

# 海气交互数值模拟实验报告

邓楠<sup>1,2</sup>

1. ID 201928007313011; 2. 中科院国家空间科学中心;

**摘要:** 为了更加深刻的了解海洋过程如AMOC和物理参数如风应力、淡水通量的关系, 使用LICOM模拟30年1060-1990的海洋过程, 实验为两组分别是控制参数风应力和虚盐度通量。其中不仅学到了如何操作LINUX系统、如何运行模式、模式构成等知识, 更加深刻的理解了海洋过程受到边界条件的影响。实验结果表明, 风应力的为零影响了海表海流, 从而影响海表温度SST, 进而影响温跃层深度, 使得正压流消失, 除了ACC因其地形复杂还存在。淡水通量的减少影响盐度, 减弱了AMOC, 降低北半球海表温度。

**关键词:** 海气交互数值模拟; LICOM; 风应力; AMOC;

**中图分类号:** V221+.3; TB553

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965 (XXXX) XX-XXXX-XX

## 1 引言

LICOM (LASG/IAP Climate system Ocean Model) 由LASG全球海气耦合模式研究组设计开发的数值海洋模式, 主要目的是为模拟大尺度锋生环流和热盐环流。LICOM的发展历史已久, 从最初的LICOM1 ( $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 、南北范围 $60^{\circ}N \sim 60^{\circ}S$  的4层模式) 已经增涨到如今LICOM3 (30层,  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,  $90^{\circ}N \sim 78^{\circ}S$ ), 并且在模式比较计划CMIP5的报告中, 显示其对于ENSO的模拟是世界领先水平。

为了深入了解海洋过程是如何受到物理参数的影响, 开展数值模拟海洋物理过程。本实验主要想了解风应力和盐度在大洋环流中的作用。风生环流是局地或非局地海表风应力产生, 从海表面到深1000米的环流。热盐环流是由密度梯度驱动的深层环流, 而海水的密度梯度是由温度和盐度分布不均匀引起的。大洋环流对于全球气候有着至关重要的变化, 表层环流影响全全球的温度, 例如风应力驱动的湾流将暖水从低纬度向高纬度输送。温盐环流也对全球有着深远的影响, 当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。研究表明, 如果该洋流减弱, 至少北大西洋沿岸将会变冷。现有的数值模拟表明, 洋流减弱可导致整个北半球持续数百年的变冷。(Yu et al. 2017)

模式试验是深入了解研究对象的重要手段。以此为基础, 本实验主要包括控制实验、风应力实验、淡水实验。通过控制风应力、温盐方程中的淡水通量, 来了解这两个因子是如何影响海洋温度和海流的。风应力对海面的影响, 是赤道海流的重要形成原因。赤道东风带产生了南赤道流SEC和北赤道流NEC, 又因为二者的辐散引起Sverdrup理论下Ekman输送, 于是产生了北赤道逆流NSSC。而赤道的风异会产生ENSO或La Nina事件。因此, 风影响着全球深、浅层海流, 进而海温。因此, 了解风应力的影响是十分关键的。

## 2 实验设计

本节十分简略的讨论了LICOM的物理基础和其模式设计是如何让模式尽量精确。

## 2.1 LICOM网格和物理基础

1) 网格本实验中使用的LICOM2, 其使用的是经纬度网格。高度最高为30层, 经纬网格 $2^\circ \times 2^\circ$ 分辨率覆盖 $90^\circ\text{N} \sim 78^\circ\text{S}$ , 甚至在 $30^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{S}$ 达到了纬度分辨率为 $1^\circ$ 。模式采用B 网格, 矢量和标量定义在不同的格点上。其中U网格写着动量方程, T网格上写着海表高度和温盐方程。

2) 大洋环流模式LICOM2的模式运行方式包括海气耦合, 非耦合模式。非耦合模式使用的大气定义的初始场, 通过读取给定好的初始场来运行。本实验因为计算机资源有限, 使用了非耦合模式。

3) 基本假定LICOM的大洋环流模式取了一些基本近似。1) 假定流体是静力平衡的, 因为海洋环流水平运动尺度几十公里远大于海洋平均深度四千米。2) LICOM取Boussinesq近似忽略密度个别变化, 保留连续方程和静力方程中的密度变化, 使得质量守恒退化为体积守恒, 这和大气模式有十分大的区别。3) 取湍流粘性假定, 忽略分子间作用。

4) 基本方程组为经过简化的N-S方程(1)静力方程; (2)连续方程, 可压又不可压; (3)盐度状态方程; (4)温盐方程; (5)x、y方向的运动方程;

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} \\ & + F_T^x + F_T^y + F_T^z + \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial I}{\partial z} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} = & -u \frac{\partial S}{\partial x} - v \frac{\partial S}{\partial y} - w \frac{\partial S}{\partial z} \\ & + F_S^x + F_S^y + F_S^z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} \\ & + f v - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + F_u^x + F_u^y + F_u^z \\ \frac{\partial v}{\partial t} = & -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} \\ & - f u - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + F_v^x + F_v^y + F_v^z \end{aligned} \quad (5)$$

5) 边界条件。首先, 海表面有风应力影响可达到2000m, 它通过湍流粘性来强迫海洋模式即为公式(5)中的F; 热通量中只考虑短波穿透。盐度通量使用淡水通量来强迫。侧边界为刚性边界无滑动,

绝热。海底边界条件有两部分, 一是海底地形引起的爬升作用, 即洋流不能有垂直于地形坡度方向的分量; 二是海底的摩擦效应; 二是海底的摩擦效应;

6) 海表高度预报方程和表面重力波。海标高度预报方程在动量方程中因Boussinesq近似是无法求解的, 因此另外使用了连续方程的体积守恒来求出, 并使用了刚盖近似过滤表面波, 使用正压无辐散来计算。因为过滤了重力波这个快过程, 只剩下风应力, 梯度等慢过程, 刚盖近似使得模式计算素的加快。但是缺点就是使得海表高度预报不准确。

7) 差分格式。时间上使用蛙跳差分; 位温差分使用半点差分。

8) 次网格尺度过程的参数化方案。湍流混合中忽略分子粘性, 而采用湍流来表示粘性。其过程使用了雷诺平均、混合长理论。湍流过程混合风应力、热量, 它强烈的影响着海洋环流尤其是经圈翻转环流。中尺度涡参数, 依赖于Richardson数的参数化方案, 非局地混合。短波穿透。

## 2.2 LICOM2程序运行流程

LICOM的基础代码都用了Fortran90或C写成, 运行高效。并且LICOM采用了OpenMP的并行方式来计算, 有效提高了模式的运算速度。整个程序包含一个主程序LICOM和66个子程序, 其中模块文件param\_mod.F90定义模式中格点数和示踪物种类的参数; tracer\_mod.F90定义温盐方程和海冰的预报变量, 温盐实验修改此文件; 头文件def\_undef.h通过预编译实现源文件中模块使用。主程序通过rdriver.F90文件来读写气候强迫场, 在风应力实验中修改此文件。Ocn.parm文件用来控制程序的参数, 如积分步长, 输出频率等。

积分流程方面如1所示, LICOM.F90启动程序, 首先读入常数, 网格, 初始强迫场。然后开始月份循环, 内部进行天循环。天循环内, 按不同纬圈进行循环。按并行方式将纬圈划分到不同的CPU内进行运算。每天内首先读入密度等边界条件, 随后进行温盐方程, 动量、正压、斜压计算, 然后传其他层并进行海冰模式, 对流调整, 累积等过程。最后ENERGY屏幕输出平均动能, 位能, 海表温度, 海水温度等。并将预报变量写入CDF文件中直到30年计算结束为止。

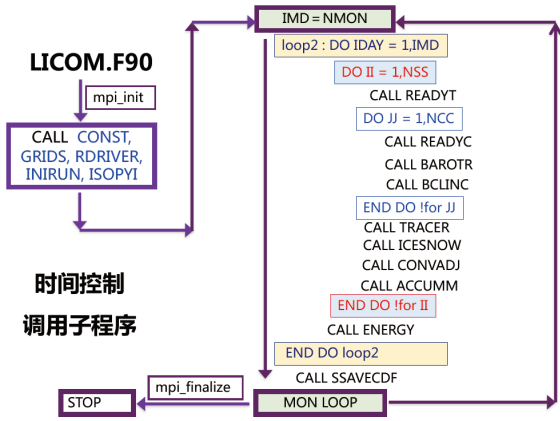


图1 LICOM积分流程图

### 3 实验设计

为了了解数值模式和相关物理过程，使用LICOM积分出1960-1990年结果，取1986-1990年的结果进行分析讨论。设置三个实验。实验一为控制实验，一切强迫参数均为默认值。目的为学习如何正确运行一个模式，并将其输出数据进行图像化表示。实验二为风应力敏感性实验，在实验一的基础上，将海表风应力改为0。目的为了解风应力对海洋的温度、盐度、高度等场的影响，具体分析见下一节。实验三为淡水通量的敏感性实验，在实验一的基础上在北大西洋50-70° N，160° W-15° E区域，持续注入0.1Sv的淡水。目的为了解淡水通量是如何影响AMOC的。

#### 3.1 LICOM的基础运行

本机选择了VMware15来安装LICOM，按百度操作进行了红帽系统向100G的扩容如图2。通过修改bld文件夹里的case.sh中的文件名，将3个实验分别放置于3个文件夹；使用基础运行的详细步骤见附件1：实验一。



图2 虚拟机安装LICOM实现扩容100G后的状态

本机设置4颗CPU，运算时将网格按纬度划分为如图3的4个分区。每个分区交界处有重合的

纬圈需要进行数据的交换，因此需要调用MPI子程序来进行各个CPU的数据交换。此类子程序为有`lobal_to_local`：将全局数组转换成局地数组，仅用于处理模式输入数据；`Exchange_XXX`：处理相邻CPU的单个或多个、二维或三维数组的边界交换等。OpenMP并行的启动方法为在src文件中的`def-undef.h`文件中`define SMPD`。

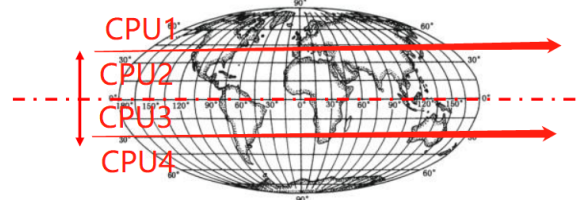


图3 并行下4个CPU并行方式的纬度分区

#### 3.2 LICOM的两种启动方式

LICOM在运行时，有两种启动方式。一种为初始积分(Initial Run)，即`ocn.parm`文件中`nstart = 1`，该启动方式读入的数据是Tinitial文件的初始场，出来的时间结果为1900年。另一种启动方式为续算模式，即`ocn.parm`文件中的`nstart = 0`，该启动方式读入的数据为Fort.22文件的数据。运行的详细步骤见附件1：实验一。二者实验的具体结果见4.1的两种方式启动结果对比。

#### 3.3 风应力影响实验

运行的详细步骤见附件1：实验二。主程序的读月平均气候场文件为`rdriver.F90`文件。因为在预编译选项`def-undef.h`文件中，`define`了`CDFIN`。所以，该读入数据方式为读NetCDF格式文件。`Rdriver.F90`文件读到了，经度、纬度，层数1，月数12，`SWV3`、`NSWV3`、`DQDT3`、`SU3`、`SV3`、`SST3`和`SSS3`共7个变量，分别为气候月平均的太阳短波辐射、非短波热通量、耦合系数、纬向风应力、经向风应力、海表温度和海表盐度。除两个方向的风应力在U网格上外，其它变量都分布在T网格上。修改的部分为见图4，读取完数据进行全局交换前的加入`SU3 = 0.0`，`SV3 = 0.0`即可。修改完毕需要重新编译文件。

```
155 #endif
156 !=====
157
158 #endif
159     end if
160 !
161     su3_io = 0.0
162     sv3_io = 0.0
163     call global_to_local_4d(su3_io, su3, 12, 1)
164     call global_to_local_4d(sv3_io, sv3, 12, 1)
165     call global_to_local_4d(sss3_io, sss3, 12, 1)
166     call global_to_local_4d(swv3_io, swv3, 12, 1)
167     call global_to_local_4d(nswv3_io, nswv3, 12, 1)
168     call global_to_local_4d(dqdt3_io, dqdt3, 12, 1)
```

图4 风应力敏感性实验rdriver.F90的程序修改

### 3.4 淡水通量敏感实验

本实验除了像实验二一样修改子文件，还应该考虑大西洋网格问题带来的并行问题、如何加入淡水的理论问题，和每个格点加多少水的计算问题。运行的详细并行分区、计算步骤见**附件1：实验三**。以下简述理论公式的选取，并行计算大西洋经纬格判断，面积积分计算，程序修改位置。

理论公式为盐度方程。通过虚盐度通量转化的公式，修改淡水通E-P。方程如下：

$$(E - P) = \frac{h_1}{S_1 \tau_s} (S_o - S_m) \quad (6)$$

实际修改程序时除了要注意单位Sv除以面积以达到向m/s的转换，还需要注意多除以1000以和程序中量级保持一致。

并行经纬格北大西洋50-70° N, 160° W-15° E区域都在CPU1内，因此修改程序的时候需要加mytid = 0。

面积计算使用了球表面积分，并且通过判断nan点去除了陆地点，最后得到结果为 $9.3 \times 10^{12} m^2$ 。其中对经纬度积分公式为下：

$$ds = a^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta d\lambda \quad (7)$$

$$= (\lambda_2 - \lambda_1) \times (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$$

加入的淡水通量值为 $3.77 \times 10^{-10} m/s$ 。将0.1Sv淡水通量除以面积，经过单位转化和保持在程序中的量级统一后每个格点，并除以1000。程序修改为给公式(6)减去该值如图5。

```

960 [SOMP PARALLEL DO PRIVATE (J,I)
961 DO J = JSM,JEM
962 DO I = 2,IMM
963 IF (ITHU(I,J) > 0) THEN
964 #ifdef COUP
965     STF(I,J) = SSP(I,J)
966     STF(I,J) = SSP(I,J)/ODSP(1)
967 #else
968     STF(I,J) = GAMMA * (SSS(I,J) - ATB(I,J,1,2))/ODSP(1)
969 #endif
970 IF (mytid=0) THEN
971     IF ((J<22 .AND. J>=11) .AND. (I<7 .OR. I=141)) THEN
972         STF(I,J) = - 3.77308248D-10+ GAMMA * (SSS(I,J) - ATB(I,J,1,2))/ODSP(1)
973     #endif
974 #endif
975 #
976     TF(I,J,1) = TF(I,J,1) + STF(I,J) * (1.0 - AIDIF)
977     TF(I,J,1) = TF(I,J,1) + STF(I,J) * (1.0 - AIDIF) * ODSP(1)
978     NET(I,J,2) = STF(I,J) * ODSP(1)
979 #
980 #endif
981 #endif
982 #endif

```

图5 淡水敏感性实验tracer.F90的程序修改

## 4 结果

本章给出三个实验的结果，并根据每个图的结果给出相应分析。因为用LICOM的积分时间为1960-1990年，这里只取1986-1990年的结果进行分析讨论。

### 4.1 控制实验结果

控制实验为最基础的实验，结果分为3节讨论，时间序列，平均态，垂直剖面结果。

### 4.2 时间序列

此节给出1986-1990年的全球海表温度SST，全球海水温度的时间序列。首先对比了屏幕输出和手算的全球SST。另外，还对比了2种不同启动方式的结果。

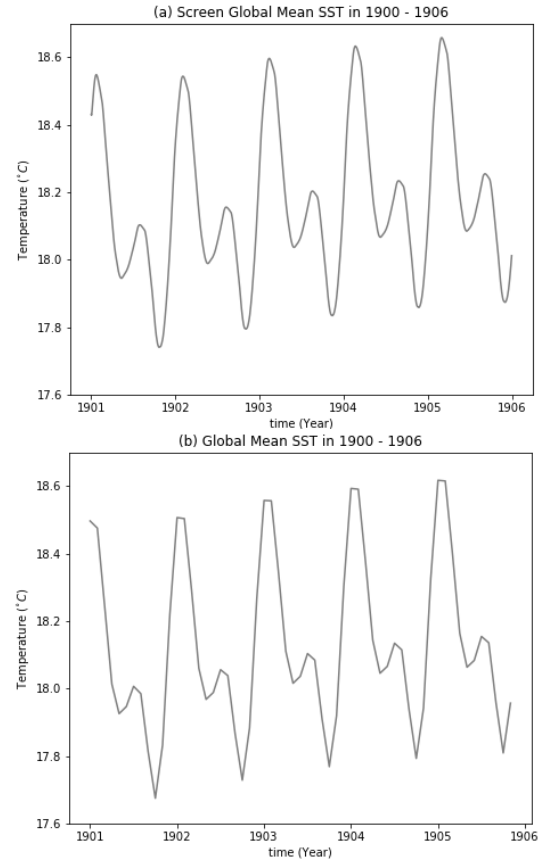


图6 启动方式1为Initial的海表温度变化，(a)为屏幕输出，(b)为手动计算

图6展示了全球海表温度SST的屏幕输出和手算区别，y轴为取值区间相同。可以看到屏幕(a)图更为连续且震动频率更大，(b)更曲折振幅较小。因为，屏幕输出是日输出，一年365个数据，因此出图更平滑。而手算(b)则是通过月平均文件来计算，一年12个数据。(b)幅度较小可能有两个原因，一为月平均数据平均了日变化因此振幅会更小。原因二为手动计算时取格点计算面积时存在误差、python算法带来的舍入误差。

手动计算面积使用公式(7)，格点查看了NC文件。排除陆面点，为每个格点温度值加权了该格点面积。其中90-30°N为2°x2°，30°N-30°S为1°x2°。积分了全球所有海洋格点后除以总面积得到。具体过程参见**附件二python代码中计算全球SST部分**。手算结果不但结果稍逊于屏幕输出，且运算的十分缓慢，且编程过程略负责，因此之后的时间序列均只使用屏幕输出。

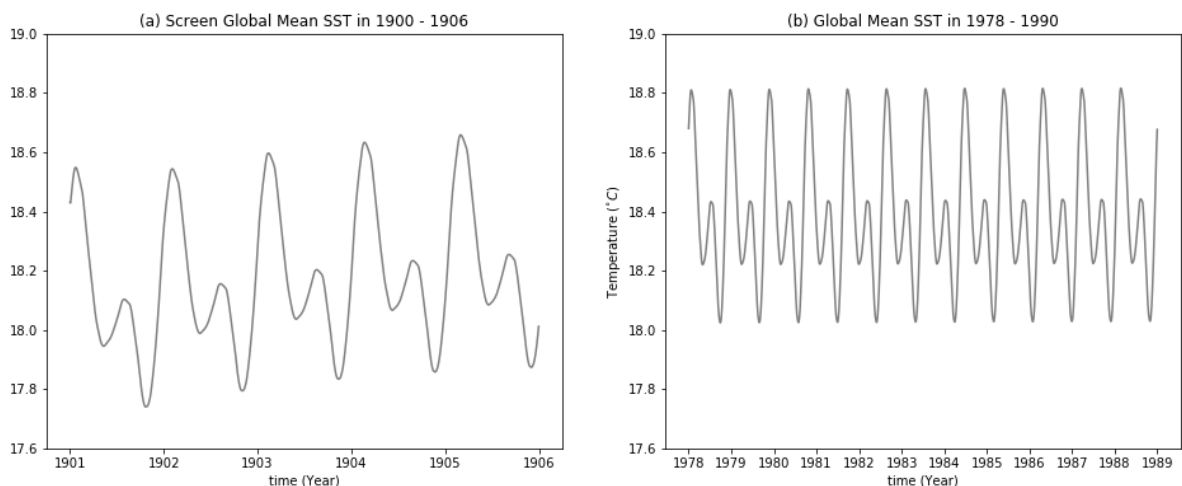


图7 海表温度变化, (a)为Initial启动输出的SST, (b)为Fort.22启动方式输出的SST

图7展示了两种不同启动方式的全球SST。

(a)为从Initial文件启动的积分了5年的结果。可以看到(a)中的值逐渐增大的, 因为读入的所有初始值都需要一定的时间来逐渐适应, 每5年才能增到0.1度, 因此估计要到稳定的18.8至少需要运行10年。而(b)是运行了约60年稳定了的序列, 因此结果会十分稳定, 可直接应用于后续分析。

图8展示了两种不同启动方式输出的全球海水温度。两种方式都显示了全球海水温度逐渐增大。但启动方式initial的结果(a)显示海水温度增温更缓慢, 同上一段一样模式在逐渐适应初始场。(b)显示也显示了小幅度的海水温度上升, 这是因为海表热通量没有进行归零, 容易会有净的热通量进入海洋。但在图7的全球SST中没有明显显示, 但其实也存在很小的幅度。

#### 4.3 控制实验平均态

本节介绍了SST、海表盐度、海表高度、海表盐度1986-1990年的平均态。并指出相应平均态

中可见的特征, 如海流特征。

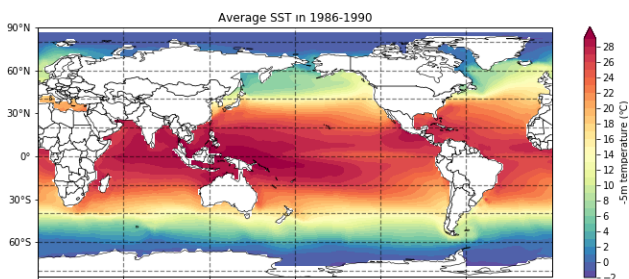


图9 控制实验下的LICOM2模拟出的1986-1990年全球海表温度分布图

图9中显示了SST平均态, 可以明显看到赤道海水温度高, 向两极逐渐降低。并且可以明显看到暖池区, 印度尼西亚贯穿流导致的西太平洋和东印度洋普遍较暖。相对应的东太平洋较冷。

图10中显示了海表盐度平均态, 可以明显看到地中海区域十分咸, 北极部分普遍盐度低, 尤其是新西伯利亚群岛、巴伦支海。另外大西洋的巴西沿岸, 和非洲西海岸更加咸。

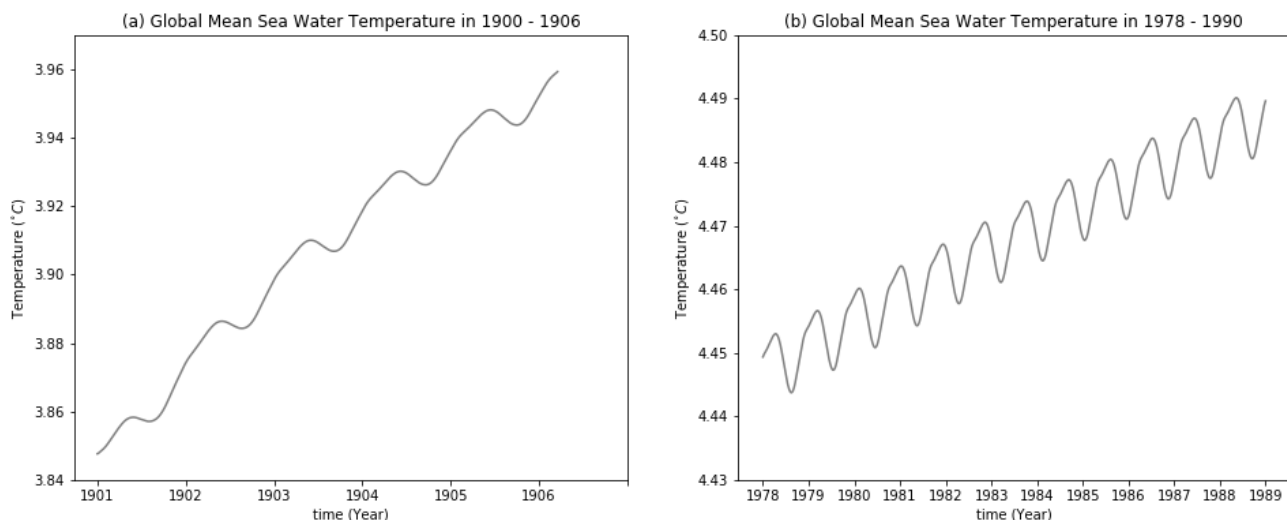


图8 海水温度变化, (a)为Initial启动输出的海水温度, (b)为Fort.22启动方式输出的海水温度



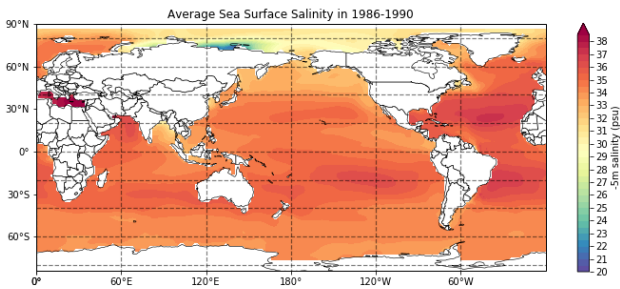


图 10 控制实验下的LICOM2模拟出的1986-1990年全球海

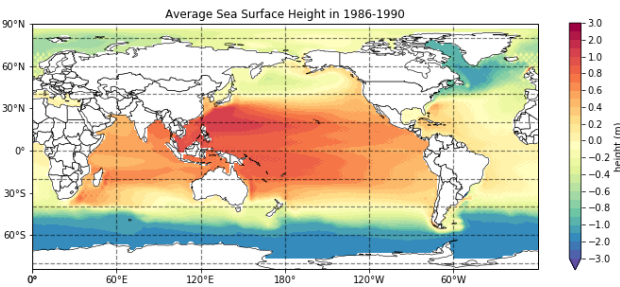


图 11 控制实验下的LICOM2模拟出的1986-1990年全球海  
表高度分布图

图11中显示了海表高度平均态，海表面高度和温跃层深度有正比得关系。因此常用海标高度来推测温跃层深度。从图中可以看到西太平洋暖池区的海表面很高。这是因为此处温跃层深度大，因此海表高度高。黑潮处海表高度很低。

图12中为海表流分布图，颜色只叠加了纬向流。可以从图中看到南赤道流SEC和北赤道流NEC。南赤道流的辐散特性，使得深层冷水上翻，于是此处常有冷舌出现。中间为北赤道逆流NECC，可能因为模式的分辨率问题，不是特别的明显。NECC的形成原理是Sverdrup风应力引起旋度变化，南赤道流向南，北赤道流向北，因此必须有中间的北赤道逆流辐合补充，形成了向东的海流。

#### 4.4 控制实验垂直剖面

本节介绍了SST、海表盐度、海表高度、海表盐度1986-1990年的平均态。并指出相应平均态中可见的特征，如海流特征。

图13为全球纬向平均温度。可以看到热带海表温度高，两极地有冷的上升流，尤其北极上升流很明显，南极区域为混合上升。

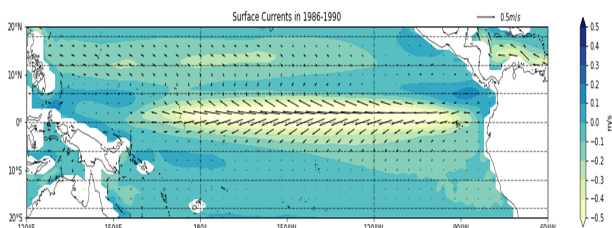


图 12 图控制实验下的LICOM2模拟出的1986-1990年太平  
洋赤道区域海流分布图

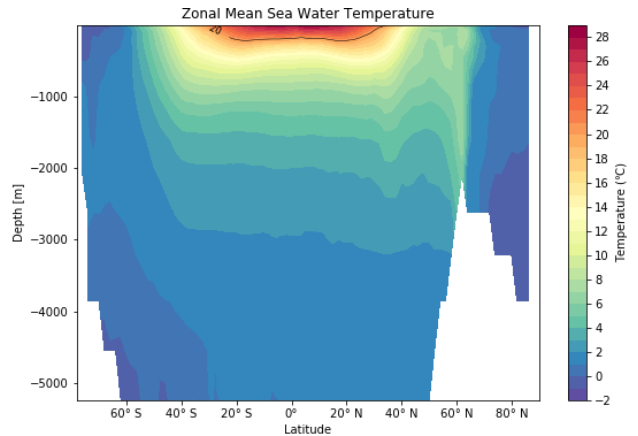


图 13 86-90年全球纬向平均海温,20°C等温线为温跃层

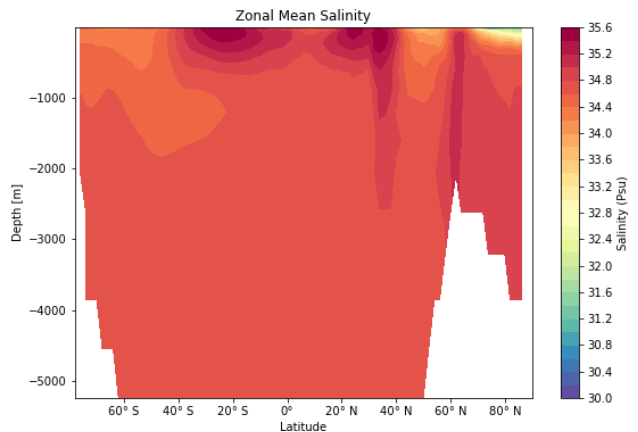


图 14 1986-1990年全球纬向平均盐度

图14为全球纬向平均盐度，30°N有盐度很大的地中海，因此该区域尤其咸。另外，南北纬20度对应着大西洋南北两处盐度较大的海域。

图15展示赤道南北纬2度平均温度，并将20°C约定为平均温跃层深度。东太平洋温度高，这是由于赤道东风带造成的暖水堆积，其对应温跃层也高。温度向下150m温度最大值向西偏移，这显示了风应力对海水Ekman螺旋的移动区线。图16展示赤道南北纬2度平均纬向流的速度。正号为向东，负号为向西。可以看到海表主要向西运

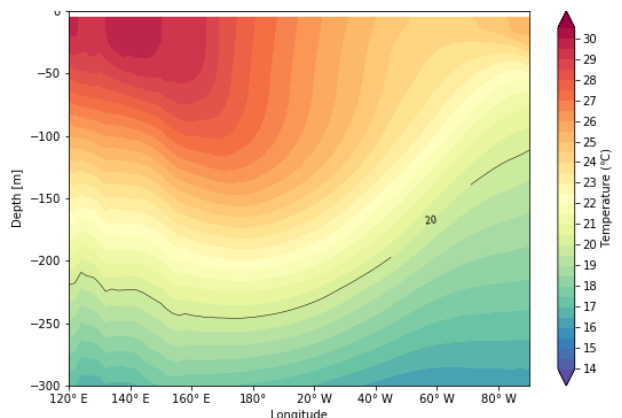


图 15 1986-1990年热带太平洋2 °N-2 °S纬向平均温度，  
取20°C为温跃层深度

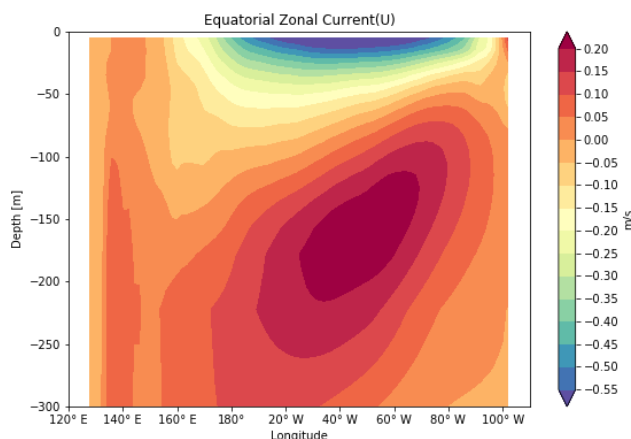


图 16 1986-1990年, 热带太平洋2°N-2°S纬向流速图

动, 因为赤道东风带的风应力驱动。深层的为赤道潜流EUC, 最大流速所在的深度自东向西逐渐抬升, 大体上和等温线的走向一致; 在向东流动的过程中EUC的强度有显著的变化, 表明存在着赤道内外水体交换。

#### 4.5 风应力敏感性实验

此节将对比控制实验讨论风应力实验的结果, 分析纬向流、海表温度、正压流函数、温跃层深度的变化。风应力对海面的影响, 是赤道海流的重要形成原因。赤道东风带产生了南赤道流SEC和北赤道流NEC, 又因为二者的辐散引起Sverdrup理论下Ekman输送, 于是产生了北赤道逆流NSSC。而赤道到的风异会产生ENSO或La nina事件。因此, 风影响着全球深、浅层海流, 进而海温。因此, 了解风应力的影响是十分关键的。

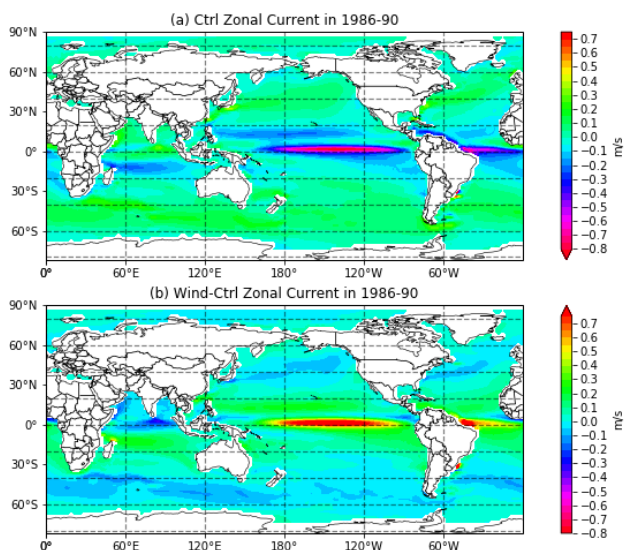


图 17 1986-1990年全球海表50m平均纬向流, 正值向西, 负值向东。(a)为控制实验;(b)为风应力实验减去控制实验结果

首先分析纬向流。因为Sverdrup理论下, 风应力通过Ekman影响到50米海流。因为海洋上层几十

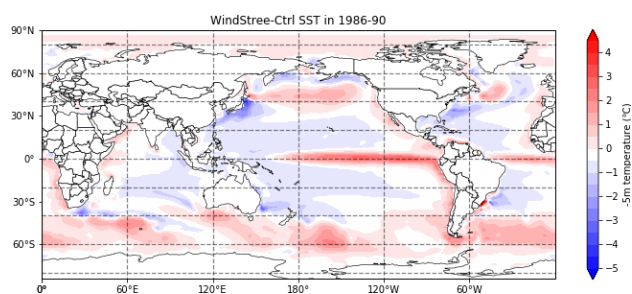


图 18 风应力实验减去控制实验的SST态

米是Ekman层, 速度随深度指数衰减并且偏转。这里计算上层50米平均的速度, 相当于EKMAN平均速度, 可以直接与风应力得到的理论解进行对比。因此这里选择画50米纬向流来表征风应力为0实验下, 风对于海洋的影响。图17为1986年-1990年全球纬向海流分布, (a)为控制实验海流图, 可以明显的看到赤道区域均为东风带风应力影响下的海流, 相应中高纬度为相反反向的海流。(b)为风应力实验减去控制实验的海流变化。可以看到赤道地区没有了风应力, 整体海流方向向东。印度洋原来的环流方向也从逆时针方向, 转得偏向变为顺时针。相应高纬度, 海流变化方向也和原来相反。湾流的方向也向反向转换。没有了海流, 就没有了赤道和赤道外得温度交换。

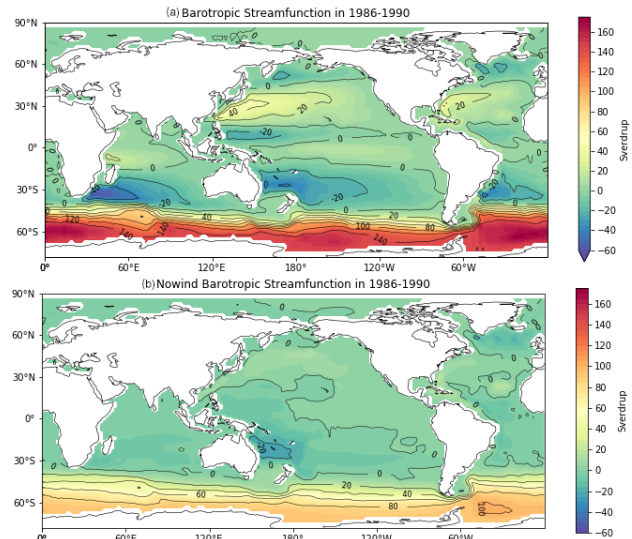


图 19 正压流函数, (a)控制实验的正压流函数。(b)风应力为0后正压流函数; 正值向东, 负值向西

这里分析风应力对全球海温的影响。图??显示了全球海温分布, 可以看到暖池区有所降低, 相应冷舌有4度的增暖。暖池的形成原因赤道东风带风应力将东表面的热海流吹到西边, 没有风应力了就会降温。相应中纬度湾流区没了风应力将热带暖水带来, 也降温了。

这里分析风应力对正压流函数的影响。图19 (a)中当没有风应力强迫时只有热盐强迫, 在副热

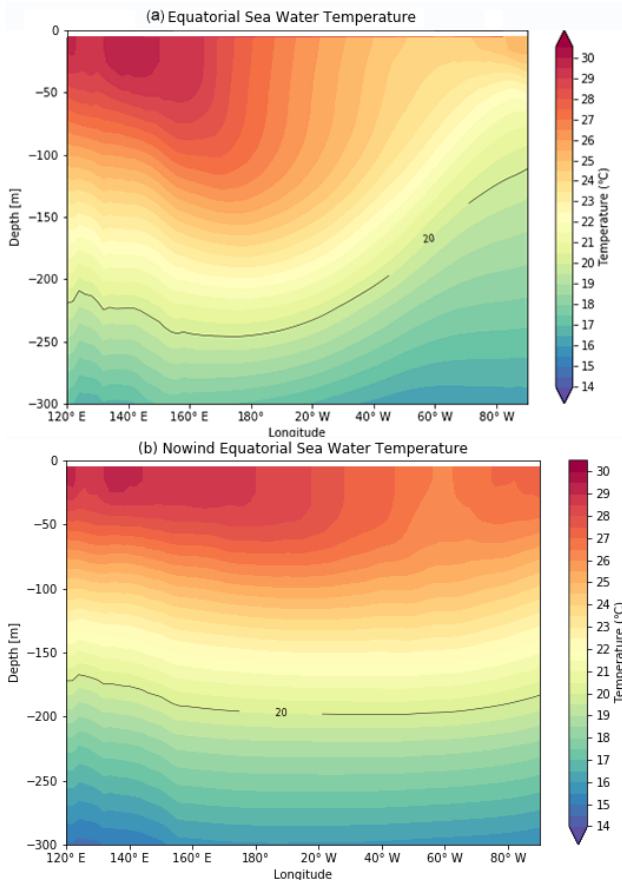


图 20 热带太平洋2 °N-2 °S纬向平均温度，取20°C线为温跃层深度。(a) 控制实验的温跃层；(b)的风应力为0后的温跃层深度；

带和热带海区几乎看不到正压流，只有ACC南极绕极流海存在大概在70Sv。(b)中加上风应力强迫以后，ACC显著加强可达140 Sv。另外可以看到在太平洋西北的副热带和热带区域海盆尺度的大涡旋gyre出现了，这是由于风应力在赤道东风，到西边界转向北而形成的反气旋环流。由此可见，风应力对正压流的贡献大于热盐强，没有风应力正压流只出现在南极绕极海域。此结果同(England, 1993)结果相同。

这里分析风应力对温跃层深度的影响。如图20(a)为控制实验的温跃层表现，可以看到西深东浅。但是没有了风应力，海表温度趋于东西一致，温跃层也会如图(b)一样区域平衡。并且可以看到温跃层中的温度梯度也没有了原来Ekman螺旋线的形状，正在逐渐恢复到平静。

#### 4.6 淡水通量敏感性实验

此节分析注入淡水后的变化，将分析海表盐度变化、温度变化、并从经圈流函数分析AMOC变化。海表盐度的分布不均，会引起海水的密度梯度变化，从而造成温盐环流AMOC。温盐环流的研究对象主要在大西洋，因为大西洋的海水交换频

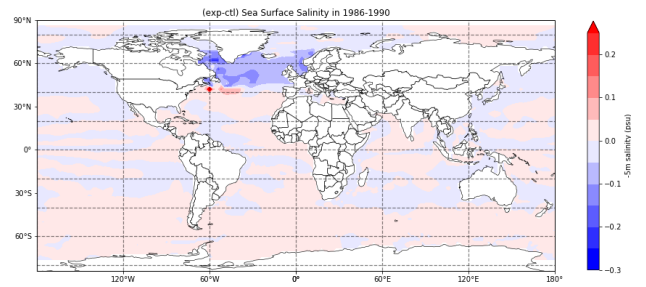


图 21 北大西洋加入淡水实验相对于控制实验的海表盐度(psu)变化，取值为1986-1990年平均。

率更高，且有北有北冰洋处向南达到16Sv的淡水输送，还有地中海盐度十分大的贡献。因此模拟北冰洋向大西洋注入淡水，也类似探讨全球变暖下，北冰洋融化会对热盐环流有如何的影响。实验在大西洋海盆50-70°N，160°W- 15°加入0.1Sv的淡水通量。通过模拟处流函数，来查看淡水通量实验对比控制实验有如何的变化。

首先分析盐度变化。图21为淡水实验减去控制实验的海表盐度，体现加入淡水后海表盐度的变化。除了该海盆盐度有0.2psu的降低外，可以看到全球海表盐度不同区域有微小的盐度增加或减少，这是由于AMOC所导致的。

这里分析海表温度SST的变化。图22显示的整体温度变化在1度以内。注入淡水的区域温度略降低了。北半球SST略升高，南半球稍升高。这一结果同 (Yu et al. 2017)，经圈环流的减弱会使得北半球整体变冷。

这里分析经圈环流AMOC的变化。图23展示了年平均的经圈流函数，为和报告手册方向一致，改为左北纬右南纬。(a)为控制实验的经圈流函数（手画了两个循环），可以看到南极区域有很强的下沉，北极区也又下沉但受地形影响和模式分辨率影响，南极的区域略的上翻不见了。从南极下来的冷水，在海底低纬度又逐渐上升，并在南纬40度又回到南极海表面，形成一个循环。在热带温带2000米以上的海水，又存在着北下降，南上升的形成第二个循环。(b)为淡水实验所产生的

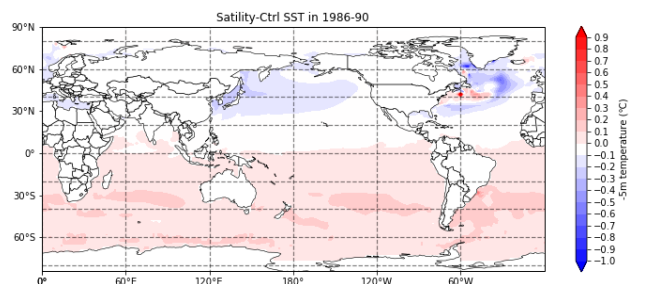


图 22 北大西洋加入淡水实验相对于控制实验的海表温度变化，取值为1986-1990年平均



经圈环流变化, 可以看到经圈环流在南北极的下沉没那么强了, 并在北半球温带2000米的下沉明显减弱了很多。

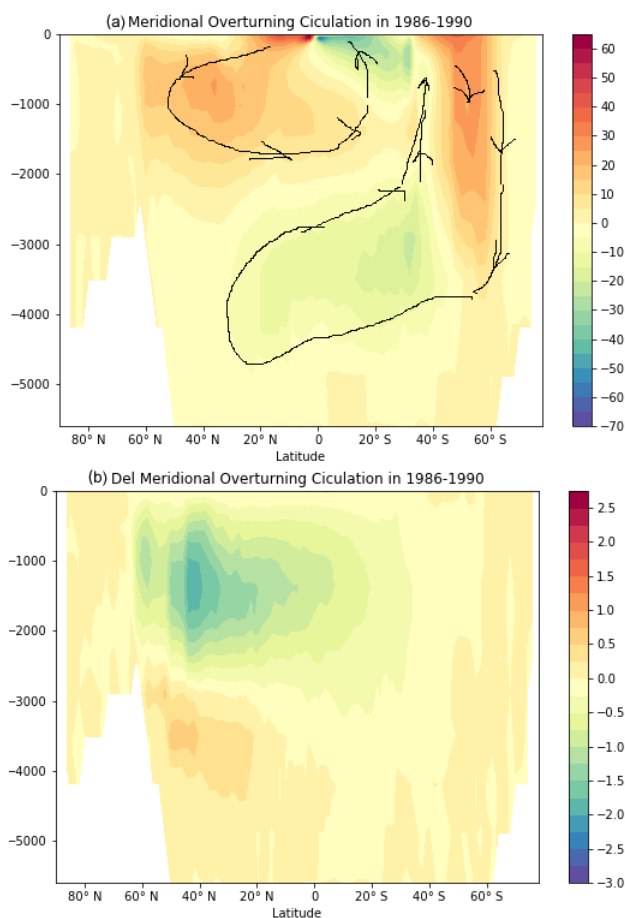


图 23 经圈流函数变化, (a)为控制实验结果; (b)为北大西洋加入淡水试验相对于参考试验的 ( $S_v$ ) 的变化, 取86-90年的平均值做差值。正值下沉, 负值上升。

## 5 结论

为更好的了解海气交互和数值模拟过程, 本报告通过LICOM数值模拟了三组实验: 控制实验、风应力敏感性实验、淡水通量敏感性实验。风应力深刻的影响着海表分布, 运转着全球大部分正压流, 体现着大气的重要作用。温盐环流中盐度的减弱, 明显的削弱了经圈翻转环流, 随着的盐度和温度的减小结果显示北半球会更冷。

通过本次实验, 学习了Linux操作, 了解了如何更好的读懂模式, 学了模式结构、串并行区别和如何修改基本的参数等。深刻的理解了风应力和盐度在经圈翻转环流中扮演着何种角色。这门课程含金量极高, 感谢各位老师的教授与无论时间地点的解答, 受益颇深, 鞠躬, 致敬!

## 参考文献

Yu, Tianlei, et al. "Responses and mechanisms of East Asian winter and summer monsoons to weakened Atlantic meridional overturning circulation using the FGOALS-g2 model." *International Journal of Climatology* 38.5 (2018): 2618-2626.

England M H, 1993: Representing the global-scale water masses in ocean general circulation models, *J. Phys. Oceanogr.*, 23, 1523-1552.

# 附件一

本附件包含三个实验的编程过程、计算公式、LICOM修改过程。

## 实验一 控制实验运行流程

1. 修改 src 下的 ssave.cdf.F90 中的

• 把if psi (j,k,1) <10000) then  
修改为 if psi (j,k,1) <9999999) then

```
if (diag_msf) then
  do k=1,km+1
  do j=1,jmt_global
    if (psi(j,k,1)<9999999.) then
      !if (psi(j,k,1)<10000.) then
        t2z_cdf(j,k,1)=psi(j,k,1)/NSS/(nmonth (mon0))
      else
        t2z_cdf(j,k,1)=spval
      end if
    end do
  end do
end do
```

2. 替换LICOM文件中得trace.F90文件
3. 在LICOM\_2\*2文件夹下创建新文件夹，命名为 Exp\_work
4. 复制bld文件夹里的 case.sh 到 my\_work 文件夹；
5. 进入文件夹 my\_work，打开 case.sh，第一行CASENAME改为 Exp\_work
6. 在Exp\_work 中，输入， ./case.sh，运行后出现 exe 和 src 两个文件夹。进入 exe，按初始场和积分时间修改 ocn.parm``，修改月分个数30年则为  $30 \times 12 = 360$ ，保存，退出

其中：IO\_REST表示NC文件多少年保存一次，IO\_HIST表示fort.22文件多少月保存一次

```
1  &namctl
2  DLAM           = 2.0           !grid distance
3  AM_TRO         = 15000
4  AM_EXT         = 15000
5  IDTB           = 120
6  IDTC           = 2880
7  IDTS           = 5760
8  AFB1           = 0.20
9  AFC1           = 0.43
10 AFT1           = 0.43
11 AMV            = 1.0E-3
12 AHV            = 0.3E-4
13 NUMBER         = 24
14 NSTART         = 0
15 klv            = 30
16 IO_HIST = 1
17 IO_REST = 1
18 diag_bsf = .true.
19 diag_msf = .true.
20
21
22 &end
```

月份数

推荐从0开始

7. 开始计算 ./run >log & 输出重定向到log文件中，回车再输入 bg 1

开始输出每天的文本变量到log中，结果出现 fort和nc文件，即为所求。

8. 续算, 首先用最新fort.22文件覆盖原来得fort.22文件 $cp -r fort.22.0060 - *fort.22$ ; 然后执行续算 `mpirun -np 4 ./licom2 >log &`

注意：其中np后跟的是cpu个数，如果和最开始得cash文件中的NSTART不同则会出错

9. 运行完成查看nc文件内部的结构， `ncdump -c MMEAN.nc |more`

10. 数据运行出来拖出电脑？ 鼠标直接从虚拟机拖到win。

## 实验二 风应力修改流程

### 创建风应力实验文件夹

1. 在LICOM\_2\*2文件夹下创建新文件夹，命名为 `wind`
2. 复制bld文件夹里的 `case.sh` 到 `wind` 文件夹；
3. 进入文件夹wind，打开 `case.sh`，第一行CASENAME改为wind

### 修改风应力文件

1. 进入 `wind/src/`，打开 `vim rdriver.F90`
2. 计算机采用并行方式，发现 SPMD 在 `def-undef.h` 文件中被定义。
3. 发现定义了 `CDFIN`，因此初始场的读入的是NetCDF文件。从下图可见，从7、8中读入了风应力。

```
!-----  
! Open netCDF file.  
!-----  
      iret=nf_open('MODEL.FRC',nf_nowrite,ncid)  
      call check_err (iret)  
!-----  
! Retrieve data  
!-----  
      start(1)=1 ; count(1)=imt  
      start(2)=1 ; count(2)=jmt_global  
      start(3)=1 ; count(3)=1  
      start(4)=1 ; count(4)=12  
  
      iret=nf_get_vara_double(ncid, 5,start,count,swv3_io)  
      call check_err (iret)  
      iret=nf_get_vara_double(ncid, 6,start,count,nsbv3_io)  
      call check_err (iret)  
      iret=nf_get_vara_double(ncid, 7,start,count,dqdt3_io)  
      call check_err (iret)  
      iret=nf_get_vara_double(ncid, 8,start,count,su3_io)  
      call check_err (iret)  
      iret=nf_get_vara_double(ncid, 9,start,count,sv3_io)  
      call check_err (iret)  
      iret=nf_get_vara_double(ncid, 10,start,count,sst3_io)  
      call check_err (iret)  
      iret=nf_get_vara_double(ncid, 11,start,count,sss3_io)  
      call check_err (iret)  
!  
      iret = nf_close (ncid)
```

4. 在交互数据处添加第161行，无论从文件读入何值，从全局传给局地的变量值均为0，退出保存！

```
155 #endif
156 !=====
157
158 #endif
159     end if
160 !
161     su3_io = 0.0
162     sv3_io = 0.0
163     call global_to_local_4d(su3_io,su3,12,1)
164     call global_to_local_4d(sv3_io,sv3,12,1)
165     call global_to_local_4d(sss3_io,sss3,12,1)
166     call global_to_local_4d(swv3_io,swv3,12,1)
167     call global_to_local_4d(nswv3_io,nswv3,12,1)
168     call global_to_local_4d(dqdt3_io,dqdt3,12,1)
```

5. 在 src 文件中执行 make clean, make, 重新编译文件。

6. 回到 exe 文件中，运行第一年，发现nc文件中的us和vs均为0， 修改成功！

## 实验三 注入淡水计算和修改流程

### 创建风应力实验文件夹

1. 在LICOM\_2\*2文件夹下创建新文件夹，命名为 salinity
2. 复制bld文件夹里的 case.sh 到 salinity 文件夹；
3. 进入文件夹 salinity，打开 case.sh，第一行CASENAME改为 salinity

### 计算过程

题目：在北大西洋50-70N，160 - 280E + 0 - 15E 之间的区域，持续注入0.1Sv的淡水

#### 计算平均格点加的淡水通量

通过虚盐度通量转化，修改淡水通量，使用的公式为

$$(E - P) = \frac{h_1}{S_1 \tau_s} (S_o - S_m)$$

$h_1$ 为第一层厚度，淡水通量为 $E - P$ 蒸发-降水， $S_o$ 为观测盐度， $S_m$ 为模拟盐度， $S_1$ 为表层的大洋参考盐度。

#### 计算海洋面积

$1^\circ \approx 11km$  取近似梯形面积，上底50°，下底70度，高弧长从25度，并乘以 $10^6$ 将km转化为m

```
S = (25*111)/2*(np.cos(5/18*np.pi)*95*111 + np.cos(7/18*np.pi)*95 * 111)*1000000
S
14408906885775.307
```

#### 去除陆地点

使用python，DataFrame查看nc文件结构，发现经度范围内 280-360°W，0-15°E，50-70°N 有格点数为  $11 * 41 + 11 * 8 = 539$

```
[34]: sali[10:21,-42:-1]
```



```
Coordinates:
* lat      (lat) float32 70.0 68.0 66.0 64.0 62.0 ... 58.0 56.0 54.0 52.0 50.0
* lon      (lon) float32 280.0 282.0 284.0 286.0 ... 354.0 356.0 358.0 360.0
lev        float32 -5.0
time       float64 1.07e+03
Attributes:
long_name:  salinity
units:      psu
```

```
[70]: sali[10:21,0:8]
```

```
Coordinates:
* lat      (lat) float32 70.0 68.0 66.0 64.0 62.0 ... 58.0 56.0 54.0 52.0 50.0
* lon      (lon) float32 0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0
lev        float32 -5.0
time       float64 1.07e+03
Attributes:
long_name:  salinity
units:      psu
```

```
Coordinates:
* lat      (lat) float32 70.0 68.0 66.0 64.0 62.0 ... 58.0 56.0 54.0 52.0 50.0
* lon      (lon) float32 0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0
lev        float32 -5.0
time       float64 1.07e+03
Attributes:
long_name:  salinity
units:      psu
```

其中nan为陆地值，有 $156+36 = 192$ 个，因此海洋点有347个。

```
[5]: str1 = str(sali[10:21,-42:-1].values)
[6]: str1.count('nan')
[6]: 156
[7]: str2 = str(sali[10:21,0:8].values)
str2.count('nan')
[7]: 36
```

因此海洋面积结果为

```
S1 = S * 347/539
S1 # 9.4*10^12
9276235045202.283
```

$$area = (25 * 111)/2 * (np.cos(5/18 * np.pi) * 95 * 111 + np.cos(7/18 * np.pi) * 95 * 111) * 1000000 * 347/539$$

结果为 $9.3 * 10^{12}$

因此每个格点注入值为下：

$$0.1 * 10^6 * 35/1000/area = 3.77 * 10^{-10}$$

```
[13]: 0.1*1000*35/S1
[13]: 3.773082487609257e-10
```

注意：因为模式中， $S^* = (S - 35) / 1000$ ，因此在计算中也需要除以1000来保持数量级大小

## 程序修改

- 判断是否跨CPU

不跨节。实验中，此机采用CPU=4，lat = [90,88,86,..., -78]共115个节点，115/4 = 28.75个节点，因此一个CPU计算29个节点，从北向南，CPU1计算[90°N, 34°N]区域，如下图。因此

```
lat[0:29]

array([90., 88., 86., 84., 82., 80., 78., 76., 74., 72., 70., 68., 66.,
       64., 62., 60., 58., 56., 54., 52., 50., 48., 46., 44., 42., 40.,
       38., 36., 34.], dtype=float32)
```

因此，包含了[70°N, 50°N]。

又由程序查看到，经纬度[70°N, 50°N]对应的Index为lat = [10 : 21], lon = [140 : 181]因为Fortran从1开始，则为lat = [11 : 22], lon = [141 : 182]

```
sali[10:21,140:181]

<xarray.DataArray 'ss' (lat: 11, lon: 41)>
array([[ nan,      nan,      nan, ..., 34.02607, 34.163258, 34.311916],
       [ nan,      nan,      nan, ..., 34.078533, 34.214817, 34.315865],
       [ nan,      nan,      nan, ..., 34.10533 , 34.299675, 34.624184],
       ...,
       [ nan,      nan,      nan, ...,      nan,      nan, 34.798893],
       [ nan,      nan,      nan, ...,      nan,      nan,      nan],
       [ nan,      nan,      nan, ...,      nan,      nan,      nan]],
      dtype=float32)
Coordinates:
  * lat      (lat) float32 70.0 68.0 66.0 64.0 62.0 ... 58.0 56.0 54.0 52.0 50.0
  * lon      (lon) float32 280.0 282.0 284.0 286.0 ... 354.0 356.0 358.0 360.0
  lev       float32 -5.0
  time       float64 1.07e+03
Attributes:
  long_name:  salinity
  units:      psu
```

- 程序修改tracer.f90

在文件 def-undef.h 中查看是，COUP是undefined，于是选用else后的部分，L985公式为：

```
STF (I,J) = GAMMA * (SSS (I,J) - ATB (I,J,1,2))/ODZP(1) - 3.77*10D-10
```

```

958         IF (N == 2) THEN
959
960 !$OMP PARALLEL DO PRIVATE (J,I)
961         DO J = JSM,JEM
962             DO I = 2,IMM
963                 IF (ITNU (I,J) > 0) THEN
964 #ifdef COUP
965 !                     STF (I,J) = SSF(I,J)
966                     STF (I,J) = SSF(I,J)/ODZP(1)
967 #else
968                     STF (I,J) = GAMMA * (SSS (I,J) - ATB (I,J,1,2))/ODZP(1)
969 IF(mytid==0) THEN
970     IF ((J<=22 .AND. J>=11).AND.(I<=7.or.I>=141)) THEN
971         STF (I,J) = - 3.77308248D-10+ GAMMA * (SSS (I,J) - ATB (I,J,1,2))/ODZP(1)
972     ENDIF
973 ENDIF
974 #endif
975 !                     TF (I,J,1) = TF (I,J,1) + STF (I,J)* (1.0- AIDIF)
976                     TF (I,J,1) = TF (I,J,1) + STF (I,J)* (1.0- AIDIF)*ODZP(1)
977 !
978                     NET (I,J,2) = STF (I,J)*ODZP(1)
979 !
980                     END IF
981             END DO
982         END DO

```

其中,

$$GAMMA = \frac{3}{\tau_s} = \frac{3}{90 \times 86400}$$

$$S_1 = 35 \text{ } psu$$

$$ODZP = \frac{1}{h_1}$$

GAMMA出现3倍值得原因是, 在该情况下, 守恒, 淡水通量没办法加到体积里面, 所有只能用恢复盐度边界条件, 通过加入, 反应在观测的盐度通量, 最合理的则为3倍值。

- 保存修改, 在 src 中make clean, make。
- 运行实验
- 发现第一年的对应区域确实有盐度变化, 修改程序成功!

## 答疑:

### 1. 初始场在哪里, 如何从1960年开始?

初始场有TSinitia和fort.22:

NSTART = 1 表示初始积分, 从TSinitial启动, 输出为0001-01-01

NSTART = 0 表示继续积分, 从fort.22启动, 输出为fort.22的时间, 如fort.22-0060-01-01, 输出即为MMEAN0060-01

建议从1960年开始积分30年, 取后面的5年做年平均进行对比。1960年的fort.22\* 在data文件, 拷贝到当前目录下fort.22覆盖。

### 2. ./run > log & 和 mpirun -np x ./licom2 什么区别?

mpirun可以指定cpu个数, 但是如果x和cash.sh设定的cpu不同, 会边界报错。

./run可以畅通无阻

### 3. 运行内存不够, 如何扩容? 红帽系统适用 VMware的教程, 非VB

<https://www.jb51.net/article/144291.htm>

注意最后11的代码, 改为

```

xfs_info /dev/mapper/vg00-lvroot    #可通过fdisk -l查看设备路径
xfs_growfs /dev/mapper/vg00-lvroot #扩容则需要使用

```

输入mpiifort tracer.F90, 能看到具体报错

## 附件二 python代码

### 计算全球SST时间序列

```
rootdir = './compare1/'
list = os.listdir(rootdir) #列出文件夹下所有的目录与文件
list.sort()
#读取一个lat, lon
ds = xr.open_dataset(rootdir+list[1],decode_times=False)
ts = ds['ts'][0,0]
lon = ts.coords['lon'].values
lat = ts.coords['lat'].values
a = 6.371e6
list.sort()
list = list[1:-1]

lat = abs(lat)
lat[0] = lat[1]
lon[-1] = lon[0]

# 表面积计算 #
S = []
Sqhere = 0.0
for i in range(len(lat)):
    for j in range(len(lon)-1):
        if np.isnan(ts[i,j]): #去除nan值
            continue
        elif (lat[i]<31):
            v = np.sin(np.pi/180*(lat[i]+0.5))-np.sin(np.pi/180*(lat[i]-0.5))
            area = v*np.pi/180*(2.0)*a*a
            S.append(area)
            Sqhere =Sqhere + area
        else:
            v = np.sin(np.pi/180*(lat[i]+1.0))-np.sin(np.pi/180*(lat[i]-1.0)) #
lat:i,lon:j
            area = v*np.pi/180*(2.0)*a*a
            S.append(area)
            Sqhere =Sqhere + area
print('%e' % Sqhere) #3.6e14

# SST计算
SST_series = [] #
for n in tqdm(range(len(list))):
    try:
        ds = xr.open_dataset(rootdir+list[n],decode_times=False)
    except:
        continue
    ts = ds['ts'][0,0]
    SST = 0.0
    ii = 0
    for i in range(len(lat)):
        for j in range(len(lon)-1):
```



```
        if np.isnan(ts[i,j]):
            continue
        elif (lat[i]<31):
            SST = SST + S[ii]*ts[i,j].values
            ii = ii + 1
        else:
            SST = SST + S[ii]*ts[i,j].values
            ii = ii + 1
    SST_series.append(abs(SST/Sqhere))
#print('%e' % SST_series) #输出时间序列
```