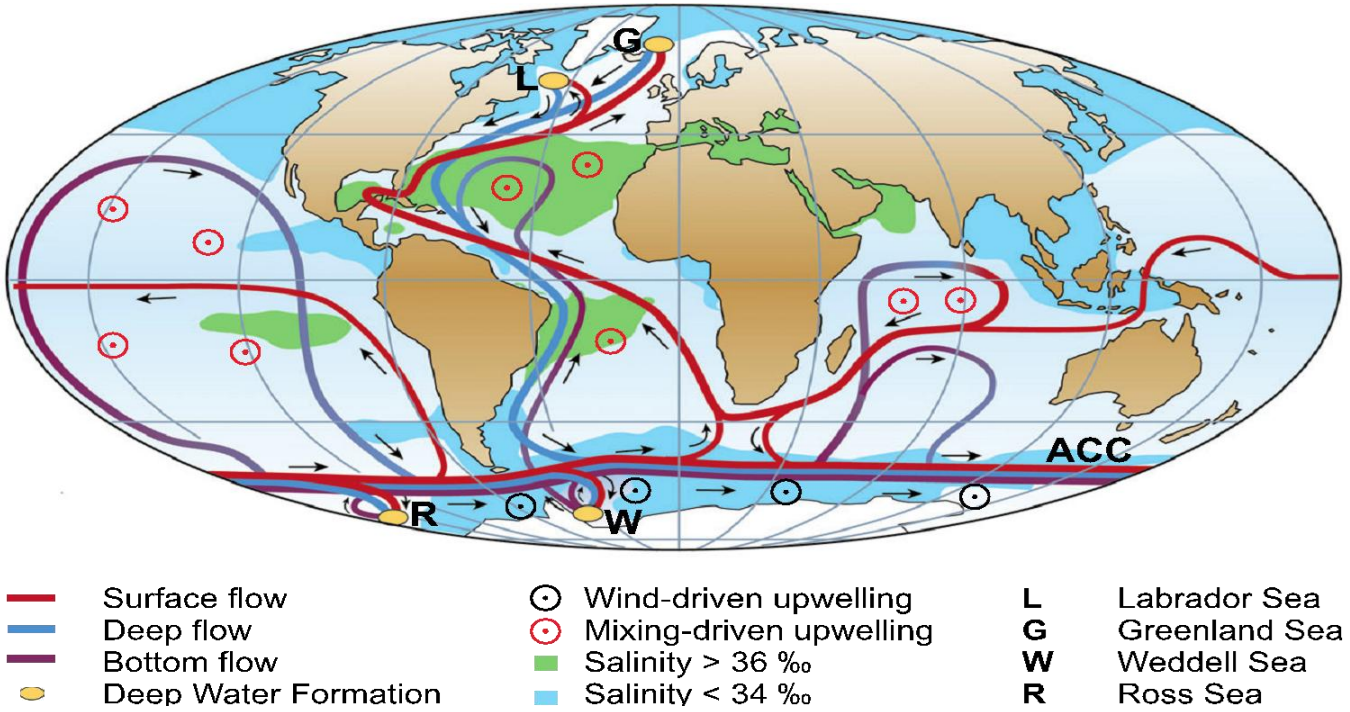


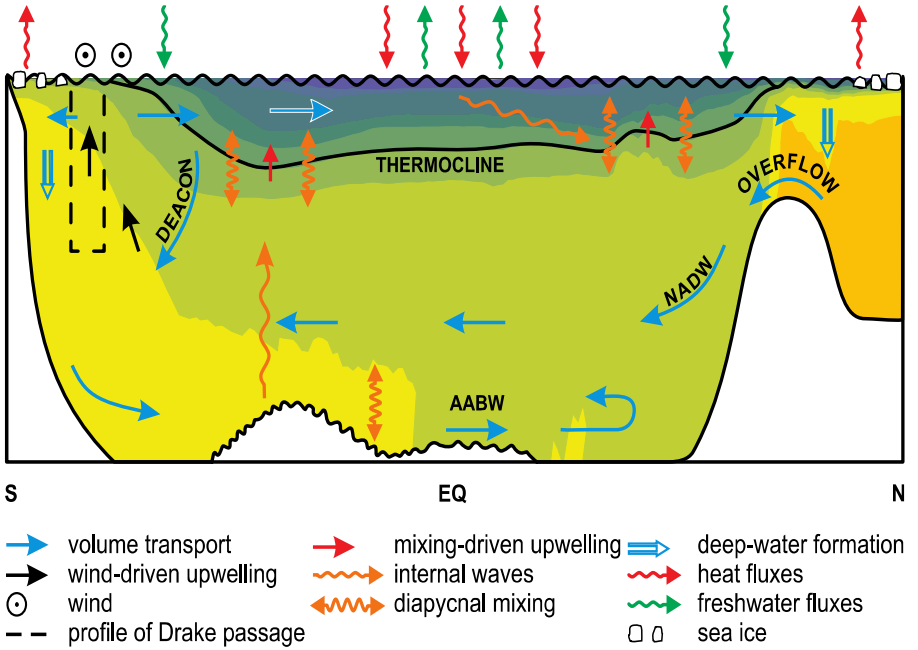




- 前面我们提到了风生洋流只达到100-300米的深度。
- 海水运动还受其层结稳定性的影响，就像大气层结不稳定时，大气会产生垂直对流运动，海水也会层结不稳定而产生对流运动。
- 决定海水层结稳定性的要素除了温度，还有盐度。温度越低、盐度越高，则海水越重。本质是密度分布和变化。
- 热带海水由于温度高，蒸发大，盐度较高。高纬度温度低，蒸发少，海水盐度低。
- 当热带温度和盐度较高的海水向高纬度运动时，随着温度的降低（盐度变化相对较小），海水密度逐渐变大，产生下沉运动，在海底流向其他地区，并进一步上升，构成闭合的环流。这一环流是由于温度和盐度的变化共同造成的，所以称为温盐环流。
- 温盐环流是全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

大西洋的温盐环流：AMOC



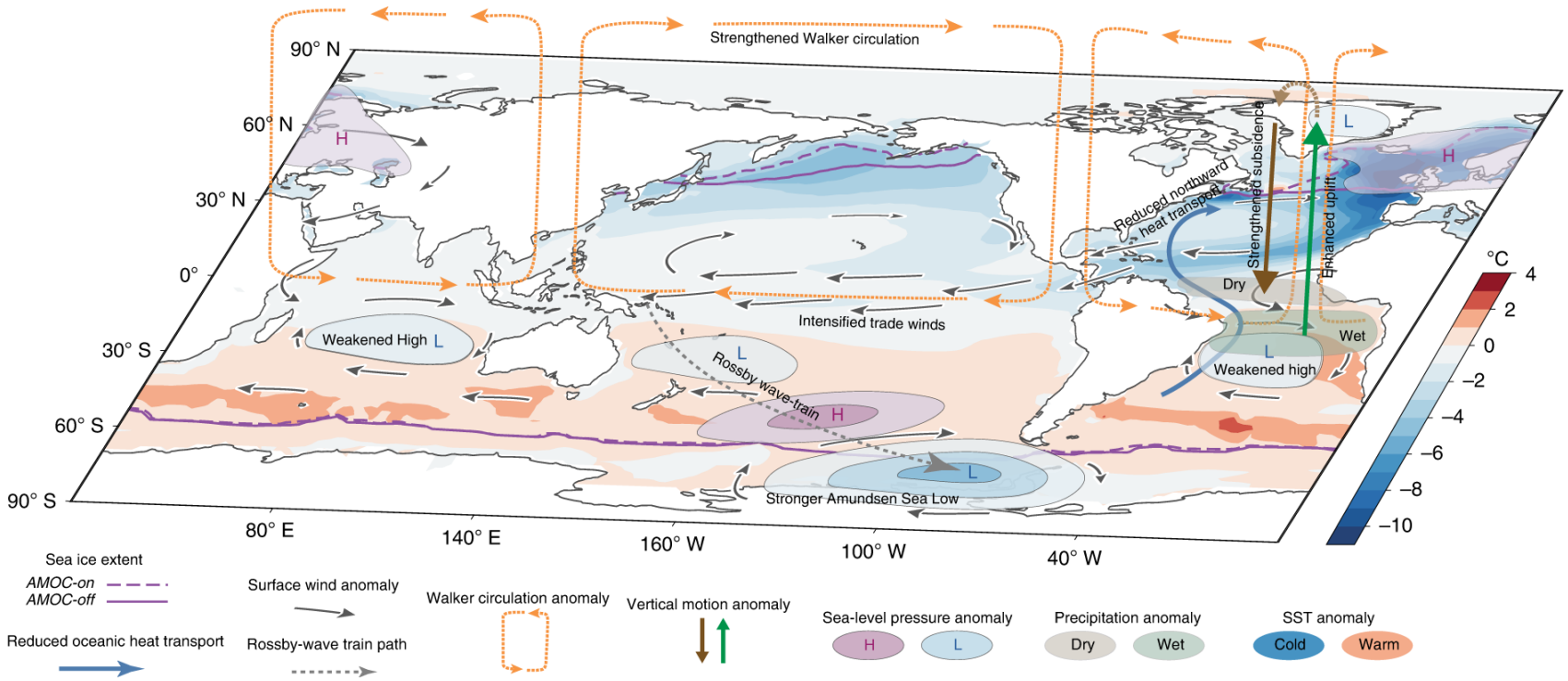


高盐度的热带海水在风的驱动下自热带向北大西洋运动，并在格陵兰岛附近下沉。

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。。。



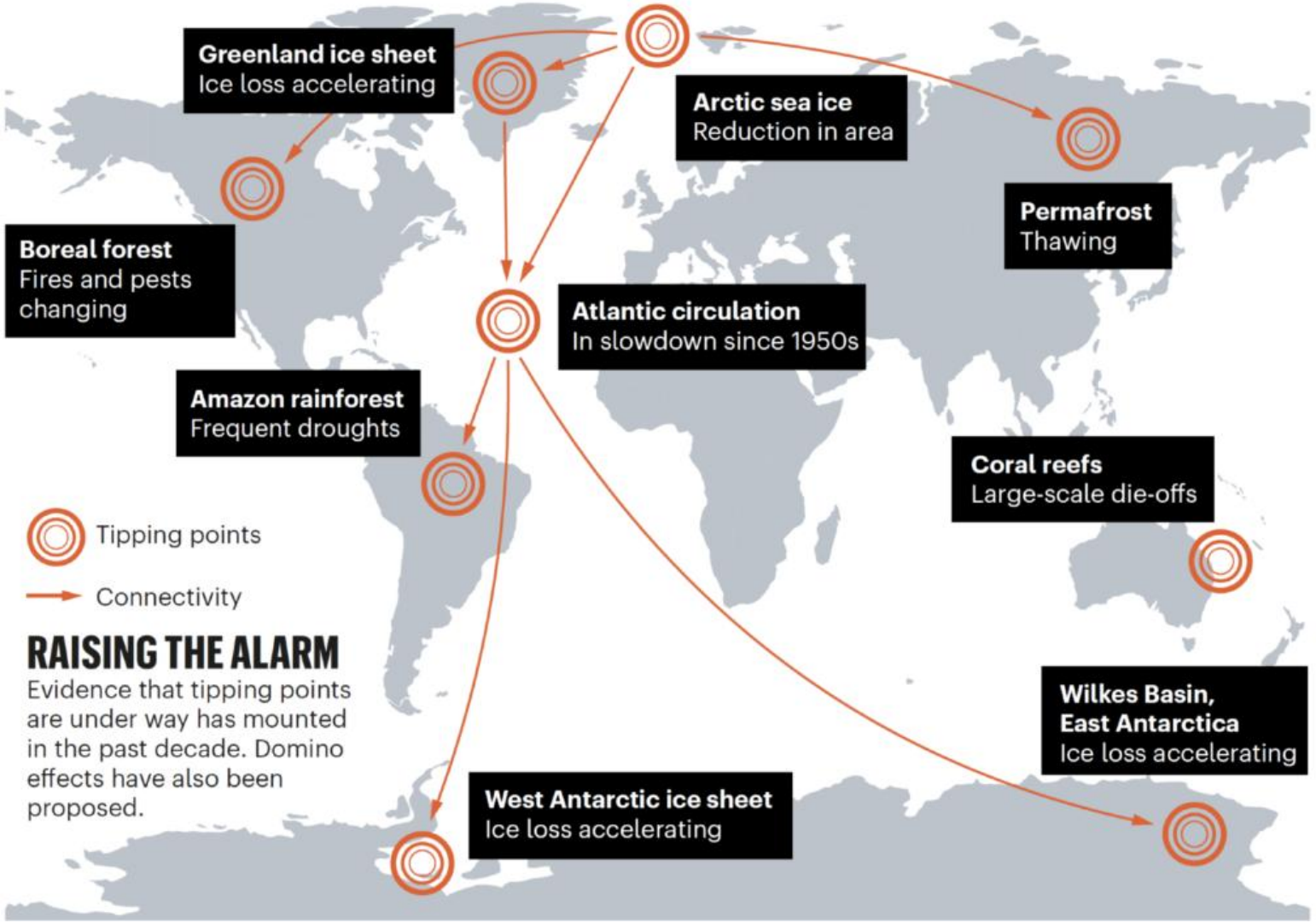


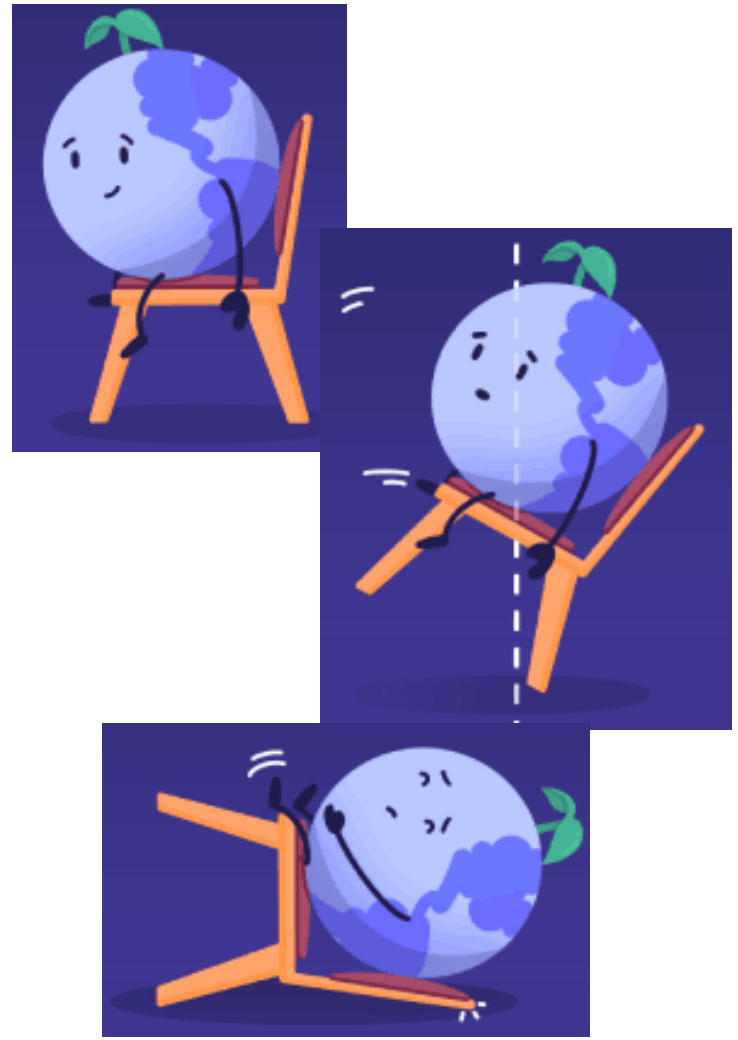
电影：后天

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。

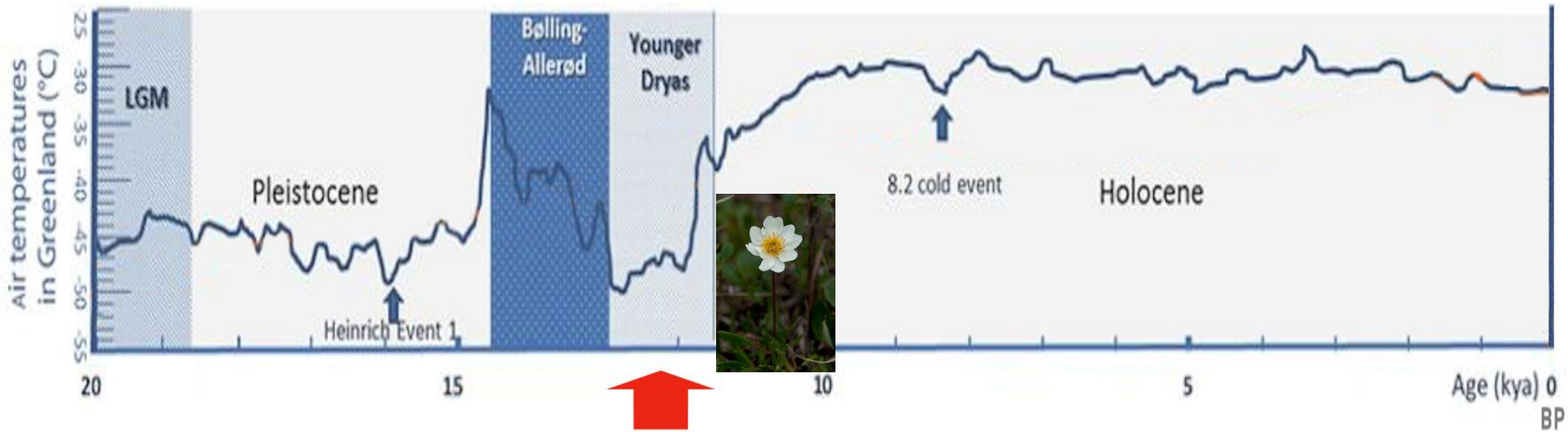
Q：为什么很多研究者认为全球变暖会导致AMOC减弱？这个数值模拟试验怎么做？

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 = 2026年6月9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：

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

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

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

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

假设对于加州(北纬35度) 的沿岸风，u = 0，v = -10 m s^{-1}，艾克曼理论适用于沿岸宽度（即从岸边到海中的距离）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？