

海洋气象学：大气与海洋等相关专业本科生选修课

Marine Meteorology: A undergraduate course majored in oceanography, atmosphere and other related subjects

第四章：海洋环流

Chapter 04: Ocean circulation

杨海军 (YANG Haijun) , 周震强 (ZHOU Zhenqiang)

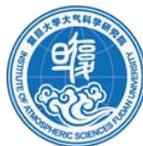
复旦大学大气与海洋科学系

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University

Email: yanghj@fudan.edu.cn, zqzhou@fudan.edu.cn



復旦大學 大气与海洋科学系
DEPARTMENT OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCES
FUDAN UNIVERSITY



復旦大學 大气科学研究院
INSTITUTE OF ATMOSPHERIC SCIENCES
FUDAN UNIVERSITY

This powerpoint was prepared for purposes of this lecture and course only. It contains graphics from copyrighted books, journals and other products. Please do not use without acknowledgment of these sources.

内容提要

第一节 什么是海流？

第二节 海洋上层环流基本特征

第三节 太平洋环流系统

第四节 大西洋环流系统

第五节 印度洋环流系统

第一节 什么是海流

- **海流**：指海水相对稳定速度的流动，是海水主要运动形式之一。
- **流速**：单位常用Kn（节）和mile/d(海里/日)表示。1节=1海里/小时；1海里=1.85公里
- **流向**：海流的方向是指去向，例如由西向东的流动，称为东向流。海流主轴是指海流流动方向上流速最大点的连线。海流规模常用流幅来表示，流幅是指垂于主轴的水平宽度和上下厚度。海流强度常用平均流速或平均流量表示。

海流

海流是指海水大规模相对稳定的流动。海洋的海水几乎都在运动状态中，但深海海盆之周围被海槛所包围，其底层的海水可能不动外，其它的海水都在缓慢的移动着，有些地方可能高过陆地上河川的流速，这种大致上循着一定方向流动的海水，称之为海流或洋流。海洋环流一般是指海域中的海流形成首尾相接的相对独立的环流系统。就整个世界大洋而言，海洋环流的时空变化是连续的，它把世界大洋联系在一起，使世界大洋的各种水文、化学要素及其温度和盐度状况得以保持长期相对稳定。

海流

1. “大规模”是指它的空间尺度大，具有数百、数千千米甚至全球范围的流动；
2. “相对稳定”是指在较长的时间内，其流动方向、速率和流动路径大致不变。
3. 海流一般是三维的，即不但水平方向流动，而且在垂直方向上也存在流动。由于海洋的水平尺度(数百至数千千米甚至上万千米)远远大于其垂直尺度，水平流动远比垂直流动强得多。但是尽管后者相当微弱，它在海洋学中却有其特殊的重要性。习惯上常把海流的水平运动分量狭义地称为海流，而其垂直分量称为上升流和下降流。

海流

- 海洋的运动特征：存在多种时空尺度的运动，短时间内的运动毫无规律。
- 海洋环流：通常是指海洋中平均的气候式(准)定常运动。
- 时间尺度：通常超过1个月
- 空间尺度：通常超过100公里
- 速度：水平速度通常1-5cm/s(非常缓慢)，垂直运动 10^{-4} cm/s

上层海洋风生环流

Upper layer circulation-----Wind driven; Time scale-----year to decade

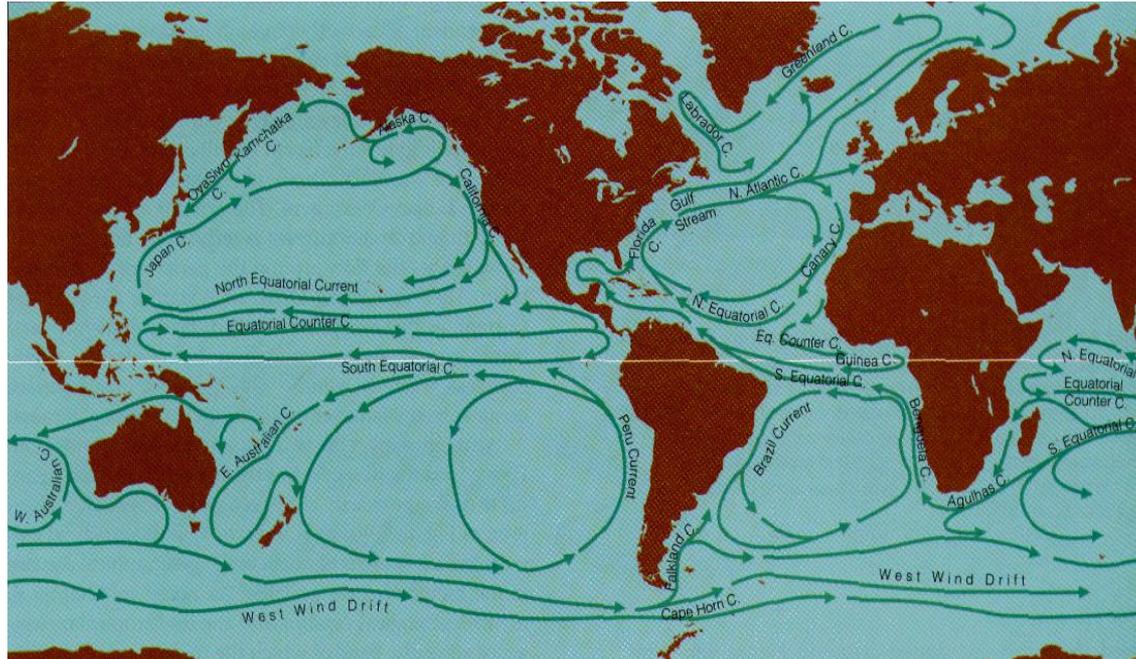
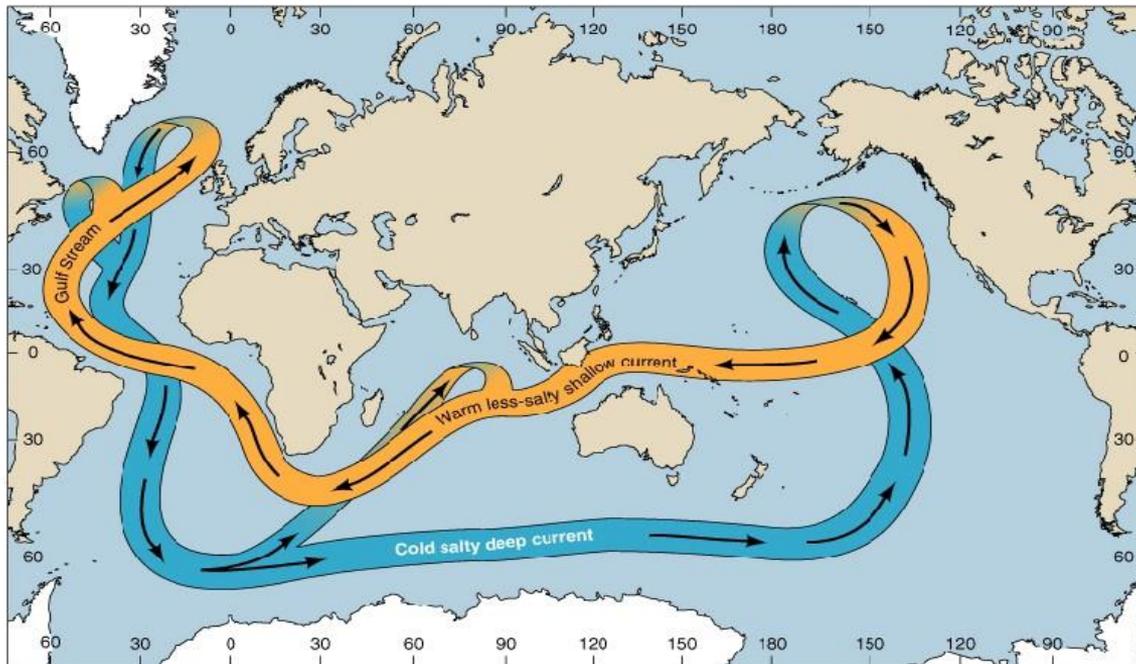


Figure 9.8 Major surface currents of the world ocean.

海洋热盐环流

Deep ocean circulation---Thermal driven; Time scale---hundred to thousand years



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

海洋环流的驱动力

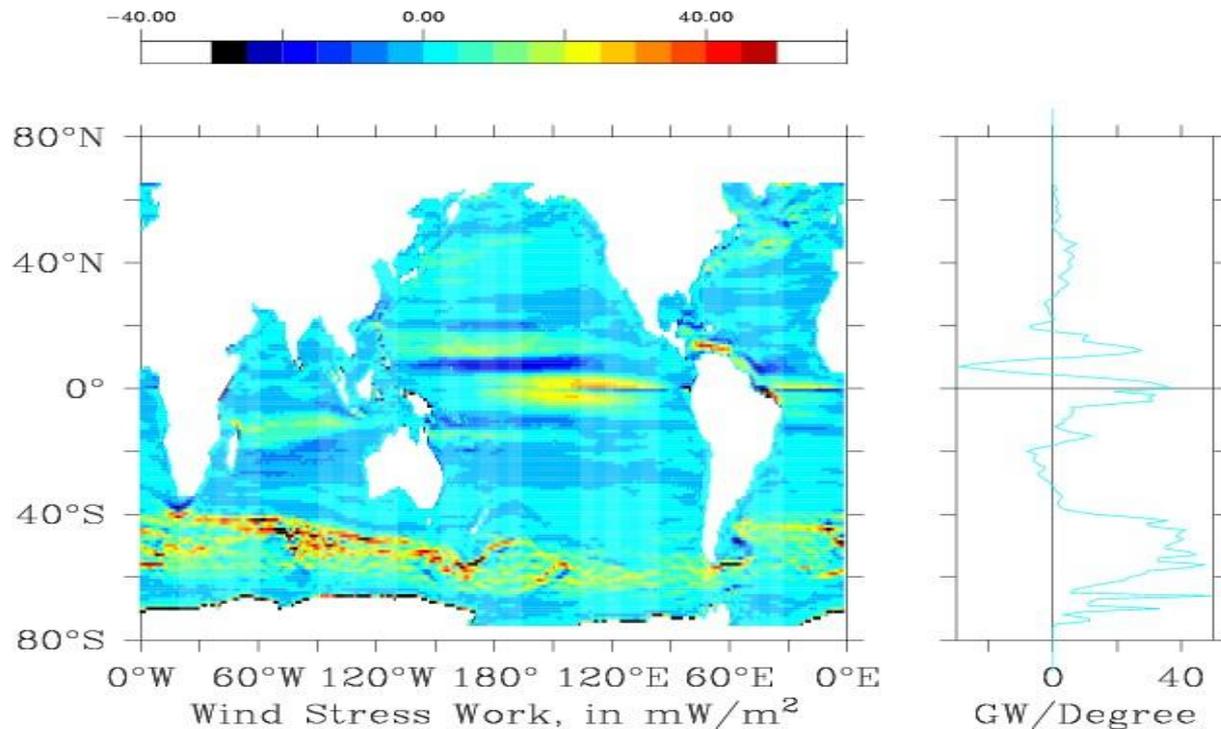
- 风应力 — 风生环流
- 浮力 — 热盐环流：热通量、蒸发及降水、淡水输入等
- 天体引力 — 潮或某些周期性运动
- 影响和产生海流的力

引起海水运动的力：重力，压强梯度力，风应力，引潮力

海水运动后派生的力：科氏力，摩擦力

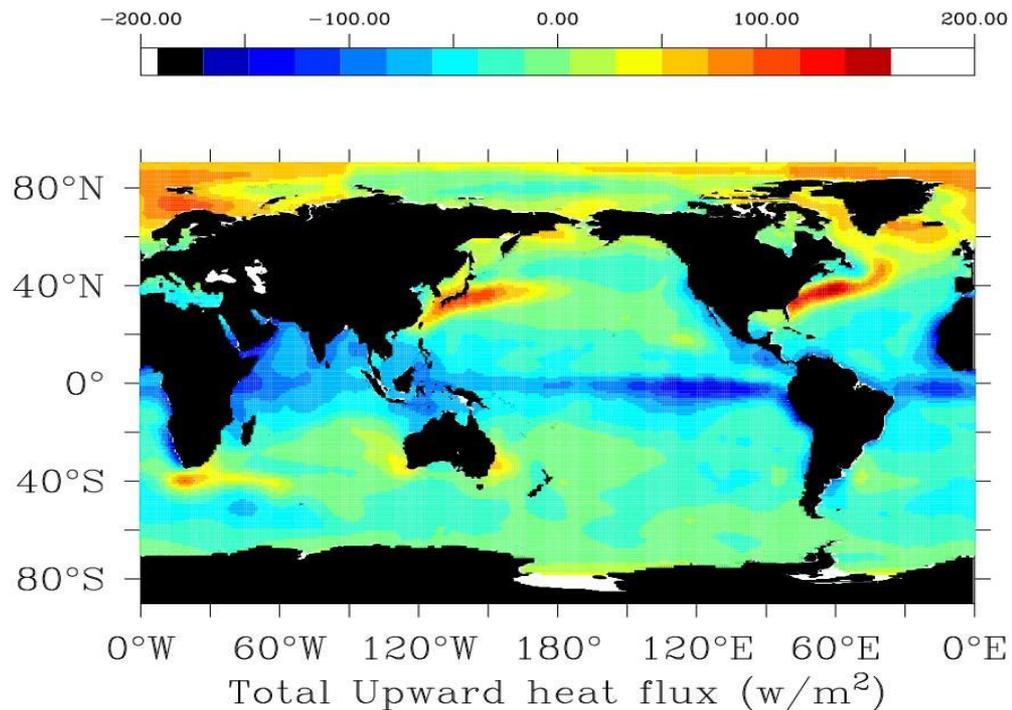
风应力能量输入

Wind stress energy input to the geostrophic current (Wunsch, 1998)

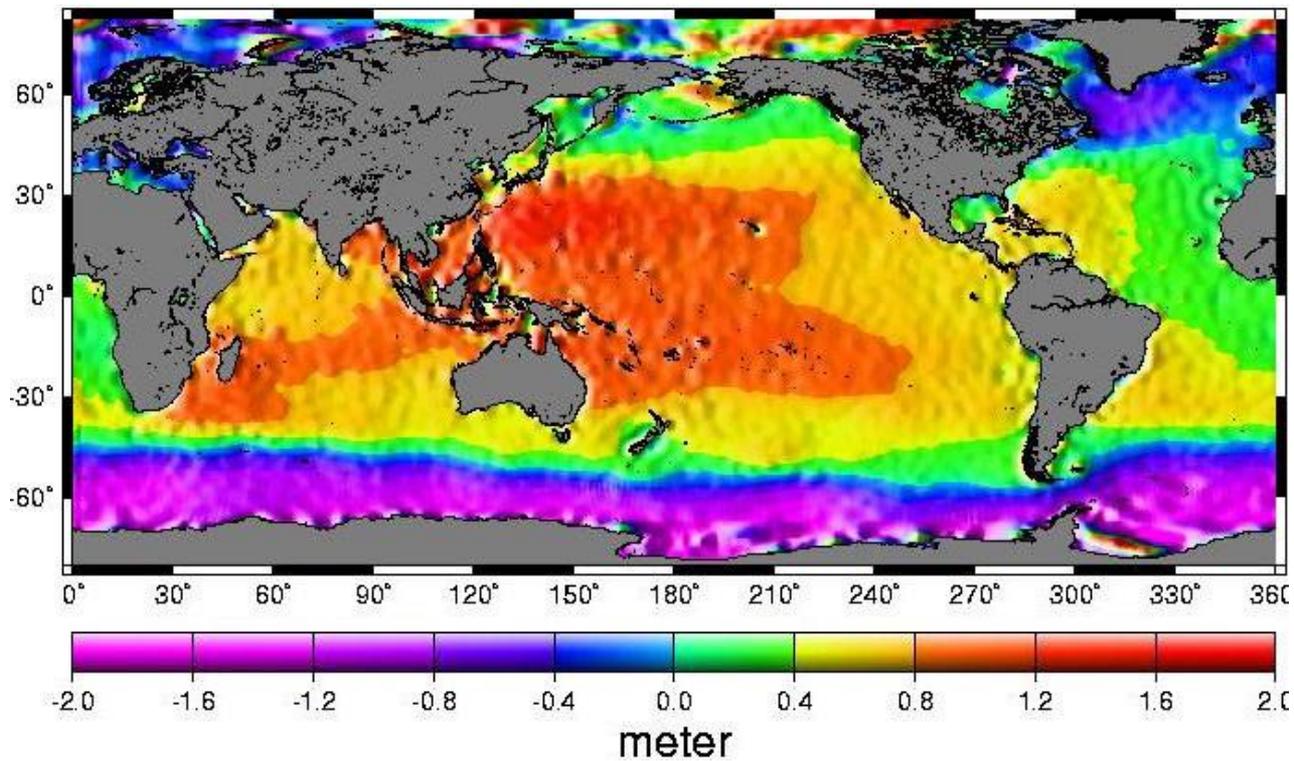


热量通量能量输入

Total annual-mean air-sea heat flux



海面高度



受力分析

1. 重力：地心引力与地球自转产生的惯性离心力的合力。习惯上将单位质量物体所受重力称为重力加速度，以 g 表示。与纬度和海水深度有关：海面上赤道到极地差为 0.052m/平方米 ，在中纬度，海面与 10km 深处的差为 0.031m/平方米 。因此，在海洋研究中，一般视其为常数 9.8m/平方米
- 重力势：从一水平面逆重力方向移动物体到另一高度所做功。
 - 等势面：位势相等的面叫等势面。处处与重力垂直的面称水平面。
 - 海平面：海洋表面的平均位置。

受力分析

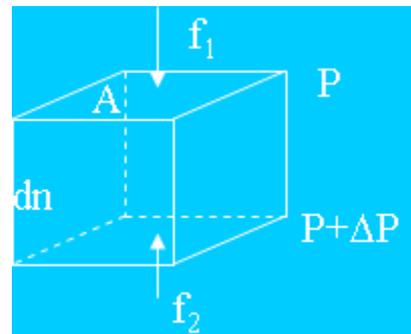
1. 压强梯度力:

- 等压面：压强相等的面。
- 单位质量水体所受的静压力的合力:

$$f/(\rho \cdot dn \cdot A) = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{dn} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dn}$$

- 与等压面垂直，指向压力减小的方向。即与压强梯度方向相反。
- 流体静力学方程:

$$g = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz}$$



受力分析

- 正压场：等压面与等势面平行
- 斜压场：等压面相对等势面发生倾斜时。
- 海洋内压场：由海洋中密度差异形成的斜压状态。在海洋上部斜压性很强。
- 外压场：外部原因（风、降水、江河径流）引起海面倾斜产生的压力场。

3. 风应力：切应力，将大气动量输送给海水，目前只能以经验公式给出

4. 科氏力：

$\vec{F} = -2\vec{\Omega} \times \vec{V}$ 为科氏力

$f = 2\Omega \sin \varphi$ 称其为科氏参量

$$\left. \begin{aligned} F_x &= 2\Omega \sin \varphi \cdot v - 2\Omega \cos \varphi \cdot w \\ F_y &= -2\Omega \sin \varphi \cdot u \\ F_z &= 2\Omega \cos \varphi \cdot u \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} F_x &= 2\Omega \sin \varphi \cdot v \\ F_y &= -2\Omega \sin \varphi \cdot u \\ F_z &= 0 \end{aligned} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} F_x &= f \cdot v \\ F_y &= -f \cdot u \\ F_z &= 0 \end{aligned} \right.$$

5. 摩擦力：分子粘性力和湍流粘性力

运动方程：牛顿第二定律 $f = ma$

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \sum \vec{F}$$

连续方程：质量守恒定律在流体中的应用

$$dp/dt + \rho \nabla \cdot u = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

海洋运动时空尺度

	L 长度尺度	U水平速度尺度	T 时间尺度
大气: 海陆风	5-50km	1-10m/s	12h
天气过程	100-5000km	1-50m/s	Day-week
盛行风	全球尺度	5-50m/s	季-年
气候	全球尺度	1-50m/s	十年以上
海洋: 内波	1-20km	0.05-0.5m/s	分-小时
上升流	1-10km	0.1-1m/s	几天
大涡和锋面	10-200km	0.1-1m/s	天-周
主要流	10-1000km	0.1-2m/s	周-季
大尺度环流	海盆尺度	0.01-0.1m/s	十年以上

海洋大尺度运动

- 运动空间尺度很大，基本在100km以上。
- 运动时间尺度很长，一般在1个月以上，远远的大于地球自转的时间尺度。
- **物理意义：**流体相对运动的时间尺度远大于地球自转周期，运动过程中地球自转的效应能够被感觉到，即科氏力的作用能被感觉到。

正压与斜压

- 正压海洋：等密度面和等压力面平行

$$\nabla \rho \times \nabla p = 0$$

- 斜压海洋：等密度面和等压力面不平行

$$\nabla \rho \times \nabla p \neq 0$$

正压与斜压

一般情况下的定义

- 正压海洋：海水的密度（温度）看成是常数（均质流体）
- 斜压海洋：海水的密度（温度）不是常数
- 实际的海洋是斜压的，然而正压近似可以简化物理问题，同时能对海洋的运动做出初步的合理解释，因而被大家所接受。
- 本课程主要讲述正压海洋

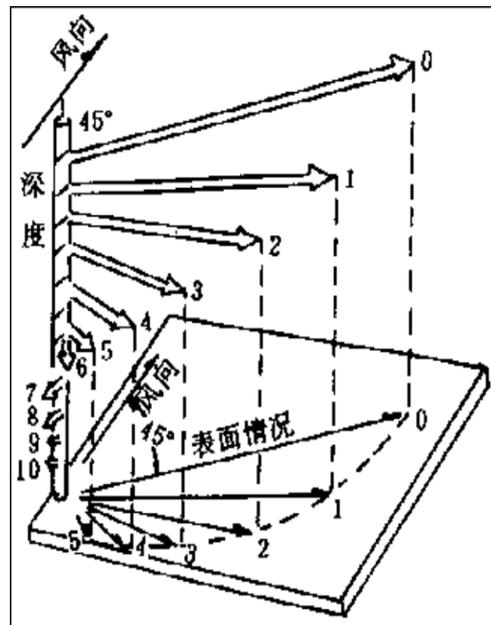
海流分类

1. **地转流 (Geotropic Current)**：海水等压面倾斜，海水受到水平压强梯度力和水平地转偏向力平衡时出现的稳定流动。据引起等压面倾斜的原因不同，可分为：
 - a) 倾斜流：是在不均匀的外压场作用下的地转流。海洋上大气压分布不均匀，使海面发生倾斜而产生海水的流动。测者背流而立，右侧等压面高，左侧等压面低。倾斜度越大，水平压力梯度越大，流速就越大。（正压）
 - b) 密度流：由于海水中的密度不均匀而产生的地转海流，又称梯度流。如非洲红海蒸发大，盐度高密度大，产生由红海流向印度洋的海流。背流而立，右侧等压面高，密度小；左侧等压面低，密度大。

海流分类

2. Ekman流：是海洋上最主要的海流，其强度较强。风海流是在海面风作用下形成的海水流动。通常将大范围盛行风所引起的流向、流速常年都比较稳定的风海流称为定海流，或漂流。而将某一短期天气过程或阵风形成的海流称为风生流。

- 表层风海流方向：在无限深海中，由于地转偏向力作用，表层风海流的流向在北半球偏于风去向之右约 45° ，在南半球偏于风去向之左约 45° 。
- 在浅海中，流向与风向几乎一致。
- 风海流流向随深度增加向右偏转（北半球），流速随深度增加逐渐减小（见图）。

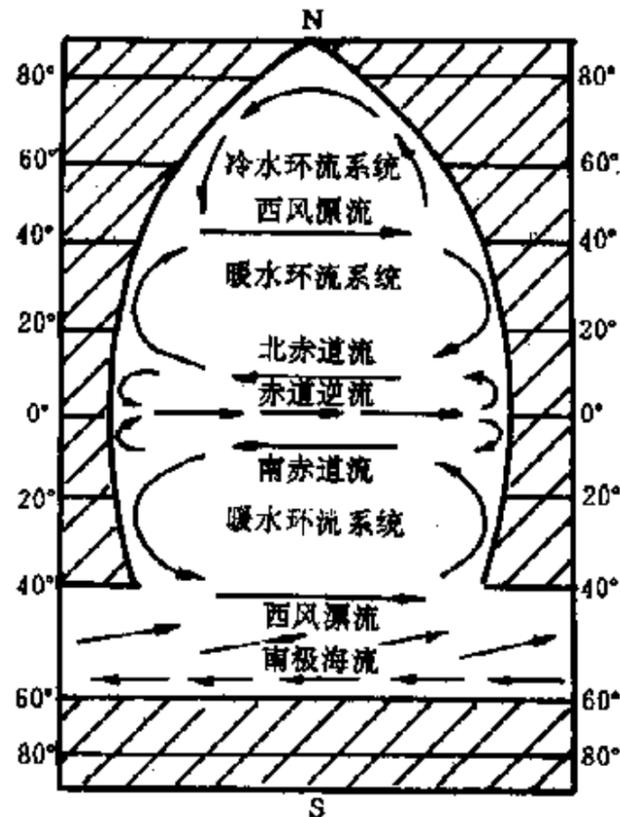


按海流的物理属性(温度)分类

- I. 暖流：流动水团的温度比它所经过海区的水温高称暖流。一般从低纬向高纬流动的海流为暖流。
- II. 冷流：流动水团的温度比它所经过海区的水温低称冷流。一般从高纬向低纬流动的海流为冷流。
- III. 中性流：流动水团的温度比它所经过海区的水温相差不大称中性流，一般东西向的流。

大洋上层海流

1. 信风流和赤道逆流：在赤道区有一支从东向西的海流，即北赤道海流(NEC)和南赤道海流(SEC)，南北赤道海流之间有一支从西向东的赤道逆流。
2. 西边界流和西风漂流：在西风带中，海流基本上自西向东流，西边界流大多来自热带洋面，水温高，流速大，是较强的暖流。在南半球三大洋的西风海流彼此沟通，形成一个连续水环。又称西风漂流。



大洋上层海流

3. 东边界流：大洋东岸的沿岸流。东边界流流动缓慢，幅度宽广具有寒流性质。
4. 大洋两岸的海流在强度上不对称，大洋西边界的海流比东边界的海流窄而强。如墨西哥湾流和黑潮均为强海流。
5. 南极海流：在南极因陆地少，三大洋在西风带里相互连接，西风强劲，相应而形成的自西向东的西风漂流；在南极大陆周围存在受极地东风影响而产生的自东向西的流动，这种海流常被南极岸形和其它因素影响而发生的地方性海流所切断。

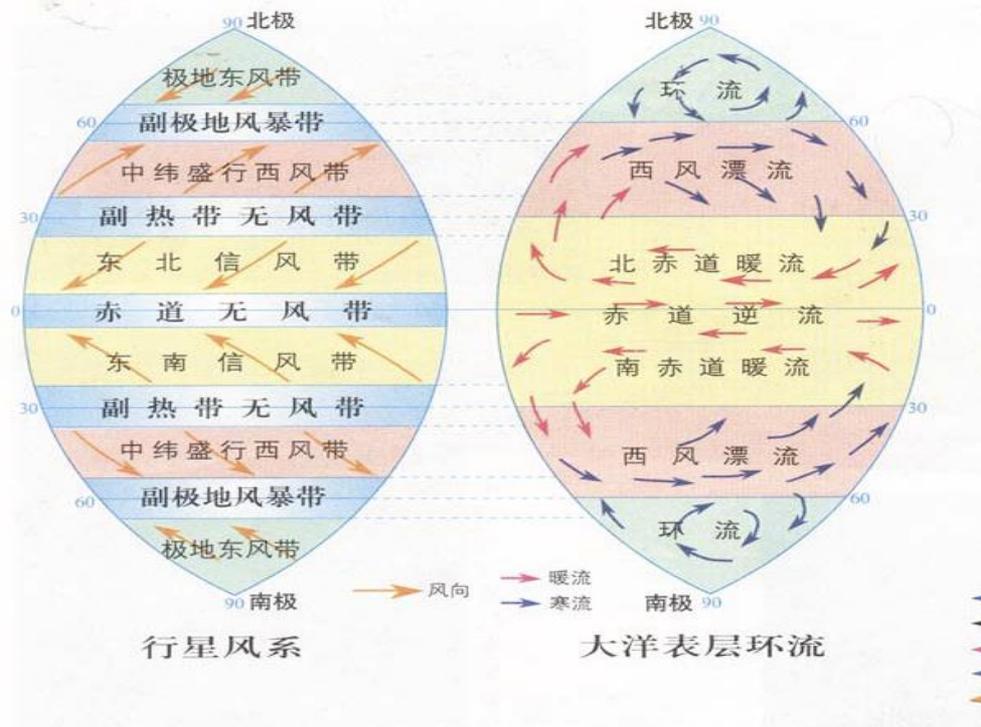
第二节 海洋上层环流基本特征

什么是“上层海洋”？

- 混合层或温跃层以上，水深浅于数百米的海域，皆可称为上层。
- 一般来说，表层海水是从表面开始算起，温度随深度变化很小的深度为止，可能有300~1000米的深度，整层海洋包括了50~200米的混合表层、混合层下方密度分层明显的海水、以及深层海水。
- 上层海洋的环流主要是风驱动

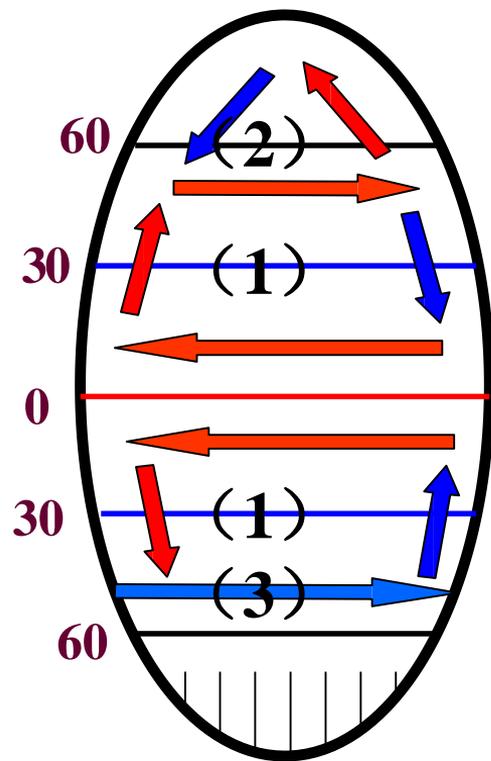
风生环流

洋流的形成

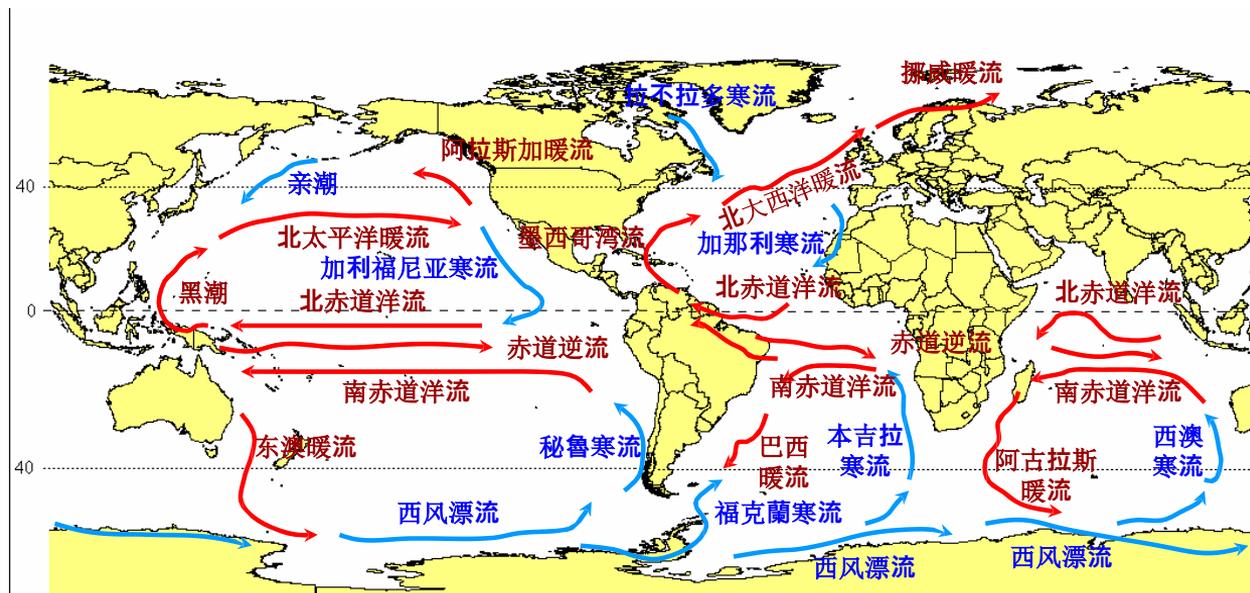


风生环流

- 1) 中低纬度海区：以副热带海区为中心的大洋环流，北顺南逆
- 2) 北半球中高纬度海区：逆时针方向环流
- 3) 南极大陆外围：西风漂流
- 4) 北印度洋海区：季风洋流，夏顺冬逆

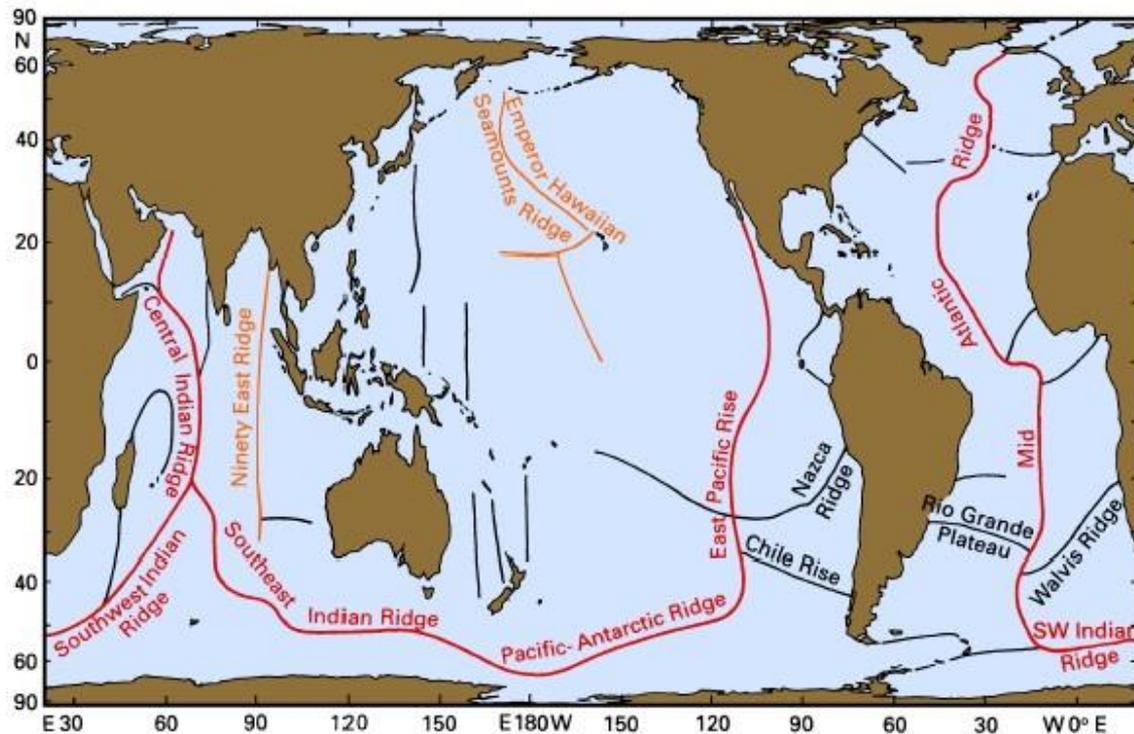


全球大洋风生环流主要流系



第三节 太平洋风生环流

太平洋的轮廓



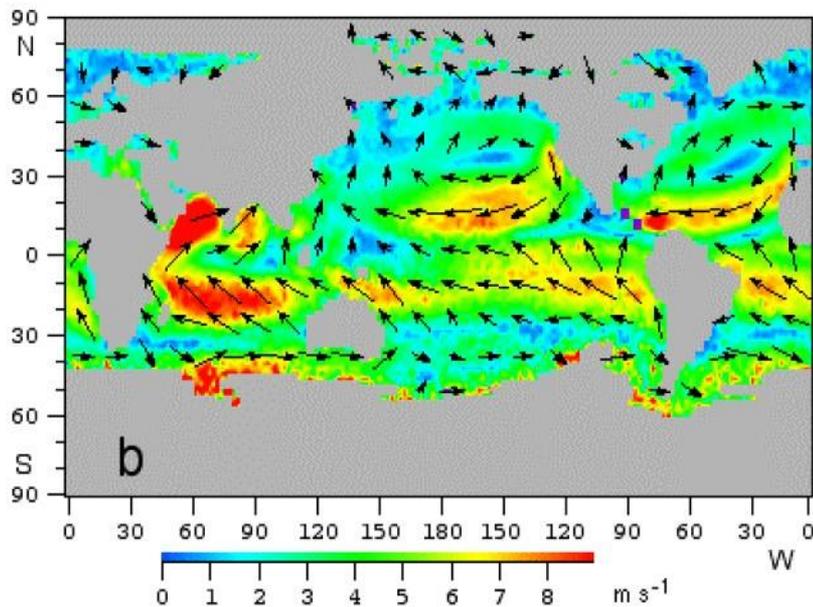
太平洋基本情况

太平洋是世界大洋中**最大**的一个，东西宽处约19000多公里，南北最长约16000多公里，面积达1.8亿平方公里，占全球面积的**35%**，整个世界海洋总面积的50%，超过了世界陆地面积的总和。太平洋平均深度为3957米，而在马里亚纳海沟的最深处可达11034米。

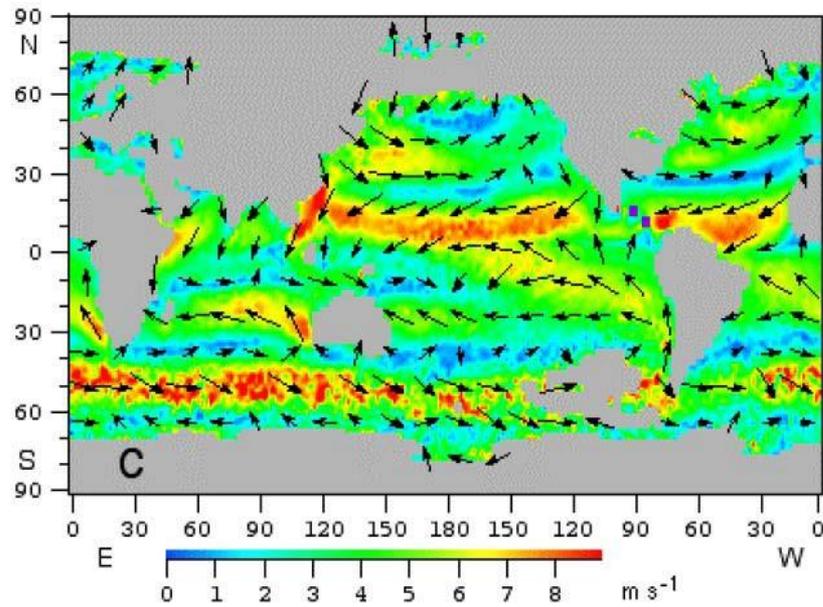
太平洋是世界上**最温暖**的大洋。海面平均水温为19度。全世界海洋平均温度为17.5度。太平洋的水温比大西洋高2度，这主要是因为白令海峡很窄。阻碍了北冰洋寒冷的水流入；太平洋热带海面宽广，储存的热量大。在太平洋生成的**台风多**，约占世界台风总数的**70%**。

太平洋风场

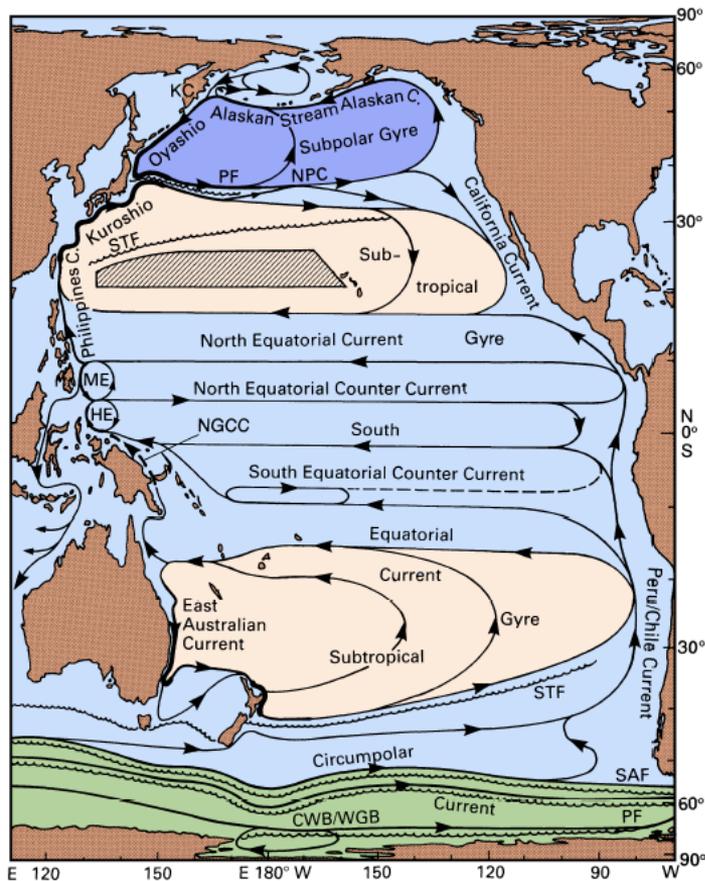
夏季



冬季



太平洋风生环流



Mindanao Eddy (ME)
Halmahera Eddy (HE)

New Guinea Coastal Current (NGCC)
North Pacific Current (NPC)

STF: Subtropical Front
SAF: Subantarctic Front
PF: Polar Front

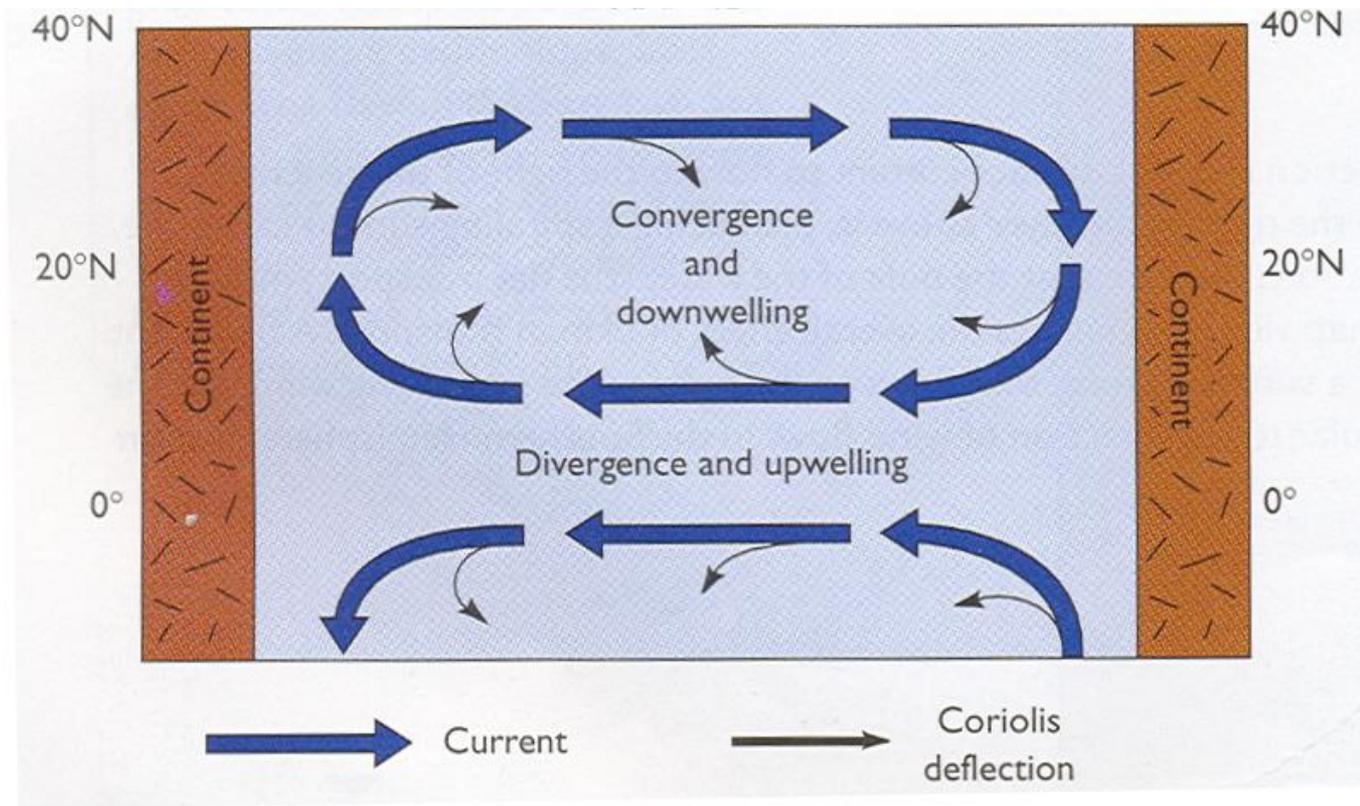
北太平洋主要海流：

- 北赤道海流→黑潮→北太平洋海流→加利福尼亚海流，构成北太平洋中低纬顺时针环流系统；
- 北太平洋海流→阿拉斯加海流→阿留申海流→亲潮，构成北太平洋中高纬逆时针环流系统；

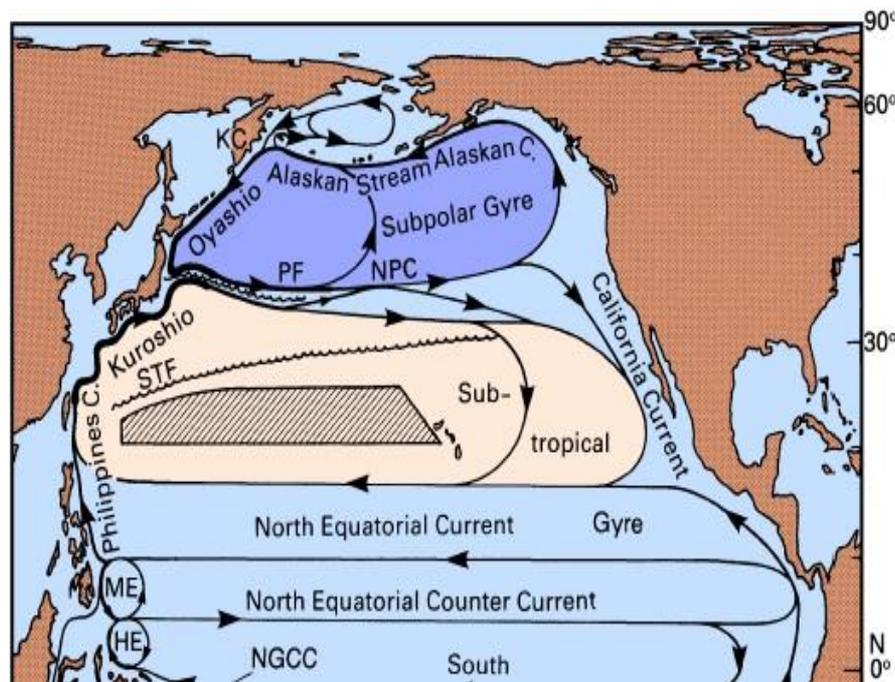
南太平洋主要海流：

- 南赤道流→东澳大利亚暖流→西风漂流→秘鲁海流，构成南太平洋逆时针环流系统。

太平洋风生环流系统：辐合与辐散



北太平洋副热带环流



黑潮 (Kuroshio)

黑潮延伸体 (Kuroshio Extension)

北太平洋流 (North pacific current)

加利福尼亚流 (California current)

亲潮 (Oyashio current)

副热带北太平洋风生环流

1. **北赤道流**：流速较小(0.5~0.7节)，属中性流

2. **黑潮**：流速较大(2~2.5节)，属暖流。

黑潮(Kuroshio)由北赤道流在菲律宾东方转变而成。从台湾东方到35N处。

①台湾东方：宽度150*1852m，流速1~1.5kn。

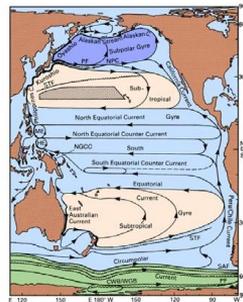
②越过台湾与那国岛之间进入东海：宽度变窄，约80英里；流速增加至2-2.5kn。

③在九州岛西南海域分出一支**对马海流**进入日本海；另一支经吐噶喇群岛**流出东海**，并沿着日本群岛向东北方向流动。

④黑潮在40N附近与北方南下的**亲潮汇合**，一起向东流去成为北太平洋海流。

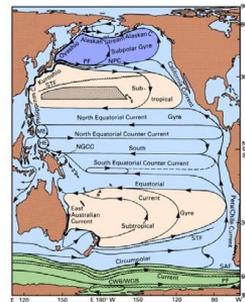
3. **加利福尼亚海流**：流速较小，属冷流。

4. **北太平洋海流**：较宽,流速小，属中性流。

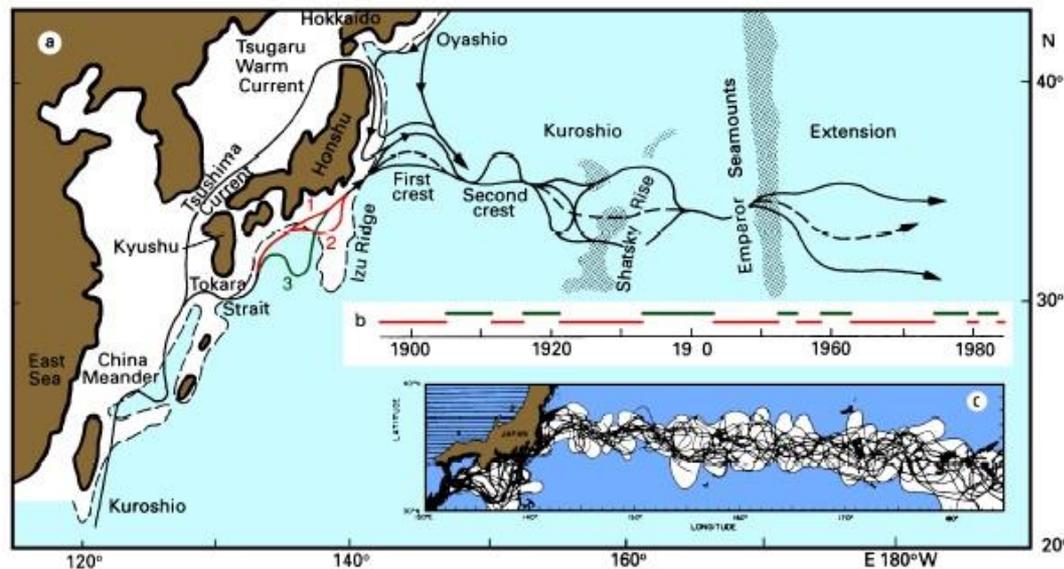


副极地北太平洋风生环流

1. 阿拉斯加暖流
2. 阿留申海流
3. 亲潮(Oyashio): 白令海海流和来自北冰洋经白令海峡流出的冷流一起, 沿大陆东岸南流, 沿途汇合了来自鄂霍次克海、千岛附近的海冰融化而成的海水南下, 形成了北太平洋上水温最低的冷流。
 - ①冬春势力强, 流速约0.5~1kn; 夏季势力较弱。
 - ②在北海道东南大约40N处与黑潮汇合。



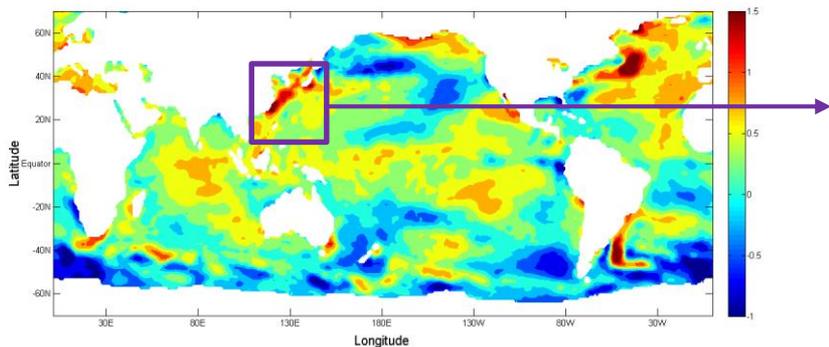
北太平洋副热带环流：黑潮



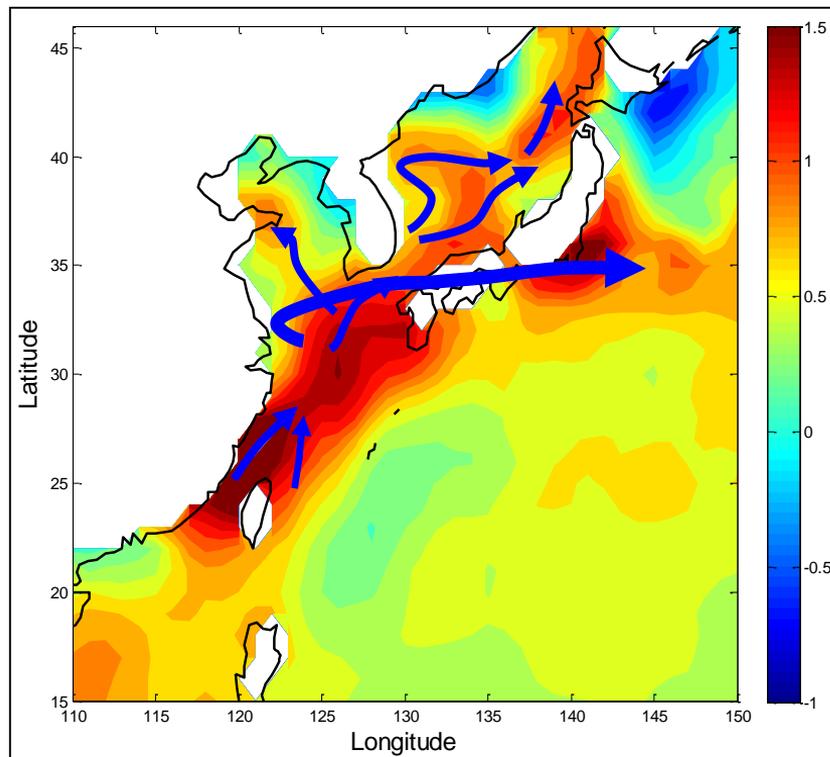
- 世界上最强的西边界流之一 / 流速可以达到1.5m/s
- 高温高盐 / 流量大约100SV

黑潮流域温度变化

近30余年全球SST变化空间分布
(2002~2006平均减去1970~1974平均)

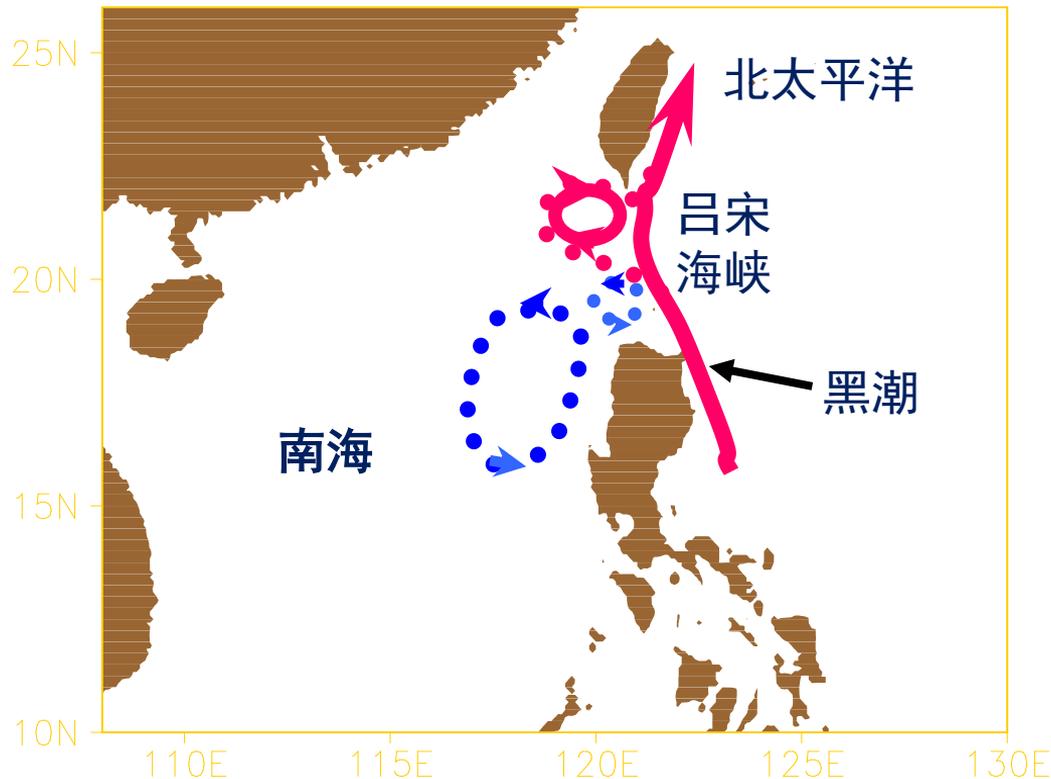


我国近海及邻近洋区是太平洋海区过去
30多年温度升高最显著区域，该区域
升温可能与暖流输运密切相关



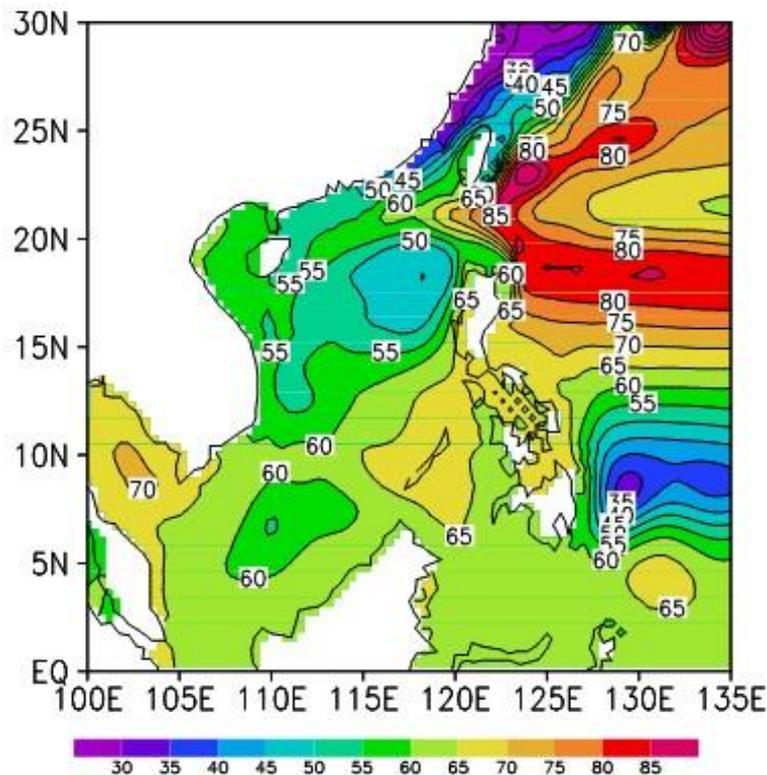
黑潮对南中国海（SCS）的影响

黑潮可以入侵南海形成黑潮的南海分支

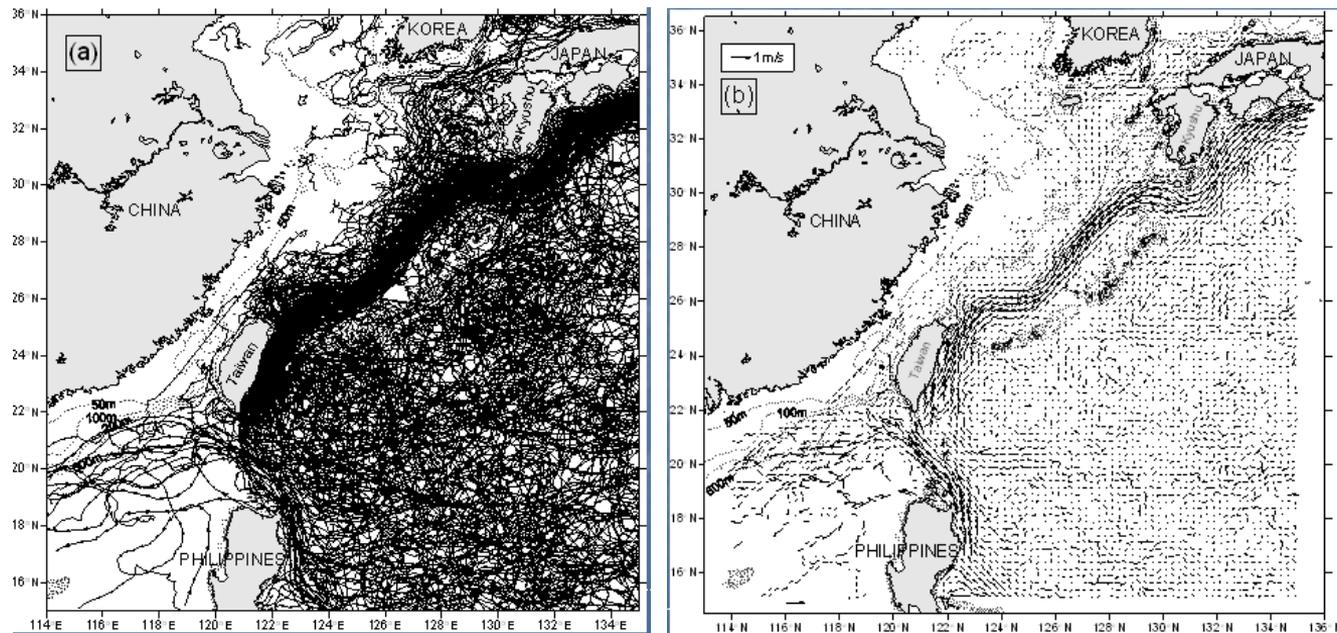


黑潮对南中国海（SCS）的影响

多年平均SSH场（POCM）

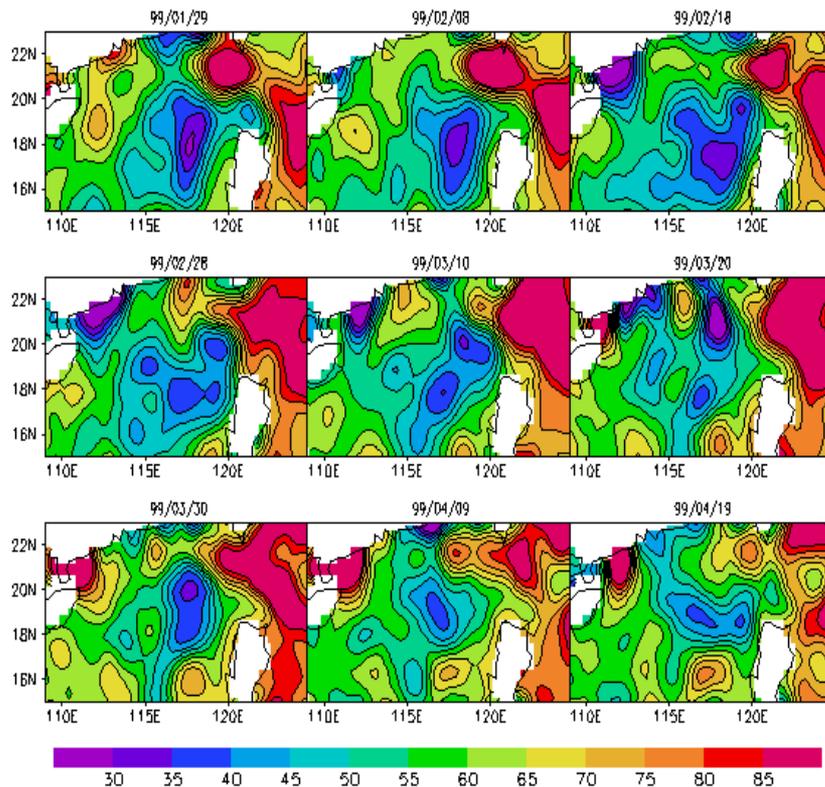


黑潮对南中国海（SCS）的影响

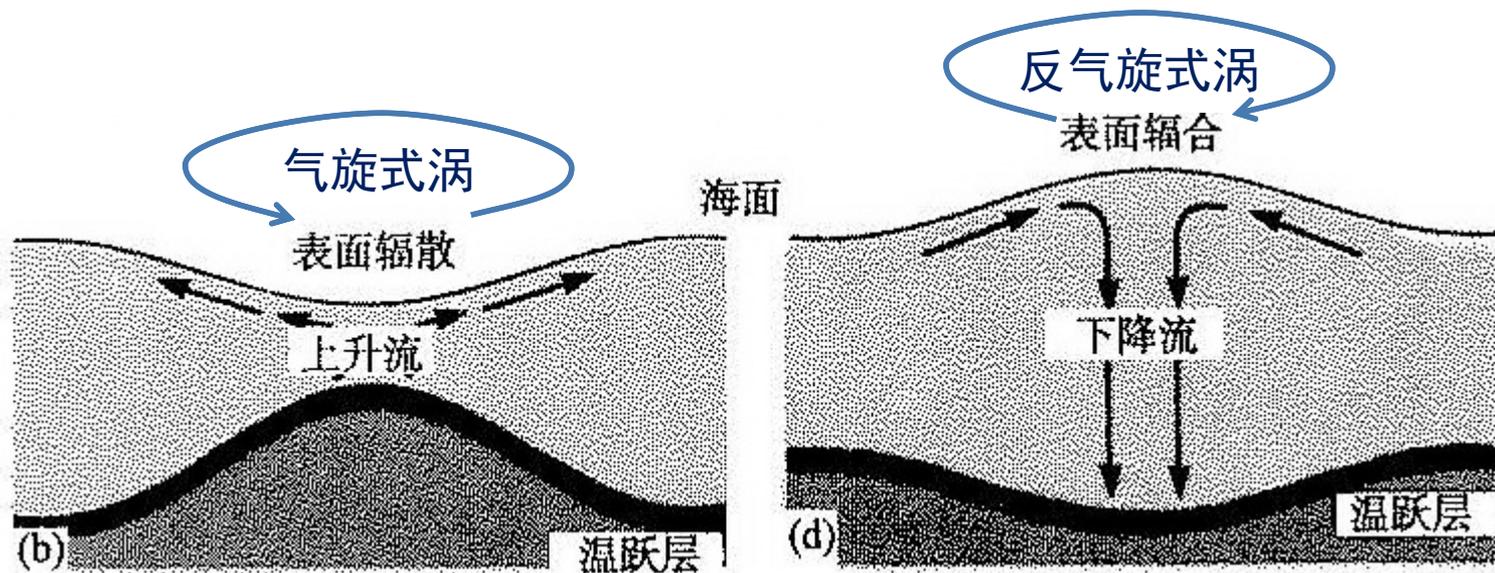


黑潮对南中国海（SCS）的影响

SSH (1999-1-29 -- 4-19) (90days)



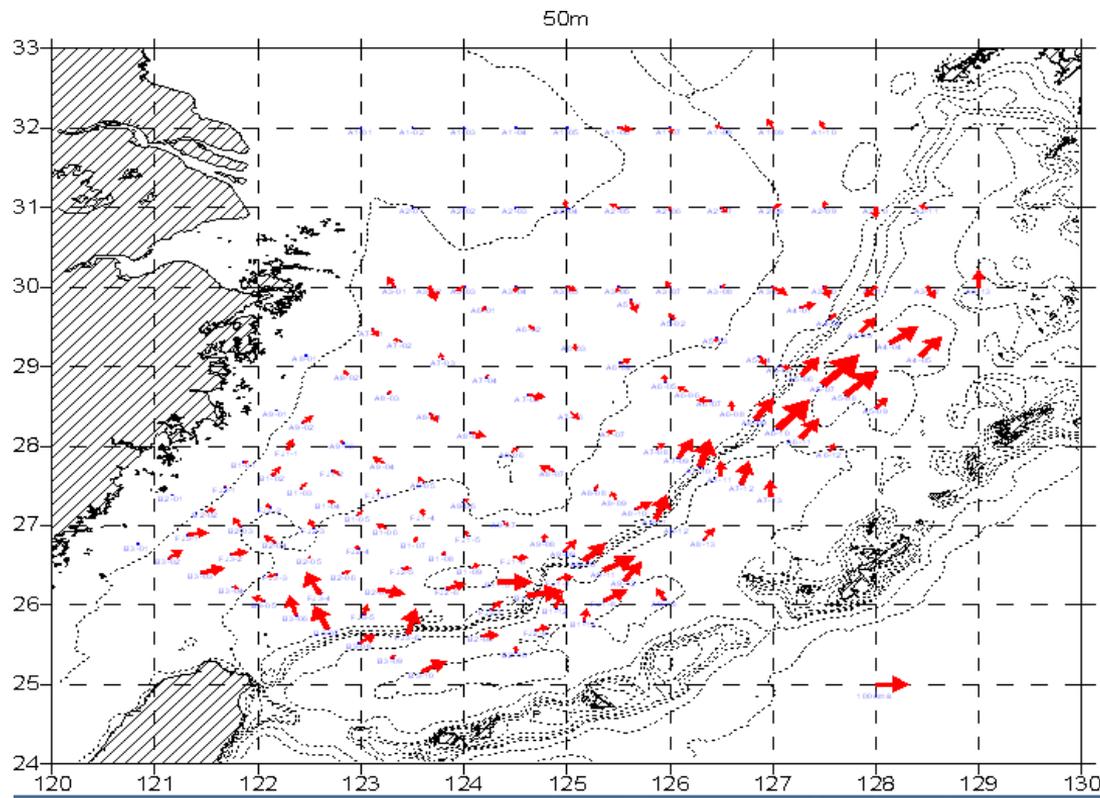
海洋涡旋基本特征



- cold core
- negative SSHA
- counter clock

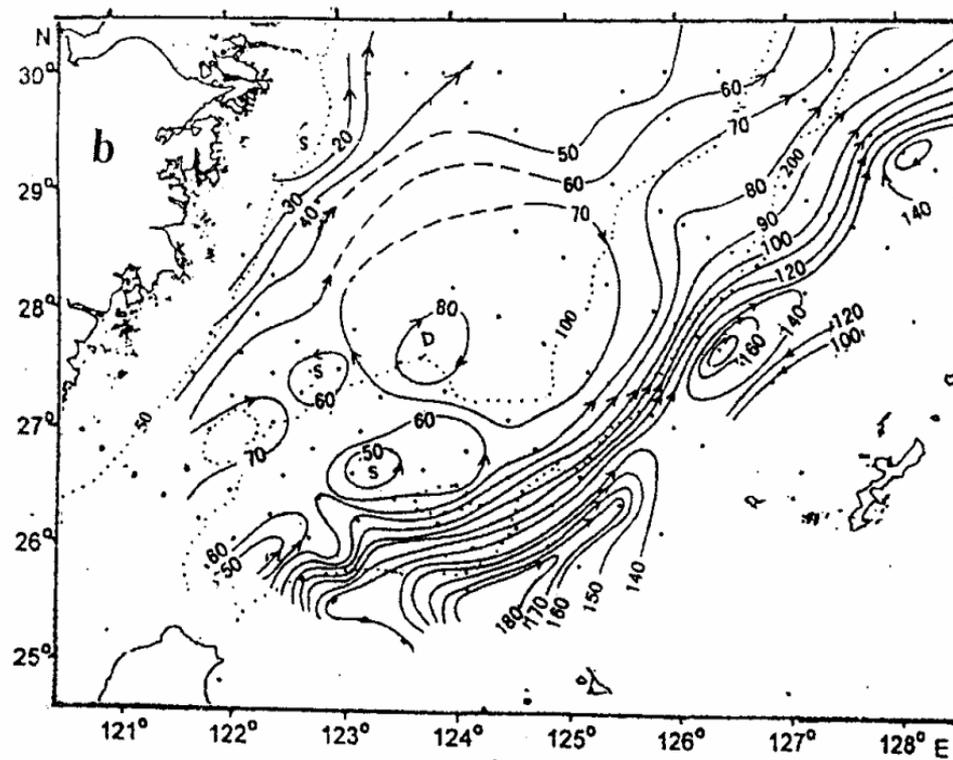
- warm core
- positive SSHA
- clock-wise

黑潮对东中国海（ECS）的影响

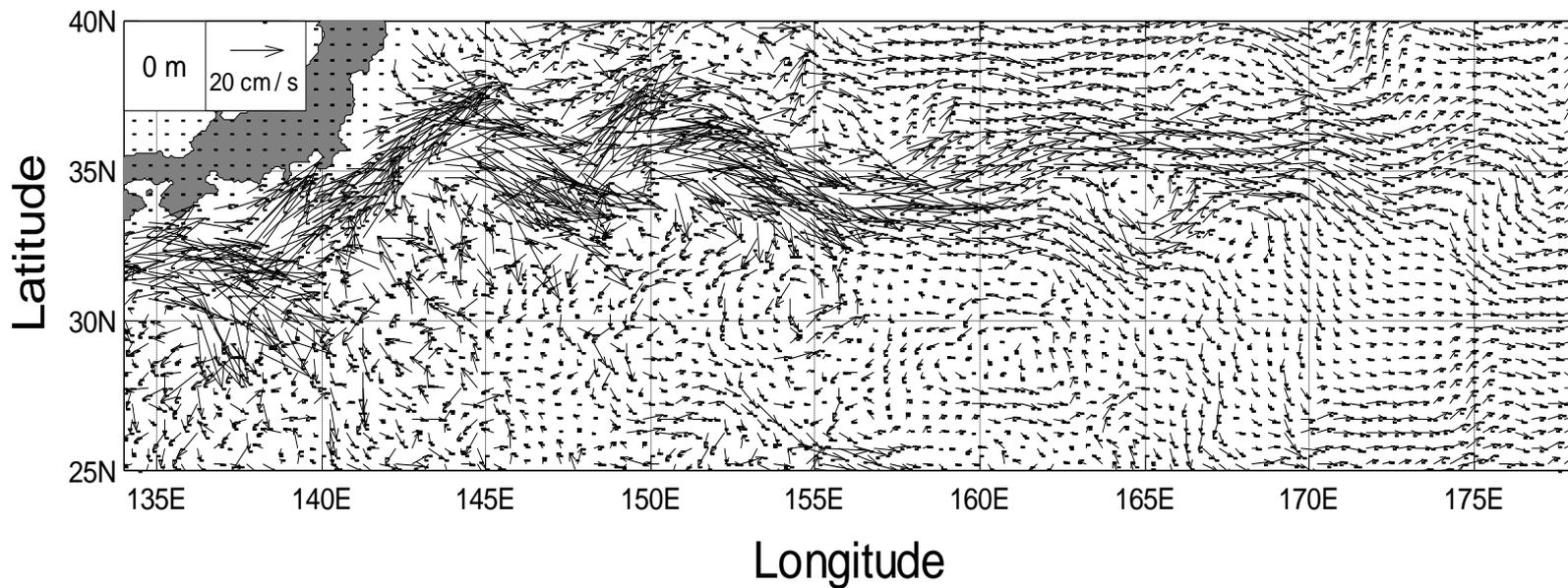


黑潮对东中国海（ECS）的影响

东海黑潮两侧的伴随涡旋

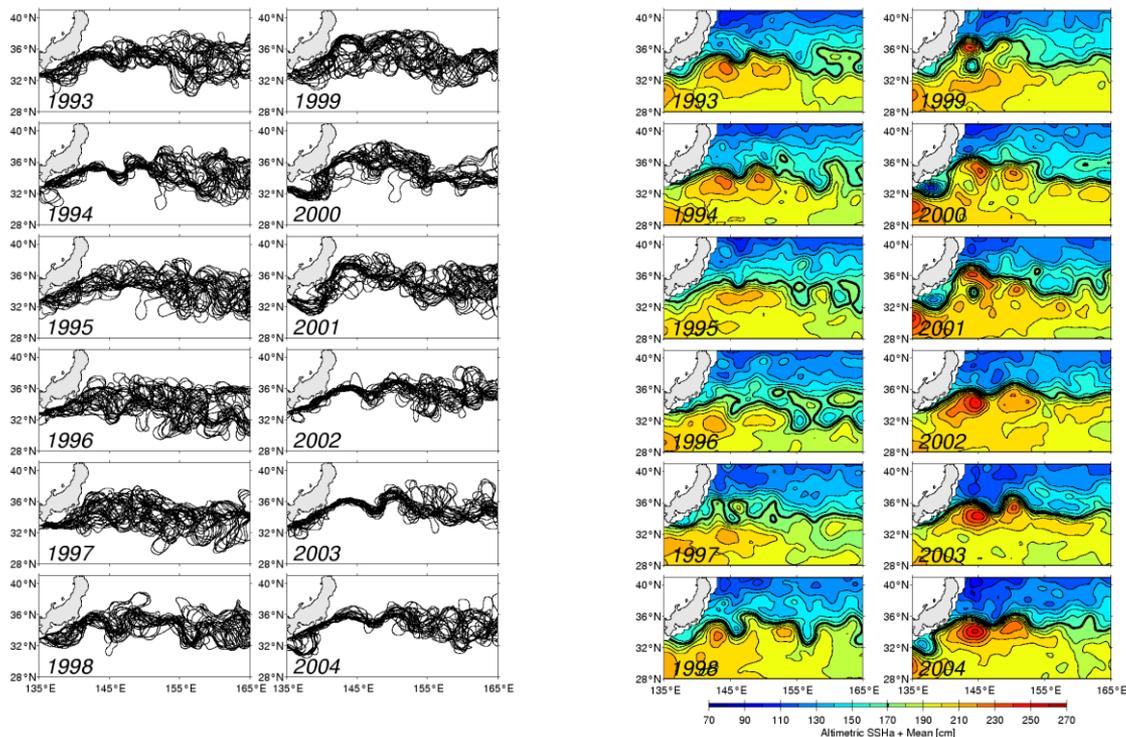


北太平洋海流NPC--黑潮延伸体



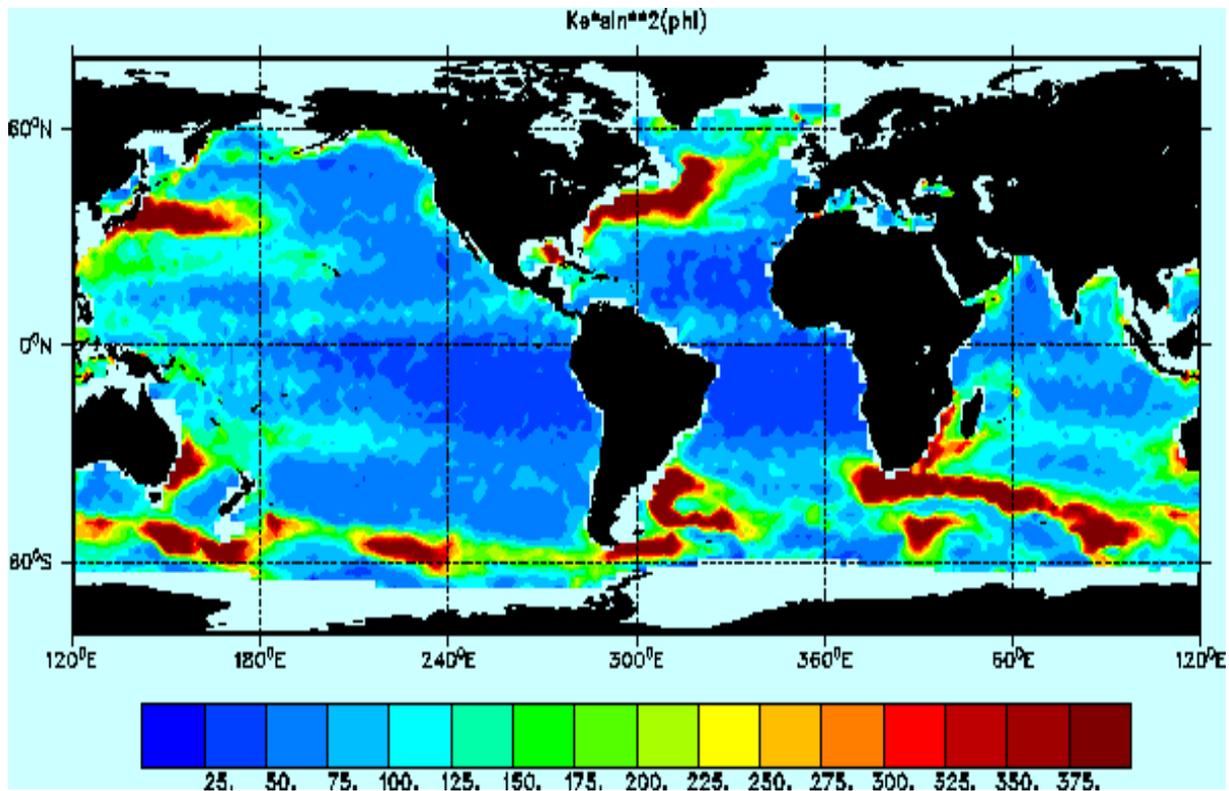
黑潮变化最大的区域

北太平洋海流NPC -- 黑潮延伸体

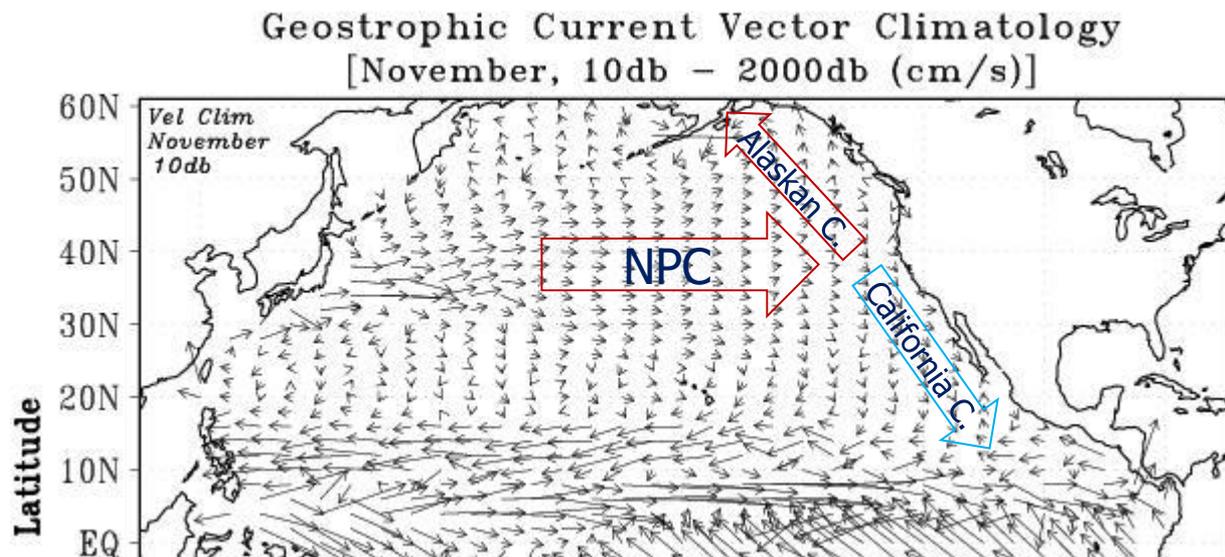


- 黑潮延伸体较强且稳定，路径北移，回流拉伸（1993, 1994, 2002, 2003, 2004）
- 黑潮延伸体较弱且变化大，路径南移，回流缩短（1996, 1997, 1998, 1999）

海面动能分布



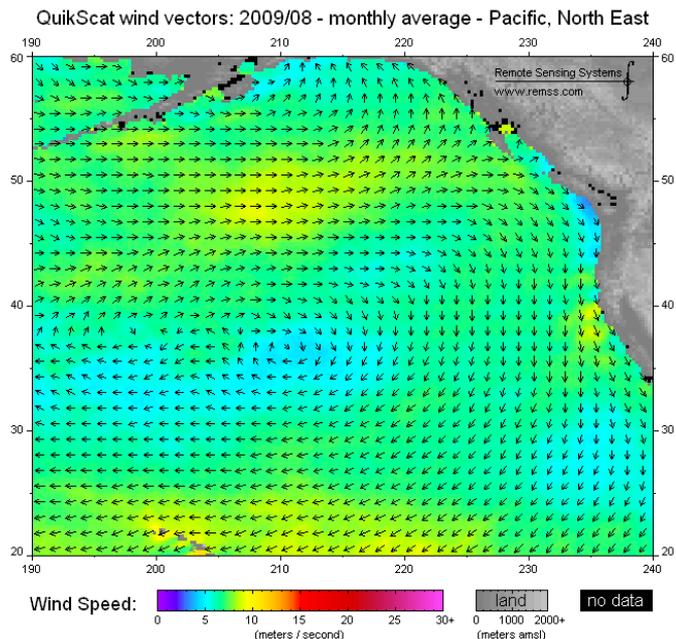
北太平洋海流NPC



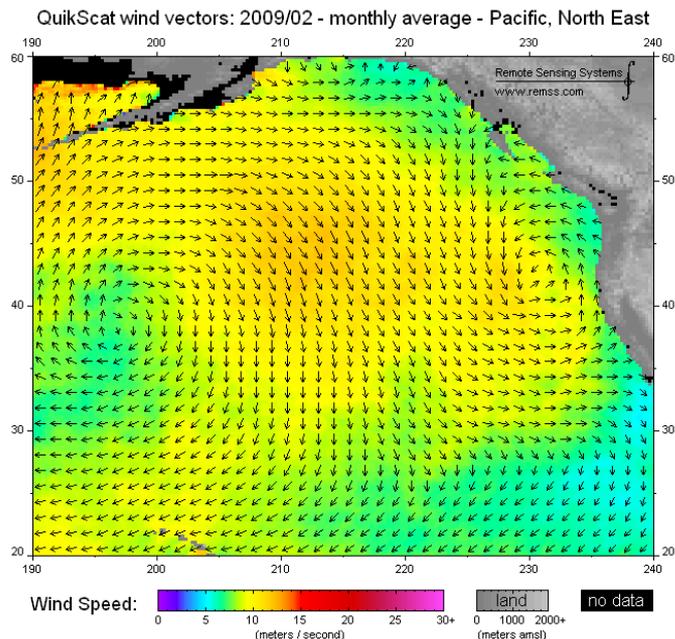
流辐宽，流速慢；受风场影响较大；流动变化较小

北太平洋东边界流—加利福尼亚寒流

流速慢，流辐宽；变化大，瞬时观测中较难发现；形成**低温低盐舌**



夏季偏北风，上升流明显



冬季偏南风，存在逆流

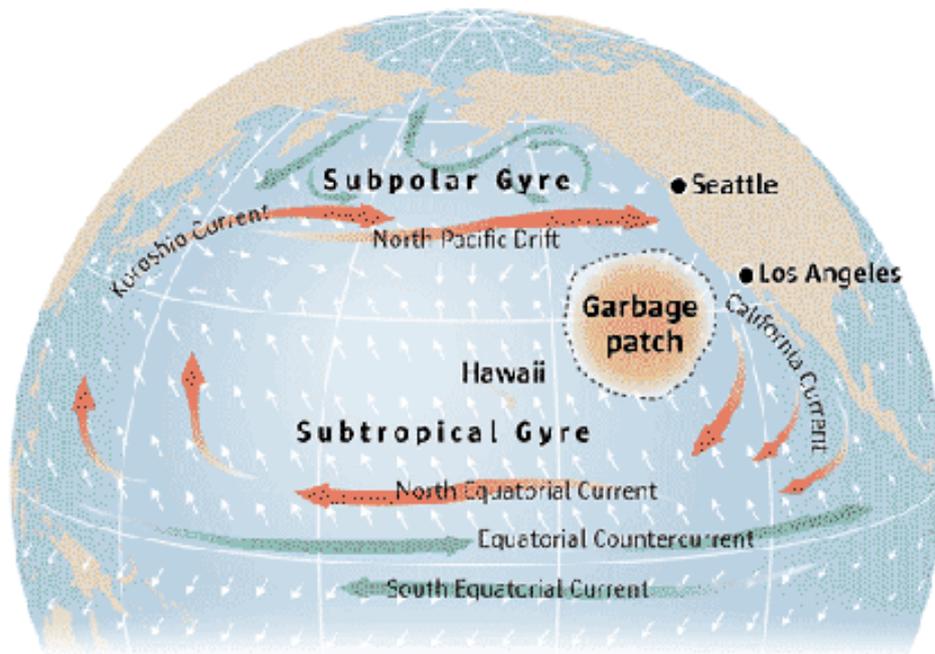
北太平洋东边界流—加利福尼亚寒流

上升流导致的强温度梯度引起海雾



coastal California's characteristic fog

北太平洋垃圾聚集区



接近中欧面积大小 --- “第八洲”



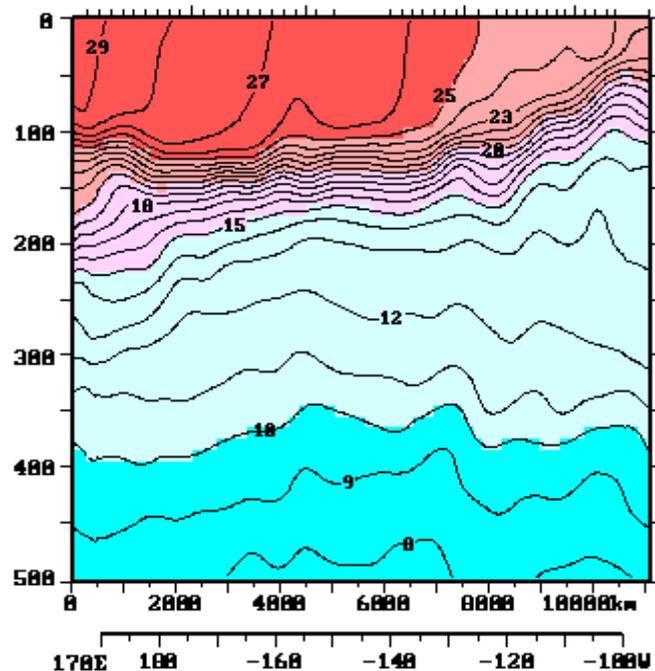
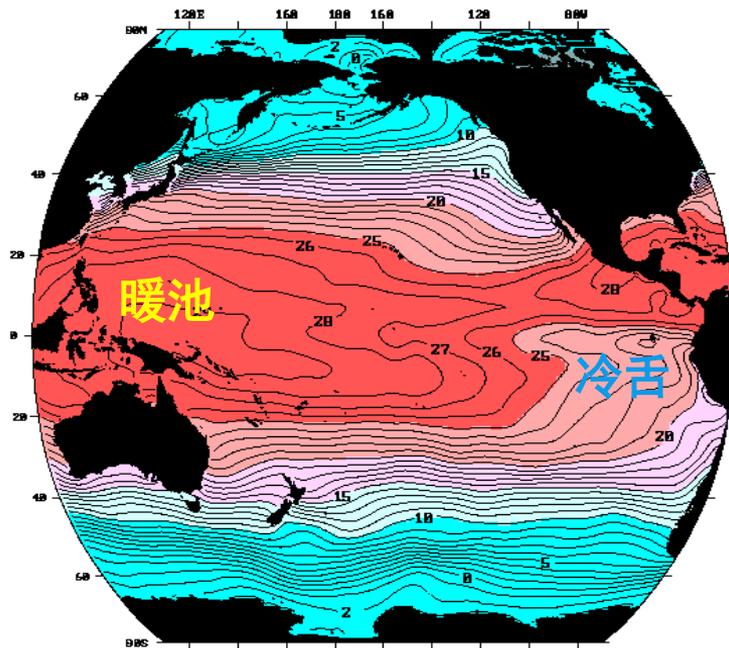
海上垃圾



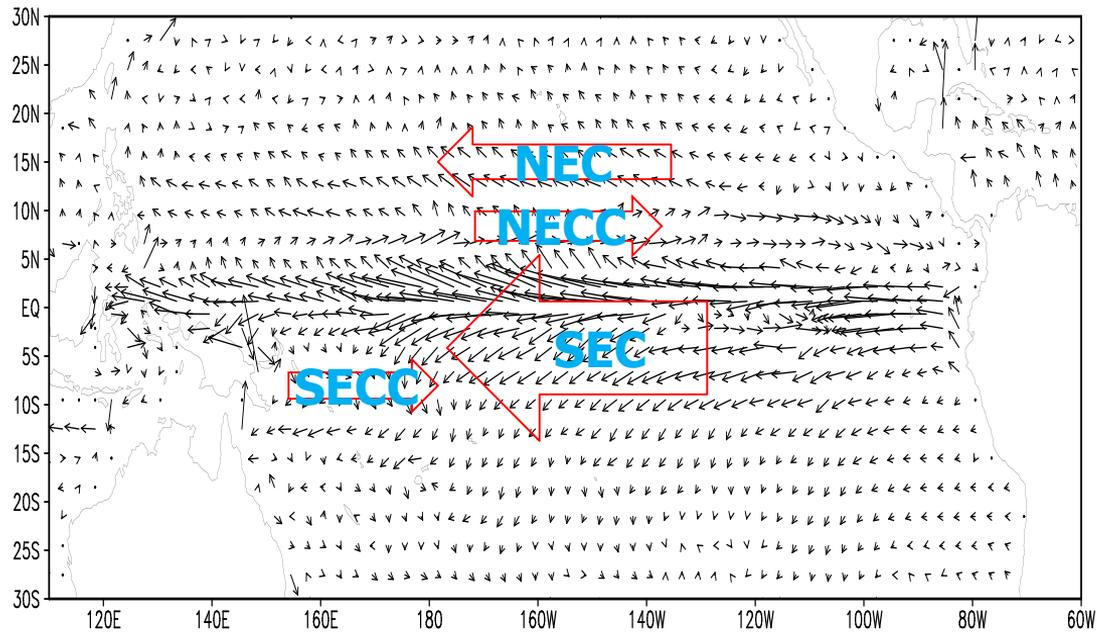
海星计划 <http://www.projectkaisei.org/>

热带太平洋：暖池、冷舌和温跃层

暖池 (warm pool)：在热带西太平洋和东印度洋常年存在着的上层海水温度超过 28°C 的宽广的水域，占全球热带海洋面积的 $35\%\sim 45\%$



热带太平洋表层流系



热带太平洋上层流系垂直结构

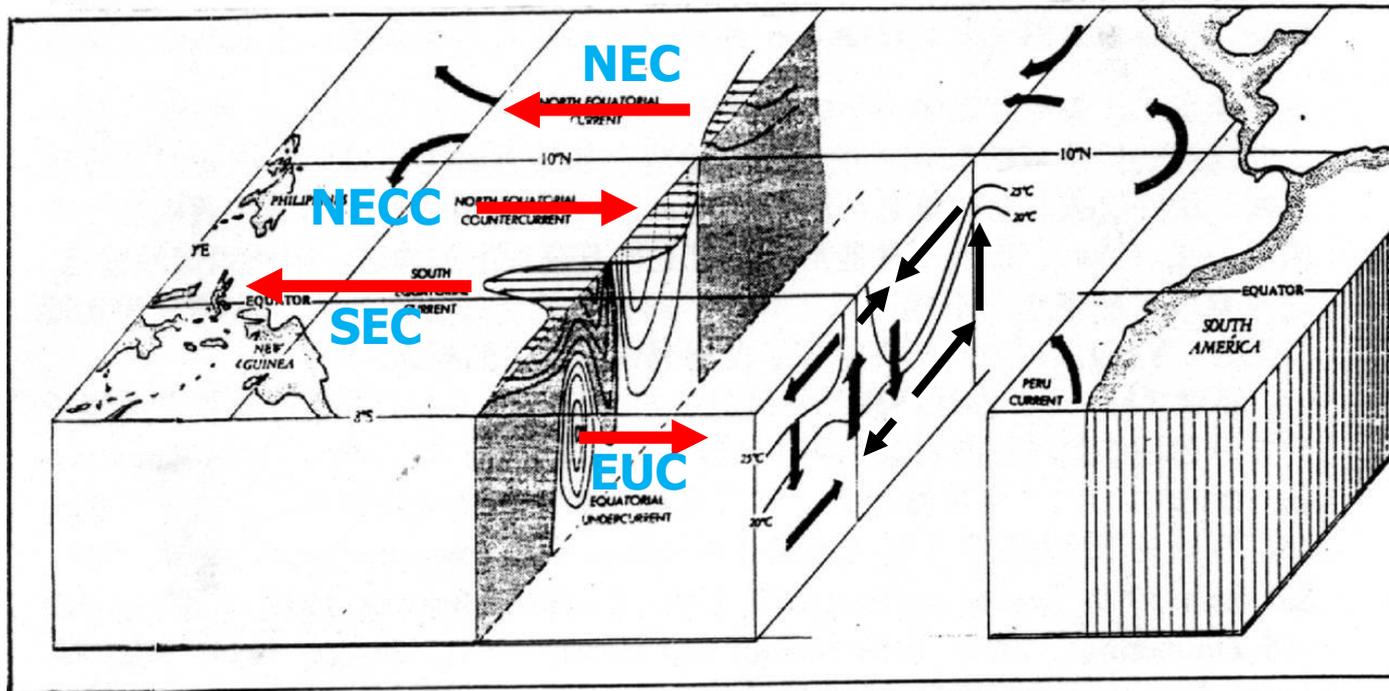
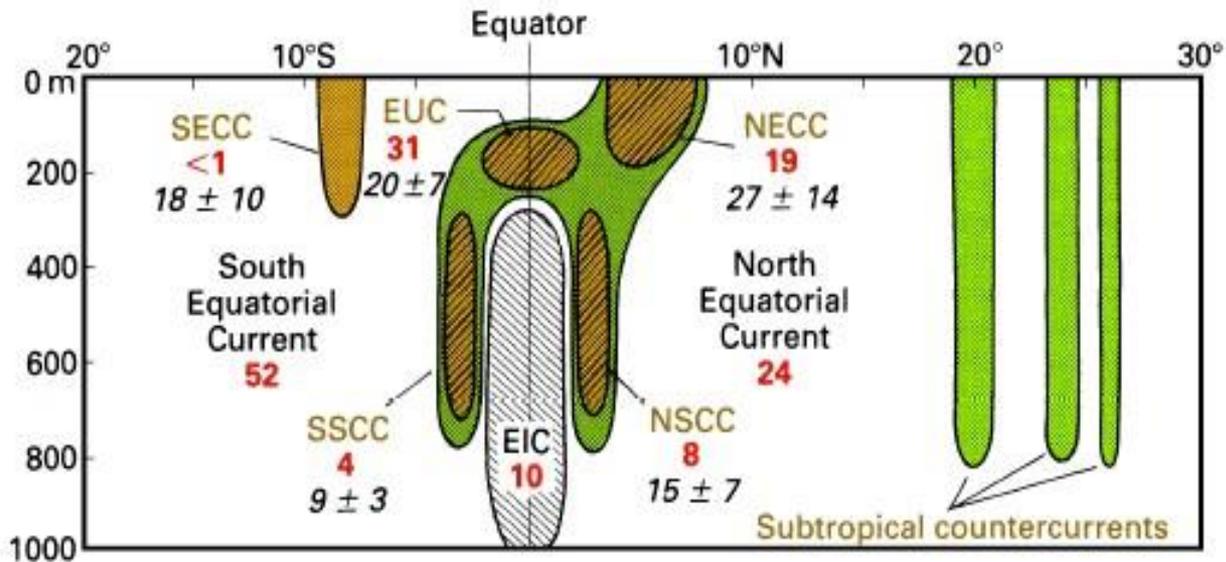


FIG. 1. A schematic diagram of the horizontal and vertical circulation in the tropical Pacific Ocean.

热带太平洋上层流系垂直结构



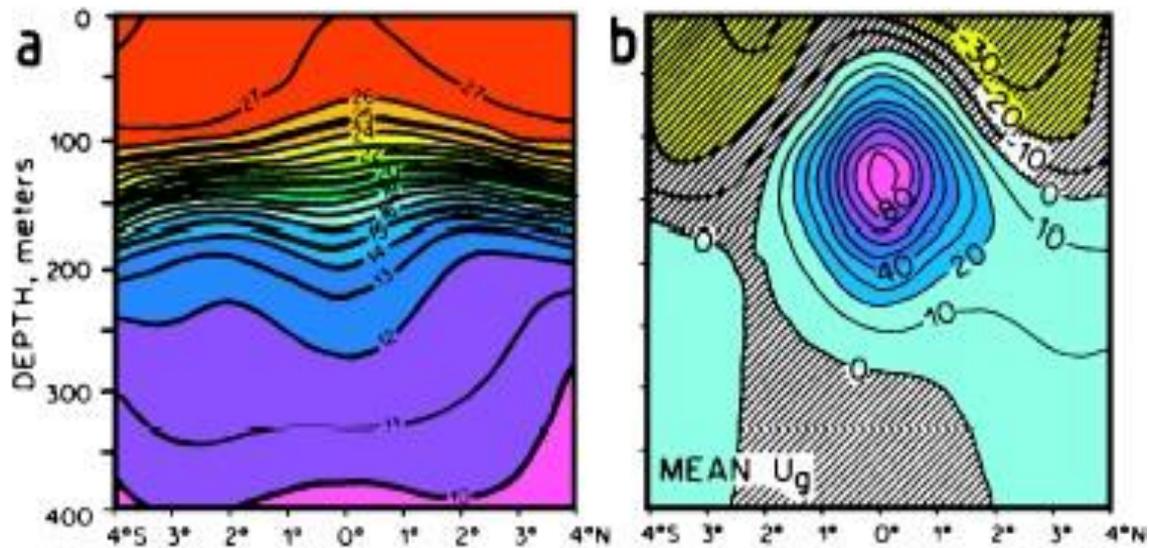
EUC = Equatorial Undercurrent (赤道潜流)

EIC = Equatorial Intermediate Current (赤道中层流)

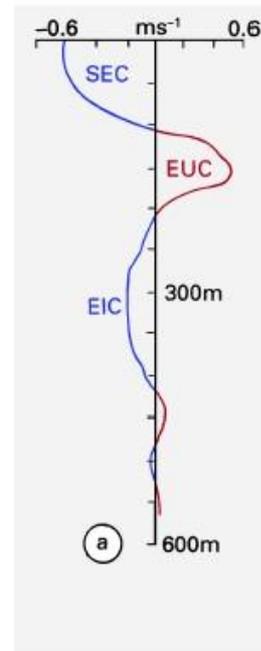
NECC and SECC = North and South Equatorial Countercurrents (赤道逆流)

NSCC and SSCC = North and South Subsurface Countercurrents (次表层逆流)

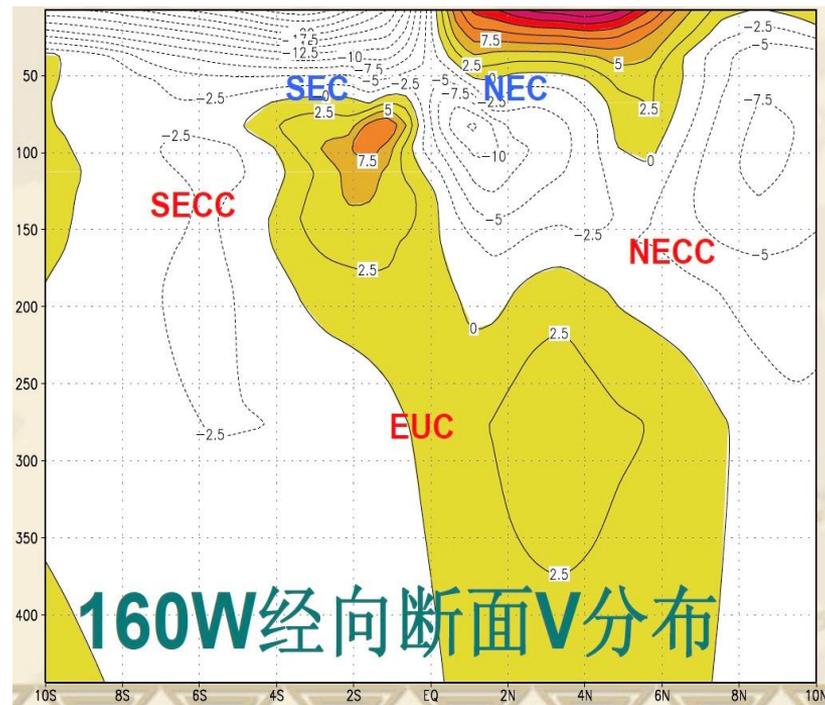
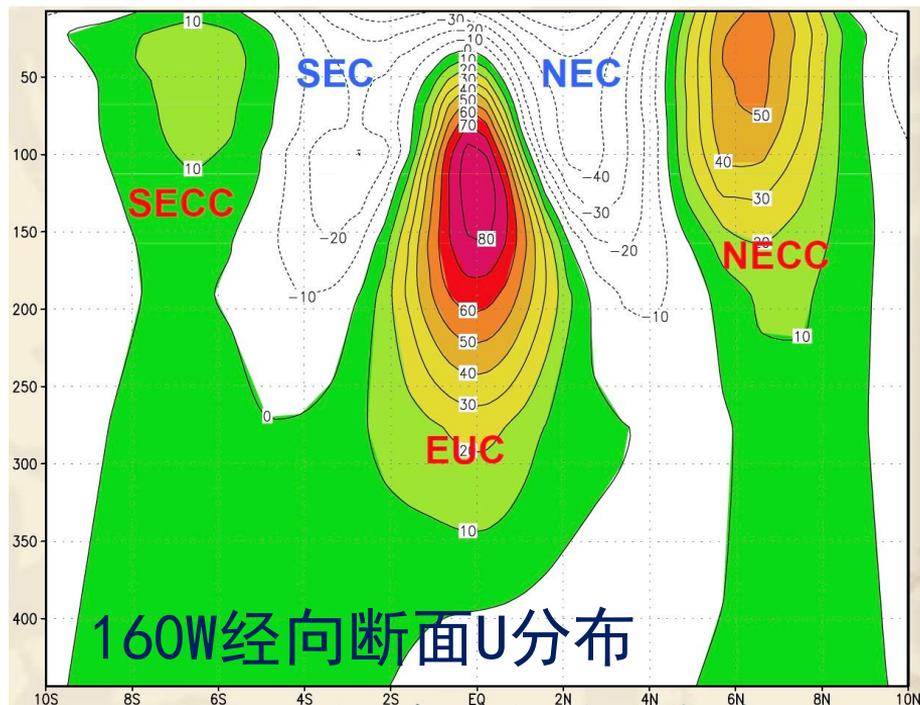
赤道潜流(EUC)



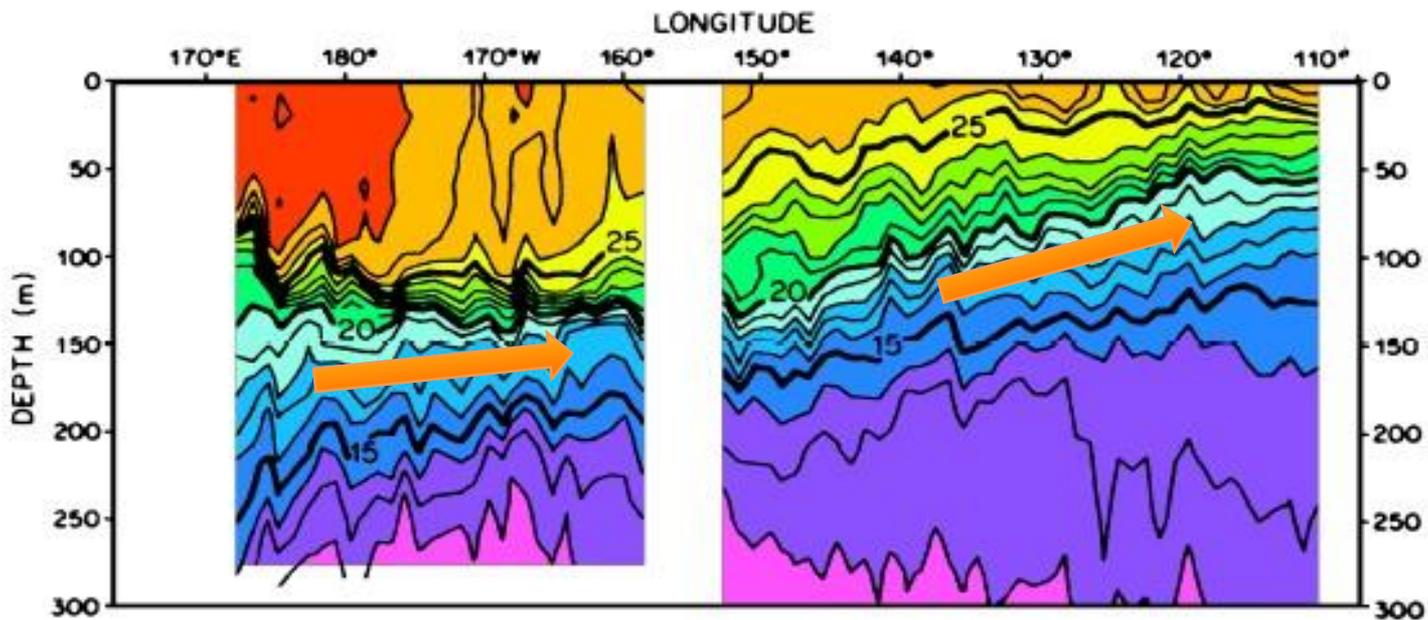
海流计的观测



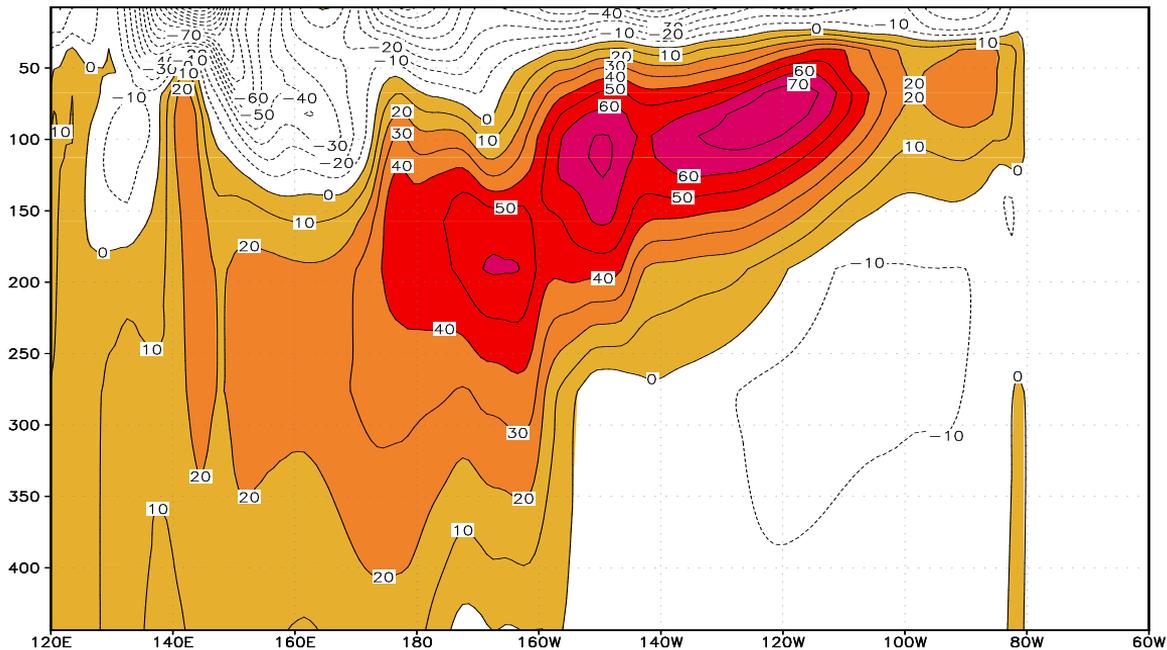
热带太平洋上层流系垂直结构



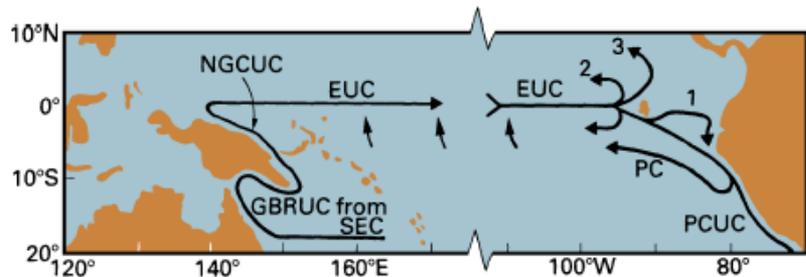
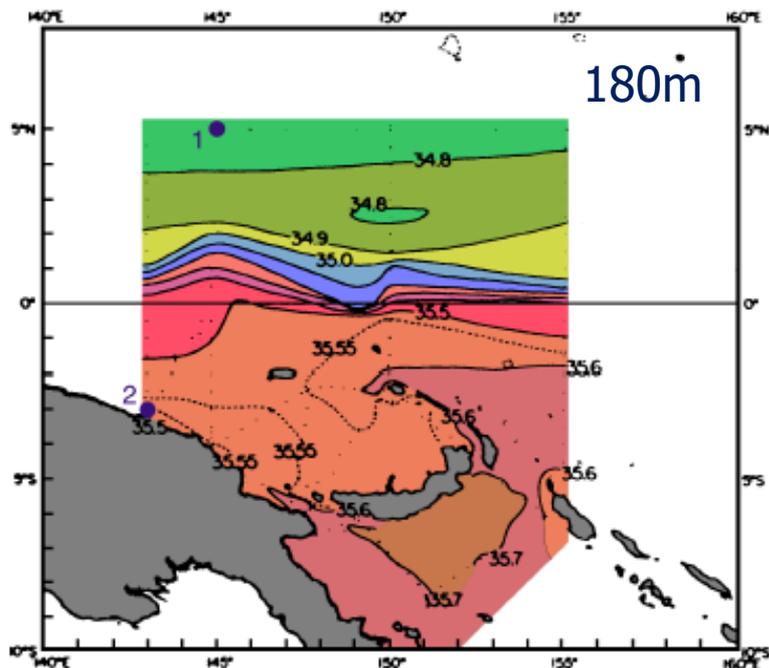
赤道温跃层与赤道潜流



赤道纬向断面流速U

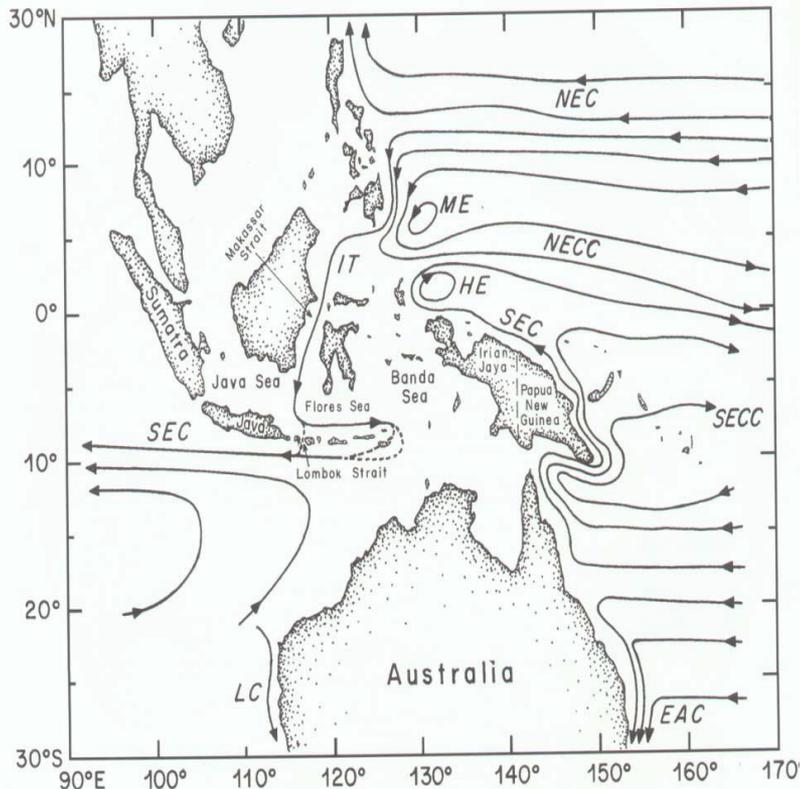


EUC水源来源于南太平洋



环流分布和盐度特征上都显示赤道
潜流主要与南太平洋的水有关

北赤道逆流NECC和南赤道逆流SECC



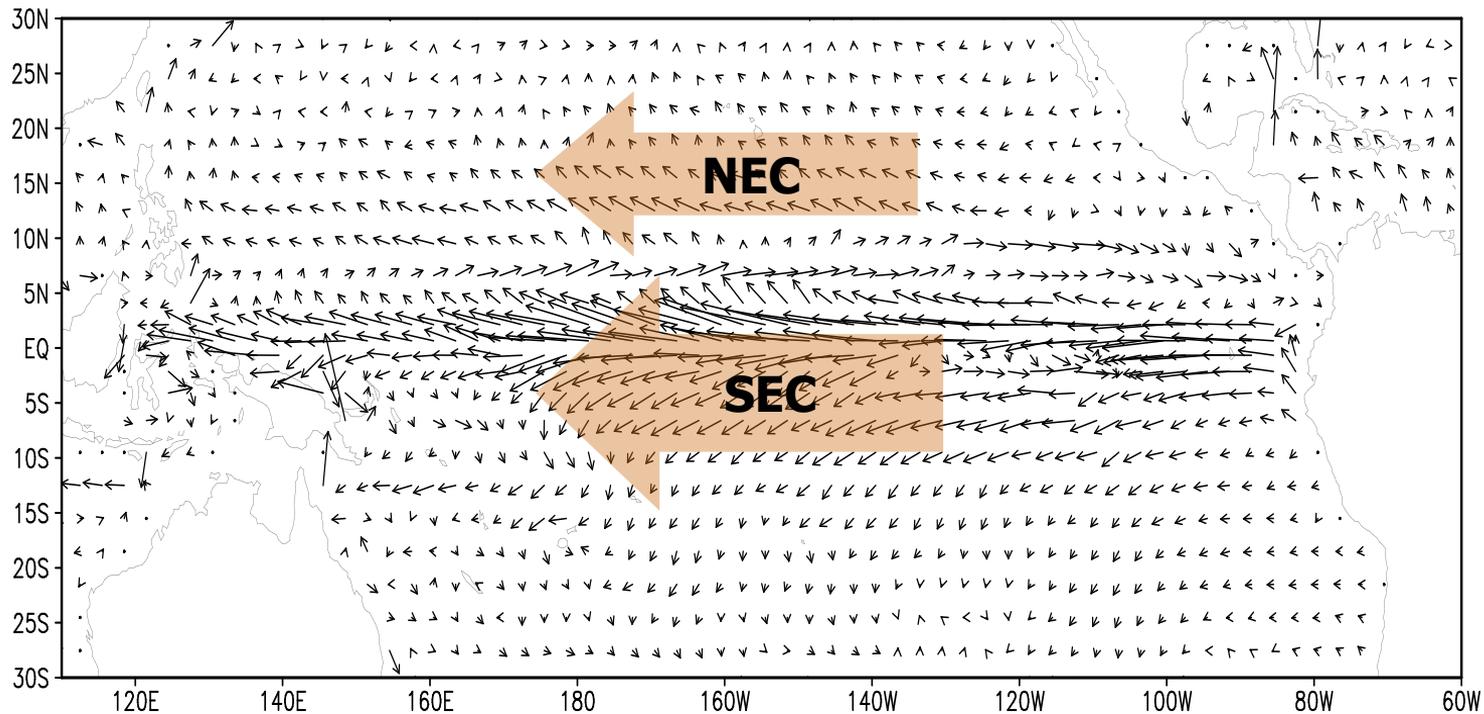
- 北赤道逆流的水来自北太平洋和南太平洋
- 南赤道逆流的水基本都来自南太平洋
- 北赤道逆流可以看成是南北太平洋赤道流系的分界
- 南北半球信风将海水吹向西，在西部陆地处受阻、堆积
- 海洋西高东低，引起指向东的水平压强梯度力
- 由于赤道无风带风力很弱，所以东向压强梯度力可以将水沿着赤道无风带向东输送，而不受表面风海流阻碍



北赤道流NEC和南赤道流SEC

- 典型的风生环流
- 都在风最强的季节（冬季）最强
- 2月偏南，8月偏北
- NEC的流量大概45Sv，流速0.3m/s
- SEC的流量大概50Sv，流速0.6m/s
- 温跃层之上，高温、高盐、高溶解氧、低营养盐、高水色、透明度大

北赤道流NEC和南赤道流SEC



热带太平洋暖池与冷舌

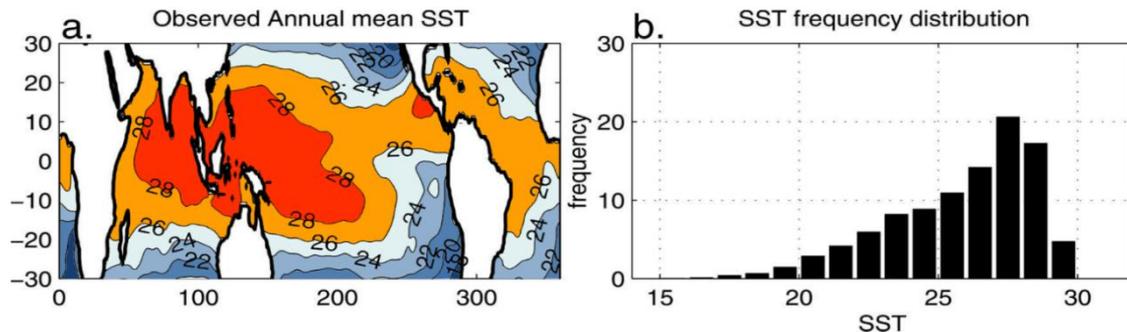


FIG. 1. (a) Annual mean SST ($^{\circ}\text{C}$) from Levitus and Boyer (1994). (b) Frequency distribution for the SST shown in (a) as a percent area (so that the sum of over all SSTs is 100%).

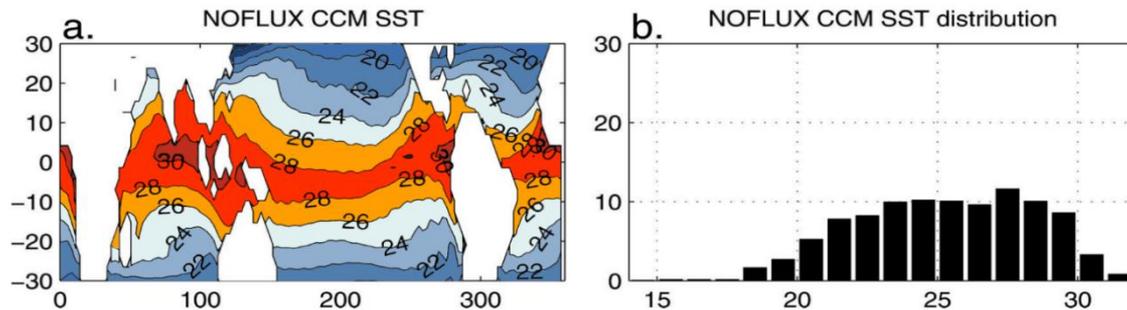
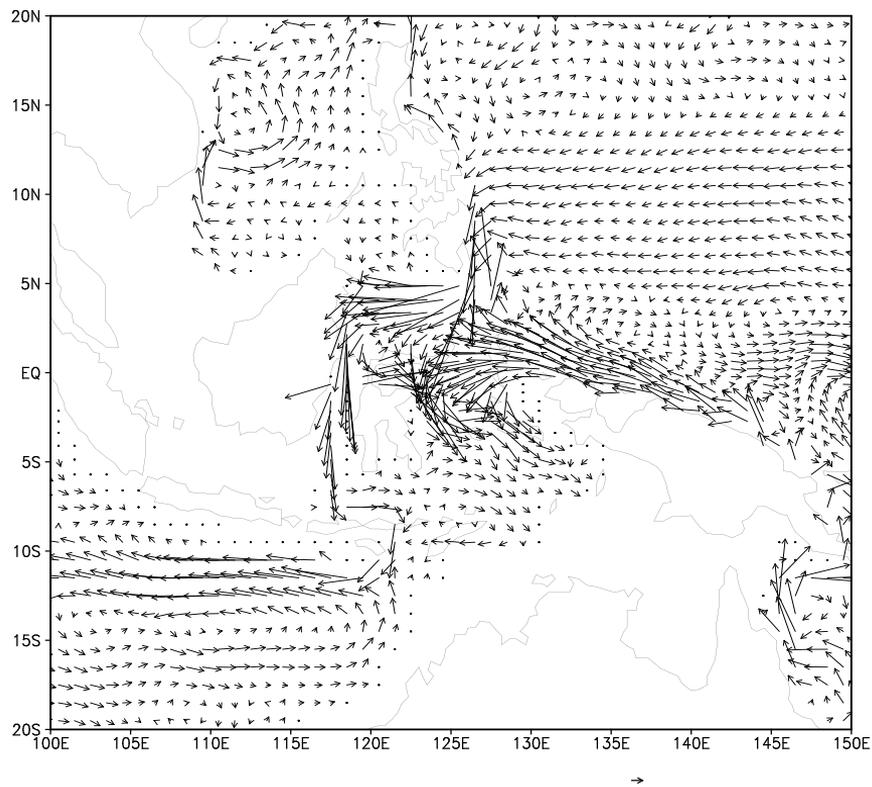


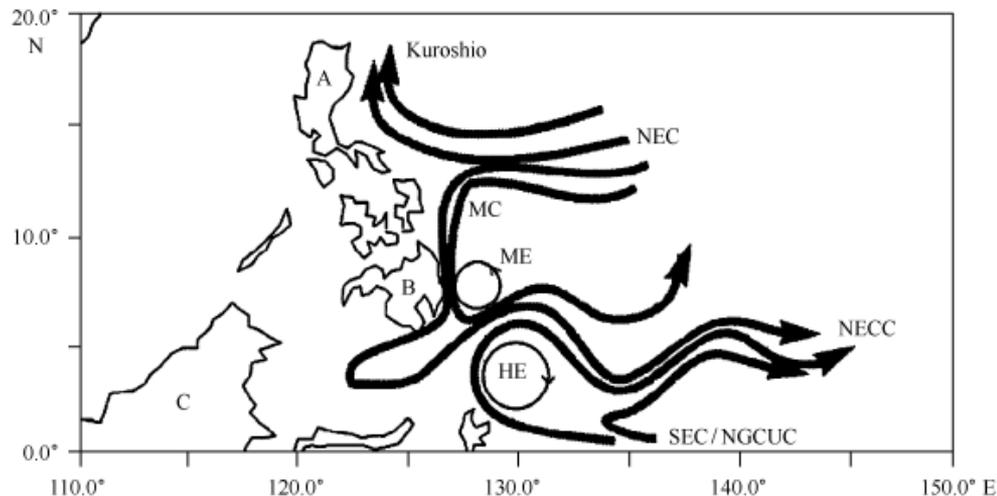
FIG. 3. (a) Annual mean SST from CCM3 experiment in which ocean heat transports are set to zero everywhere. (b) Frequency distribution for the SST shown in (a).

没有赤道流的热输送就没有暖池存在 (Clement et al. 2005)

热带太平洋西边界流



热带太平洋西边界流



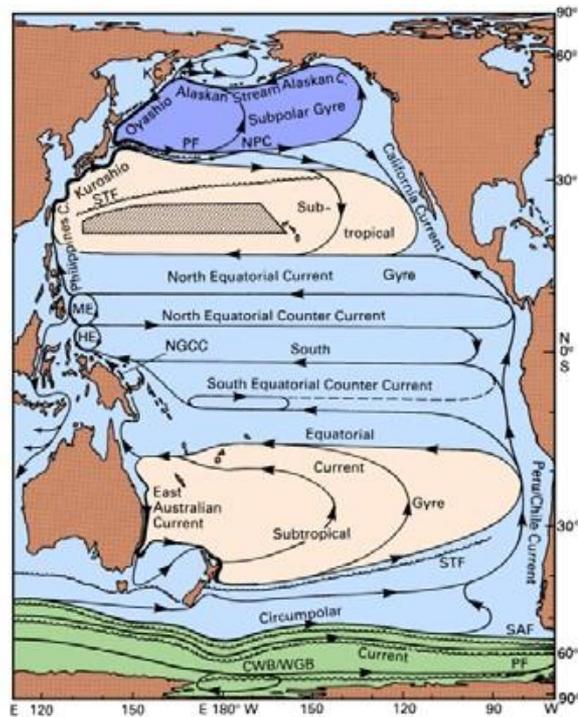
向北的一支为黑潮，向南流动的一支为棉兰老流，棉兰老涡，和棉兰老潜流世界上唯一一个由中国人发现、命名，并在国际上获广泛承认的洋流（Mindanao Undercurrent）

图1 太平洋低纬度西边界环流分布(根据 Nitanaï, 1972^[1])，北赤道流(NEC)发生分叉形成黑潮(Kuroshio)和棉兰老流(MC) A为吕宋岛,B为棉兰老岛,C为加里曼丹岛。ME为棉兰老冷涡,HE为哈目黑拉暖涡,NECC为北赤道逆流,SEC为南赤道流,NGCUC为新几内亚沿岸潜流

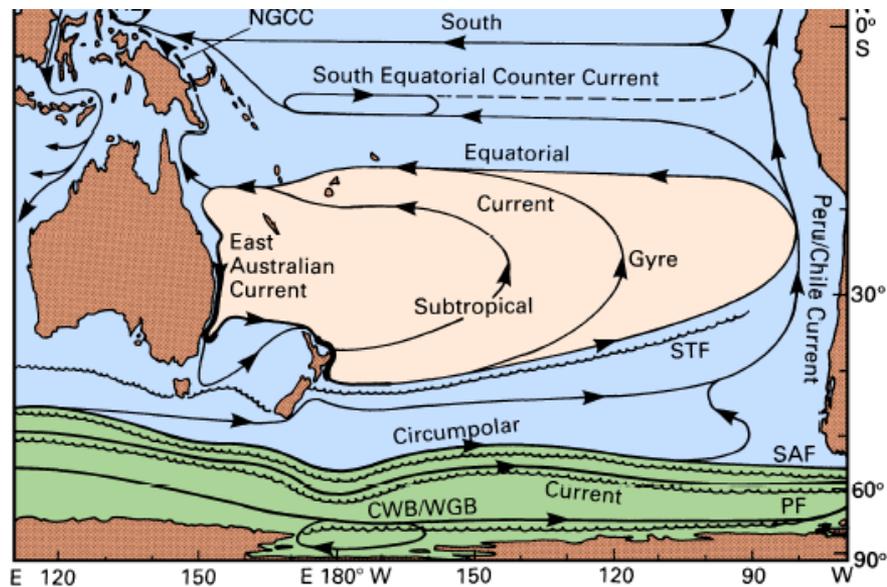
南太平洋风生环流

主要是一个反时针环流：

1. 南赤道流（South Equatorial current）
2. 东澳暖流（East Australian current）：流速1kn。
3. 西风漂流（West wind drift）：属冷流。
4. 秘鲁冷流（Peru Current）：很宽，流速0.5kn

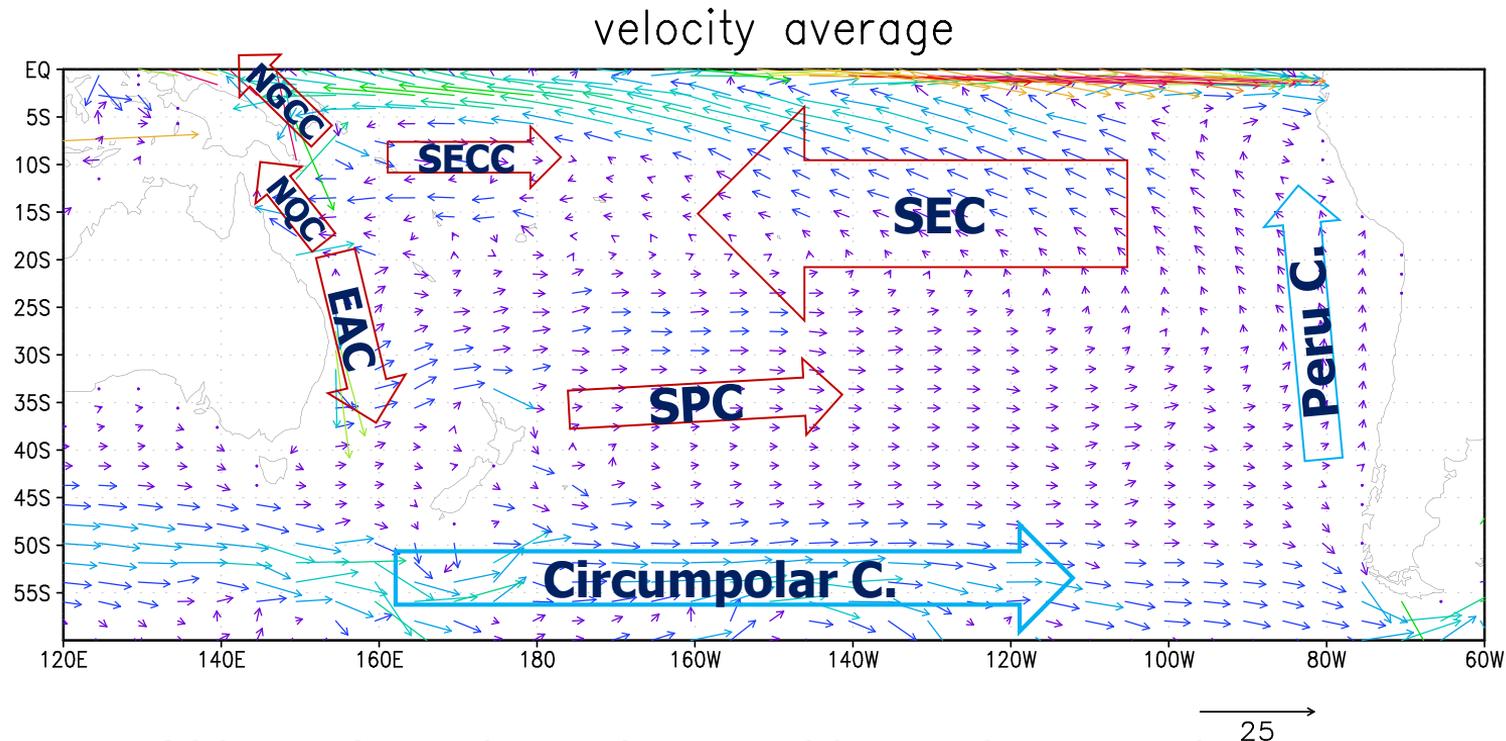


南太平洋风生环流



- **南赤道流**约南纬10度左右由东向西的洋流，东起加拉巴哥群岛，西至新几内亚岛，主要是受到东南信风（贸易风）吹送，且其流速愈往西愈慢，最大流速有四节。
- **东澳洋流**为南赤道流末端在新几内亚岛附近南下，抵达澳洲东岸的洋流，性质与黑潮类似。
- **西风漂流**南太平洋的西风漂流与北半球大不相同，完全是围绕南极大陆的环状极地流，其为寒冷的南极水向东北方流动，而又为偏西风所吹送。其流幅宽广，抵达南美洲南端时，分成二支，向北一只为秘鲁洋流；向南绕过合恩角进入大西洋为合恩角洋流。
- **秘鲁洋流**将南半球高纬度地区的寒冷海水，北流到低纬度地区，对南美洲气候影响很大，末端接南赤道流。

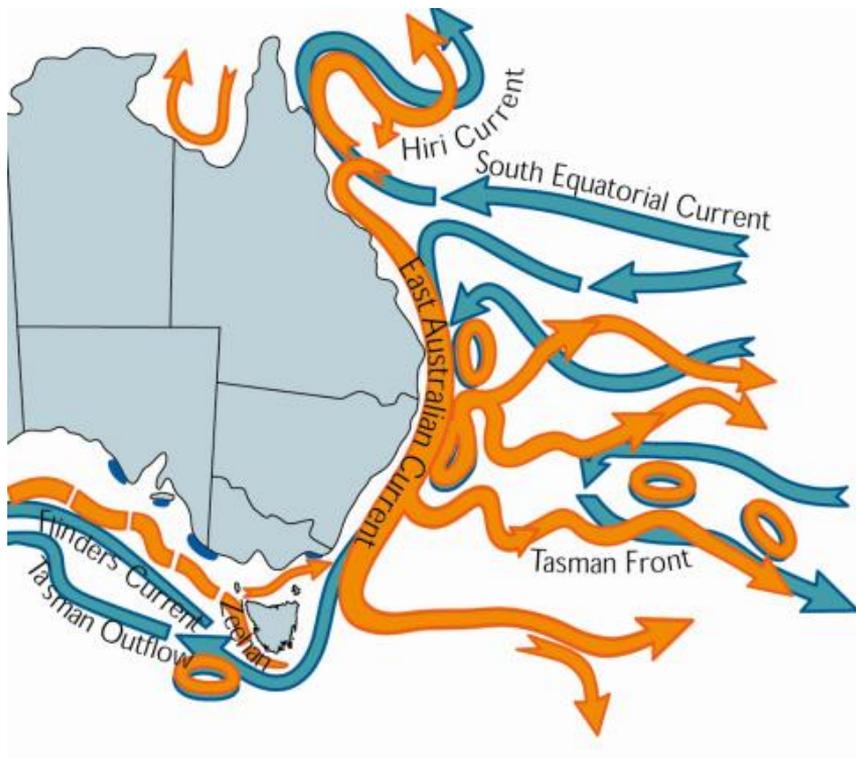
南太平洋风生环流



NGCC: New Guinea Coastal Current; NQC: North Queensland Current

EAC: East Australian Current; SPC: South Pacific Current

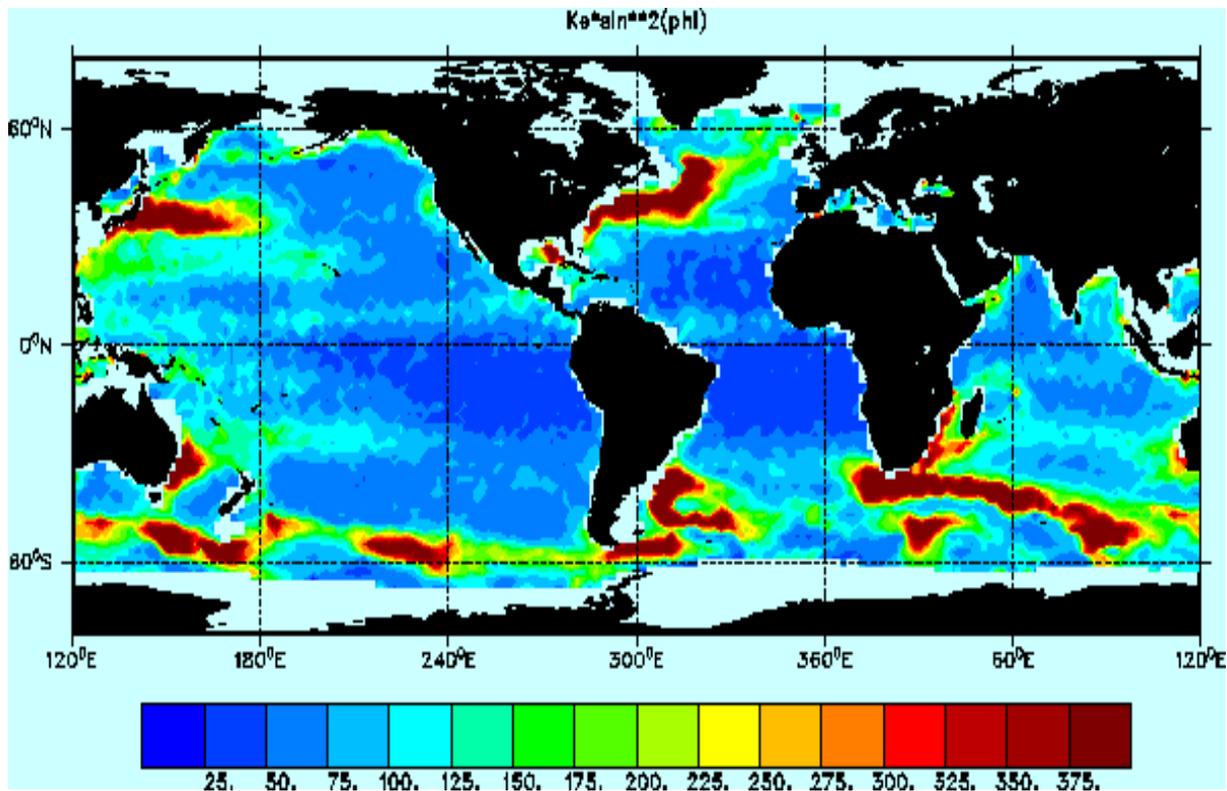
南太平洋风生环流：东澳大利亚海流



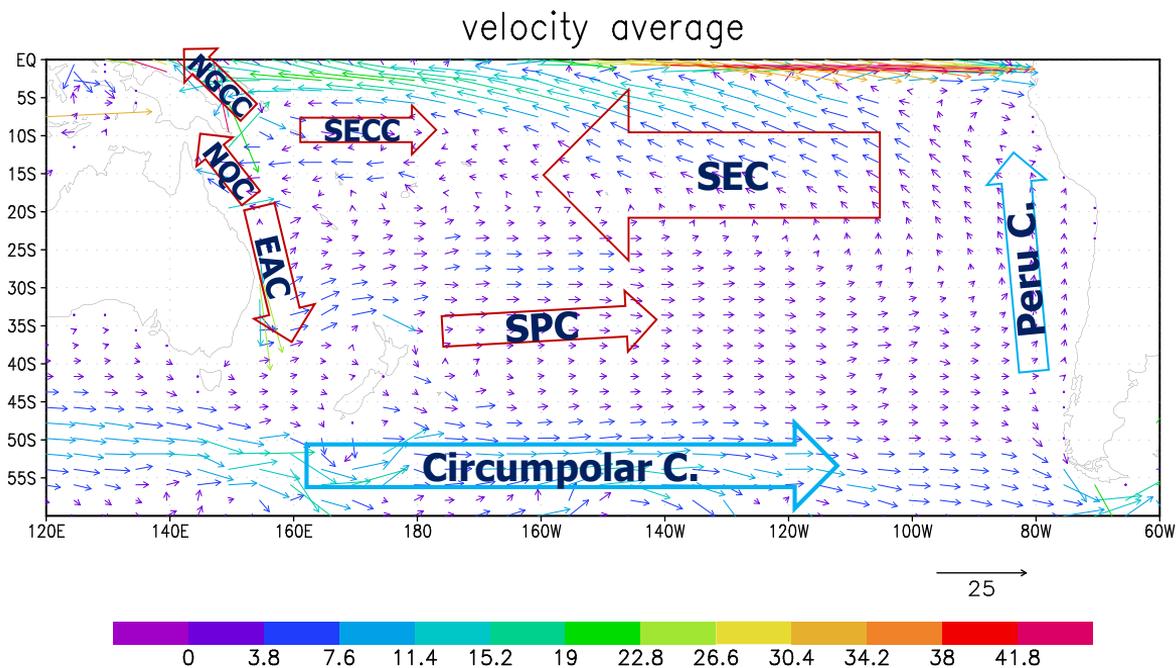
- 相对黑潮和湾流弱
- 流量大约15SV
- 在南纬34度左右离开澳大利亚

海面动能分布

东澳大利亚海流
也是海面动能比
较高的区域



秘鲁沿岸流

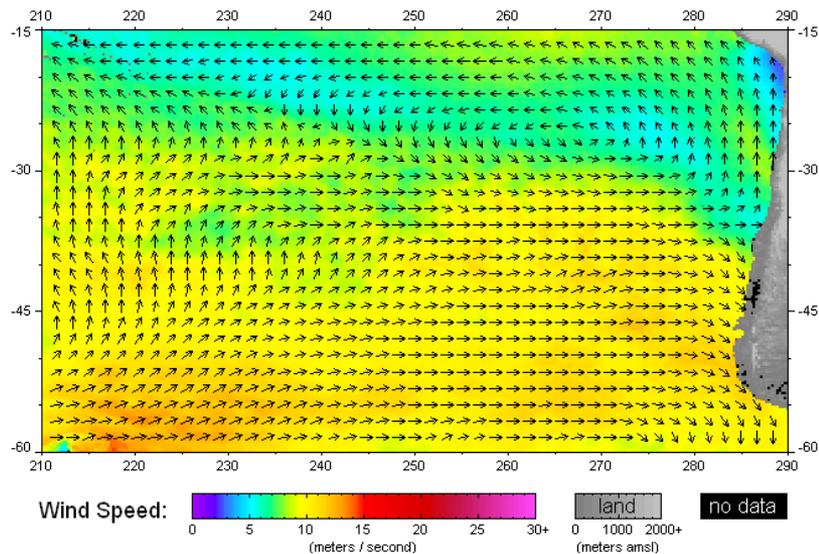


世界著名的上升流区； ENSO现象显著的区域； 生产力最强的海区

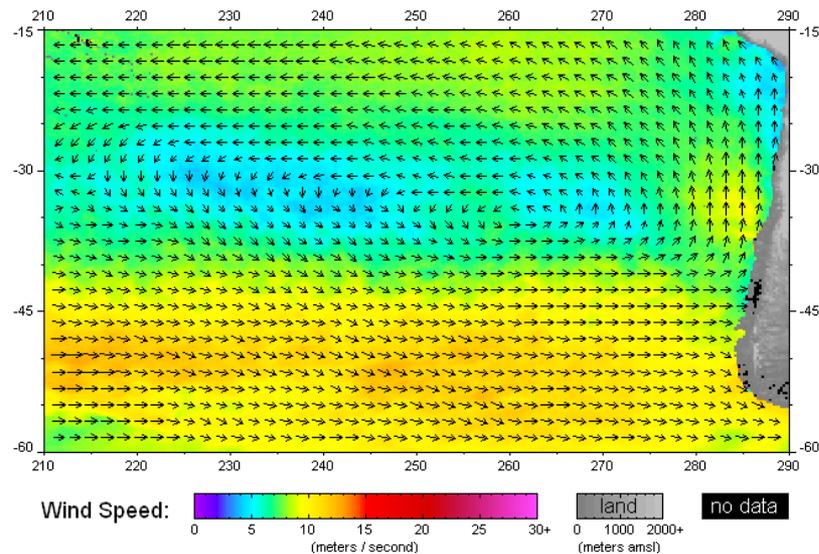
秘鲁沿岸流

全年都为偏南风

QuikScat wind vectors: 2009/08 - monthly average - Pacific, South East

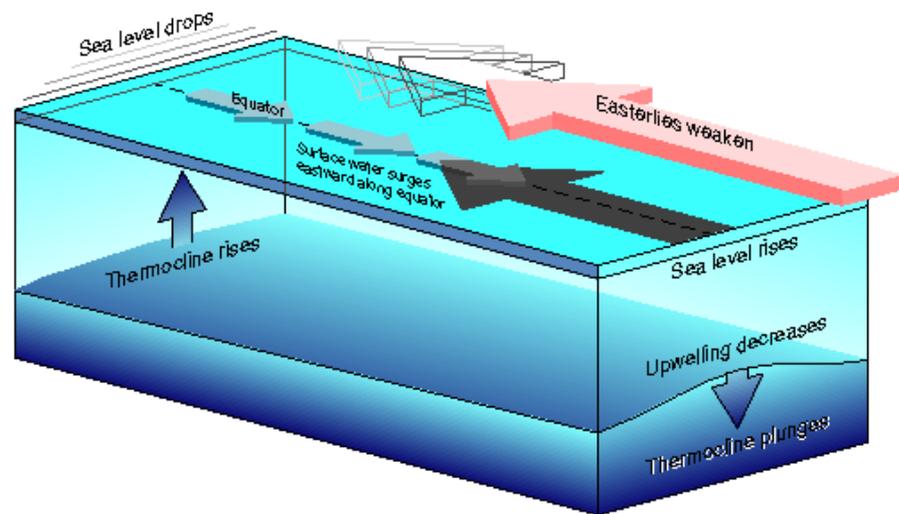
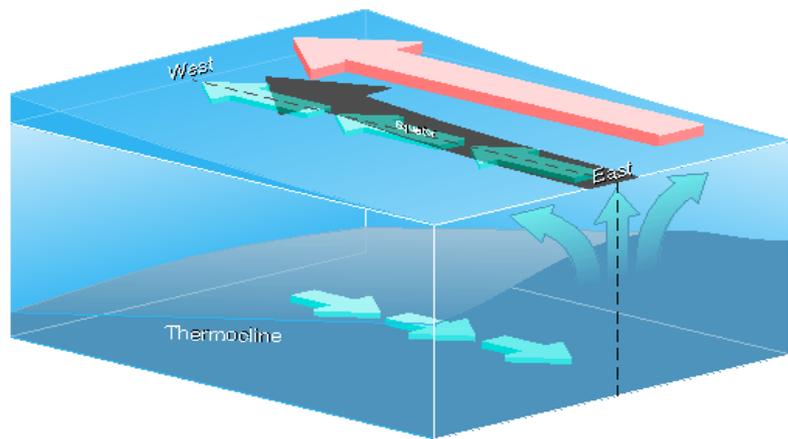


QuikScat wind vectors: 2009/02 - monthly average - Pacific, South East



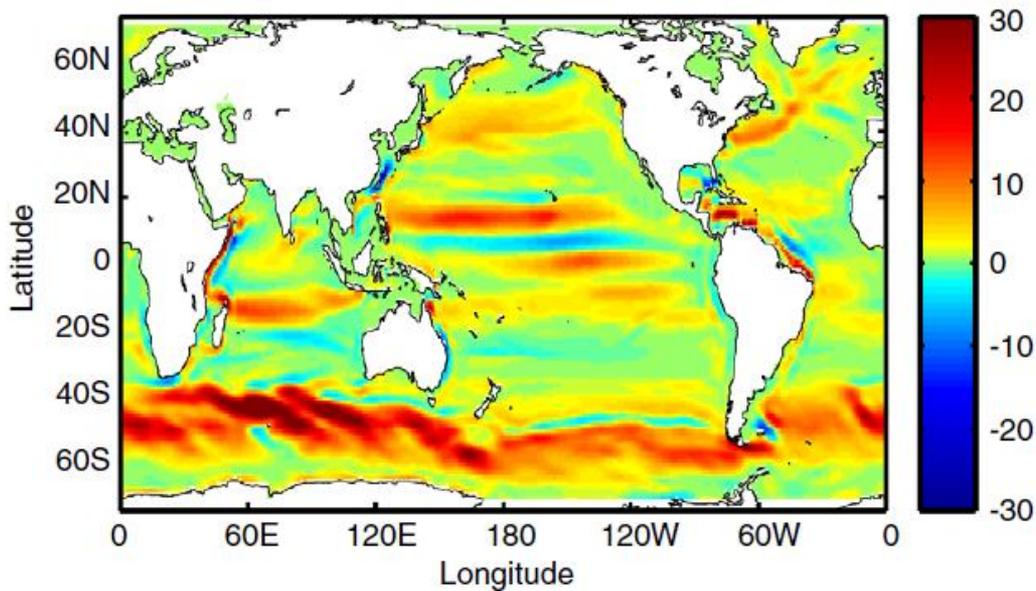
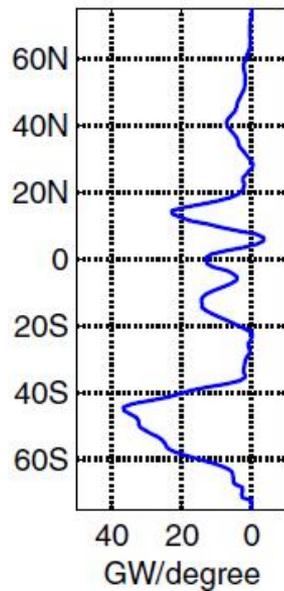
秘鲁沿岸上升流

上升流与厄尔尼诺的关系



南极绕极流ACC

风通过地转流进入大洋的能量

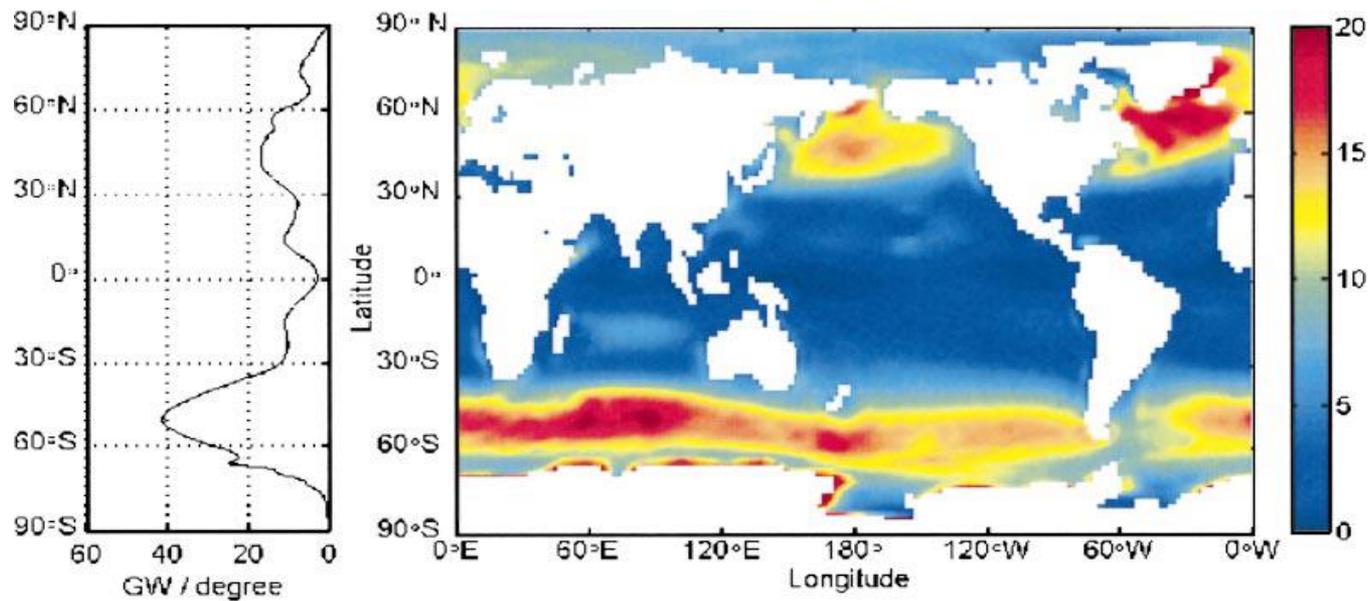


$$P = \langle \tau \cdot v_g \rangle$$

Wunsch, 1998; Huang, et al., 2006

南极绕极流ACC

风通过Ekman流进入大洋的能量

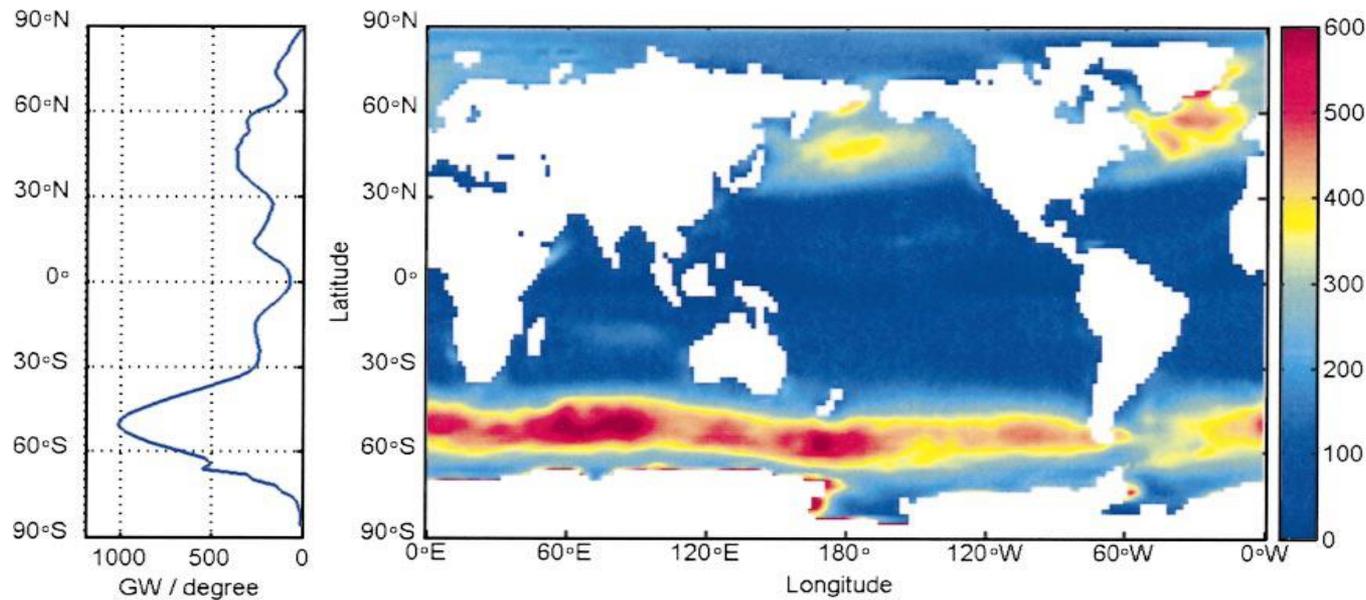


$$P = \langle \tau \cdot v_{ag} \rangle$$

Wang & Huang, 2004

南极绕极流ACC

风通过海浪进入大洋的能量

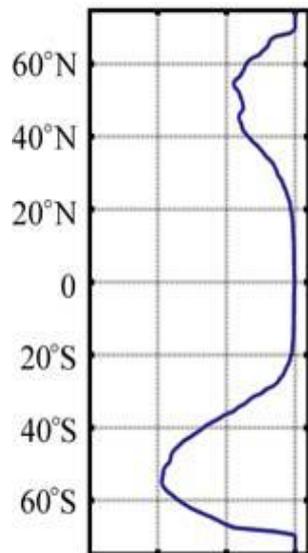


$$P = \tau c$$

Wang & Huang, 2004

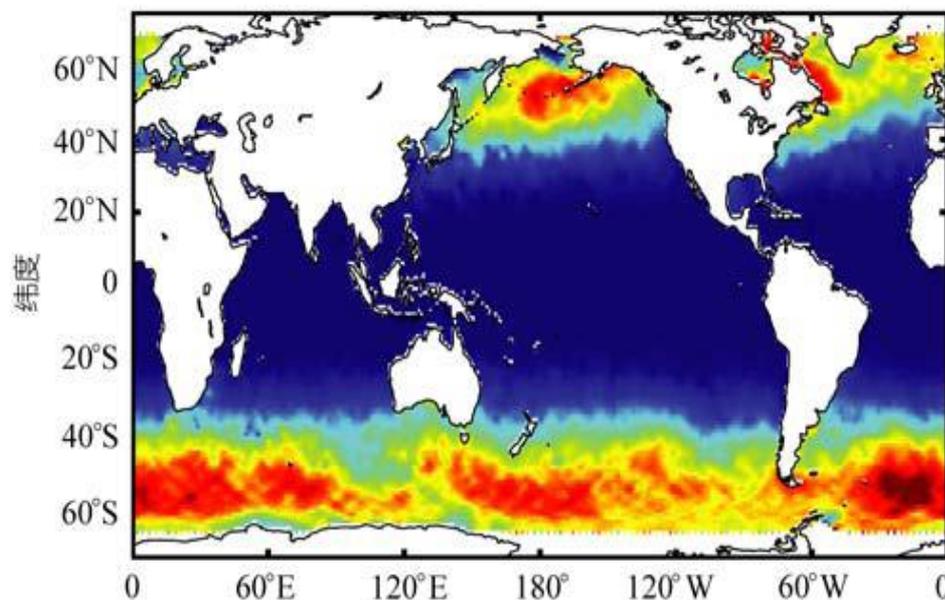
南极绕极流ACC

大气脉动进入大洋的能量



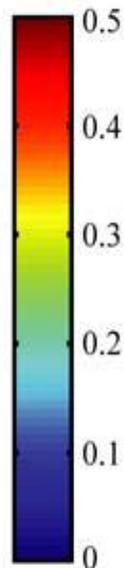
千兆瓦/纬度

(a)



经度

(b)

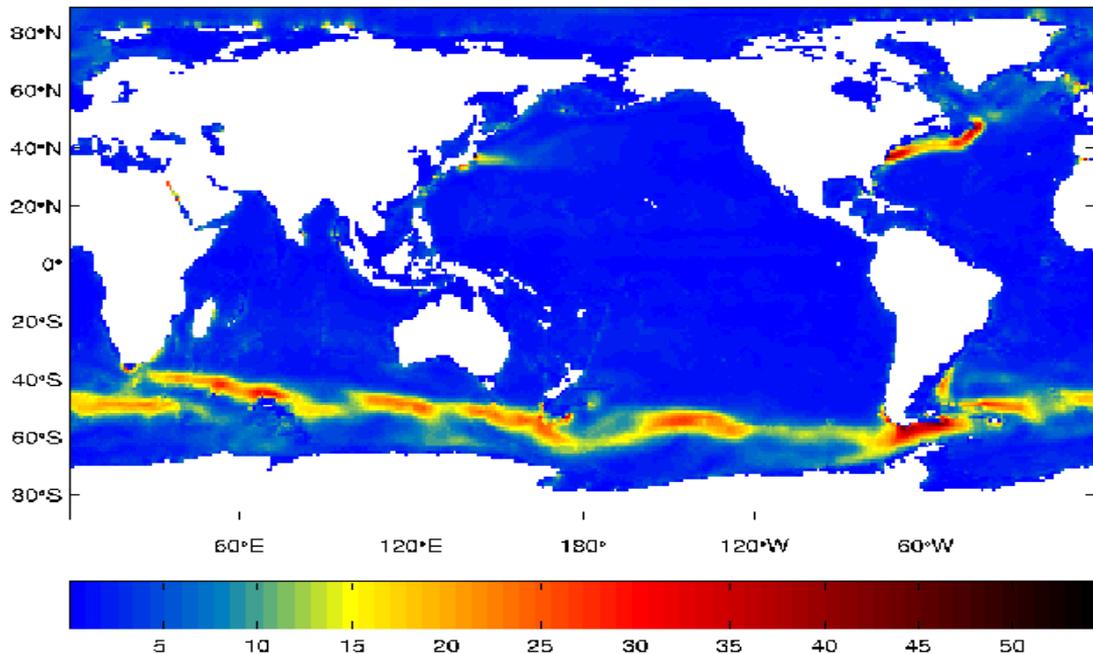


$$P = \langle -pw \rangle$$

Wang et al., 2005

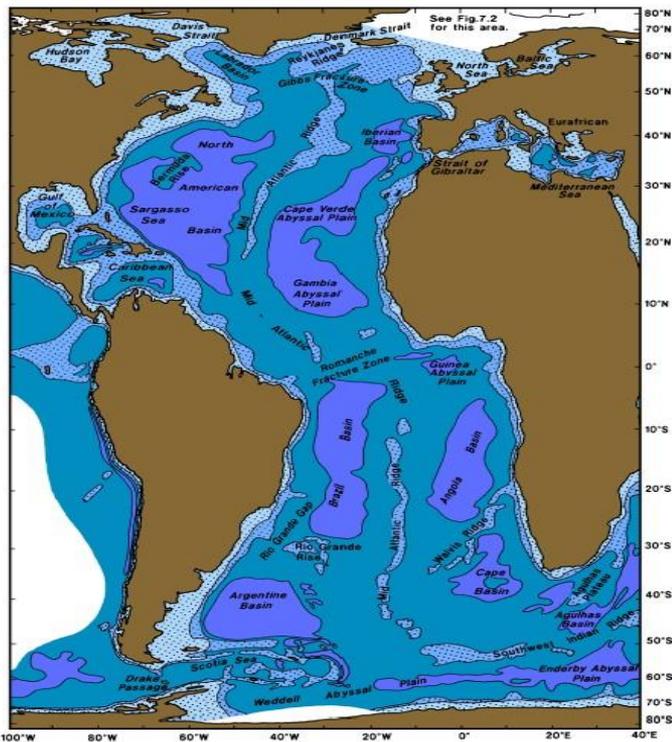
南极绕极流ACC

通过斜压不稳定进入大洋的能量



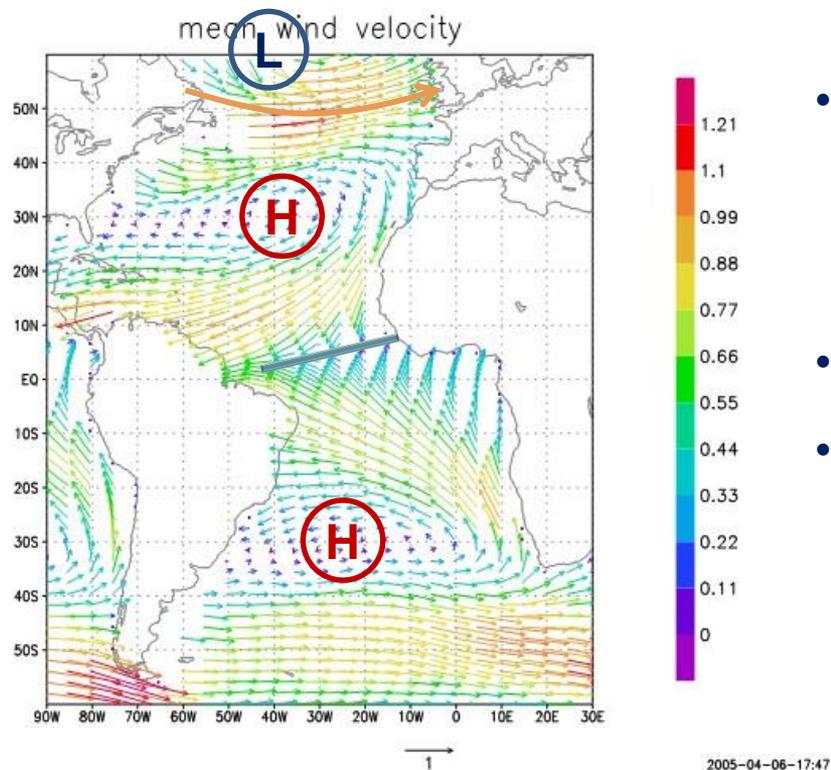
第四节 大西洋环流系统

大西洋的地形



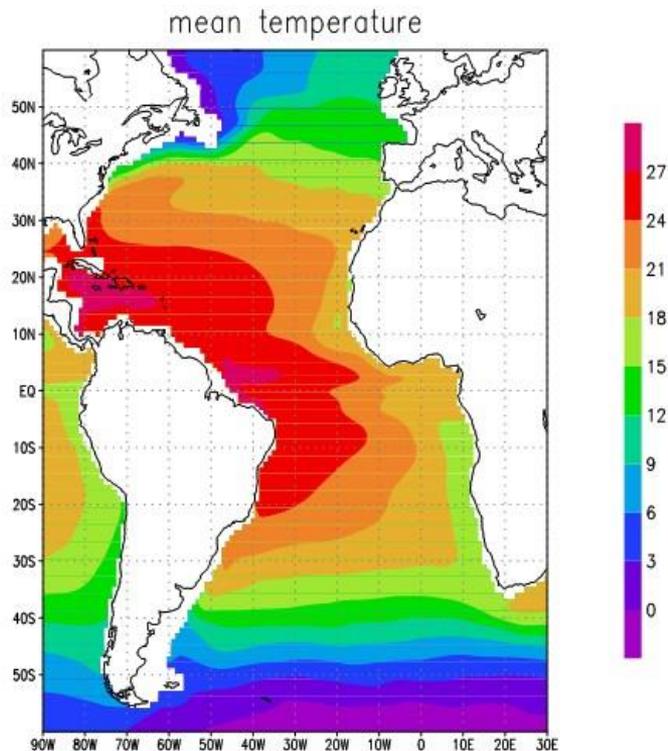
- 狭长呈S型；与北冰洋和南极洲相邻
- 拥有多个边缘海，包括部分“地中海”
- 被大洋中脊平分为东西一系列海盆，并存在断裂带
- 世界第二大洋，南北跨度约为1.6万km，东西最窄处为2848km，最宽处为6400km，面积约为1.1亿km²，占全球面积的20%，整个世界海洋总面积的26%
- 平均深度为3339m，波多黎各海沟最深处达8605m

大西洋平均风场



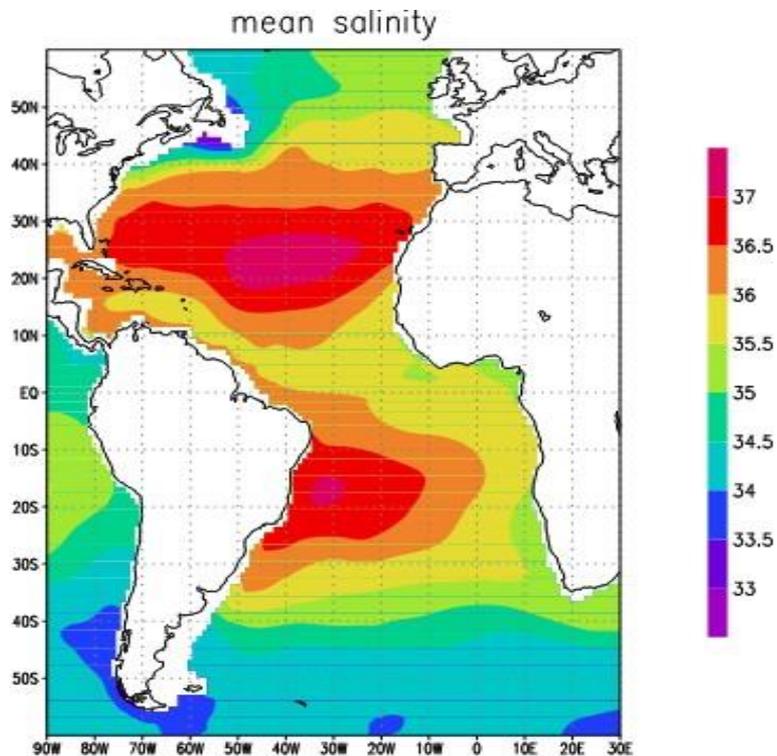
- 南半球西风最强位于 50° S，信风最强位于 15° S，北半球信风最强位于 15° N
- ITCZ位于北半球，呈西南-东北走向
- 风场的分布和地形分布有一定关系，特别是在南半球

大西洋平均温度场



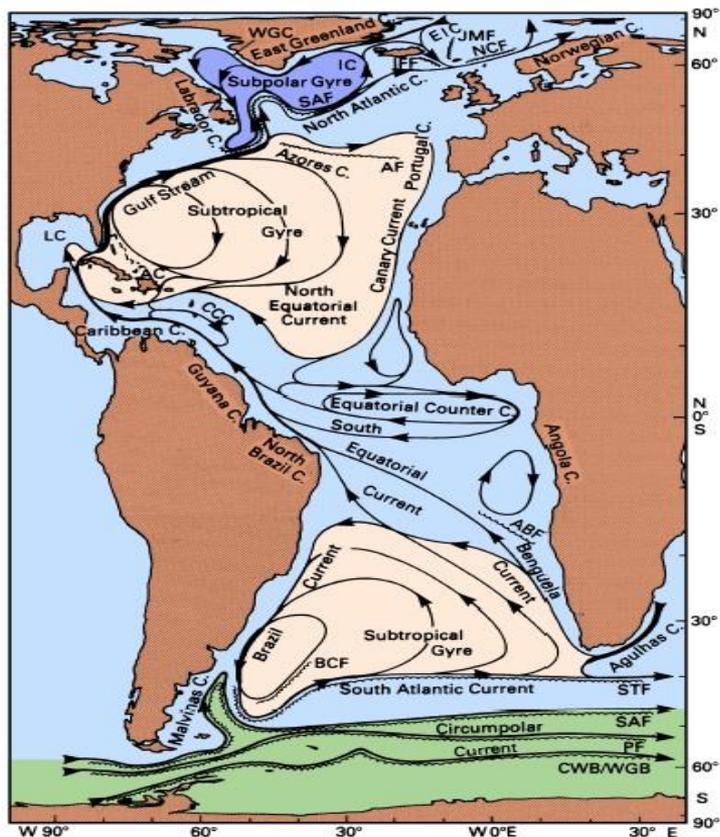
- 热带西大西洋存在一个暖池
- 等温线的分布和岸界形状有关
- 表层平均水温为 16.9°C ，低于太平洋和印度洋，这主要是因为大西洋南北两端畅通，受北冰洋和南极水域的冷水和浮冰影响明显。

大西洋平均盐度场



- 盐度最高的区域在副热带海区，北大西洋基本在大洋中部，南大西洋在靠近美洲的西海岸附近
- 热带西大西洋盐度较高
- 等盐线分布也和岸界有关
- 平均盐度为34.9，高于印度洋和太平洋，这主要是因为大西洋蒸发与降水之差大于其他大洋。

大西洋水平环流



- 赤道流系
- 南北半球副热带环流
- 北半球副极地环流
- 南半球绕极流

East Iceland Current (EIC); Irminger Current (IC)
West Greenland Current (WGC); Antilles Current (AC)
Caribbean Countercurrent (CCC); SAF: Subarctic Front
AF: Azores Front; ABF: Angola - Benguela Front
BCF: Brazil Current Front; STF: Subtropical Front
SAF: Subantarctic Front; PF: Polar Front



热带大西洋流系

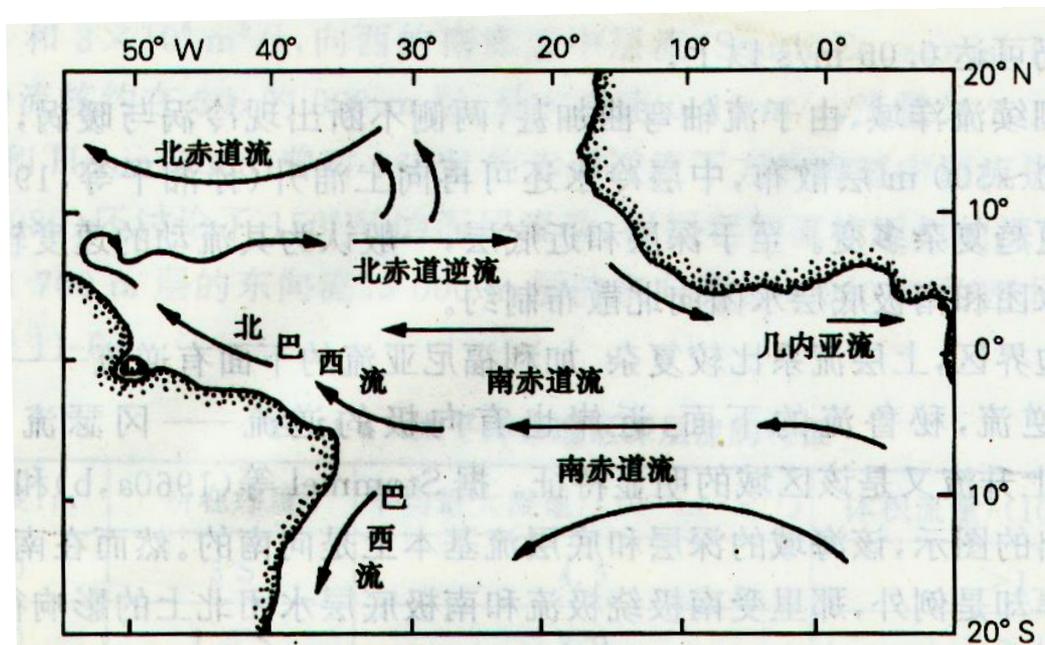
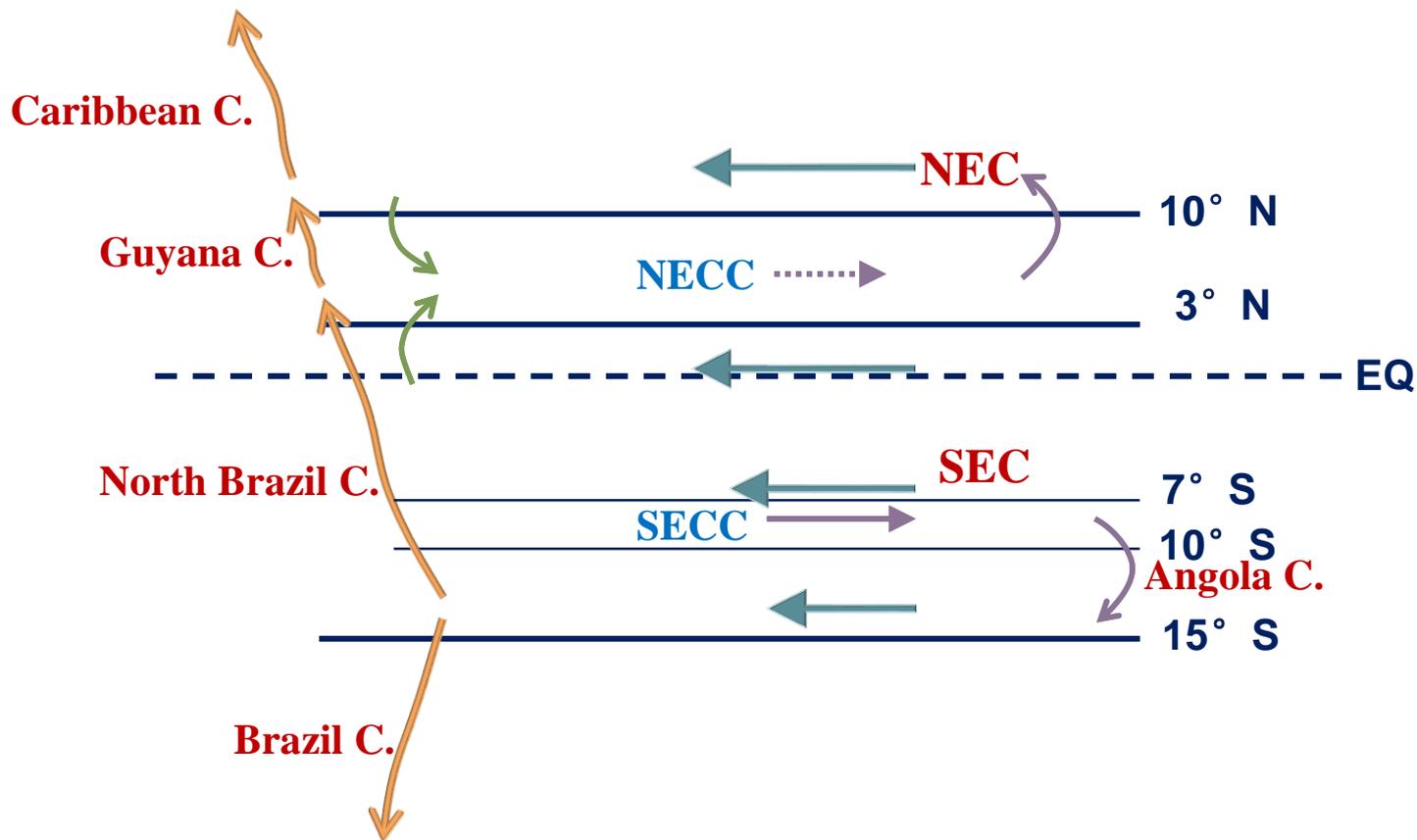


图 11-9 大西洋赤道区上层流系

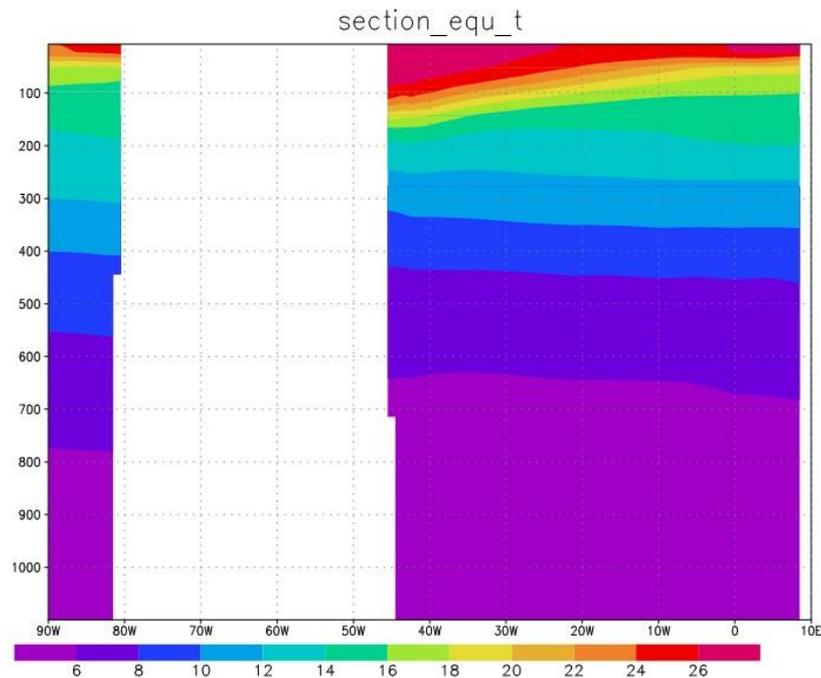
(据 Richardson *et al*, 1986, 1994 等改绘)

热带大西洋流系

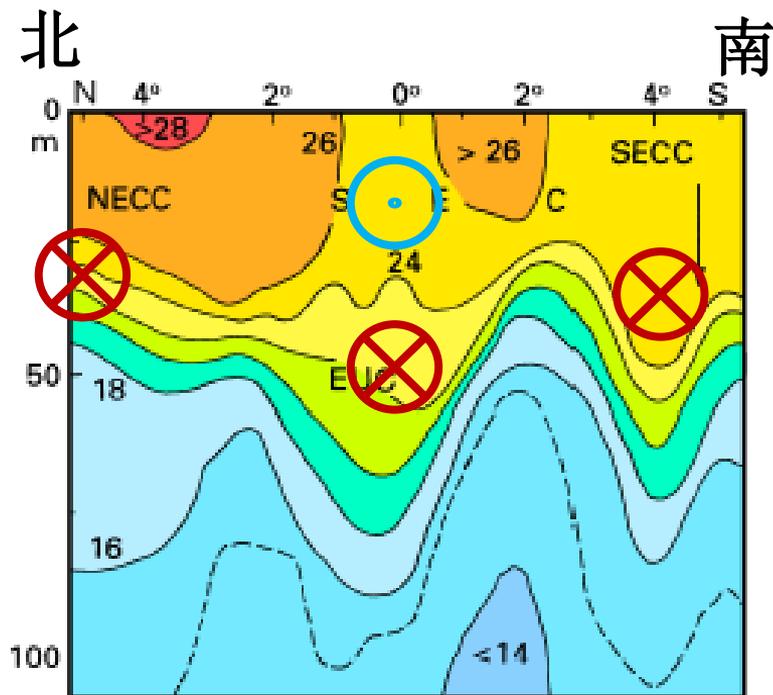


赤道大西洋温跃层

温跃层西深东浅

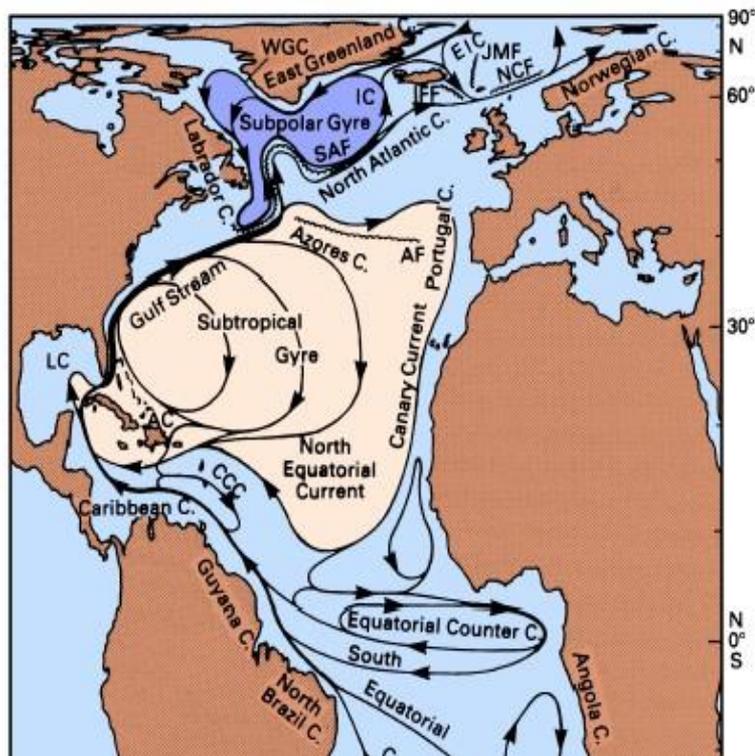


赤道大西洋流系温度垂直结构



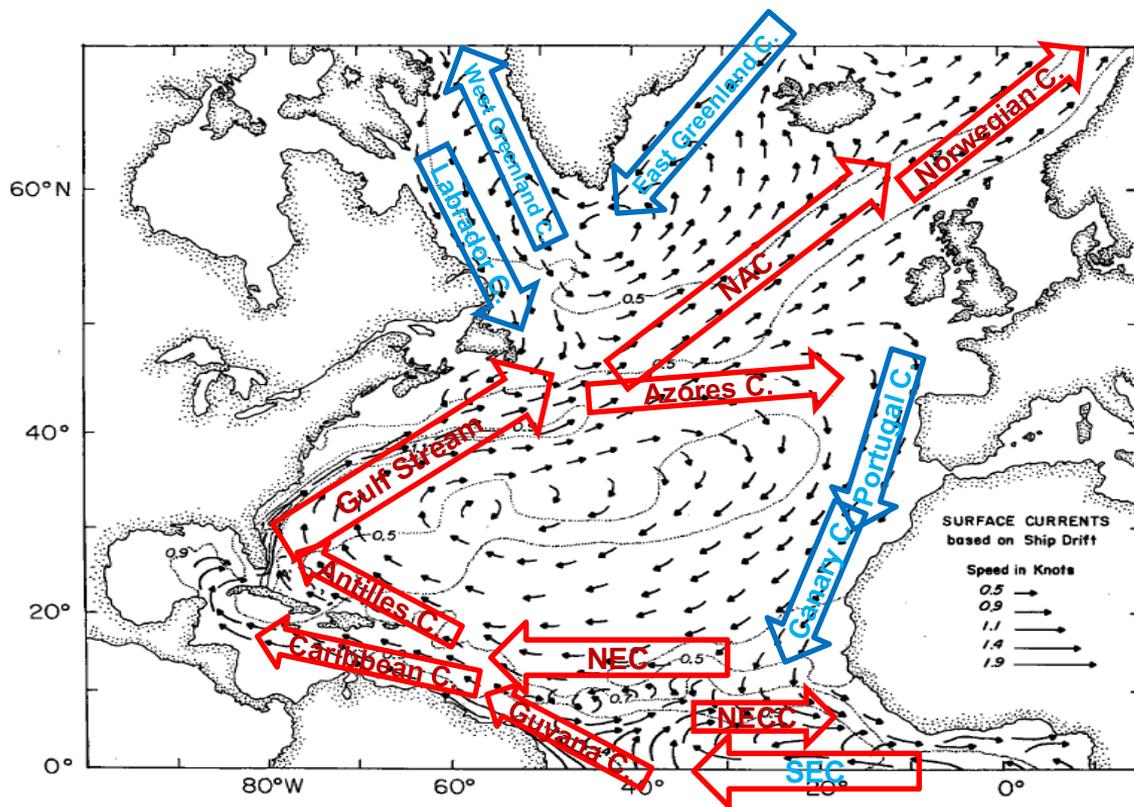
- **EUC**: 赤道附近, 核心深度100m, 流速0.6~1.2m/s, 流量4~15Sv, 西强东弱
- **NEC**: 10°N以北, 流速0.1~0.3m/s;
- **SEC**: 15°S~3°N, 流速0.1~0.3m/s
- **NECC**: 3°N~10°N, 流速0.1~0.3m/s, 季节变化明显
- **SECC**: 很窄很弱, 核心深度超过100m, 最大速度0.1m/s

北大西洋流系



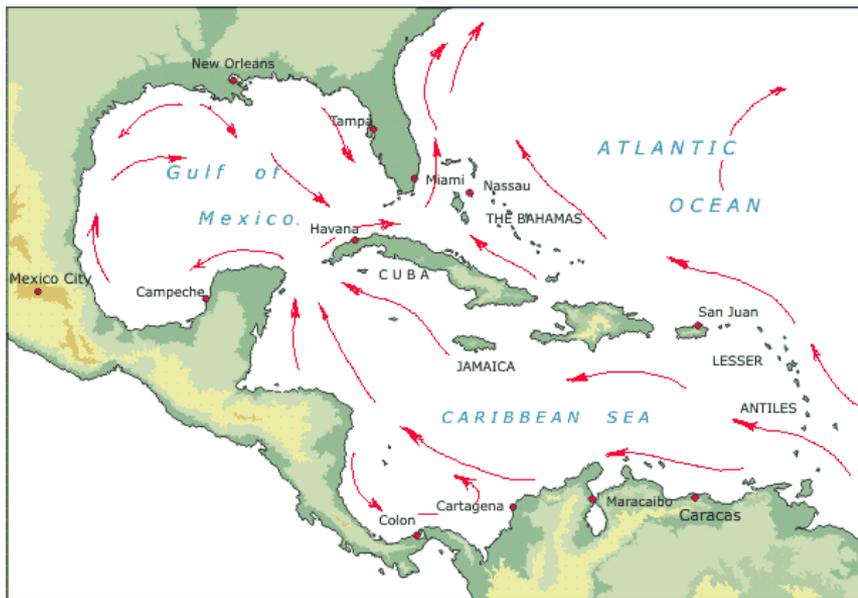
- 北赤道流
- 加勒比海流
- 安的列斯海流
- 湾流
- 亚速尔海流
- 葡萄牙/加纳利海流
- 北大西洋海流
- 东/西格陵兰海流
- 拉布拉多海流

北大西洋副热带环流与副极地环流



北大西洋副热带环流—墨西哥湾流

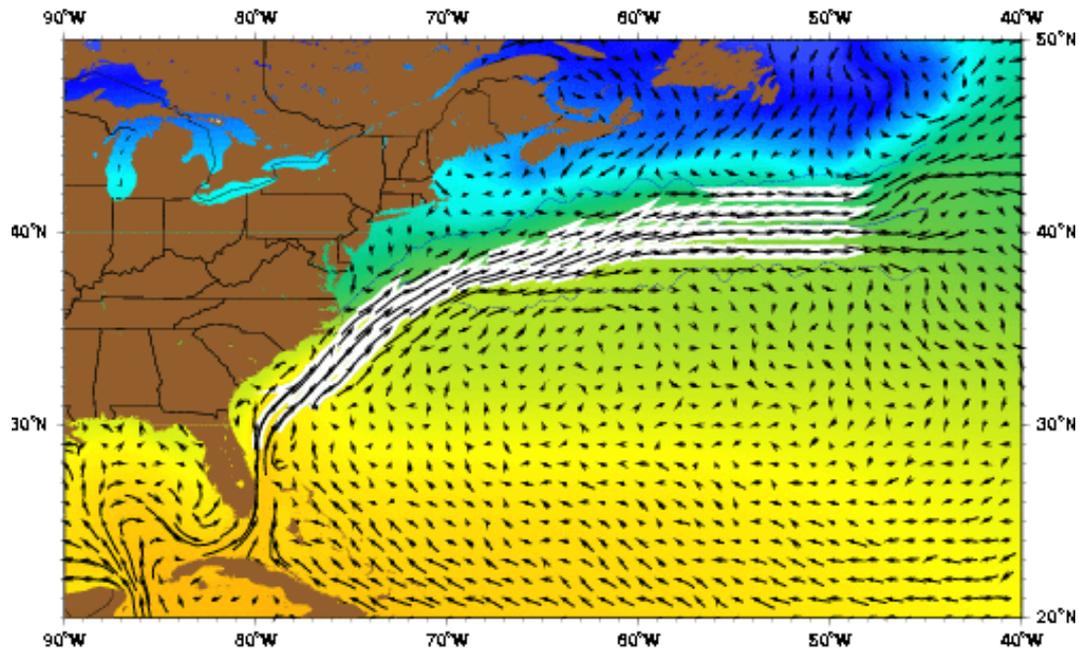
加勒比海与墨西哥湾海流



墨西哥湾油污带已进入海洋环流

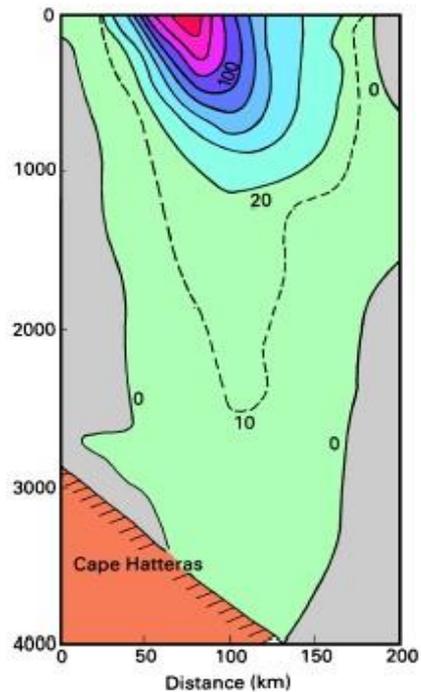
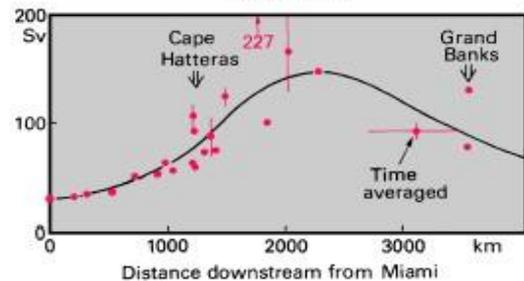
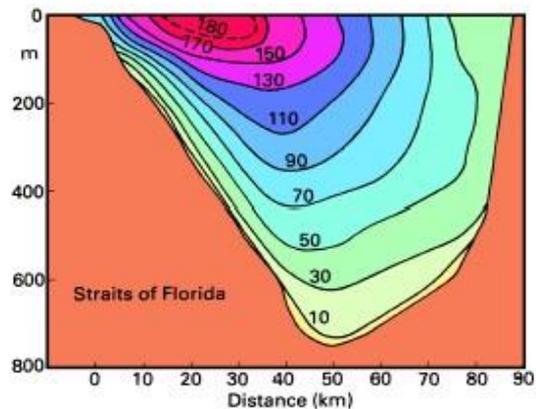


Gulf Stream System



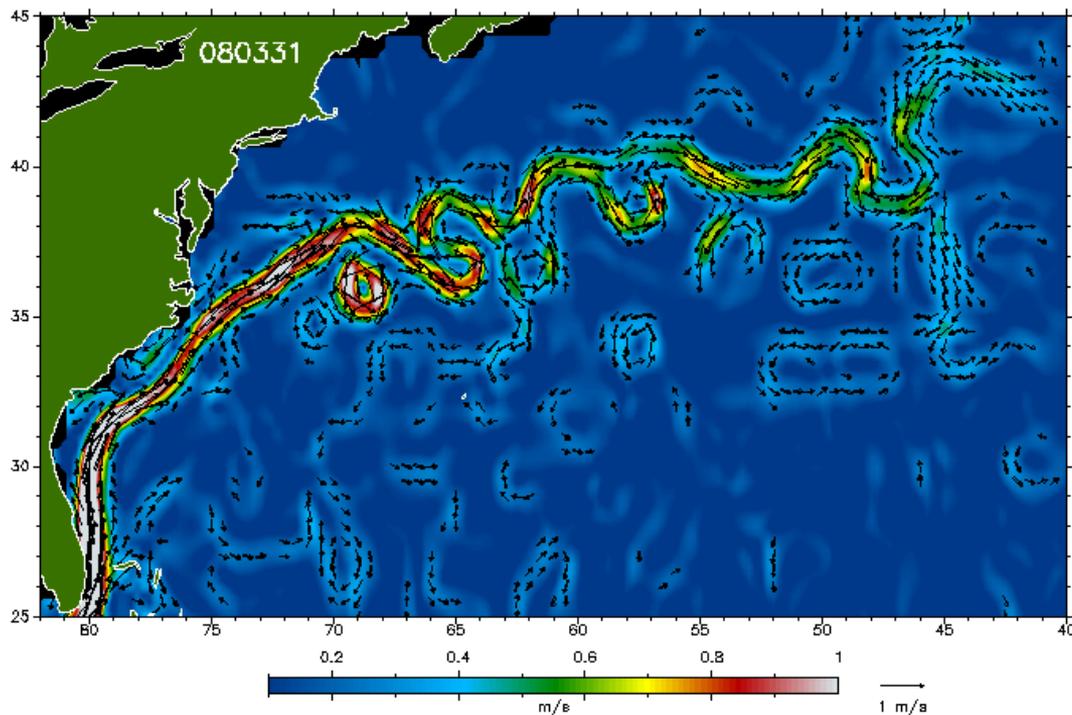
- 世界上流量最大的西边界流
- 流速超过2m/s
- 高温高盐水
- 对美洲和欧洲气候意义重大

北大西洋副热带环流—湾流系统



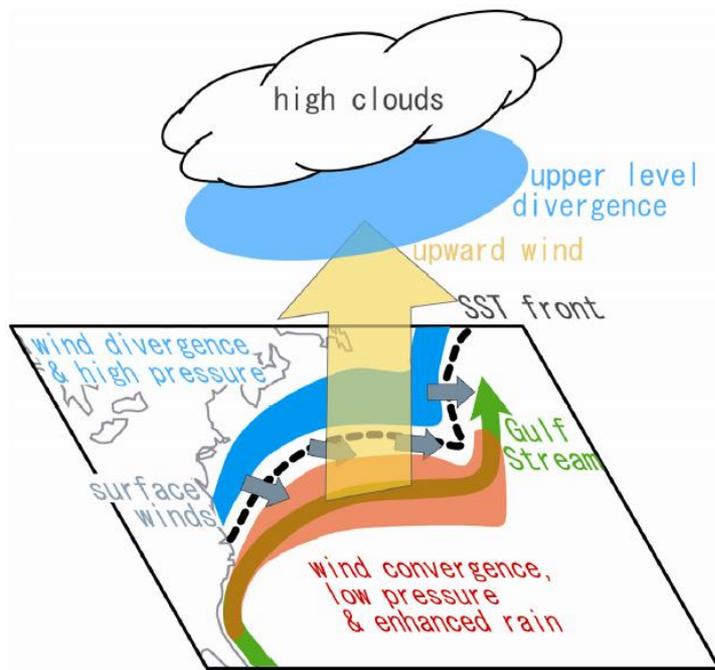
北大西洋副热带环流—湾流系统

与黑潮类似充满涡旋



<http://rads.tudelft.nl/gulfstream/gif/>

湾流系统对大气有巨大影响力



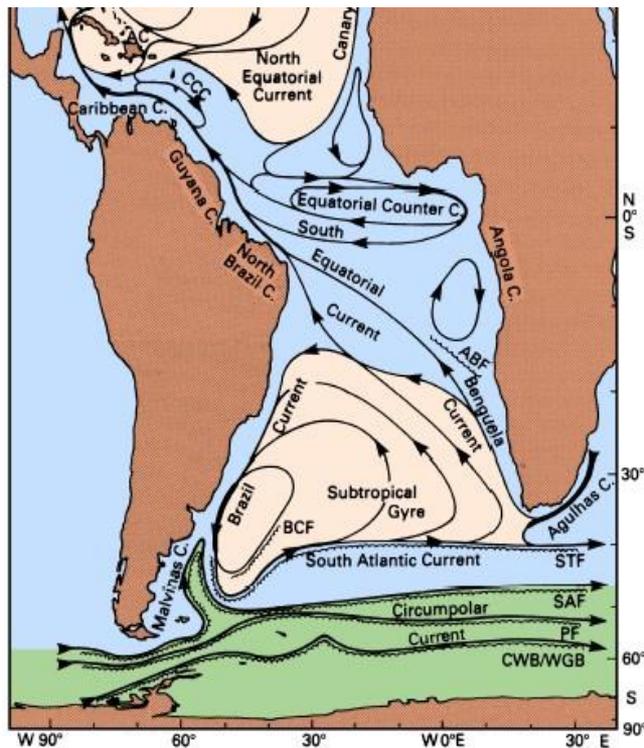
湾流对大气的影响可到达10km高度的对流层
(Minobo et al., 2008)



北大西洋副热带环流—湾流系统

- 湾流在海面上的宽度为100~150km，表层最大流速可达2.5m/s，流轴左侧流速大，沿途流量不断增大，影响深度可达海底；湾流两侧有自北向南的逆流存在。
- 湾流方向的左侧是高密的冷海水，右侧为低密而温暖的海水，其水平温度梯度高达10°C/20km。等密线的倾斜深达
 - 2000m以下，说明在该深度内地转流性质仍明显存在。观测表明在湾流的前进途中，绝大部分区域一直到达海底。湾流的运动处于地转平衡占优势状态。
- 湾流离开哈特拉斯角后，流幅稍有变宽，出现弯曲现象，并逐渐发展，当流轴弯曲足够大时，往往与主流分离，在**南侧形成气旋式冷涡**，在**北侧则形成反气旋式暖涡**。其空间尺度特征数百公里。这些涡有时可能存在几年。涡形成之后沿湾流相反方向移动，有人曾跟踪过一个涡，经过22个月之后又并入湾流中去了。

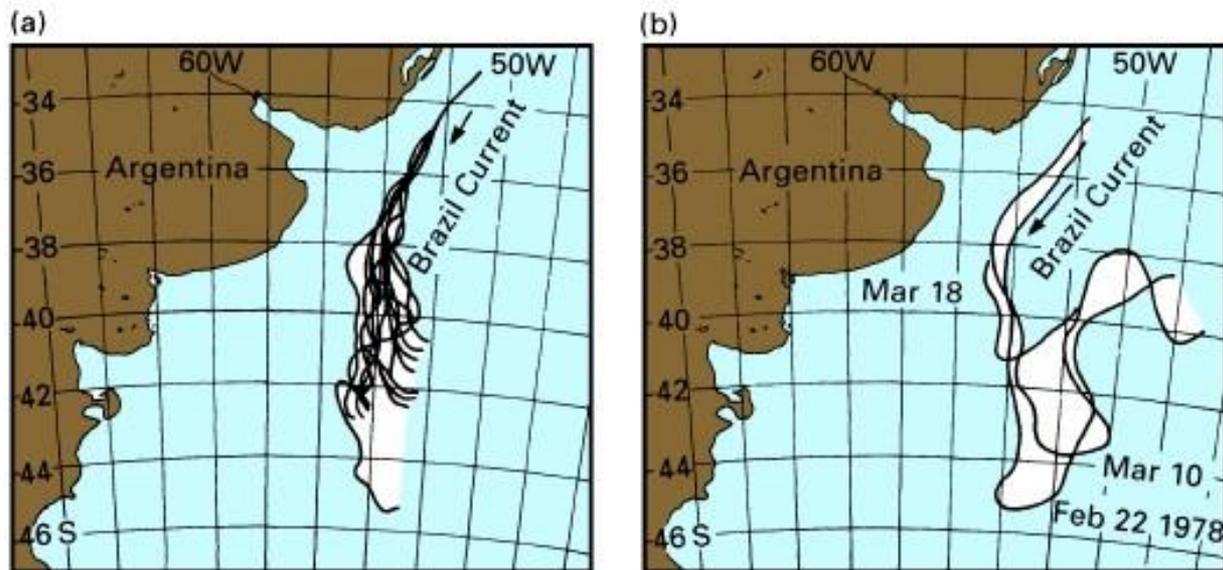
南大西洋流系



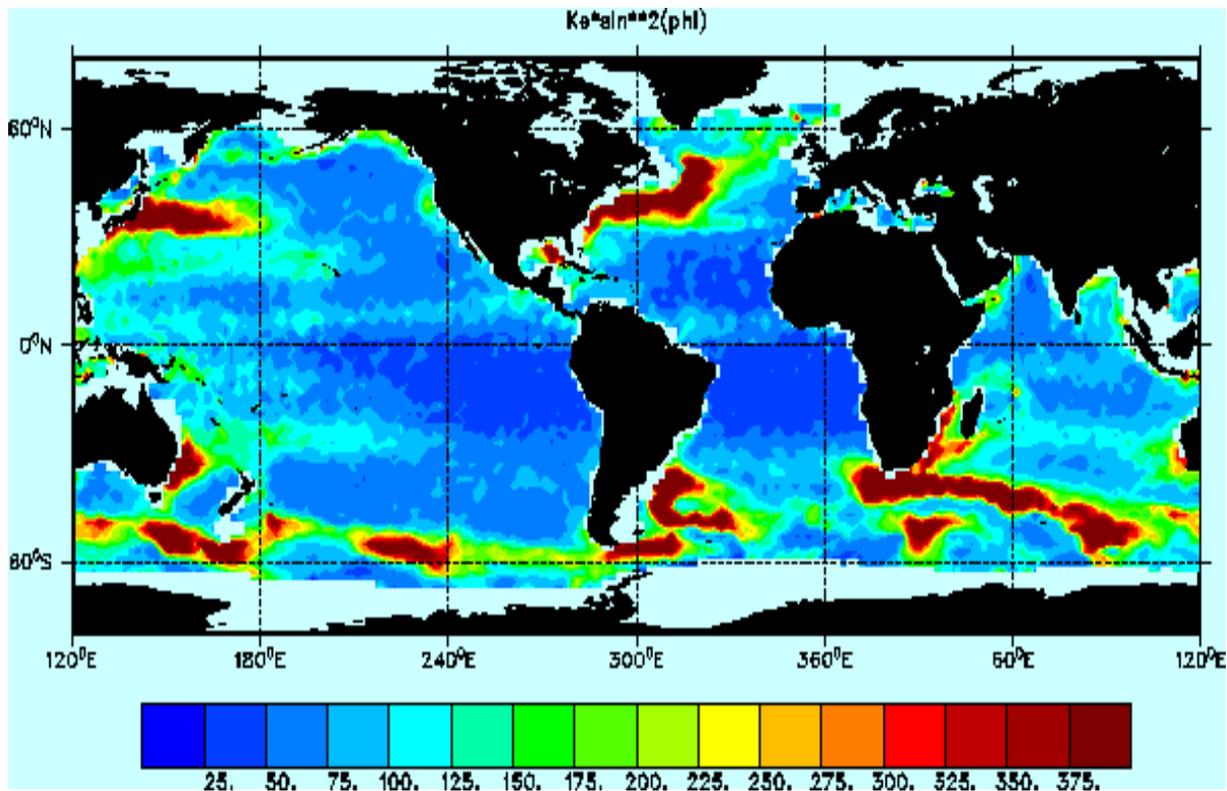
- 南赤道流
- 巴西海流
- 南大西洋流
- 本格拉海流
- 安哥拉海流

巴西海流

西边界流，流速较强，流量小于黑潮和湾流



海面动能分布



北大西洋上层环流

1. **北赤道流**：由东北信风（贸易风）吹送而形成，流轴约在北纬15至20度之间，由东向西的洋流，东起北非西岸，西达加勒比海，平均流速约一节。在西端北进，形成湾流的一部份。
2. **湾流**：主源为南北两赤道流，也就是南赤道流接近南美洲大陆时，分成南北二流，其中北流与北赤道流会合，因地形关系迫使沿圭亚纳海岸，通过小安地列斯群岛，经加勒比海，绕墨西哥湾，从佛罗里达海峡挤出，形成高盐度的洋流，为湾流。其平均流速约为2.5节，有时超过5节，流幅宽达50哩。湾流继续向北美东岸流动，至纽芬兰岛（加拿大东侧）附近，即与寒流拉布拉多流相遇，作为冷暖流交会处，是世界著名的渔场。

北大西洋上层环流

- 北大西洋流：**在湾流的末端，受到偏西风吹拂而生成的洋流，大部分主流向挪威海岸，途中分南北二支，北上的洋流在英伦三岛与冰岛间转向东北，入挪威海。南下的洋流在亚速尔群岛向右转，形成加纳利海流。
- 加纳利流：**北大西洋流在末端南下后，抵达加纳利群岛附近，复转流向西南，它的末端又接到北赤道流，形成完整的环流。
- 拉布拉多流：**为自拜芬湾（Baffin bay）经戴维斯海峡（Davis strait）南下的寒流，在纽芬兰外海与湾流相遇，就潜降于湾流之下，而成为潜流。拉布拉多流会从极地地区夹冰山而南下，航行船只应加注意。

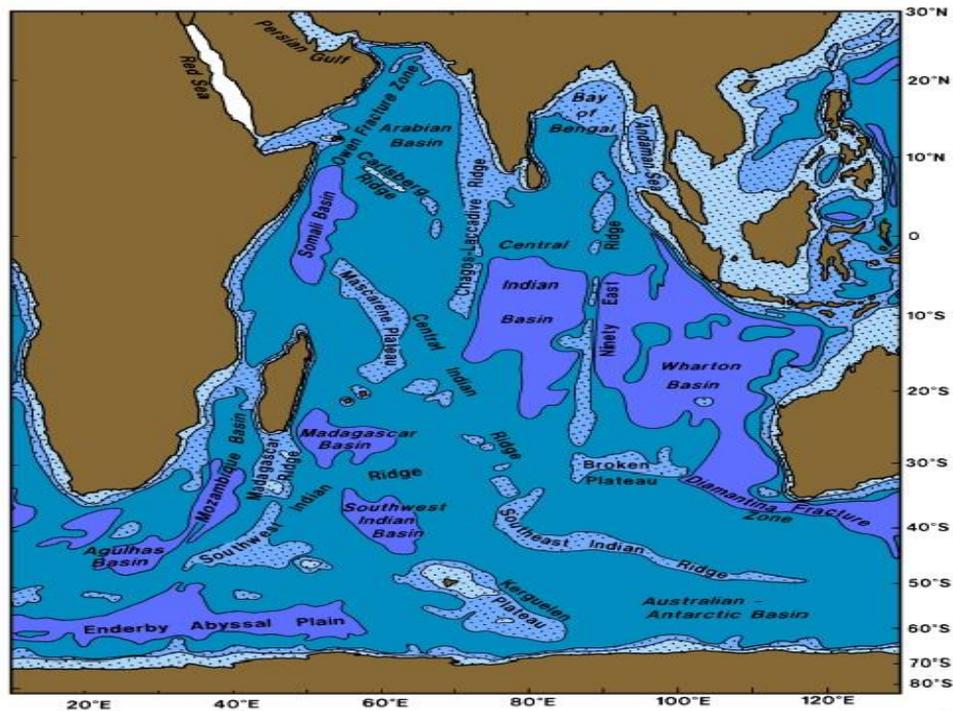
南大西洋上层环流

1. **南赤道流**：赤道从东向西的洋流，流轴在南纬10-15度之间，流幅宽度约270哩，流速在中洋脊最快，约有3节。流到巴西东北外海时分为二支，一支沿南美东北海岸向西北流去，流入加勒比海，成为湾流的一个源泉；另一支沿南美洲东岸南下，为巴西洋流。
2. **巴西洋流**：南赤道流沿南美洲东岸南下的暖流，流速约1.5-3节，从此以后分支向左旋转，末端与沿阿根廷海岸北上的福克兰流相遇后，再汇入西风漂流。
3. **西风漂流**：与南太平洋的西风漂流相同。南美洲南端与南极大陆格拉汉半岛间的海域通道有限，在此流速最高，约为2-3节，过此之后为开阔的南大西洋面，海流流幅较大，抵达非洲好望角前，逐渐转向东北，而成为本格拉流。
4. **本格拉流**（Benguela current）：南大西洋东侧重要洋流，沿南非西岸北上，与南太平洋的秘鲁洋流相似，流抵南纬17度左右，即逐步向西转向，越过南纬6度后，向西汇入南赤道流。
5. **福克兰流**：西风漂流通过南极大陆与福克兰岛间，沿南美东岸北上的寒流。



第五节 印度洋环流系统

印度洋的地形



- 印度洋北部的海盆较小，基本位于热带
- “入”字型大洋中脊，“L”型海岭
- 与太平洋通过印尼贯穿流相连

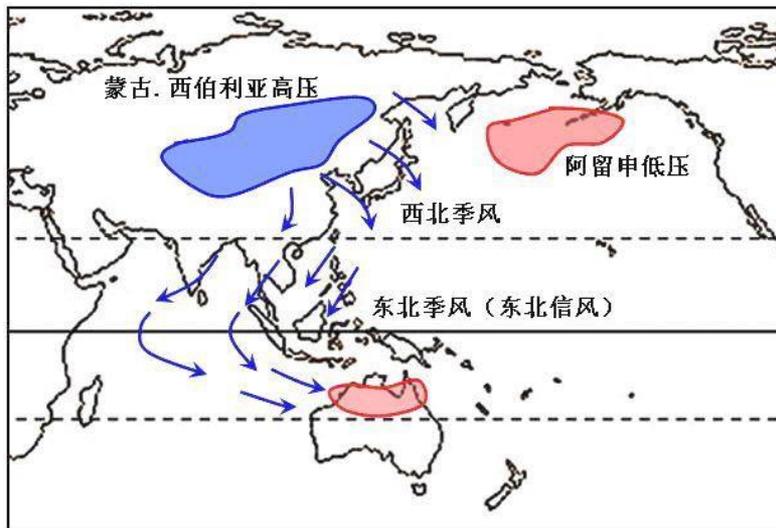


印度洋基本状况

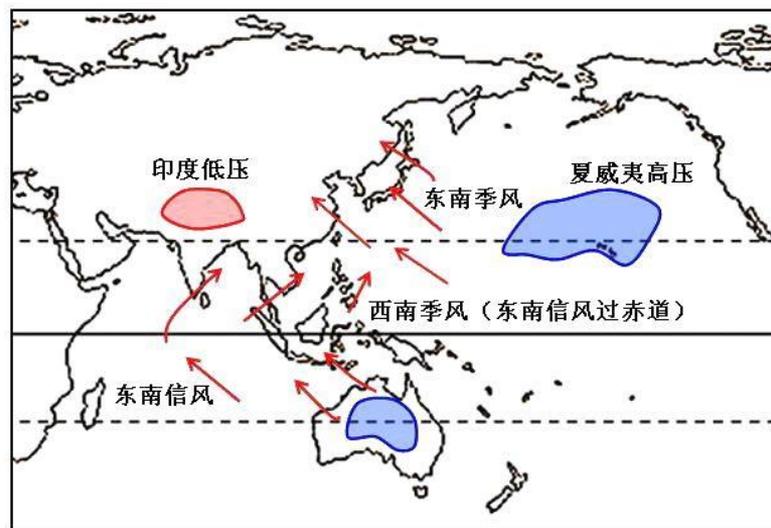
- 世界第三大洋，面积约为7491万km²，东西最宽处约为10000km，南北最长处约为9600km，占整个世界海洋总面积的21.1%
- 平均深度为3897m，最大深度为蒂阿曼蒂那海沟（Diamantina Trench），达8047m
- 表层平均水温为17.0°C，低于太平洋而高于大西洋。
- 平均盐度为34.76，低于大西洋而高于太平洋

印度洋气压场

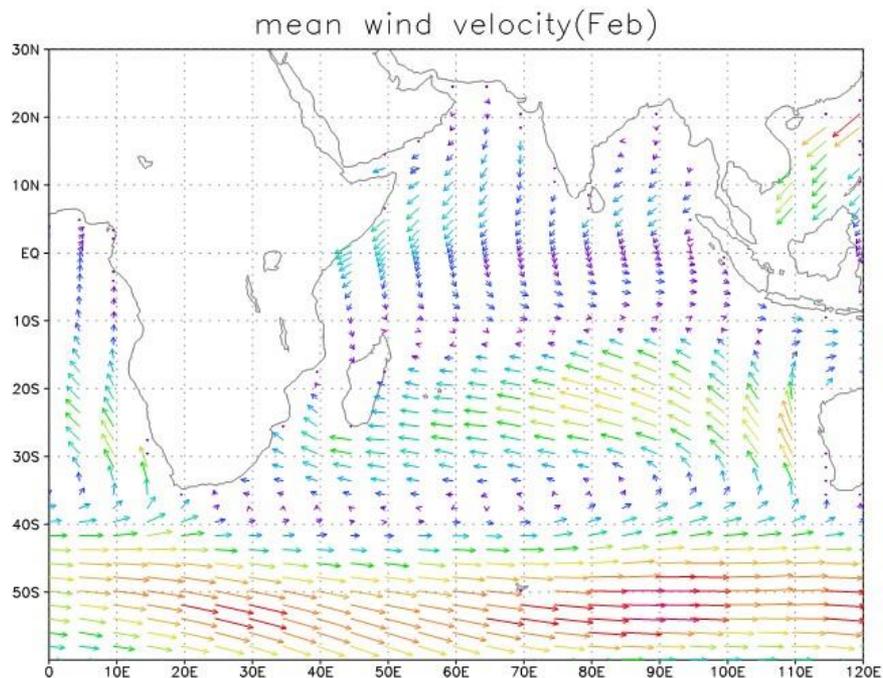
冬季



夏季

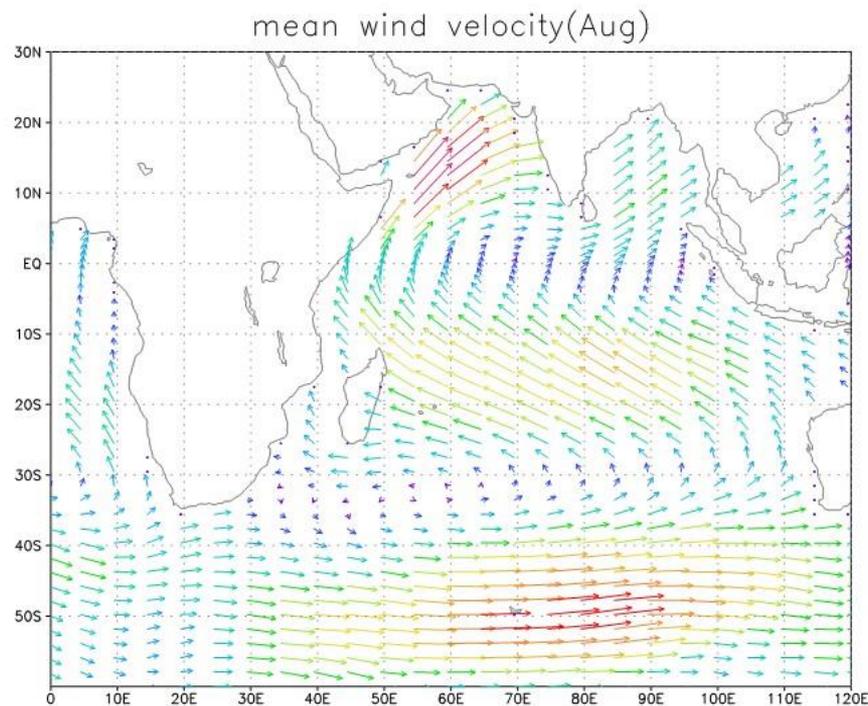


印度洋冬季风场



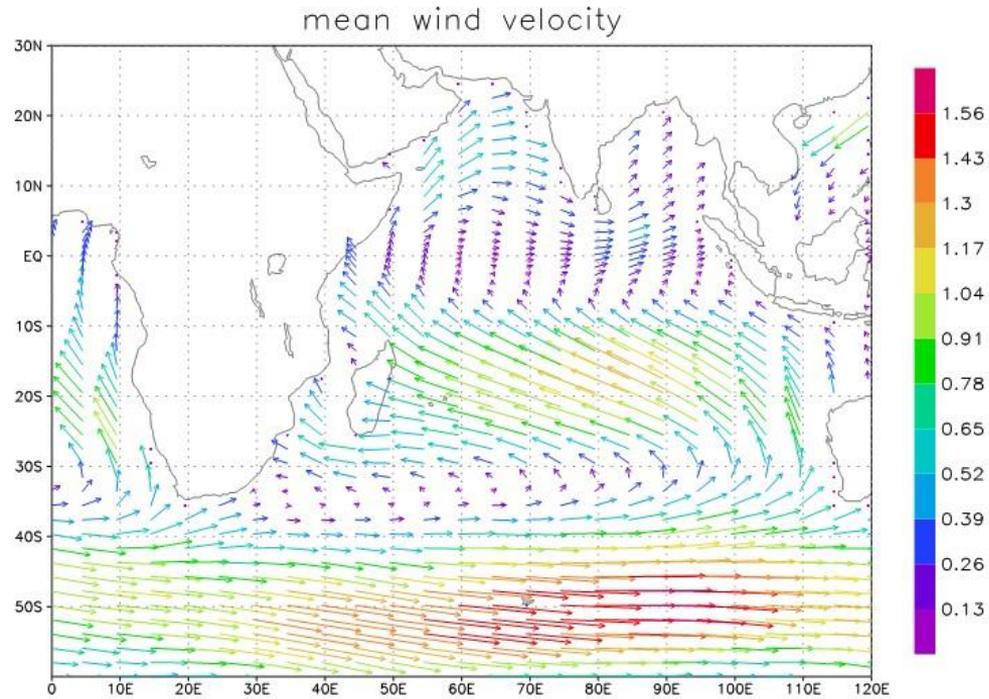
- 北半球盛行东北季风
- ITCZ、无风带位于赤道以南 (5°S)
- 北半球信风很弱，南半球信风较强
- 澳大利亚西北部盛行西南风

印度洋夏季风场



- 北半球盛行西南季风，信风消失
- 沿非洲东岸急风
- 30°S以北风存在向北分量
- ITCZ季节变化不大
- 南半球信风最强（10°S-20°S）

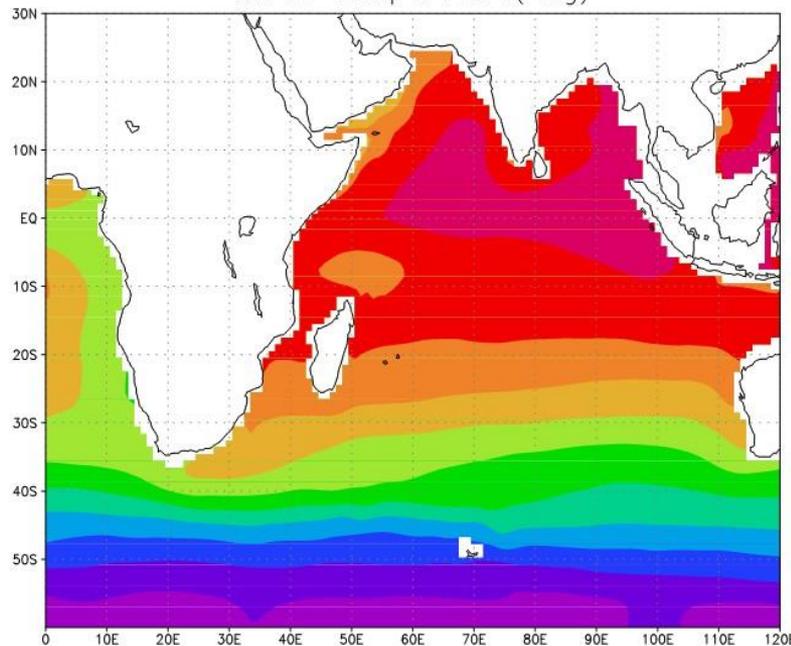
印度洋年平均风场



印度洋季节平均海面温度

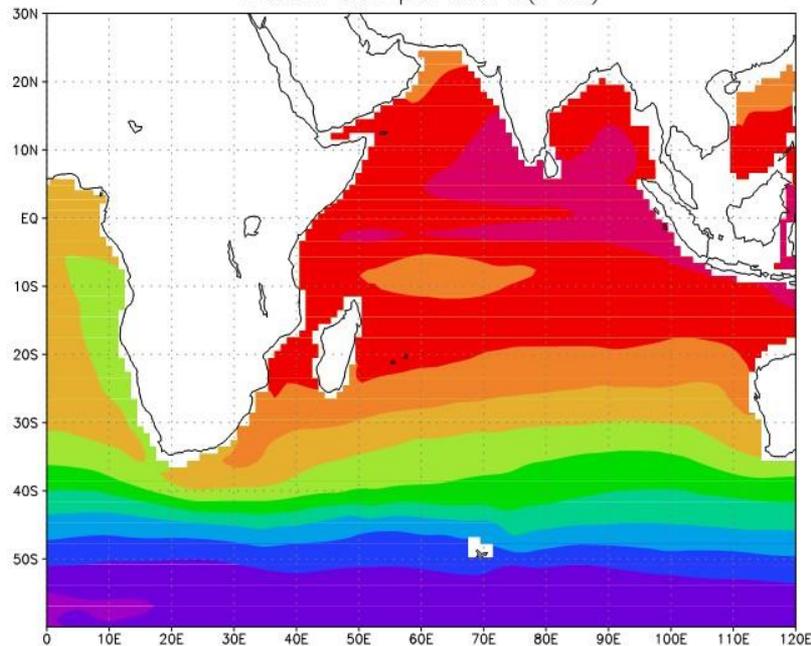
夏季

mean temperature(Aug)



冬季

mean temperature(Feb)

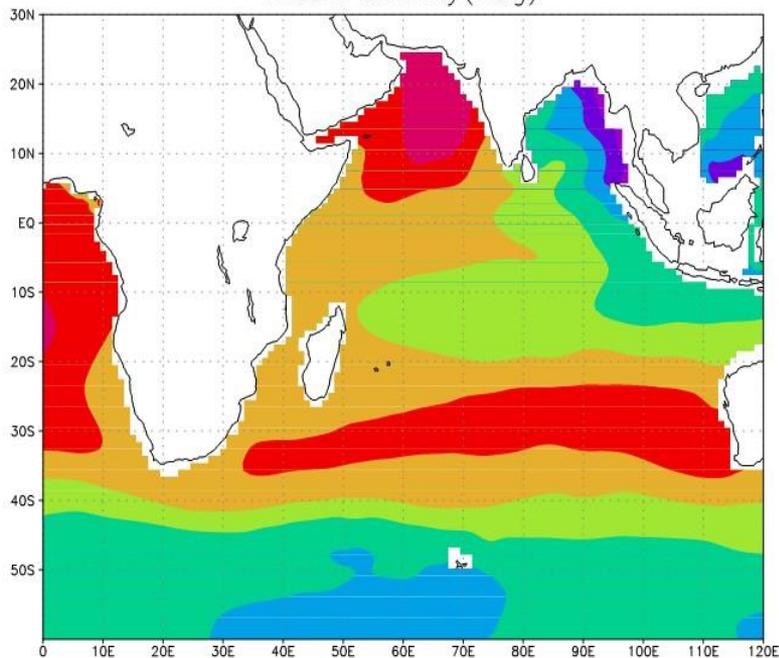


表层水温季节变化不大；暖池分布在热带东印度洋

印度洋季节平均海面盐度

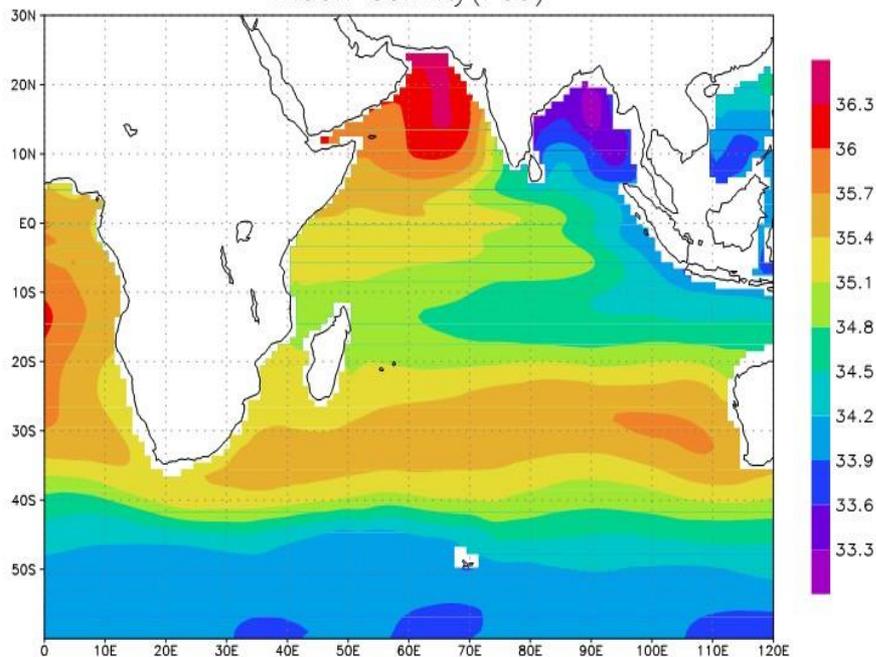
夏季

mean salinity(Aug)



冬季

mean salinity(Feb)

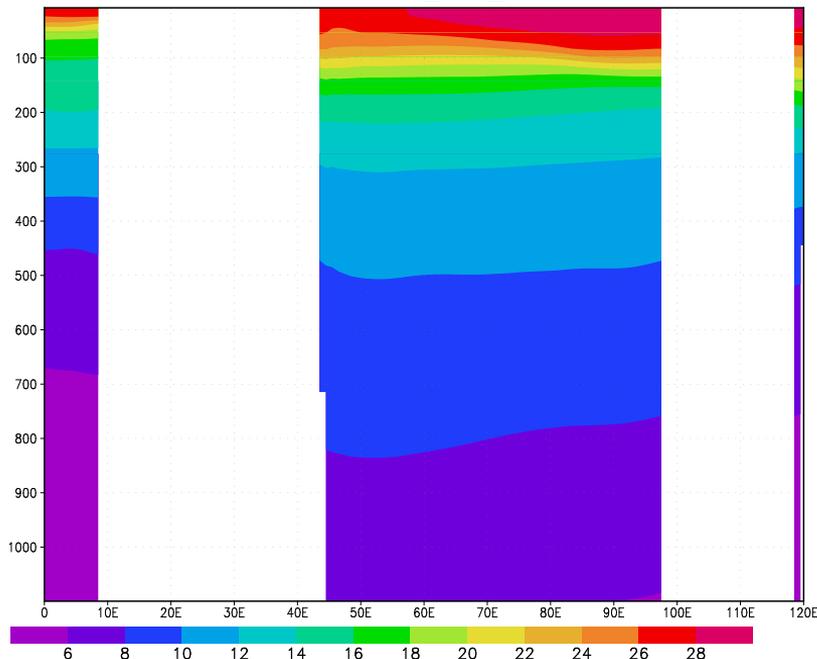


北半球盐度最高的地方在红海和阿拉伯海；南半球盐度最高的地方在副热带海区

赤道印度洋温度断面

温跃层东深西浅

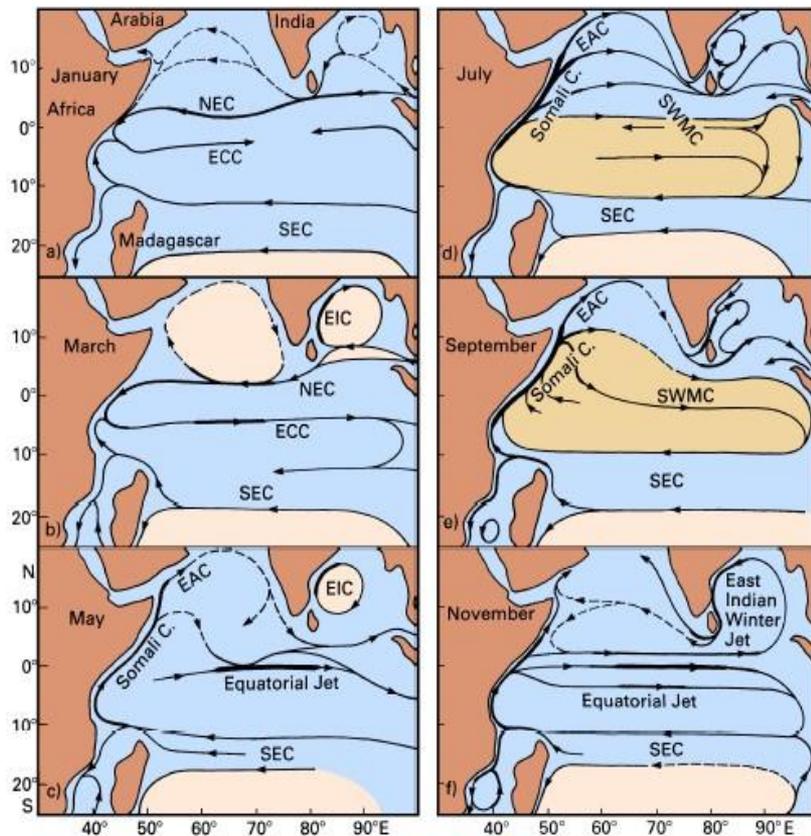
section_Equ_t



GrADS: COLA/IGES

2005-04-07-17:39

赤道印度洋流系季节变化



1-3月: NEC: 0.5~0.8m/s, 2° S~5° N

ECC: 0.5~0.8m/s, 70° E以西

SEC: <0.3m/s, 8° S以南

5月: 赤道急流: >0.7m/s; 赤道外: <0.2m/s

7-9月: SWMC: 0.2~0.3m/s, 5° S以北;
SEC: 6° S以南

11月: 赤道急流: 1~1.3m/s

ECC: Equatorial Countercurrent

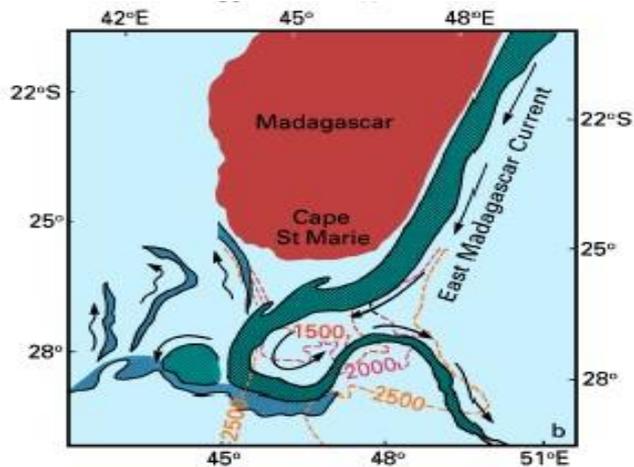
SWMC: Southwest Monsoon C.

EAC: East Arabian C.; EIC: East Indian C.

印度洋表层海流

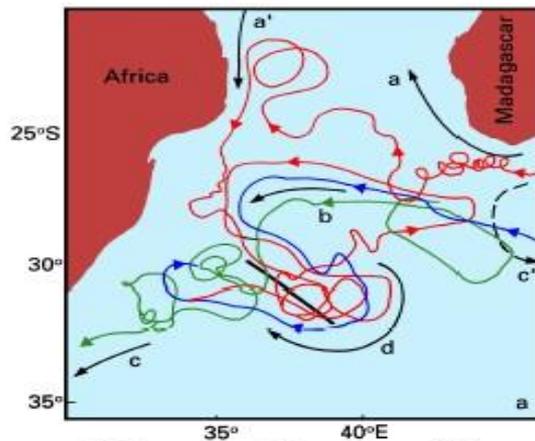
1. **北赤道流**：与北太平洋、北大西洋的北赤道流相同，都是自东向西之洋流，但因为印度洋的海域较小，仅止于北纬20度左右，且受地形影响，当抵达非洲东岸时，逆时针方向转向，成为赤道逆流
2. **赤道逆流**：北赤道流抵达非洲东岸时转向，北赤道流抵达非洲东岸时转向，汇合而成赤道逆流，形成自桑给巴尔至棉兰东向流动之洋流，其流轴偏南半球。夏季时，因为受到西南季风增强。
3. **南印度环流**：在南纬10-30度之间从东向西的南赤道流，抵达马拉加斯加后，转向南，再偏东南，终至向东流，并形成西风漂流的一部份，抵达澳洲西海岸后北转，最后又流入南赤道流，完成南印度环流。
4. **西风漂流**：与南太平洋的西风漂流相同，发生于南纬40至60度之间，为全球西风漂流的一部分。
5. **两只西边界海流**：北印向北的强西边界流-索马里海流，南印向南的马达加斯加海流。

马达加斯加海流



东马达加斯加海流

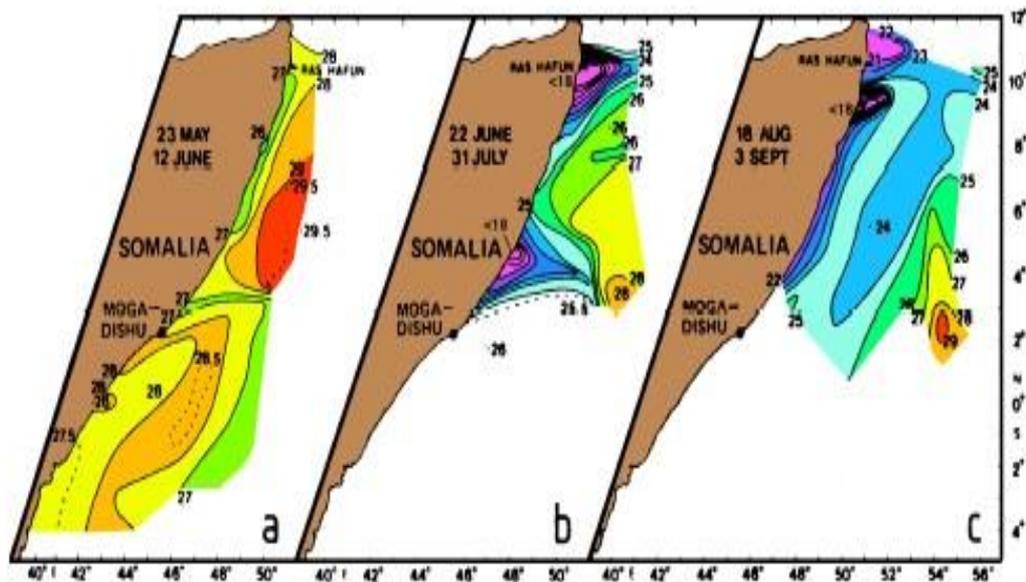
- 路径多变
- 流量较大 (24Sv)



莫桑比克海流

- 多顺时针涡旋
- 流量较小 (6Sv)

索马里海流

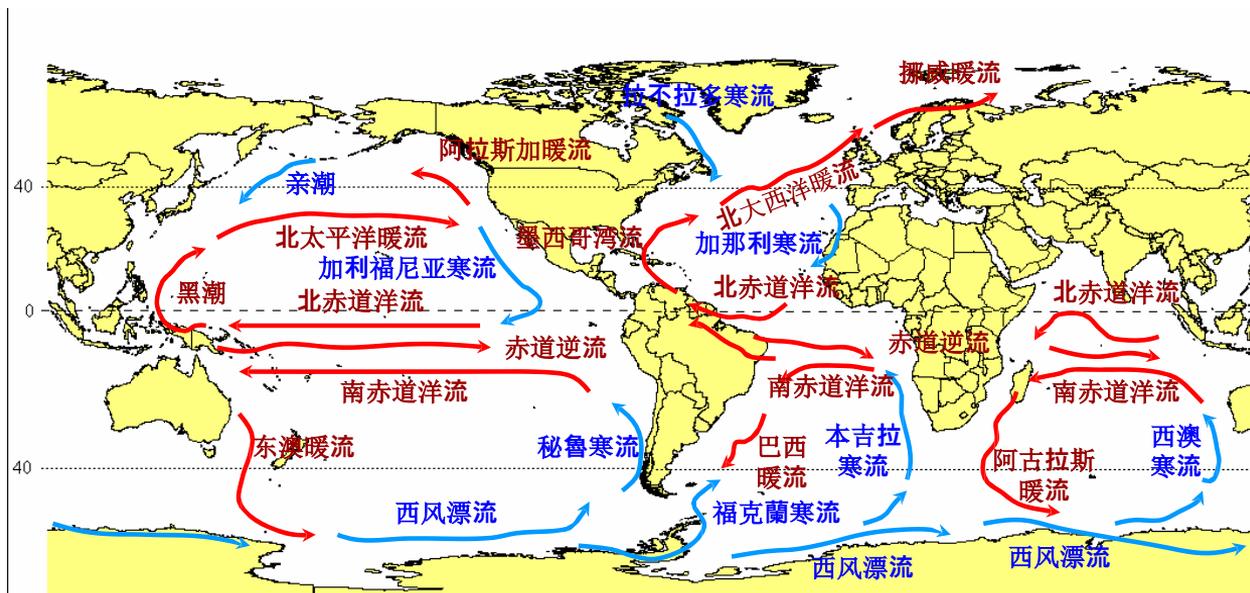


特殊的西边界流，只存在于夏季，带来冷的海水

印度洋流系季节变化

印度洋的赤道流系主要受季风控制：在赤道区域风向以经线方向为主，并随季节而变化。11月至翌年3月盛行东北季风，5~9月盛行西南季风。北赤道流从11月到翌年3月盛行东北季风时向西流动，其他时间受西南季风影响而向东流动，可与赤道逆流汇合在一起而难以分辨。

全球大洋风生环流主要流系



极地海流

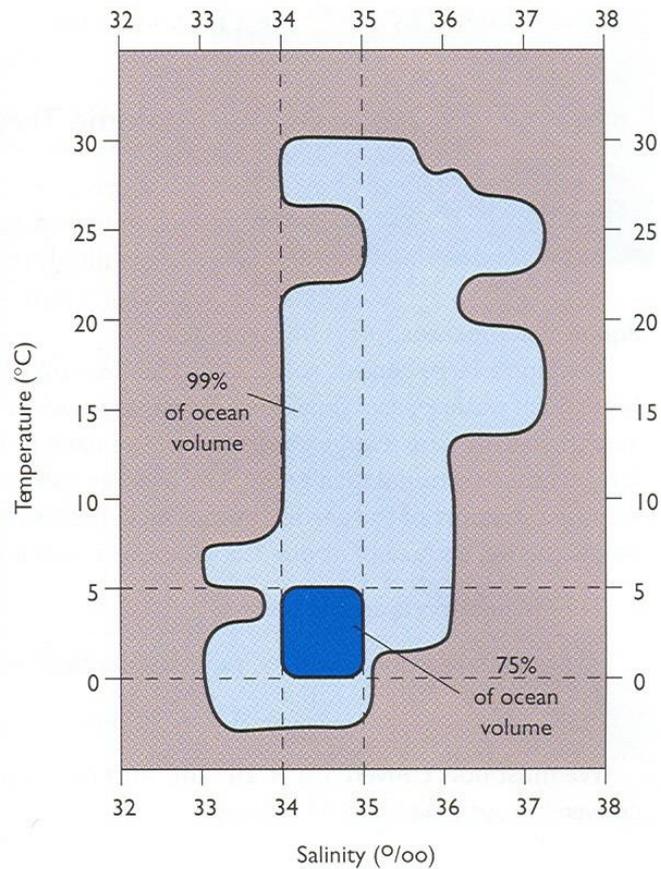
1. **北冰洋中的环流**：北冰洋内主要有从大西洋进入的挪威流及一些沿岸流。加拿大海盆中为一个巨大的反气旋式环流，它从亚美交界处的楚科奇海穿越北极到达格陵兰海，部分折向西流，部分汇入东格陵兰流，把大量的浮冰携带进入大西洋，估计每年 10000km^3 。其他多为一些小型气旋式环流。
2. **南极海区环流**：在南极大陆边缘一个很狭窄的范围内，由于极地东风的作用，形成了一支自东向西绕南极大陆边缘的小环流，称为**东风环流**。它与南极绕极环流之间，由于动力作用形成南极辐散带。与南极大陆之间形成海水沿陆架的辐聚下沉，这也是南极陆架区表层海水下沉的动力学原因。
3. 极地海区的共同特点是：几乎终年或大多数时间由冰覆盖，结冰与融冰过程导致全年水温与盐度较低，形成**低温低盐的表层水**。

- **水团**的定义：Water mass is a body of water with a common formation history of all its properties.
- 中国大百科全书：源地和形成机制相近，具有相对均匀的物理、化学和生物特征及大体一致的变化趋势，与周围海水存在明显差异的宏大水体。“内同性”“外异性”长期来把温盐特性作为分析水团的主要指标温盐图解判定水团的数目。

水团分析方法

1. 定性的综合分析方法（经验法）：定性描述
2. 浓度混合分析方法：定量地确定水团边界和混合区
3. 概率统计分析法：目前已被应用的主要有海水特征频率分析法，判别分析法、聚类分析法等
4. 模糊数学分析方法：隶属函数描述一水体元对水团的隶属度

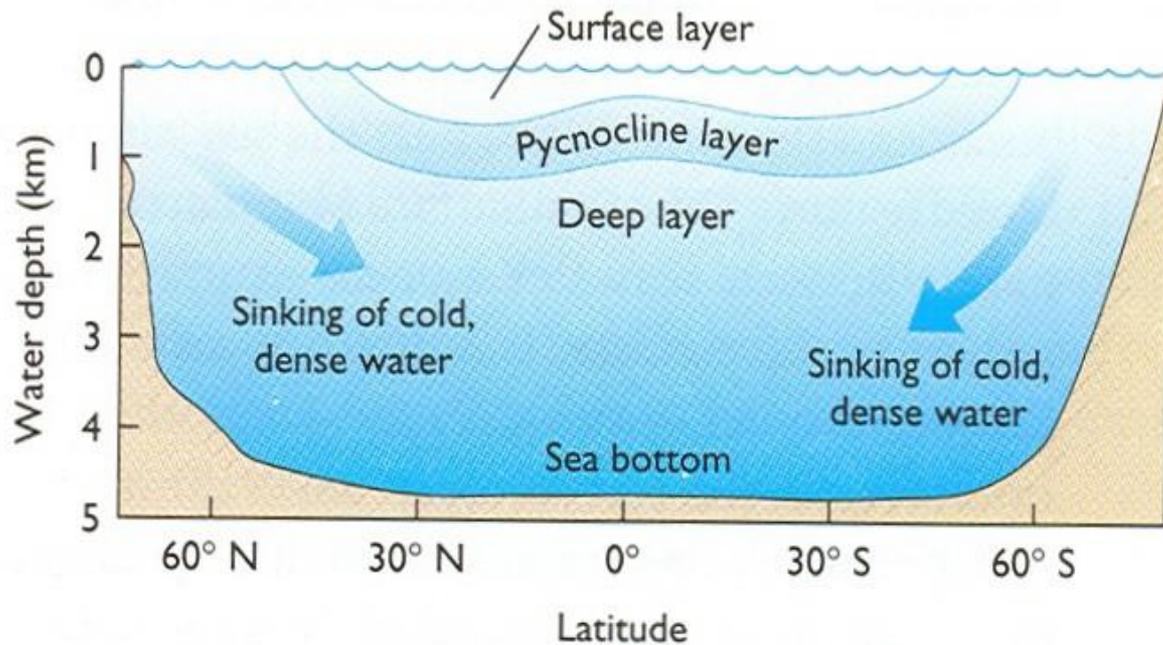
大洋水体温盐范围



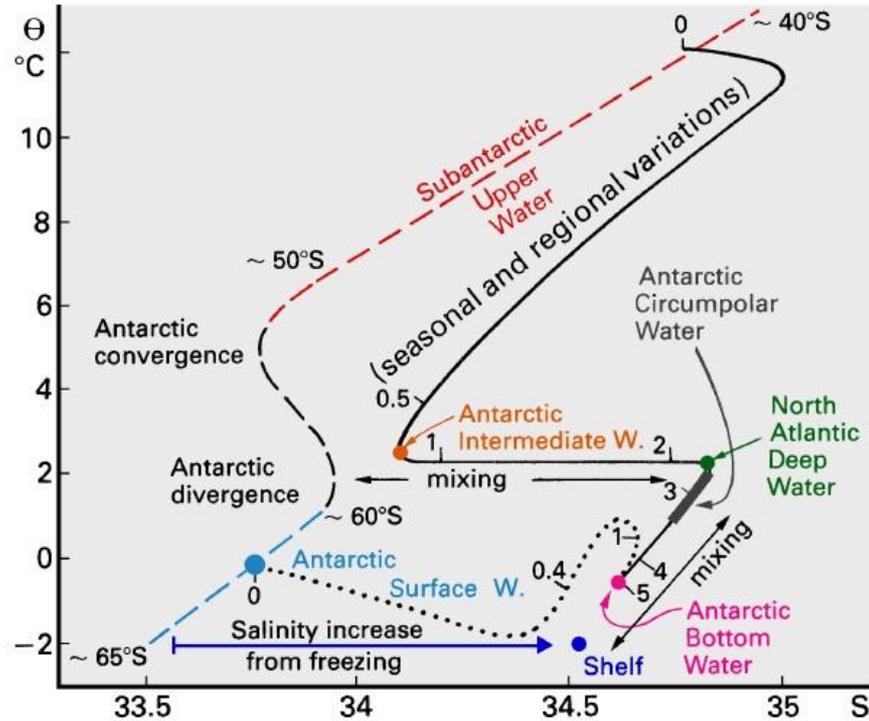
世界大洋主要水团

- 世界大洋中存在着五个基本水层，即大洋暖水区的表层水，次表层水；大洋冷水区中的中层水、深层水和底层水。如果按其温、盐等理化特性和源地作为条件，也可把五层水视为五个水团。
 1. 表层水：具有高温、相对低盐特性，其源就是低纬海区密度最小的表层暖水本身。
 2. 次表层水：具有独特的高盐特征和相对高温，它是由副热辐聚区表层海水下沉而形成的，其下界为主温跃层，南北范围在南北极锋之间。
 3. 中层水：具有低盐特征，是西风漂流中的辐聚区表层海水下沉而形成。其深度约在1000~2000m的范围内。但地中海水、红海—波斯湾水是高盐的。
 4. 深层水：北大西洋上部但在表层以下深度上是它的源地，因此贫氧是其主要特性。其深度约在2000~4000m的范围内。
 5. 底层水：源于极地海区，具有最大的密度。
- 根据不同的标准可以在不同等级上依水团划分的原则进行更细的划分。例如在大西洋、太平洋、印度洋中的五大水团可分别冠以大洋的名称和再分为南、北两部分，这样便会划分出第二等级与第三等级的水团。

水团的流动性

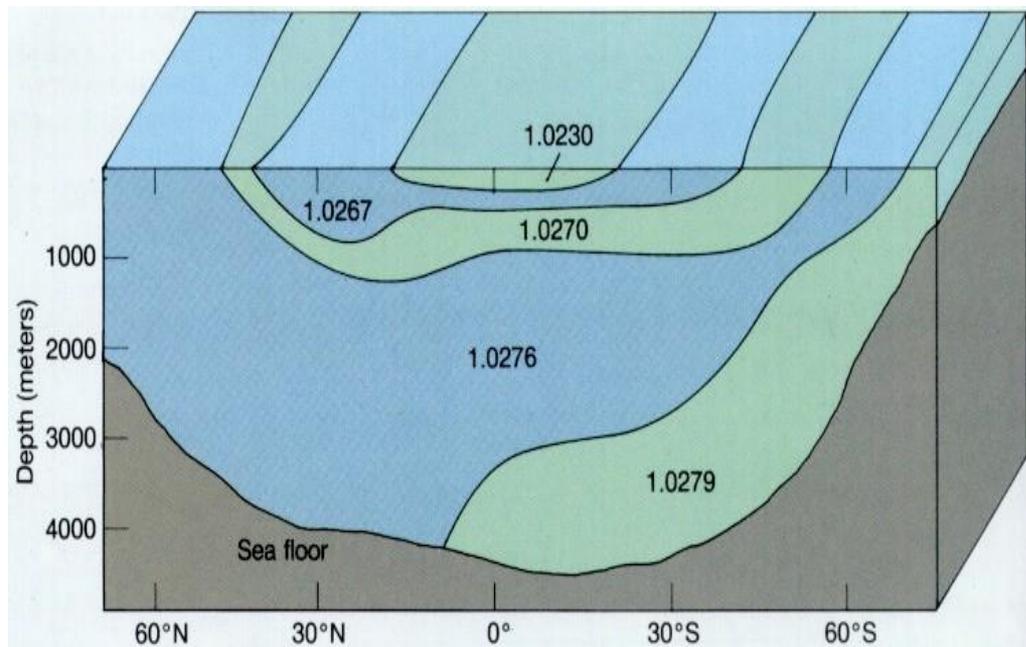


水团分析：T-S曲线图

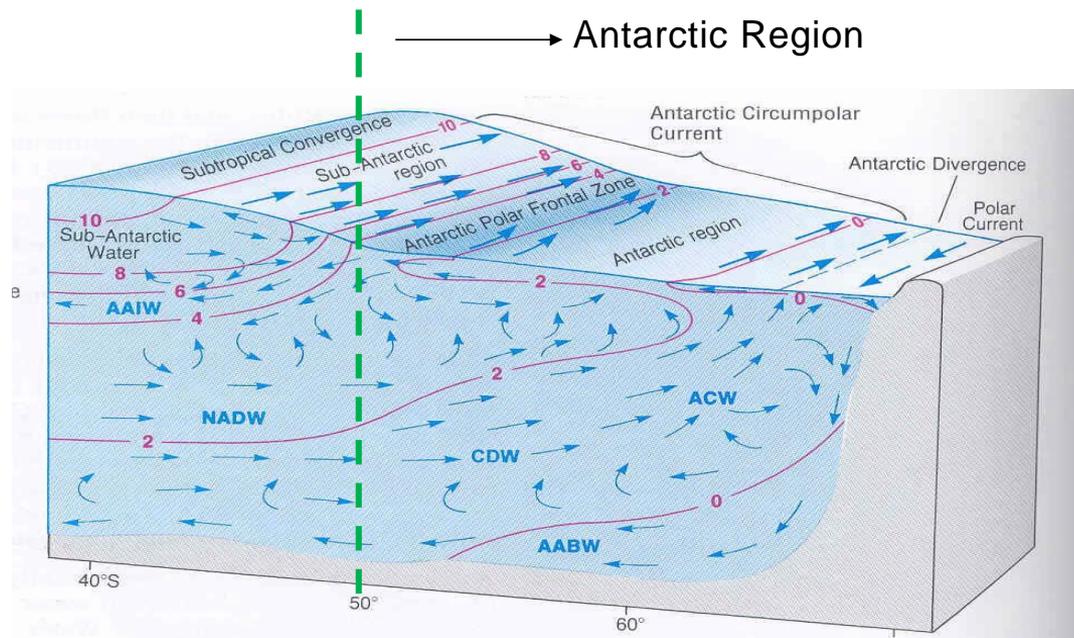


大洋水团

1. 表层水：富溶解氧
2. 次表层水：高盐
3. 中层水：低盐；
高盐中层水：地中海，红海
4. 深层水：贫氧。
5. 底层水：高密。

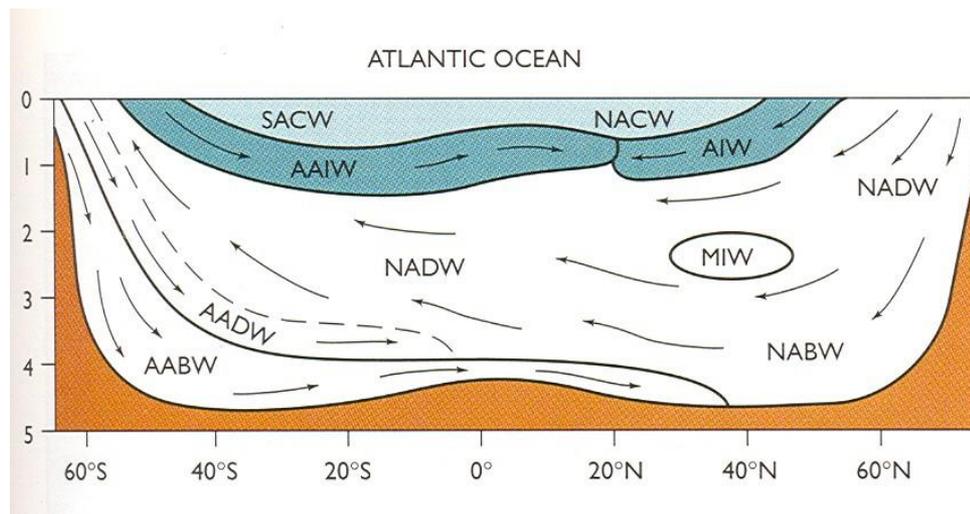


南大洋水团



Red lines are isotherms

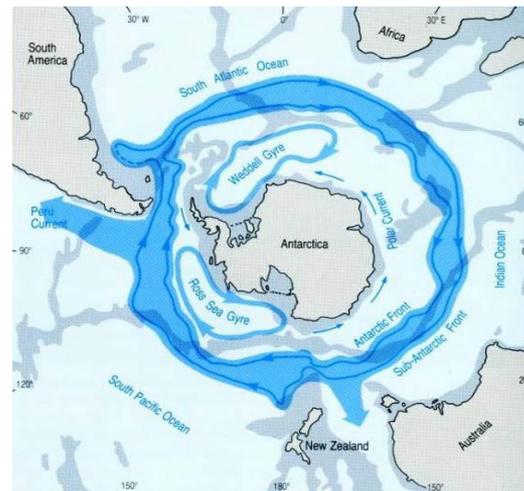
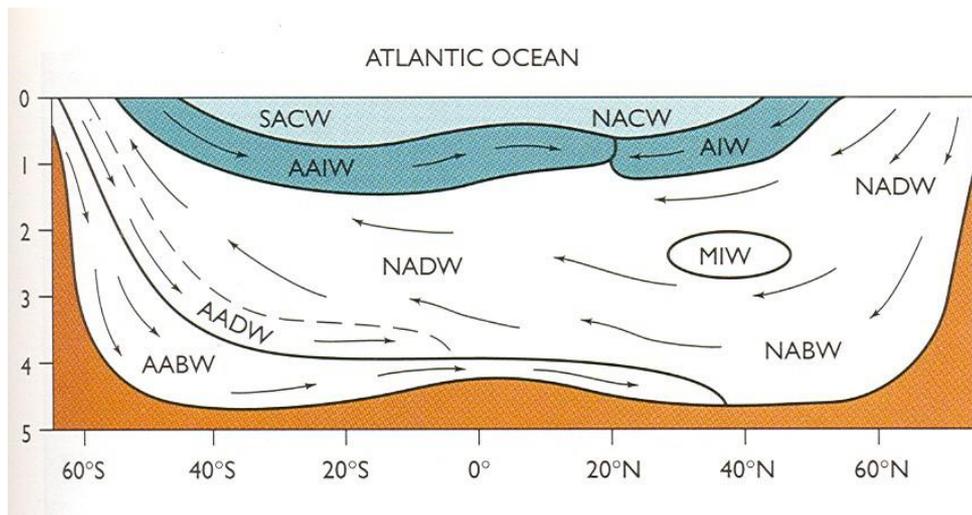
南大洋水团：南极底层水



南极底层水（AABW）：遍布南大洋海盆底部的，温度低于 0°C 的水体。

- 威德尔海底层水，位势温度低于 -0.7°C ，盐度大约在34.64
- 罗斯海底层水，位势温度在 -0.5°C 以上，盐度在34.7以上。

南极底层水形成机制



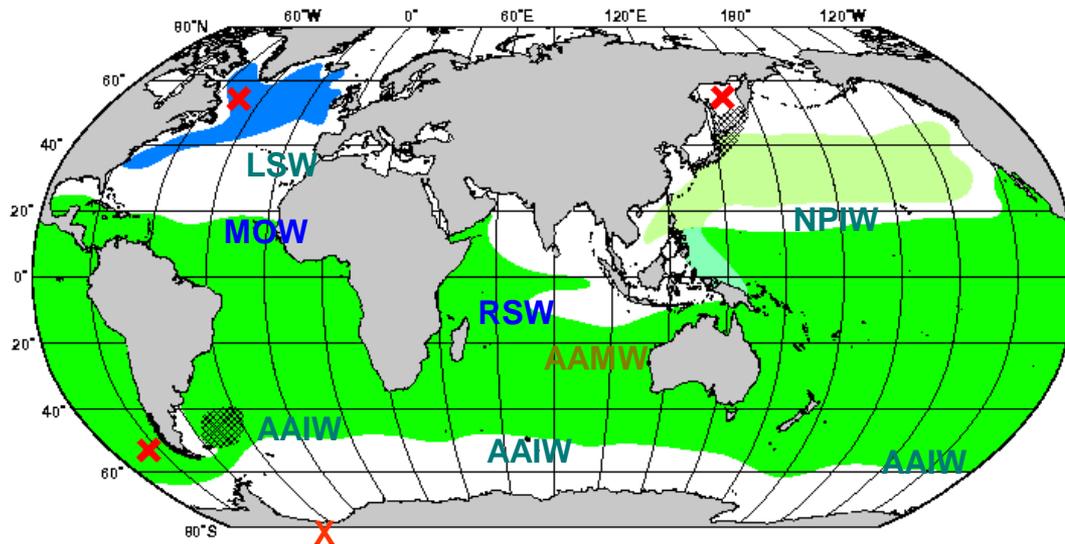
陆架水（SW）和入侵的绕极深层水（CDW）混合，是底层水形成的主要途径。

混合增密：海水状态方程的非线性，SW(低温低盐)+CDW(高温高盐)=AABW

中层水定义：Intermediate water is a body of water with a common formation history of all its properties and is a layer characterized by a unique salinity minimum core, lying vertically between main thermocline and deep water masses and spatially in the equatorward sides of subarctic/subtropical frontal zone (subantarctic-arctic front).

全球海洋中层水

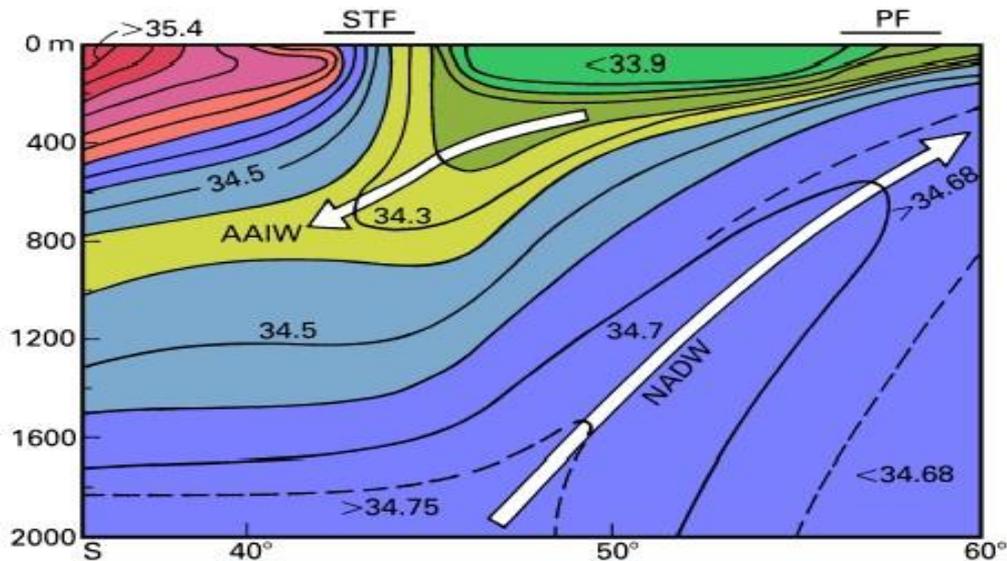
Global Ocean Intermediate Water masses



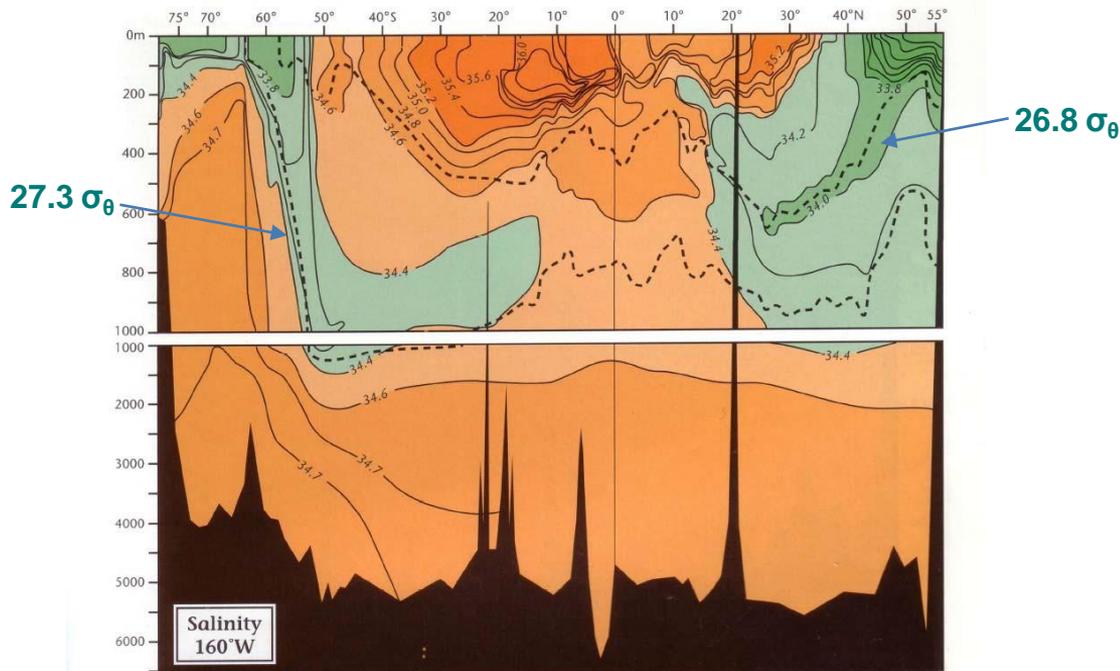
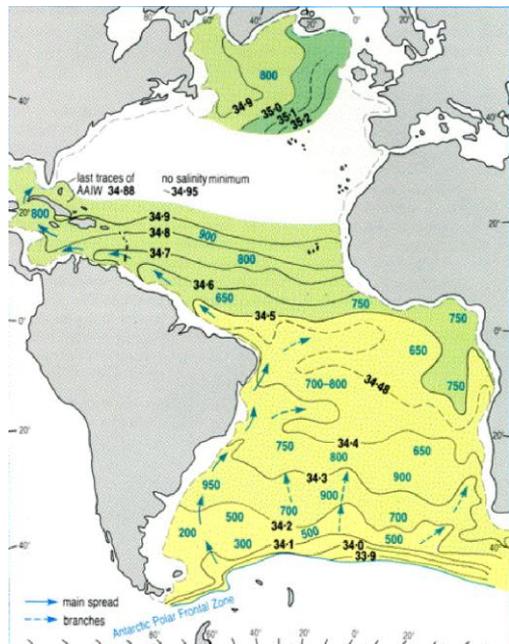
Shown are the North Pacific Intermediate Water (light green), Antarctic Intermediate Water (green), overlap of NPIW and AAIW (medium green), and Labrador Sea Water (blue).

南极中层水AAIW

在南极辐合带下沉并向北运输的中层水团：**低盐**，最小盐度为33.8。在南极辐合带海面降水大大超过蒸发，又有融冰的影响。**低温**， 2°C 左右。低温特征来自于南极表层水，低温特征使得该水体密度足够大。**环绕南极运动**。



南极中层水AAIW



Blue numbers indicate depth of layer (m)

Black numbers indicate salinity (ppt)

中层水的运动

1. 南极辐聚区和西北辐聚区下沉的海水形成，带有源地**低盐**的特征。温度较低，故密度较大，分布在次表层水之下。
2. 南极辐聚下沉的海水，温盐特征为 2.2°C 与33.8，下沉到800—1000m深度上，一边参加南极绕极流，一部分水体向北散布进入三大洋。**大西洋可达 25°N ；太平洋越过赤道，印度洋在 10°S 。**
3. **高盐中层水**：北大西洋的高盐**地中海水**（温 13°C ，盐37）由直布罗陀海峡溢出，下沉到1000—1200m深度上，然后向西、西南和东北方向散布。印度洋中的**红海高盐水**（温 15°C ，盐36.5）通过曼德海峡流出，在600—1600m深度上沿非洲东岸向南散布，与南极中层水相遇发生混合。

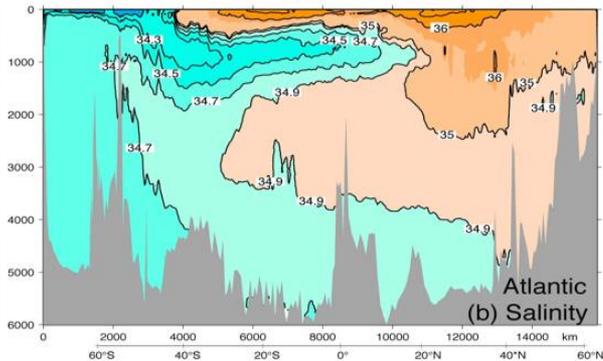
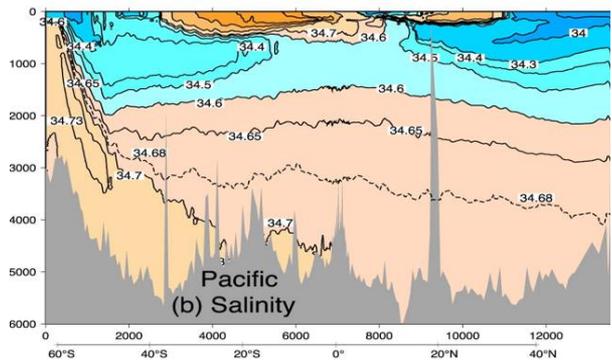
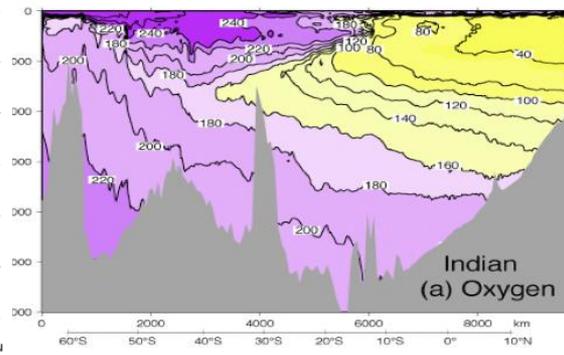
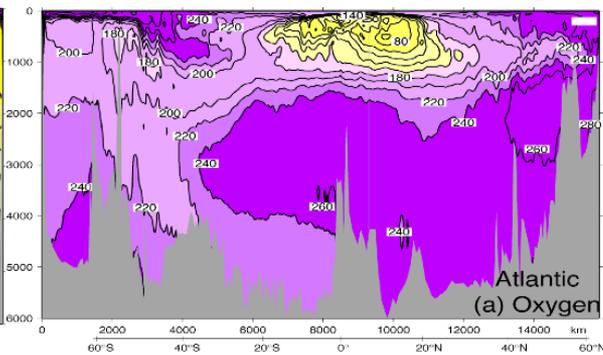
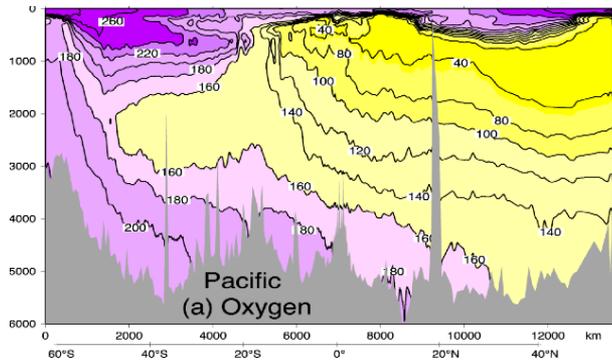
大洋底层水的运动

1. 源地是南极大陆边缘的威德尔海、罗斯海，其次为北冰洋的格陵兰海与挪威海等。普遍认为南极威德尔海是南极底层水的主要来源在冬季冰盖下海水（盐34.6，温度-1.9°C）密度迅速增大，沿陆坡下沉到海底，一方面加入南极绕极流向东流，一方面向北进入三大洋。主要沿洋盆西侧向北流动。在大西洋可达40°N，与北大西洋深层水相遇。
2. 北冰洋底层水因白令海峡很浅，不可能进入太平洋只在偶然情况下，少量海水通过海槛溢出而进入大西洋。因此北冰洋底层水处于几乎是被隔绝状态。

大洋深层水的运动

1. 深层水介于中层水和底层水之间，约在2000~4000m的深度上。大洋深层水主要是由北大西洋格陵兰南部的上层海洋中形成的。
2. 大西洋深层水加入绕极环流的同时，逐渐上升，在南极辐散带可上升至海面，与南极表层水混合后，分别向北与向南流去，即加入到南极辐聚与南极大陆辐聚中去。
3. 大洋深层水的源地不是海面，因此贫氧是它的主要特征。

三大洋水团



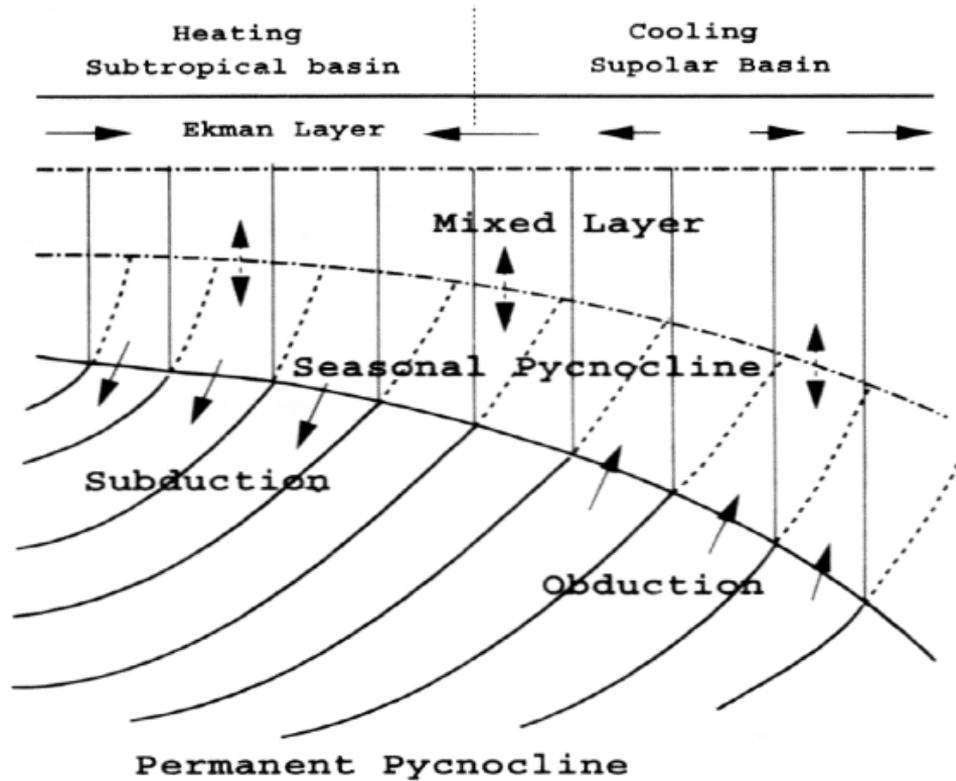
潜沉或下潜 Subduction

Stommel (1979) 认为潜沉就是混合层中的部分水体进入温跃层

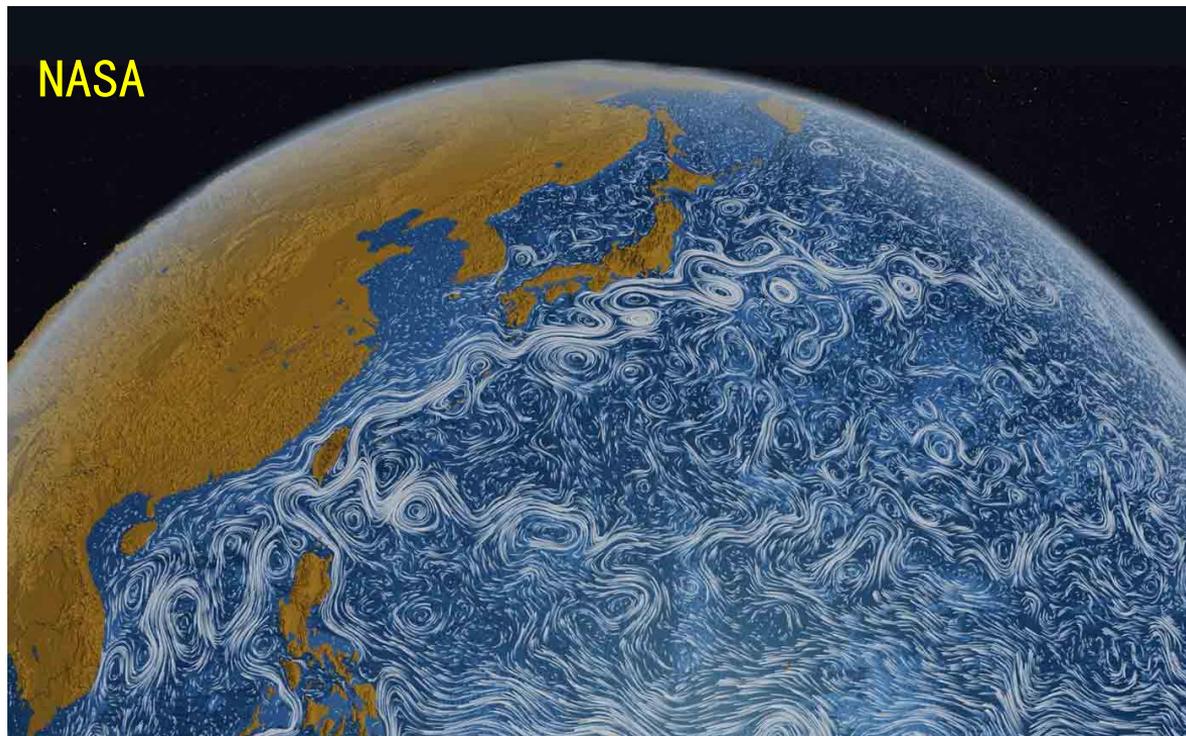
Marshall (1993) 则定义为水体由混合层/季节性跃层进入永久性温跃层的比例

Huang和Qiu等人的定义 (Huang and Qiu 1994; Qiu and Huang 1995) : 水体由混合层进入温跃层的过程是由于艾克曼抽吸, 浮力通量的强迫将水体带到混合层底倾斜的等密面上而开始的。

Subduction



大洋中尺度涡 Meso-Scale Eddies



大洋中尺度涡

- 自70年代以来，海洋科学工作者相继在各大洋中发现了一种水平尺度约为100~500km，时间尺度约为20~200d的流涡，它们广泛地寄居于总的大洋环流之中，且以 $(1\sim5)\times 10^{-2}\text{m/s}$ 的速度移动着，这些流涡称为“中尺度涡”。它们可以类比于大气中的涡旋与锋面等天气系统。因此，如果把以前对海洋平均状况的研究称为“气候学”的描述，那么中尺度涡发现后，便使海洋学进入了“天气学”的研究阶段。
- 关于中尺度涡形成、运动、能量的传输机制、时空分布及其与平均环流的关系等，许多学者已进行了研究
- 中尺度涡可被观测到的最突出的特性是它们的动能(和势能)数量级的区域不均匀性。它与大洋环流的格局紧密相关，最强盛的涡主要存在于或者靠近强流区。显然，这是由于在那里存在不稳定性，具有涡形成的基本条件。
- 世界大洋中尺度涡场的动能分布极不均匀。例如在北大西洋和北太平洋西边界强流区的表层，其动能约为东边界流区和弱流区的10倍。涡场动能又主要集中在表层。在强流区，从海面至1000m的深度内直线减少至表面的1/1087。涡所影响的深度极大，在湾流强流区达5000m以深，在黑潮延续体达6000m，在这个深度上仍具有相当的动能。中尺度涡是一个深厚的系统。

大洋中尺度涡

- **涡的能量传输过程是：**上层动能由大洋环流的平均动能提供；在较下层，由平均环流的势能转化为涡的动能，同时伴随着自上而下由涡的动能转化为涡的势能。然后再转化为更下层涡的动能这一次级的传输过程。另外，在下层涡的动能也会转化为平均环流的动能。
- 涡在强流区形成后，能被强流吸收，也能传播到其他海域，这就导致了涡场动能和势能数量级的多变性。涡对总环流的作用主要发生在强流区邻近；在强流区内，涡形成的结果，只起到了使平均环流能量下沉的作用，而平均环流与涡之间的能量交换主要是在强锋面流处以及向下输送过程中的能量耗散机制。
- **涡的时间尺度，相对变化较小。**在靠近或在强流区中，其支配周期主要为中尺度时间，即20~200d；靠近表层，天气时间尺度显著；近海底陡坡处，地形波时间尺度(几天的量级)变得突出。
- 中尺度涡的发现与研究，把人们对大洋环流的认识提高到了一个新的阶段。随着观测技术和手段的进步、高速计算机的应用，必将对大洋环流的动力学、热力学机制以及对海洋环流、大气环境的影响等各方面，作出更加详尽的科学结论。

作业（2周后上交）

1. 试叙述洋流的原动力。
2. 洋流的种类有那些？试简述之。
3. 洋流的成因有那些？试简述之。
4. 试绘图叙述太平洋上主要洋流的情况。
5. 试绘图叙述大西洋上主要洋流的情况。
6. 试绘图叙述印度洋上主要洋流的情况。
7. 请说出三大洋洋流相同及相异之处。
(最好能以图表说明之)
8. 何谓热盐环流？它在世界大洋环流中扮演什么角色？
9. 世界大洋上层环流的总特征如何？
10. 赤道流系主要包括哪些流动？说明其形成原因及水文特征。
11. 南、北两半球西风漂流区有哪些主要特征？
12. 与西边界流区相比，东边界流的基本特征有哪些？
13. 世界大洋的水团分布特征？给出主要的水团名称和大概位置。
14. 简单描述海洋次表层水生成过程。