



# 地球系统数值模拟装置项目 (地球系统模式数值模拟系统) 海洋生化分系统培训

培训人：李阳春

2022年5月23日

01

背景介绍

02

模式原理

03

数据制备

04

结果诊断分析与应用案例



# 01 海洋生化分系统介绍

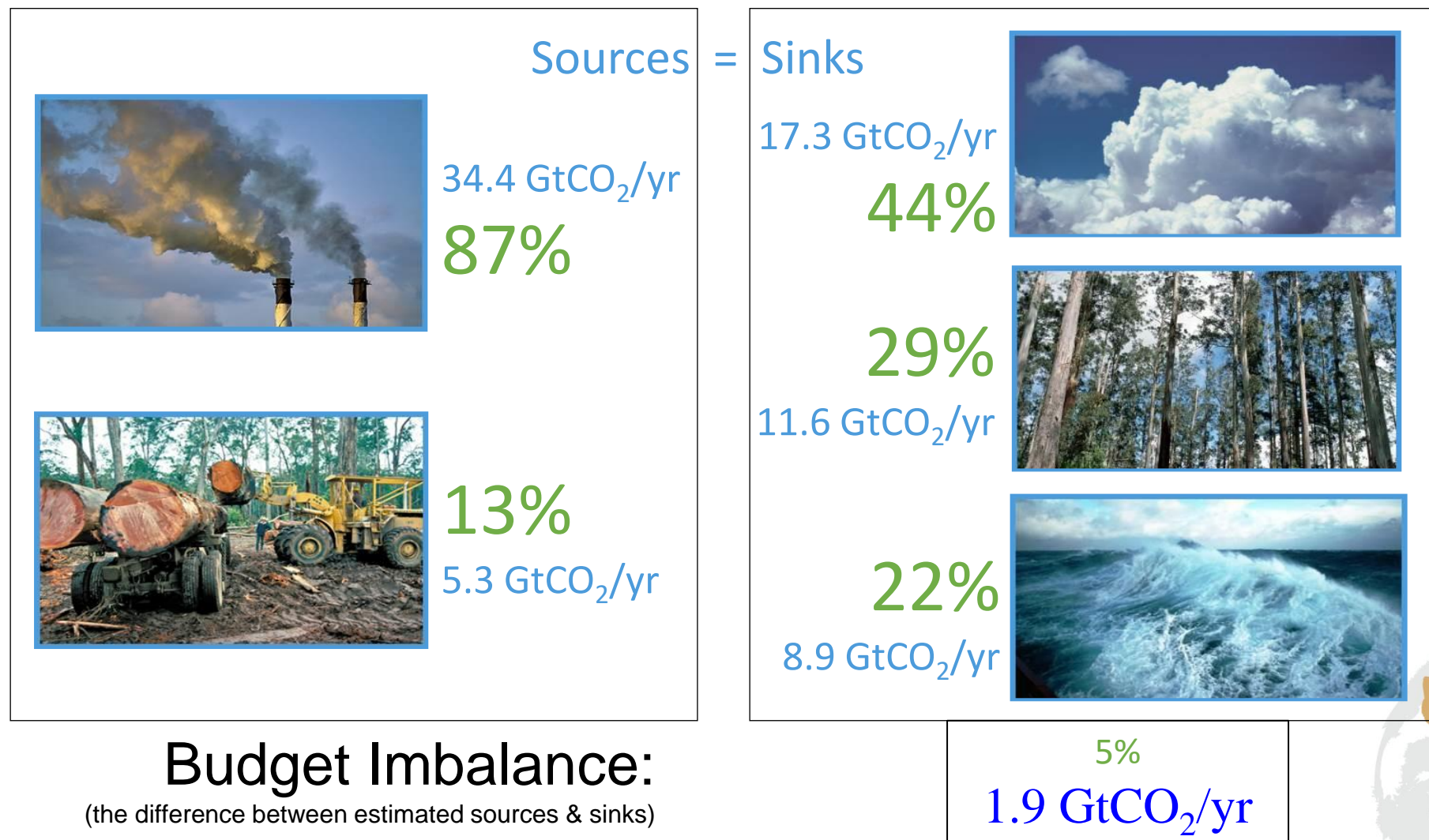
生化：生物地球化学

海洋生化模式主要描述海洋中碳的生物地球化学循环过程

- **模式功能** — 量化海洋对人为二氧化碳的吸收能力，以及这种能力对气候变化的响应
- **模式在地球系统模式中的作用** — 通过与其他分系统模式的全面耦合，可以研究碳循环与气候变化的相互作用，也可预估未来海洋环境如海水pH值等的演变



# 人为 CO<sub>2</sub> (2008–2017)

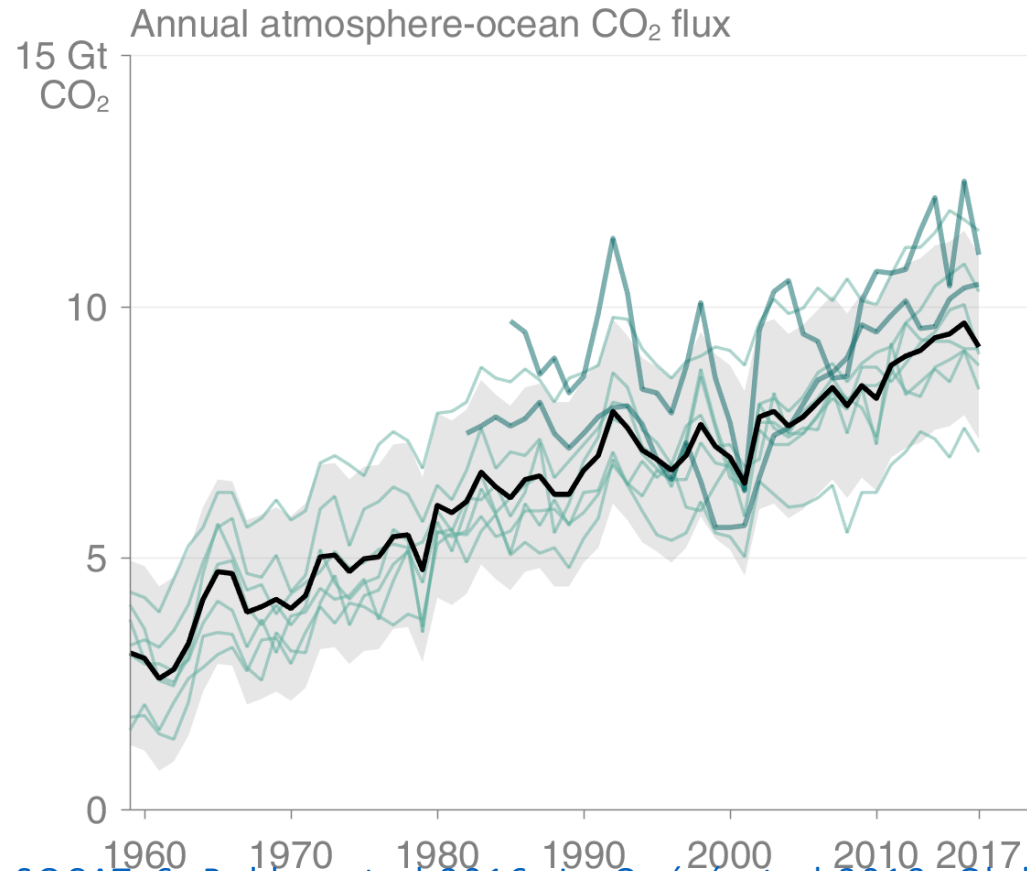


Source: [CDIAC](#); [NOAA-ESRL](#); [Houghton and Nassikas 2017](#); [Hansis et al 2015](#); [Le Quéré et al 2018](#); [Global Carbon Budget 2018](#)



The ocean carbon sink continues to increase

$8.9 \pm 2$  GtCO<sub>2</sub>/yr for 2008–2017 and  $9.2 \pm 2$  GtCO<sub>2</sub>/yr in 2017



Source: [SOCATv6](#); [Bakker et al 2016](#); [Le Quéré et al 2018](#); [Global Carbon Budget 2018](#)

© Global Carbon Project • Data: GCP

Individual estimates from: Aumont and Bopp (2006); Berthet et al. (2018); Buitenhuis et al. (2010); Doney et al. (2009); Hauck et al. (2016); Landschützer et al. (2016); Mauritsen et al. (2018);

Rödenbeck et al. (2014); Schwinger et al. (2016). Full references provided in Le Quéré et al. (2018).



# 海气碳通量

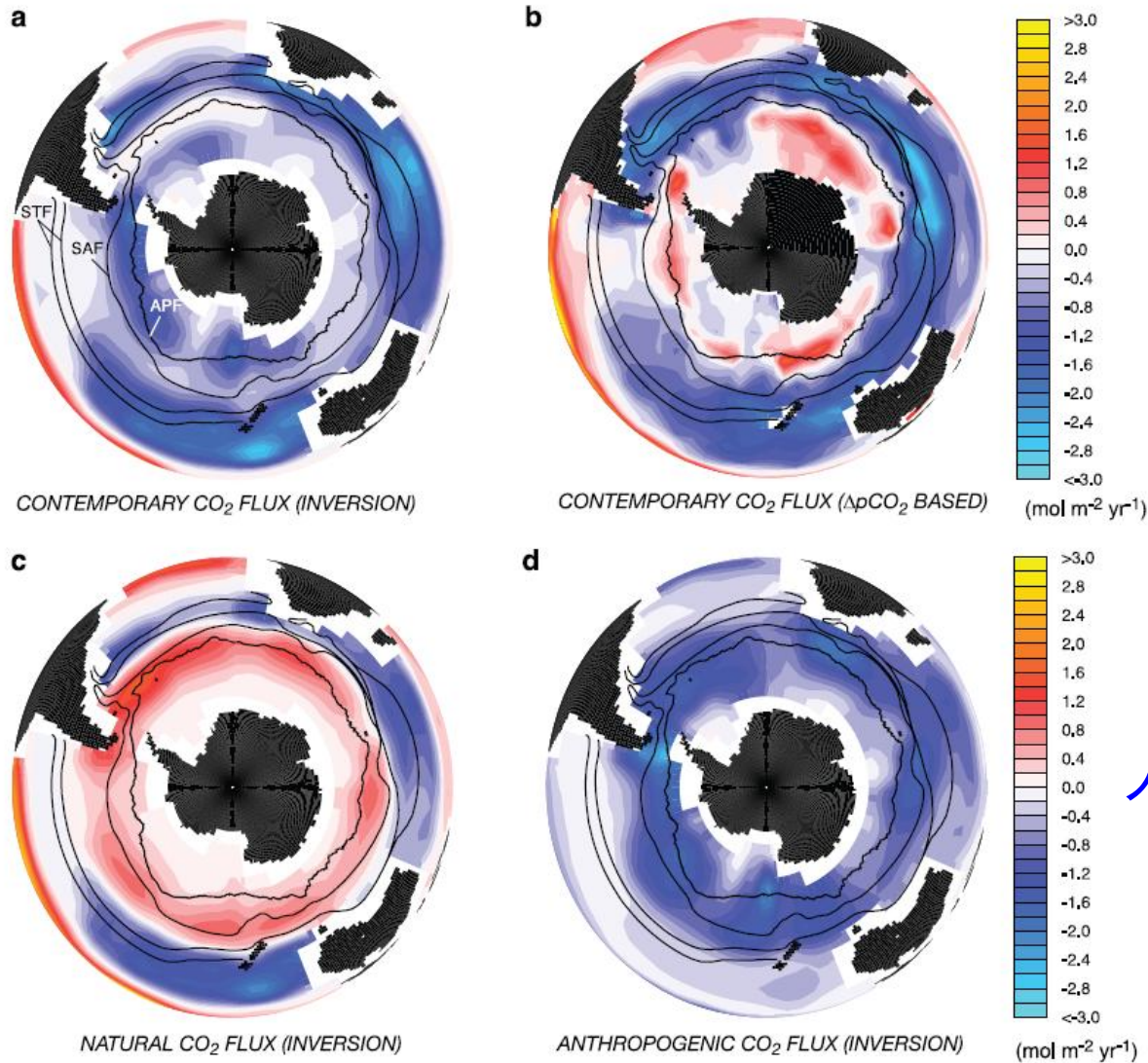
两个概念：

自然碳

人为碳

自然碳  
通量

人为碳  
通量



# CO<sub>2</sub> 海气交换通量

自然碳  
+  
人为碳

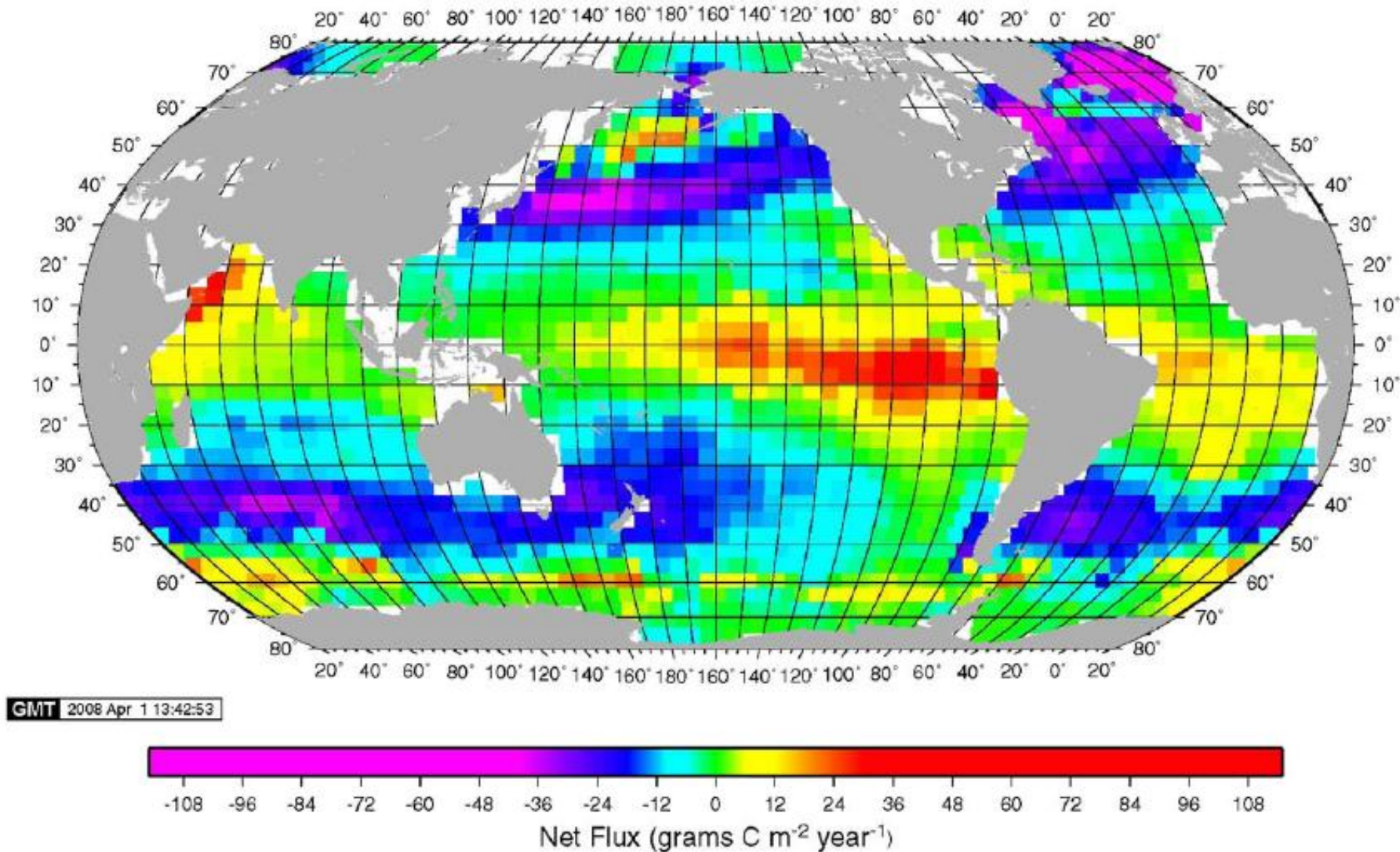


Fig. 13. Climatological mean annual sea-air CO<sub>2</sub> flux (g-Cm<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>) for the reference year 2000 (non-El Niño conditions). The map is based on 3.0 million surface water pCO<sub>2</sub> measurements obtained since 1970. Wind speed data from the 1979–2005 NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) and the gas transfer coefficient with a scaling factor of 0.26 (Eq. (8)) are used. This yields a net global air-to-sea flux of 1.42 Pg-Cy<sup>-1</sup>.

Takahashi et al. (2009)



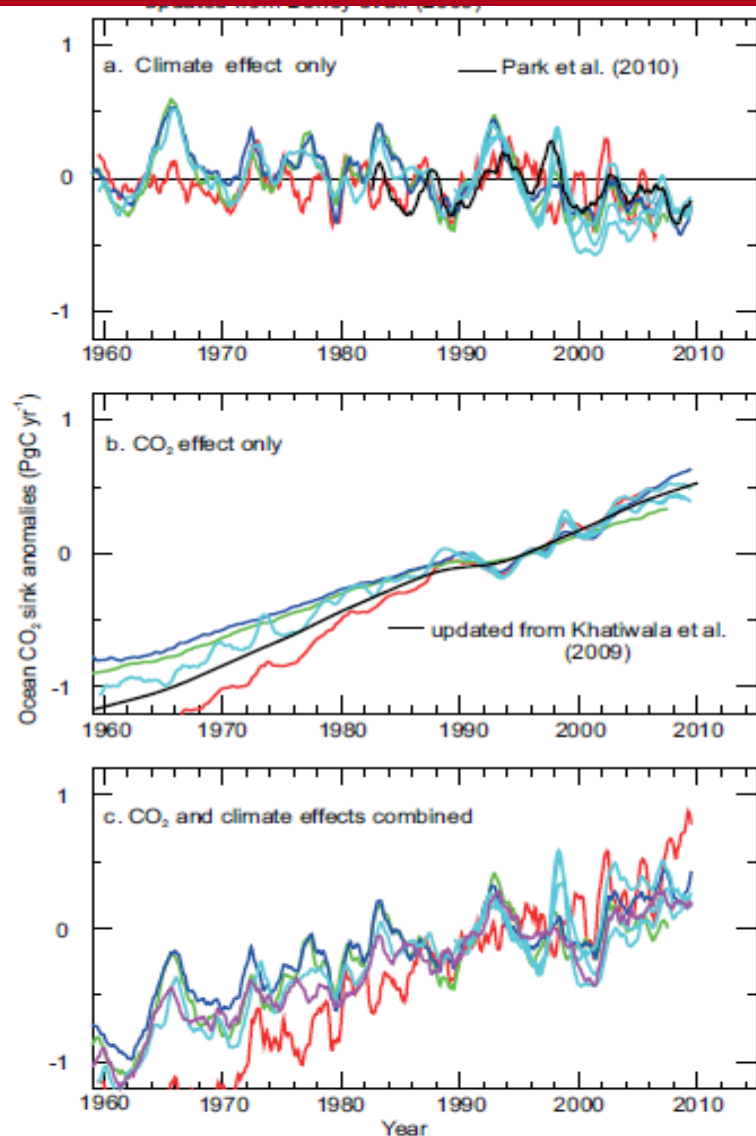


# 海洋碳吸收三种情况：

**a** 受气候变化（自然变率+长期趋势）影响，不受大气CO<sub>2</sub>浓度升高的影响；（自然碳通量）

**b** 受大气CO<sub>2</sub>浓度升高的影响，不受气候变化的影响；（人为碳通量）

**c** 两个影响共同起作用

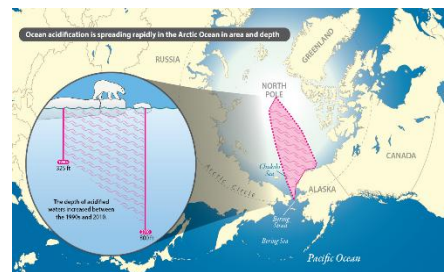
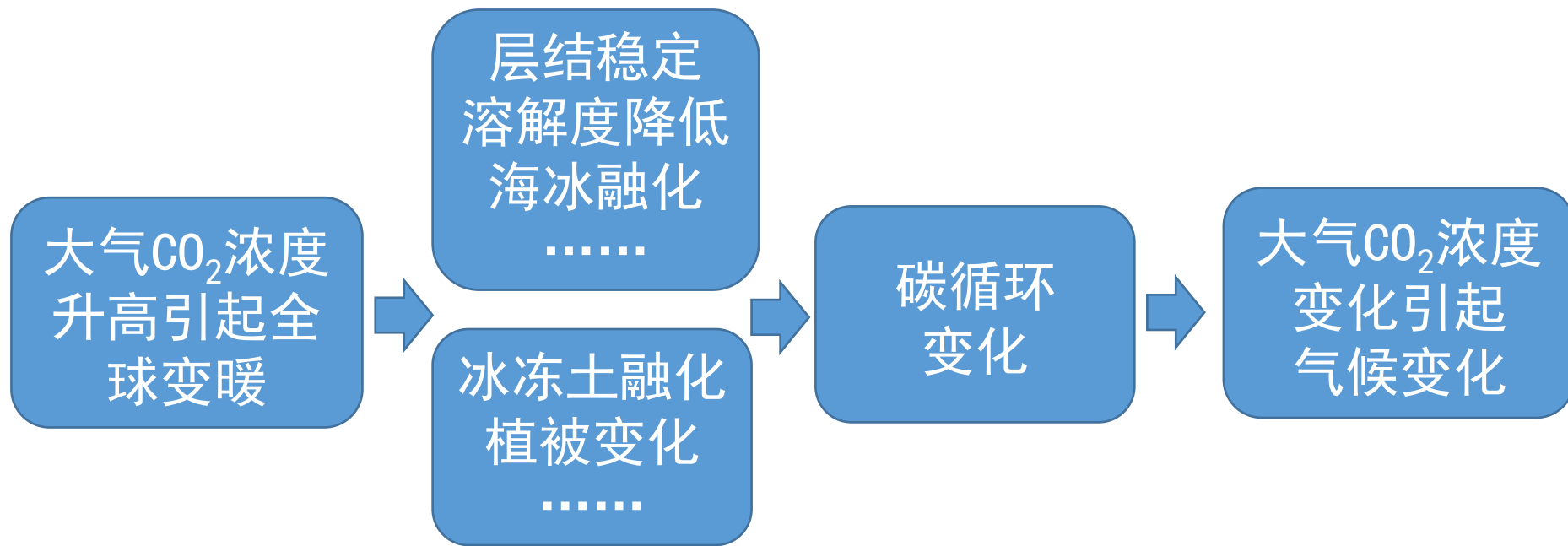


**Figure 6.14 |** Anomalies in the ocean CO<sub>2</sub> ocean-to-atmosphere flux in response to (a) changes in climate, (b) increasing atmospheric CO<sub>2</sub>, and (c) the combined effects of increasing CO<sub>2</sub> and changes in climate (PgC yr<sup>-1</sup>). All estimates are shown as anomalies with respect to the 1990–2000 averages. Estimates are updates from ocean models (in colours) and from indirect methods based on observations (Khatiwala et al., 2009; Park et al., 2010). A negative ocean-to-atmosphere flux represents a sink of CO<sub>2</sub>, as in Table 6.1.



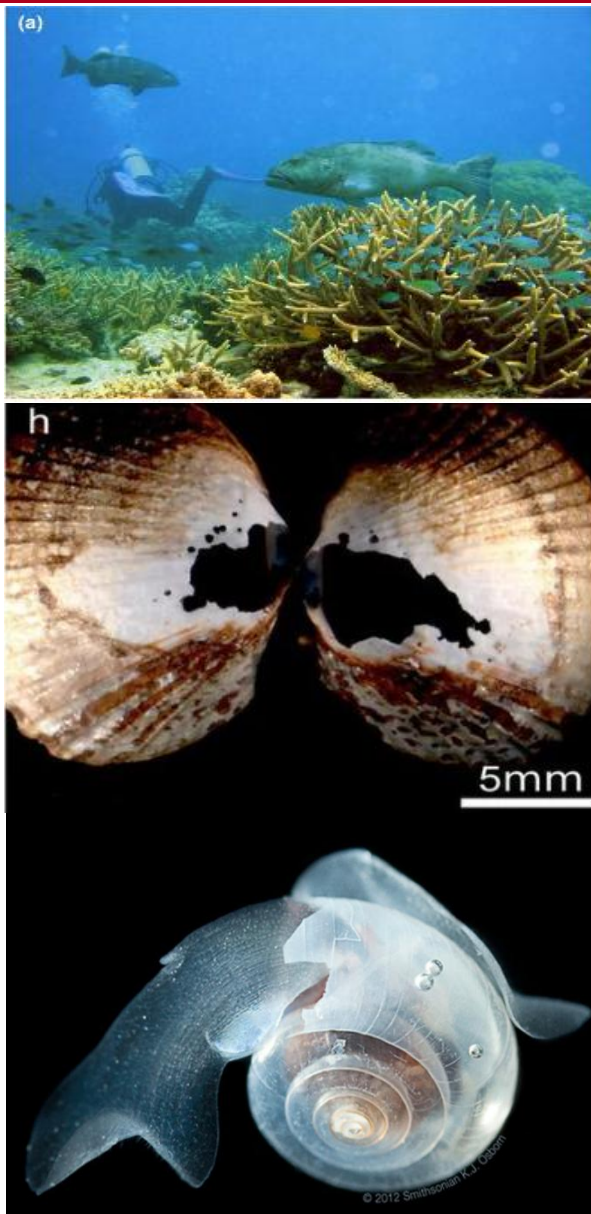


# 气候变化与碳循环



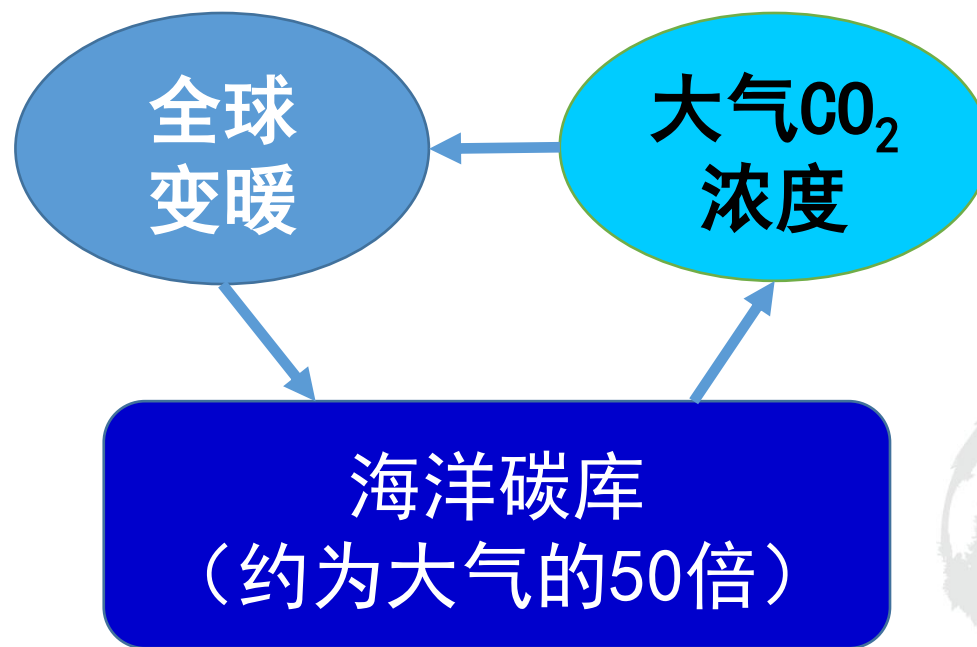
# 海洋酸化

海洋吸收了大量的人为 $\text{CO}_2$ ，导致海表pH值降低（约0.1），碳酸钙形成难度增加，海洋中珊瑚、贝壳类动物的外壳和鱼类的骨骼生长都受到影响。这些会破坏海洋生态平衡，如，鱼类数量下降，而水母不受海洋酸化的影响却因鱼类对其幼体捕捉量下降而大量繁殖，并大量捕食鱼卵，导致鱼类进一步下降。



## 为什么要发展海洋碳循环模式：

- 1 海洋观测资料时空覆盖度都很低；
- 2 海洋碳循环与气候变化之间存在非线性的相互反馈作用。



# 影响海气碳通量的过程





# 液相化学中质量输送限制

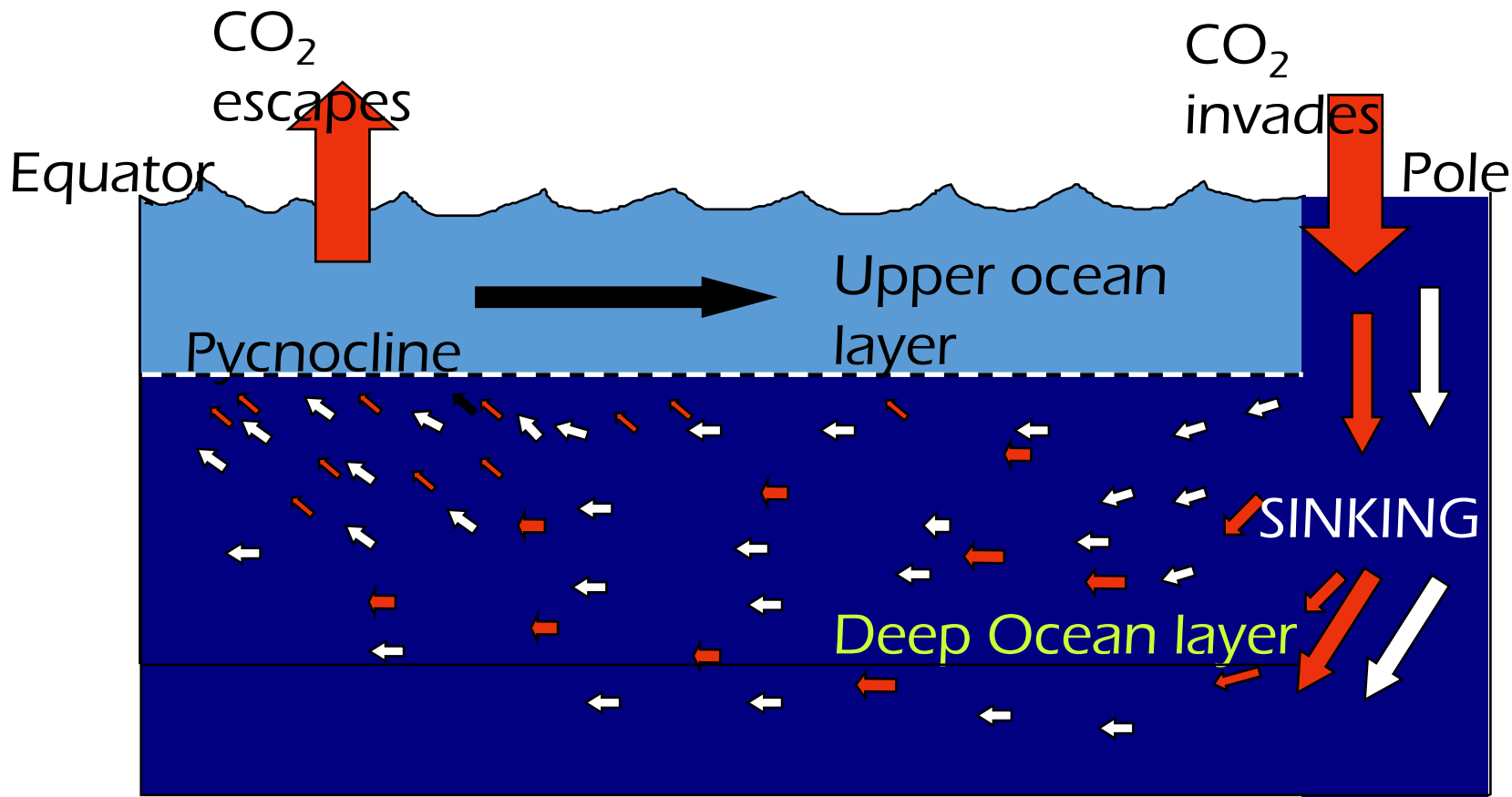
大气物种溶于液体接着发生液相反应会涉及到以下一系列的步骤：

- 1 反应物从气相扩散到气-水界面
- 2 物种穿过界面
- 3 在液相中物种可能发生水解/电离过程
- 4 液滴中离子或非离子物种的液相扩散
- 5 液相中的化学反应



# 海洋碳吸收的3个泵：1 溶解泵

海洋碳循环与气候变化

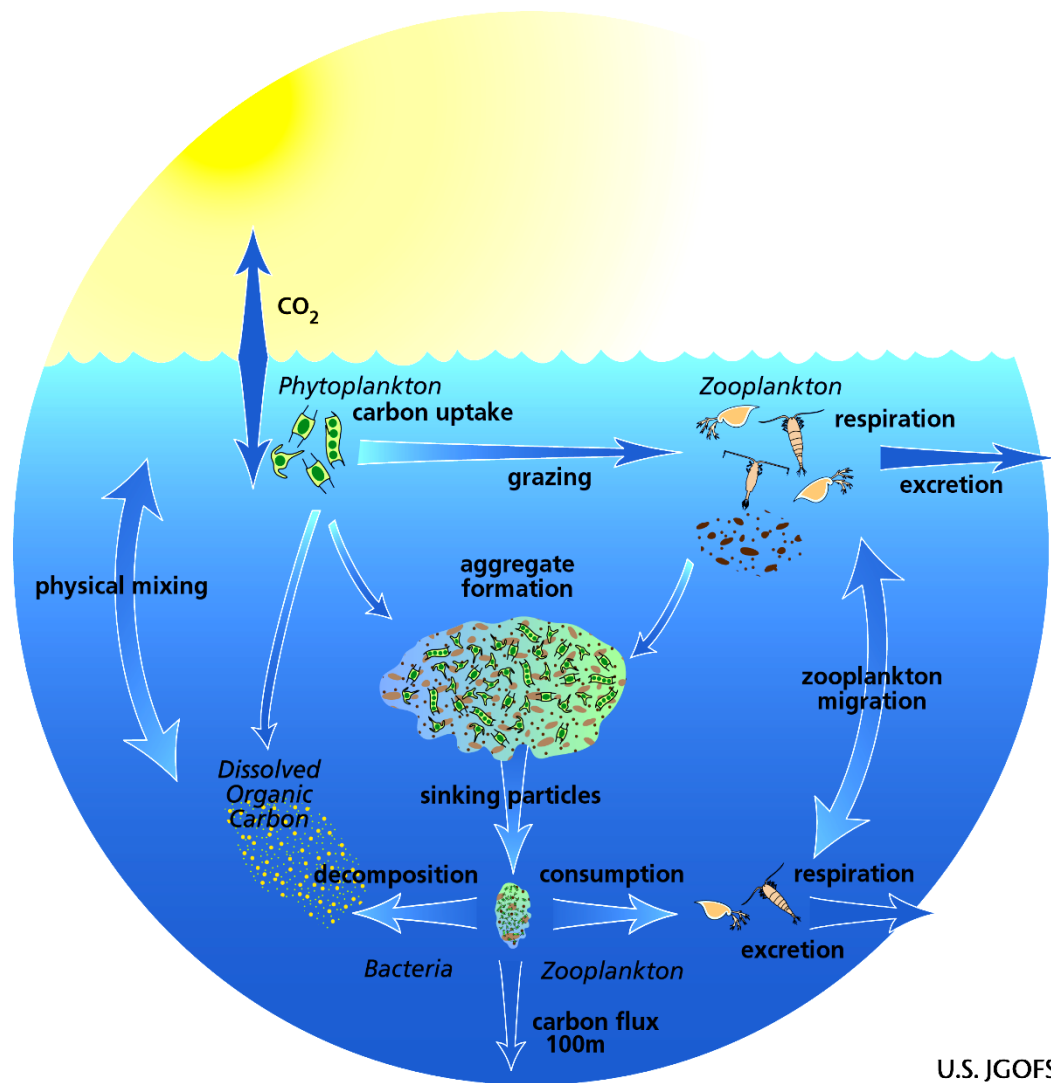


$$dpCO_2/dT: 13 \mu\text{atm } ^\circ\text{C}^{-1}$$

polar regions are sinks,  
equatorial sources



# 2 生物泵



如果关闭生物泵，大气 $\text{CO}_2$ 浓度将升高约200 ppm (Sarmiento )



# 3 碳酸盐泵

## The Calcium Carbonate Pump

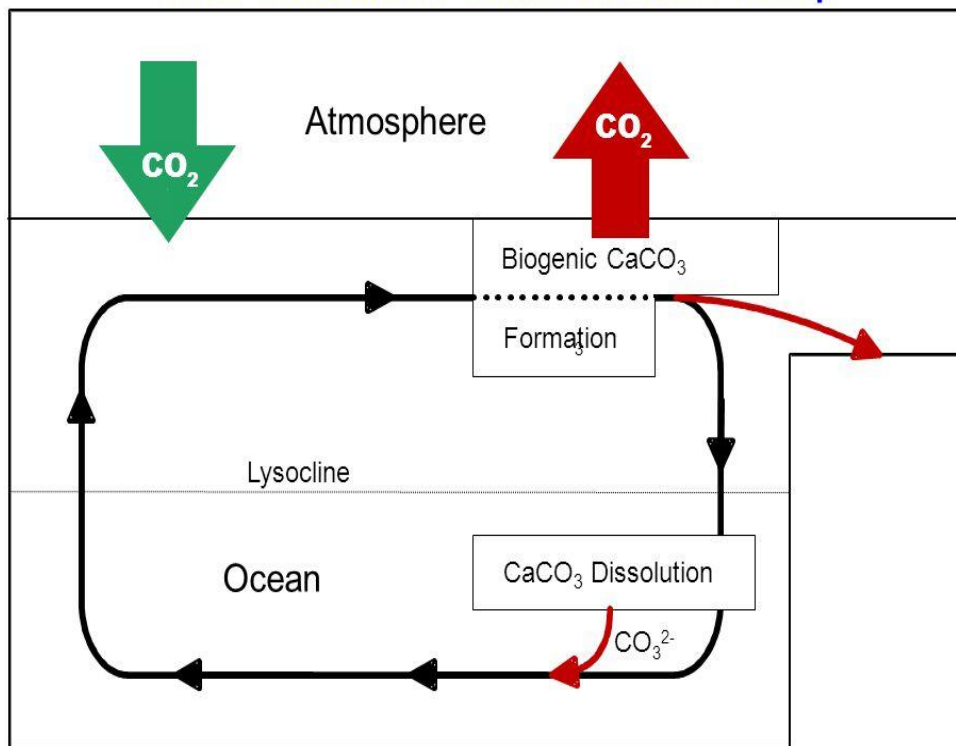


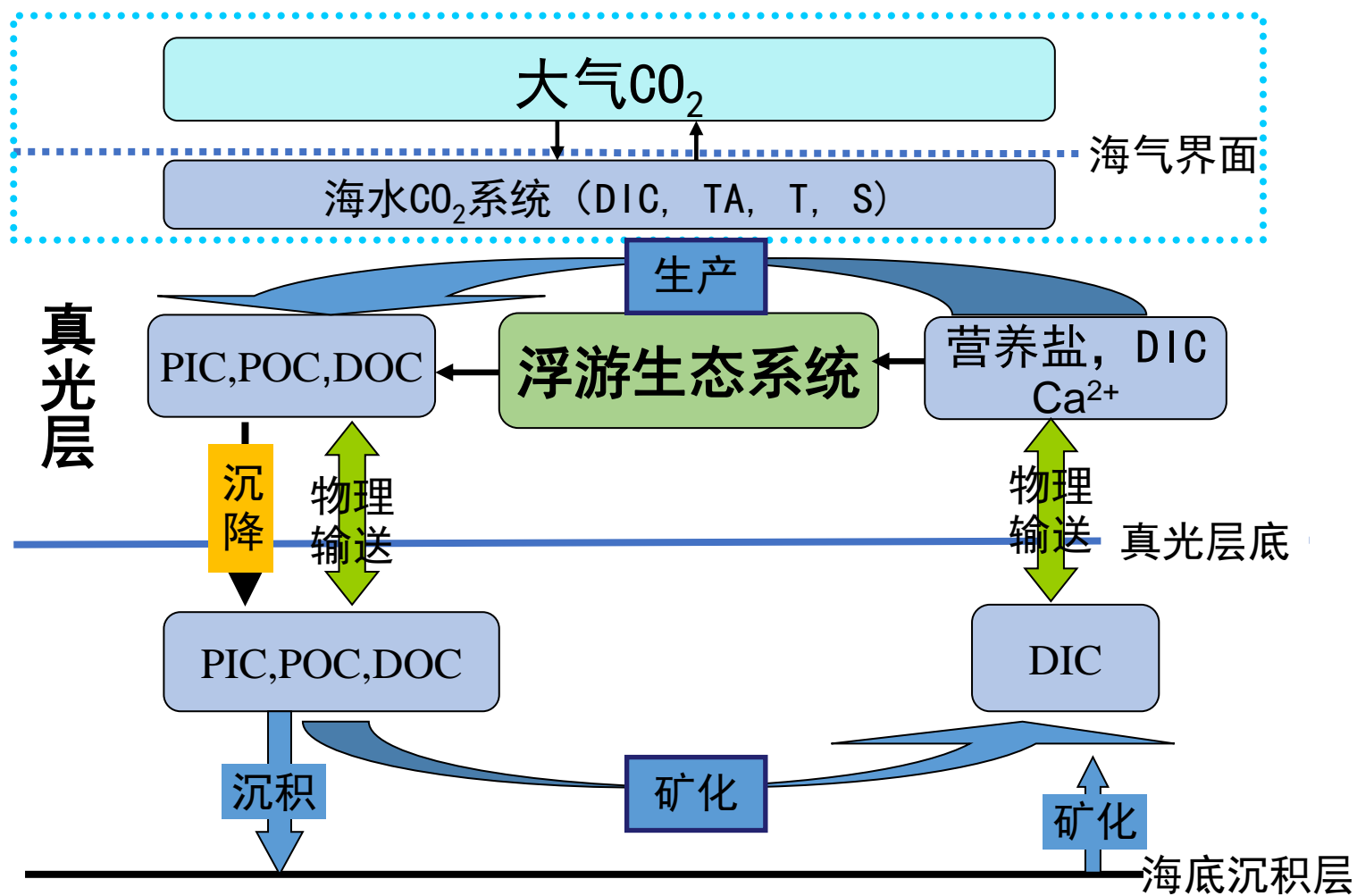
Fig. courtesy of A. Körtzinger

海洋生物如珊瑚、生蚝、螃蟹和龙虾等都需要使用碳酸钙来形成外壳或者骨骼。当这些载体死亡并下沉后，这些躯壳中的碳被传输至深海





# 过程示意图



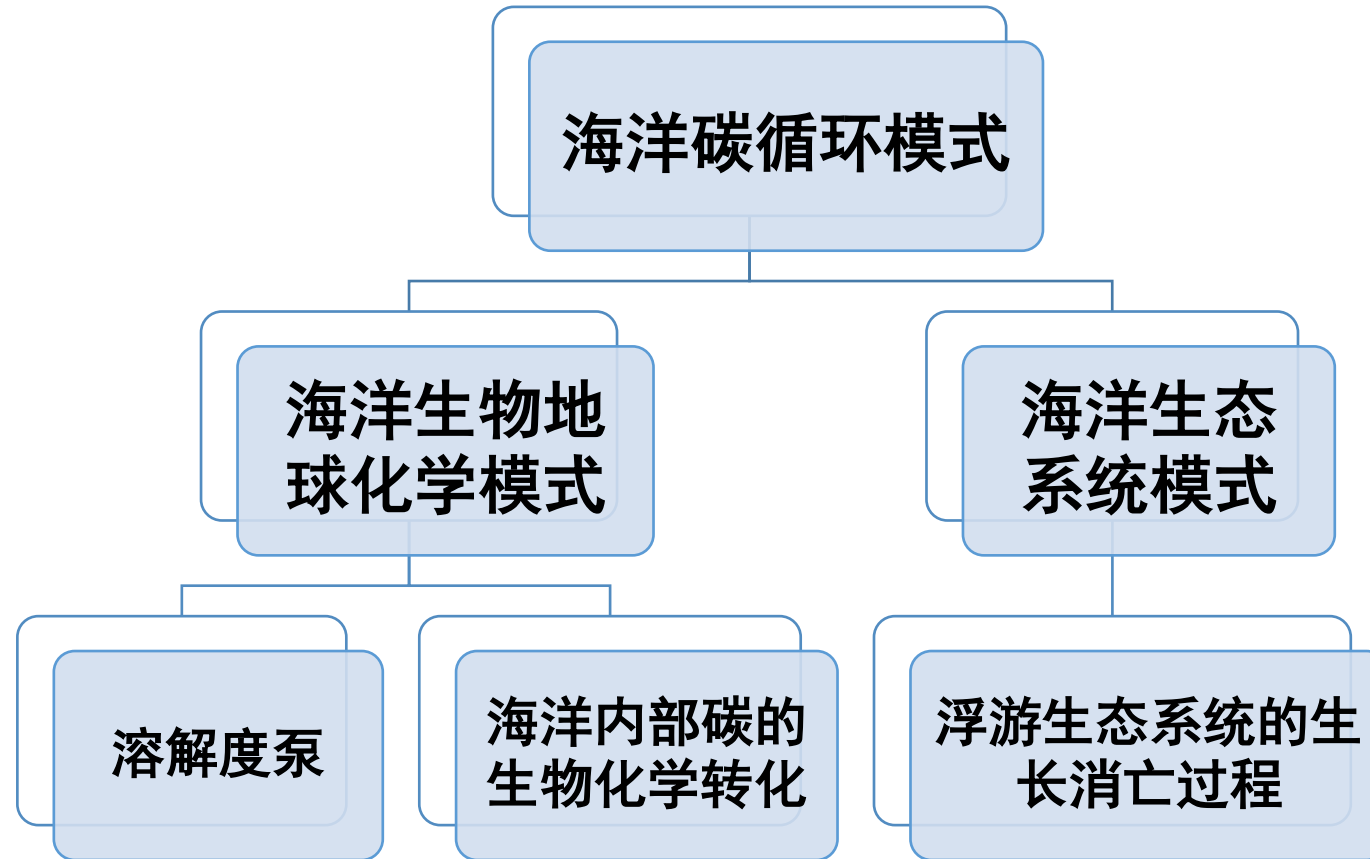
## 02 模式原理

怎么去建

- 控制方程
- 数值方法
- 变量情况
- 计算流程



## 海洋生化分系统模式-海洋碳循环模式



## 02 模式原理——方程

### 海洋生物地球化学（碳循环）模式

控制方程：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \underset{\text{平流}}{Adv(C)} = \underset{\text{扩散}}{Diff(C)} + \underset{\text{生化源汇}}{Bio(C)}$$

**C** 代表示踪物变量





# 数值计算方法

$$\begin{cases} \frac{C^* - C^n}{\Delta t} = \nabla \cdot (K \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{u}C) \\ \frac{C^{n+1} - C^*}{\Delta t} = \psi(C) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $C$ 代表生化预报量，方程右边两项分别为扩散项和平流项。 $C^*$ 为经 $\Delta t$ 时步后的物理输送解， $C^{n+1}$ 即为经物理输送、生化过程后的下一时刻预报值。海洋生物化学变量的预报对守恒性要求较高，且不能产生负值，采用时间分解算法也易于实现计算解的正定性。



# 平流项的计算-通量差分格式

$$\begin{aligned}\left(u \frac{\partial C}{\partial x}\right)_{i,j,k+\frac{1}{2}} &= \left(u \frac{\partial C}{4a \sin \theta_j \Delta \lambda}\right)_{i,j,k+\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{4a \sin \theta_j \Delta \lambda} \left[ \left(u_{j+\frac{1}{2}} + u_{j-\frac{1}{2}}\right)_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \left(C_{i,j,k+\frac{1}{2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + C_{i+1,j,k+\frac{1}{2}}\right) - \left(u_{j+\frac{1}{2}} + u_{j-\frac{1}{2}}\right)_{i-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \left(C_{i,j,k+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j,k+\frac{1}{2}}\right) \right]\end{aligned}$$



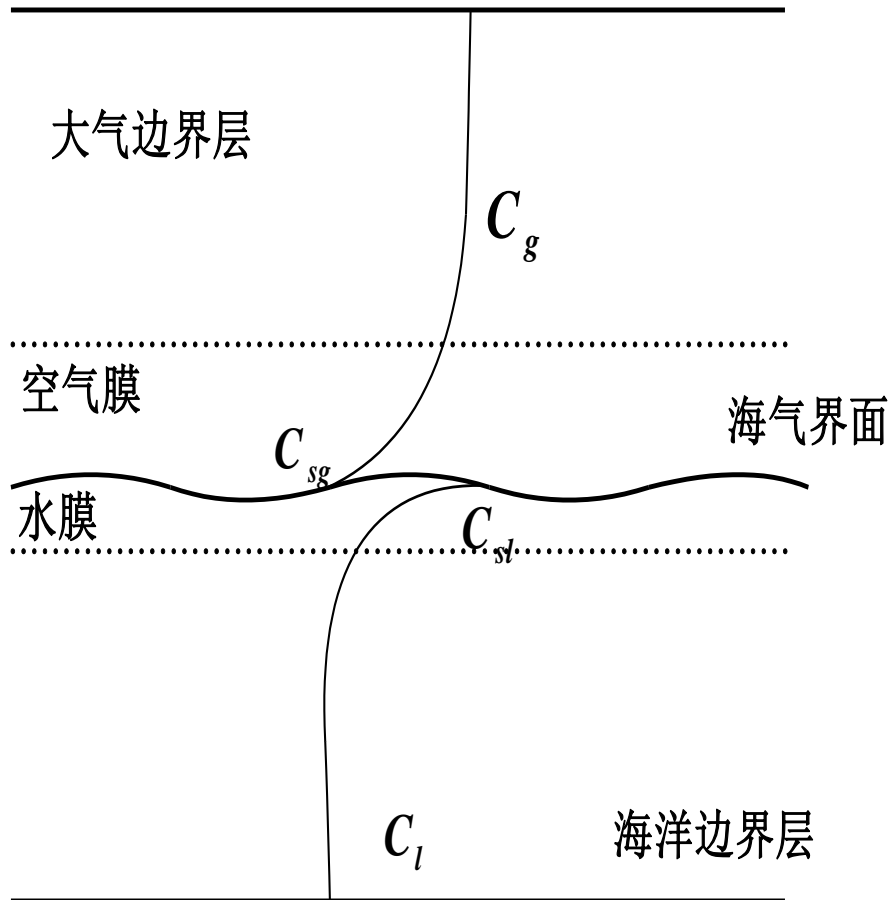
# 平流项的计算-通量加权迎风

$$\begin{aligned} \left(u \frac{\partial C}{\partial x}\right)_{i,j,k+\frac{1}{2}} &= \left(u \frac{\partial C}{4a \sin \theta_j \Delta \lambda}\right)_{i,j,k+\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{4a \sin \theta_j \Delta \lambda} \left[ upsh \right. \\ &\quad * \left. \left| \left(u_{j+\frac{1}{2}} + u_{j-\frac{1}{2}}\right)_{i-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \right| \left( C_{i-1,j,k+\frac{1}{2}} - C_{i,j,k+\frac{1}{2}} \right) + \left(u_{j+\frac{1}{2}} + u_{j-\frac{1}{2}}\right)_{i-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \left( C_{i,j,k+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j,k+\frac{1}{2}} \right) \right] \\ &\quad - \frac{1}{4a \sin \theta_j \Delta \lambda} \left[ upsh \right. \\ &\quad * \left. \left| \left(u_{j+\frac{1}{2}} + u_{j-\frac{1}{2}}\right)_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \right| \left( C_{i,j,k+\frac{1}{2}} - C_{i+1,j,k+\frac{1}{2}} \right) + \left(u_{j+\frac{1}{2}} + u_{j-\frac{1}{2}}\right)_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \left( C_{i,j,k+\frac{1}{2}} + C_{i+1,j,k+\frac{1}{2}} \right) \right] \end{aligned}$$

**upsh:** 加权迎风差的权重系数为0到1之间的数值，在权重系数为0时则为通量差分格式，为1时为迎风格式，默认权重系数为0.8。



# 溶解度泵：CO<sub>2</sub>气-海交换



对于CO<sub>2</sub>, 阻力来自水边

CO<sub>2</sub> 海气交换通量:

$$F = k\alpha(p\text{CO}_{2\text{sw}} - p\text{CO}_{2\text{atm}})$$

$\alpha$  为CO<sub>2</sub>海水中的溶解度,  
 $k$ 为CO<sub>2</sub>海水中传输速度, 一般表达为风速的函数。

$$k = 0.17W (Sc/660)^{-2/3} \quad W \leq 3.6$$

$$k = (2.85W - 9.65)(Sc/660)^{-1/2} \quad 3.6 < W < 13$$

$$k = (5.9W - 49.3)(Sc/660)^{-1/2} \quad W \geq 13$$

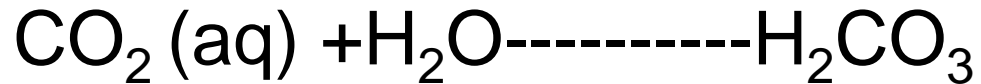
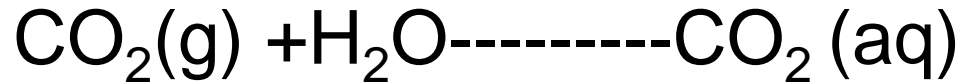
$$k = A w^2 (Sc/660)^{-1/2}$$

$W$ : wind speed

$Sc$ : Schmidt number



海水CO<sub>2</sub>体系：当大气 CO<sub>2</sub>穿越气-海界面溶于水后，就建立了海水二氧化碳体系（或碳酸盐体系）。CO<sub>2</sub>浓度常以分压（或逸度）来表示，其中海水中CO<sub>2</sub>分压(pCO<sub>2,sw</sub>)的大小是由CO<sub>2</sub>化学体系决定的。



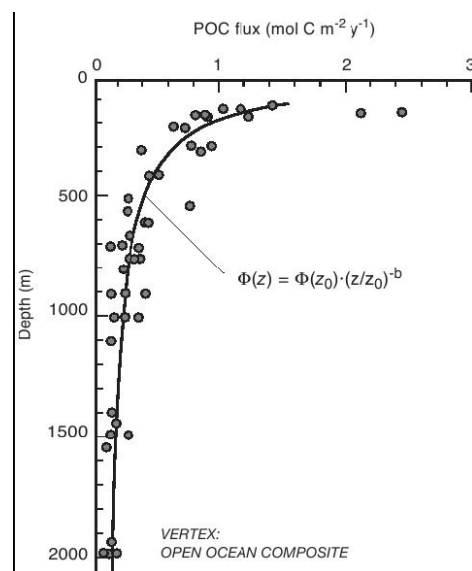
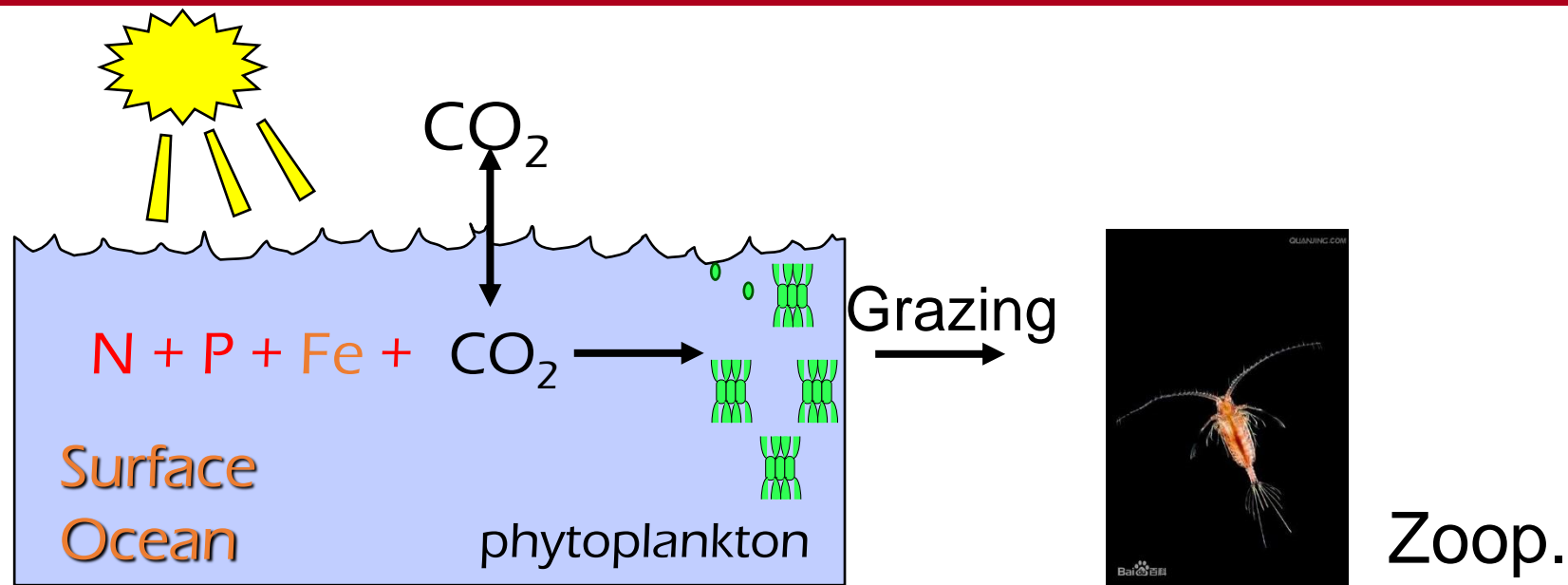
$$[\text{TCO}_2] = [\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

DIC	1	100	10
-----	---	-----	----

$$[\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}] = [\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{H}_2\text{CO}_3]$$



# 生物泵+碳酸钙泵：生物生产和再矿化



颗粒物

POC Vertical flux  
(Sarmiento and Gruber, 2006)

有机颗粒的下沉和再矿化





# IAP海洋碳循环模式：

1 简单生物地球化学模式（OCMIP-2 protocols）：

将生化源汇项部分进行高度参数化

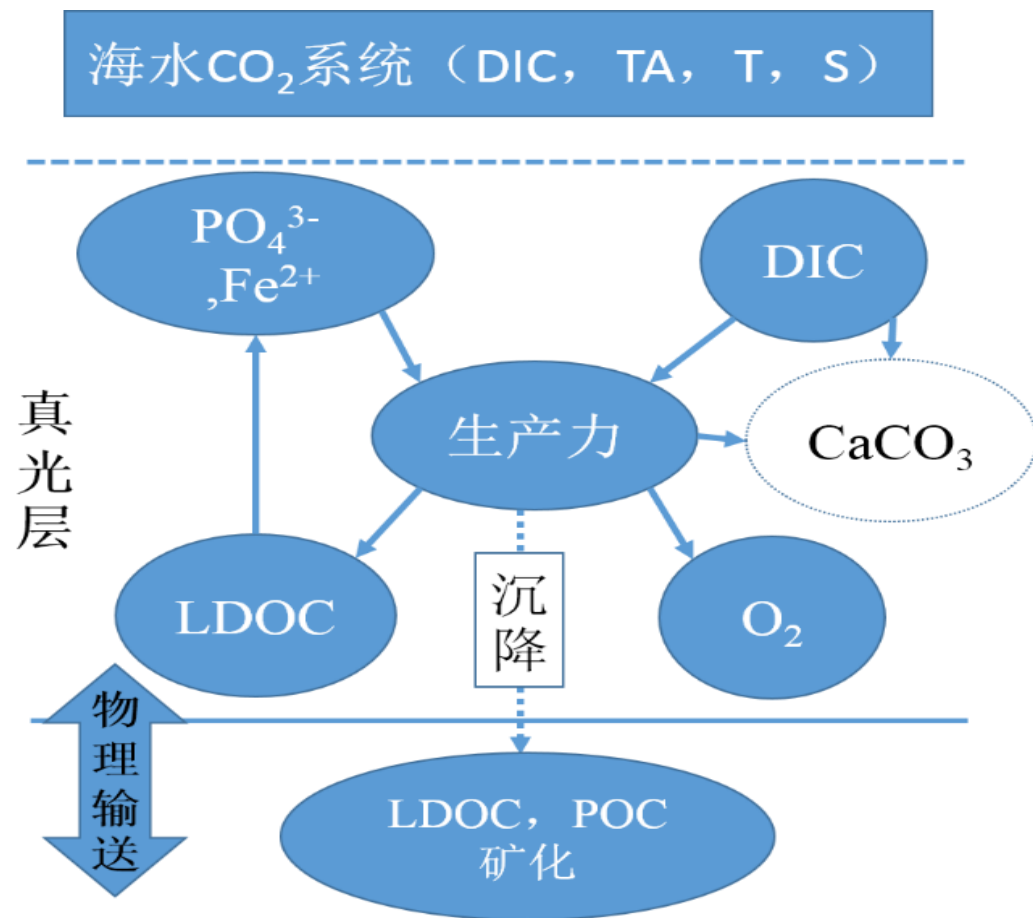
2 带显式生态系统模式的碳循环模式：

直接描述浮游生态系统的生产、生长、分泌、消亡  
等过程

生态系统模式



# 简单生化模式



# 海洋生化子系统单独运行时

生产力的计算:

$$A_1 = L_f \times r_0 \times [PO_4^{3-}] \frac{[PO_4^{3-}]}{(h_f + [PO_4^{3-}])} \times e^{-kz} \times \frac{T+2.0}{T+10.0} \quad (9)$$

$A_1$ 分成两部分，一部分为颗粒有机磷（POP），另外一部分为易溶解有机磷（LDOP）

磷酸盐源汇项的计算:

$$\varphi(PO_4^{3-}) = -A_0 - \frac{B_0}{r_{cp}} \quad (10)$$

$A_0$ 为真光层中颗粒有机磷（POP）的生产以及真光层下POP的矿化， $B_0$ 项为LDOP的生产和矿化

总溶解无机碳源汇项的计算:

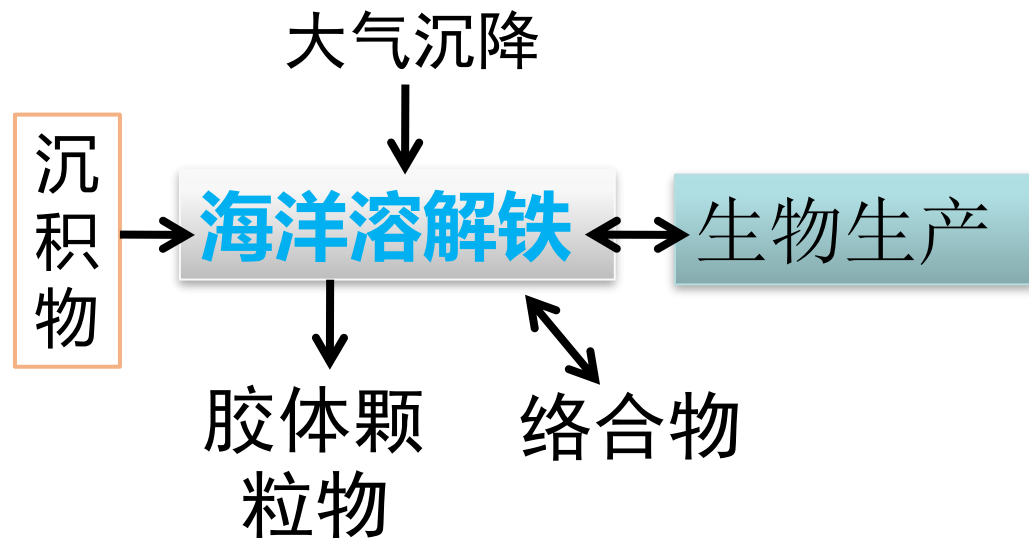
$$\varphi(TCO_2) = -r_{cp} A_0 - B_0 - C$$

总碱度源汇项的计算:

$$\varphi(TA) = r_{NP} \left[ A_0 + \frac{B_0}{r_{cp}} \right] - 2C$$



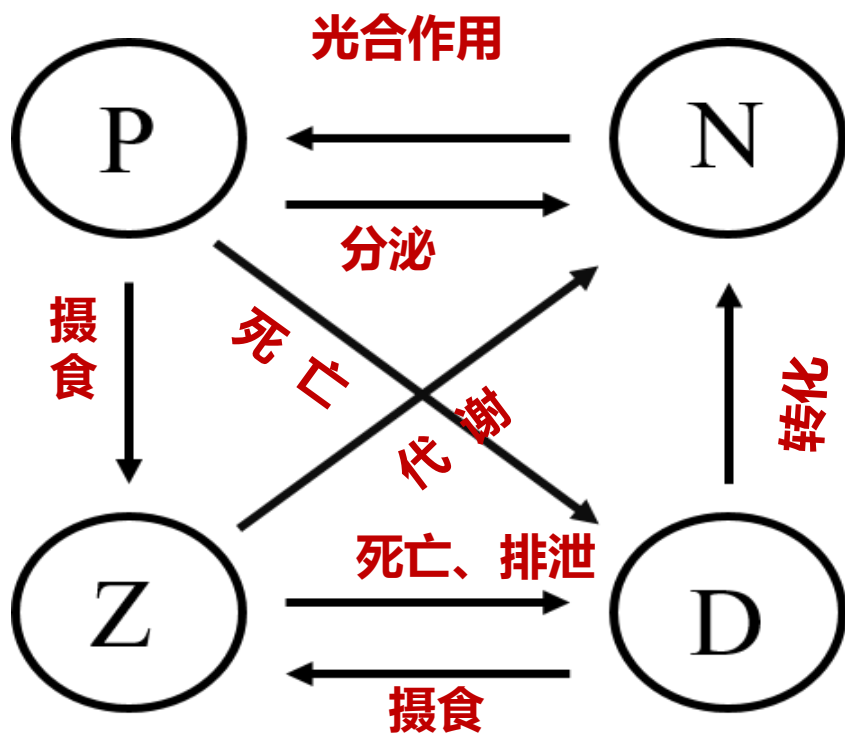
# 铁循环



$$A_1 = L_f \times r_0 \times [PO_4^{3-}] \min\left(\frac{[PO_4^{3-}]}{(h_f + [PO_4^{3-}])}, \frac{[Fe^{2+}]}{(h_{fe} + [Fe^{2+}])}\right) \times e^{-kz} \times \frac{T+2.0}{T+10.0}$$



# 生态子系统



## NPZD:

N 硝酸盐, P 浮游植物, Z 浮游动物,  
D 有机碎屑



N: 硝酸盐, 铵盐, 硅酸盐等

P: 多种功能不同的浮游植物

Z: 多种浮游动物

D: 多种有机碎屑

DON: 多种溶解有机氮



# 生化与生态子系统耦合运行

$$S_{bio}(PO_4) = [S_{bio}(NO_3) + S_{bio}(NH_4)] \times R_{PN}$$

$$S_{bio}(DIC) = [S_{bio}(NO_3) + S_{bio}(NH_4)] \times R_{CN} + S_{bio}(CaCO_3)$$

$$S_{bio}(TA) = 2(CaCO_3) - S_{bio}(NO_3) + S_{bio}(NH_4)$$

$$S_{bio}(DO) = S_{bio}(NO_3) \times R_{NOO_2} + S_{bio}(NH_4) \times R_{NHO_2}$$

$$\begin{aligned} S_{bio}(Fe) &= [(1 - x_{ze}) \\ &\times (\text{zooplankton excretion}) - (1 - x_D) \\ &\times (\text{detritus decomposition}) \\ &+ (\text{LDON decomposition}) \\ &- (\text{phytoplankton growth})] \times R_{FeN} \end{aligned}$$





## 25个预报变量:

DIC (总溶解无机碳)

TA (总碱度)

Ps (小型浮游植物) Pl (硅藻) Pc (颗石藻)

Zs (小型浮游动物) Zl (大型浮游动物)

Nn (硝酸盐) SiO<sub>4</sub> (硅酸盐) Nr (铵盐)

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (磷酸盐)

Fe<sup>2+</sup> (溶解无机铁)

Ds (小的有机碎屑) Dl (大的有机碎屑)

LDOC (溶解有机碳)

LDON (易分解溶解有机氮) SDON (Semi-labile DON)

RDON (Refractory DON)

O<sub>2</sub> (溶解氧)

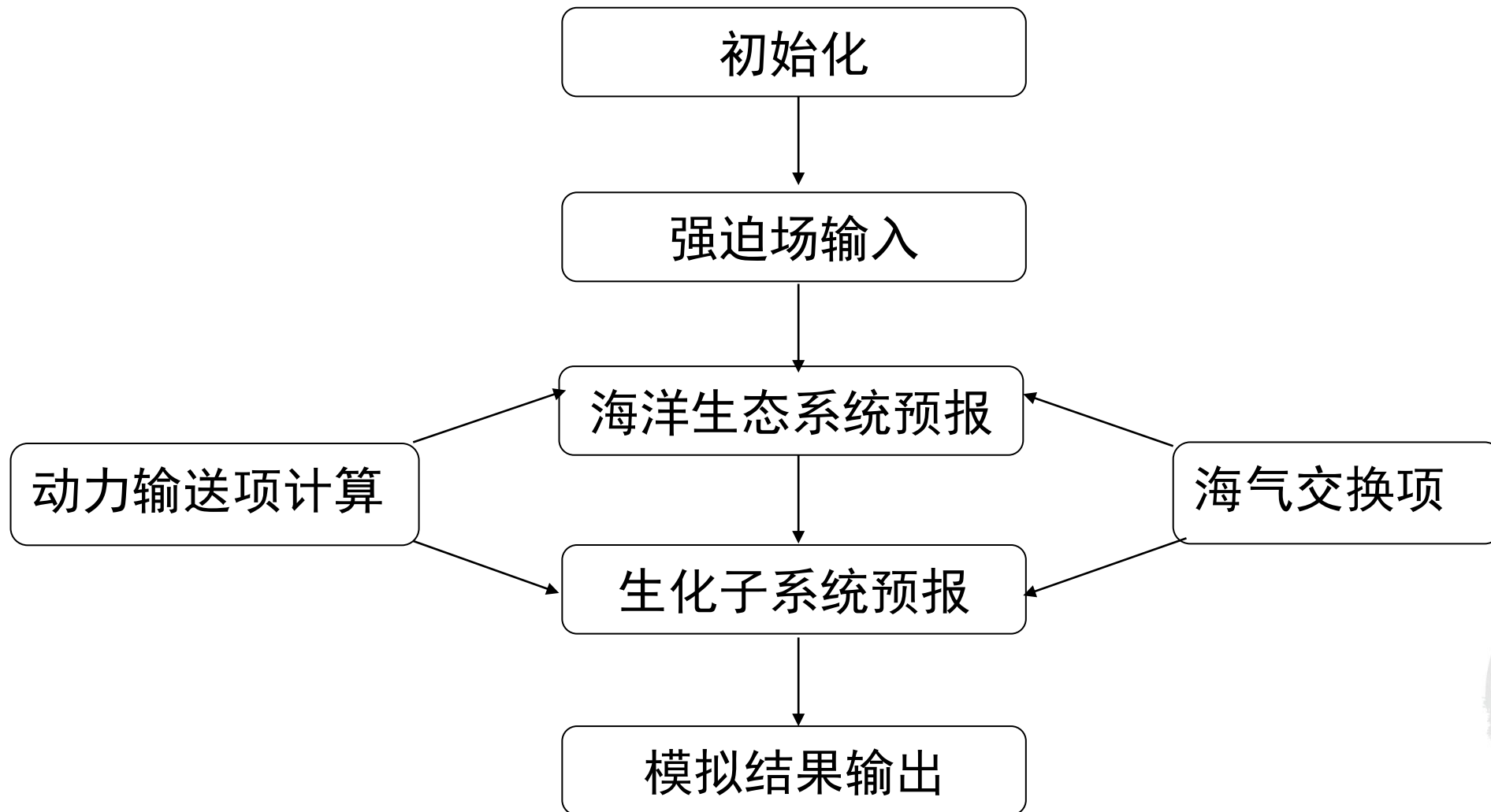
Ba (细菌)

Opal (蛋白石) Plsi (浮游生物硅)

Ca<sup>2+</sup> (钙离子)

CaCO<sub>3</sub> (non-living form) PC<sub>Ca</sub> (钙化浮游生物钙)

# 模式运行流程



# 04 数据制备

## 强迫场

(离线版本来自外部文件读取, 耦合版本来自大气模式)

海表风湿压

大气CO<sub>2</sub>浓度

**工业革命前:** 284.725 ppm

**历史实验:** 观测大气CO<sub>2</sub>浓度

大气铁/灰尘沉降:

**铁沉降:** Fe\_flux.nc

**沙尘沉降:** Dust\_flux.nc

## 初始场

### 生化系统模块

溶解无机碳浓度  
磷酸盐浓度  
溶解有机碳浓度  
总碱度  
溶解氧浓度  
溶解铁浓度

**Initial run:** carbon-init.nc  
**Continue run:** fort.32

### 生态系统模块

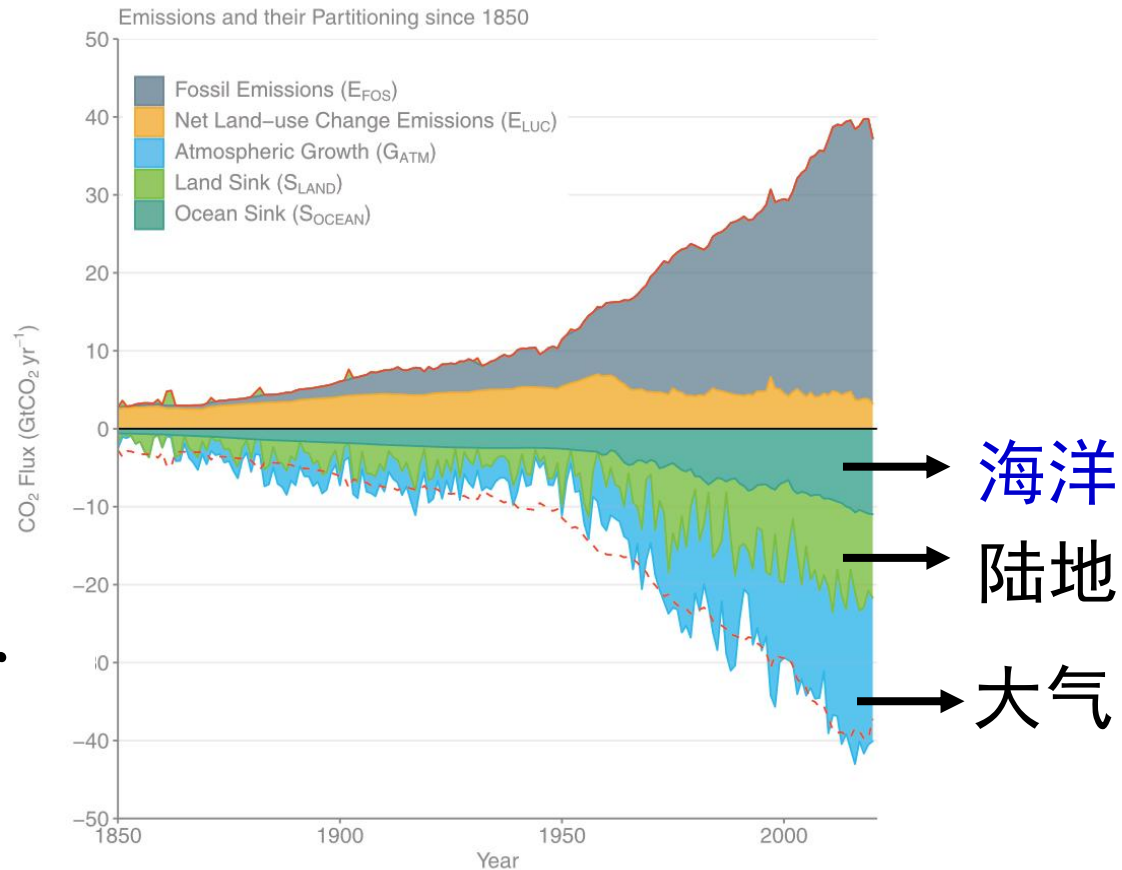
硝酸盐浓度  
普通浮游植物  
浮游动物  
碎屑  
其他化合价的氮元素  
溶解有机氮

**Initial run:** eco-init.nc  
**Continue run:** fort.52

# 05 结果诊断分析与应用案例

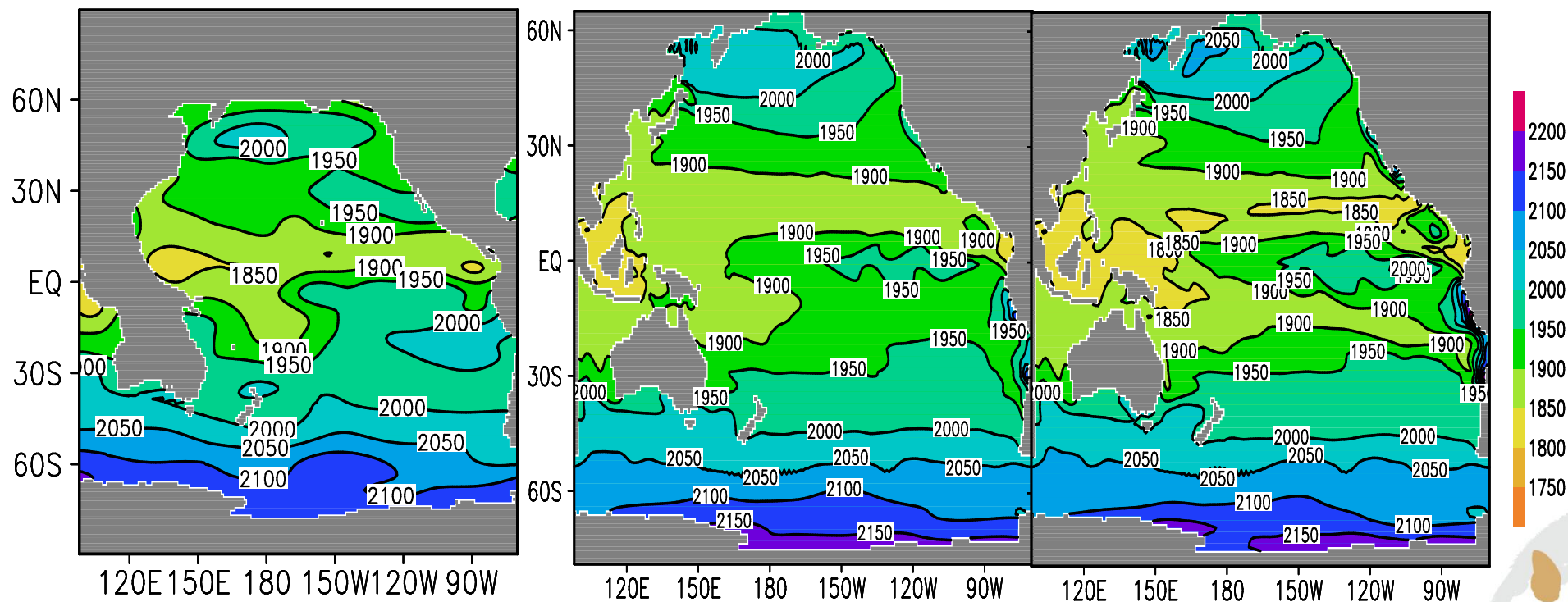
碳通量

Pg C/yr



# 关键变量诊断 (DIC、TA、营养盐、溶解氧、生产力等)

## 年平均海表溶解无机碳



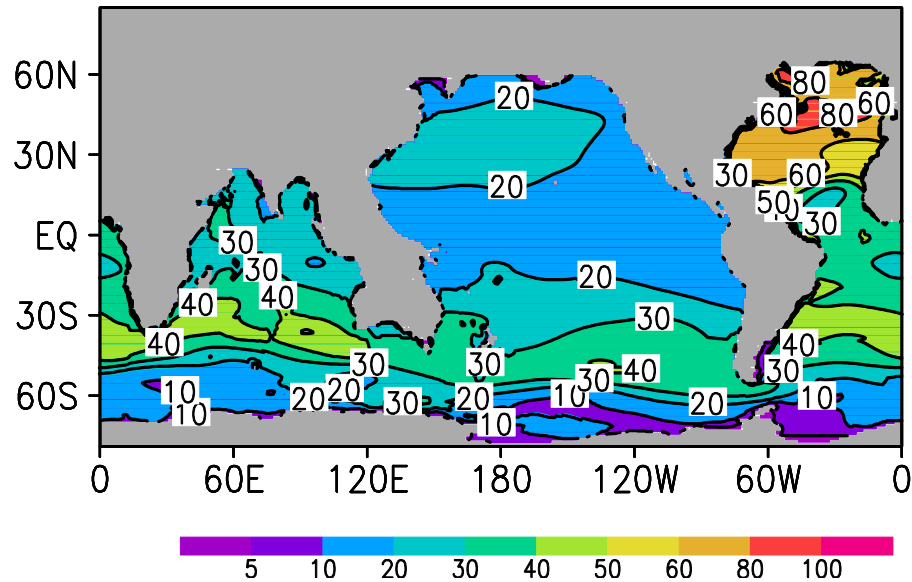
Data-based

Without Eco.  
(OBGCM)

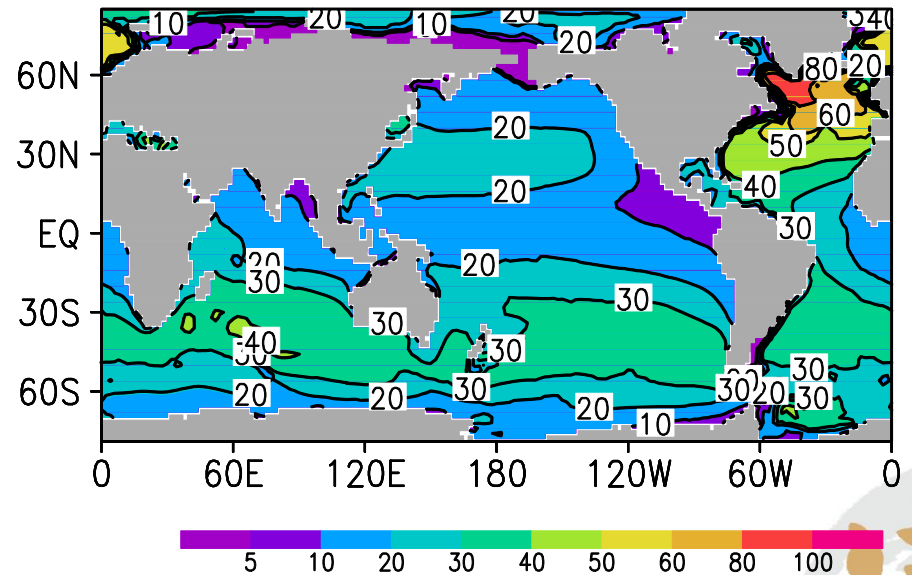
N2PZDD-C



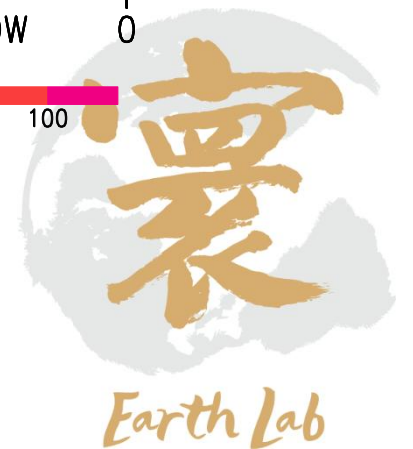
# 1990s海洋人为碳水柱总量分布 (mol/m<sup>2</sup>)



基于观测  
(GLODAP)



生化模式





# 其他重要的诊断

## 守恒性诊断：

存在海气交换过程的，要求海气交换通量与海洋内部该元素的变化量相等；

不存在海气交换过程的，要求海洋内部该元素守恒，如总氮守恒，总磷守恒。

## 判断方法：

通常是基于不同时刻的重启动场（保存的是各个变量的瞬时值加通量的累加值）进行判断



谢 谢