



地球系统数值模拟装置

不确定性分析子系统

陆面模式分析优化模块

使用培训

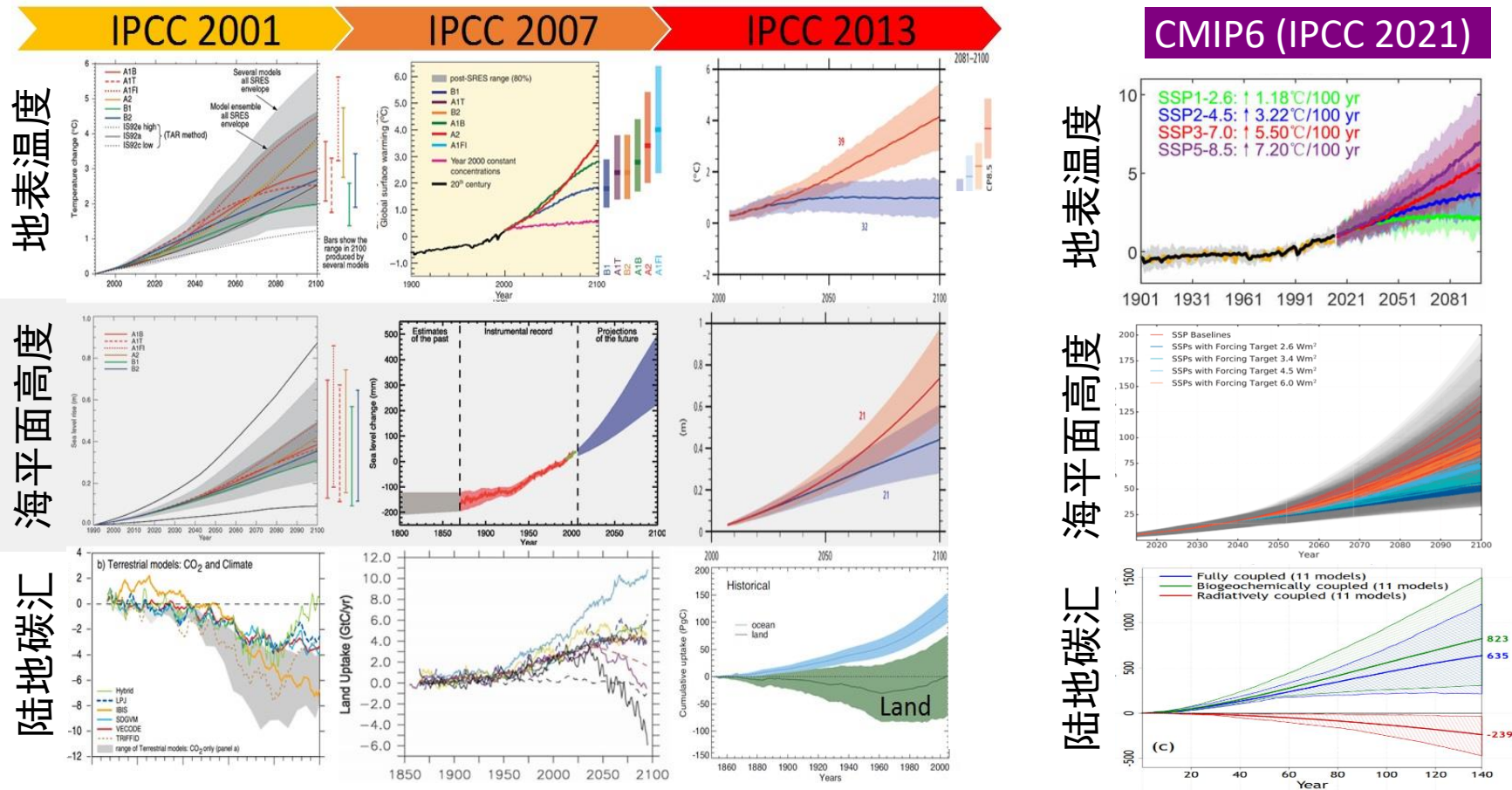
2022年5月26日

课程内容

1. 陆面模式不确定性背景介绍
 - 陆面模式不确定性的研究背景
 - 陆面模式分析优化模块总体情况
2. 陆面模式分析优化系列模块的环境配置
 - 系统环境部署与初始环境配置
3. 陆面模式分析优化系列模块的使用
 - 陆面碳循环的快速启动模块
 - 陆面模式溯源性诊断模块
 - 陆面模式关键过程的基准性分析模块
 - 陆面模式碳循环的数据融合模块
 - 陆面模式生物地球化学循环多源分析与参数优选模块
 - 基本功能演示
4. 交流讨论

1. 陆面模式不确定性背景介绍

- 地球系统模式数量急剧增加，但是模拟结果的不确定性未见减小
- 迫切需要**评估模式的不确定性**，改进模式的预测和预估能力。



1. 陆面模式不确定性背景介绍

- 近年来，我国地球系统模式的数量明显趋势十分明显

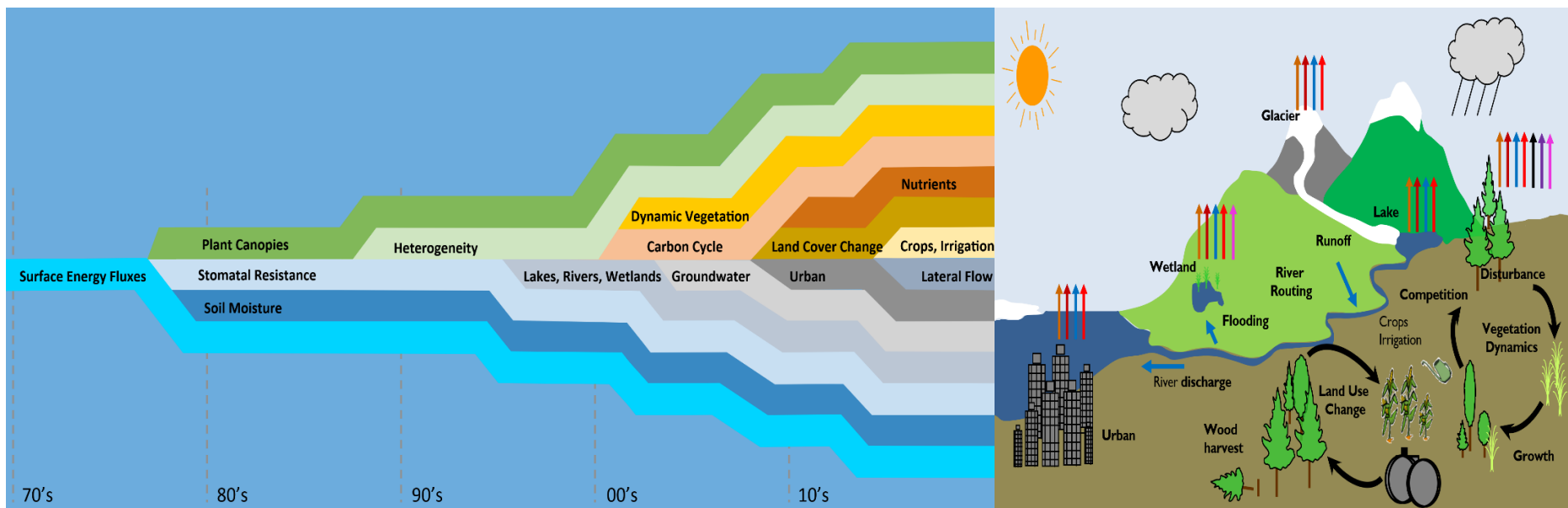
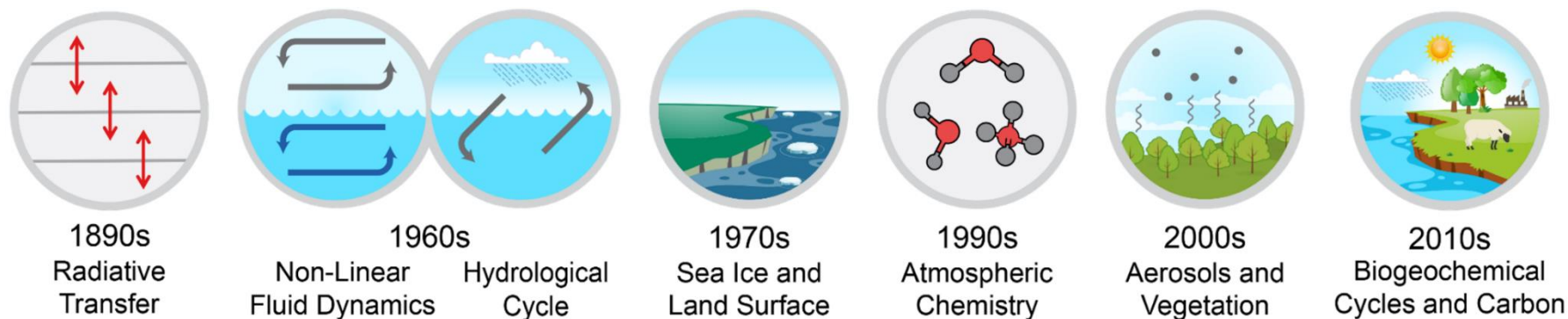
模式名称	研发单位	大气模式分量
BCC-ESM1.0	国家气候中心	BCC-AGCM3-Chem
BCC-CSM2-MR	国家气候中心	BCC-AGCM3-MR
BCC-CSM2-HR	国家气候中心	BCC-AGCM3-HR
BNU-ESM-1-1	北京师范大学	CAM3.5
CAMS-CSM1-0	中国气象科学研究院	ECHAM5
CAS-ESM2-0	中科院大气所ICCES	IAP AGCM5
CAS FGOALS-f3	中科院大气所LASG	FAMIL2.2
CAS FGOALS-g3	中科院大气所LASG	GAMIL3
CIESM	清华大学/无锡超算	Modified CAM5
FIO-ESM v2.0	自然资源部第一海洋研究所	CAM5
NESM3	南京信息工程大学	ECHAM6.3
TaiESM	台湾中研院	CAM5.3



- CMIP6总体情况
全球33家；中国有9家机构12个模式
- 新增的中国模式团队(5):
 - ✓ 中国科学院地球系统模式团队
 - ✓ 中国气象科学研究院
 - ✓ 南京信息工程大学
 - ✓ 清华大学/无锡超算
 - ✓ 中国台湾“中研院”

1.1 陆面模式不确定性的研究背景

- 陆面模式是地球系统模式的重要组成部分
- 陆面模式正在成为生命科学与地球系统科学交叉研究的重要工具



1.1 陆面模式不确定性的研究背景

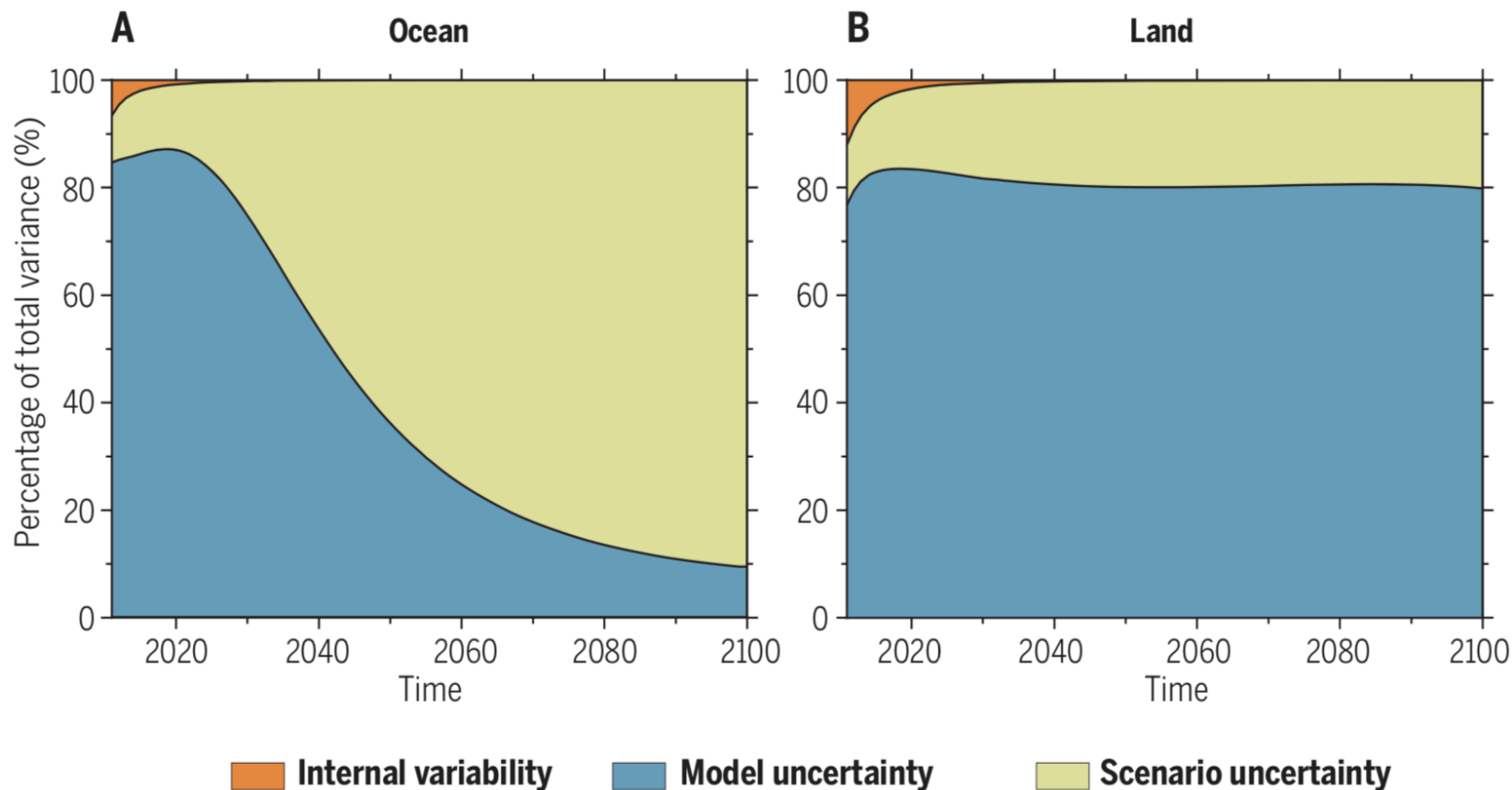
陆面模式与欧美国家差距呈现增大趋势

- 在陆地碳循环方面，只有BCC模式同时提交CMIP5和CMIP6
- 我国陆面模式的当前发展重点: **完善氮循环过程、动态植被等模式结构不足**

	模型开发机构 (国家)	地球系统模型	陆面模型	是否含氮循环	是否含磷循环	是否含动态植被	碳库数量			参考文献
							植物	凋落物	土壤	
CMIP5 (IPCC AR5, 2013)	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China	BCC-CSM1-1m	BCC_AVIM1.0	No	No	No	3	2	6	Wu et al., 2013
	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCma), Victoria BC, Canada	CanESM2	CTEM	No	No	No	3	1	1	Arora et al., 2009
	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	CCSM4	CLM4.0	Yes	No	No	18	4	3	Gent et al., 2011 Lindsay et al., 2014
	Met Office Hadley Centre, UK	HadGEM2-ES	MOSES/TRIFFID	No	No	No	3	—	4	Collins et al., 2011
	IPSL Climate Modeling Centre, France	IPSL-CM5A-MR	ORCHIDEE	No	No	No	8	4	3	Dufresne et al., 2013 Krinner et al., 2005
	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan	MIROC-ESM	SEIB-DGVM	No	No	No	4	1	2	Watanabe et al., 2011 Sato et al., 2007
	Max-Planck-Institute for Meteorology, Germany	MPI-ESM-MR	JSBACH	No	No	No	3	4	1	Giorgetta et al., 2013 Schneek et al., 2013
	Norwegian Climate Centre, Norway	NorESM1-M	CLM4.0	Yes	No	No	18	4	3	Tjiputra et al., 2012
	Beijing Normal University (BNU), China	BNU-ESM	CoLM	No	No	No	4	1	1	Ji et al., 2014 Sitch et al., 2003
	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, US	GFDL-ESM2G	LM3.0	No	No	No	5	—	2	Dunne et al., 2013
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Japan	MRI-ESM1	HAL	No	No	No	3	1	1	Yukimoto et al., 2011	
CMIP6 (IPCC AR6, 2020)	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China	BCC-CSM2-MR	BCC-AVIM2.0	No	No	No	3	2	6	Wu et al., 2019
	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCma), Victoria BC, Canada	CanESM5	CLASS-CTEM	No	No	No	3	1	1	Swart et al., 2019
	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	CESM2	CLM5.0	Yes	No	No	18	80	60	Lawrence et al., 2019
	Met Office Hadley Centre, UK	UKESM1-0-LL	JULES-CN; TRIFFID	Yes	No	Yes	3	—	4	Best et al., 2011 Clark et al., 2011
	IPSL Climate Modeling Centre, France	IPSL-CM6A-LR	ORCHIDEE	Yes	No	No	8	4	3	Vuichard et al., 2019
	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan	MIROC-ES2L	VISIT-e	Yes	No	No	3	1	1	Hajima et al., 2019 Ito and Oikawa, 2002
	Max-Planck-Institute for Meteorology, Germany	MPI-ESM1-2-LR	JSBACH	Yes	No	No	3	2	1	Goll et al., 2012 Mauritsen et al., 2019
	Norwegian Climate Centre, Norway	NorESM2-LM	CLM5.0	Yes	No	No	18	80	60	Seland et al., 2020
	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia	ACCESS-ESM1-5	CABLE	Yes	No	No	3	3	3	Law et al., 2017
	National Center for Meteorological Research, Météo-France and CNRS laboratory, Toulouse, France	CNRM-ESM2-1	ISBA	No	No	No	6	4	3	Séférian et al., 2019
EC-Earth Consortium, Europe	EC-Earth3-Veg	LPJ-GUESS	Yes	No	Yes	3	8	3	Yukimoto et al., 2011	

1.1 陆面模式不确定性的研究背景

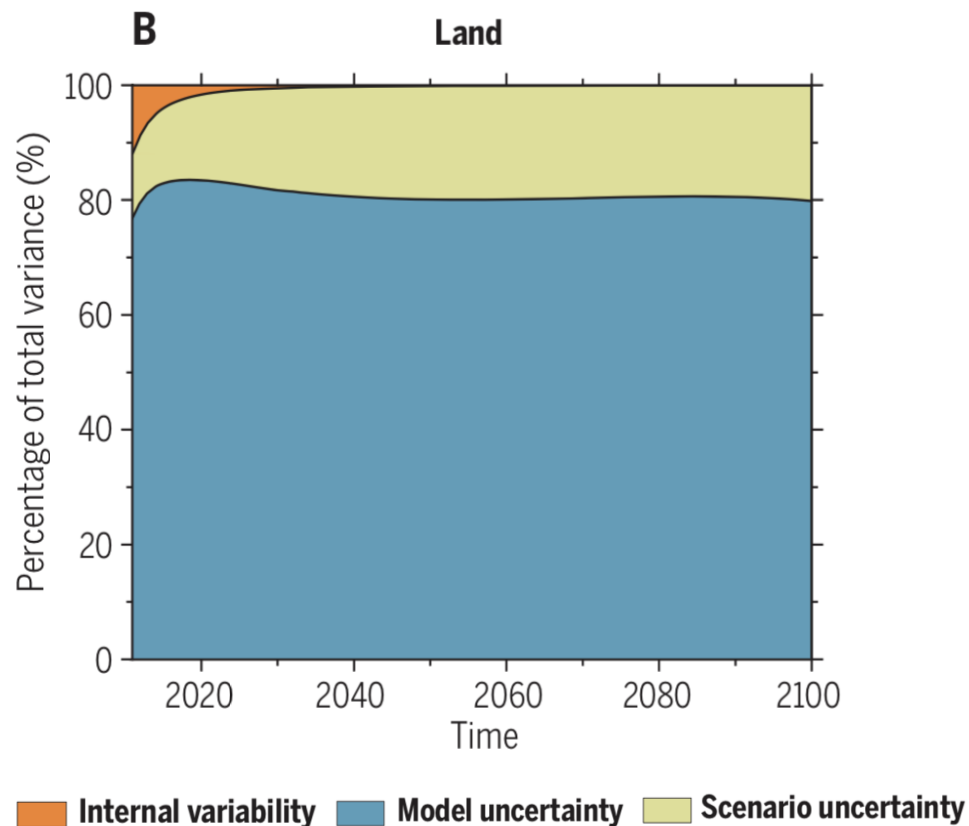
- 陆面模式的结构是造成预测不确定性的主要原因
- 由于结构过于复杂，陆面模式的不确定性分析存在许多难点



1.1 陆面模式不确定性的研究背景

陆地碳循环的不确定性难以分析的原因比较复杂：

1. 陆面模式碳循环的初始态获取 (spin-up) 需要消耗大量计算资源
2. 模式结果的评估难以溯源到关键过程
3. 模式提交结果之前缺乏基于观测资料的基准性分析
4. 陆面碳循环关键参数的设定未经过数据融合
5. 不同模式之间在碳氮循环的不同过程的模拟性能不同



1.2 陆面模式分析优化模块总体情况

陆地碳循环的不确定性难以分析的原因比较复杂：

1. 陆面模式碳循环的初始态获取 (spin-up) 需要消耗大量计算资源
2. 模式结果的评估难以溯源到关键过程
3. 模式提交结果之前缺乏基于观测资料的基准性分析
4. 陆面碳循环关键参数的设定未经过数据融合
5. 不同模式之间在碳氮循环的不同过程的模拟性能不同

1:陆面碳循环的快速启动

2:陆面模式溯源性诊断

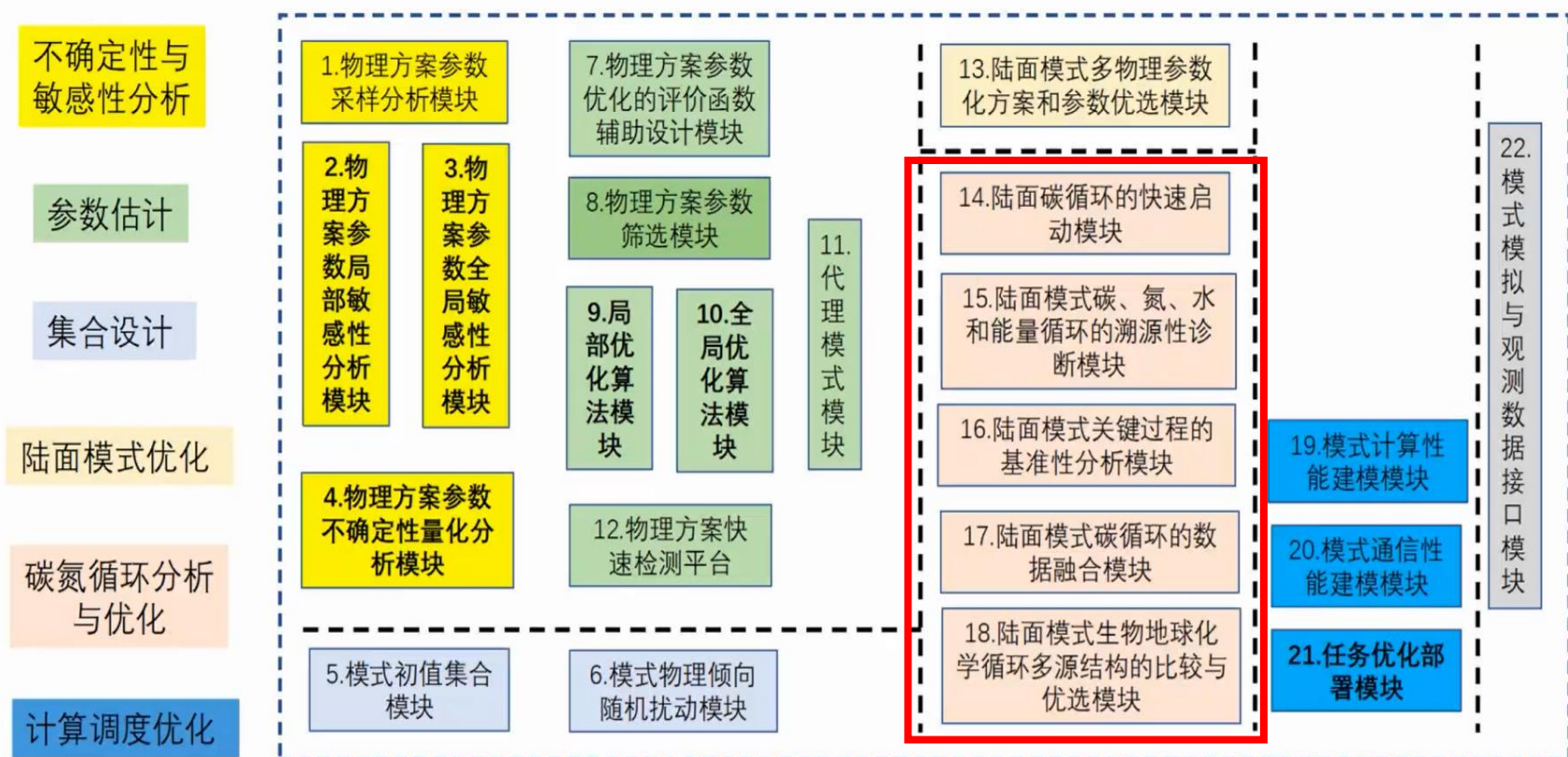
3:陆面模式关键过程的基准性分析

4:陆面模式碳循环的数据融合

5:碳氮循环多源分析与参数优选

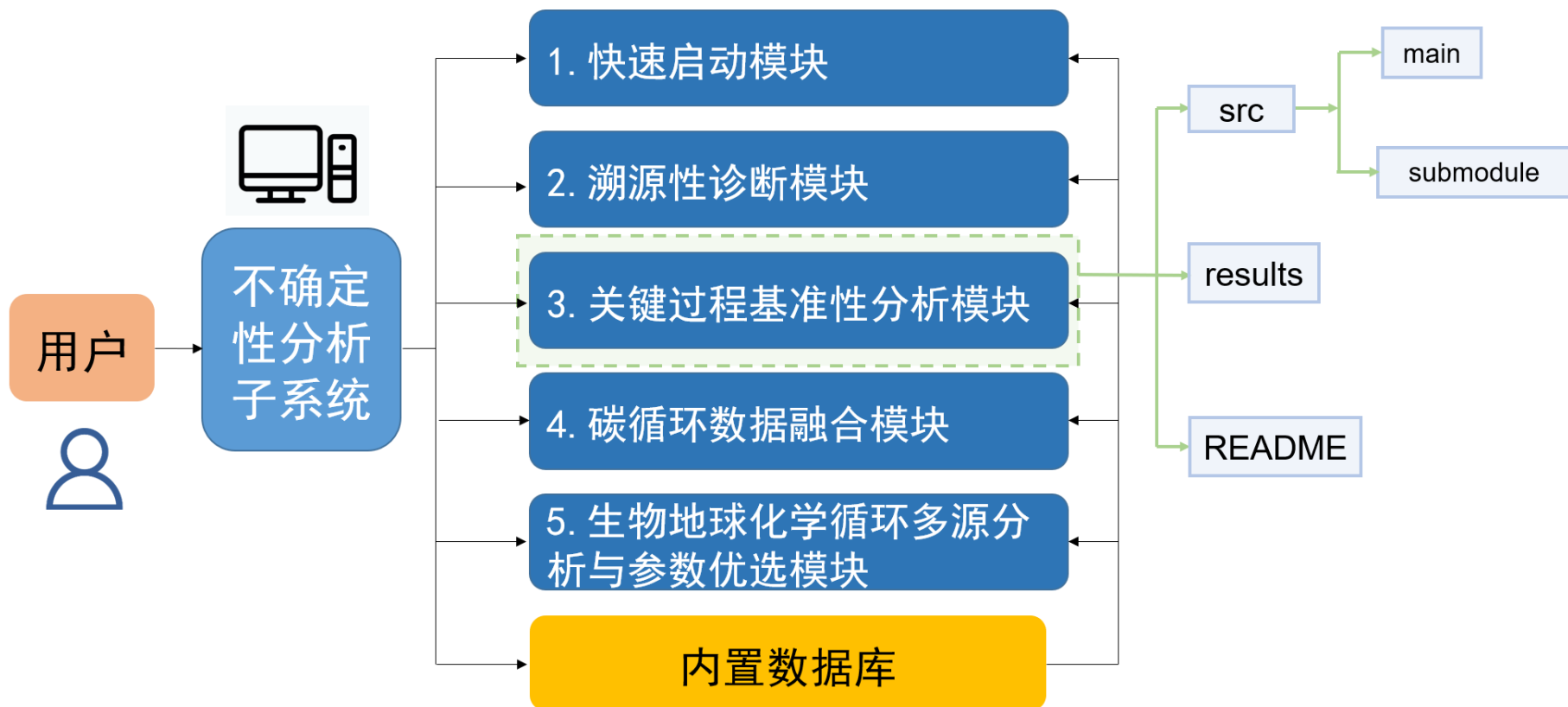
1.2 陆面模式分析优化模块总体情况

- 陆面模式分析优化模块包含五个子模块
- 用户通过调用相应子模块，实现陆面模式关键过程的快速评估与优化



1.2 陆面模式分析优化模块总体情况

- 陆面模式分析优化模块包含五个子模块
- 用户通过调用相应子模块，实现陆面模式关键过程的快速评估与优化



2. 陆面模式分析优化系列模块的环境配置

- 操作系统：Linux
- 底层软件：netcdf, cdo, Python等
- 语言版本：建议Python3.7及以上
- 运行所需的Python模块及版本

库名	模块描述	版本
numpy	Python基础数组运算	1.19.1
netCDF4	为netCDF4提供面向对象的Python接口	1.5.4
scipy	Python科学计算库	1.5.2
matplotlib	Python画图工具包	3.2.1
basemap	基于matplotlib在地图投影上绘制数据	1.2.2
pandas	提供用于数据分析, 时间序列和静态处理的数据结构	1.1.1
seaborn	统计数据可视化	0.10.1

2. 系统环境部署与初始环境配置

- 确认系统中安装anaconda3 (Python 3.7及以上版本)

```
(base) [wujx01@login03 ~]$ ls
anaconda3 Anaconda3-2019.10-Linux-x86_64.sh  cpuinfo  intel  perl5  software  work
```

- 将环境包(ecnu_env.tar.gz)拷贝至 ~/anaconda3/envs/路径下并解压缩

```
(base) [wujx01@login03 ~]$ cd /public/home/wujx01/work/EARthLab_UQ
(base) [wujx01@login03 EARthLab_UQ]$ cp ecnu_env.tar.gz ~/anaconda3/envs/
(base) [wujx01@login03 EARthLab_UQ]$ cd ~/anaconda3/envs/
(base) [wujx01@login03 envs]$ tar -zxvf ecnu_env.tar.gz ecnu_env
```

- 执行conda activate ecnu_env 激活所需环境

```
(base) [wujx01@login03 ~]$ cd work/EARthLab_UQ/
(base) [wujx01@login03 EARthLab_UQ]$ pwd
/public/home/wujx01/work/EARthLab_UQ
(base) [wujx01@login03 EARthLab_UQ]$ conda activate ecnu_env
(ecnu_env) [wujx01@login03 EARthLab_UQ]$
```


2. 系统环境部署与初始环境配置

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 EARthLab_UQ]$ ls
autoEnv                               ParameterEvaluation_FunLayer1
caihy_dazhuangzhi.txt                 ParameterEvaluation_FunLayer2
capt_file                             ParameterEvaluation_FunLayer.caihy
casesm_cases                          ParameterEvaluation_FunLayer.integtest
DataBase                              ParameterEvaluation_FunLayer.pureVersion
diagnostics_scripts                   ParameterEvaluation_FunLayer.tar
ecnu_env.tar.gz                       ParameterEvaluation_FunLayer-target1
Ensemble_FunLayer                     ParameterEvaluation_FunLayer-target2
Ensemble_FunLayer.tar                 ParameterEvaluation_FunLayer-target3
land_carbon_diagnose                   ParameterEvaluation_FunLayer-target4
land_carbon_diagnose.tar.gz           ParameterEvaluation_FunLayer.wujx
log                                     ProcessBar
logs                                   README.md
lsm                                    scam_cases
model_scripts                          TaskOptimize_FunLayer
ParameterAnalysis_FunLayer             TaskOptimize.tar.gz
ParameterEvaluation_FunLayer           uq-env.tar.gz
(ecnu_env) [wujx01@login03 EARthLab_UQ]$ cd land_carbon_diagnose/
(ecnu_env) [wujx01@login03 land_carbon_diagnose]$ ls
Benchmarking_Analysis                  Input_data_for_test                python_package                      Semi-Analytical_Spinup
Data_Assimilation                      Multi-Module_Analysis              README.md                            Traceability_Analysis
```

1. 陆面碳循环快速启动模块

2. 陆面模式碳、氮、水溯源性分析模块

测试数据集（观测数据集和模型输出）

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Input_data_for_test]$ ls
Benchmark_input  Data_Assimilation_Input  soildepth.mat
clm45_output_1980  MStr_BGC_input          Traceability_Analysis_input
```

5. 陆面模式生物地球化学循环多源结构比较与优选模块

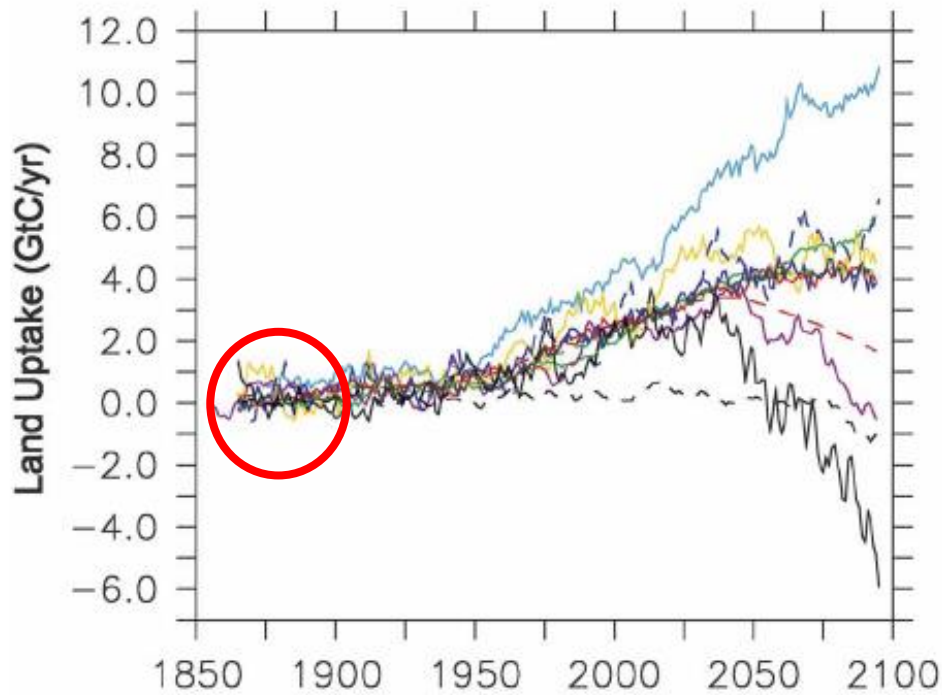
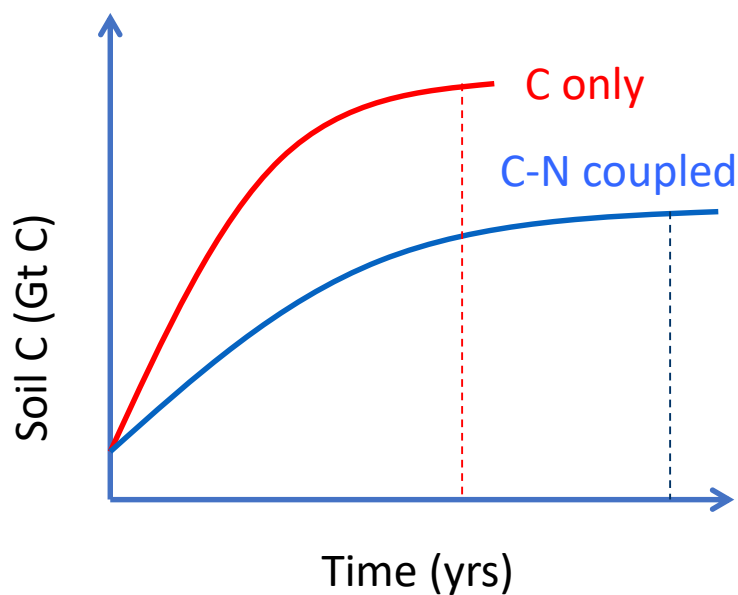
4. 陆面模式碳循环的数据融合模块

3. 陆面模式关键过程基准性分析模块

3.1 陆面碳循环的快速启动模块

陆面模式启动前需要先使碳库达到平衡态(spin-up)

土壤碳库平衡一般需要数万年，但是计算机每天只能算几十或几百年



3.1 陆面碳循环的快速启动模块

SASU (Semi-Analytical Spin-Up)

1. 陆地碳循环模型矩阵化

$$\frac{dX(t)}{dt} = BU(t) - \xi(t)AKX(t)$$

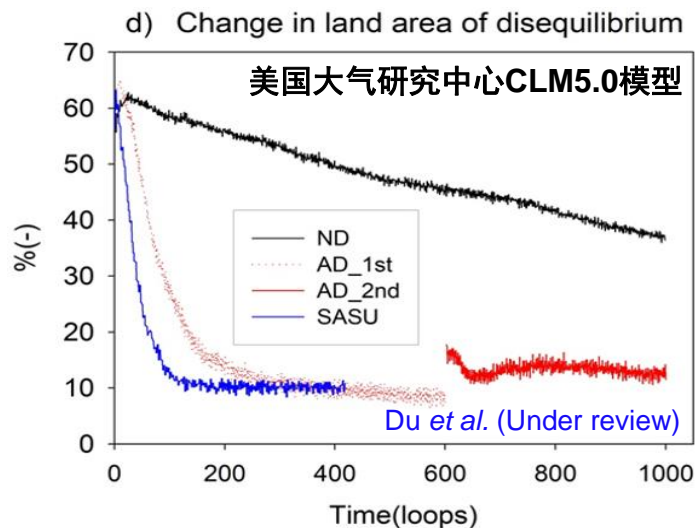
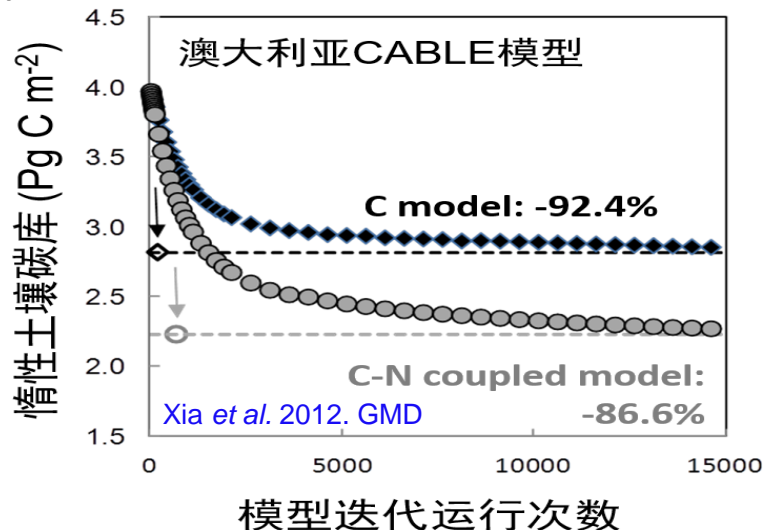
2. 初始spin-up计算平衡碳输入

$$U_{SS}, \bar{\xi}, \bar{A}, \bar{B}$$

3. 矩阵方程求解近平衡态碳库

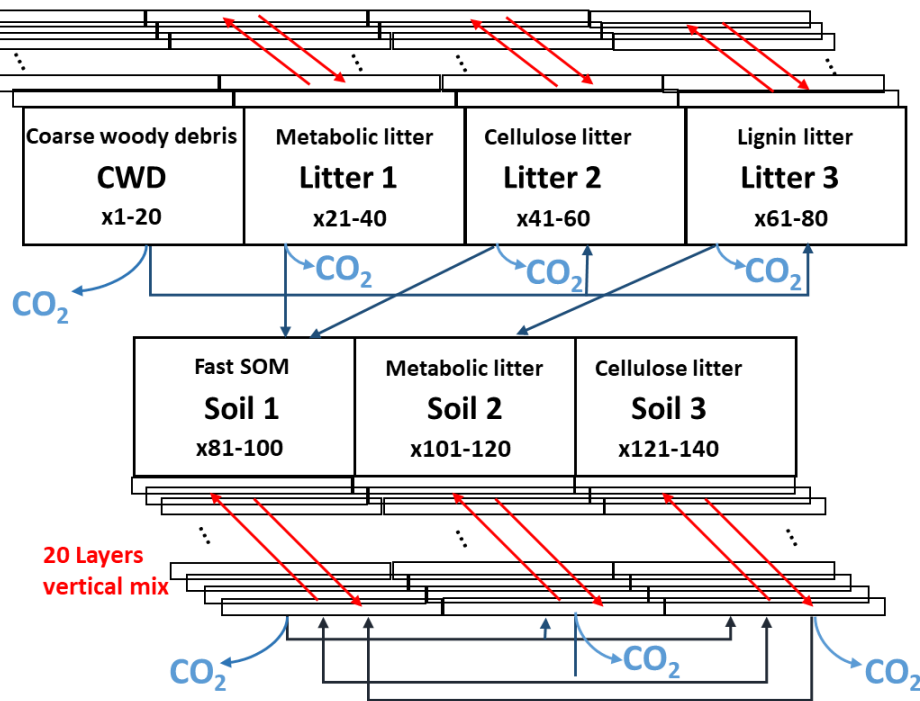
$$X_{SS} = -(\bar{\xi}\bar{A}K)^{-1}\bar{B}U_{SS}$$

4. 最终spin-up达到最终平衡态



3.1 陆面碳循环的快速启动模块

以CLM4中凋落物和土壤碳库为例根据矩阵方程求解平衡态碳库大小，用以简化原生模型中矩阵化的过程，进而实现加速模型达到平衡态的目的。



土壤碳氮平衡方程的矩阵化表达

$$\frac{dC_{soil}}{dt} = I_{Csoil} + (A_{hc}\xi(t)K_h + V(t) + K_f(t))C_{soil}(t)$$

$$\frac{dN_{soil}}{dt} = I_{Nsoil} + (A_{hn}\xi(t)K_h + V(t) + K_f(t))N_{soil}(t)$$

Huang et al. GCB (2017)

模式需要提供：

- 环境因子
水分因子、温度因子、氮限制因子、氧限制因子
- 全球陆面格点的植被碳库到凋落物碳库的输入
- 凋落物与土壤模块的碳平衡方程

本模块输出：

- 全球陆面格点的平衡态凋落物与土壤碳库

3.1 陆面碳循环的快速启动模块—运行步骤

1. 进入模块所在目录

陆面碳循环快速启动模块

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 land_carbon_diagnose]$ cd Semi-Analytical_Spinup/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Semi-Analytical_Spinup]$ pwd  
/public/home/wujx01/work/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Semi-Analytical_Spinup  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Semi-Analytical_Spinup]$ ls  
README.md results Semi-Analytical_Module_Documentation.pdf src 源码
```

模块原理说明文档

Semi-Analytical Spinup用户操作手册

目录

1. 概要
2. 编译环境
3. 所需Python模块
4. 所需模型输出变量
5. 模块构成说明
6. 运行SASU模块
7. 输出结果说明
8. 后续操作步骤

1. 概要

陆面生态系统生物地球化学循环的模拟高度依赖于模型的初始值。因此利用模型进行分析之前需要设置所有状态变量的初始值。这种初始值通常根据观测数据或者假设系统处于稳态下的数值。而后者通常需要较长时期的模型模拟直到各个碳库大小在数百年尺度的气候驱动条件下没有显著的变化为止。

为加速模型转至平衡态，减少计算资源消耗提高计算效率，实现模型快速启动的要求，我们根据陆面碳循环过程矩阵化的特点，开发了陆面碳循环快速启动模块 (SASU, Semi-Analytical Spin-up)，以实现加速陆面生态系统碳循环模型转至平衡态的目的。

SASU模块主要包括自动读取并处理数据、离线模型矩阵化、自动计算半平衡态碳库结果、输出结果分析报告等四项功能。该手册以CLM4 (Community Land Model, Version 4) 模型为例，考虑陆地上植物碳库作为一个快过程，因此只考虑植物和土壤碳库为例演示该模块加速模型至平衡态的运行过程。该模块结构简单，功能合理，便于今后不同模型的扩展和功能升级。操作简便易懂。

《用户操作手册》对SASU模块的编译环境、输入文件、系统流程、输出文件组成和模块功能进行了详细的介绍，可作为模块操作的方法指南，加速模型转至平衡态的编译资料和流程。未来模块将会不定期维护升级，与本手册不一致之处，以模块更新说明为准。关于方法的详细描述，请参见：SASU module documentation

由于编写人员能力有限，手册中难免有不足之处，敬请广大专家和读者提出宝贵意见和建议！

2. 编译环境

操作环境：Linux

编译环境：Python3

陆面碳循环快速启动模块 (SASU) 主要由python3.7编译。因此在运行该模块之前，您需要在您的电脑中安装并配置python编译环境。

以下为在Unix & Linux 平台上安装python的简单步骤：

- 访问Python官网 (<https://www.python.org/>)，下载适用于您系统版本的源码
- 以 Python 3.7.2 版本为例：

```
tar -zxvf python-3.7.2.tgz  
cd python-3.7.2  
./configure  
make
```
- 检查Python3是否正常运行：

```
python3 --version
```

3. 所需Python模块

该模块是基于以下模块编译的，因此建议您至少在以下模块版本及其以上版本进行操作，以防止因模块版本问题出现其他不必要的问题。

模块	模块描述	版本
numpy	The fundamental package for array computing with Python	1.18.3
netCDF4	Provides an object-oriented python interface to the netCDF version 4 library	1.5.3
scipy	Scientific library for Python	1.4.1
matplotlib	python plotting package	3.2.1
basemap	Plot data on map projections with matplotlib	1.2.1

4. 所需模型输出变量

在应用SASU模块加速模型转至平衡态之前，您首先需要确认模型输出中有以下关键字段。以CLM4 (Community Land Model, Version4) 模型为例，我们需要模型输出以下变量：

- 环境变量因子，包括水分因子、温度因子、氮限制因子和氮限制因子；
- 植被碳库等植物碳库的输入。在CLM4中，植被由土地覆被变化导致的死根和活根根、火灾、树木死亡、作物产量的输入到植物木质体碳库；由土地覆被变化导致的烟根、火灾、烟根、树木死亡、谷物、作物产量、叶、茎、茎、茎的输入到放射性凋落物碳库、纤维碳库凋落物碳库和木质素残体碳库。

5. 模块构成说明

该模块主要包含主程序、子程序和参数模块、操作指南、说明手册。下面将对模块中每个子程序给出具体说明：

文件名	描述
src/Semi_Analytical_Main.py	The main program used to run SASU
src/Semi_Analytical_Submodule.py	This program contains all subroutines which support SASU main program
src/Semi_Analytical_Para.py	This program declare important global parameters
results/Semi-Analytical_Result_Report.md	This file generates the simulated results report automatically
results/conv_md2pdf.sh	Used to convert result report from markdown to pdf
README.md	This readme file describe how to use this module in your computer
Semi-Analytical_Module_Documentation.pdf	This document contains a detailed description of this module
results/output	It's a directory, which contains all the output results

6. 运行SASU模型

- 克隆远程源码文件到本地目录

```
git clone https://github.com/cy@lan/python_project.git <your_dir_name>
```
- 给目录文件添加执行权限

```
chmod -R uwx python_project
```

Note: 这里 python_project 可以根据需要设置自己的目录名

- 进入Semi-Analytical_Spinup模块目录

```
cd python_project/src/Semi-Analytical_Spinup
```

2. SASU 过程

利用SASU方法加速模型至平衡态的过程主要包括四个步骤：1) 陆面碳循环模型矩阵化；2) 初始的spin-up得到稳态下的平衡态 U_{ss} ，以及时间变量的平均值 \bar{U} 、 \bar{B} ；3) 矩阵方程的求解半平衡态碳库 X_{ss} ；4) 利用计算得到的 X_{ss} 运行最后的spin-up以满足稳态的标志。

2.1. 陆面碳循环模型的矩阵化

用SASU方法加速模型转至平衡态之前，首先需要将陆面碳循环模型矩阵化转成矩阵公式，即：

$$\frac{dX(t)}{dt} = \zeta AKX(t) + BU(t) \quad (1)$$

其中， $X(t)$ 为一个向量，表示模型在 t 时刻各个碳库大小； A 表示在不同碳库间的转移系数矩阵； K 为一个对角矩阵，其对角元素表示各个碳库的分解速率； ζ 表示环境因子对分解速率的影响，其中通常包括温度因子、水分因子等。 B 表示气候驱动因子到不同碳库的分配系数； $U(t)$ 表示 t 时刻通过气候作用型驱动输入。

2.2. 初始spin-up计算平衡态碳库

考虑到矩阵 A 、 B 、环境因子和生态系统碳输入 $U(t)$ 是时间变化量，因此矩阵方程 (1) 不能直接求解得到稳态下的碳库大小。由于输入是一个快过程，其稳态结果 U_{ss} 可以通过短时间的spin-up获得，大部分模型利用长时间阶段的驱动数据迭代模拟来进行spin-up。这为我们利用一段较短时间的驱动数据进行迭代模拟和矩阵计算环境变量 ζ 、转移系数 A 以及分配系数 B 的平均值提供了可能。

2.3. 矩阵方程求解半平衡态碳库

利用 U_{ss} 和 \bar{U} 、 \bar{B} 通过方程 (1) 等于0可以求解稳态时碳库大小为：

$$X_{ss} = -(\zeta AK)^{-1} \bar{B} U_{ss} \quad (2)$$

2.4. 再次spin-up达到平衡态结果

矩阵方程中假设陆面碳循环是一个线性系统，然后实际生物地球化学模型对一些碳库的模拟是非线性的过程，利用线性系统计算稳态下碳库大小不可避免会带来一些误差。因此，矩阵方程求解得到的平衡态下碳库大小需要通过最终的spin-up进行确认以满足其所有碳库转至平衡态下的平衡态。

3. SASU 离线模块：以CLM4为例

考虑到陆面碳库周转是一个快过程，因此我们假设模型已通过初步的spin-up得到了植被部分碳库的平衡。本模块中仍以凋落物和土壤碳库为求解矩阵方程求解半平衡态碳库大小，用以简化非线性模型中矩阵化的过程，进而实现快速模型达到平衡态的目的。

3.1 陆面碳循环的快速启动模块—运行步骤

2. 进入脚本所在目录

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Semi-Analytical_Spinup]$ cd src
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ ls
__pycache__  Semi_Analytical_Main.py  Semi_Analytical_Para.py  Semi_Analytical_Submodule.py
```

模块主程序

模块部分参数文件

```
# read input data and calculate multi-year averaged results
(env_scalar, C_in, C_in_Eachpool, b_matr_glob, lat, lon, FillValue) = Read_input_data(filepath, startyr, endyr)

# write multi-year averaged environmental scalars, allocation coefficients, carbon input to ncfile
da = np.zeros([13, nlat, nlon])
da[0:4, :, :] = env_scalar
da[4:8, :, :] = b_matr_glob
da[8, :, :] = C_in
da[9:13, :, :] = C_in_Eachpool

Var_Name_in = ['wscalar', 'itscalar', 'ioscalar', 'nscalar', 'b_cwd', 'b_litr1', 'b_litr2', 'b_litr3', 'Cinput_tot', \
              'C2cwd', 'C2litr1', 'C2litr2', 'C2litr3']

# is_write_para = input('Do you want to output averaged parameters which used to calculate SASU?(y/n)')
is_write_para = 'y'
if is_write_para == 'y':
    print('Now writing averaged parameters to nc files ...')
    f_input_var = f_out_path + '/Parameters_mean.nc'
    write_output(f_input_var, da, Var_Name_in, nlat, nlon, lat, lon, FillValue)
    write_output(f_input_var, da, Var_Name_in, nlat, nlon, lat, lon, FillValue)
    print('You cancelled the parameter output processes ...')
else:
    print('Input Error, please input \'Y\' or \'N\'!')

#f_input_var = 'E:\Tsinghua\SASU\SASU_output\C_input.nc'
#write_output(f_input_var, da, Var_Name_in, nlat, nlon, lat, lon)

# create an array used to store Cpools_output
Cpools_Out0 = np.full([npools, nlat, nlon], np.nan)
Cpools_Out = np.full([npools+1, nlat, nlon], np.nan)

icount = 0
print('Now do loop in each grid ... ')

# use one grid to test
for ilat in range(nlat): # 129,130 nlat 169, 179
    for ilon in range(nlon): # 96,97 nlon 119, 128
        a0 = env_scalar[0, ilat, ilon]
        if np.isnan(a0):
            continue
        else:
            icount += 1

            # for each grid
            scalar_ld = [0.0 for col in range(nenvs)]
            matrix_B = b_matrix[ilat, ilon, npools, b_matr_glob]

            if np.isnan(np.sum(matrix_B)):
                continue
            else:
                for iscalar in range(nenvs):
                    scalar_ld[iscalar] = env_scalar[iscalar, ilat, ilon]

                    #print('ilat, ilon', ilat, ilon)
                    #print('matrix_B=', matrix_B)
                    matrix_A = a_matrix()
                    matrix_K = k_matrix(scalar_ld[iwscalar], scalar_ld[itscalar], scalar_ld[ioscalar], scalar_ld[inscalar])
                    matrix_AK = np.matmul(matrix_A, matrix_K)

                    try:
                        matrix_AKinv = inverse(matrix_AK)
                        cpool_out = -1 * np.matmul(matrix_AKinv, matrix_B) * C_in[ilat, ilon]
                    except:
                        cpool_out = [np.nan for icpool in range(npools)]

                    #print('cpool_out=', cpool_out)
                    Cpools_Out[0:, ilat, ilon] = cpool_out

Cpools_Out[0:npools, :, :] = Cpools_Out0
Cpools_Out[npools, :, :] = np.sum(Cpools_Out0, axis=0)
```

```
# The following numbers indicate the position of env scalars (zero as initial index)
iwscalar = 0
itscalar = 1
ioscalar = 2
inscalar = 3

npools = 7 # Numbers of pools
nenvs = 4 # Number of environment scalars

nlat = 192
nlon = 288

secspday = 24 * 3600 # seconds per day
dayspmon = 30 # days per mon
dayspyr = 365 # days per year

# dt = secspday * dayspmon
dt = secspday * dayspyr
```

```
#!/usr/bin/python3
# -*- coding:utf-8 -*-

# =====
# Defines some subroutines used to calculate SASU
# Author: Chenyu Bian, bian_chenyu@163.com, cybian@stu.ecnu.edu.cn
# Date: 2020/5/11
# =====
# Called from: Semi-Analytical_Main.py
#
# This module contains the following subroutines:
#
# Read_input_data -> Read input and calculate the multi-year averaged results
# mask -> Used to transfer FillValue to nan
# b_matrix -> Output matrix_B in each grid (allocation coefficients)
# a_matrix -> Calculate and output matrix_A in each grid (transfer coefficients)
# k_matrix -> Calculate and output matrix_K in each grid (exit rate)
# inverse -> Calculate the inverse of the input matrix
# write_output -> Output the calculated results to nc file
# plt_figure -> write and save output figures
# reverse4plt -> tranfer map center to (0,0)
# mkdir -> create new directory
# =====
```

3.1 陆面碳循环的快速启动模块—运行步骤

3. 运行模块主程序并根据需求输入所需计算文件的起止年份

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ python Semi_Analytical_Main.py
Please set the start year in your files: 1980
Please set the end year in your files: 1990
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Semi-Analytical_Spinup
Path already exists.
nyr = 11 nmon = 12
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-1.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-2.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-3.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-4.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-5.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-6.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-7.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-8.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-9.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1989-12.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-1.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-2.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-3.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-4.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-5.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-6.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-7.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-8.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-9.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-10.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-11.nc
.././Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1990-12.nc
Now writing averaged parameters to nc files ...
Now do loop in each grid ...
```

3.1 陆面碳循环的快速启动模块—运行步骤

4. 在results目录查看模块运行结果

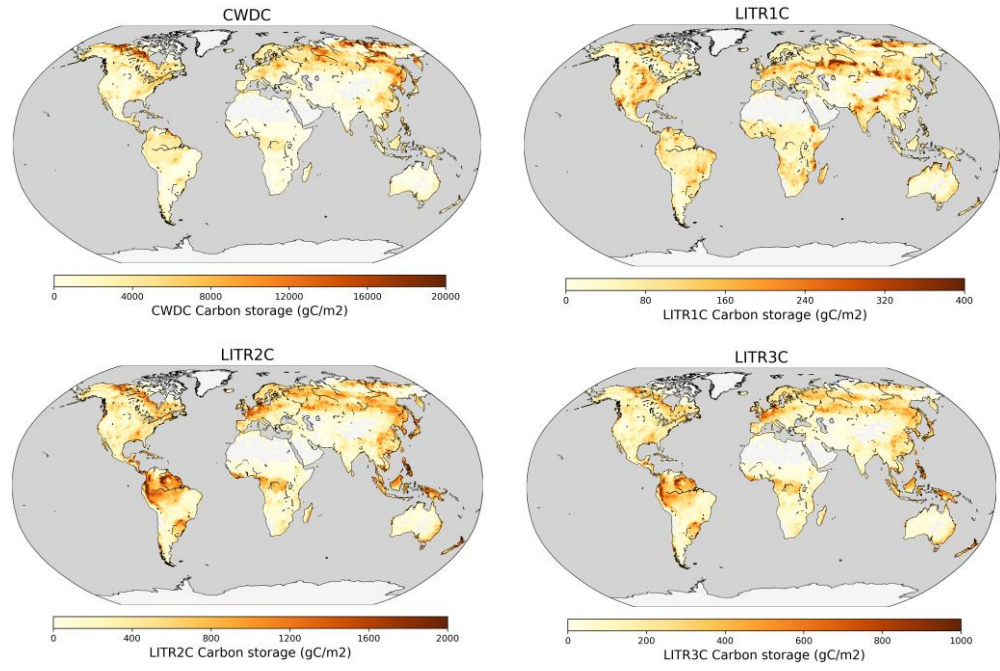
```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Semi-Analytical_Spinup]$ cd results/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ ls  
conv_md2pdf.sh output Semi-Analytical_Result_Report.md Semi-Analytical_Result_Report.pdf  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ cd output  
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$ ls  
figure Parameters_mean.nc SASU_Carbon_pools.nc
```

模型运行结果报告

平衡态时各碳库全球分布

计算得到的各碳库平衡态结果

用以进行SASU计算的平衡态参数，主要包括分配系数、凋落物碳输入和环境因子等



SASU模块结果报告

输出数据描述

如果您在之前运行过程中：
Do you want to output averaged parameters which used which used to calculate SASU? (y/n)

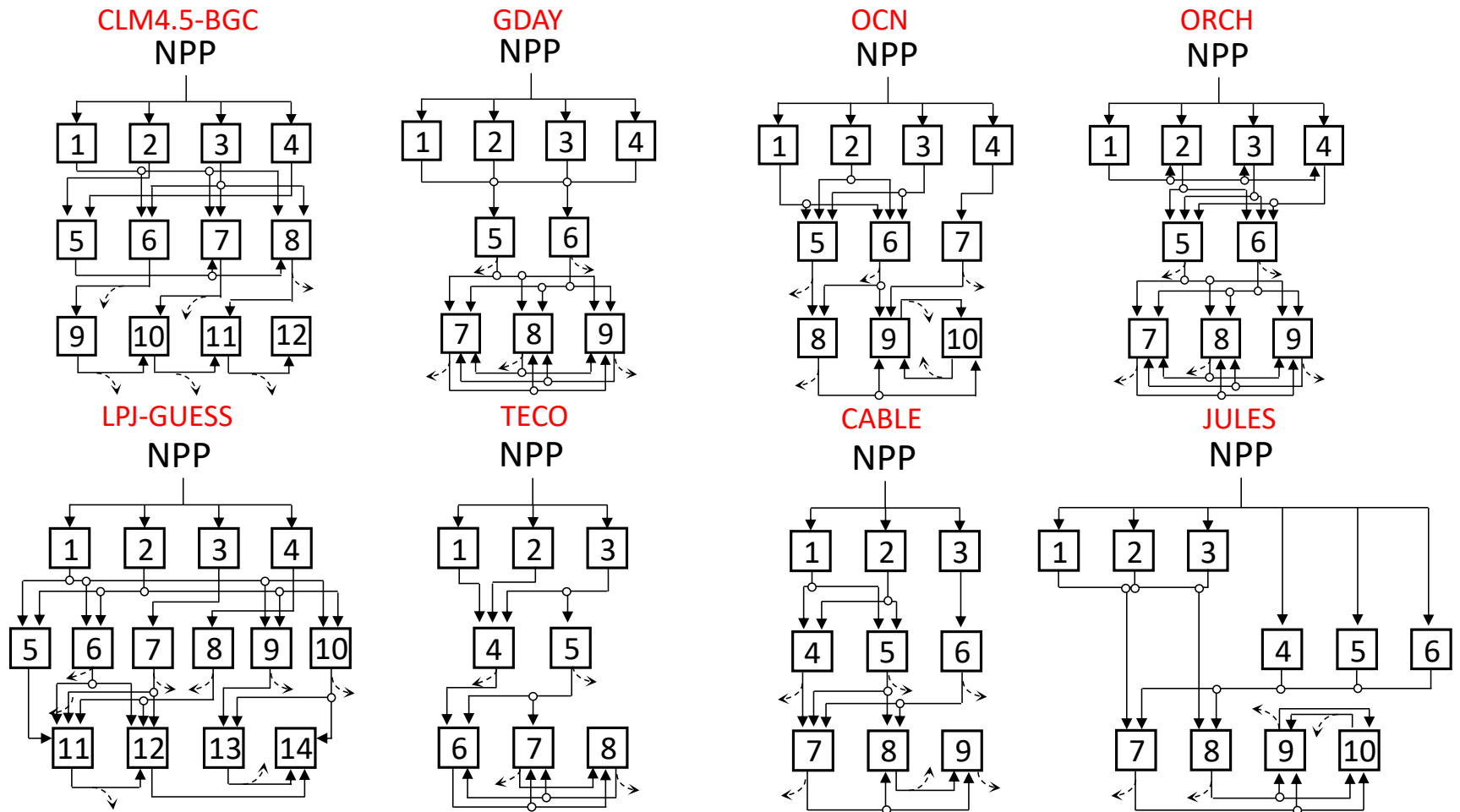
选择 y 则输出文件中包含以下两个nc文件以及一个figure文件夹，其中 Para_ave.nc 表示用以进行SASU计算的平衡态参数，SASU_Cpool.nc 表示计算得到的近平衡态结果，figure文件夹中包含近平衡态时各个碳库全球分布图。

文件名	参数名	单位	描述
Para_ave.nc	b_cwd	-	allocation coefficients from plant carbon input to CWDC
	b_litr1	-	allocation coefficients from plant carbon input to met litter pool
	b_litr2	-	allocation coefficients from plant carbon input to cel litter pool
	b_litr3	-	allocation coefficients from plant carbon input to lig litter pool
	C2cwd	gC/m2/s	carbon input from aboveground to CWDC
	C2litr1	gC/m2/s	carbon input from aboveground to litr1
	C2litr2	gC/m2/s	carbon input from aboveground to litr2
	C2litr3	gC/m2/s	carbon input from aboveground to litr3
	Cinput_tot	gC/m2/s	Total carbon input from aboveground to belowground
	Oscalar	-	fraction by which decomposition is reduced due to anoxia
	Tscalar	-	temperature inhibition of decomposition
	Wscalar	-	moisture inhibition of decomposition
	Nscalar	-	fraction of potential immobilization
SASU_Cpools.nc	C_tot	gC/m2	belowground carbon pool (Litter + Soil)
	CWDC	gC/m2	CWDC carbon pool
	LITR1C	gC/m2	Litter1 (met) carbon pool
	LITR2C	gC/m2	Litter2 (cel) carbon pool
	LITR3C	gC/m2	Litter3 (lig) carbon pool
	SOIL1C	gC/m2	soil1 carbon pool
	SOIL2C	gC/m2	soil2 carbon pool
SOIL3C	gC/m2	soil3 carbon pool	

总之，通过上述SASU离线模块，我们可以得到各凋落物和土壤碳库半平衡态下的碳库结果，包括粗木质残体碳库（CWD Carbon Pool）、代谢性凋落物碳库（Litter1 Carbon Pool）、纤维素凋落物库（Litter2 Carbon Pool）、木质素残体凋落物库（Litter3 Carbon Pool）、快性土壤碳库（Soil1 Carbon Pool）、惰性土壤碳库（Soil2 Carbon Pool）与惰性土壤碳库（Soil3 Carbon Pool）。

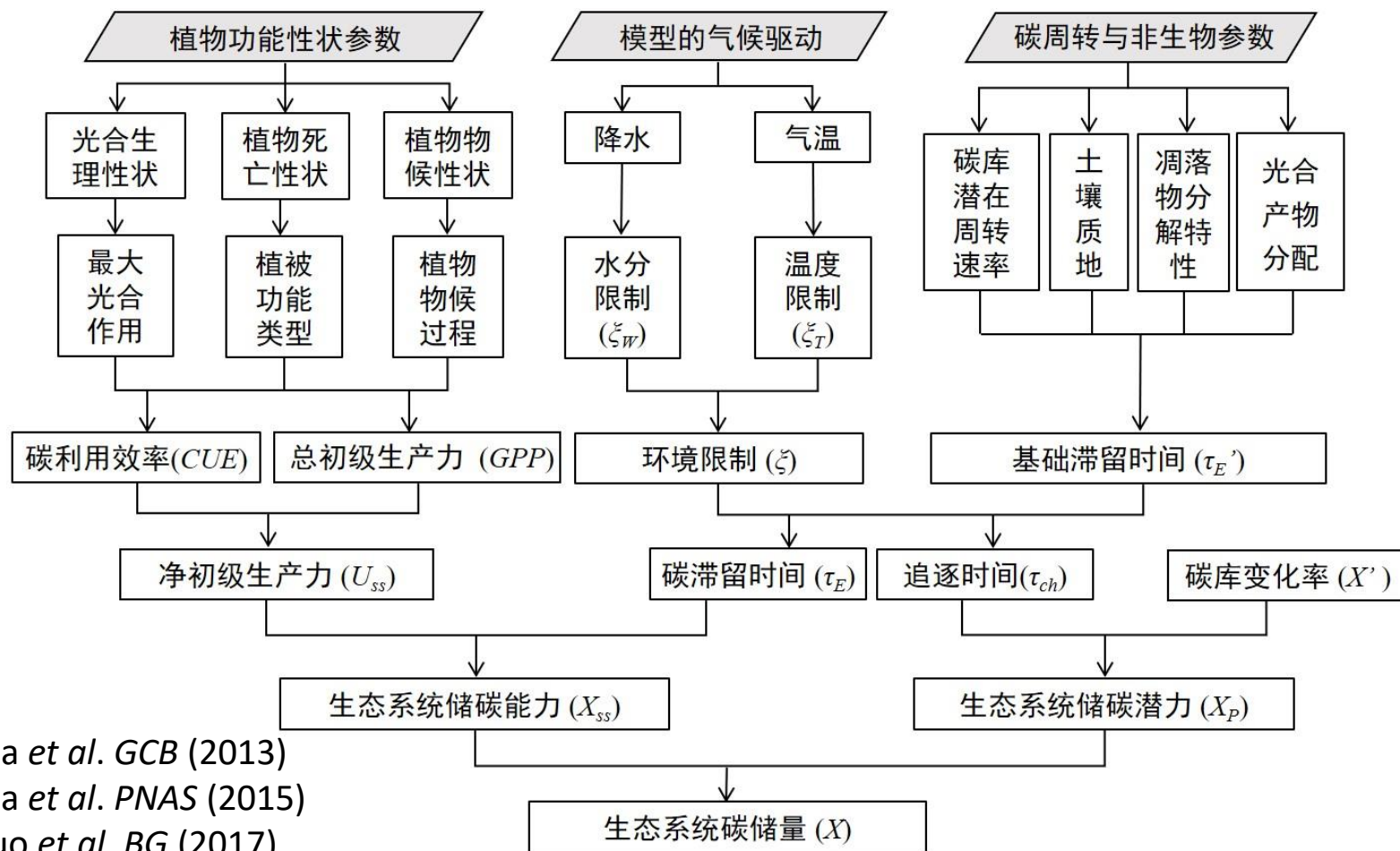
3.2 陆面模式溯源性诊断模块

不同模式的结构差别很大，模拟结果的偏差难以追溯来源



3.2 陆面模式溯源性诊断模块

碳氮循环的溯源性分析方法



Xia et al. GCB (2013)

Xia et al. PNAS (2015)

Luo et al. BG (2017)

Zhou et al. Ecol. Process (2021)

3.2 陆面模式溯源性诊断模块

矩阵表达

碳循环

$$\frac{dX(t)}{dt} = BU(t) - A\xi CX(t)$$

其中, X 表示陆地碳库, t 为时间, ξ 是环境因子, A 表示碳库之间转移系数, C 表示碳库的分解率, B 表示输入碳在植被不同组织中的分配系数, U 表示通过光合作用的碳输入

氮循环

$$\frac{dN_{min}(t)}{dt} = [N_{dep}(t) + N_{fix}(t) + N_{nminer}(t)] - [N_{up}(t) + N_{leach}(t) + N_{dn}(t) + N_{tmm}(t)]$$

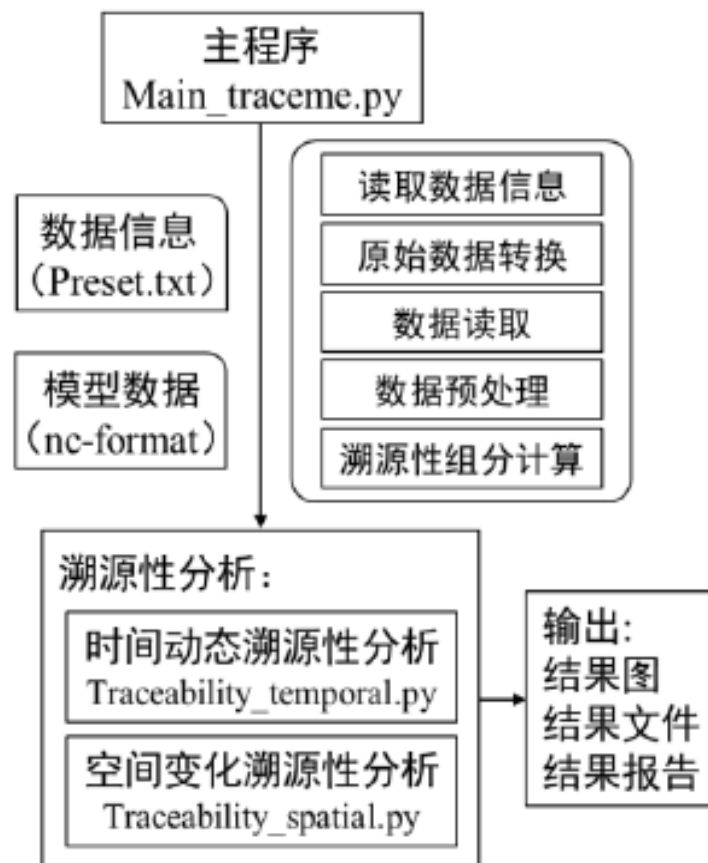
其中, N_{min} 表示土壤无机氮库, t 为时间, N_{dep} 表示氮沉降, N_{fix} 表示生物固氮量, N_{nminer} 表示氮矿化量, N_{up} 表示植物氮吸收量, N_{leach} 表示氮淋溶量, N_{imm} 表示反硝化量

水循环

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) + G_{in}(t) - [ET_V(t) + E_g(t) + Q_{over}(t) + Q_{base}(t)]$$

其中, S 表示土壤储水量, t 为时间, P 表示降水量, G_{in} 表示地下水补给量, ET_V 为植被蒸散量, E_g 表示地表蒸发量, Q_{over} 表示地表径流量, Q_{base} 为地下径流量

溯源性分析模块流程



3.2 陆面模式溯源性诊断模块—运行步骤

1. 进入溯源性分析诊断模块并打开Preset.txt文件

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 land_carbon_diagnose]$ cd Traceability_Analysis/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Traceability_Analysis]$ ls  
README.md  results  src  Traceability_Analysis_Documents.pdf  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Traceability_Analysis]$ cd src/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ ls  
area.nc      __pycache__  Traceability_Analysis_Main.py      Traceability_Analysis_Temporal.py  
Preset.txt   sftlf.nc     Traceability_Analysis_Spatial.py  
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ vim Preset.txt ■包含模型输出基本信息，以逗号隔开
```

2. 修改Preset.txt文件下数据相关属性

```
Scenario,file_path,start_year,end_year,file_res,temporal_resolution  
CRUNCEP,/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/Traceability_Analysis_input/CLM_CRUNCEP,21,40,yearly,yearly  
GSWP,/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/Traceability_Analysis_input/CLM_GSWP,21,40,yearly,yearly  
~
```

- **场景 (scenario)**：表示模型模拟的场景名（不同模型是模型名称）。
- **文件路径 (file_path)**：对应场景下模型输出数据放置的路径。（注，每个场景的模型输出文件需要放置在单独的文件夹下）。
- **起始年份 (start_year)**：模型输出文件的开始年份。
- **结束年份 (end_year)**：模型输出文件的结束年份。
- **单个文件的时间分辨率 (file_res)**：单个nc格式的文件所包含模拟结果的时间分辨率，可以是月尺度 (monthly) 和年尺度 (yearly)。
- **模型模拟时间分辨率 (temporal_resolution)**：模型模拟输出文件的时间分辨率，可以是月尺度 (monthly) 和年尺度 (yearly)。

CLM模型输出数据放于"/data/CLM4.5"，模拟从1980到2000年，每个文件是按月分割的月尺度输出。那么，在Preset.txt里面添加一行：

```
CLM,/data/CLM4.5,1980,2000,monthly,monthly
```

3.2 陆面模式溯源性诊断模块—运行步骤

3. 进入模块脚本所在目录并运行主程序

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ python Traceability_Analysis_Main.py
-->> Could not load xarray!! <<--
#### Reading Preset files...
### model ###
#### Clean and make dir of cdo...
### Starting pre-processing model outputs ###
#### CRUNCEP : Start to select the variable from data ...
Global4x5_matrix_1901_ND_CRU_restart_1_1.clm2.h0.0021-01-01-00000.nc
Global4x5_matrix_1901_ND_CRU_restart_1_1.clm2.h0.0031-01-01-00000.nc
#### CRUNCEP : cat all files into one ...
#### CRUNCEP : change data into yearly ...
#### CRUNCEP : change data into 1pt ...
#### GSWP : Start to select the variable from data ...
Global4x5_matrix_1901_ND_restart_2_2.clm2.h0.0031-01-01-00000.nc
Global4x5_matrix_1901_ND_restart_2_2.clm2.h0.0021-01-01-00000.nc
#### GSWP : cat all files into one ...
#### GSWP : change data into yearly ...
#### GSWP : change data into 1pt ...
['/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Traceability_Analysis/results/cdo_files/cdo5_time/CRUNCEP/
_1.clm2.h0.21-40.yearly.360x180.nc', '/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Traceability_Analysis/
_14x5_matrix_1901_ND_restart_2_2.clm2.h0.21-40.yearly.360x180.nc']
### End of pre-processing model output data###
### Start reading model output data ###
The scenarios are: ['CRUNCEP', 'GSWP']
period: 21 to 40
#### Start to run traceability analysis...
### Start runing spatial traceability analysis ...###
### Calculating baseline residence time ...
### Calculating baseline residence time ...
### Calculating baseline residence time ...
# Start drawing the Carbon storage (cEco) of CRUNCEP
# Start drawing the Carbon storage (cEco) of GSWP

Success of iteration: True
### Start to draw Carbon storage capacity (Ecosystem)
### Start to draw Carbon storage capacity (Vegetation)
### Start to draw Carbon storage capacity (Soil)
### Start to draw NPP
### Start to draw Residence time (Ecosystem)
### Start to draw Residence time (Vegetation)
### Start to draw Residence time (Soil)
### Start to draw Environmental scalars
### Successful running temporal traceability analysis ###
#### End of all Traceability analysis ####
```

3.2 陆面模式溯源性诊断模块—运行步骤

4.进入results目录查看运行结果

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Traceability_Analysis]$ cd results/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ ls  
cdo_files  output  Traceability_Analysis_Framework.png  Traceability_Analysis_Report.html  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ cd output/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$ ls  
figures  nc_files
```

溯源性分析结果报告

溯源性分析结果数据文件

溯源性分析过程图片结果

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 figures]$ ls  
Global_10_npp_CRUNCEP.png  Global_2_carbon_cVeg_CRUNCEP.png  
Global_10_npp_GSWP.png    Global_2_carbon_cVeg_GSWP.png  
Global_10_npp.png         Global_2_carbon_cVeg.png  
Global_11_resTime_cEco_CRUNCEP.png  Global_3_carbon_cSoil_CRUNCEP.png  
Global_11_resTime_cEco_GSWP.png    Global_3_carbon_cSoil_GSWP.png  
Global_11_resTime_cEco.png         Global_3_carbon_cSoil.png  
Global_12_resTime_cVeg_CRUNCEP.png  Global_4_capacity_cEco_CRUNCEP.png  
Global_12_resTime_cVeg_GSWP.png    Global_4_capacity_cEco_GSWP.png  
Global_12_resTime_cVeg.png         Global_4_capacity_cEco.png  
Global_13_resTime_cSoil_CRUNCEP.png  Global_5_capacity_cVeg_CRUNCEP.png  
Global_13_resTime_cSoil_GSWP.png    Global_5_capacity_cVeg_GSWP.png  
Global_13_resTime_cSoil.png         Global_5_capacity_cVeg.png  
Global_14_GPP_CRUNCEP.png          Global_6_capacity_cSoil_CRUNCEP.png  
Global_14_GPP_GSWP.png            Global_6_capacity_cSoil_GSWP.png  
Global_14_GPP.png                 Global_6_capacity_cSoil.png  
Global_15_CUE_CRUNCEP.png          Global_7_potential_cEco_CRUNCEP.png  
Global_15_CUE_GSWP.png            Global_7_potential_cEco_GSWP.png  
Global_15_CUE.png                 Global_7_potential_cEco.png  
Global_16_base_cEco_CRUNCEP.png     Global_8_potential_cVeg_CRUNCEP.png  
Global_16_base_cEco_GSWP.png       Global_8_potential_cVeg_GSWP.png  
Global_16_base_cEco.png            Global_8_potential_cVeg.png  
Global_17_base_cVeg_CRUNCEP.png     Global_9_potential_cSoil_CRUNCEP.png  
Global_17_base_cVeg_GSWP.png       Global_9_potential_cSoil_GSWP.png  
Global_17_base_cVeg.png            Global_9_potential_cSoil.png  
Global_18_base_cSoil_CRUNCEP.png     Temporal_10_trace_components_residence_time_cSoil.png  
Global_18_base_cSoil_GSWP.png       Temporal_11_trace_components_env_scalars.png  
Global_18_base_cSoil.png            Temporal_1_carbon_dynamic_cEco.png  
Global_19_precipitation_CRUNCEP.png  Temporal_2_carbon_dynamic_cVeg.png  
Global_19_precipitation_GSWP.png    Temporal_3_carbon_dynamic_cSoil.png  
Global_19_precipitation.png         Temporal_4_trace_components_capacity_cEco.png  
Global_1_carbon_cEco_CRUNCEP.png     Temporal_5_trace_components_capacity_cVeg.png  
Global_1_carbon_cEco_GSWP.png       Temporal_6_trace_components_capacity_cSoil.png  
Global_1_carbon_cEco.png            Temporal_7_trace_components_npp.png  
Global_20_temperature_CRUNCEP.png    Temporal_8_trace_components_residence_time_cEco.png  
Global_20_temperature_GSWP.png      Temporal_9_trace_components_residence_time_cVeg.png  
Global_20_temperature.png
```

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 nc_files]$ ls  
Traceability_spatial_results.nc  Traceability_temporal_results.nc
```

溯源性分析 (Traceability analysis) 报告

1. 溯源性分析简介

溯源性分析方法 (Traceability Analysis method) 旨在利用地球系统模式中的可溯源部分来分析不同地球系统模式模拟陆地碳储量动态的不确定性来源。将模式输出结果的差异追溯到模型的结构、参数和环境变量 (例如温度和降水) 等具体的因子 (图 1-1)。这种溯源性分析方法已经被广泛应用于模型内部、模型间和站点间的比较研究 (Jiang et al., 2017; Rafique et al., 2016, 2017; Xia et al., 2013)。Xia et al. (2013) 和 Luo et al. (2017) 等人提出了溯源性分析的理论基础, 并以矩阵化形式表达不同模式的关键过程并解析求解, 以揭示陆地生态系统关键过程模拟中的不确定性来源, 评价和诊断不确定性因子的影响机制。对于尚未转换为矩阵形式的模型, 可以根据后溯源性分析方法 (Post-MIP Traceability Analysis) 利用模式的输出结果进行溯源性分析 (Zhou et al., 2018)。

图1-1. 溯源性分析框架图

2. 结果

2.1 全球碳储量时间动态的溯源性分析

陆地生态系统碳储量 (Land ecosystem carbon storage) 可以分为地上植被部分 (Vegetation) 和地下土壤部分 (soil)。根据溯源性分析方法, 碳储量变化可以分解为: 碳储量能力 (carbon storage capacity) 和 碳储量潜力 (carbon storage potential)。分解结果如下图所示:

3.3 陆面模式关键过程基准性分析模块

International Land Model Benchmarking (ILAMB) 国际陆面模型基准研究计划



U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

Office of Science

- International Land Model Benchmarking (ILAMB) 是发起于Randerson **2009年**的 evaluation work;
- **2015年** 发布中应用
- 多观测数据集和多统计方法的加权打分系统，对模型进行基准性分析

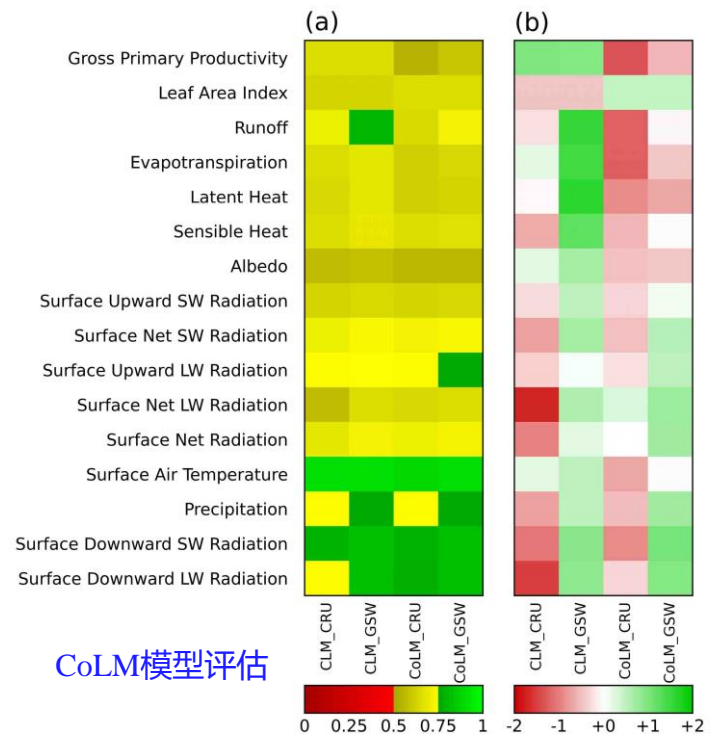
观测数据库的加权打分系统

Table 3
References and Weighting of Data Sets Used to Measure the Hydrology Cycle

Variable/Data Set	Certainty	Scale	Process
Evapotranspiration			5
GLEAM (Miralles et al., 2011)	3	5	
MODIS (De Kauwe et al., 2011)	3	5	
Evaporative fraction			5
GBAF (Jung et al., 2010)	3	3	
Latent heat			5
Fluxnet (Lasslop et al., 2010)	3	1	
GBAF (Jung et al., 2010)	3	3	
Runoff			5
Dai (Dai & Trenberth, 2002)	3	5	
Sensible heat			2
Fluxnet (Lasslop et al., 2010)	3	3	
GBAF (Jung et al., 2010)	3	5	
Terrestrial water storage anomaly			5
GRACE (Swenson & Wahr, 2006)	5	5	

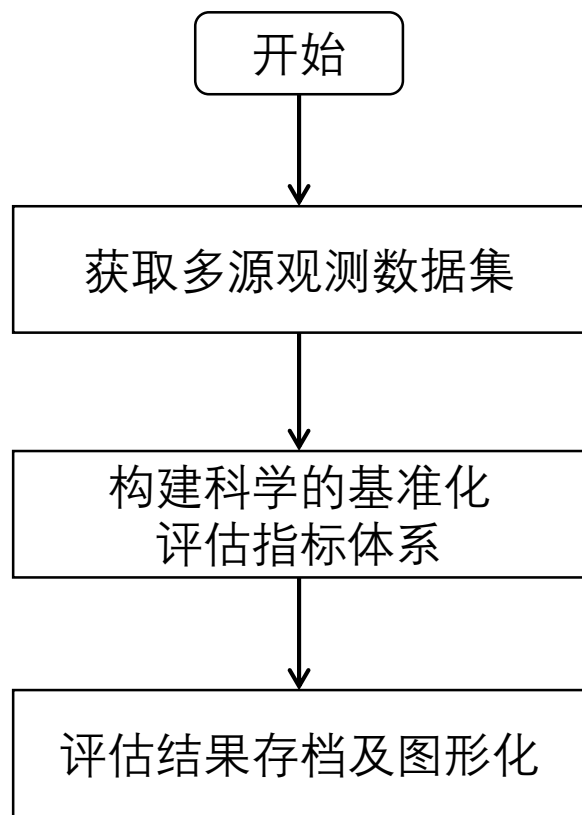
Note. Weights are chosen using the rubric in Table 1 and reflect a focus on understanding the carbon cycle.

陆地碳循环过程的基准性分析



3.3 陆面模式关键过程基准性分析模块

陆面关键过程基准性分析模块流程



陆地碳、氮、水循环关键过程及参量的基准性数据集

陆面过程	变量名	单位	来源	时空分辨率
碳循环	总初级生产力 (GPP)	gC/m ² /yr	GOSIF GPP	2001-2014, 0.05°
			MODIS GPP	2000-2014, 0.5°
			FLUXCOM GPP	1980-2013, 0.94x1.25°
	净初级生产力 (NPP)	gC/m ² /yr	MODIS NPP	2000-2014, 0.5°
	土壤有机碳 (SOC)	kgC/m ²	HWSD	2000, 0.94x1.25°
	叶面积指数 (LAI)	m ² /m ²	GIMMS LAI3g	1982-2015, 1/12°
GLASS LAI			1982-2014, 0.05°	
GLOBMAP LAI			1982-2016, 0.08°	
氮循环	土壤无机氮 (SIN)	mg/kg	文献搜集	1980-2008
水循环	蒸散发 (ET)	kg/m ² /yr	MODIS ET	2000-2014, 0.5°

3.3 陆面模式关键过程基准性分析模块—运行步骤

1. 进入模块所在目录

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 land_carbon_diagnose]$ cd Benchmarking_Analysis/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Benchmarking_Analysis]$ ls  
Benchmarking_Analysis_Module_Documentation.pdf  README.md  results  src  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Benchmarking_Analysis]$ cd src
```

模块说明文档

Benchmark module documentation

1. 数据来源

1.1 GPP

1.1.1 GOSIF GPP

GOSIF-GPP为基于OCO-2的全球SIF产品 (GOSIF) 以及SIF与GPP之间的线性关系, 以2000年至2018年期间的0.05°空间分辨率和8天时间步长对GPP进行了全球映射得到的数据产品。基于高质量的SIF格点观测数据所得到的GPP将不再需要任何其他输入数据 (例如气候数据, 土壤属性等), 因此能够仅基于SIF的观测值独立映射出GPP进而在区域和全球尺度上生成更加精确的GPP结果。本模块中, 我们将原始数据的时间分辨率转化为一, 并将空间分辨率重采样到0.94°x1.25°。

1.1.2 MODIS GPP

MODIS 是美国航天局为主提出并实施的全球尺度观测计划对地观测系统中的重要传感器之一, 其产品覆盖海洋、陆地和大气, 已广泛应用于各类研究。本模块中使用的数据为2001-2014年的MOD17A3 GPP数据, 时间分辨率为一年, 空间分辨率为1km重采样到CLM模型输出的分辨率(0.94x1.25°)

1.1.3 FLUXCOM GPP

FLUXCOM利用机器学习的方法融合了FLUXNET测度通量塔的通量观测数据和遥感以及气象数据来估计生态系统总初级生产力 (GPP)。其是马克思·普朗克生物地球化学研究所的产品, 空间分辨率为0.5°, 时间分辨率为1天。本模块中为应用其进行基准性分析, 将其时间分辨率转化为一, 并将空间分辨率重采样到0.94°x1.25°。

1.2 NPP

1.2.1 NPP

美国国家航空航天局MODIS卫星的NPP数据 (MOD17A3 NPP) 用于评价CLM模拟的NPP。该数据产品包括自2000年以来全球NPP估计值, 分辨率为每年1x1 km。目前该产品已校正云污染, 且其数据的准确性已被广泛衡量, 并已广泛用于评估模型模拟的生物地球化学过程。由于MODIS NPP是根据每种生物群落类型内固定参数驱动的光能利用效率算法估算的, 因此不可避免会导致时间和空间变化的不确定性。MOD17算法的每日气象输入为来自全球建模和同化办公室/ NASA提供的全球气象再分析数据。在本模块中, 将MOD17A3的NPP估算值与模型所模拟的NPP多年平均值进行了比较。使用Arcgis Spatial analysis 中的resample tool对数据进行重采样, 并使用最近邻算法将数据重新采样为与CLM模型一致的空间分辨率0.94°x1.25°分辨率。

1.3 SOC

本模块中我们用来评价和限制模型的全土土壤有机碳数据来自于Harmonized World Soil Database (HWSD) 数据库。即MCMC模块中所用数据库, 因此本篇不再赘述。

基准性分析用户操作手册

目录

1. 概要
2. 编译环境
3. 所需python模块
4. 所需输入数据
5. 模块构成说明
6. 运行MCMC
7. 输出结果说明

1. 概要

为了更准确的预测生态系统对未来气候变化的响应, 模型的复杂化成为最近二十年来生态以及陆面模型的发展趋势。其复杂化主要表现在两个方面, 一是逐渐增加生态过程, 二是增加观测数据, 分为驱动数据与验证或反演数据。复杂模型整合了更多过程与不同数据信息, 为复杂机理研究提供了途径。然而, 由于过程与观测数据增加了模型参数和观测误差, 进一步增加了模型的不确定性, 这些不确定性反过来也限制了模型模拟的准确性。因此, 如果不对陆面模型的模拟结果进行量化, 就难以应用陆面模型对生态系统和气候的未来状态进行预测。基准性分析 (Benchmark) 方法可以基于观测数据对模型模拟结果进行评价, 进而可以改进模型结构、推动模型发展。

陆面模式关键过程的基准性分析模块(Benchmark)主要包括读取并处理数据、模型和观测数据的比较与评价、输出结果等三项主要功能。本手册对Benchmark模块的编译环境、输入文件、系统流程、输出文件进行了详细的介绍, 并对如何应用本模块给出了详细指导, 可作为模块操作方法指南。

关于本模块中所涉及到方法和数据的描述, 请参见: [Benchmark module documentation](#)

2. 编译环境

操作系统: Linux

编译环境: Python3

陆面模式关键过程的基准性分析模块主要由Python3.7 编写, 因此在运行此模块之前, 您需要在您的电脑中安装并配置python编译环境。

以下为在Unix & Linux 平台上安装Python的简单步骤:

- 访问Python官网 (<https://www.python.org/>), 下载适用于您系统版本的源码
- 以 Python 3.7.2 版本为例:

```
tar -zxvf Python-3.7.2.tgz  
cd Python-3.7.2  
./configure  
make
```

3.3 陆面模式关键过程基准性分析模块—运行步骤

2. 进入源码所在目录并运行模块主程序

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Benchmarking_Analysis]$ cd src
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ ls
Benchmarking_Analysis_Main.py      Benchmarking_Analysis_Unified_Spatial_Resolution.py
Benchmarking_Analysis_Submodule.py  __pycache__
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ python Benchmarking_Analysis_Main.py
```

统一分辨率

```
# FLUXCOM_GPP
elif icount == 2:
    filepath = path + '/Benchmark_input/GPP/FLUXCOM_GPP/'
    filename = filepath + 'FLUXCOMGPP_Annual1980-2013_clm_res_0.94x1.25.nc'
    da = nc.Dataset(filename)
    data = da.variables['GPP'][:,].filled(np.nan) # gC/m2/day
    data = data * 365 # convert unit from gC/m2/day -> gC/m2/year
    data_ave = np.nanmean(data, axis=0)

# MODIS NPP
elif icount == 3:
    data = np.full(((endyr - startyr + 1), nlat, nlon), np.nan)
    iyr_count = 0
    filepath = path + '/Benchmark_input/NPP/MODIS_NPP/'
    for iyr in range(startyr, endyr + 1):
        filename = filepath + 'MOD17A3_NPP_Annual_' + str(iyr) + '_CLM_RES_0.94x1.25.nc'
        da = nc.Dataset(filename)
        data[iyr_count, :, :] = da.variables['NPP'][:,].filled(np.nan) # gC/m2/year
        data_ave = np.nanmean(data, axis=0)

# HWSO Csoil
elif icount == 4:
    filepath = path + '/Benchmark_input/HWSO_I247/data/'
    filename = filepath + 'HWSO_SOIL_CLM_RES.nc4'
    da = nc.Dataset(filename)
    data = da.variables['AWT_SOC'][:,].filled(np.nan) # kgC/m2
    data_ave = np.nansum(data, axis=0) # calculate the sum of soil organic carbon content and top layers

# GIMMS LAI
elif icount == 5:
    data = np.full(((endyr - startyr + 1), nlat, nlon), np.nan)
    iyr_count = 0
    filepath = path + '/Benchmark_input/LAI/LAI_nc/GIMMS/'
    for iyr in range(startyr, endyr+1):
        filename = filepath + 'GIMMS_LAI_' + str(iyr) + '_annual_0.94x1.25.nc'
        da = nc.Dataset(filename)
        data[iyr_count, :, :] = da.variables['LAI'][:,].filled(np.nan) # m2/m2
        data_ave = np.nanmean(data, axis=0)

# GLASS LAI
elif icount == 6:
    data = np.full(((endyr - startyr + 1), nlat, nlon), np.nan)
    iyr_count = 0
    filepath = path + '/Benchmark_input/LAI/LAI_nc/GLASS/'
    for iyr in range(startyr, endyr+1):
        filename = filepath + 'GLASS_LAI_' + str(iyr) + '_annual_0.94x1.25.nc'
        da = nc.Dataset(filename)
        data[iyr_count, :, :] = da.variables['LAI'][:,].filled(np.nan) # m2/m2
        data_ave = np.nanmean(data, axis=0)
```

读取模型数据并和每一套观测数据分别对比分析

```
for idataset in range(len(dataset)):
    for iyr in range(2011, 2016+1):
        f_in = filepath + dataset[idataset] + '/' + dataset[idataset] + '_' + str(iyr) + '.csv'
        print(f_in)
        df = pd.read_csv(f_in, sep=',', header=None)
        LAI_data = df.to_numpy()
        LAI_data = np.flipud(LAI_data)

        f_out = filepath_out + dataset[idataset] + '/' + dataset[idataset] + '_LAI_' + str(iyr) + '_annual_0.5x0.5.nc'

        nc_out = nc.Dataset(f_out, mode='w', format='NETCDF4')
        lat = np.arange(-89.75, 90, 0.5)
        lon = np.arange(-179.75, 180, 0.5)

        lat_dim = nc_out.createDimension('lat', len(lat))
        lon_dim = nc_out.createDimension('lon', len(lon))
        time_dim = nc_out.createDimension('time', 1) # unlimited axis (can be appended to it)

        # creating variables
        lat_new = nc_out.createVariable('lat', np.float32, ('lat'))
        lat_new.units = 'degrees_north'
        lat_new.long_name = 'latitude'
        lon_new = nc_out.createVariable('lon', np.float32, ('lon'))
        lon_new.units = 'degrees_east'
        lon_new.long_name = 'longitude'
        time = nc_out.createVariable('time', np.float32, ('time'))

        LAI0 = nc_out.createVariable('LAI', np.float32, ('time', 'lat', 'lon'))
        LAI0.long_name = 'Leaf Area Index'
        LAI0.units = 'm2/m2'

        # 5. Writing data to nc file
        nc_out.variables['lat'][:] = lat
        nc_out.variables['lon'][:] = lon

        # Writing other variables to nc file
        nc_out.variables['LAI'][:] = LAI_data

        # 6. Closing the output nc file
        nc_out.close()

        f_out_clm_res = filepath_out + dataset[idataset] + '/' + dataset[idataset] + '_LAI_' + str(iyr) + '_annual_0.94x1.25.nc'
        print(f_out_clm_res)
        cdo.remapbil('r288x192', input=f_out, output=f_out_clm_res)
```

3.3 陆面模式关键过程基准性分析模块—运行步骤

2. 进入源码所在目录并运行模块主程序

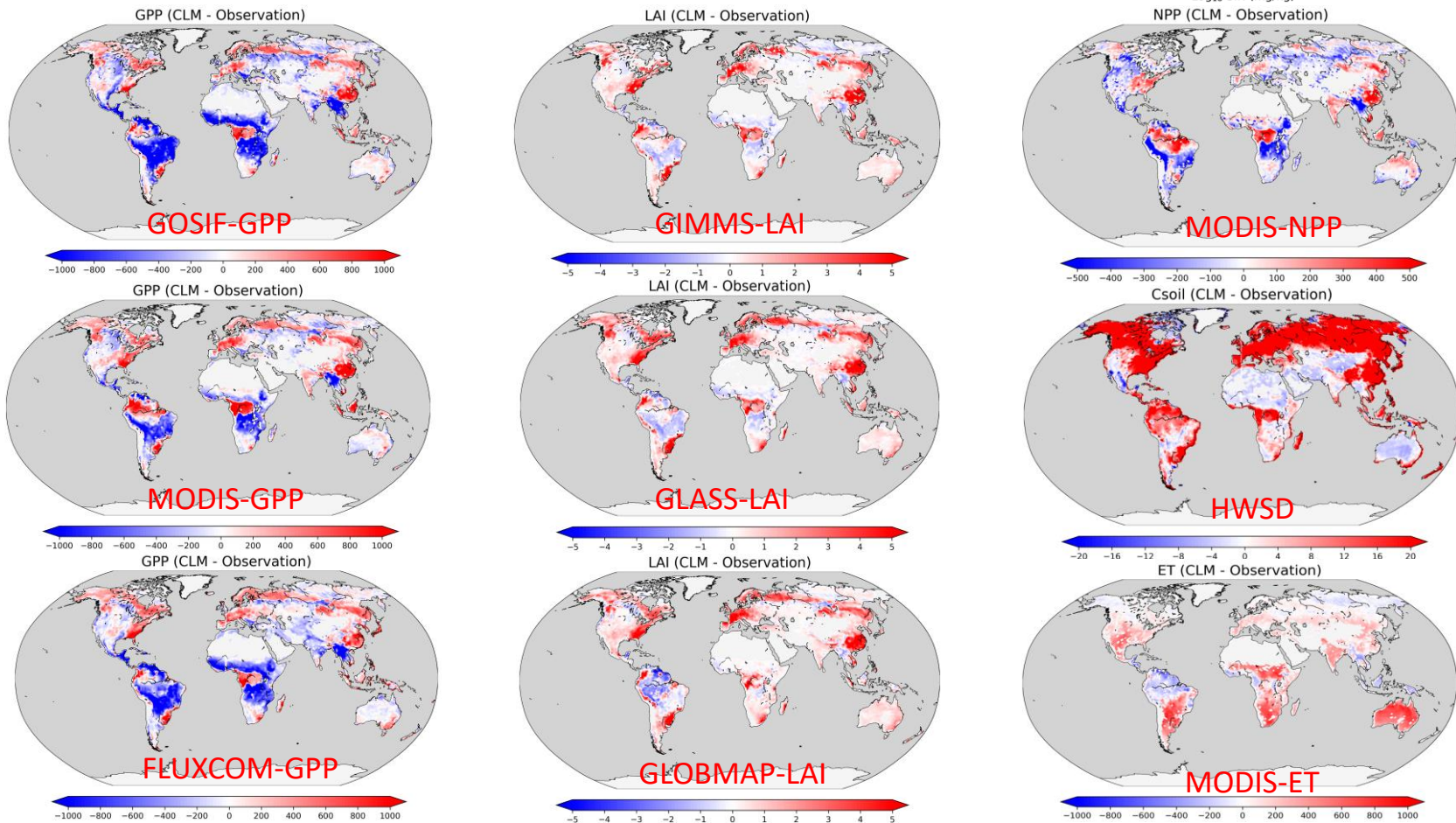
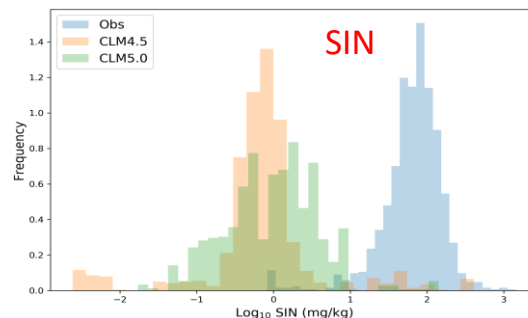
```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Benchmarking_Analysis]$ cd src
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ ls
Benchmarking_Analysis_Main.py      Benchmarking_Analysis_Unified_Spatial_Resolution.py
Benchmarking_Analysis_Submodule.py  __pycache__
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ python Benchmarking_Analysis_Main.py
```

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ python Benchmarking_Analysis_Main.py
Path already exists.
Path already exists.
in GOSIF GPP: startyr is: 2001 endyr is: 2005
data.shape = (5, 192, 288)
in MODIS GPP: startyr is: 2000 endyr is: 2005
in FLUXCOM GPP: startyr is: 1980 endyr is: 2005
Path already exists.
in MODIS NPP: startyr is: 2000 endyr is: 2005
Path already exists.
in HWSO Csoil: startyr is: 2000 endyr is: 2000
Path already exists.
in GIMMS LAI: startyr is: 1982 endyr is: 2005
in GLASS LAI: startyr is: 1982 endyr is: 2005
in GLOBMAP LAI: startyr is: 1982 endyr is: 2005
Path already exists.
in MODIS ET: startyr is: 2000 endyr is: 2005
Path already exists.
```


3.3 陆面模式关键过程基准性分析模块—运行步骤

3. 进入results目录查看运行结果

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Benchmarking_Analysis]$ cd results/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ ls  
Benchmarking_Analysis_Result_Report.md  output  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ cd output/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$ ls  
Csoil  ET  GPP  LAI  NPP  SIN
```



3.4 陆面模式碳循环的数据融合模块

数据同化方法：数据同化方法基于贝叶斯原理，基本思路是将不同来源、不同分辨率观测数据融入模型，反向求得最优参数，以提高模型的模拟精度和预测能力。

$$\text{Posterior Probability} \quad \left[p(\theta|Z) \right] = \frac{p(Z|\theta) \boxed{p(\theta)}}{p(Z)} \rightarrow \text{Prior}$$

其中 θ 为参数， Z 为观测值， $P(\theta|Z)$ 是在已经观测值时参数的后验概率分布， $P(\theta)$ 表示参数的先验概率密度函数，在此模块中设定为最大值和最小值之间的均匀分布。 $P(Z)$ 为观测数据的概率密度函数， $P(Z|\theta)$ 为观测数据在先验参数值下的条件概率密度分布函数。

假设每个参数均具有均值为0的对数正态分布：

$$p(Z|\theta) \propto \exp \left\{ - \sum \frac{[Z_i - \phi_i \times X]^2}{2\sigma_i^2} \right\}$$

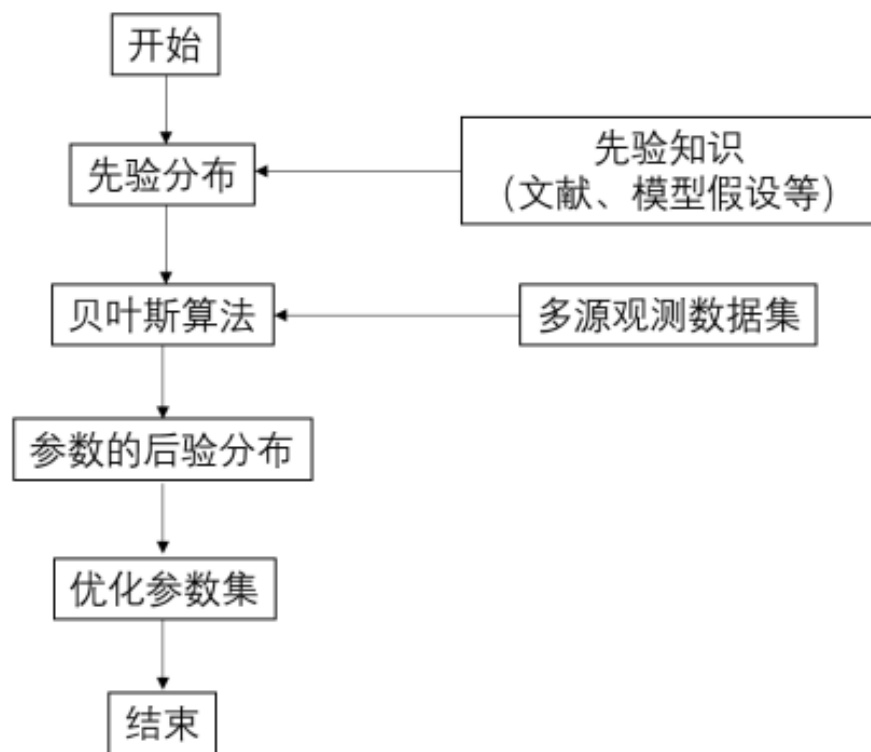
进一步通过MCMC方法随机采样得到模型参数的后验分布：

$$\theta_{new} = \theta_{old} + r \times (\theta_{max} - \theta_{min}) / D$$

其中， θ_{max} 和 θ_{min} 分别代表参数最大值和最小值， θ_{old} 和 θ_{new} 分别是之前接受的参数和新产生的参数， r 为-0.5到0.5之间的随机变量， D 为控制移动步长的常数，本模块中将其设置为5。

3.4 陆面模式碳循环的数据融合模块

陆面模式碳循环数据融合模块流程



模式需要提供：

- 陆地碳循环关键过程的格点化结果
- 碳分配、周转和分解等过程的固定关键参数列表

本模块输出：

- 关键参数的优化数值集

3.4 陆面模式碳循环的数据融合模块

全球土壤有机碳数据库

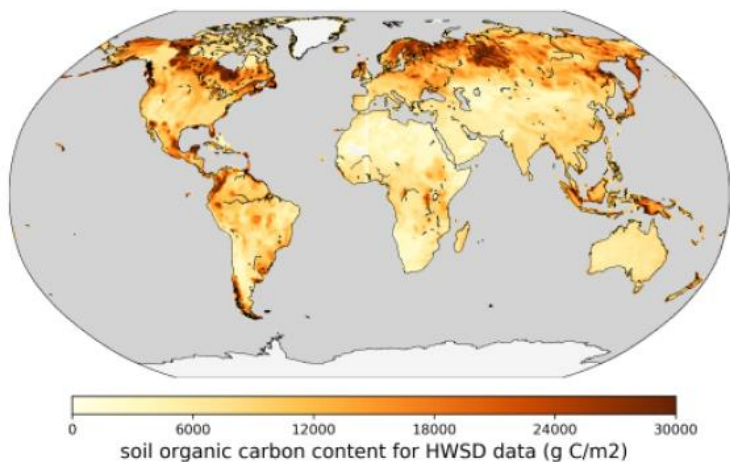
Harmonized World Soil Database

Harmonized World Soil Database HWSD Database

The data available on this page is automatically installed with the HWSD Viewer, in a subdirectory called "Data" of the installation directory. The data is duplicated here for those who do not wish to install the viewer, or already have the viewer and only want to update or repair the database. If updates to the database are necessary and created, they will be documented here.

DATA FILES	DESCRIPTION	DATE
HWSD_RASTER.zip	Raster soil map in .bil file format	07.03.12
HWSD.mdb	Soil Attribute Database (MS Access)	07.03.12
HWSD_META.mdb	Soil Attribute Database metadata	07.03.12

If you have a version of the HWSD viewer installed and wish only to update the database, the files above can be copied into the "Data"



模型待估计参数

参数	描述	单位	最小值	最大值	默认值	平均值±标准差
t1	Coefficient to calculate f21 (intercept)	-	0	1	0.85	0.12±0.064
t2	Coefficient to calculate f21 (slope)	-	0	1	0.68	0.048±0.04
f31	Fraction of C in fast soil C transferring to passive soil C	-	0	0.01	0.005	0.006±0.0025
f12	Fraction of C in slow soil C transferring to fast soil C	-	0.1	0.6	0.4185	0.47±0.084
f32	Fraction of C in slow soil C transferring to passive soil C	-	0	0.05	0.0315	0.042 ± 0.0055
f13	Fraction of C in passive soil C transferring to fast soil C	-	0.3	0.7	0.45	0.50 ± 0.11
k1	Turnover rate of C from fast soil C	gC gC ⁻¹ yr ⁻¹	1	15	7.3	7.97 ± 3.72
k2	Turnover rate of C from slow soil C	gC gC ⁻¹ yr ⁻¹	0.1	0.5	0.2	0.28 ± 0.11
k3	Turnover rate of C from passive soil C	gC gC ⁻¹ yr ⁻¹	0.001	0.01	0.0045	0.0013 ± 0.00020
Q10	Turnover rate of C from fast soil C	-	1	3	2	1.28 ± 0.0054

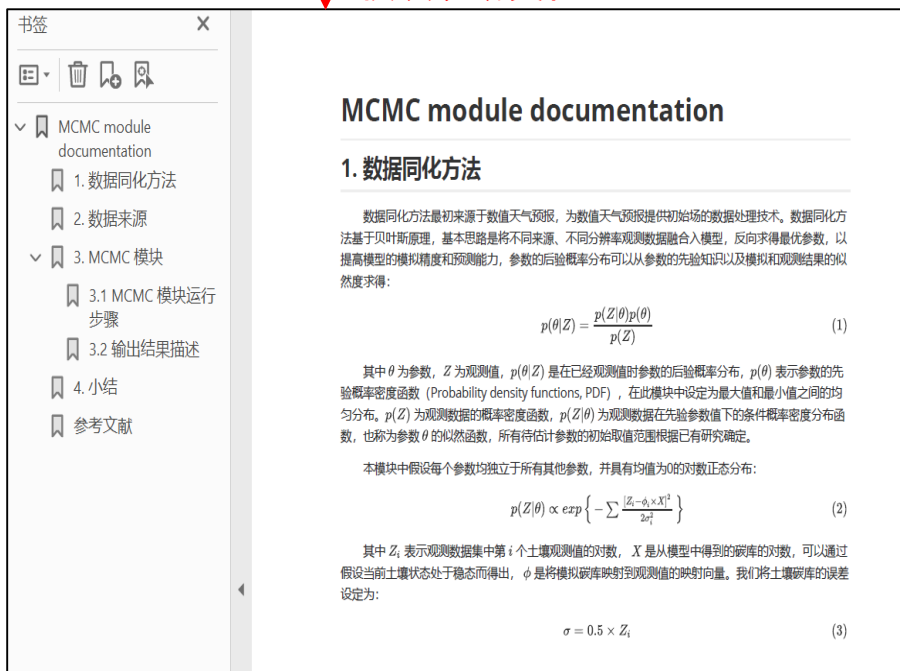
3.4 陆面模式碳循环的数据融合模块—运行步骤

1. 进入模块脚本所在目录

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 land_carbon_diagnose]$ cd Data_Assimilation/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Data_Assimilation]$ ls  
Data_Assimilation_Module_Documentation.pdf  README.md  results  src
```

↓ 模块说明文档

↓ 用户操作手册



The screenshot shows a web browser window displaying the 'MCMC module documentation' page. The left sidebar contains a navigation menu with items like 'MCMC module documentation', '1. 数据同化方法', '2. 数据来源', '3. MCMC 模块', '3.1 MCMC 模块运行步骤', '3.2 输出结果描述', '4. 小结', and '参考文献'. The main content area is titled 'MCMC module documentation' and '1. 数据同化方法'. It contains a paragraph about data assimilation methods, followed by equation (1)
$$p(\theta|Z) = \frac{p(Z|\theta)p(\theta)}{p(Z)} \quad (1)$$
 and equation (2)
$$p(Z|\theta) \propto \exp\left\{-\sum \frac{(Z_i - \phi_i \times X_i)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$
. Below equation (2) is equation (3)
$$\sigma = 0.5 \times Z_i \quad (3)$$
.



The screenshot shows a web browser window displaying the 'Data-Assimilation module用户操作手册' (Data-Assimilation module user operation manual). The page has a table of contents with items: '1. 概要', '2. 编译环境', '3. 所需python模块', '4. 所需输入数据', '5. 模块构成说明', '6. 运行MCMC', and '7. 输出结果说明'. The main content area is titled '1. 概要' and contains text about the model's complexity and data assimilation. It includes a section for '编译环境' (Compilation Environment) with details on the operating system (Linux), compiler (Python3), and steps for installation on Unix & Linux platforms. It also includes a code block for installation steps:

```
tar -zxvf Python-3.7.2.tgz  
cd Python-3.7.2  
./configure  
make
```

And a section for checking if Python3 is installed:

```
python3 --version
```

3.4 陆面模式碳循环的数据融合模块—运行步骤

2. 进入脚本所在目录运行主程序，并根据需求选择模拟的空间尺度（站点或者全球）并设定文件的起止年份

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Data Assimilation]$ cd src
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ ls
Data_Assimilation_Main.py  Plot_SOC_globmap.m  regridded_data.m
Data_Assimilation_Submodule.py  __pycache__
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ python Data_Assimilation_Main.py
Do you want to run in site or global scale? (0-site, 1-global)
Please enter 0 or 1 : 0
Do MCMC in [site] level.
Please set the start year in your files: 1980
Please set the end year in your files: 1989
Now in reading data .....
Now in set parameter ranges .....
Now set litter input to soil .....
Now replaced the permafrost soil C in HWSO with the NCSCD .....
Now do MCMC .....
Please enter the number of times you want to simulate: 1000
nsimul is: 1000
Create output directory ...
Path already exists.
Path already exists.
Please enter the lat grid number (a integer which ranges from 0 to 191): 110
Please enter the lon grid number (a integer which ranges from 0 to 287): 11
is_land = yes
soilC_tot= 1596.181354980767
Now do Site MCMC ...
simu = 0
simu = 25
simu = 50
```

```
# for equilibrium calculation
soilcarbon_ss_emulator = np.full([3, 192, 288], np.nan)
k = 0
for ilat in range(192):
    for ilon in range(288):
        if np.isnan(soilC_tot[ilat, ilon]):
            continue
        else:
            # print('ilat, ilon=', ilat, ilon)
            # if soilC_tot[ilat, ilon] > 0:
            k += 1
            A = [[-1, fs[1], fs[3]],
                 [f21[ilat, ilon], -1, 0],
                 [fs[0], fs[2], -1]]
            A = np.array(A)
            Ks_grid = Ks[:, ilat, ilon]
            if np.sum(Ks_grid) == 0:
                continue
            else:
                diag_Ks = np.diag(Ks_grid)
                inv_AKs = np.linalg.inv(np.matmul(A, diag_Ks))
                soilcarbon_ss_emulator[0:3, ilat, ilon] = np.matmul(inv_AKs, -I[:, ilat, ilon])

soilcarbon_ss_emulator_total = np.sum(soilcarbon_ss_emulator, axis=0)
soilcarbon_ss_emulator_total = np.where(soilcarbon_ss_emulator_total == 0, np.nan,
                                         soilcarbon_ss_emulator_total)
# soilcarbon_ss_emulator_total = np.where(mask_mic == 0, np.nan, soilcarbon_ss_emulator_total)
# soilcarbon_ss_emulator_total = np.where(mask_litr_input == 0, np.nan, soilcarbon_ss_emulator_total)
soilcarbon_ss_emulator_total_area = soilcarbon_ss_emulator_total * area * 10 ** 6
soilcarbon_ss_emulator_total_area_global = np.nansum(
    np.nansum(soilcarbon_ss_emulator_total_area, axis=1),
    axis=0)

#
log_soilcarbon_M_total = np.log10(soilcarbon_ss_emulator_total)
scalar_sd = 0.5
diff = log_soilcarbon_M_total - log_soilC_tot_area_glob
J = (diff ** 2) / (2 * (scalar_sd * log_soilC_tot_area_glob) ** 2)
J_new = np.nansum(np.nansum(J))
delta_J = J_new - J_old

# with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):

if min(1, np.exp(-delta_J)) > random.random():
    para_write.writerow(par_new)
    Parameters_keep[upgrade, :] = par_new
    J_keep[upgrade] = J_new
    par_old = par_new
    J_old = J_new
    soilcarbon_ss_emulator_total1 = np.where(soilcarbon_ss_emulator_total > 0,
                                             soilcarbon_ss_emulator_total,
                                             np.nan)
    count_recode[upgrade] = np.nansum(np.nansum(soilcarbon_ss_emulator_total1, axis=1), axis=0)
    ss_recode[upgrade] = soilcarbon_ss_emulator_total_area_global
    soilcarbon_keep[upgrade, :, :] = soilcarbon_ss_emulator_total1
    upgrade += 1
```


3.4 陆面模式碳循环的数据融合模块—运行步骤

2. 进入脚本所在目录运行主程序，并根据需求选择模拟的空间尺度（站点或者全球）并设定文件的起止年份

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Data_Assimilation]$ cd src
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ ls
Data_Assimilation_Main.py      Plot_SOC_globmap.m  regridded_data.m
Data_Assimilation_Submodule.py  __pycache__
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ python Data_Assimilation_Main.py
Do you want to run in site or global scale? (0-site, 1-global)
Please enter 0 or 1 : 1
Do MCMC in [global] scale.
Please set the start year in your files: 1980
Please set the end year in your files: 1989
Now in reading data .....
Now in set parameter ranges .....
Now set litter input to soil .....
Now replaced the permafrost soil C in HWSO with the NCSCD .....
Now do MCMC .....
Please enter the number of times you want to simulate: 1000
nsimul = 1000
Create output directory ...
Path already exists.
Path already exists.
simu = 0
simu = 25
simu = 50
simu = 75
```

```
# for equilibrium calculation
soilcarbon_ss_emulator = np.full([3, 192, 288], np.nan)
k = 0
for ilat in range(192):
    for ilon in range(288):
        if np.isnan(soilC_tot[ilat, ilon]):
            continue
        else:
            # print('ilat, ilon=', ilat, ilon)
            # if soilC_tot[ilat, ilon] > 0:
            k += 1
            A = [[-1, fs[1], fs[3]],
                 [f21[ilat, ilon], -1, 0],
                 [fs[0], fs[2], -1]]
            A = np.array(A)
            Ks_grid = Ks[:, ilat, ilon]
            if np.sum(Ks_grid) == 0:
                continue
            else:
                diag_Ks = np.diag(Ks_grid)
                inv_AKs = np.linalg.inv(np.matmul(A, diag_Ks))
                soilcarbon_ss_emulator[0:3, ilat, ilon] = np.matmul(inv_AKs, -I[:, ilat, ilon])

soilcarbon_ss_emulator_total = np.sum(soilcarbon_ss_emulator, axis=0)
soilcarbon_ss_emulator_total = np.where(soilcarbon_ss_emulator_total == 0, np.nan,
                                         soilcarbon_ss_emulator_total)
# soilcarbon_ss_emulator_total = np.where(mask_mic == 0, np.nan, soilcarbon_ss_emulator_total)
# soilcarbon_ss_emulator_total = np.where(mask_litr_input == 0, np.nan, soilcarbon_ss_emulator_total)
soilcarbon_ss_emulator_total_area = soilcarbon_ss_emulator_total * area * 10 ** 6
soilcarbon_ss_emulator_total_area_global = np.nansum(
    np.nansum(soilcarbon_ss_emulator_total_area, axis=1),
    axis=0)

#
log_soilcarbon_M_total = np.log10(soilcarbon_ss_emulator_total)
scalar_sd = 0.5
diff = log_soilcarbon_M_total - log_soilC_tot_area_glob
J = (diff ** 2) / (2 * (scalar_sd * log_soilC_tot_area_glob) ** 2)
J_new = np.nansum(np.nansum(J))
delta_J = J_new - J_old

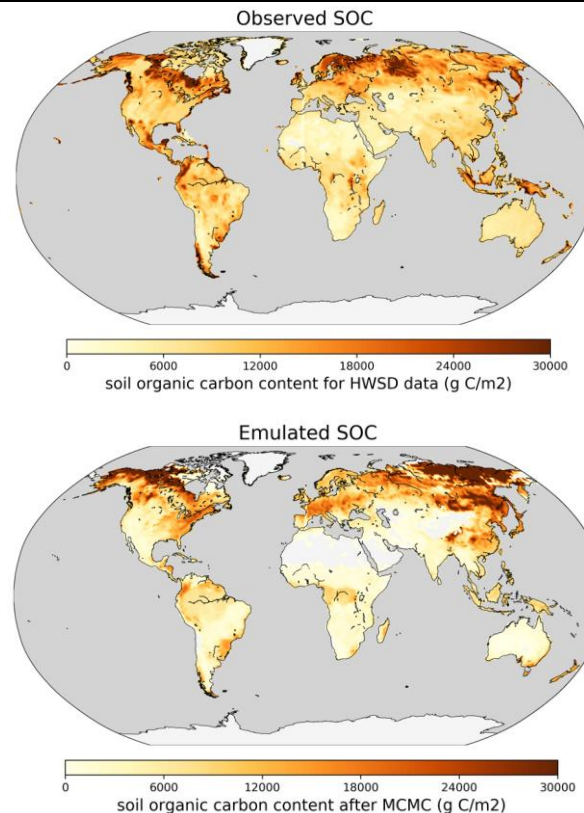
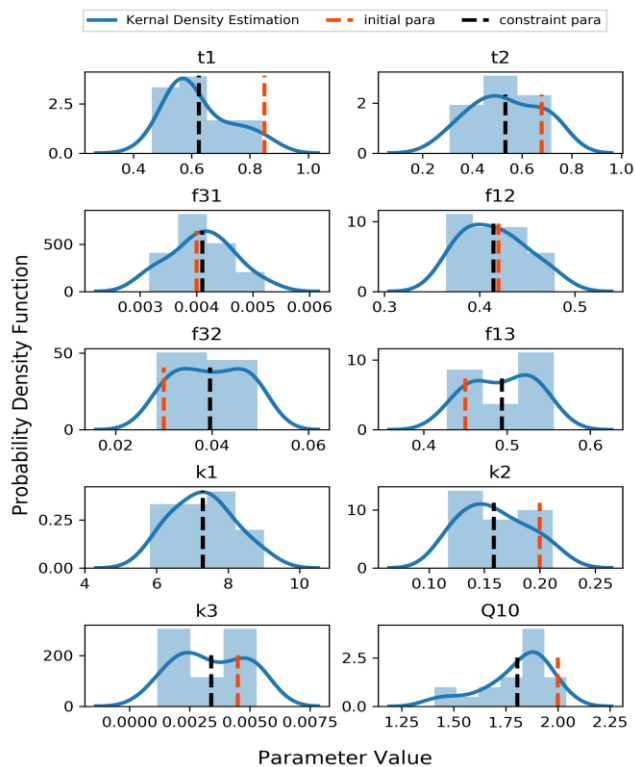
# with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):

if min(1, np.exp(-delta_J)) > random.random():
    para_write.writerow(par_new)
    Parameters_keep[upgrade, :] = par_new
    J_keep[upgrade] = J_new
    par_old = par_new
    J_old = J_new
    soilcarbon_ss_emulator_total1 = np.where(soilcarbon_ss_emulator_total > 0,
                                             soilcarbon_ss_emulator_total,
                                             np.nan)
    count_recode[upgrade] = np.nansum(np.nansum(soilcarbon_ss_emulator_total1, axis=1), axis=0)
    ss_recode[upgrade] = soilcarbon_ss_emulator_total_area_global
    soilcarbon_keep[upgrade, :, :] = soilcarbon_ss_emulator_total1
    upgrade += 1
```

3. 4 陆面模式碳循环的数据融合模块—运行步骤

3. 进入results目录查看运行结果

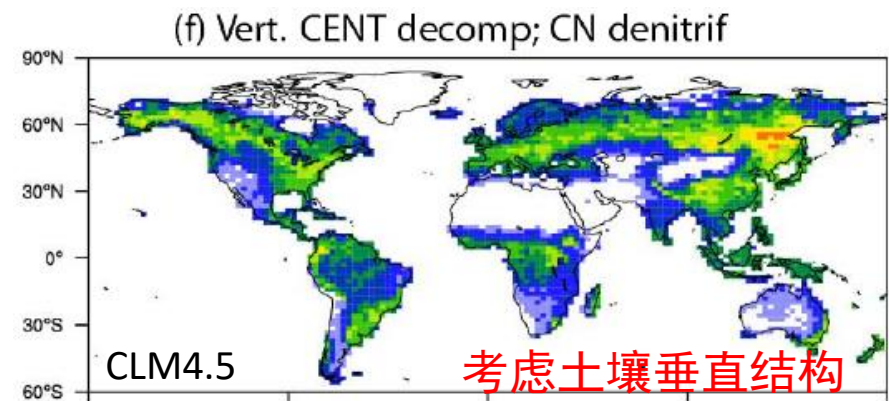
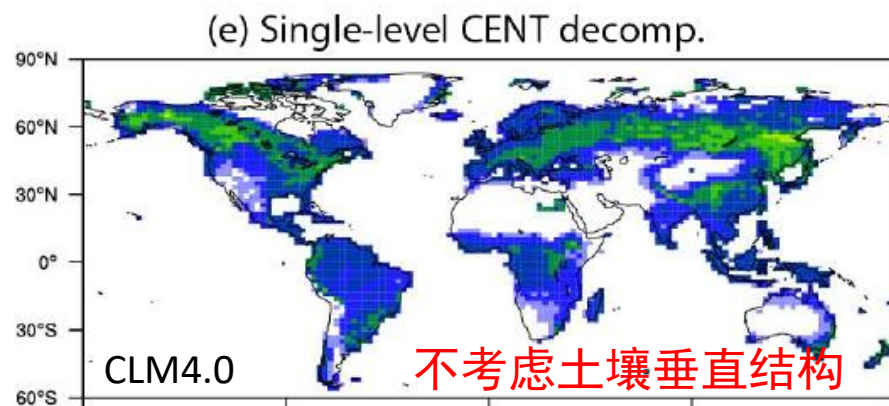
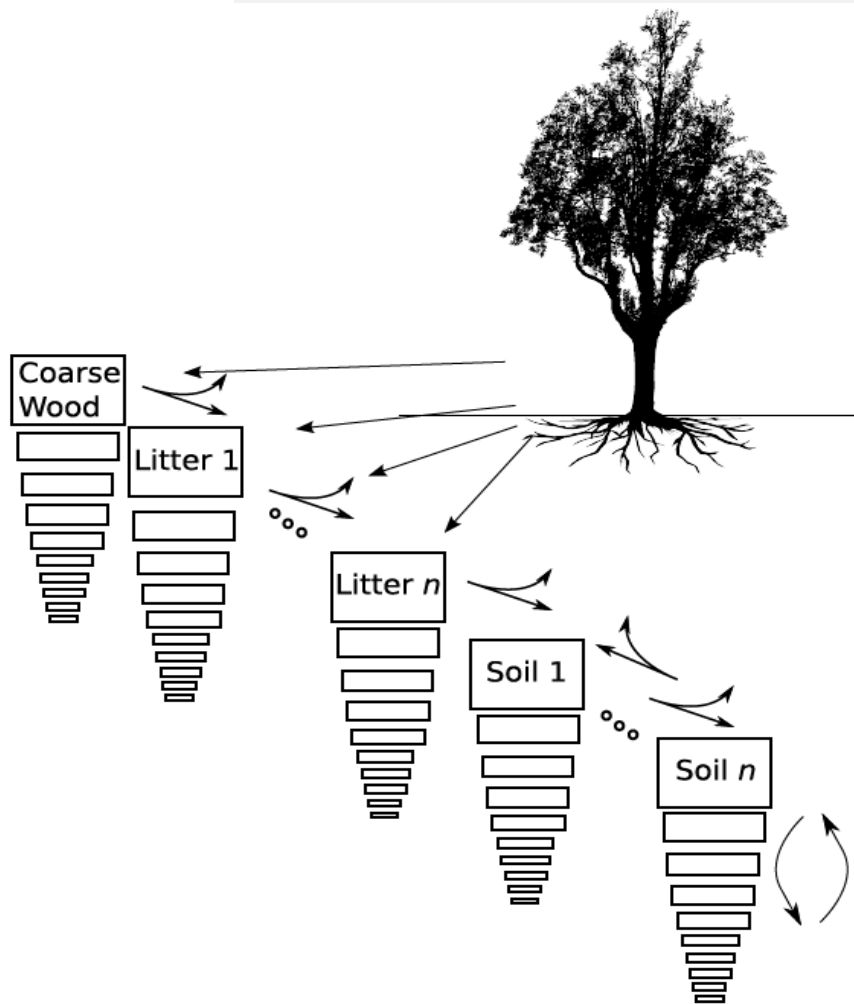
```
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ cd ..  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Data_Assimilation]$ ls  
Data_Assimilation_Module_Documentation.pdf README.md results src  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Data_Assimilation]$ cd results/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ ls  
Data_Assimilation_Result_Report.md output  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ cd output/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$ ls  
img_glob img_site MCMC_output_glob MCMC_output_site  
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$
```



3.5 陆面模式生物地球化学循环多源结构比较与优选模块

陆地碳氮循环的不同关键过程存在多种结构方案

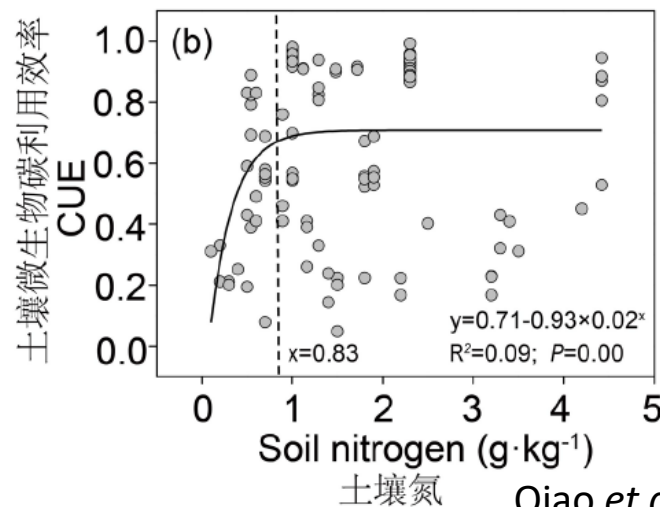
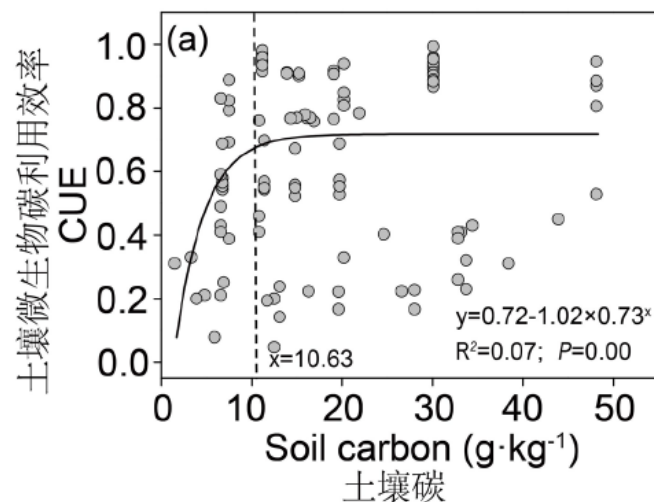
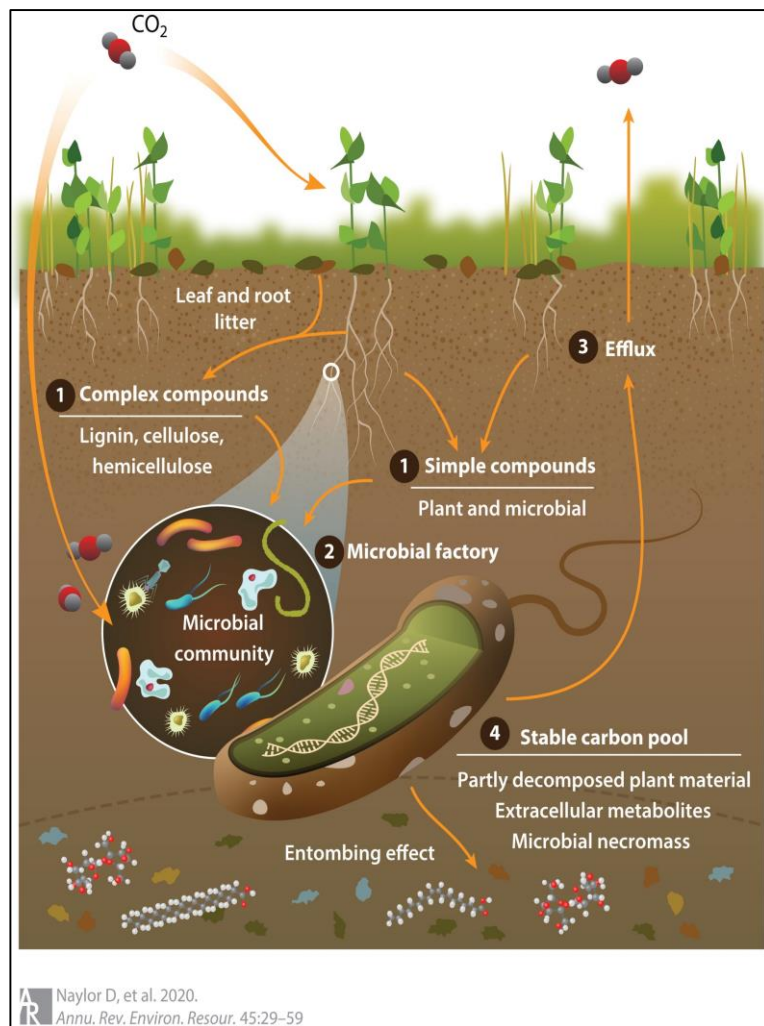
1. 不同土壤结构导致土壤有机碳模拟结果的巨大差异



3.5 陆面模式生物地球化学循环多源结构比较与优选模块

陆地碳氮循环的不同关键过程存在多种结构方案

2. 土壤有机碳氮含量与土壤微生物利用效率显著相关



3.5 陆面模式生物地球化学循环多源结构比较与优选模块—运行步骤

1. 进入模块脚本所在目录

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 land_carbon_diagnose]$ cd Multi-Module_Analysis/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Multi-Module_Analysis]$ ls  
Multi_Module_Analysis_Documentation.pdf  README.md  results  src  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Multi-Module_Analysis]$ cd src  
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ ls  
Multi_Module_Analysis_Main.py  Multi_Module_Analysis_Submodule.py  __pycache__
```

模块说明文档

MStr-BGC module documentation

1. MStr-BGC简介

随着模型的发展，融合了越来越多的过程和参数，因此使模型变得越来越复杂。增加过程所带来的增加模型现实度的同时，也增加了模型的不确定性，即不同模型间的模拟结果存在巨大差异。造成模型间差异的可能原因包括对氮吸收、微生物过程、土壤深度和死亡率等过程的不完整的理解和表示。

Multi-Structure BioGeoChemistry (MStr-BGC) 模块以CLM (Community Land Model) 模型为例，将原模型使用平衡方程描述的生态系统碳动态转化为对应的一阶矩阵方程。CLM4和CLM4.5的主要区别在于CLM4.5中增加了土壤垂直结构，因此本模块考虑了土壤垂直结构的差异对碳储量的影响。因此，本模块通过模拟不同土壤结构对生物地球化学循环模拟的影响，比较不同结构模型模拟的差异。以期借此选择性能最优的模型结构进行有针对性的模拟，进而提高陆面生态系统过程模型在区域尺度的模拟精度。

2. 数据来源

本模块中我们用来评价和限制模型的全球土壤有机碳数据来自于Harmonized World Soil Database (HWSD) 数据库。即MCMC模块中所用数据库，因此本篇不再赘述。

3. 微生物碳利用效率对土壤碳储量的影响

近年来随着人们对土壤微生物动力学机制的认识逐渐提高，一些模型中逐渐加入了土壤微生物过程。例如，将微生物过程纳入全球碳循环模拟可以提高模拟结果的准确性。在包含了微生物过程的土壤有机碳模型中，土壤微生物碳利用效率是一个重要参数。

由于微生物碳利用效率表示了微生物用于生长从碳与进入微生物体内总碳量的比值，这两部分不同的温度敏感性决定了微生物碳利用效率具有温度依赖性，随温度变化而变化。一般来说，呼吸作用随温度升高的幅度大于生长作用，因此，在土壤和水生生态系统中，微生物碳利用效率都呈现随温度的增加而逐渐降低的趋势。这种微生物碳利用效率随温度的变化趋势已经在土壤微生物过程表征土壤碳的模型中以线性方程的形式进行了表达：

$$CUE = CUE_0 + m(T - T_0) \quad (1)$$

其中， CUE_0 是参考温度下的微生物碳利用效率的值， m 是温度响应系数（即，温度每变化一度所引致的CUE变化的值）， T_0 是参考温度（一般是20°C）。

考察土壤微生物碳利用效率与纬度、经度、年均温、年降雨、土壤pH值之间没有显著线性相关关系，因此，本模块中采用Qiao (2019) 文章中土壤微生物碳利用效率公式对模型中转移系数加以限制：

$$CUE = 0.475 - 0.016 \times (T - 20) \quad (2)$$

Multi-Module Analysis模块用户操作手册

目录

1. 概要
2. 编译环境
3. 所需python模块
4. 所需输入数据
5. 模块构成说明
6. 运行Multi-Module Analysis Module
7. 输出结果说明

1. 概要

随着模型的发展，融合了越来越多的过程和参数，因此使模型变得越来越复杂。增加过程所带来的增加模型现实度的同时，也增加了模型的不确定性，即不同模型间的模拟结果存在巨大差异。造成模型间差异的可能原因包括对氮吸收、微生物过程、土壤深度和死亡率等过程的不完整的理解和表示。因此，本模块通过模拟不同土壤结构对生物地球化学循环模拟的影响，比较不同结构模型模拟的差异。以期借此选择性能最优的模型结构进行有针对性的模拟，进而提高陆面生态系统过程模型在区域尺度的模拟精度。

陆面模式生物地球化学循环多源分析 (Multi-Module Analysis) 模块以CLM模型为基础，根据是否包含垂直土壤结构以及是否包含微生物碳利用效率分为四个版本，四个版本紧密耦合在一起，均具有读取并处理数据、计算模拟结果、输出文件、绘图保存等功能。本手册对MStr-BGC模块的编译环境、输入文件、系统流程、输出文件进行了详细的介绍，并对如何应用本模块进行不同结构的模型模拟给出了详细指导，可作为模块操作方法指南。

2. 编译环境

操作系统: Linux
编译环境: Python3

陆面模式生物地球化学循环多源分析模块 (Multi-Module Analysis) 主要由Python3.7 编写。因此在运行此模块之前，您需要在您的电脑中安装并配置python编译环境。

以下为在Unix & Linux 平台上安装Python的简单步骤：

- 访问Python官网 (<https://www.python.org/>)，下载适用于您系统版本的源码
- 以 Python 3.7.2 版本为例：

```
tar -zxvf Python-3.7.2.tgz  
cd Python-3.7.2  
./configure  
make
```
- 检查Python3是否正常可用：

```
python3 --version
```


3.5 陆面模式生物地球化学循环多源结构比较与优选模块—运行步骤

1. 进入模块脚本所在目录

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 land_carbon_diagnose]$ cd Multi-Module_Analysis/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Multi-Module_Analysis]$ ls  
Multi_Module_Analysis_Documentation.pdf  README.md  results  src  
(ecnu_env) [wujx01@login03 Multi-Module_Analysis]$ cd src  
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ ls  
Multi_Module_Analysis_Main.py  Multi_Module_Analysis_Submodule.py  __pycache__
```

```
if __name__ == "__main__":  
  
    print('Do you want to use soil vertical structure in the model? (0-no/1-yes)')  
    use_vert_soilC = int(input('Please enter the number (0-no, 1-yes):' ))  
    print('Do you want to use soil microbial CUE in the model? (0-no/1-yes)')  
    use_CUE = int(input('Please enter the number (0-no, 1-yes):'))  
  
    nspools = 7  
    nspools_vr = 70 # number of pools if vertical  
    nlev_decomp = 10 # number of soil layers  
  
    # Read soil depth data  
    path_in = os.path.abspath('../..')  
    filepath = path_in + '/Input_data_for_test'  
    Sdep_path = filepath + '/soildepth.mat'
```

```
for n in range(nstep-1):  
    # vertical matrix  
    vert_mat = vert_matrix(use_vert_soilC, altmax_in[n, ilat, ilon], altmax_lastyr_in[n, ilat, ilon], zsoi, zisoi, dz)  
  
    # tranfer matrix  
    if use_vert_soilC:  
        A_mat = a_matrix(use_vert_soilC, use_CUE, cellsand[n, :, ilat, ilon], TSOI_vr[n, :, ilat, ilon])  
    else:  
        A_mat = a_matrix(use_vert_soilC, use_CUE, cellsand[n, :, ilat, ilon], TSOI_suf[n, ilat, ilon])  
  
    # print('A_mat = ', A_mat)  
    # K matrix  
    K_mat = k_matrix(use_vert_soilC, wscalar_in[n, :, ilat, ilon], tscalar_in[n, :, ilat, ilon], oscalar_in[n, :, ilat, ilon],  
nscalar_in[n, :, ilat, ilon], zsoi)
```

3.5 陆面模式生物地球化学循环多源结构比较与优选模块—运行步骤

2. 运行模块主程序并根据需求选择不同的模型结构

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 src]$ python Multi_Module_Analysis_Main.py
-->> Could not load xarray!! <<--
Do you want to use soil vertical structure in the model? (0-no/1-yes)
Please enter the number (0-no, 1-yes):0
Do you want to use soil microbial CUE in the model? (0-no/1-yes)
Please enter the number (0-no, 1-yes):0
Now in reading data ...
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-1.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-2.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-3.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-4.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-5.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-6.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-7.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-8.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-9.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-10.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-11.nc
/data/wujx01/EARthLab_UQ/land_carbon_diagnose/Input_data_for_test/clm45_output_1980/i.cor.ihistcplclm45bgc.f09_g16.clm2.h0.1980-12.nc
Now in calculating ...
Now output results ...
Create output directory ...
Path already exists.
Path already exists.
Path already exists.
Now plot gloabl map figures ...
```

3.5 陆面模式生物地球化学循环多源结构比较与优选模块—运行步骤

3. 进入results目录查看相应运行结果

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Multi-Module_Analysis]$ cd results/
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ ls
Multi_Module_Analysis_Result_Report.md  output
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ cd output/
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$ ls
NoVert_CUE  NoVert_NoCUE  Vert_CUE  Vert_NoCUE
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$ cd NoVert_NoCUE/
(ecnu_env) [wujx01@login03 NoVert_NoCUE]$ ls
Cpool_output_NoVert_NoCUE.nc  Emu2Obs_SOC_NoVert_NoCUE.csv  figure
(ecnu_env) [wujx01@login03 NoVert_NoCUE]$ █
```

模拟情况设置说明：

是否考虑土壤垂直结构

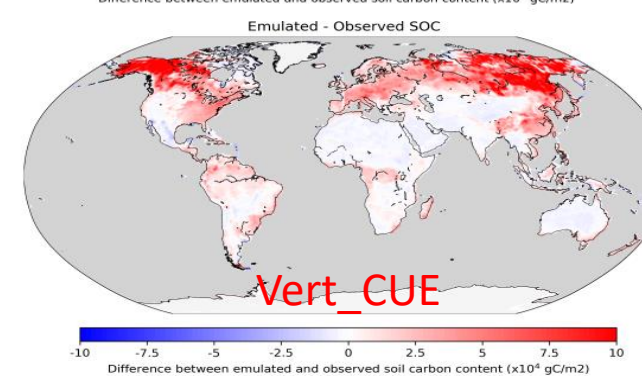
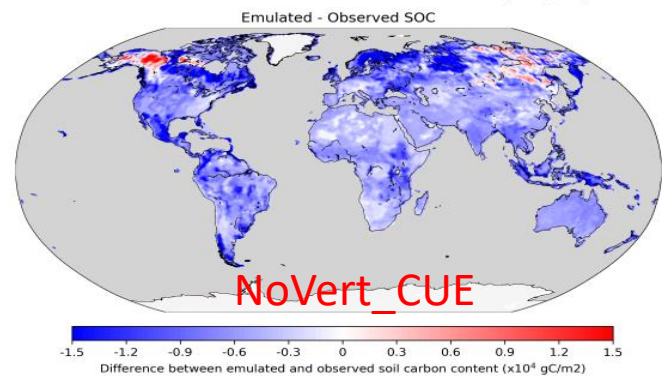
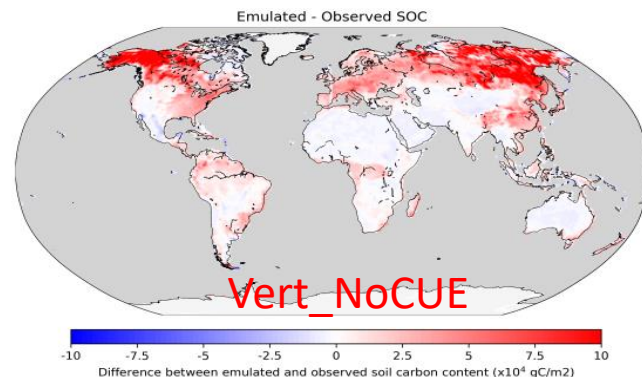
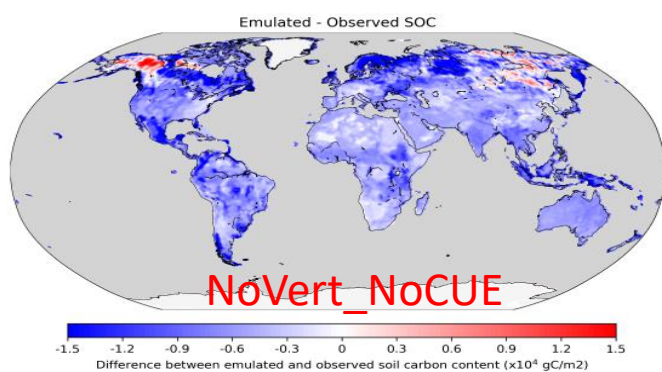
是否考虑微生物碳利用效率

use_vertical	use_CUE	name	description
0	0	NoVert_NoCUE	不考虑土壤垂直结构及微生物碳利用效率
0	1	NoVert_CUE	不考虑土壤垂直结构但考虑微生物碳利用效率
1	0	Vert_NoCUE	考虑土壤垂直结构但不考虑微生物碳利用效率
1	1	Vert_CUE	考虑土壤垂直结构同时 考虑微生物碳利用效率

3.5 陆面模式生物地球化学循环多源结构比较与优选模块—运行步骤

3. 进入results目录查看相应运行结果

```
(ecnu_env) [wujx01@login03 Multi-Module_Analysis]$ cd results/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ ls  
Multi_Module_Analysis_Result_Report.md  output  
(ecnu_env) [wujx01@login03 results]$ cd output/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$ ls  
NoVert_CUE  NoVert_NoCUE  Vert_CUE  Vert_NoCUE  
(ecnu_env) [wujx01@login03 output]$ cd NoVert_NoCUE/  
(ecnu_env) [wujx01@login03 NoVert_NoCUE]$ ls  
Cpool_output_NoVert_NoCUE.nc  Emu20obs_SOC_NoVert_NoCUE.csv  figure  
(ecnu_env) [wujx01@login03 NoVert_NoCUE]$ █
```



4. 交流讨论

问题 1: 快速启动模块如何与模式默认的Spinup方法结合?

NCAR Community Terrestrial Systems Model (CTSM) 的最新应用:

1. Spinup model to equilibrium with default params
2. From previous spinup, perturb parameter
3. 20 years Accelerated Decomposition (AD) spinup - provides good initial estimate of NPP
4. 80 years Semi-Analytical Spin-Up (SASU, "Step 3")
5. 40 years Native Dynamics

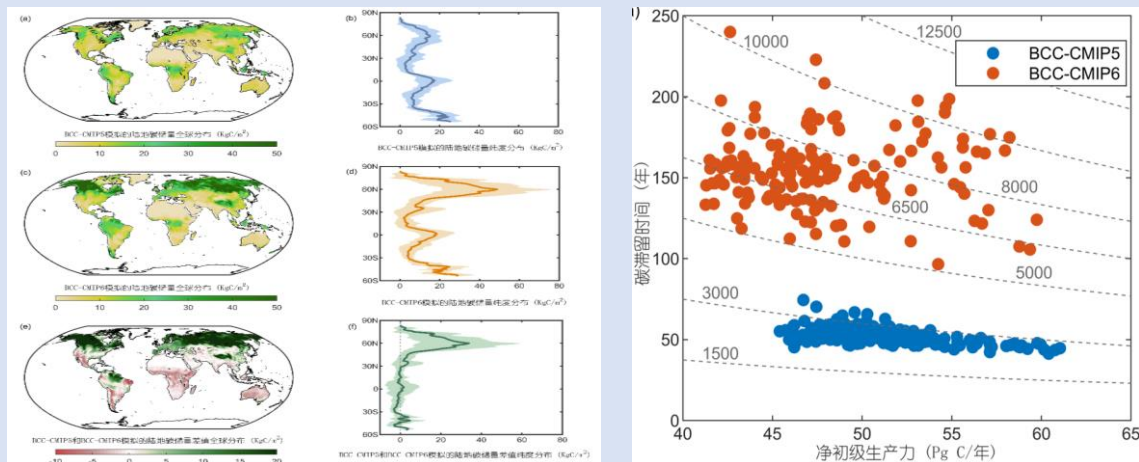
140 total years;

- Compares to 445 years for cnmatrix step 0-4 spinup sequence
- Compares to ~1500 years for AD/pAD

问题 2: 如何陆面模式发展新版本, 能否评估新旧版本的变化?

BCC模式在CMIP5与CMIP6中的对比分析:

- 陆面模式溯源性诊断模块的功能之一
- 以陆地碳循环为例, 如果对模型结构进行了大量修改, 需重新进行矩阵化表达等工作



谢谢！

