

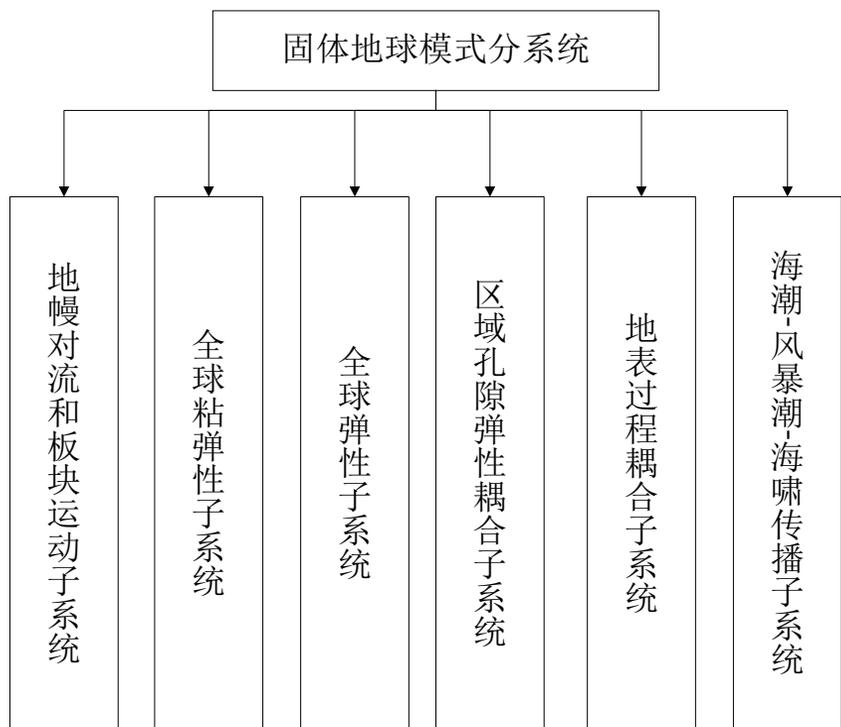


地球系统数值模拟装置项目 (地球系统模式数值模拟系统) 固体地球模式分系统培训

培训人：张 怀

2022年5月30日

分系统介绍



固体地球模式分系统组成图

固体地球模式分系统由6个子系统组成：地幔对流和板块运动子系统、全球粘弹性子系统、全球弹性子系统、地表过程耦合子系统、区域孔隙弹性耦合子系统和全球海潮-风暴潮-海啸传播子系统。六个子系统系独立运行，之间仅通过输入输出数据文件进行可能的数据传输。固体地球模式分系统旨在建立全球尺度的、多物理场的地球动力学模式，该系统通过不同的子系统对地球不同圈层、或是同一圈层不同尺度下的物理环境和物理运动进行模拟。从多种空间和时间尺度上实现对真实地质与地球物理现象演化过程的还原与预测。利用该软件可以实现在复杂条件下对固体地球各个区域的科学研究。

1

地幔对流和板块运动子系统

2

全球粘弹性子系统

3

全球弹性子系统

4

区域孔隙弹性耦合子系统

5

地表过程耦合子系统

6

全球海潮-风暴潮-海啸传播子系统



地幔对流和板块构造运动子系统



01

子系统介绍

02

模式原理

03

程序代码结构

04

数据制备

05

新建case、编译、运行

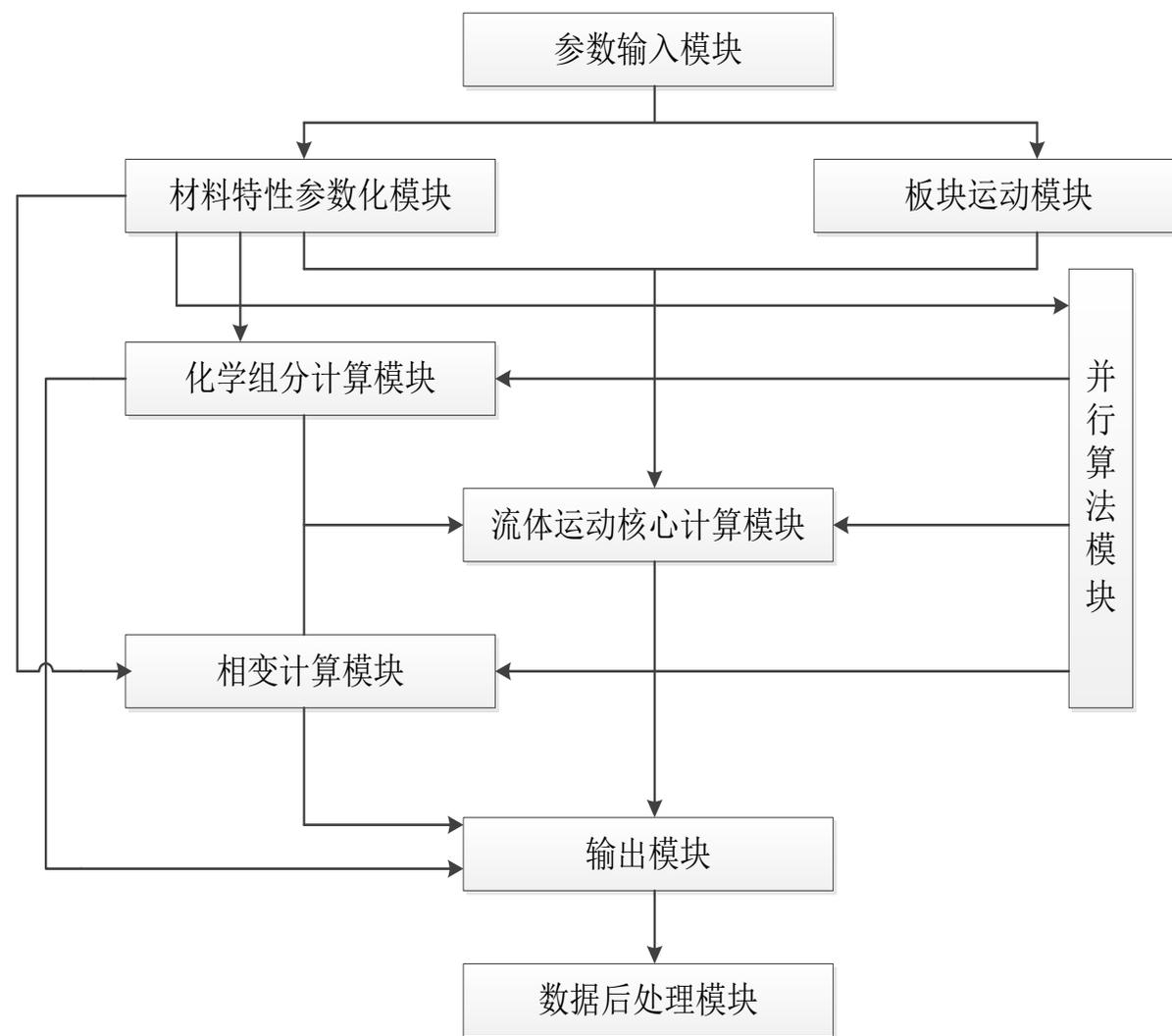
06

结果诊断分析与应用案例



1-01 地幔对流和板块构造运动子系统-子系统介绍

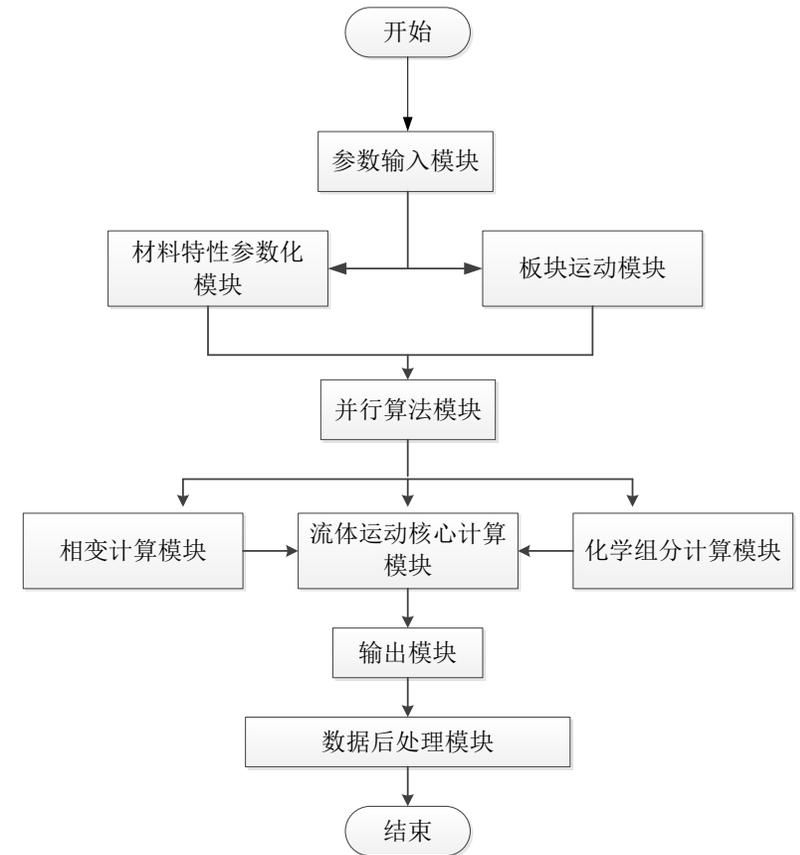
- **地幔对流和板块构造运动子系统**主要功能是对地幔对流进行数值模拟，并给出古生代以来板块构造运动历史。在现有研究的基础上进一步完善和发展地幔对流数值模拟算法和计算程序，使其既能方便地将现有的地球物理、地质、大地测量、矿物物理等最新研究成果纳入地幔对流和板块构造运动子系统计算研究框架，又能方便地将最新地幔对流和板块构造运动研究成果提供给其他地球科学研究。
- **地幔对流和板块运动子系统**主要功能是结合古生代以来板块构造运动历史开展地幔对流进行数值模拟。该子系统包括九大模块：板块运动模块、流体运动核心计算模块、化学组分计算模块、相变计算模块、材料特性参数化模块、参数输入模块、并行算法模块、输出模块和数据后处理模块。子系统的流程如下图所示：



地幔对流和板块运动子系统功能实现流程图

1-02 地幔对流和板块构造运动子系统-模式原理

- 1) 用户设置地幔对流和板块运动模型的配置文件，参数输入模块将首先读入配置文件参数，进行相应配置，并将参数传递给其他模块。并进行初始条件和边界条件初始化配置；
- 2) 材料特性参数化模块根据配置文件参数，对地幔各种物质特性参数化，包括计算区域的网格化、以及密度、热传导系数、热膨胀系数以及蠕变规律等物质特性的参数化；
- 3) 板块运动模块根据配置文件参数，确定板块运动速度，供后续程序计算调用；
- 4) 流体运动核心计算模块根据程序确定的参数，计算流动运动，并根据配置文件确定是否调用化学组分计算模块和/或相变计算模块，并确定是否启用并行算法；
- 5) 化学组分计算模块调用地幔不同组分场的参数，计算不同组分的影响以及其运动；
- 6) 相变计算模块调用相变参数，计算地幔中的相变过程以及其对流场的影响；
- 7) 并行算法模块根据需要启动并行计算节点、协调计算节点间的数据调度，并根据需要计算全局或节点的信息；
- 8) 输出模块根据配置，按照要求输出用户需要的各种物理场量；
- 9) 数据后处理模块将根据用户需求对数据进行后处理加工并存储用于可视化的数据文件。



地幔对流和板块运动子系统功能实现的加工流程图

1-03 地幔对流和板块构造运动子系统-程序代码结构

编号	模块名	文件名	功能
1	参数输入模块	INPT_boundary_conditions.c INPT_convection_init.c INPT_initial_temperature.c INPT_material_properties.c INPT_parsing.c INPT_problem_related.c INPT_viscosity_structures.c	通过读入参数文件实现初始条件和边界条件、物质特性等参数的输入
2	材料特性参数化模块	FELM_construct_arrays.c FELM_element_calculations.c FELM_nodal_mesh.c FELM_shape_functions.c FELM_size_does_matter.c FELM_sphere_related.c FELM_sphere_util.c FELM_version_dependent.c	实现模型有限元网格化, 进而实现各物理量的参数化。
3	板块运动模块	PLAT_lith_age.c PLAT_read_input_from_files.c	读入板块运动历史数据, 为地幔对流计算程序提供板块运动速度场。
4	流体运动核心计算模块	FLOW_advection_diffusion.c FLOW_drive_solvers.c FLOW_general_matrix_functions.c FLOW_instructions.c FLOW_pan_problem_misc_functions.c FLOW_process_buoyancy.c FLOW_solver_multigrid.c FLOW_stokes_flow_Incomp.c	实现流体运动的解算, 即求解质量守恒、动量守恒和能量守恒。模块将采用有限元方法, 并通过调用并行算法模块实现并行计算
5	化学组分计算模块	CHEM_comp_related.c CHEM_tracer_advection.c CHEM_tracer_setup.c	实现地幔多种组分在对流地幔中运动的计算。采用 Runge-Kutta 法解算组分方程

6	相变计算模块	Phase_change.c	实现 410 km、660 km 和核幔边界处相变方程的解算。
7	并行算法模块	Parallel_global_operations.c Parallel_init.c Parallel_related.c	子系统采用 MPICH2 构建 MPI 编程环境, 进行并行程序的开发。包含实现并行算法涉及的主要子程序
8	输出模块和数据后处理模块	OUPT_checkpoints.c OUPT_output.c OUPT_output_vtk.c OUPT_sphere_harmonics.c OUPT_topo_gravity.c	根据需求, 从计算数据中提取温度、速度、应力、应变、组分进行输出, 或对其进行后处理得到热流、地形、和重力场等数据, 并输出。可采用二进制, 或 ASCII 码的格式输出。也可以处理成 vtk 格式输出, 用于 paraview 等进行图形展示
9	主程序	MC_ustc.c	调用各个模块子程序, 实现采用并行算法, 对地幔对流问题实现求解
10	头文件	advection.h convection_init.h convection_variables.h element_definitions.h global_defs.h interuption.h protype.h solver.h sphere_communication.h tracer_defs.h viscosity_descriptions.h	程序变量、数值、和函数等头文件

1-04 地幔对流和板块构造运动子系统-数据制备

地幔对流与板块运动子系统程序运行前需要准备一个输入参数脚本文件以及板块运动历史的数据文件:

1. 输入参数脚本文件case_example.input:

- 模型设置各类参数, 包括网格划分、并行计算区域划分、模型边界条件和初始条件、相变、组分粘性结构等等参数

1. 板块运动历史数据文件夹 data_M2016:

- 数据文件包括三个目录下的众多数据文件, 它们是4 亿1 千万年以来的板块运动速度 (存放在M2016_velocity_file_64 目录下)、各板块边界 (存放在M2016_topology_feature_64 目录下) 和板块编号 (存放在M2016_plate_id_64 目录下)。数据文件的时间间隔1 Ma。

```
##### Input.controller (A.1.1) #####
weak_bound_filename="M2016_topology_features_48/topology_platepolygons"
vel_bound_file="M2016_velocity_file_64/bvel"
plate_id_filename="M2016_plate_id_64/65.mesh"
output_optional="surf,botm,geoid,horiz_avg,comp_nd"

##### Mesh.and.processors (A.1.3) #####
nproc_surf=12          viscE=9.21,9.21,9.21,9.21
nodex=129             viscT=0.5,0.5,0.5,0.5
nodey=129             viscZ=0.0,0.0,0.0,0.0
nodez=129
nprocx=4              # phase change is specified
nprocy=4              Ra_410=0.0          # 2.5 MPa/K
nprocz=4              clapeyron410=0.025      # 1573 K
# nodex = 1 + nprocx * mgunitx * 2^{levels}
mgunitx=2             transT410=0.52          # 50 km
mgunity=2             width410=0.00785
mgunitz=2
levels=5              Ra_670=5.33e7          # -2.0 MPa/K
                      clapeyron670=-0.0243    # 1573 K
                      transT670=0.52          # 40 km
                      width670=0.00628

##### Domain.size (A.1.4) #####
radius_inner=0.55     Ra_cmb=0.0          # 8 MPa/k
radius_outer=1.0      clapeyroncmb=0.08    # 2398 K
                      transTcmb=0.85          # 50 km
                      widthcmb=0.00785

##### Boundary.conditions (A.1.8) #####
topvbc=1
topvbxval=0.0
topvbyval=0.0
botvbc=0
botvbxval=0.0
botvbyval=0.0
toptbc=1
toptbcval=0.0
bottbc=0
bottbcval=0.0

##### Non-dimensional.numbers (A.1.9) #####
rayleigh=5.0e07

viscE=9.21,9.21,9.21,9.21
viscT=0.5,0.5,0.5,0.5
viscZ=0.0,0.0,0.0,0.0
"case_example.input" 80L, 1617B

##### Tracer.info (A.1.18) #####
tracer=off
tracer_ic_method=0
tracers_per_element=41
z_interface=0.58925   # if plate_tracer=1, only one
buoy_type=1

##### Dimensional.info (A.1.19) #####
radius=6.37e+6
density=3.30e+3
thermdiff=1.0e-6
gravacc=9.8
thermexp=3.0e-5
refvisc=1.254e22
cp=1000
density_above=0.0
density_below=8.3e+3

##### Required.info (A.1.20) #####
Problem=convection
Geometry=sphere
```

1-05 地幔对流和板块构造运动子系统-新建case、编译、运行

1) 运行前的准备

- a) 登陆进入地球系统数值模拟装置服务器: `ssh jshhuang01@10.64.201.1`
- b) 地幔对流和板块运动子系统软件部署在 `/data/jshhuang01/convection`。
- c) 系统需安装MPI-CH2或兼容并行软件编译环境 (如mpicc、mpirun等) , 其他无需安装。

2) 程序安装

- a) 系统软件源代码部署在 `/data/jshhuang01/convection/src`目录。里面包含源代码、参数输入示例文件`case_r11.input` 和脚本提交示例文件 `case_r11.slm`。里面同时包含有三个数据文件夹: `M206_plate_id_64/`、`M206_topology_feature_64/` 和`M206_velocity_file_64/`
- b) 如果是首次部署软件, 将源程序文件`USTC_src.tar` 和数据文件`data_M2016.tar`拷贝到 `/data/jshhuang01/convection` 目录下, 然后解压缩包文件 `USTC_src.tar` 和 `data_M2016.tar`, 即`tar -xf USTC_src.tar` 和 `tar -xf data_M2016.tar`即可完成程序安装

```
drwxrwxr-x 4 jshhuang01 jshhuang01      4096 Nov 25 16:01 tmp
-rw-rw-r-- 1 jshhuang01 jshhuang01    3145946 Nov 25 06:01 case_r11.monitor
drwxr-xr-x 2 jshhuang01 jshhuang01      4096 Nov 25 06:01 case_r11.output
drwxrwxr-x 2 jshhuang01 jshhuang01      4096 Nov 24 19:23 src
-rw-rw-r-- 1 jshhuang01 jshhuang01    10973 Nov 24 19:16 case_r11.input
-rw-rw-r-- 1 jshhuang01 jshhuang01     1023 Nov 24 19:16 case_r11.slm
-rw-rw-r-- 1 jshhuang01 jshhuang01    983040 Nov 24 19:13 USTC_src.tar
-rw-rw-r-- 1 jshhuang01 jshhuang01 2762014720 Sep 16 11:36 data_M2016.tar
drwxrwxr-x 2 jshhuang01 jshhuang01      4096 Sep 16 11:12 M2016_velocity_file_64
drwxrwxr-x 2 jshhuang01 jshhuang01      4096 Sep 16 11:12 M2016_plate_id_64
drwxrwxr-x 2 jshhuang01 jshhuang01      4096 Dec 4 2019 M2016_topology_feature_64
[jshhuang01@login03 convection]$
```

目录文件截图

1-05 地幔对流和板块构造运动子系统-新建case、编译、运行

□ 新建case

- 将src目录里的参数输入示例文件case_r11.input 和脚本提交示例文件 case_r11.slm拷贝至convection 目录下即完成case_r11模型的建立。
- 如果要建立新的模型算例，参考这两个文件，修改其中的模型参数， case名称等即可完成

□ 编译

- 进入src目录，在src目录里面运行 make 生成可执行文件 convection3d.mpi。

□ 运行

- 在convection 目录下提交脚本运行文件，即sbatch case_r11.slm完成任务提交。程序开始运行

```
#SBATCH -J case_r11
#SBATCH -p normal
#SBATCH -N 2
#SBATCH -n 96
#SBATCH --ntasks-per-node=48
#SBATCH -o case_r11.o.log
#SBATCH -e case_r11.e.log
#SBATCH --exclusive

INPUT=case_r11.input
ouput=case_r11.monitor
EXECc=../bin/convection3d.mpi

NP=$SLURM_NPROCS
echo "mpirun -np $NP $EXECc $INPUT >& $ouput"
mpirun -np $NP $EXECc $INPUT >& $ouput
"case_r11.slm_copy" 19L, 358C 19,0-1
```

```
[[jshhuang01@login01 src]$ make
mpicc -O2 -c MC_ustc.c INPT_boundary_conditions.c INPT_boundary_util.c INPT_convection_init.c INPT_geometry_cartesian.c INPT_initial_temperature.c INPT_material_properties.c INPT_parsing.c INPT_problem_related.c INPT_solver_init.c INPT_viscosity_structures.c PLAT_lith_age.c PLAT_lith_age_read_files.c PLAT_read_input_from_files.c FELM_construct_arrays.c FELM_element_calculations.c FELM_nodal_mesh.c FELM_shape_functions.c FELM_size_does_matter.c FELM_sphere_util.c FELM_sphere_related.c FELM_version_dependent.c Parallel_global_operations.c Parallel_init.c Parallel_related.c Parallel_util.c Parallel_interruption.c FLOW_advection_diffusion.c FLOW_drive_solvers.c FLOW_general_matrix_functions.c FLOW_instructions.c FLOW_pan_problem_misc_functions.c FLOW_process_buoyancy.c FLOW_solver_multigrid.c FLOW_solver_conj_grad.c FLOW_stokes_flow_Incomp.c Phase_change.c CHEM_comp_related.c CHEM_tracer_advection.c CHEM_tracer_setup.c OUPT_checkpoints.c OUPT_output.c OUPT_output_vtk.c OUPT_sphere_harmonics.c OUPT_topo_gravity.c
mpicc -O2 -o convection3d.mpi MC_ustc.o INPT_boundary_conditions.o INPT_boundary_util.o INPT_convection_init.o INPT_geometry_cartesian.o INPT_initial_temperature.o INPT_material_properties.o INPT_parsing.o INPT_problem_related.o INPT_solver_init.o INPT_viscosity_structures.o PLAT_lith_age.o PLAT_lith_age_read_files.o PLAT_read_input_from_files.o FELM_construct_arrays.o FELM_element_calculations.o FELM_nodal_mesh.o FELM_shape_functions.o FELM_size_does_matter.o FELM_sphere_util.o FELM_sphere_related.o FELM_version_dependent.o Parallel_global_operations.o Parallel_init.o Parallel_related.o Parallel_util.o Parallel_interruption.o FLOW_advection_diffusion.o FLOW_drive_solvers.o FLOW_general_matrix_functions.o FLOW_instructions.o FLOW_pan_problem_misc_functions.o FLOW_process_buoyancy.o FLOW_solver_multigrid.o FLOW_solver_conj_grad.o FLOW_stokes_flow_Incomp.o Phase_change.o CHEM_comp_related.o CHEM_tracer_advection.o CHEM_tracer_setup.o OUPT_checkpoints.o OUPT_output.o OUPT_output_vtk.o OUPT_sphere_harmonics.o OUPT_topo_gravity.o -lm
[[jshhuang01@login01 src]$
```

1-06 地幔对流和板块构造运动子系统-结果诊断分析与应用案例

- 提交并行作业，即完成sbatch case_r11.slm后程序进入运行状态。
- case_r11.monitor 给出程序实时运行信息，方便查看程序运行状况。
- 运行监控输出文件记录的部分信息如下：早期、中期和正常完成记录。
- 如没有正常完成，可通过监控文件初步诊断出现异常的问题

```
plate_tracer: 1
mark_plate: 901
mark_age: 50.0
E->trace.PLATE[1] = 926
E->trace.PLATE[2] = 901
E->trace.PLATE[3] = 501
E->trace.PLATE[4] = 608
Problem has 65 x 65 x 65 nodes per cap, 3195010 nodes and 3145728 elements:
Output_ll_max = 60
memory allocation done
parallel setup done
node locations done
velocity vars done
boundary conditions done
id/lm done
v communications done
  nz      radius      depth      dr
  1      0.550000     0.450000     0.1
  2      0.553516     0.446484     0.1
  3      0.557031     0.442969     0.1
  4      0.560547     0.439453     0.1
  5      0.564063     0.435937     0.1
  6      0.567578     0.432422     0.1
  7      0.571094     0.428906     0.1
  8      0.580003     0.419997     0.1
  9      0.588912     0.411088     0.1
 10     0.597821     0.402179     0.1
 11     0.606730     0.393270     0.1
 12     0.615639     0.384361     0.1
 13     0.624548     0.375452     0.1
 14     0.633457     0.366543     0.1
 15     0.642366     0.357634     0.1
 16     0.651275     0.348725     0.1
 17     0.660184     0.339816     0.1
 18     0.669093     0.330907     0.1
 19     0.678002     0.321998     0.1
 20     0.686911     0.313089     0.1
 21     0.695820     0.304180     0.1
 22     0.704729     0.295271     0.1
 23     0.713638     0.286362     0.1
 24     0.722547     0.277453     0.1
 25     0.731456     0.268544     0.1
 26     0.740365     0.259635     0.1
 27     0.749274     0.250726     0.1
 28     0.758183     0.241817     0.1
 29     0.767092     0.232908     0.1
 30     0.776001     0.223999     0.1
 31     0.784910     0.215090     0.1
 32     0.793819     0.206181     0.1
 33     0.802728     0.197272     0.1
 33     0.802728     0.197272     0.1
 33     0.802728     0.197272     0.1
 34     0.811637     0.188363     0.1
"case_r11.monitor" 46604L, 3144564C

bottom heat flux= 0.005616
surface heat flux= 39.487804
Momentum equation force 7.903557348e+06
(000) 0.3 s v=2.184076e+04 p=1.773188e+06 div/v=2.31e-01 d
(001) 0.6 s v=2.182773e+04 p=1.771033e+06 div/v=2.38e-01 d
(002) 0.9 s v=2.183432e+04 p=1.769416e+06 div/v=1.97e-01 d
(003) 1.3 s v=2.183007e+04 p=1.768347e+06 div/v=1.77e-01 d
(004) 1.6 s v=2.182394e+04 p=1.768009e+06 div/v=2.12e-01 d
bottom heat flux= -0.003065
surface heat flux= 39.353973
Momentum equation force 7.910450570e+06
(000) 0.3 s v=2.133999e+04 p=1.768009e+06 div/v=2.60e-01 d
(001) 0.6 s v=2.133438e+04 p=1.766310e+06 div/v=2.58e-01 d
(002) 0.9 s v=2.133647e+04 p=1.765142e+06 div/v=2.27e-01 d
(003) 1.3 s v=2.133369e+04 p=1.764078e+06 div/v=1.92e-01 d
bottom heat flux= -0.004003
surface heat flux= 39.265495
Momentum equation force 7.917450287e+06
(000) 0.3 s v=2.088589e+04 p=1.764078e+06 div/v=2.33e-01 d
(001) 0.6 s v=2.087564e+04 p=1.762388e+06 div/v=2.64e-01 d
(002) 0.9 s v=2.088195e+04 p=1.760847e+06 div/v=2.32e-01 d
(003) 1.3 s v=2.087308e+04 p=1.759527e+06 div/v=2.34e-01 d
(004) 1.6 s v=2.085661e+04 p=1.757968e+06 div/v=3.64e-01 d
(005) 1.9 s v=2.084298e+04 p=1.757530e+06 div/v=2.59e-01 d
(006) 2.2 s v=2.083011e+04 p=1.757944e+06 div/v=1.92e-01 d
(007) 2.5 s v=2.081838e+04 p=1.758389e+06 div/v=1.71e-01 d
(008) 2.8 s v=2.081237e+04 p=1.758557e+06 div/v=1.09e-01 d
(009) 3.1 s v=2.080766e+04 p=1.758761e+06 div/v=9.24e-02 d
bottom heat flux= -0.003368
surface heat flux= 39.167995
Momentum equation force 7.924546345e+06
(000) 0.3 s v=2.037717e+04 p=1.758761e+06 div/v=1.25e-01 d
(001) 0.7 s v=2.037605e+04 p=1.756912e+06 div/v=1.09e-01 d
(002) 1.0 s v=2.037788e+04 p=1.755626e+06 div/v=1.08e-01 d
(003) 1.3 s v=2.037752e+04 p=1.755296e+06 div/v=9.10e-02 d
bottom heat flux= -0.002200
surface heat flux= 39.053856
Momentum equation force 7.931750678e+06
(000) 0.3 s v=1.994892e+04 p=1.755296e+06 div/v=1.04e-01 d
(001) 0.6 s v=1.994962e+04 p=1.753610e+06 div/v=1.04e-01 d
(002) 0.9 s v=1.994973e+04 p=1.752251e+06 div/v=1.17e-01 d
(003) 1.3 s v=1.995041e+04 p=1.751950e+06 div/v=9.71e-02 d
bottom heat flux= -0.001670
surface heat flux= 38.952782
Momentum equation force 7.939051078e+06
(000) 0.3 s v=1.953380e+04 p=1.751950e+06 div/v=1.06e-01 d
(001) 0.6 s v=1.953344e+04 p=1.750380e+06 div/v=1.13e-01 d
(002) 0.9 s v=1.953475e+04 p=1.749079e+06 div/v=1.33e-01 d
(003) 1.3 s v=1.953427e+04 p=1.748724e+06 div/v=9.58e-02 d
bottom heat flux= -0.001919
surface heat flux= 38.855850

bottom heat flux= 0.036724
surface heat flux= 40.231514
Momentum equation force 4.106764784e+06
(000) 0.3 s v=6.948746e+03 p=1.064078e+06 div/v=1.36e-01 dv/v=1.00e+00 dp/p=1.00e+00 step 6993
(001) 0.6 s v=6.948792e+03 p=1.064102e+06 div/v=8.77e-02 dv/v=1.16e-03 dp/p=1.79e-04 step 6993
(002) 1.0 s v=6.948700e+03 p=1.064124e+06 div/v=7.00e-02 dv/v=8.14e-04 dp/p=1.62e-04 step 6993
bottom heat flux= 0.036828
surface heat flux= 40.231258
Momentum equation force 4.106594635e+06
(000) 0.3 s v=6.948478e+03 p=1.064124e+06 div/v=3.58e-01 dv/v=1.00e+00 dp/p=1.00e+00 step 6994
(001) 0.6 s v=6.948559e+03 p=1.064137e+06 div/v=1.23e-01 dv/v=3.38e-03 dp/p=1.27e-04 step 6994
(002) 1.0 s v=6.948542e+03 p=1.064154e+06 div/v=7.64e-02 dv/v=1.12e-03 dp/p=1.23e-04 step 6994
bottom heat flux= 0.036743
surface heat flux= 40.231152
Momentum equation force 4.106424578e+06
(000) 0.3 s v=6.949574e+03 p=1.064154e+06 div/v=1.26e-01 dv/v=1.00e+00 dp/p=1.00e+00 step 6995
(001) 0.6 s v=6.949680e+03 p=1.064184e+06 div/v=8.41e-02 dv/v=1.17e-03 dp/p=2.28e-04 step 6995
(002) 0.9 s v=6.949553e+03 p=1.064212e+06 div/v=6.19e-02 dv/v=8.21e-04 dp/p=2.06e-04 step 6995
bottom heat flux= 0.036597
surface heat flux= 40.230728
Momentum equation force 4.106254614e+06
(000) 0.3 s v=6.948926e+03 p=1.064212e+06 div/v=1.76e-01 dv/v=1.00e+00 dp/p=1.00e+00 step 6996
(001) 0.6 s v=6.949016e+03 p=1.064232e+06 div/v=9.76e-02 dv/v=1.52e-03 dp/p=1.69e-04 step 6996
(002) 0.9 s v=6.948946e+03 p=1.064252e+06 div/v=7.15e-02 dv/v=8.28e-04 dp/p=1.61e-04 step 6996
bottom heat flux= 0.036695
surface heat flux= 40.230637
Momentum equation force 4.106084740e+06
(000) 0.3 s v=6.949201e+03 p=1.064252e+06 div/v=2.56e-01 dv/v=1.00e+00 dp/p=1.00e+00 step 6997
(001) 0.6 s v=6.949316e+03 p=1.064274e+06 div/v=1.36e-01 dv/v=2.55e-03 dp/p=1.84e-04 step 6997
(002) 0.9 s v=6.949208e+03 p=1.064292e+06 div/v=8.06e-02 dv/v=1.23e-03 dp/p=1.40e-04 step 6997
bottom heat flux= 0.036501
surface heat flux= 40.230377
Momentum equation force 4.105914951e+06
(000) 0.3 s v=6.949372e+03 p=1.064292e+06 div/v=3.03e-01 dv/v=1.00e+00 dp/p=1.00e+00 step 6998
(001) 0.6 s v=6.949365e+03 p=1.064309e+06 div/v=1.39e-01 dv/v=2.94e-03 dp/p=1.41e-04 step 6998
(002) 0.9 s v=6.949312e+03 p=1.064330e+06 div/v=8.43e-02 dv/v=1.39e-03 dp/p=1.57e-04 step 6998
bottom heat flux= 0.036569
surface heat flux= 40.230110
Momentum equation force 4.105745257e+06
(000) 0.3 s v=6.949834e+03 p=1.064330e+06 div/v=3.14e-01 dv/v=1.00e+00 dp/p=1.00e+00 step 6999
(001) 0.6 s v=6.949926e+03 p=1.064345e+06 div/v=1.21e-01 dv/v=2.89e-03 dp/p=1.34e-04 step 6999
(002) 1.0 s v=6.949900e+03 p=1.064371e+06 div/v=7.95e-02 dv/v=1.14e-03 dp/p=2.04e-04 step 6999
bottom heat flux= 0.036577
surface heat flux= 40.229805
Momentum equation force 4.105575649e+06
(000) 0.3 s v=6.949921e+03 p=1.064371e+06 div/v=1.92e-01 dv/v=1.00e+00 dp/p=1.00e+00 step 7000
(001) 0.6 s v=6.949970e+03 p=1.064399e+06 div/v=1.01e-01 dv/v=1.45e-03 dp/p=2.03e-04 step 7000
(002) 0.9 s v=6.949888e+03 p=1.064424e+06 div/v=7.49e-02 dv/v=9.07e-04 dp/p=1.92e-04 step 7000
bottom heat flux= 0.036487
surface heat flux= 40.229652
cycles=7000
Average cpu time taken for velocity step = 6.129991
```

1-06 地幔对流和板块构造运动子系统-结果诊断分析与应用案例

- 计算结果存储在子目录 case_r11.output 里面。部分文件如图所示

```
[jshhuang01@login01 case_r11.output]$ ls *.velo.*.1000
case_r11.velo.0.1000 case_r11.velo.23.1000 case_r11.velo.38.1000 case_r11.velo.52.1000 case_r11.velo.67.1000 case_r11.velo.81.1000
case_r11.velo.1.1000 case_r11.velo.24.1000 case_r11.velo.39.1000 case_r11.velo.53.1000 case_r11.velo.68.1000 case_r11.velo.82.1000
case_r11.velo.10.1000 case_r11.velo.25.1000 case_r11.velo.4.1000 case_r11.velo.54.1000 case_r11.velo.69.1000 case_r11.velo.83.1000
case_r11.velo.11.1000 case_r11.velo.26.1000 case_r11.velo.40.1000 case_r11.velo.55.1000 case_r11.velo.7.1000 case_r11.velo.84.1000
case_r11.velo.12.1000 case_r11.velo.27.1000 case_r11.velo.41.1000 case_r11.velo.56.1000 case_r11.velo.70.1000 case_r11.velo.85.1000
case_r11.velo.13.1000 case_r11.velo.28.1000 case_r11.velo.42.1000 case_r11.velo.57.1000 case_r11.velo.71.1000 case_r11.velo.86.1000
case_r11.velo.14.1000 case_r11.velo.29.1000 case_r11.velo.43.1000 case_r11.velo.58.1000 case_r11.velo.72.1000 case_r11.velo.87.1000
case_r11.velo.15.1000 case_r11.velo.3.1000 case_r11.velo.44.1000 case_r11.velo.59.1000 case_r11.velo.73.1000 case_r11.velo.88.1000
case_r11.velo.16.1000 case_r11.velo.30.1000 case_r11.velo.45.1000 case_r11.velo.6.1000 case_r11.velo.74.1000 case_r11.velo.89.1000
case_r11.velo.17.1000 case_r11.velo.31.1000 case_r11.velo.46.1000 case_r11.velo.60.1000 case_r11.velo.75.1000 case_r11.velo.9.1000
case_r11.velo.18.1000 case_r11.velo.32.1000 case_r11.velo.47.1000 case_r11.velo.61.1000 case_r11.velo.76.1000 case_r11.velo.90.1000
case_r11.velo.19.1000 case_r11.velo.33.1000 case_r11.velo.48.1000 case_r11.velo.62.1000 case_r11.velo.77.1000 case_r11.velo.91.1000
case_r11.velo.2.1000 case_r11.velo.34.1000 case_r11.velo.49.1000 case_r11.velo.63.1000 case_r11.velo.78.1000 case_r11.velo.92.1000
case_r11.velo.20.1000 case_r11.velo.35.1000 case_r11.velo.5.1000 case_r11.velo.64.1000 case_r11.velo.79.1000 case_r11.velo.93.1000
case_r11.velo.21.1000 case_r11.velo.36.1000 case_r11.velo.50.1000 case_r11.velo.65.1000 case_r11.velo.8.1000 case_r11.velo.94.1000
case_r11.velo.22.1000 case_r11.velo.37.1000 case_r11.velo.51.1000 case_r11.velo.66.1000 case_r11.velo.80.1000 case_r11.velo.95.1000
[jshhuang01@login01 case_r11.output]$
```

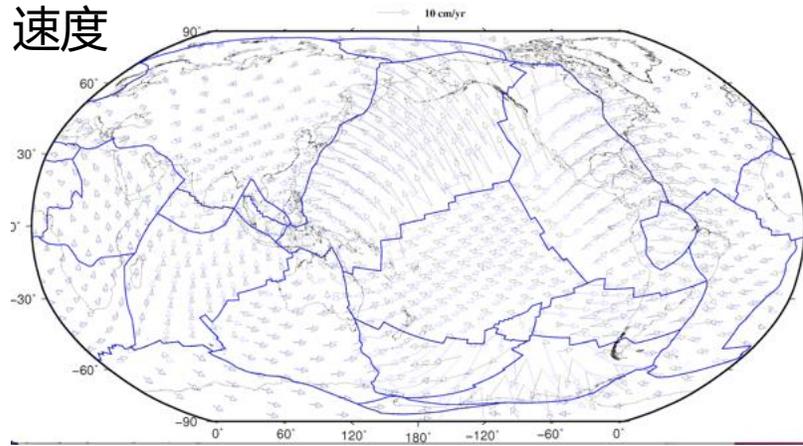
```
[jshhuang01@login01 case_r11.output]$ ls *.95.*000
case_r11.chkpt.95.1000 case_r11.comp_nd.95.3000 case_r11.phase-upper.95.5000 case_r11.surf.95.7000 case_r11.visc.95.2000
case_r11.chkpt.95.2000 case_r11.comp_nd.95.4000 case_r11.phase-upper.95.6000 case_r11.velo.95.1000 case_r11.visc.95.3000
case_r11.chkpt.95.3000 case_r11.comp_nd.95.5000 case_r11.phase-upper.95.7000 case_r11.velo.95.2000 case_r11.visc.95.4000
case_r11.chkpt.95.4000 case_r11.comp_nd.95.6000 case_r11.surf.95.1000 case_r11.velo.95.3000 case_r11.visc.95.5000
case_r11.chkpt.95.5000 case_r11.comp_nd.95.7000 case_r11.surf.95.2000 case_r11.velo.95.4000 case_r11.visc.95.6000
case_r11.chkpt.95.6000 case_r11.phase-upper.95.1000 case_r11.surf.95.3000 case_r11.velo.95.5000 case_r11.visc.95.7000
case_r11.chkpt.95.7000 case_r11.phase-upper.95.2000 case_r11.surf.95.4000 case_r11.velo.95.6000
case_r11.comp_nd.95.1000 case_r11.phase-upper.95.3000 case_r11.surf.95.5000 case_r11.velo.95.7000
case_r11.comp_nd.95.2000 case_r11.phase-upper.95.4000 case_r11.surf.95.6000 case_r11.visc.95.1000
[jshhuang01@login01 case_r11.output]$
```

```
[jshhuang01@login01 case_r11.output]$ ls case_r11.??? case_r11.????? case_r11.????? case_r11.???????
case_r11.botm.0.0 case_r11.coord.23 case_r11.coord.41 case_r11.coord.59 case_r11.coord.77 case_r11.coord.95 case_r11.velo.5.0
case_r11.botm.2.0 case_r11.coord.24 case_r11.coord.42 case_r11.coord.60 case_r11.coord.78 case_r11.domain case_r11.velo.6.0
case_r11.botm.4.0 case_r11.coord.25 case_r11.coord.43 case_r11.coord.61 case_r11.coord.79 case_r11.domain case_r11.velo.7.0
case_r11.botm.6.0 case_r11.coord.26 case_r11.coord.44 case_r11.coord.62 case_r11.coord.80 case_r11.log case_r11.velo.8.0
case_r11.botm.8.0 case_r11.coord.27 case_r11.coord.45 case_r11.coord.63 case_r11.coord.81 case_r11.qb.dat case_r11.velo.9.0
case_r11.coord.10 case_r11.coord.28 case_r11.coord.46 case_r11.coord.64 case_r11.coord.82 case_r11.qb.dat case_r11.visc.0.0
case_r11.coord.11 case_r11.coord.29 case_r11.coord.47 case_r11.coord.65 case_r11.coord.83 case_r11.qt.dat case_r11.visc.1.0
case_r11.coord.12 case_r11.coord.30 case_r11.coord.48 case_r11.coord.66 case_r11.coord.84 case_r11.qt.dat case_r11.visc.2.0
case_r11.coord.13 case_r11.coord.31 case_r11.coord.49 case_r11.coord.67 case_r11.coord.85 case_r11.surf.1.0 case_r11.visc.3.0
case_r11.coord.14 case_r11.coord.32 case_r11.coord.50 case_r11.coord.68 case_r11.coord.86 case_r11.surf.3.0 case_r11.visc.4.0
case_r11.coord.15 case_r11.coord.33 case_r11.coord.51 case_r11.coord.69 case_r11.coord.87 case_r11.surf.5.0 case_r11.visc.5.0
case_r11.coord.16 case_r11.coord.34 case_r11.coord.52 case_r11.coord.70 case_r11.coord.88 case_r11.surf.7.0 case_r11.visc.6.0
case_r11.coord.17 case_r11.coord.35 case_r11.coord.53 case_r11.coord.71 case_r11.coord.89 case_r11.surf.9.0 case_r11.visc.7.0
case_r11.coord.18 case_r11.coord.36 case_r11.coord.54 case_r11.coord.72 case_r11.coord.90 case_r11.velo.0.0 case_r11.visc.8.0
case_r11.coord.19 case_r11.coord.37 case_r11.coord.55 case_r11.coord.73 case_r11.coord.91 case_r11.velo.1.0 case_r11.visc.9.0
case_r11.coord.20 case_r11.coord.38 case_r11.coord.56 case_r11.coord.74 case_r11.coord.92 case_r11.velo.2.0
case_r11.coord.21 case_r11.coord.39 case_r11.coord.57 case_r11.coord.75 case_r11.coord.93 case_r11.velo.3.0
case_r11.coord.22 case_r11.coord.40 case_r11.coord.58 case_r11.coord.76 case_r11.coord.94 case_r11.velo.4.0
```

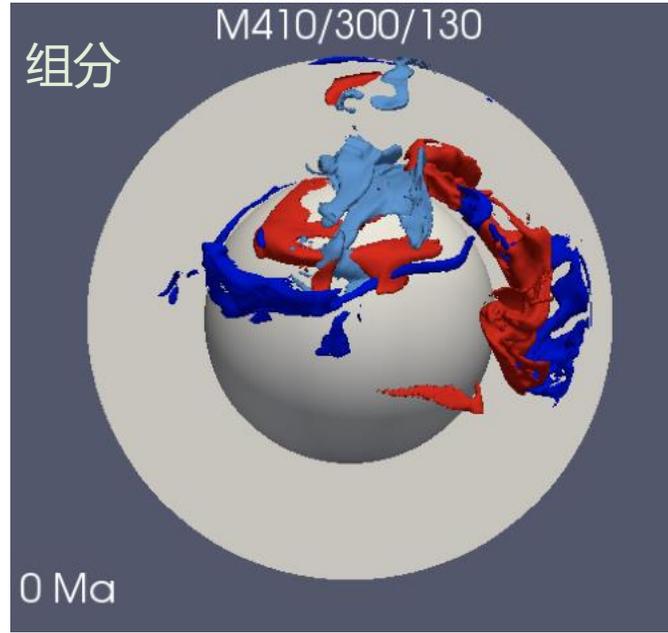
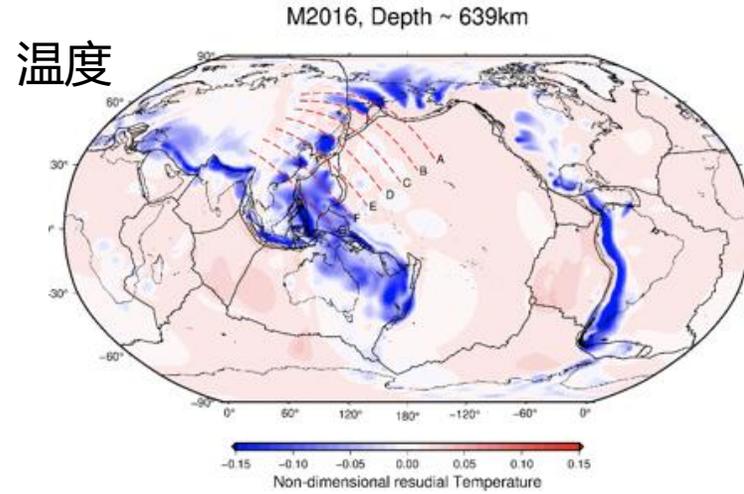
1-06 地幔对流和板块构造运动子系统-结果诊断分析与应用案例

□ 板块运动在地幔中的形态追踪示例结果的可视化图

速度

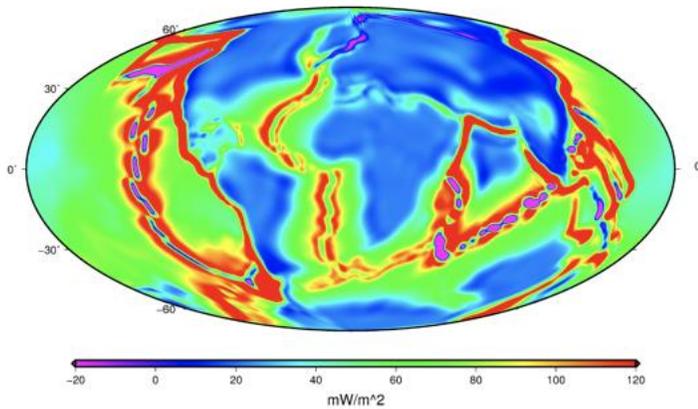


温度



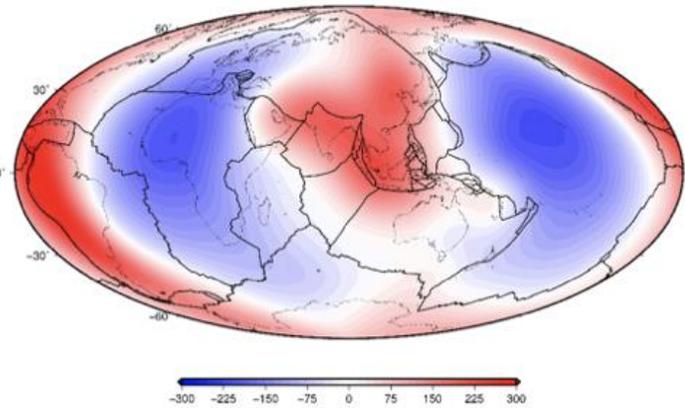
热流

Surface Heatflux (case42) t ~ 50 Ma



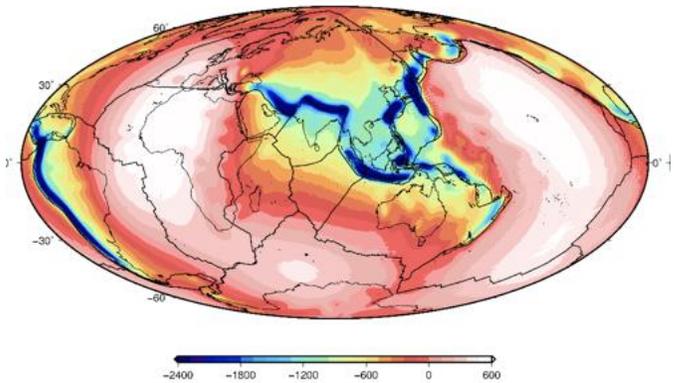
重力场

-217~299 m
Geoid height (M2016)



地形

-4606~669 m
Surface Topography (M2016)



全球粘弹性子系统



01

子系统介绍

02

模式原理

03

程序代码结构

04

数据制备

05

新建case、编译、运行

06

结果诊断分析与应用案例



2-01 全球粘弹性子系统-子系统介绍

全球粘弹性子系统包含粘弹性正斜压过程模块、粘弹性剪切模量、弹性模量模块、粘弹性应力应变模块、粘弹性松弛函数模块、粘弹性诊断模块、粘弹性预处理模块、粘弹性并行剖分模块、粘弹性耦合器数据交换模块、粘弹性输入输出模块、粘弹性后处理模块、粘弹性参数化本构关系模块和粘弹性参数化边检条件模块12个模块组成。

子系统主要为地幔对流及板块运动对于地壳的影响作用，造成地壳临近区域动力地形、温度场、化学成分场等的改变，因而造成全球粘弹性子系统的模拟参数的改变。因此，该子系统为其提供温度场、化学组分、应力场、位移场、能量场等数据及边界条件，并将物理过程模拟进程相关信息反馈给该子系统。该系统主要功能是实现在模型中包含全球断层模型、全球高分辨率地形数据、精细地壳数据以及精细分层的地壳地幔模型，平均水平分辨率达到10米-500米，断层带和特殊结构区域分辨率达到10米，平均垂直分辨率可达200层，在特殊地球分层与地质结构如断层区域，实现网格自适应加密，对全球粘弹性问题进行求解。实现对例如冰后回弹导致的地表变形应力与地球质量重新分配；配合精细地形数据与地球结构，计算冰后回弹引起的大地水准面变化、地球自转变化、以及极移；重力场、自转角速度、地壳应力等变化，以及这些变化对地震活性动性的影响和对卫星与导弹轨道的影响等问题的求解和分析。

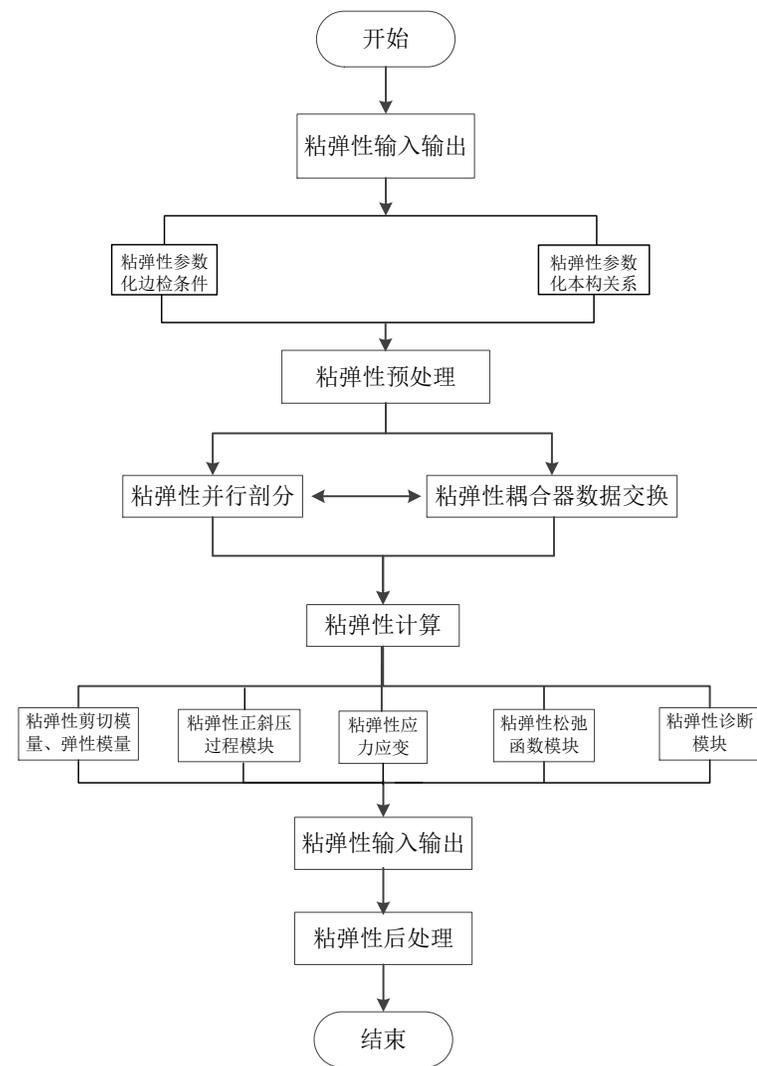
2-02 全球粘弹性子系统-模式原理

(1) 首先，通过粘弹性输入输出模块的进行参数输入，同时加上粘弹性参数化本构关系模块和粘弹性参数化边检条件模块，通过粘弹性预处理模块进行预处理，完成初始模型的装配与标记；

(2) 将预处理结果，通过粘弹性并行剖分模块将模块剖分，进行并行计算，提高计算效率。同时通过粘弹性耦合器的数据交换模块存储和组织计算中的数据，如网格格点、插值积分节点、单元的编号等等；

(3) 进行粘弹性计算，分别包含的是粘弹性模块所必需的动力学部分：正斜压过程、剪切模量、弹性模量、应力应变、松弛函数，以及其相对应的关系式。还包括粘弹性动力学诊断部分，通过粘弹性诊断模块来判断粘弹性模块的动力学关系，确保整个模型的动力平衡。

(4) 最后，通过粘弹性输入输出模块输出上述计算结果，并通过粘弹性后处理模块将计算结果呈现出来。



2-03 全球粘弹性子系统-程序代码结构

文件名	子程序名	功能
Sourcecode/makefile	fepglib.f	包含所有计算源程序，编译生成计算程序。
	incore.f	
	ddm.f	
	ddmm.f	
	ddms.f	
	azpartition.f	
	azsendpart.f	
	azrecvpart.f	
	msazrecvpart.f	
	start.f	
	nzdmbsdiag.f	
	bft.f	
	eddm.f	
	dmbs2dmsr.f	
	azsolv.f	
	uddm.f	
	nzrecvdip.f	
	esddm.f	
	nzrecvstr.f	
	ddmsub.f	
	bound.f	
intcommu.f		
realcommu.f		
charcommu.f		
inimpi.f		
ddm		
umcazpartition-wc		
regenerate.sh	genbound	生成模型网格与节点参数赋值，将生成的elem0,coor0,coorxyz0,id0,disp0,disp1,wc文件拷贝至calcu文件夹
	gen.sh 36	
	assemble	
	topfault	
	newmeshinfo	
cpdata.sh	3dmesher	
	cpdata.sh	
umcazpartition-wc.slurm	umcazpartition-wc	将网格分区，进行并行计算
visco_elastic.slurm	ddmvelas	

2-04 全球粘弹性子系统-数据制备

1. 根据 “弹性位错等效体力” 方法，引入同震的初位移和初应力；
2. 采用小变形条件下的应变增量形式的maxwell体本构关系；
3. 对断层处进行自适应加密；
4. 粘弹性刚度矩阵和右端项的组装、线性方程组的求解、积分点应力的更新、后处理结果文件的输出都是并行的。

```
3dxyz 2 6 8 10
ddm 0 1 5 u1 u2 u3
sddm 0 1 5 u1 u2 u3 u4 u5 u6
#
element y
ddm
suc8 8 pe pv fx fy fz
#
sddm
ssc8 8 pe pv fx fy fz
#
matedata
1 ddm suc8
2e5;0.25;0.0;0.0;0.0;
1 sddm ssc8
2e5;0.25;0.0;0.0;0.0;
#
```

2-05 全球粘弹性子系统-新建case、编译、运行

在data/hzhang01/visco-elastic文件夹下，共有十七个文件夹，如图所示。

```
[hzhang01@login01 visco_elastic]$ ls
1000.new
512mesh
512mesh.subduction
calcu
earth_tidal
elastic-visco-tcompute.512mesh
elastic-visco-tcompute.512mesh.subduction
lib
maxwell
maxwell-1000-sourcecode.tgz
maxwell_nfe
maxwell.tgz
serial-code
serial-exe
sourcecode
sourcecode.InitialStress
sourcecode.maxwell
```

其中/sourcecode文件夹中为数值计算源程序，/512mesh文件夹中为三维模型生成程序，/elastic-visco-tcompute.512mesh文件夹中为数值计算所需文件。

2-05 全球粘弹性子系统-新建case、编译、运行

首先对源程序进行编译生成可执行程序：进入/sourcecode文件夹，先后输入make clean、make命令进行编译，并将可执行程序拷贝到/elastic-visco-tcompute.512mesh文件夹下，如下图所示：

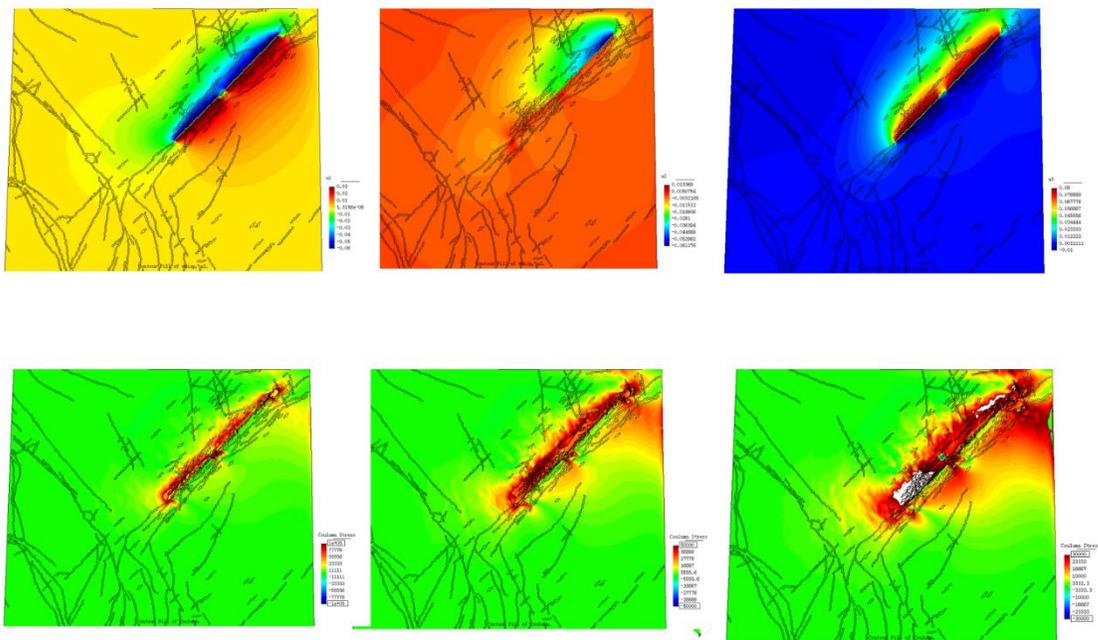
```
[h Zhang01@login01 sourcecode]$ make clean
/bin/rm -f *.o
```

```
[h Zhang01@login01 sourcecode]$ make
icc -O2 -c io.c
In file included from metis.h(36),
      from io.c(15):
proto.h(462): warning #147: declaration is incompatible with "double __log2(double)" (declared at line 145 of "/usr/include/bits/mathcalls.h")
      int log2(int);
      ^
icc -O2 -c partdmesh.c
In file included from metis.h(36),
      from partdmesh.c(16):
proto.h(462): warning #147: declaration is incompatible with "double __log2(double)" (declared at line 145 of "/usr/include/bits/mathcalls.h")
      int log2(int);
      ^
icc -O2 -c subtime.c
subtime.c(185): warning #810: conversion from "void *" to "char"
      may lose significant bits
      times = ctime(&time);
      ^
mpif77 -O2 -L../lib -c ddm.f
mpif77 -O2 -L../lib -c azsendpart-wc.f
mpif77 -O2 -L../lib -c azrecvpart-wc.f
mpif77 -O2 -L../lib -c msazrecvpart-wc.f
mpif77 -O2 -L../lib -c start.f
mpif77 -O2 -L../lib -c nzdmbsdiag.f
mpif77 -O2 -L../lib -c bft.f
mpif77 -O2 -L../lib -c eddm-wc.f
eddm-wc.f(660): remark #8291: Recommended relationship between field width 'W' and the number of fractional digits 'D' in this edit descriptor is 'W>=D+7'.
8888      format(15e10.5)
-----^
mpif77 -O2 -L../lib -c dmbs2dmsr.f
mpif77 -O2 -L../lib -c azsolv.f
mpif77 -O2 -L../lib -c uddm-wc.f
mpif77 -O2 -L../lib -c nzrecvdip.f
mpif77 -O2 -L../lib -c esddm-wc.f
mpif77 -O2 -L../lib -c nzrecvstr.f
mpif77 -O2 -L../lib -c ddmsub.f
mpif77 -O2 -L../lib -c bound-nch.f
mpif77 -O2 -L../lib -c intcommu.f
mpif77 -O2 -L../lib -c realcommu.f
mpif77 -O2 -L../lib -c charcommu.f
mpif77 -O2 -L../lib -c inimpi.f
mpif77 -O2 -L../lib -c timer.f
timer.f(452): remark #8291: Recommended relationship between field width 'W' and the number of fractional digits 'D' in this edit descriptor is 'W>=D+7'.
9      format(i3,lx,9(1x,e7.2))
```

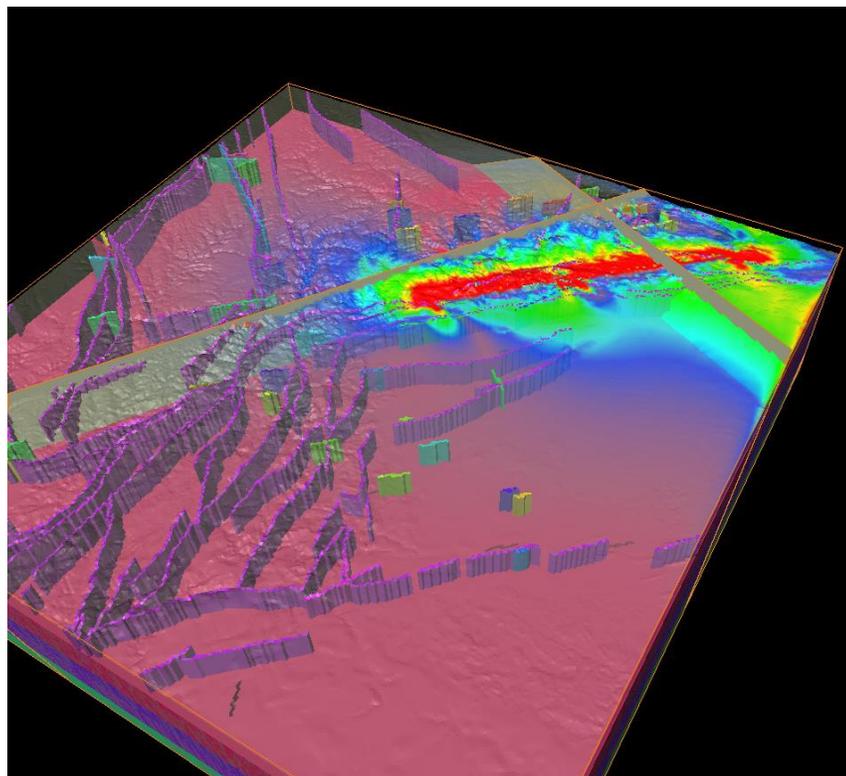

2-06 全球粘弹性子系统-结果诊断分析与应用案例

进入/elastic-visco-tcompute.512mesh文件夹，先后输入 sbatch part.slurm和sbatch visco_elastic.slurm进行数值并行计算。

```
[h Zhang01@login01 elastic-visco-tcompute.512mesh]$ ls
coord ddmvelas disp0 disp1 elem0 id0 lwt.z umcazpartition-wc wc
[h Zhang01@login01 elastic-visco-tcompute.512mesh]$ sbatch part.slurm
[h Zhang01@login01 elastic-visco-tcompute.512mesh]$ sbatch visco_elastic.slurm
Submitted batch job 180902
```



位移与库伦应力计算结果



位移与库伦应力计算结果

全球弹性子系统



01

子系统介绍

02

模式原理

03

程序代码结构

04

数据制备

05

新建case、编译、运行

06

结果诊断分析与应用案例



3-01 全球弹性子系统-子系统介绍

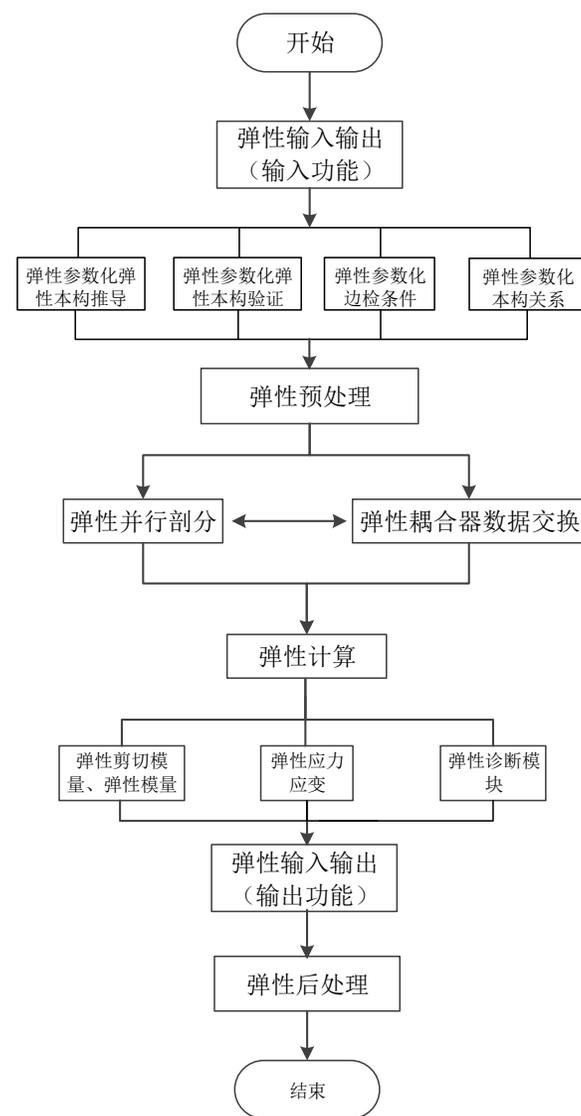
全球弹性子系统通过计算求取全球同震位移场、应变场，应力场，大地水准面变化，地球质量再分配，地球转动惯量变化，地球自转角速度变化，地球日长变化，地球自转轴角度变化等量对计算和分析地球自转和极移等参数变化等。

该子系统由弹性剪切模量、弹性模量模块，弹性应力应变模块，弹性诊断模块，弹性预处理模块，弹性并行剖分模块，弹性耦合器数据交换模块，弹性输入输出模块，弹性后处理模块，弹性参数化本构关系模块，弹性参数化弹性本构推导模块，弹性参数化弹性本构验证模块和弹性参数化边检条件模块共12个模块组成。

系统主要为地幔对流及板块运动对于地壳的影响作用，造成地壳临近区域动力地形、温度场、化学成分场等的改变，因而造成全球弹性子系统的模拟参数的改变。因此，该子系统为其提供温度场、化学组分、应力场、位移场、能量场、岩性参数等数据及边界条件，并将物理过程模拟进程相关信息反馈给该子系统。全球弹性子系统主要通过使用等效体力有限元算法，将已存在的全球地震同震位错模型转换为等效体力添加在方程的右端项，进而消除对网格剖分的难度，精细化网格模型，缓慢区域水平和垂直分辨率达到5-50km，快速变化区域水平和垂直分辨率达到100m，平均水平分辨率达到10米-500米，断层带和特殊结构区域分辨率达到10米，7.3.3 垂直分辨率可达100层以上，平均垂直分辨率可达200层，整体非结构化网格可以达到3000万-1亿网格，在特殊地球分层与地质结构如断层区域，实现网格自适应加密。从而计算全球同震位移、应变和应力等同震效应，用于分析震后几个月内到几年时间内的全球弹性相应。

3-02 全球弹性子系统-模式原理

1. 首先，通过弹性输入输出模块的进行参数输入，同时加上弹性参数化本构关系模块和弹性参数化边检条件模块，通过弹性预处理模块进行预处理，完成初始模型的装配与标记；
2. 将预处理结果，通过弹性并行剖分模块将模块剖分，进行并行计算，提高计算效率。同时通过弹性耦合器的数据交换模块存储和组织计算中的数据，如网格格点、插值积分节点、单元的编号等等；
3. 进行粘弹性计算，分别包含的是弹性模块所必需的动力学部分：剪切模量、弹性模量、应力应变。还包括粘弹性动力学诊断部分，通过弹性诊断模块来判断粘弹性模块的动力学关系，确保整个模型的动力平衡。
4. 最后，通过弹性输入输出模块中的输出功能输出上述计算结果，并通过弹性后处理模块将计算结果呈现出来。



3-03 全球弹性子系统-程序代码结构

文件名	子程序名	功能
	ddms.f、azpartition.f、azsendpart.f、azrecvpart.f、msazrecvpart.f start.f、nzdmbdiag.f、bft.f、eddm.f	
	dmbs2dmsr.f	
	azsolv.f	
	nzrecvdip.f	
	estress.f	
	recvstress.f	
	recvTopography.f	
	boundexp.f	
	timer.f	
	bound1.f	
	hightness.f	
	aec8g2.f	
	bec8g2.f	
	tidal_disp_bound.f	
	aec8g2_sph.f	
	bec8g2_sph.f	
	sph_tidal_disp_bound.f	
	USCazpartition-ih.f	
	umcazpartition-wc	
	hmpre hmpre.f	
	post_tidal	
	post_tidal_coefficient post_tidal_	
	tidal_pre	生成模型网格与节点参数赋值，将生成的elem0,coor0,coorxyz0,id0,disp0,disp1,wc文件拷贝至calcu文件夹
	sph_tidal_pre	
	fault_tidal_pre	
	fault_tidal_pre	
	cpdata.sh	
	USCazpartition-ih.slurm	
	earth_tidal.slurm	将网格分区，进行并行计算
	ddm_earth_tidal	

3-04 全球弹性子系统-数据制备

弹性输入输出模块负责读入程序所需的模型数据，包括：

断层模型：包括断层面的三参数以及摩擦系数等；

全球模型：地球椭球的形状参考WGS-84模型；

地壳模型：采用CRUST1.0模型；

地幔模型：GYPSUM模型；

MOGI模型：三个互相垂直的不等量扩张点源岩浆囊模型；

地表地形材料：地表的地形数据等；

参数非均匀性模块：通过参数来控制非均匀模型。

```
open(10,file='coor0',form='unformatted',status='unknown')
read(10) knode, kcoor,((x(j,i),j=1,kcoor),i=1,knode)
close(10)
open(10,file='elem0',form='unformatted',status='unknown')
read(10) kelem, nne,((node(j,i),j=1,nne),i=1,kelem)
close(10)
open(10,file='munod',form='unformatted',status='unknown')
read(10)((u(j,i),i=1,knode),j=1,kdgof)
close(10)
open(10,file='mstress',form='unformatted',status='unknown')
read(10)((str(j,i),i=1,knode),j=1,kdgofgt)
close(10)
```

c

```
open(20,file='tidal.flavia.msh',form='formatted',
+ status='unknown')
write(20,*)'Mesh "Hexa" Dimension 3 Elemtpe Hexahedra Nnode 8'
write(20,*)'Coordinates'
do i = 1,knode
write(20,1000) i,(x(j,i),j=1,3)
end do
write(20,*)'End coordinates'
```

c

```
write(20,*)'Elements'
do i = 1,kelem
write(20,1050) i,(node(j,i),j=1,9)
end do
write(20,*)'End elements'
write(20,*)
close(20)
```

3-05 全球弹性子系统-新建case、编译、运行

在data/hzhang01/elastic_earth_tidal文件夹下，共有四个文件夹，如图所示。

```
[hzhang01@login01 hzhang01]$ cd elastic_earth_tidal/  
[hzhang01@login01 elastic_earth_tidal]$ ls  
benchmark  calcul  lib  mesh  sourcecode
```

其中/sourcecode文件夹中为数值计算源程序，/mesh文件夹中为三维模型生成程序，/calcul文件夹中为数值计算所需文件。

首先对源程序进行编译生成可执行程序：进入/sourcecode文件夹，先后输入make clean、make命令进行编译，并将可执行程序拷贝到/calcul文件夹下，如下图所示：

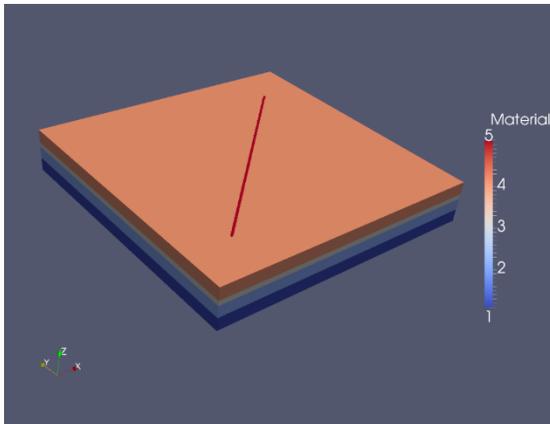
```
[hzhang01@login01 sourcecode]$ makeclean  
bash: makeclean: command not found...
```

```
[hzhang01@login01 sourcecode]$ make  
ifort -O2 -o USCazpartition-ih USCazpartition-ih.o io.o partdmesh.o ../lib/libmetis.a  
cp ddm ../calcul/ddm_earth_tidal  
cp USCazpartition-ih ../calcul/.
```

3-05 全球弹性子系统-新建case、编译、运行

进入/mesh文件夹，先后编译运行make、fault_tidal_pre 和cpdata.sh，进行网格生成，并将生成的网格数据拷贝至./calcu文件夹下，如下图所示：

```
[hzhang01@login01 mesh]$ make clean
/bin/rm -f *.o
[hzhang01@login01 mesh]$ make
ifort -O2 -L../lib -c hmpre.f
ifort -O2 -o hmpre hmpre.f
ifort -O2 -L../lib -c post_tidal.f
ifort -O2 -o post_tidal post_tidal.o
ifort -O2 -L../lib -c tidal.f
ifort -O2 -o tidal tidal.o
ifort -O2 -L../lib -c tidal_pre.f
ifort -O2 -o tidal_pre tidal_pre.o
ifort -O2 -L../lib -c sph_tidal_pre.f
ifort -O2 -o sph_tidal_pre sph_tidal_pre.o
ifort -O2 -L../lib -c fault_tidal_pre.f
ifort -O2 -o fault_tidal_pre fault_tidal_pre.o
ifort -O2 -L../lib -c post_tidal_coefficient.f
ifort -O2 -o post_tidal_coefficient post_tidal_coefficient.o
cp post_tidal ../calcu/
cp post_tidal_coefficient ../calcu/
```



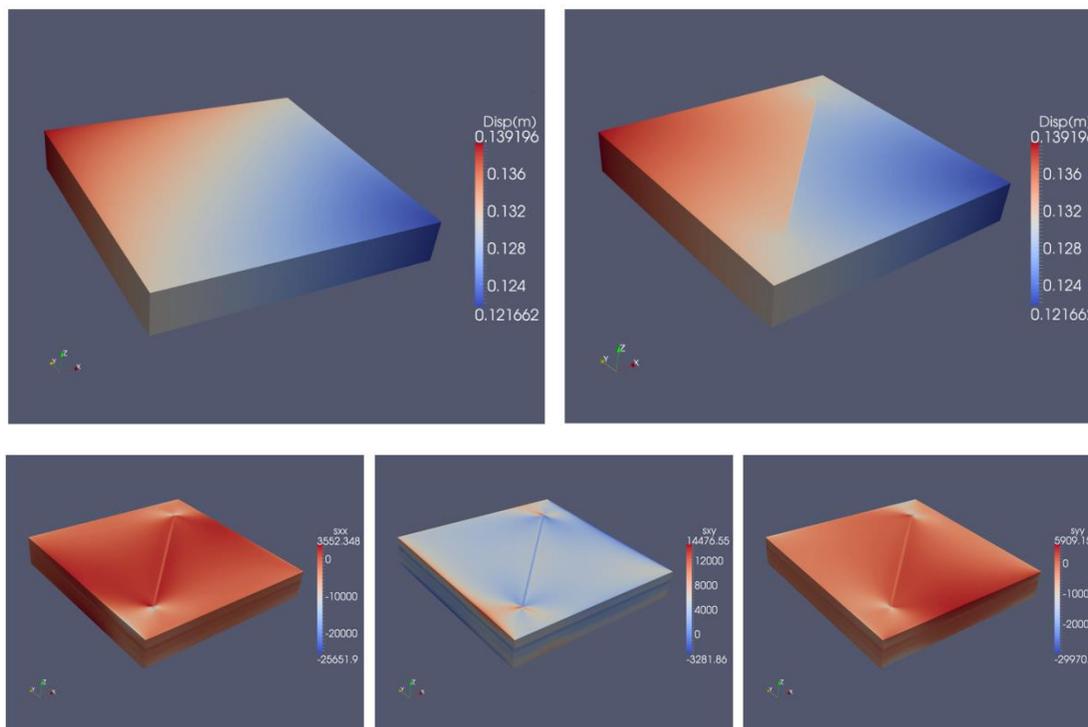
```
[hzhang01@login01 mesh]$ ./fault_tidal_pre
=====
the domain is a cube
following are requested parameters:
nx: the no. of segmentation of x-direction
ny: the no. of segmentation of y-direction
nz: the no. of segmentation of z-direction
xmax: the distance of x-direction
ymax: the distance of y-direction
zmax: the distance of z-direction
=====
                    50      250      250  50.000000000000000
117.51680000000000  120.51680000000000  29.853100000000000
32.853100000000000
                    4      16      28      35      50
                    7      7
300000000000.0000  0.250000000000000  0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000  0.000000000000000E+000  3400.0000000000000
0.000000000000000E+000
200000000000.0000  0.250000000000000  0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000  0.000000000000000E+000  3400.0000000000000
0.000000000000000E+000
100000000000.0000  0.250000000000000  0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000  0.000000000000000E+000  3400.0000000000000
0.000000000000000E+000
300000000000.0000  0.250000000000000  0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000  0.000000000000000E+000  3400.0000000000000
0.000000000000000E+000
500000000000.0000  0.330000000000000  0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000  0.000000000000000E+000  3400.0000000000000
0.000000000000000E+000
```

3-06 全球弹性子系统-结果诊断分析与应用案例

进入/calcu文件夹，先后输入sbatch part.slurm和sbatch earth_tidal.slurm进行数值并行计算。

```
[hzhang01@login01 calcu]$ sbatch part.slurm
```

```
[hzhang01@login01 calcu]$ sbatch earth_tidal.slurm
```



区域孔隙弹性耦合子系统



01

子系统介绍

02

模式原理

03

程序代码结构

04

数据制备

05

新建case、编译、运行

06

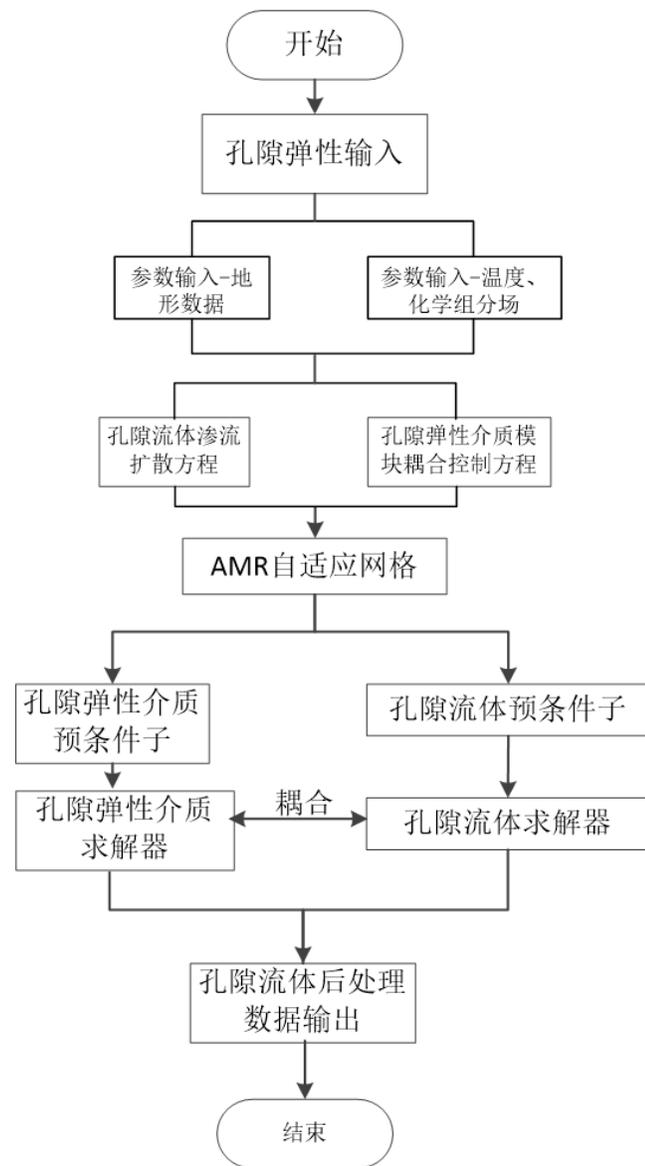
结果诊断分析与应用案例



该子系统开展区域尺度的水库诱发地震等孔隙弹性问题的数值模拟，建立区域尺度高分辨率有限元模型，计算区域的孔隙压力变化、应力变化、应变变化以及库仑应力变化，对由水库蓄水等活动引起的孔隙弹性效应所导致固体弹性应力的变化进行计算，评估水库蓄水等活动对断层活动的影响。

4-02 区域孔隙弹性耦合子系统-模式原理

- (1) 首先，准备地形、断层等输入数据，并进行数据预处理；
- (2) 将预处理结果，通过区域孔隙弹性子模块进行剖分，将物性参数进行耦合；
- (3) 进行区域孔隙弹性计算，分别包含的孔隙流体渗透方程的计算和孔隙弹性耦合方程计算。
- (4) 最后，通过后处理模块将计算结果进行可视化。



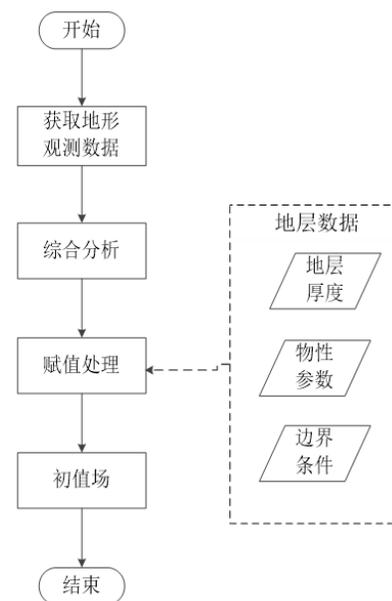
4-03 区域孔隙弹性耦合子系统-程序代码结构

文件名	子程序名	功能
Triangle	triangle.c	平面三角形网格剖分及可视化程序。
	Showme.c	
/model	Model.f	耦合地形、断层、物性参数，建立三维网格模型
	Mesh.f	
/calculate	eeta.for	进行孔隙弹性耦合计算
	eeta.for	
	Bft.for	
	Starta.for Startb.for	
/gidpost	Gidpost.for	将结果进行后处理及可视化

4-04 区域孔隙弹性耦合子系统-数据制备

序号	名称	文件格式	数据类型	周期	数据来源	描述
1	地表高程数据	NetCDF	二进制	365天	国内公开渠道	各测绘单位测得地区高程数据
2	GPS观测数据	HDF	二进制	365天	我国GPS观测	大范围的卫星观测数据
3	关键性物性参数	Txt	十进制	1天	实验测得	实验测得主要物性参数

采取合理的边界条件进行求解才能准确地描述水库地震的机制，根据地表高程、GPS观测数据、关键性物性参数等变量进行赋值处理，建立模型初边值条件解决接下来孔隙弹性介质模块和孔隙流体模块中耦合控制方程和渗透扩散方程模块的数值求解初值问题。



4-05 区域孔隙弹性耦合子系统-新建case、编译、运行

```
c ..... coord0
cc//For the sphere coordinate
nd=3
  open(101,file='coord1',form='unformatted',status='unknown')
  write(101) knode,nd,((xrs0(i,j),j=1,nd),i=1,knode)
  close(101)
cc//For the cartesian coordinate
  open(101,file='coordinate.txt',form='formatted',status='unknown')
  write(101,*) knode,nd
  write(101,*) (x(i),y(i),z(i),i=1,knode)
  close(101)

  open(101,file='coord0',form='unformatted',status='unknown')
  write(101) knode,nd,(x(i)*111000,y(i)*111000,z(i),i=1,knode)
  close(101)
c ..... id for field a (pressure)
nd=1
do i=1,knode
do j=1,nd
if (i.le.maxnod .or. i.gt.maxnod*numlay) then
idata(i,j)=-1
else
idata(i,j)=1
endif
enddo
enddo
  open(101,file='id0',form='unformatted',status='unknown')
  write(101) knode,nd,((idata(i,j),j=1,nd),i=1,knode)
  close(101)
c ..... id for field b (displace)
nd=3
do i=1,knode
do j=1,nd
idata(i,j)=1
enddo
```

mesh.f

用于将地形数据导入网格节点

```
c ..... coord0
cc//For the sphere coordinate
nd=3
  open(101,file='coord1',form='unformatted',status='unknown')
  write(101) knode,nd,((xrs0(i,j),j=1,nd),i=1,knode)
  close(101)
cc//For the cartesian coordinate
  open(101,file='coordinate.txt',form='formatted',status='unknown')
  write(101,*) knode,nd
  write(101,*) (x(i),y(i),z(i),i=1,knode)
  close(101)

  open(101,file='coord0',form='unformatted',status='unknown')
  write(101) knode,nd,(x(i)*111000,y(i)*111000,z(i),i=1,knode)
  close(101)
c ..... id for field a (pressure)
nd=1
do i=1,knode
do j=1,nd
if (i.le.maxnod .or. i.gt.maxnod*numlay) then
idata(i,j)=-1
else
idata(i,j)=1
endif
enddo
enddo
  open(101,file='id0',form='unformatted',status='unknown')
  write(101) knode,nd,((idata(i,j),j=1,nd),i=1,knode)
  close(101)
c ..... id for field b (displace)
nd=3
do i=1,knode
do j=1,nd
idata(i,j)=1
enddo
```

model.f

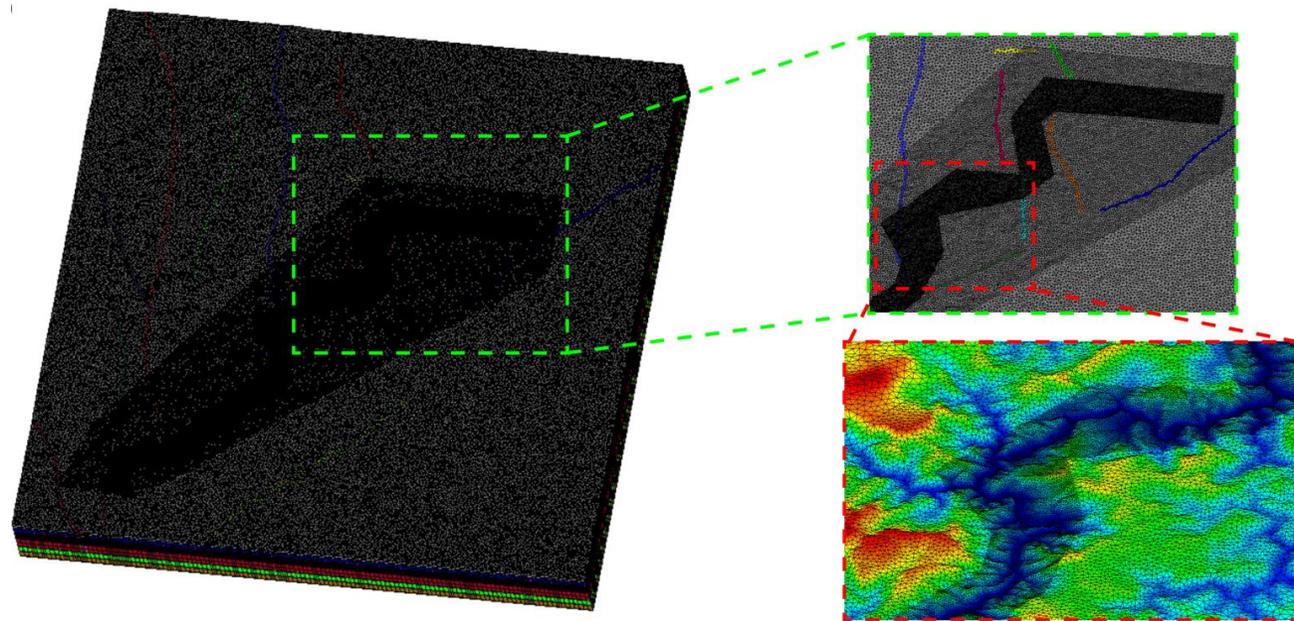
用于几何模型及数据输入

```
  open(30,file='faultmesh-new.flavia.msh',status='unknown',
+   form='formatted')
  write(30,*)
  write(30,*)'Mesh "q4" Dimension 2 Elemtype Quadrilateral Nnode 4'
  write(30,*)'Mesh "t3" Dimension 2 Elemtype Triangle Nnode 3'
  write(30,*)'Coordinates'
  do i = 1,maxnod
  write(30,*) i,xi(i),yi(i)
  end do
  write(30,*)'End coordinates'
  write(30,*) 'Elements'
  do i=1,maxele
  write(30,*)i,itri(1,i),itri(2,i),itri(3,i),mark(i)
  end do
  write(30,*)'End elements'
  goto 1145
  write(30,*)
  continue
  close(30)

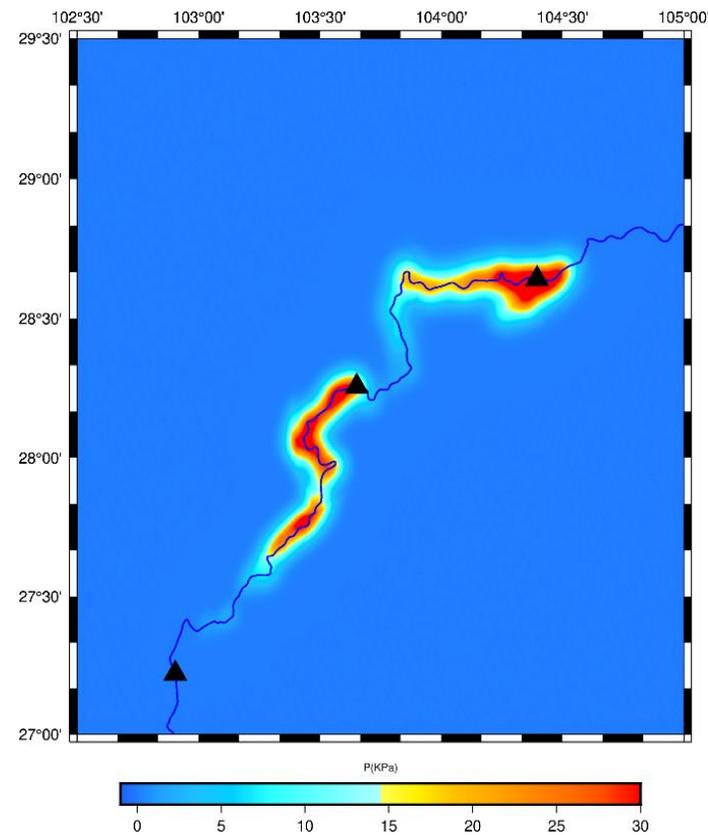
  open(100,file='topo',form='formatted',status='unknown')
do i=1,maxnod
  read(100,*) coord(i,1),coord(i,2),topo(i) !topo单位米
enddo
  close(100)
```

建立三位六棱柱网格模型

4-06 区域孔隙弹性耦合子系统-结果诊断分析与应用案例



三维水库模型



5km深度上孔隙压力结果

地表过程耦合子系统



01

子系统介绍

02

模式原理

03

程序代码结构

04

数据制备

05

新建case、编译、运行

06

结果诊断分析与应用案例



5-01 地表过程耦合子系统-子系统介绍

- 地表过程耦合子系统基于多时空尺度高分辨率有限体积数值模拟方法，考虑构造活动及气候变化影响因子，主要求解水层、基岩层、风化层和悬浮物层的地表过程演化方程。
- 子系统的输入数据主要包括以下三个部分：一是高分辨率地形数据；二是构造隆升速率数据；三是气候驱动因子，即降水因子特征模式数据，主要包括全球气候日、月、年降雨数据等。四是研究区域物性参数等模式参数。
- 最终实现包括河流下切、土壤蠕动扩散、沉积物输运与沉积等多元地表过程的数值模拟。

5-02 地表过程耦合子系统-模式原理

待求4个变量:

水深Water height θ

基岩高程Bedrock layer z

风化层/沉积层厚度Regolith layer ρ

悬浮物载荷suspended sediment load λ

$$z = z + \rho + \theta$$

$$\lambda \equiv \delta\theta$$

$$\mathbf{v} = -\theta^\alpha |\nabla \mathbf{z}|^{-\beta} \nabla \mathbf{z}$$

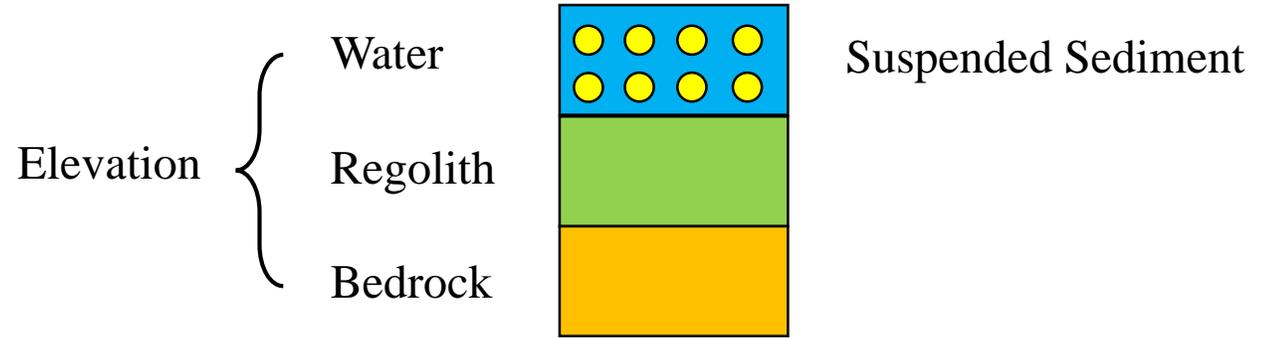
$$E_b = \varepsilon \theta^m |\nabla \mathbf{z}|^n e^{-\rho/\rho_0} + w e^{-\rho/\rho_1}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot (\theta \mathbf{v}) + r$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\varepsilon \theta^m |\nabla \mathbf{z}|^n e^{-\rho/\rho_0} - w e^{-\rho/\rho_1} + u$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\eta \text{sign}(\rho)^+ (\theta^m |\nabla \mathbf{z}|^n) + c \Delta(z + \rho) + s \frac{\lambda}{\theta}$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v} \lambda) + (\varepsilon e^{-\rho/\rho_0} + \eta \text{sign}(\rho)^+) \theta^m |\nabla \mathbf{z}|^n - s \frac{\lambda}{\theta}$$



输入参数:

ε : 基岩下切系数

η : 风化/沉积层下切系数

c : 扩散系数

s : 沉积系数

r : 降雨率

u : 抬升速率

w : 基岩层和风化/沉积层转化常数

ρ_0, ρ_1 : 风化层影响指数

α, β : 水的运输指数

m, n : 下切指数

5-03 地表过程耦合子系统-程序代码结构

➤ 物理方程对应项的子程序名

序号	子程序名	描述	命名规则
01	WTDIF	diffusion term in the water depth equation	1-2两个字母代表所在方程, 3-5三个字母为物理过程缩写, 6-7 (一般缺省) 在发生重复时用于区别不同子程序名
02	WTRIN	rainfall term in the water depth equation	
03	BKINC	incision term in the bedrock equation	
04	BKWEA	weathering term in the bedrock equation	
05	BKUPL	uplift term in the bedrock equation	
06	RGINC	incision term in the regolith equation	
07	RGDIF	diffusion term in the regolith equation	
08	RGWEA	weathering term in the regolith equation	
09	RGSED	sedimentation term in the regolith equation	
10	SUDIF	diffusion term in the suspended sediment equation	
11	SUINCBK	incision term from bedrock in the suspended sediment equation	
12	SUINCRG	incision term from regolith in the suspended sediment equation	
13	SUSED	sedimentation term in the suspended sediment equation	

5-03 地表过程耦合子系统-程序代码结构

➤ 其它子程序名

序号	子程序名	描述	命名规则
01	INIMVR	initialize main variables	子程序名由6个大写字母组成; 1-3.三个字母代表功能类型, 这里主要包括: INI 赋初值; CAL计算;
02	INIBDC	initialize boundary conditions	
03	GRDING	gridding	
04	NONNEG	making some variables non-negative, calculate the ratio	
05	MAKNNG	making some variables non-negative, apply the ratio	
06	CALWTA	calculate water depth change with given time step	
07	CALBKA	calculate bedrock change with given time step	
08	CALRGA	calculate regolith depth change with given time step	
09	CALSUA	calculate suspended sediment change with given time step	
10	NEWOLD	update main variables' values	
11	TACFLC	calculate time step constrained by CFL condition	
12	CALBDC	apply boundary condition	

5-04 地表过程耦合子系统-数据制备

➤ 提前通过文献获取研究区域下述参数，并在参数文件中输入，具体位置见后续介绍

序号	参数名	描述	命名规则
01	wtrain	rainfall in water depth equation	全小写 1-2.用equation命名; 3-6.截取前4个字母,不够4个的有几个取几个 有相等参数的,后面出现的参数不再出现在程序中
02	wtalph	alpha in water depth equation	
03	wtbeta	beta in water depth equation	
04	bkepsi	epsilon in bedrock equation	
05	bkm	m in bedrock equation	
06	bkn	n in bedrock equation	
07	bkrou0	rou0 in bedrock equation	
08	bkrou1	rou1 in bedrock equation	
09	bkw	w in bedrock equation	
10	bkupli	uplift in bedrock equation	
11	rgeta	eta in regolith equation	
12	rgm	m in regolith equation=bkm	
13	rgn	n in regolith equation=bkn	

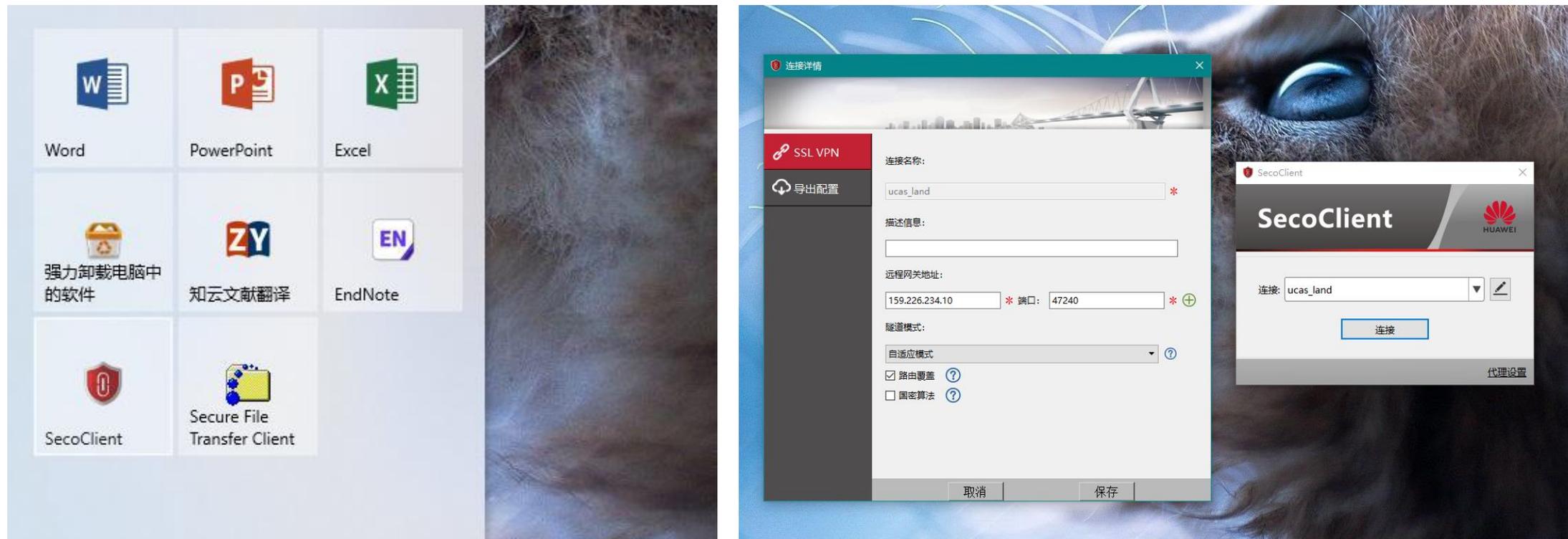
5-04 地表过程耦合子系统-数据制备

➤ 提前通过文献获取研究区域下述参数，并在参数文件中输入，具体位置见后续介绍

序号	参数名	描述	命名规则
14	rgc	c in regolith equation	全小写，1-2用equation命名，3-6截取前4个字母，不够4个的有几个取几个 有相等参数的，后面出现的参数不再出现在程序中
15	rgw	w in regolith equation=bkw	
16	rgrou1	rou1 in regolith equation=bkrou1	
17	rgs	s in regolith equation	
18	sualph	alpha in suspended sediment equation=wtalph	
19	subeta	beta in suspended sediment equation=wtbeta	
20	suepsi	epsilon in suspended sediment equation=bkepsi	
21	sueta	eta in suspended sediment equation=rgeta	
22	surou0	rou0 in suspended sediment equation=bkrou0	
23	sum	m in suspended sediment equation=bkm	
24	sun	n in suspended sediment equation=bkn	
25	sus	s in suspended sediment equation=rgs	

5-05 地表过程耦合子系统-新建case、编译、运行

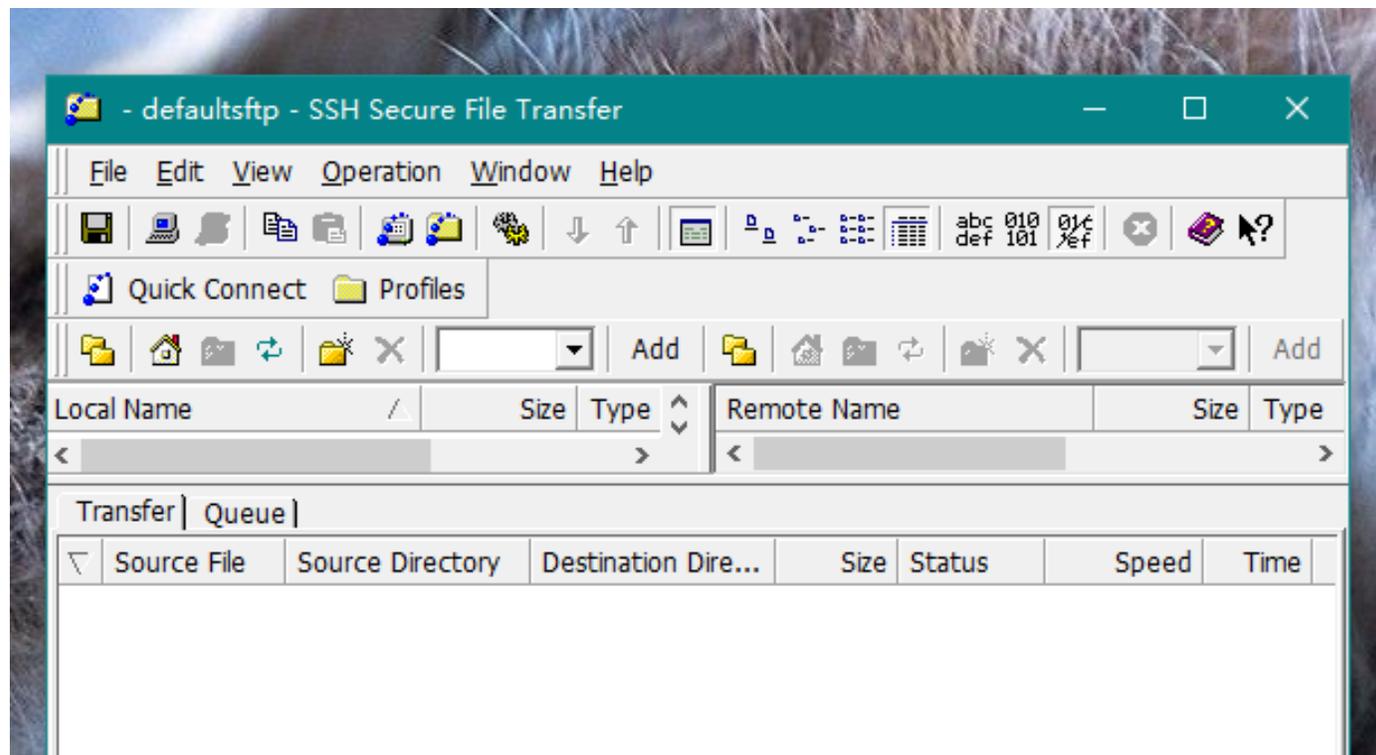
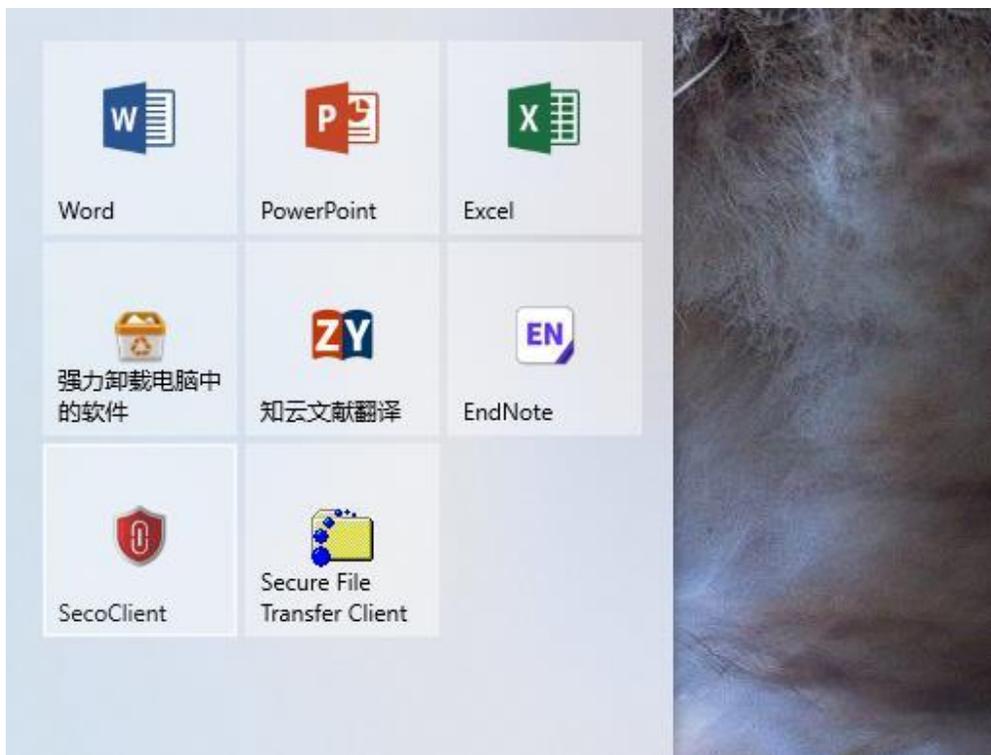
➤ 程序使用1-登录大气所密云VPN



网关：159.226.234.10 端口：47240
用户名：hzhang02 密码：Hzhang123

5-05 地表过程耦合子系统-新建case、编译、运行

➤ 程序使用2-登录大气所密云



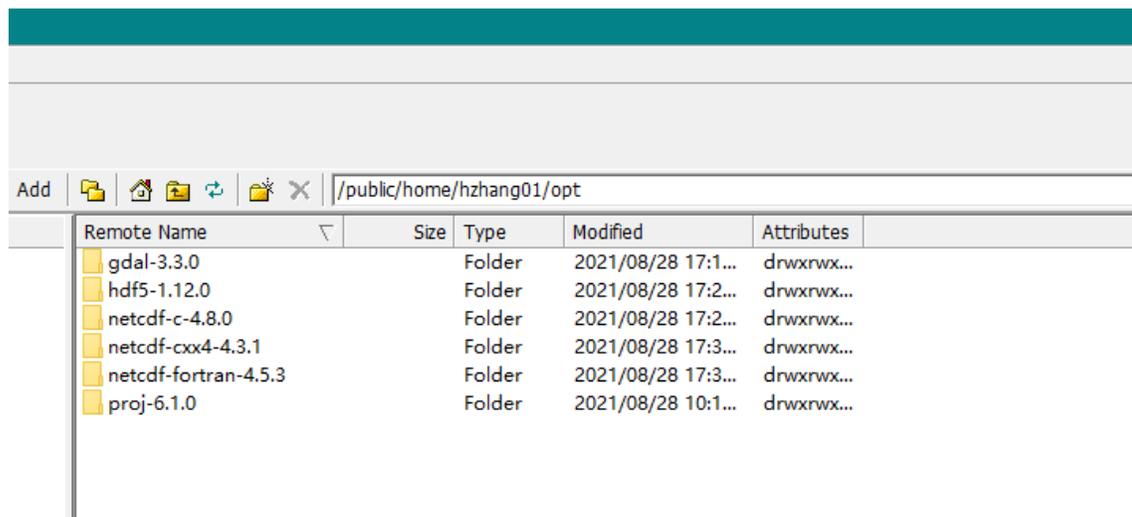
Host name: login.earthlab.iap.ac.cn

User name: hzhang01

Password: hzhang123

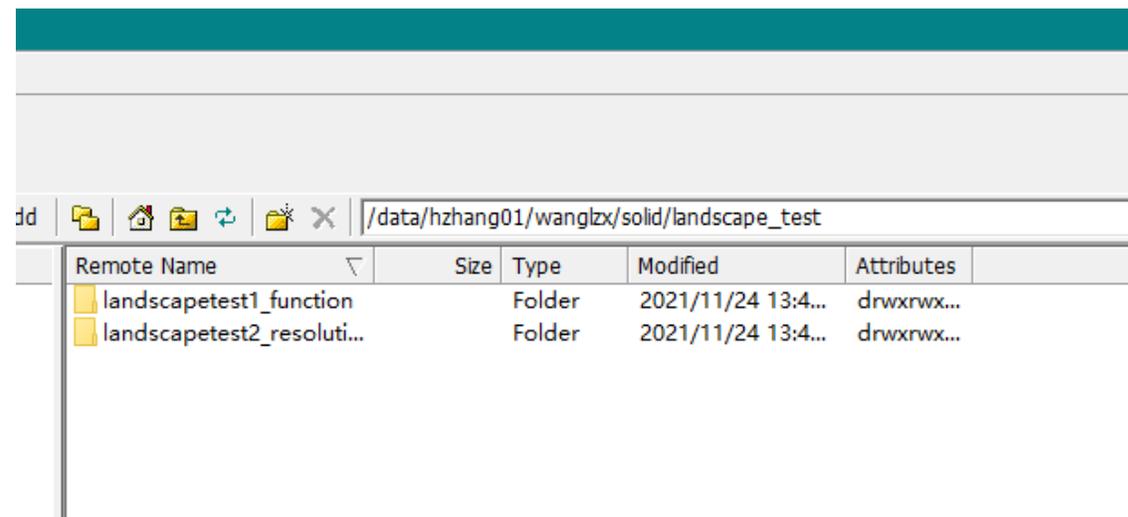
➤ 程序使用3-库和程序位置

库的位置



Remote Name	Size	Type	Modified	Attributes
gdal-3.3.0		Folder	2021/08/28 17:1...	drwxrwx...
hdf5-1.12.0		Folder	2021/08/28 17:2...	drwxrwx...
netcdf-c-4.8.0		Folder	2021/08/28 17:2...	drwxrwx...
netcdf-cxx4-4.3.1		Folder	2021/08/28 17:3...	drwxrwx...
netcdf-fortran-4.5.3		Folder	2021/08/28 17:3...	drwxrwx...
proj-6.1.0		Folder	2021/08/28 10:1...	drwxrwx...

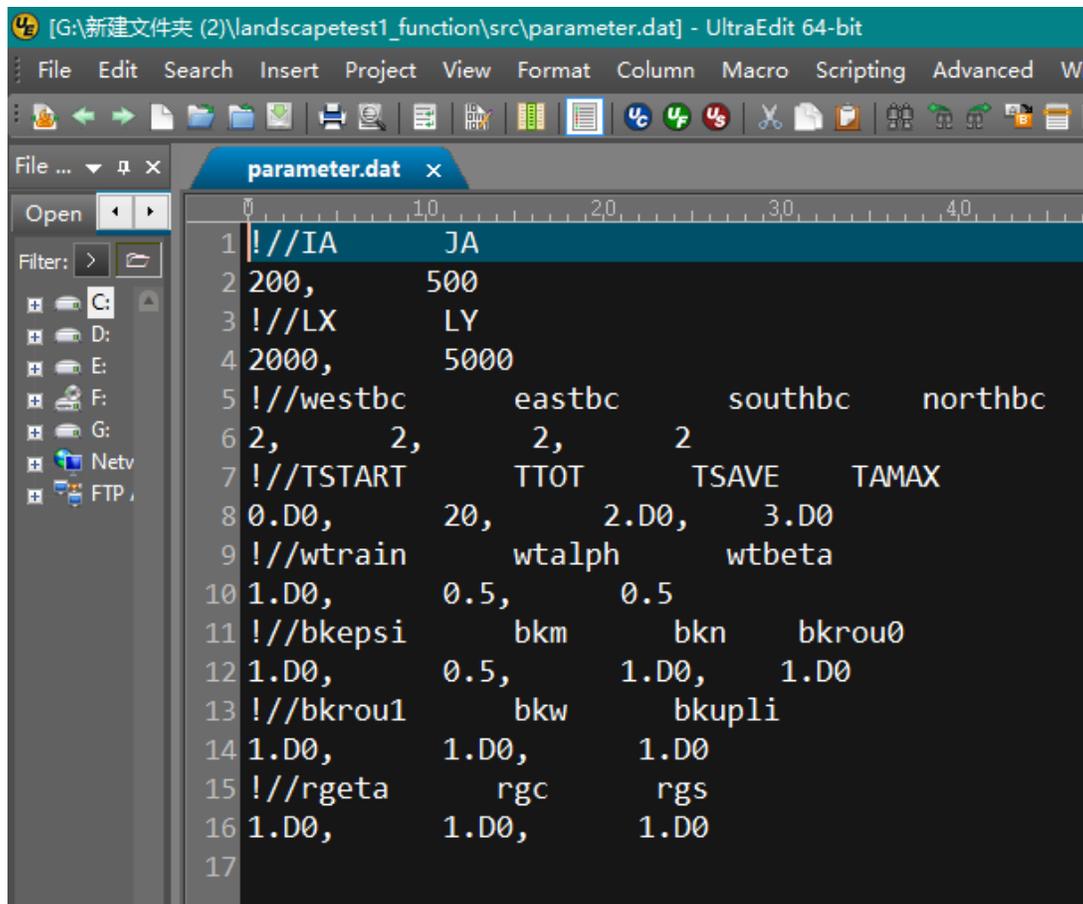
程序位置



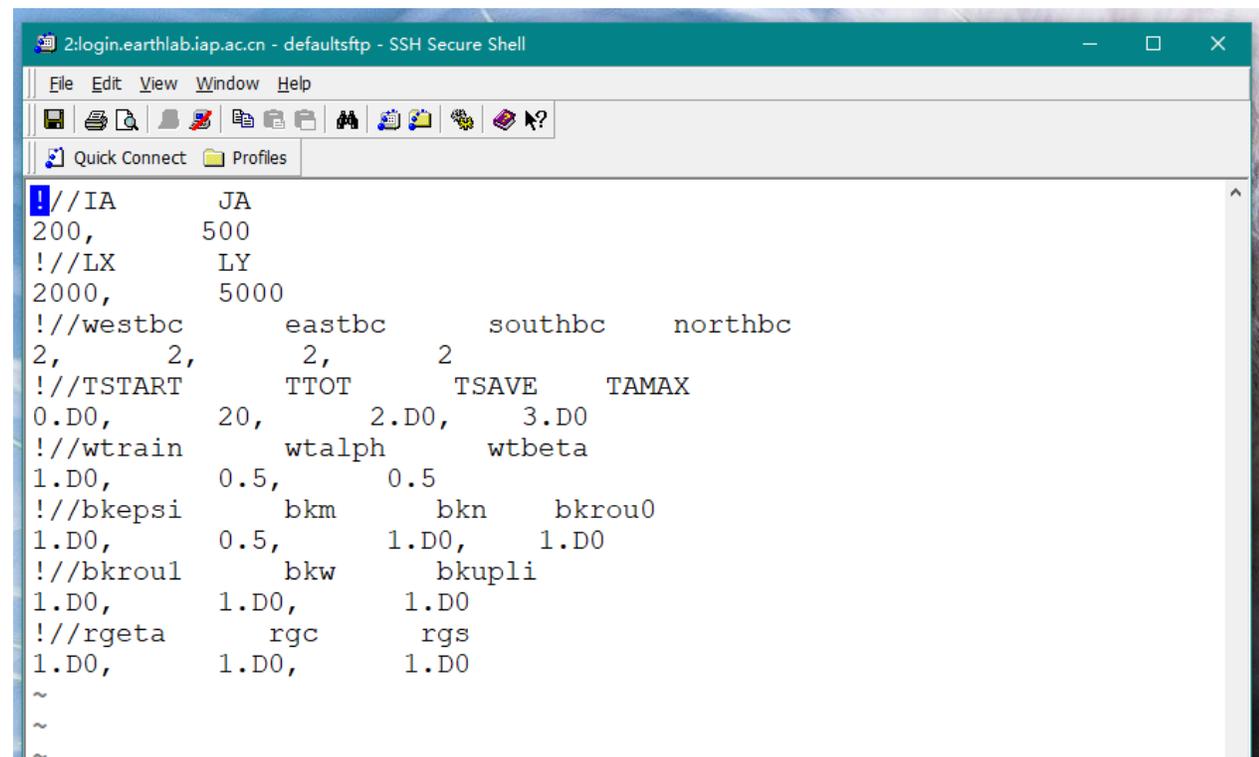
Remote Name	Size	Type	Modified	Attributes
landscapetest1_function		Folder	2021/11/24 13:4...	drwxrwx...
landscapetest2_resoluti...		Folder	2021/11/24 13:4...	drwxrwx...

5-05 地表过程耦合子系统-新建case、编译、运行

➤ 参数设置



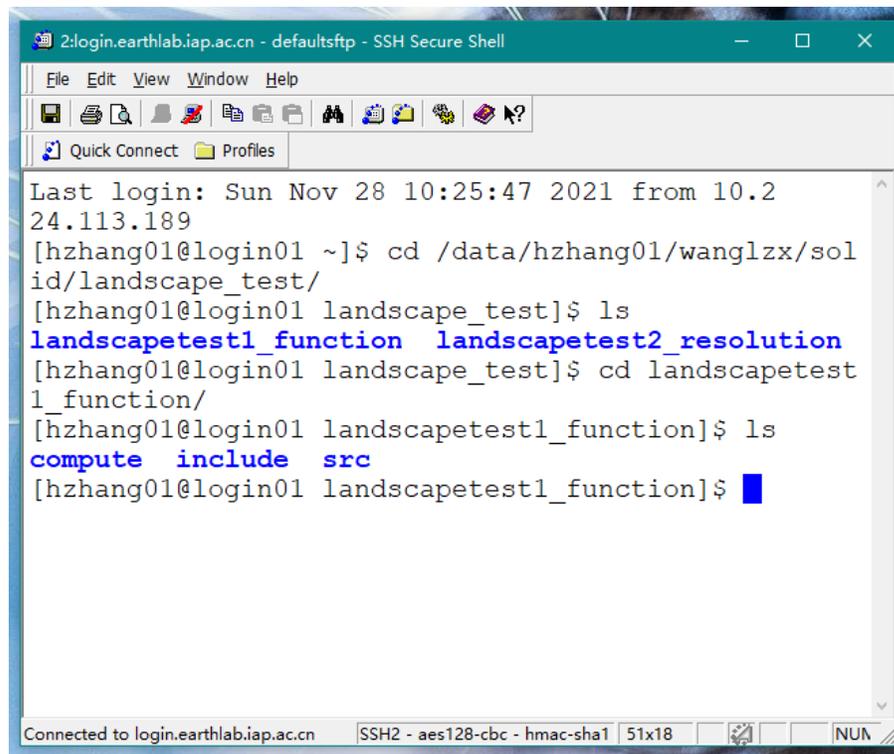
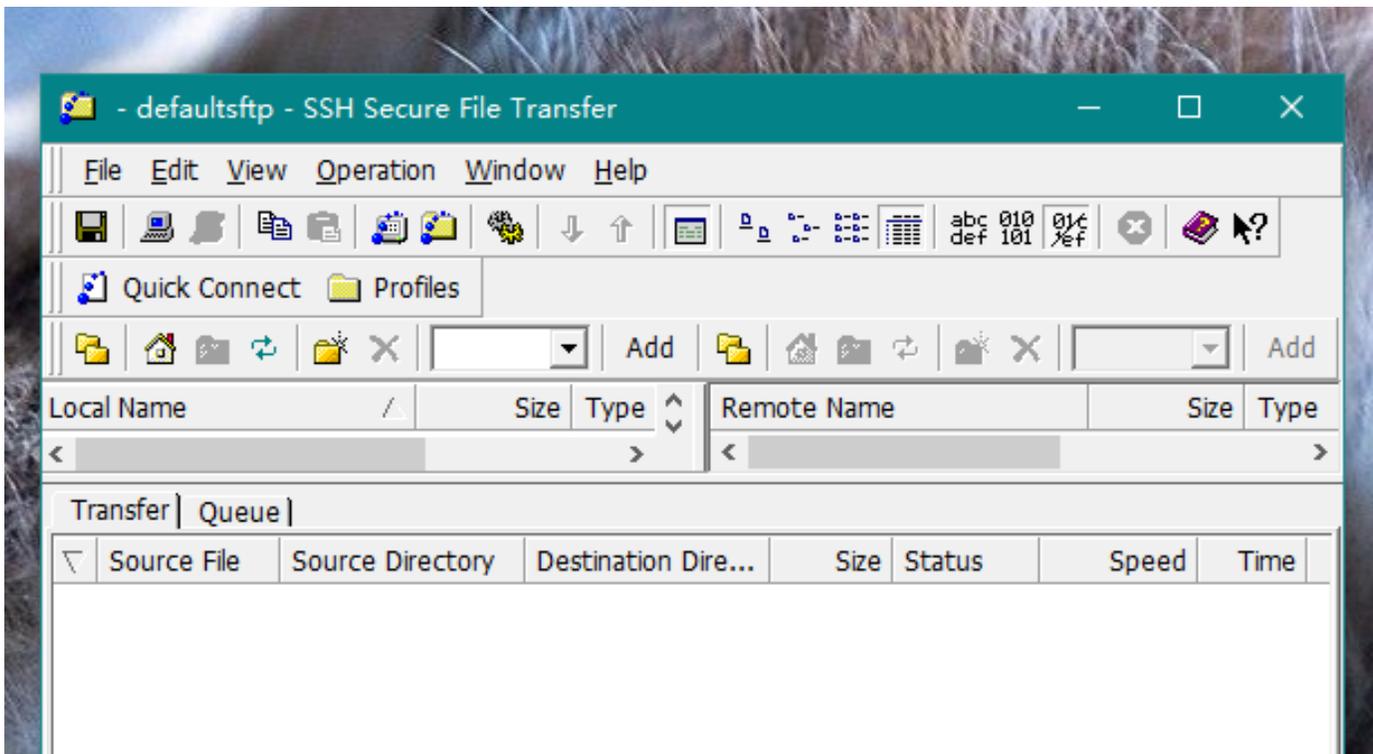
```
[G:\新建文件夹 (2)\landscapetest1_function\src\parameter.dat] - UltraEdit 64-bit
File Edit Search Insert Project View Format Column Macro Scripting Advanced W
Open parameter.dat x
Filter: >
1 !//IA JA
2 200, 500
3 !//LX LY
4 2000, 5000
5 !//westbc eastbc southbc northbc
6 2, 2, 2, 2
7 !//TSTART TTOT TSAVE TAMAX
8 0.D0, 20, 2.D0, 3.D0
9 !//wtrain wtalph wtbeta
10 1.D0, 0.5, 0.5
11 !//bkepsi bkm bkn bkrou0
12 1.D0, 0.5, 1.D0, 1.D0
13 !//bkrou1 bkw bkupli
14 1.D0, 1.D0, 1.D0
15 !//rgeta rgc rgs
16 1.D0, 1.D0, 1.D0
17
```



```
2:login.earthlab.iap.ac.cn - defaultsftp - SSH Secure Shell
File Edit View Window Help
Quick Connect Profiles
!//IA JA
200, 500
!//LX LY
2000, 5000
!//westbc eastbc southbc northbc
2, 2, 2, 2
!//TSTART TTOT TSAVE TAMAX
0.D0, 20, 2.D0, 3.D0
!//wtrain wtalph wtbeta
1.D0, 0.5, 0.5
!//bkepsi bkm bkn bkrou0
1.D0, 0.5, 1.D0, 1.D0
!//bkrou1 bkw bkupli
1.D0, 1.D0, 1.D0
!//rgeta rgc rgs
1.D0, 1.D0, 1.D0
~
~
~
```

5-05 地表过程耦合子系统-新建case、编译、运行

➤ 程序编译



5-05 地表过程耦合子系统-新建case、编译、运行

```
2:login.earthlab.iap.ac.cn - defaultsftp - SSH Secure Shell
File Edit View Window Help
Quick Connect Profiles

Last login: Sun Nov 28 10:27:18 2021 from 10.24.113.189
[hzhang01@login01 ~]$ cd /data/hzhang01/wanglx/solid/landscape_test/landscapetest1_function/src
[hzhang01@login01 src]$ make clean
/bin/rm -f *.o
/bin/rm -f *.exe
[hzhang01@login01 src]$ ls
closefile.f          parameter.dat
f90                  parameter.dat.bak
fault_p.dat          parameterlandscape
handle_err.f         parameterlandscape.bak
initfile.f           SWE-nonlinear-nc-qt.f
landscape            SWE-nonlinear-nc-qt.f.bak
landscape.f.bak      writebath_nc.f
Makefile             writemaxheight_nc.f
Makefile.bak         writemaxvelocity_nc.f
Makefile-gfort       write_netcdf.f
Makefile-intel       writewave_nc.f
openfile.f
[hzhang01@login01 src]$
```

```
[hzhang01@login01 src]$ make
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c SWE-nonlinear-nc-qt.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c initfile.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c openfile.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c closefile.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c writebath_nc.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c writewave_nc.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c write_netcdf.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c writemaxheight_nc.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c writemaxvelocity_nc.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c handle_err.f
gfortran -mcmmodel=large -o SWE-nonlinear-nc-qt.exe -O2 -I/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include SWE-nonlinear-nc-qt.o initfile.o openfile.o closefile.o writebath_nc.o writewave_nc.o write_netcdf.o writemaxheight_nc.o writemaxvelocity_nc.o handle_err.o -L/public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/lib -lnetcdff /usr/bin/ld: warning: libgfortran.so.4, needed by /public/home/hzhang01//opt/netcdf-fortran-4.5.3/lib/libnetcdff.so, may conflict with libgfortran.so.3
cp -f SWE-nonlinear-nc-qt.exe ../compute
cp -f *.dat ../compute
[hzhang01@login01 src]$
```

5-05 地表过程耦合子系统-新建case、编译、运行

➤ 程序运行

```
[hzhang01@login01 src]$ cd ../compute/
[hzhang01@login01 compute]$ ls
fault_p.dat  parameter.dat  SWE-nonlinear-nc-qt.exe
matlabscript result
[hzhang01@login01 compute]$ chmod +x SWE-nonlinear-nc-qt.exe
[hzhang01@login01 compute]$ ./SWE-nonlinear-nc-qt.exe
```

Connected to login.earthlab.iap.ac.cn SSH2 - aes128-cbc - hmac-sha1 70x36 CAP NUM

```
Gridding input information
NALL = 100000
LX = 2000.0000000000000000 , LY = 5000.0000000000000000
DX = 10.0000000000000000 meters
DY = 10.0000000000000000 meters
TAMAX = 3.0000000000000000 years
TTOT = 20.0000000000000000 years
TSTART = 0.0000000000000000 years
TSAVE = 2.0000000000000000 years
alpha = 0.5000000000000000 , beta = 0.5000000000000000

rainfall = 1.0000000000000000 meter per year
m = 0.5000000000000000 , n = 1.0000000000000000
kinc = 1.0000000000000000 , rou0 = 1.0000000000000000

w = 1.0000000000000000 , rou1 = 1.0000000000000000
uplift = 1.0000000000000000 , creg = 1.0000000000000000
kireg = 1.0000000000000000
sreg = 1.0000000000000000
```

5-05 地表过程耦合子系统-新建case、编译、运行

➤ 程序运行

```
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h1.nc
TA = 1.6829198728475658E-314 year
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h2.nc
Time = 9.3872472709836843E-323 year
TA = 1.0000000000000000 year. Start Write Data
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h3.nc
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h4.nc
Time = 2.0000000000000000 year. Save Data End
TA = 0.89395646280357965 year. Start Write Data
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h5.nc
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h6.nc
Time = 4.5161000352769758 year. Save Data End
TA = 0.90173999862214116 year. Start Write Data
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h7.nc
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h8.nc
Time = 6.3670152218436380 year. Save Data End
TA = 0.29500217663609196 year. Start Write Data
```

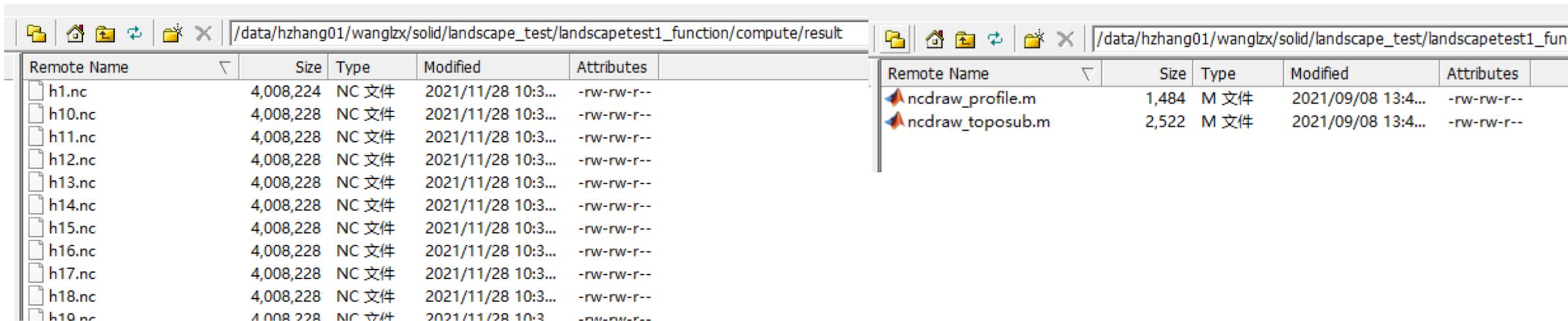
```
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h15.nc
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h16.nc
Time = 14.009926241017769 year. Save Data End
TA = 9.8842187475224365E-003 year. Start Write Data
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h17.nc
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h18.nc
Time = 16.000152125697802 year. Save Data End
TA = 6.2387777275143023E-003 year. Start Write Data
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h19.nc
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h20.nc
Time = 18.000404736662297 year. Save Data End
TA = 4.2202340714943077E-003 year. Start Write Data
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h21.nc
*** SUCCESS writing NetCDF file  result/h22.nc
Time = 20.003793676773483 year. Save Data End
CPU time = 177.80003600000001 s
finished~
[lnznang01@login01 compute]$
```

5-05 地表过程耦合子系统-新建case、编译、运行

➤ 输出数据与可视化



Remote Name	Size	Type	Modified	Attributes
matlabscript		Folder	2021/11/24 13:4...	drwxrwx...
result		Folder	2021/11/28 10:4...	drwxrwx...
fault_p.dat	553	DAT 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
parameter.dat	448	DAT 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
SWE-nonlinear-nc-qt.exe	151,480	应用程序	2021/11/28 10:3...	-rwxrwx...



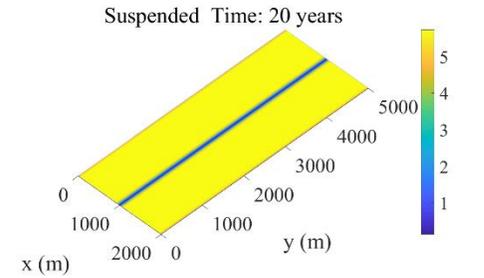
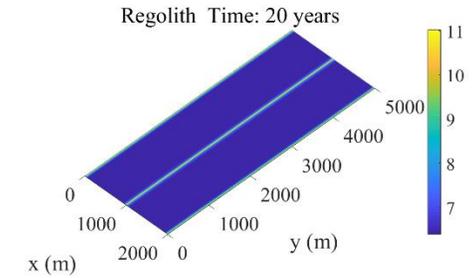
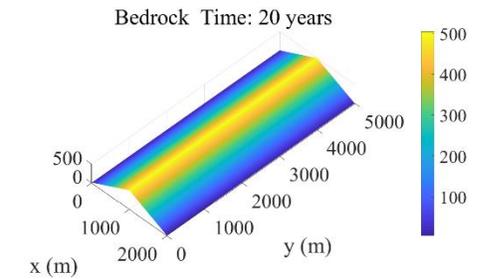
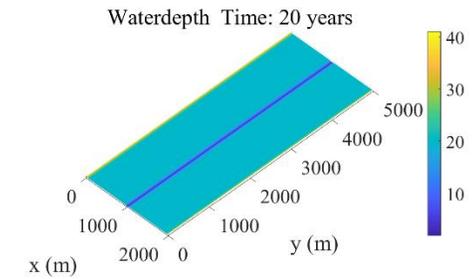
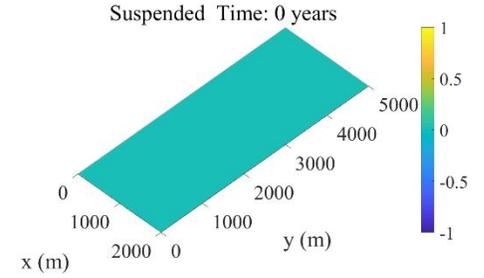
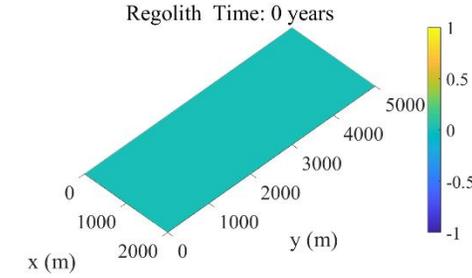
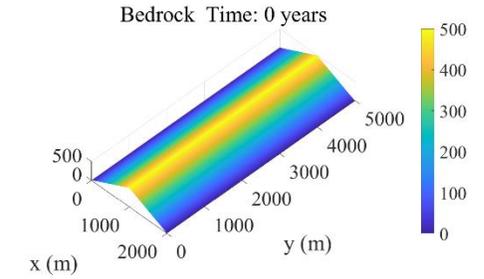
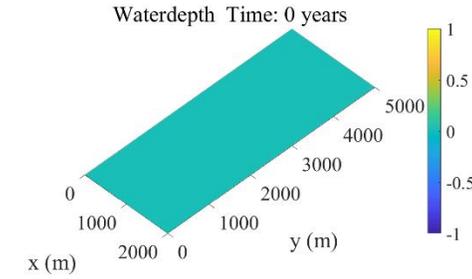
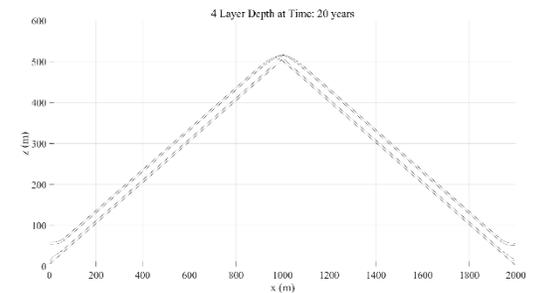
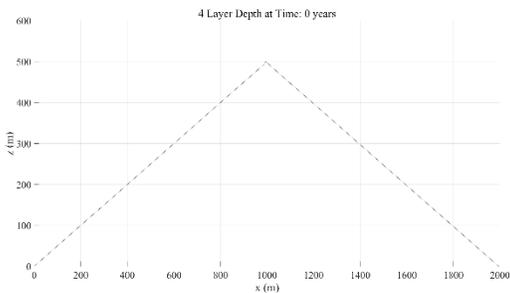
Remote Name	Size	Type	Modified	Attributes
h1.nc	4,008,224	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h10.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h11.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h12.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h13.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h14.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h15.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h16.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h17.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h18.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--
h19.nc	4,008,228	NC 文件	2021/11/28 10:3...	-rw-rw-r--

Remote Name	Size	Type	Modified	Attributes
ncdraw_profile.m	1,484	M 文件	2021/09/08 13:4...	-rw-rw-r--
ncdraw_toposub.m	2,522	M 文件	2021/09/08 13:4...	-rw-rw-r--

5-06 地表过程耦合子系统-结果诊断分析与应用案例

```

parameter.dat x
1 !//IA      JA
2 200,      500
3 !//LX     LY
4 2000,    5000
5 !//westbc eastbc      southbc  northbc
6 2,        2,        2,        2
7 !//TSTART TTOT      TSAVE     TAMAX
8 0.D0,    20,      2.D0,    3.D0
9 !//wtrain wtalph   wtbeta
10 1.D0,    0.5,    0.5
11 !//bkepsi bkm      bkn      bkrou0
12 1.D0,    0.5,    1.D0,    1.D0
13 !//bkrou1 bkwr     bkupli
14 1.D0,    1.D0,    1.D0
15 !//rgeta  rgc      rgs
16 1.D0,    1.D0,    1.D0
17
    
```



全球海潮-风暴潮-海啸传播子系统



01

子系统介绍

02

模式原理

03

程序代码结构

04

数据制备

05

新建case、编译、运行

06

结果诊断分析与应用案例



6-01 全球海啸-海潮-风暴潮子系统-子系统介绍

海啸远洋传播模块主要功能是模拟海啸在远洋长距离的区域的传播过程，以及在远洋区域海啸对于船舶的灾害性影响。模型考虑越洋海啸的大空间尺度，科氏力的恢复力作用将不可忽略，而非线性项则相对不重要，海啸波受到的底部摩擦力很小，故海啸波可以在大洋中传播数千米而能量衰减很小，最终越洋海啸模式采用包含频散项在内的Boussinesq方程。海啸的地震源模型假设海面的水位变化与海底变形是相同的，因为地震会发生在几秒钟内，而震源之上的水体在这么短时间内几乎保持不变，作为输入条件之一。利用连续方程和纬度与经度方向运动方程联立进行数值模拟，输出自由表面高度和沿经纬度方向的速度。

6-02 全球海啸-海潮-风暴潮子系统-模式原理

- 球面坐标系下越洋地震海啸的控制方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (N \cos \varphi) \right] = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} - fN - \frac{1}{R^2 \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left\{ \frac{H^3}{3 \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\cos \varphi}{h} \frac{\partial N}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{h} \frac{\partial M}{\partial t} \right) \right] \right\} = 0 \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fM - \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{H^3}{3 \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\cos \varphi}{h} \frac{\partial N}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{h} \frac{\partial M}{\partial t} \right) \right] \right\} = 0 \end{cases}$$

其中， η 为自由表面位移（波面相对静止水面的偏移值）， h 为海洋深度（静水面到大洋底部距离）， $H = \eta + h$ 为总水深（自由表面到海底距离）； φ 为纬度， λ 为经度， R 为地球平均半径， $R=6371.004$ km； f 为科氏力系数， $f = 2\omega \sin \varphi$ ， ω 是地球自传角速度， g 为重力加速度； M 为沿纬度单位宽度的通量， N 为沿经度单位宽度的通量，满足定义

$$M = H\bar{u}, \quad N = H\bar{v}$$

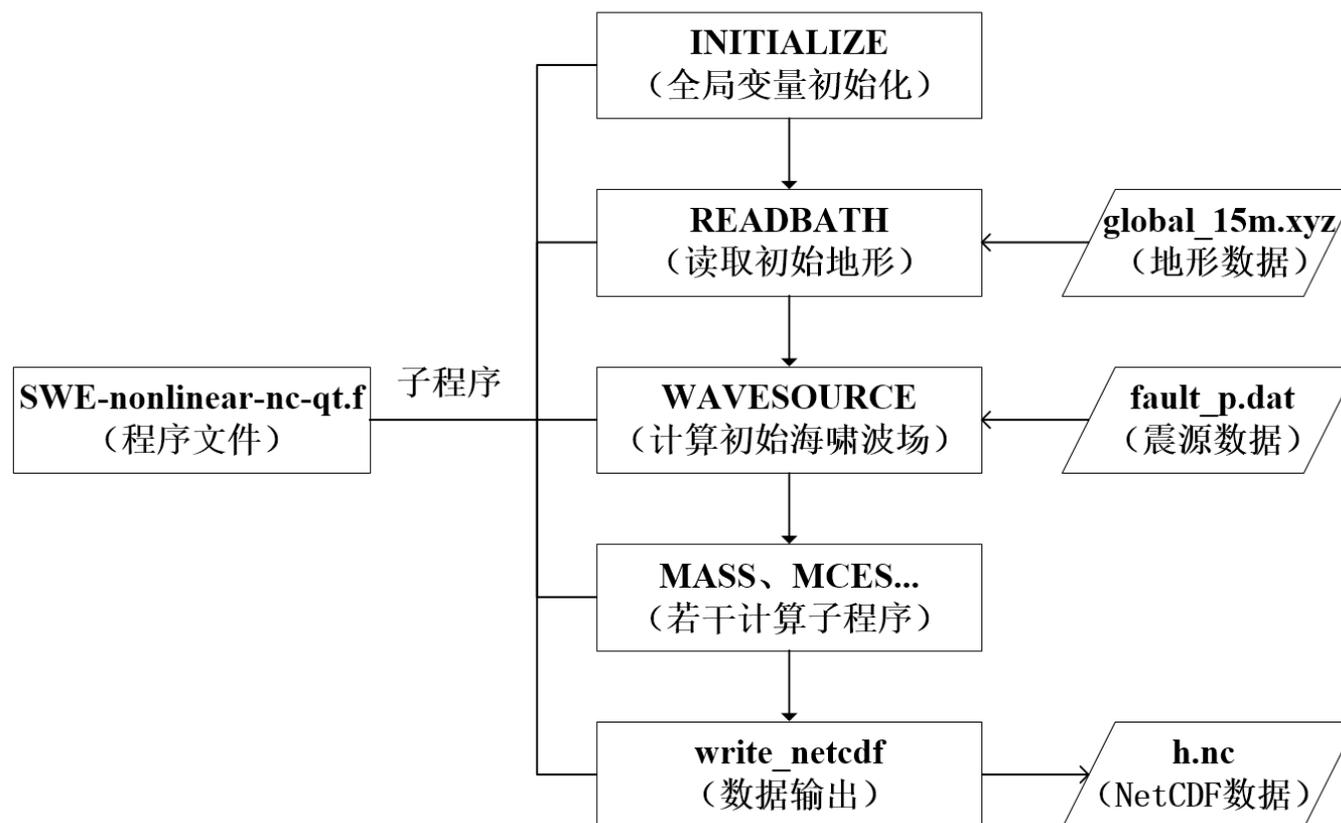
记沿纬度和沿经度的水平球面速度分别为 u, v ，则沿纬度和沿经度的径向平均速度 \bar{u}, \bar{v} 定义如下

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} u \, dr, \quad \bar{v} = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} v \, dr$$

6-03 全球海啸-海潮-风暴潮子系统-程序代码结构

SWE-nonlinear-nc-qt.f文件包含程序编写中的所有主程序和子程序部分，根据调用顺序进行运行。主程序首先声明各个变量并初始化，读入参数后进行计算，最后输出数据。

- 组分间的流程图如下图所示：



6-04 全球海啸-海潮-风暴潮子系统-数据制备

对全球尺度下的海啸模型进行模拟，
在Global文件夹下，共有三个文件夹，如图所示。

```
[hzhang01@login01 Global]$ ls  
compute include src  
[hzhang01@login01 Global]$
```

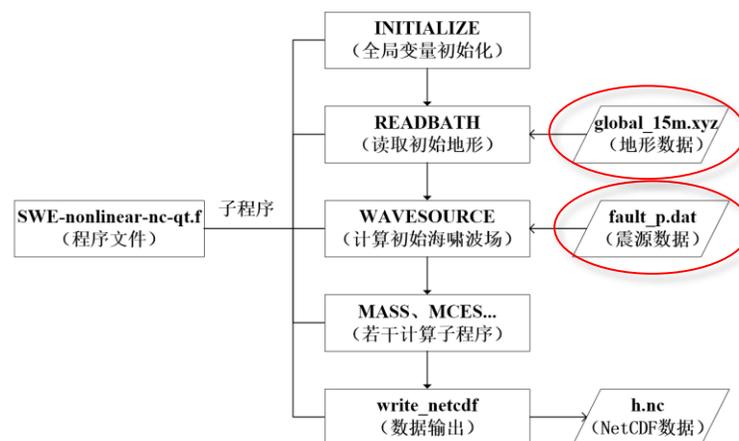
Global/src文件夹中为主体计算程序源代码。

Global/compute文件夹中为运行程序文件
和相应程序的计算结果。

Global/include文件夹为计算所需文件（无需操作）。

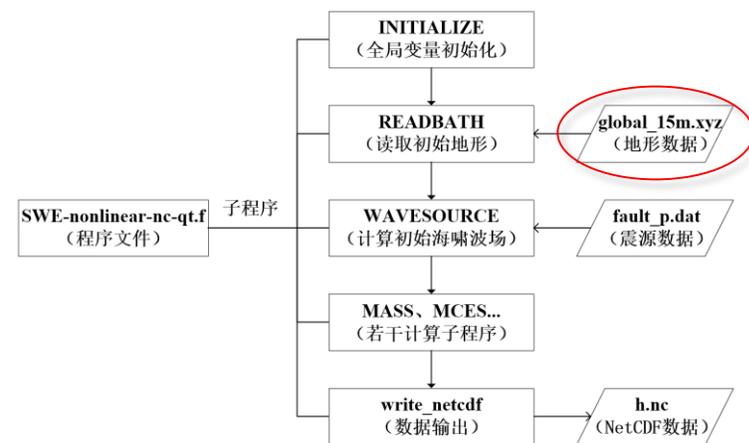
在对计算程序进行编译之前，需要对相关数据进行制备。进入到 /src 目录下，数据文件包括 global_15m.xyz、fault_p.dat、parameter.dat。

修改parameter.dat和fault_p.dat文件中涉及到的相关参数，即可进行下一步的程序编译和运行。



6-04 全球海啸-海潮-风暴潮子系统-数据制备

我们给定全球地形数据文件 (global_15m.xyz) , 网格步长为 0.25° , 地形数据为 .xyz 的文件格式, 经度: $0.125\sim 359.875$, 纬度: $-89.875\sim 89.875$ 。如下图所示。



global_15m.xyz	x		
1	0.125	89.875	-4170
2	0.375	89.875	-4170
3	0.625	89.875	-4170.5
4	0.875	89.875	-4170.5
5	1.125	89.875	-4170.5
6	1.375	89.875	-4171
7	1.625	89.875	-4171
8	1.875	89.875	-4171
9	2.125	89.875	-4171
10	2.375	89.875	-4171.5
11	2.625	89.875	-4171.5
12	2.875	89.875	-4172
13	3.125	89.875	-4172
14	3.375	89.875	-4172
15	3.625	89.875	-4172.5
16	3.875	89.875	-4172.5
17	4.125	89.875	-4172.5
18	4.375	89.875	-4172.5

根据所提供的地形数据, 我们需要修改网格参数文件 (parameter.dat) , 注意, 因为全球模型经度的闭合性, 我们需要在经度方向节点总数的基础上+1。还可设置计算时间步长和计算总时长等。

```
parameter.dat
26  !//IA,      JA
27  1441      720
28  !//Dex Dey(degree)
29  0.25
30  !//log_west      lat_south(degree)
31  0.125      -89.875
32  !//Radius(meters)      Rho(kg/m^3)      Omega(7.292
33  6378000.0      1028.0      0.00007292115
34  !//TA (seconds)
35  1.0
36  !//KS      KE      KD      KI step hour minute minute
37  1      24.0      5.0      5.0
```

6-04 全球海啸-海潮-风暴潮子系统-数据制备

我们给定2015年智利海啸地震断层相关系数和合适的网格参数，进行程序的编译运行，检验程序模拟全球海啸的功能性。

地震断层的主要设置的参数值如右表所示：

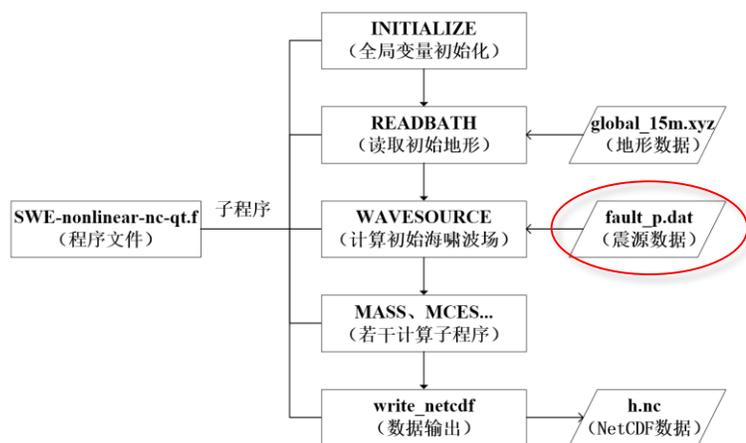


表 1 2015 年智利地震海啸有限断层模型参数

Tab.1 Finite fault solutions of Chile earthquake source

参数	符号	参数值
断层单元长度	D_x	20.0 km
断层单元宽度	D_y	14.0 km
断层单元长度个数	n_x	32
断层单元宽度个数	n_y	12
断层长度	L	640 km
断层宽度	W	168 km
倾角	δ	19°
滑动角	λ	90°
走向角	φ	4°
最大滑移量	Slip	8.04 m
深度	d	25 km
震源位置	(x_0, y_0)	(31.6°S, 71.7°W)

```

fault_p.dat
Tsunami #1  !*** NAME OF THE REGION OR EXPERIMENT-Chili-2015 : (71.654
1142    228    !*** READ(10,*) I0, J0    ORIGIN OF THE FAULT PLANE (
8.0      !*** READ(10,*) D      DISLOCATION/SLIP MAGNITUDE (
640000.0  168000.0  !*** READ(10,*) L, W    FAULT LENGTH AND
19.0     !*** READ(10,*) TH    STRIKE (degrees)
4.0      !*** READ(10,*) DL    DIP ANGLE (degrees)
90.0     !*** READ(10,*) RD    RAKE ANGLE (degrees)
25000.0  !*** READ(10,*) HH    DEPTH (meters)
    
```

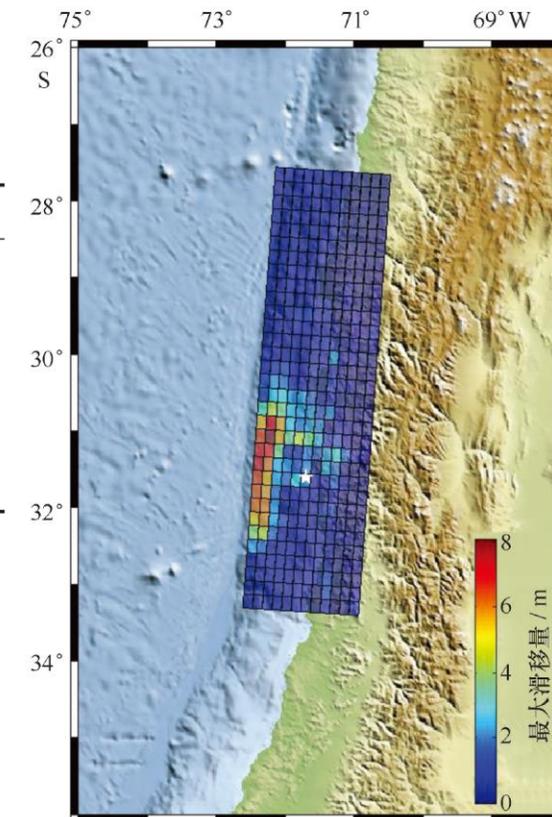


图 1 USGS 有限断层同震滑移量分布
Fig.1 Slip distributions obtained using the inversions of the teleseismic by USGS

(闪迪, 王培涛等. 2017)

6-05 全球海啸-海潮-风暴潮子系统-新建case、编译、运行

提供所需数据文件并设置好输入文件后，进入Global/src使用make clean命令清除上一次遗留可执行文件内容，使用make命令提交作业编译程序，运行过程如下所示：

```
[hzhang01@login01 src]$ make clean
/bin/rm -f *.o
/bin/rm -f *.exe
[hzhang01@login01 src]$ make
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c SWE-nonlinear-nc-qt.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c initfile.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c openfile.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c closefile.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c writebath_nc.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c writewave_nc.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c write_netcdf.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c writemaxheight_nc.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c writemaxvelocity_nc.f
gfortran -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include -c handle_err.f
gfortran -mcmmodel=large -o SWE-nonlinear-nc-qt.exe -O2 -I/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/include -I../include
SWE-nonlinear-nc-qt.o initfile.o openfile.o closefile.o writebath_nc.o writewave_nc.o write_netcdf.o writemaxheight_nc.o wri
temaxvelocity_nc.o handle_err.o -L/public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/lib -lnetcdf
/usr/bin/ld: warning: libgfortran.so.4, needed by /public/home/hzhang01/opt/netcdf-fortran-4.5.3/lib/libnetcdf.so, may confl
ict with libgfortran.so.3
cp -f SWE-nonlinear-nc-qt.exe ../compute
cp -f *.dat ../compute
[hzhang01@login01 src]$
```


6-06 全球海啸-海潮-风暴潮子系统-结果诊断分析与应用案例

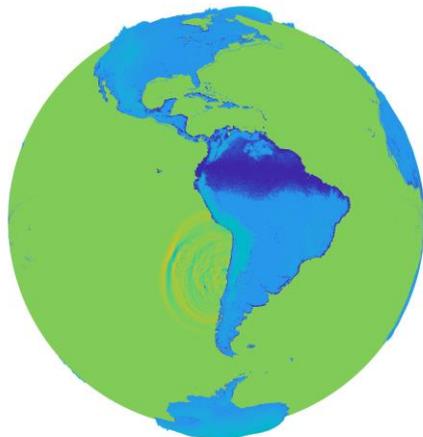
使用上述案例数据，将运行结果进行可视化。

使用matlab程序可以简单地对输出结果进行可视化，可视化结果示意图如下所示：

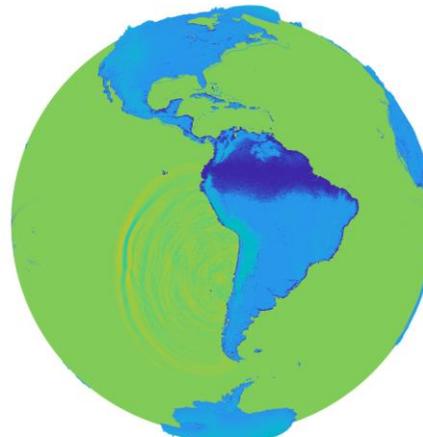
whole region at time= 5 minutes



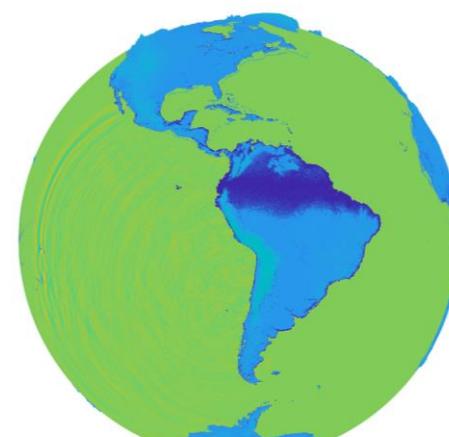
whole region at time= 150 minutes



whole region at time= 300 minutes



whole region at time= 670 minutes



谢 谢