



# 地球系统模式CAS-ESM简介

报告人：张贺

2023-06-07



# 报告提纲



1

CAS-ESM简介

2

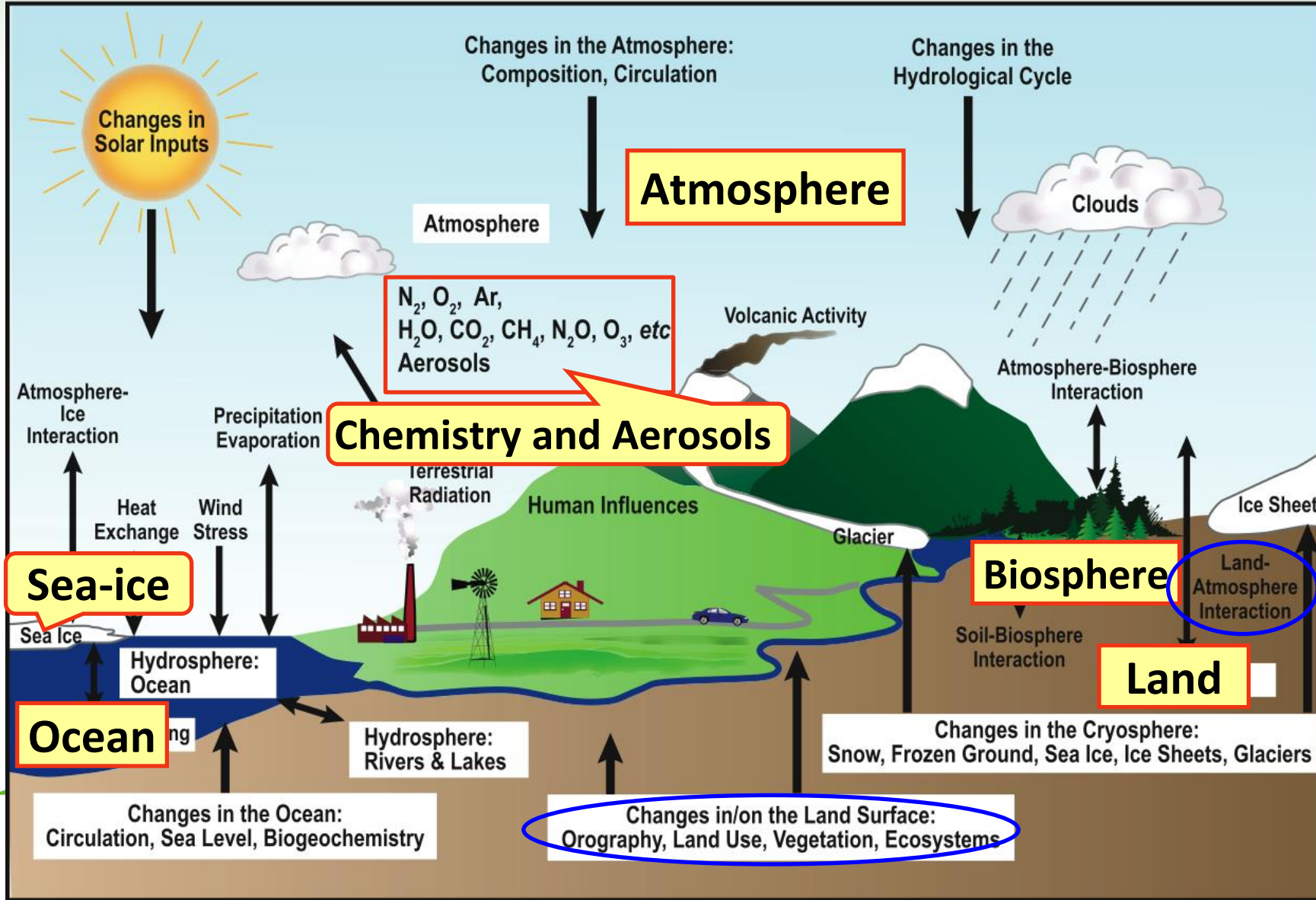
CAS-ESM2模拟性能

3

CAS-ESM开放共享



# 地球系统的构成



地球五大圈层间密切相关，存在复杂的相互作用，只有把它们作为一个整体来研究，才能深入理解各种自然现象和灾害事件的发生发展机理，进而准确预测气候变化及其对生态和环境的影响。

# 中科院地球系统模式CAS-ESM的构成

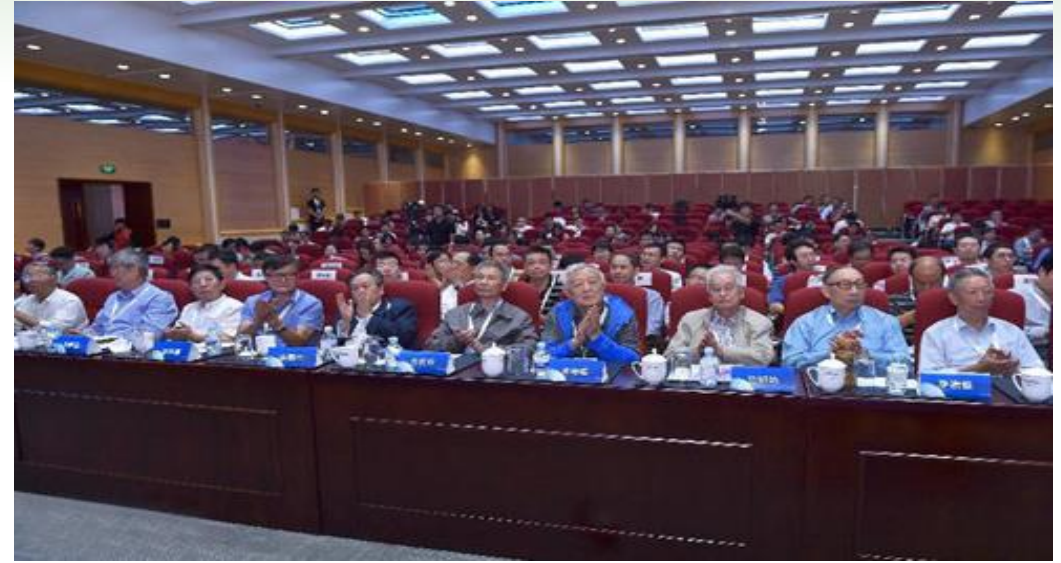


分量模式	模式名称	研发单位	参考文献
大气	IAP AGCM5.0	大气所	Zhang et al. (2020)
海洋	LICOM2	大气所	Liu et al. (2012) Jin et al. (2020)
陆面	CoLM	中山大学/北师大	Dai et al. (2003)
海冰	CICE4	LNAL, USA	
大气化学和气溶胶	IAP AACM	大气所	Wei et al. (2019)
动态植被	IAP DGVM	大气所	Zeng et al. (2013) Zhu et al., (2018)
海洋生物地球化学	IAP OBGCM	大气所	Xu et al. (2013)
陆地生物地球化学	CoLM	北师大	Ji and Dai (2013)

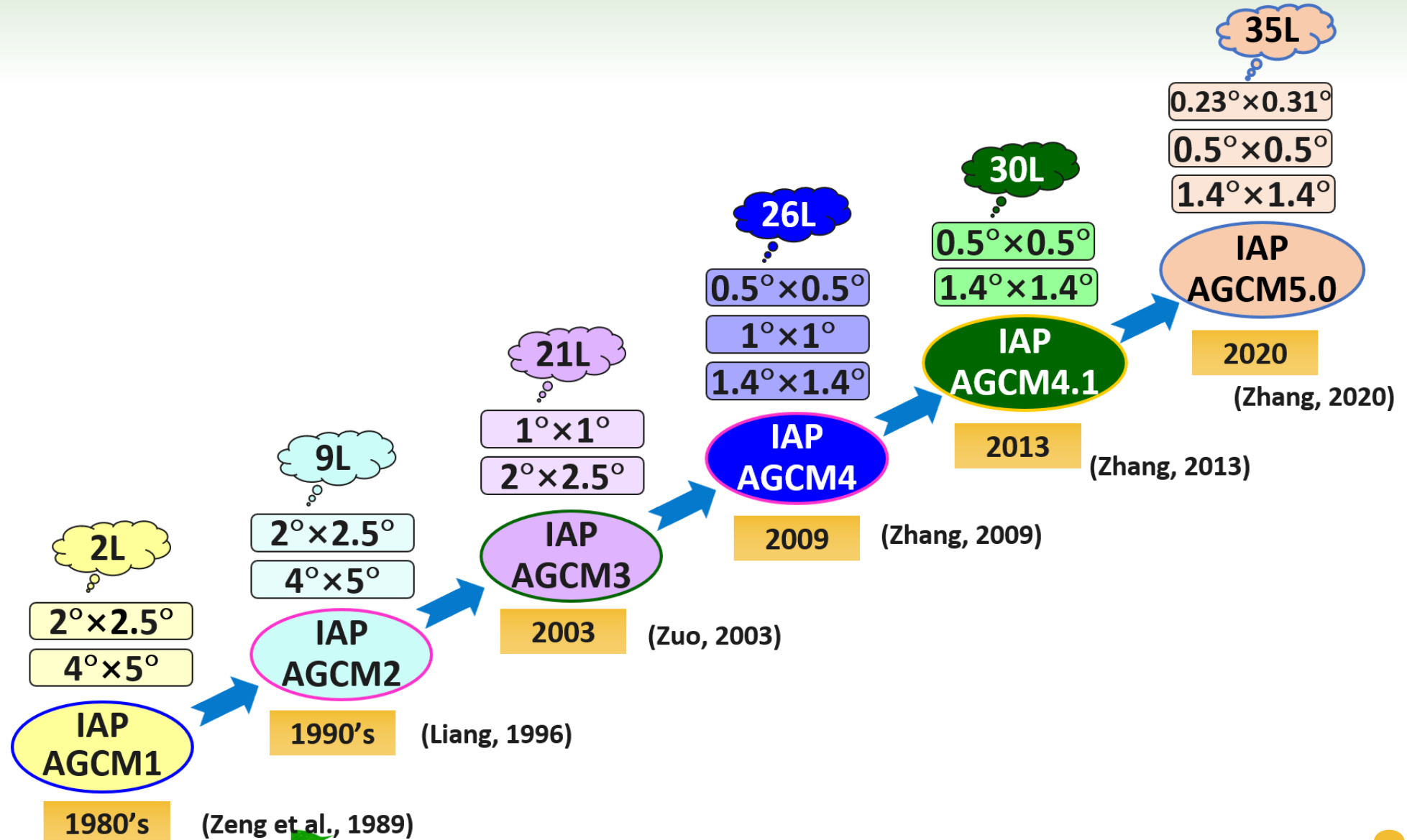
- CAS-ESM1.0于2015年9月发布;
- CAS-ESM2.0于2020年1月定型



# 2015年9月23日, CAS-ESM1.0在北京发布



# IAP AGCM发展历史



# IAP AGCM5.0概况

- **离散方法：**有限差分法（C网格）
- **分辨率：** $1.4^\circ(\text{lat}) \times 1.4^\circ(\text{lon}) \times 35\text{L}$
- **垂直坐标：** $\sigma$ 坐标，35层，模式顶约2.2 hPa
- **时间积分方案：**非线性迭代 + 时间分解算法
- **水平扩散方案：**水平二阶非线性扩散方案
- **水汽平流方案：**半拉格朗日方案
- **并行方案：**基于三维网格剖分的MPI并行



# IAP AGCM5.0动力框架

动力框架需具备较好的**稳定性**，**准确性**和**高效性**

- 标准层结扣除
- IAP变换
- 总有效能量守恒
- 非线性迭代积分方案
- 滤波和平滑
- 质量和能量修正
- 时间分解算法
- 高纬灵活性跳点
- 半拉格朗日水汽平流方案
- 可允许替代



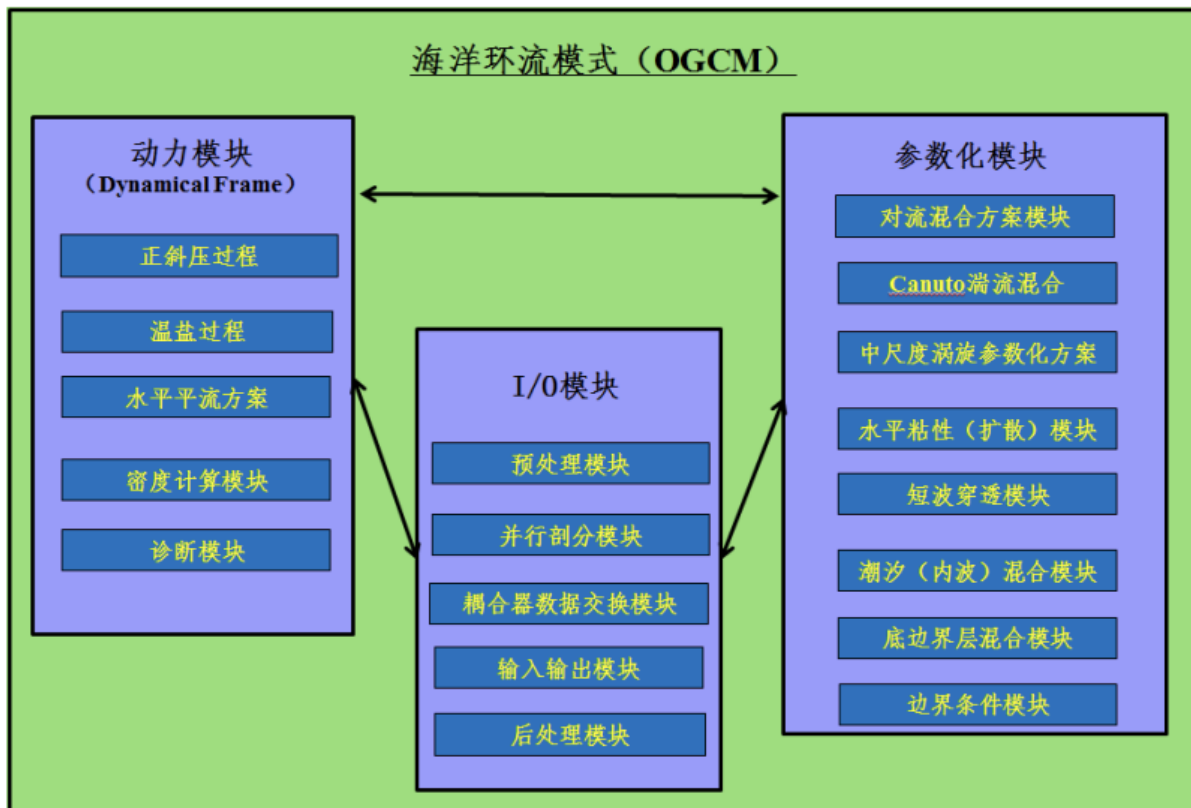


# 模式物理过程

- **边界层**: UW Diagnostic TKE, (Bretherton et al., 2009)
- **浅对流**: ECP (Xie et al., 2015; Zhang et al., 2020)
- **深对流**: ECP (Xie et al., 2015; Zhang et al., 2020)
- **云宏观物理**: UW Cloud Macrophysics, (Park et al., 2014 ; Zhang et al., 2020)
- **云微物理**: Double Moment, (Morrison and Gettelman, 2008 ; Zhang et al., 2020)
- **辐射**: RRTMG, (Iacono et al., 2008)
- **气溶胶**: Modal Aerosol Model, (Liu et al., 2012)/ IAP AACM
- **大气化学**: MOZART, (Emmons et al., 2010)/ IAP AACM



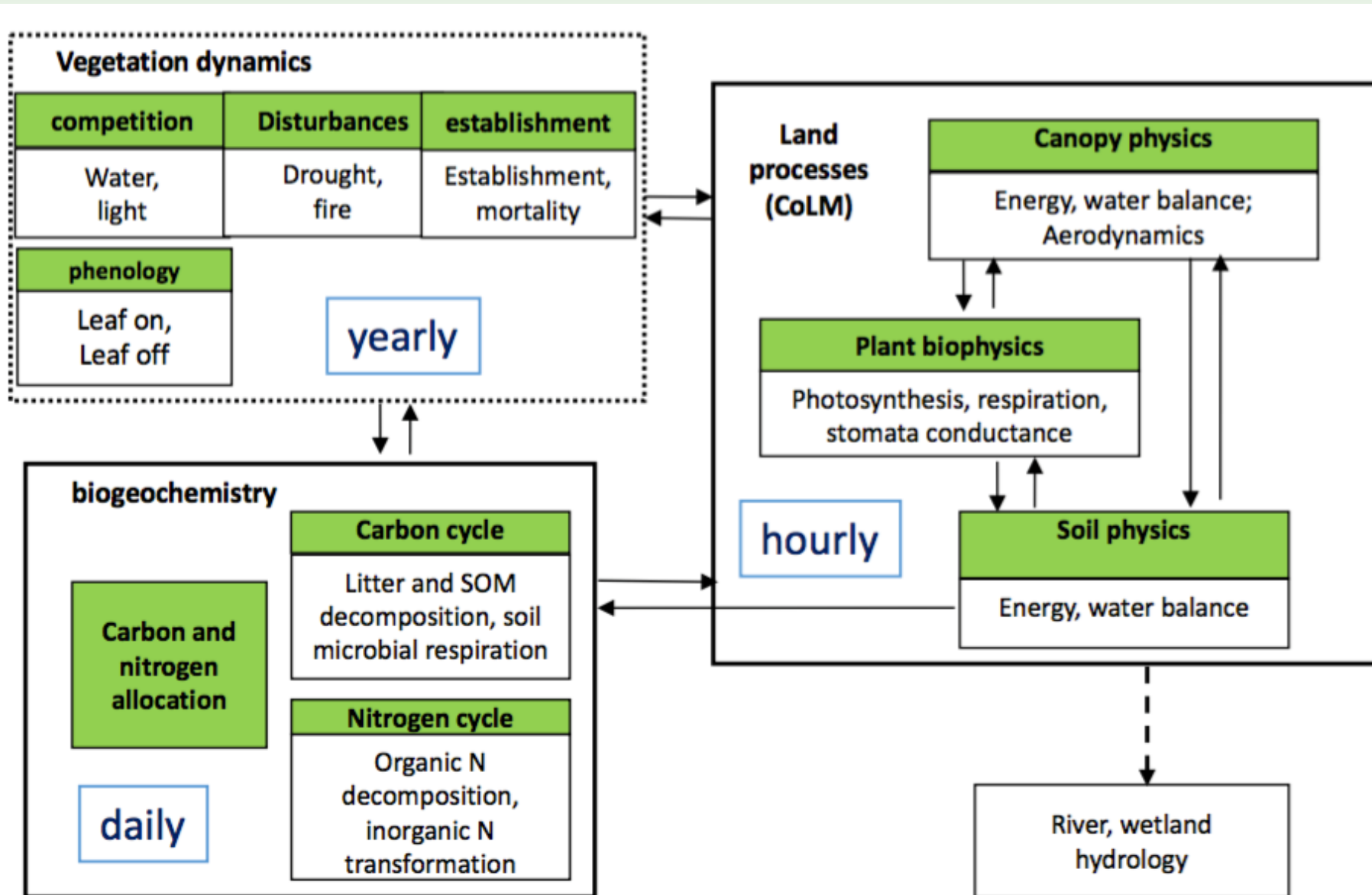
# 海洋环流模式-LICOM



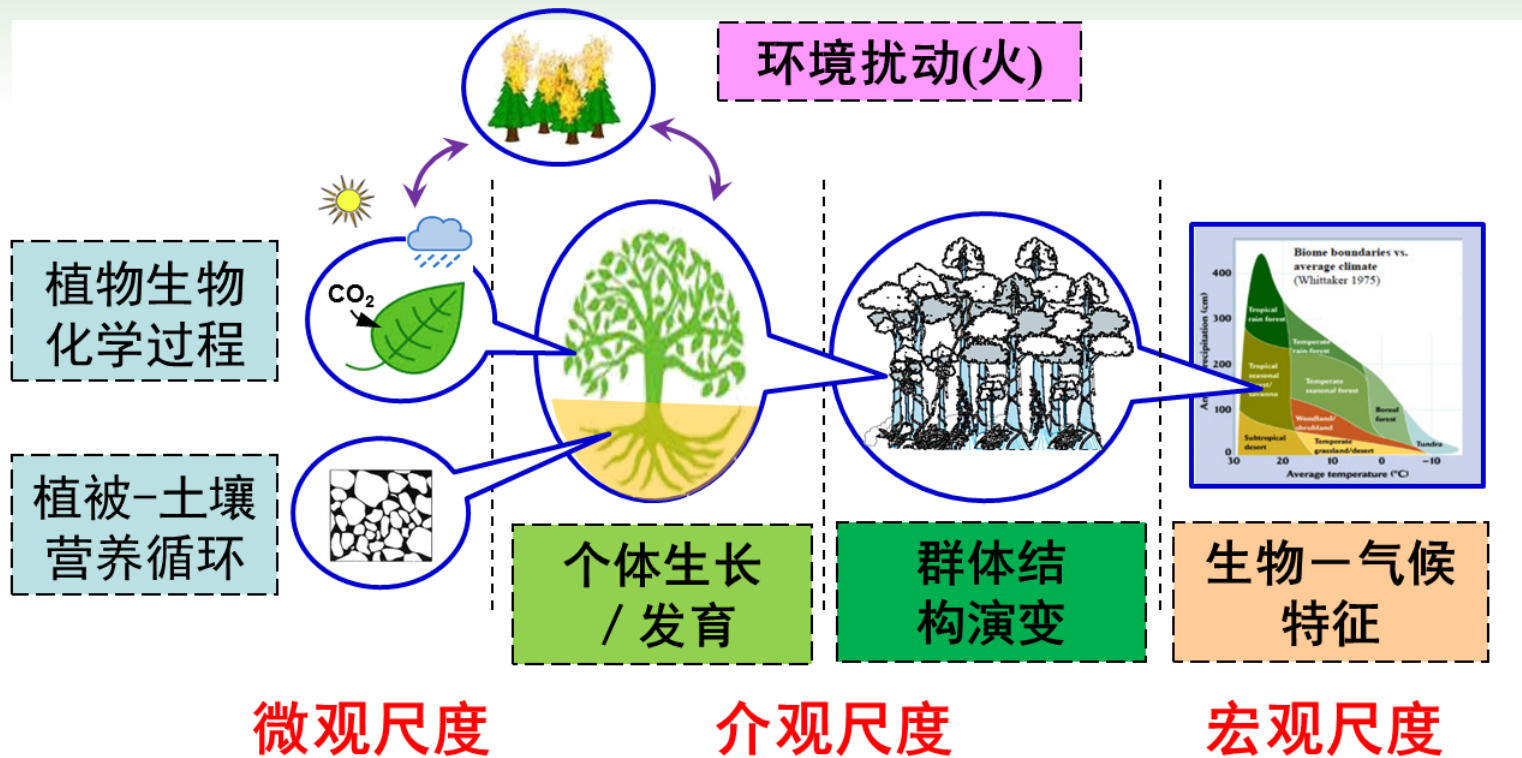
	Resolution / Domain	References
1 <sup>st</sup>	4°×5°, 4 levels ; 60°S-60°N	Zhang et al. 1989
2 <sup>nd</sup> L20	4°×5°, 20 levels ; global	Zhang et al. 1996
3 <sup>rd</sup> L30T63	T63(1.875°×1.875°), 30 levels ; global	Jin et al. 1999
4 <sup>th</sup> LICOM1.0	1° / 0.5°, 30 levels global	Liu et al. 2004
5 <sup>th</sup> LICOM2.0	1° x0.5°~1°/ 0.1°, 30 levels global	Liu et al. 2012
6 <sup>th</sup> LICOM3.0	1°/ 0.1°, 55 levels global	Yu et al. 2018



# 陆面及陆地生化模式-CoLM



# 植被动力学模式 IAP DGVM 框架



微观尺度

介观尺度

宏观尺度

- 光合作用, 植物呼吸作用
- 土壤营养循环及土壤呼吸

- 物候、分配、冠层结构、死亡

- 萌衍、光竞争
- 群体特征结构
- 空间非均匀性

- 生物气候限制条件
- 个体特性的变化
- 物种特性的演变



# 大气化学和气溶胶模式IAP AACM

☑ 采用地形追随高度经纬度坐标，水平分辨率可调，多层嵌套垂直20层，模式顶20 km

☑ GWRP气象驱动

☑ 动态和静态排放源相结合

☑ 物理过程：

平流、扩散、对流、重力沉降、干沉降、湿沉降、气溶胶微物理

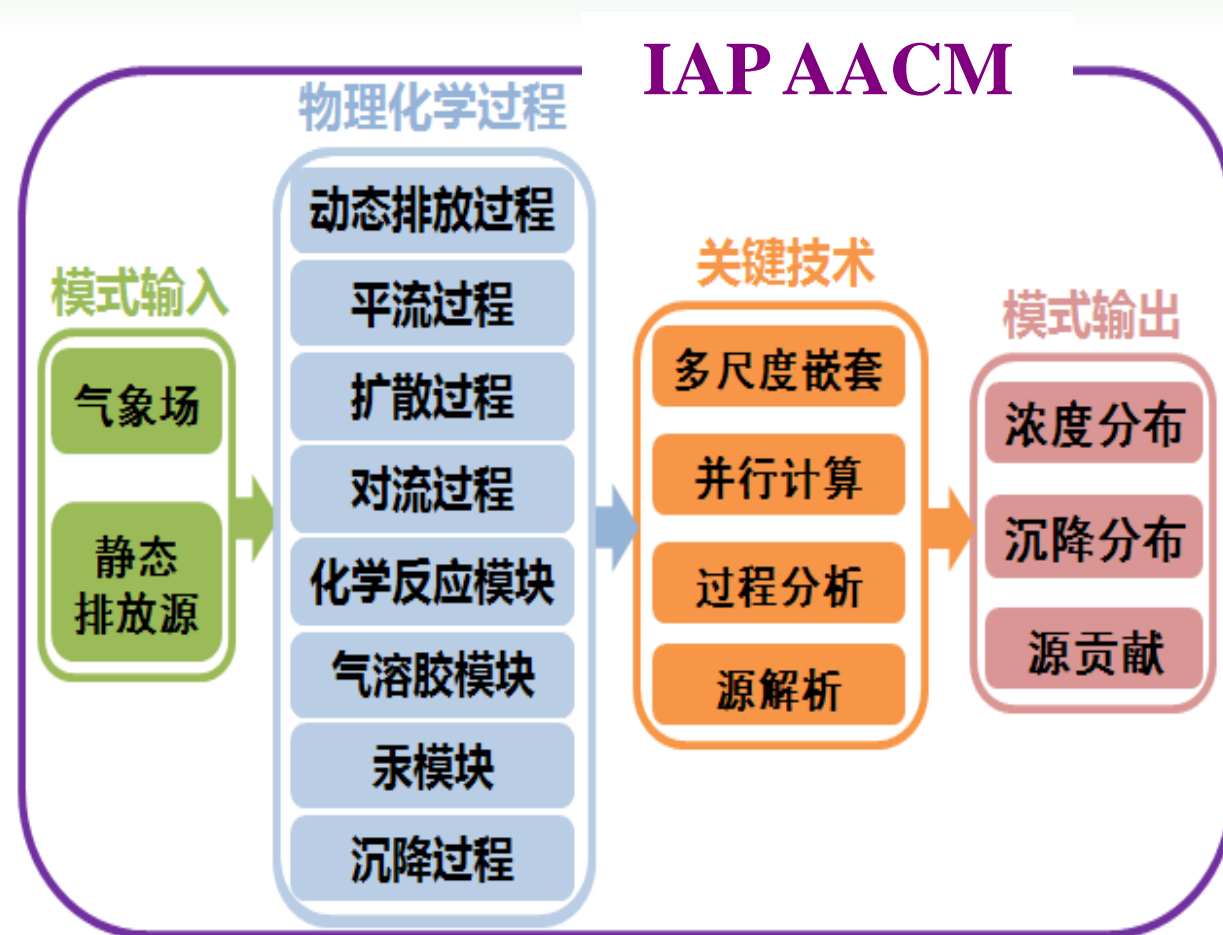
☑ 化学过程：

气溶胶化学（无机、SOA）、非均相化学、气相化学、液相化学、汞化学

☑ 辅助诊断分析功能：

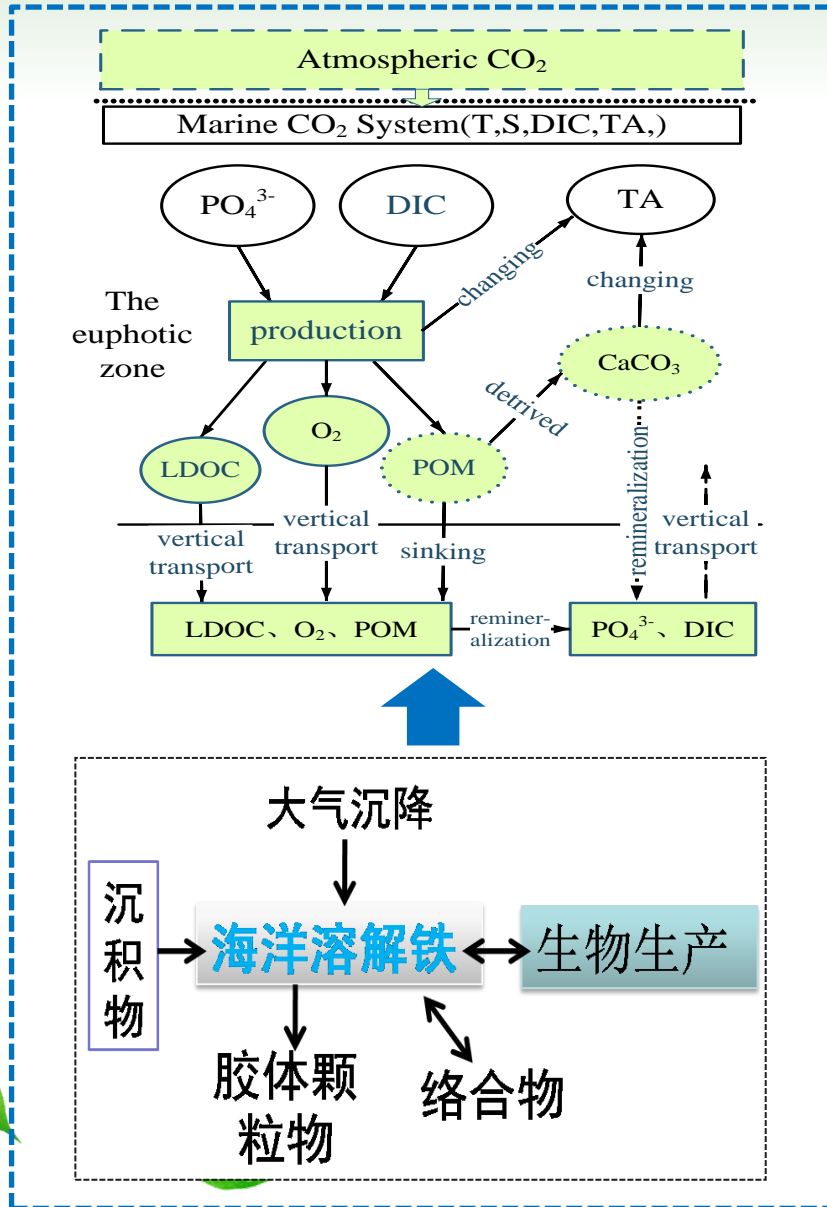
消光系数、AOD、O<sub>3</sub>生成效率、PH值、能见度、源识别与追踪、过程分析

☑ 模拟物种包括O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO等痕量气体及沙尘、海盐、黑碳、有机碳、硫酸盐、硝酸盐、SOA等气溶胶、重金属Hg

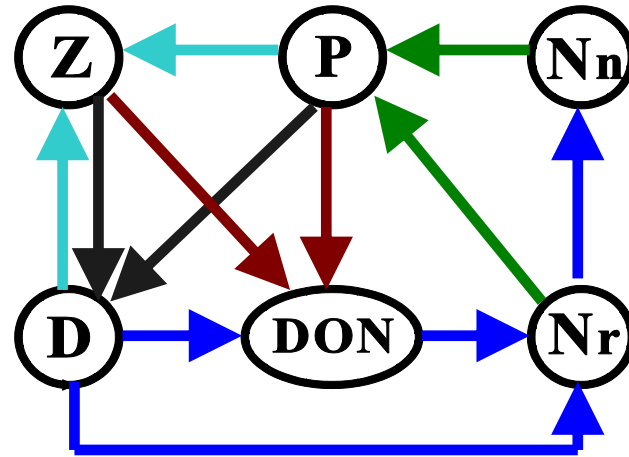


# 海洋生物地球化学模式 IAP OBGCM

生物地球化学过程



N: 营养盐  
P: 浮游植物  
Z: 浮游动物  
D: 碎屑



生态过程

Nn: 硝酸盐    Nr: 铵盐  
DON: 溶解有机氮



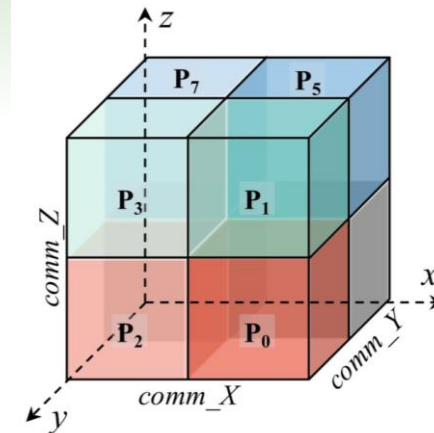
# CAS-ESM2 相比CAS-ESM1的改进

Components	CAS-ESM1	CAS-ESM2
大气模式 (IAP AGCM)	IAP AGCM4.1 1.4°×1.4°×30L	IAP AGCM5.0 (1.4°×1.4°×35L) 分辨率提高和算法的改进；新的或改进的对流、云宏观物理、云微物理、边界层和地形拖曳参数化方案
海洋模式 (LICOM)	LICOM2	改进了盐度边界条件 可灵活更改海气耦合频次
陆面模式(CoLM)	CoLM	引入了新的多层土壤碳方案 引入新的起沙方案
植被动力学模式	IAP DGVM	更新了火模块
耦合器	改进后的CPL7	CAS CPL7 (支持三维耦合) 引入了新的海汽湍流通量方案

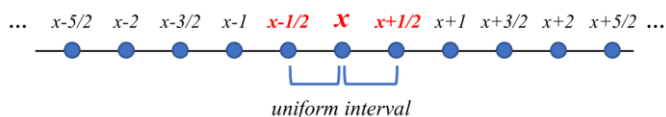


# 设计局地滤波方案，实现三维并行，提高了计算速度

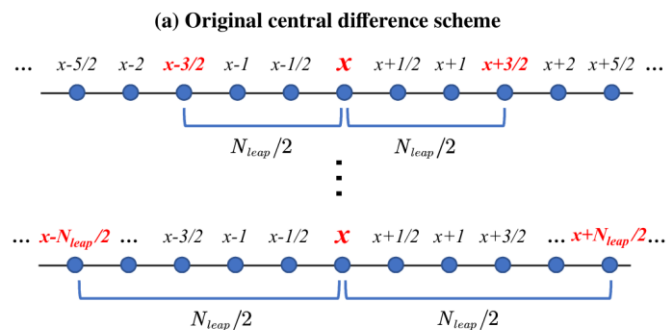
- 模式原有的FFT滤波在纬向全局依赖，难以在纬圈进行并行剖分。设计了自适应跳点局地滤波方案，实现了三维剖分的并行算法，可扩展性从7000核提高到百万核量级，大大提高了计算速度。
- 在模拟器上实现了全机20W核（3200节点，单节点64 CPU核）稳定运行；理想试验计算速度达到7.4模式年/天，相比8192核的并行效率达到了32%



三维并行剖分

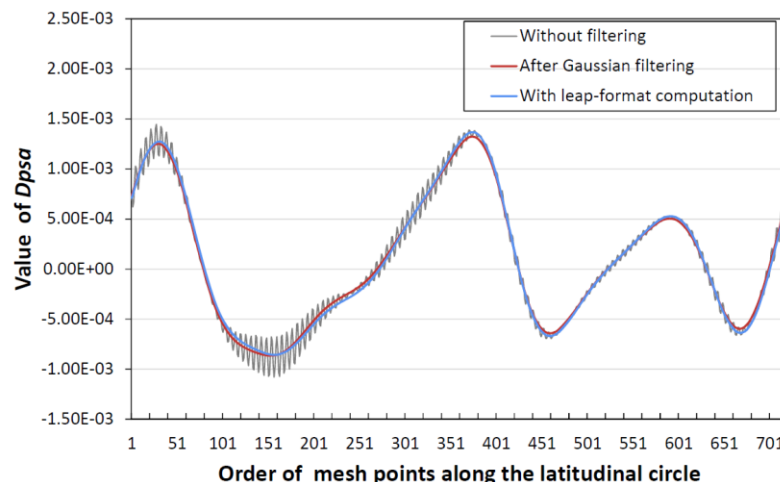


(a) 原始中央差分

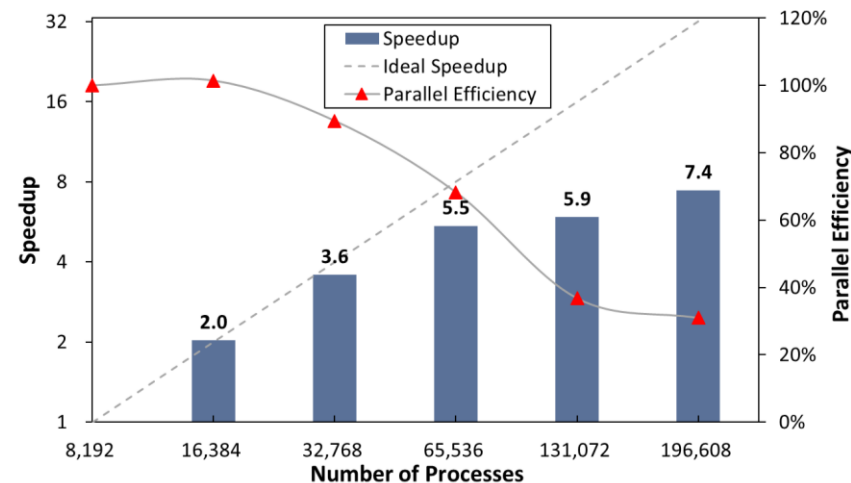


(b) 新的跳点中央差分

自适应跳点局地滤波方案



自适应跳点滤波效果



大规模并行测试

(Cao, Zhang\*, et al., 2020)



# 新的对流参数化方案提高了降水日变化的模拟

## Triggers:

$$t_r = t_{r1} \times t_{r2} \times t_{r3} \times t_{r4}$$

$$t_{r1} = (CAPE > CAPE^*); CAPE^* = CAPE_{lmt}(1 + Random)$$

$$t_{r2} = (DCAPE > DCAPE^*)$$

$$t_{r3} = (\omega_{k750} < -1.0e^{-3} \times Random_w)$$

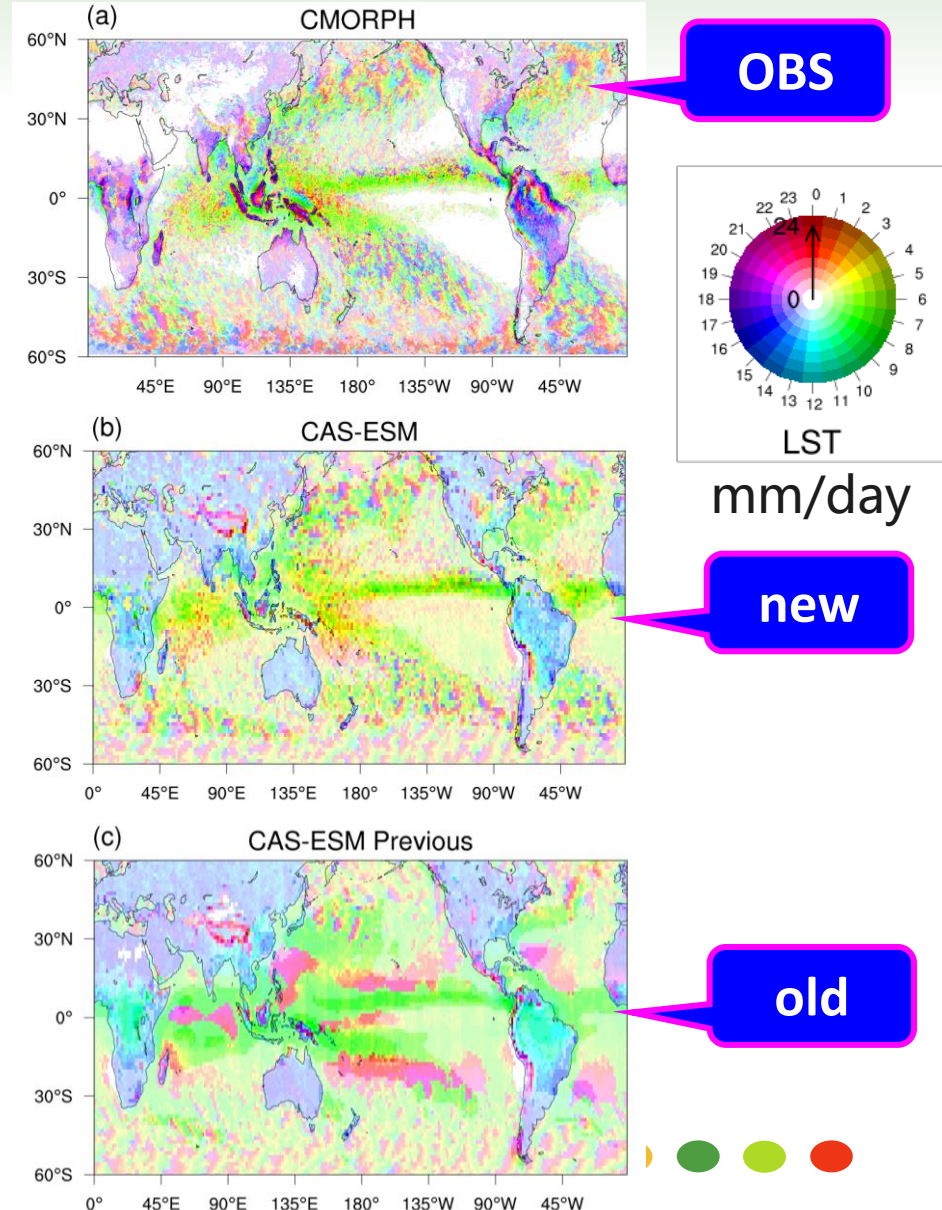
$$t_{r4} = (\overline{RH} > 0.8)$$

## Closure:

$$m_b = m_{b-} e^{-t/\tau_1} + m_{b+} (1 - e^{-t/\tau_2})$$

$$m_{b+} = -\frac{CAPE - CAPE_0}{\tau} / \left( \frac{dCAPE}{dm_b} \right),$$

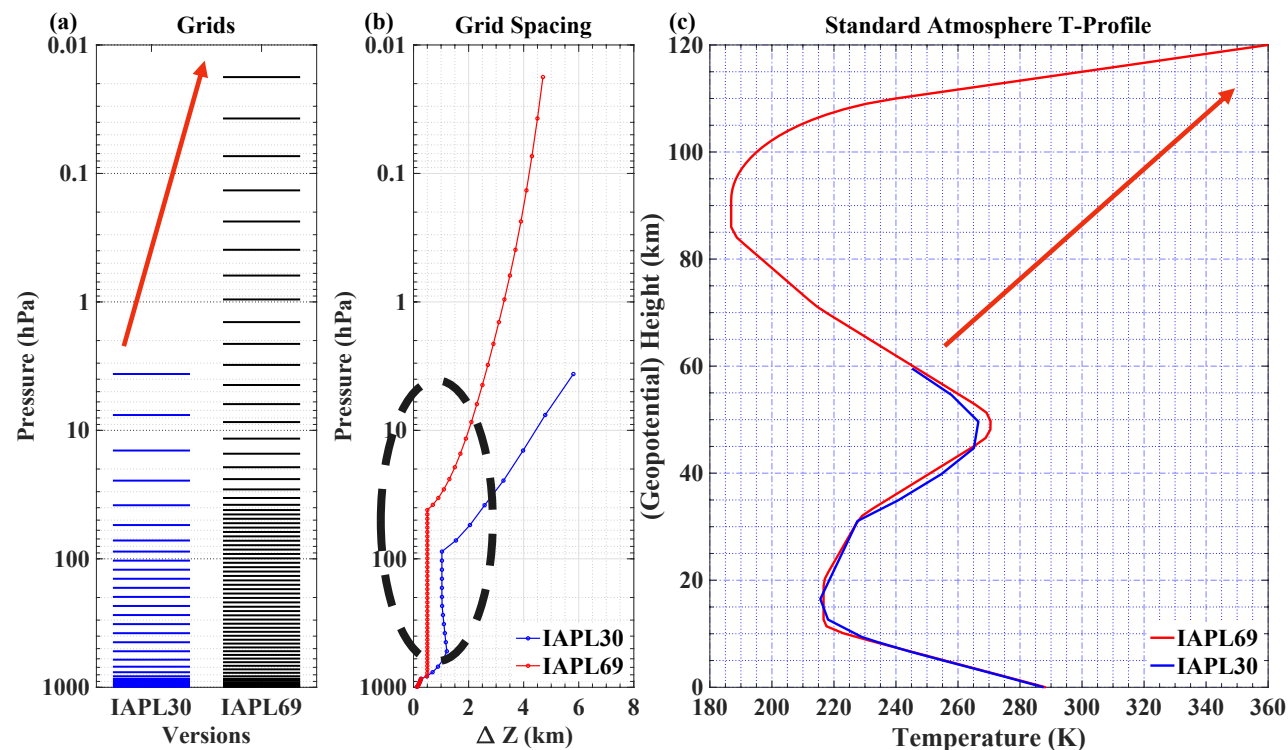
$m_{b-1}$  from previous time step



# 发展了中高层大气模式

## IAPL30 ==> IAPL69

指标	低层模式	高层模式
模式层顶高度	2.26 hPa	0.01 hPa
垂直层数	30	69
垂直分辨率	—	提高1-2倍
标准层结廓线	60 km	120 km
动力过程步长	200 s	100/150 s
DP耦合步长	1200/1800 s	600/1200 s
重力波参数化	地形	地形/锋生/对流



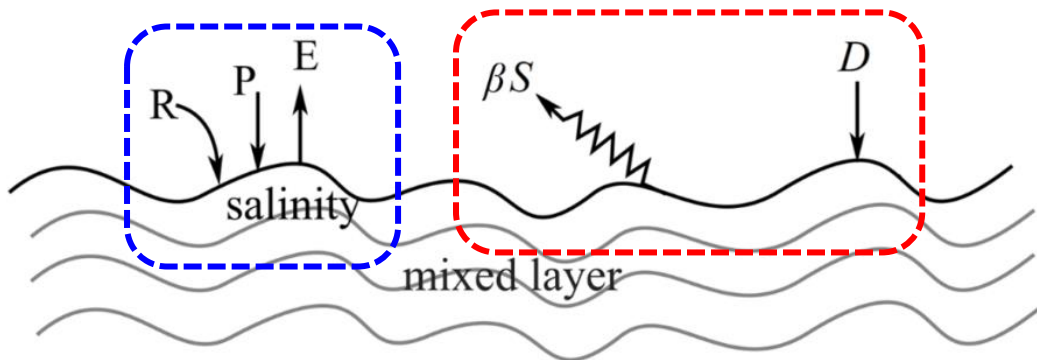
高、低层模式所采用的垂直坐标、垂直格距以及标准层结廓线



# 适定的海表盐度边界条件

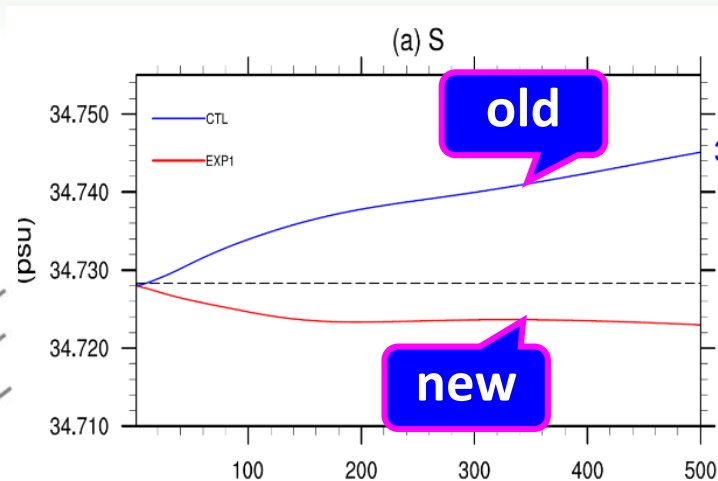
虚盐通量

实盐通量

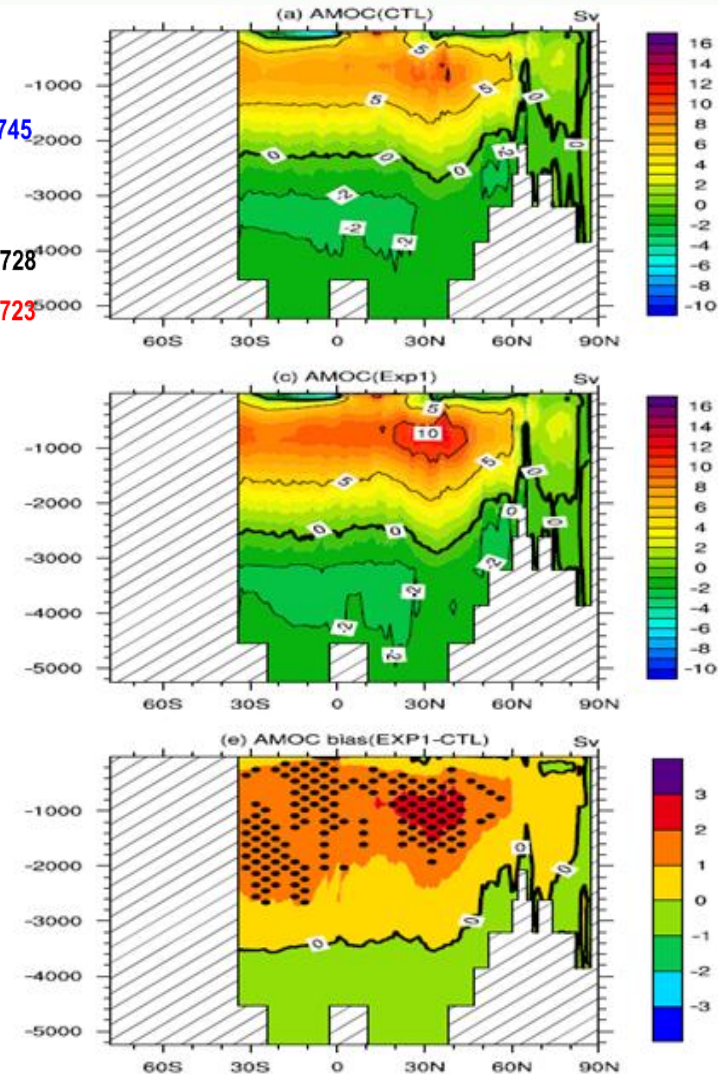


$$-k_z \frac{\partial S}{\partial z} = (P + R - E)S + (\beta S - D)$$

- ✓ 新的边界条件能够保证全球总盐量守恒
- ✓ 与旧条件相比，新的盐度边界条件模拟的全球平均盐度与观测更**接近**，且模式更易达到**平衡**；
- ✓ 新的盐度边界条件模拟的AMOC**接近观测**。

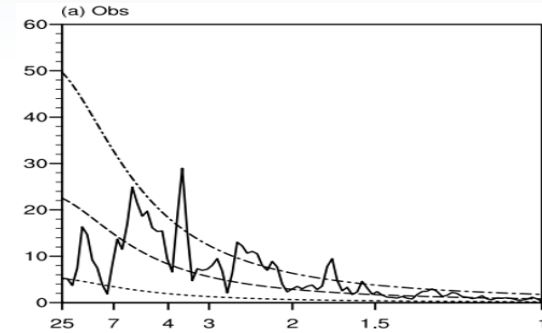
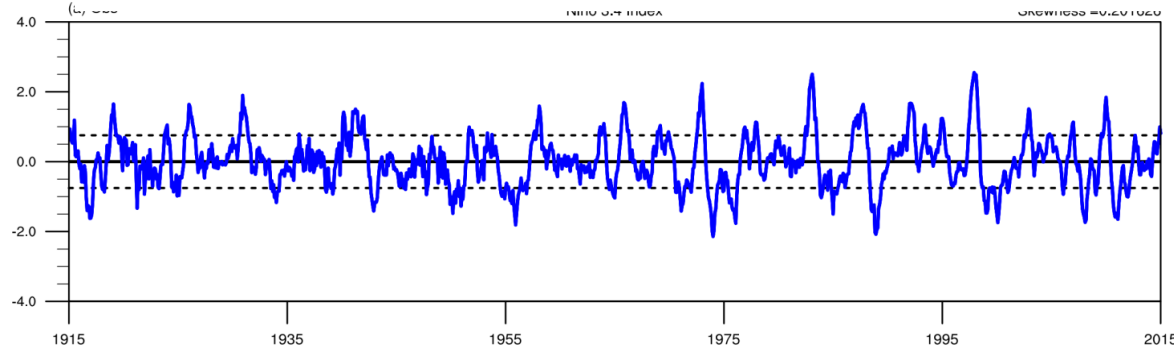


AMOC

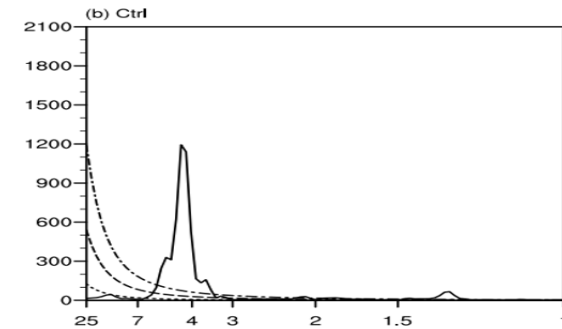
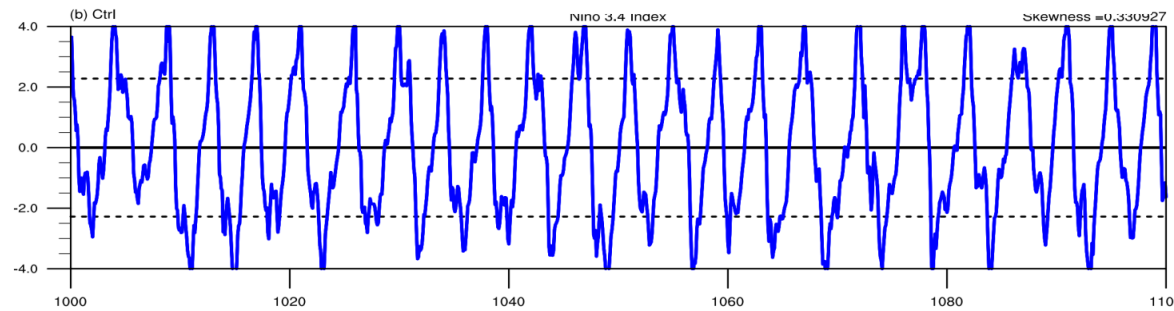


# 充分考虑海洋日变化改进了ENSO的模拟能力

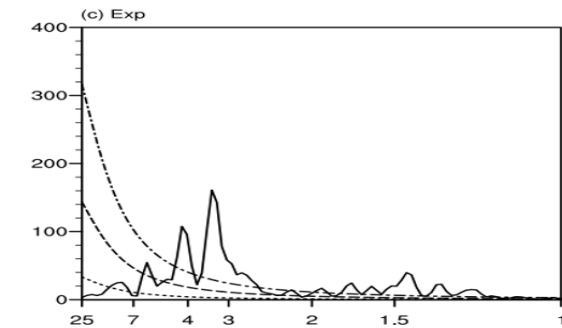
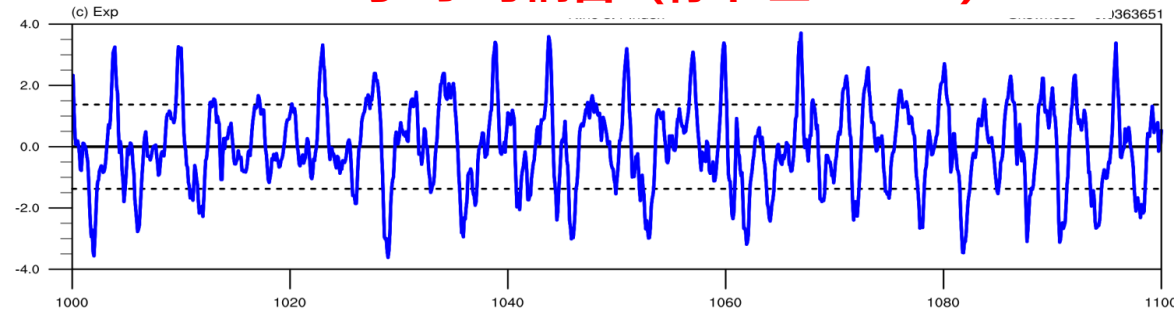
观测 (标准差: 0.755)



每天耦合 (标准差 2.278)



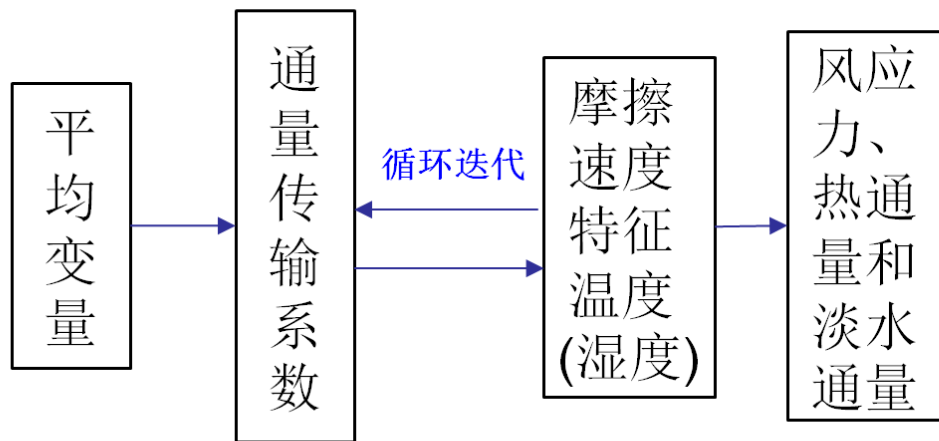
每3小时耦合 (标准差 1.375)



# 新的海气湍流通量方案

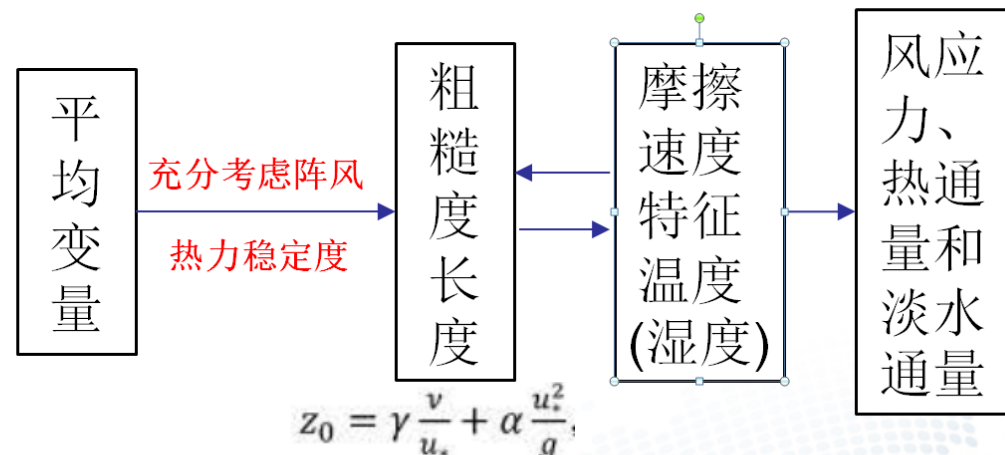
## 旧的方案(CORE方案)

CORE方案：主要是依据相似理论通过循环迭代求得湍流系数，进而得到海气湍流通量



## 新的方案(COARE3.0)

COARE3.0方案：详尽地考虑了近海层的热力稳定性和阵风的作用，应用变量的平均值来估算海气通量



**难点：**耦合代码的接口和方案的理解

缺陷：耗时长，误差大

评价

当前最可靠的方案之一

(Pelletier et al., 2017)

# 土壤碳方案的改进

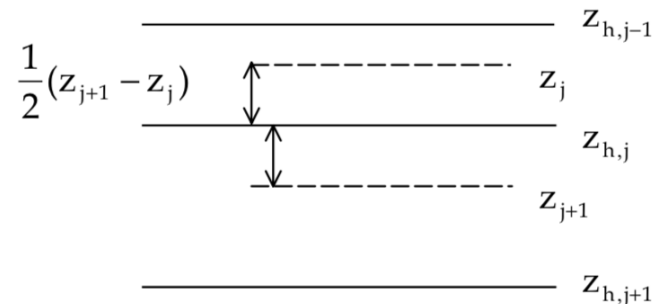
CAS-ESM1

Soil Avg

Bulk Carbon Scheme

CAS-ESM2

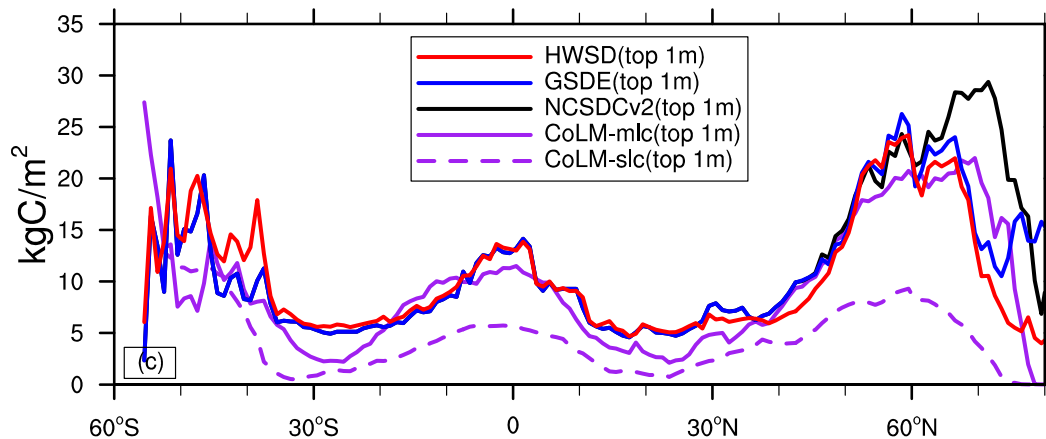
Soil  $n$



$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

Multi-layer Carbon Scheme

新方案可更好地描述土壤碳的累积和分解效应





# 报告提纲

1 CAS-ESM简介



2 CAS-ESM2模拟性能

3 CAS-ESM开放共享





# CAS-ESM2参加CMIP6试验

试验名称	试验描述	积分时间	样本数
piControl	工业革命前控制试验	500 年	1
AMIP	大气模式比较试验	1979-2014	4
1pctCO2	CO <sub>2</sub> 每年增加1%试验	150 年	1
4XCO2	CO <sub>2</sub> 4倍突增试验	150 年	1
B20TR	20世纪模拟试验	1850-2014	4
SSP	未来情景预估试验	2015-2100	2
OMIP	海洋模式比较试验	372 年	1
FAFMIP	通量距平强迫试验	100 年	7

**CAS-ESM2.0 参加了在国际模式比较计划 CMIP6, 数据累计被下载14万余次, 累计下载数据量107TB。**

The screenshot shows the CMIP6 search interface on the ESGF node. The search criteria include:
 

- MIP Era: +
- Activity: +
- Model Cohort: +
- Product: +
- Source ID: CAS-ESM2-0 (11)
- Institution ID: +
- Source Type: +
- Nominal Resolution: +
- Experiment ID: +
- Sub-Experiment: +
- Variant Label: +
- Grid Label: +
- Table ID: +
- Frequency: +
- Realm: +
- Variable: +
- CF Standard Name: +

 The search results show 11 total results. The first three results are:
 

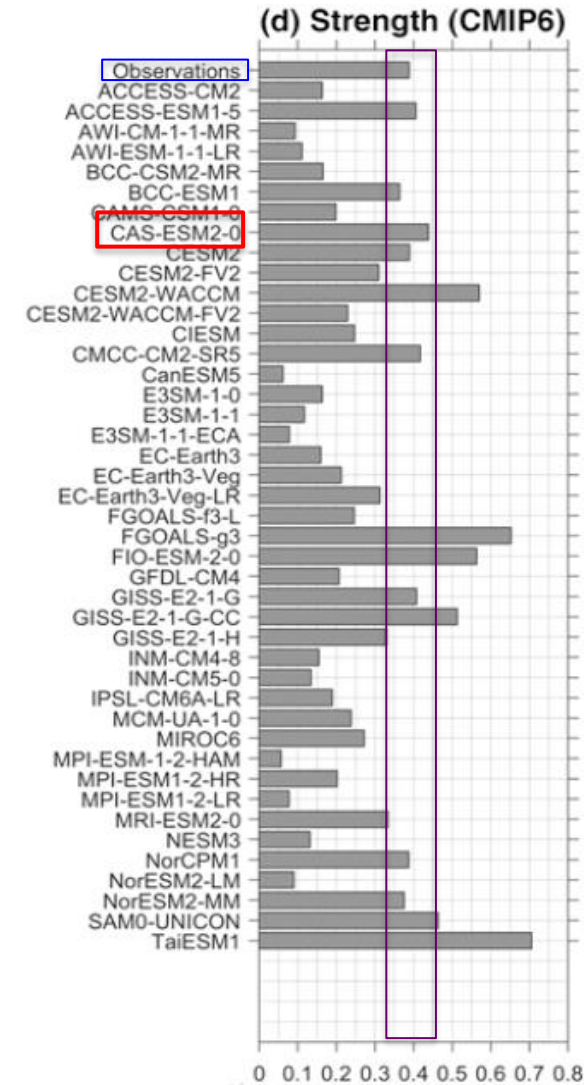
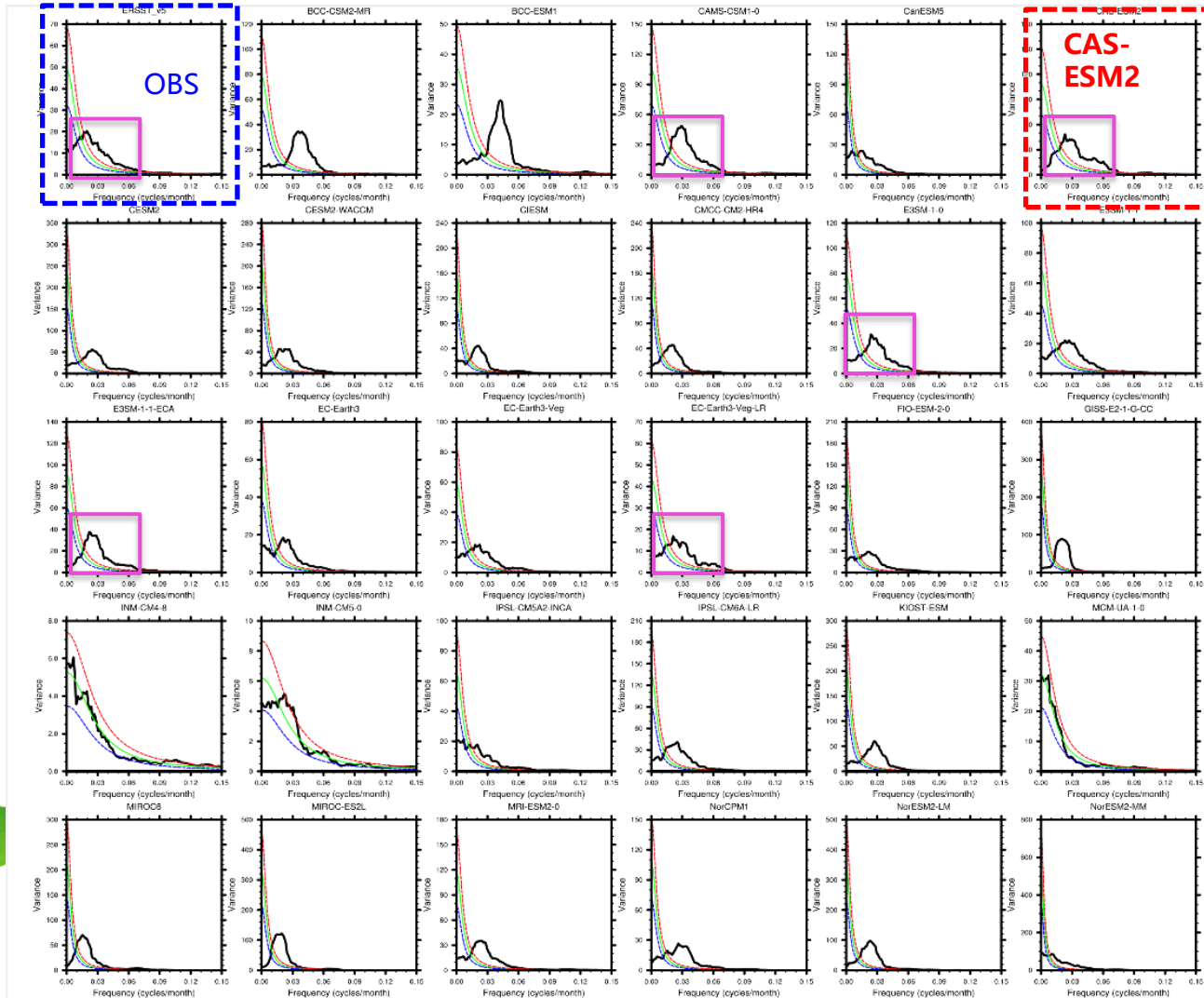
- CMIP6.CMIP.CAS.CAS-ESM2-0.historical.r1i1p1f1.Amon.ua.gn
  - Data Node: esg.lasg.ac.cn
  - Version: 20200502
  - Total Number of Files (for all variables): 1
  - Full Dataset Services: [ Show Metadata ] [ List Files ] [ WGET Script ] [ LAS ] [ Show Citation ] [ PID ] [ Further Info ]
- CMIP6.CMIP.CAS.CAS-ESM2-0.historical.r2i1p1f1.Amon.ua.gn
  - Data Node: esg.lasg.ac.cn
  - Version: 20200502
  - Total Number of Files (for all variables): 1
  - Full Dataset Services: [ Show Metadata ] [ List Files ] [ WGET Script ] [ LAS ] [ Show Citation ] [ PID ] [ Further Info ]
- CMIP6.CMIP.CAS.CAS-ESM2-0.amip.r1i1p1f1.Amon.ua.gn
  - Data Node: esg.lasg.ac.cn
  - Version: 20200502
  - Total Number of Files (for all variables): 1
  - Full Dataset Services: [ Show Metadata ] [ List Files ] [ WGET Script ] [ LAS ] [ Show Citation ] [ PID ] [ Further Info ]

<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>

# CAS-ESM2对ENSO强度与周期的模拟位居国际前列

## CMIP6多模式模拟的ENSO周期

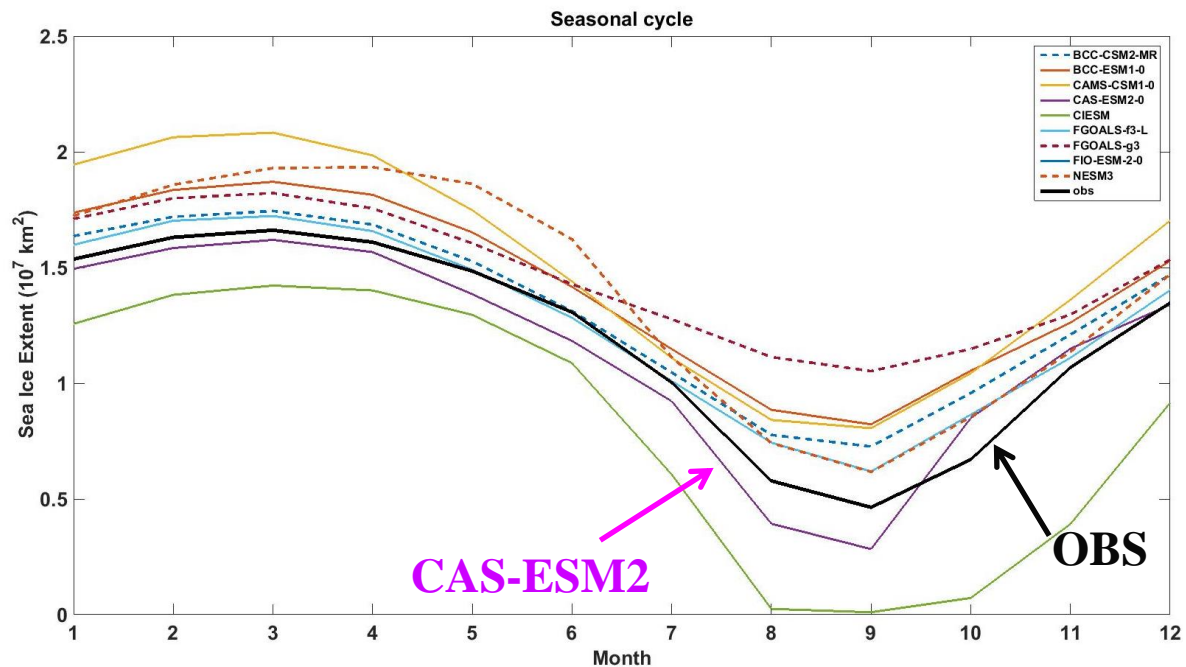
## ENSO强度



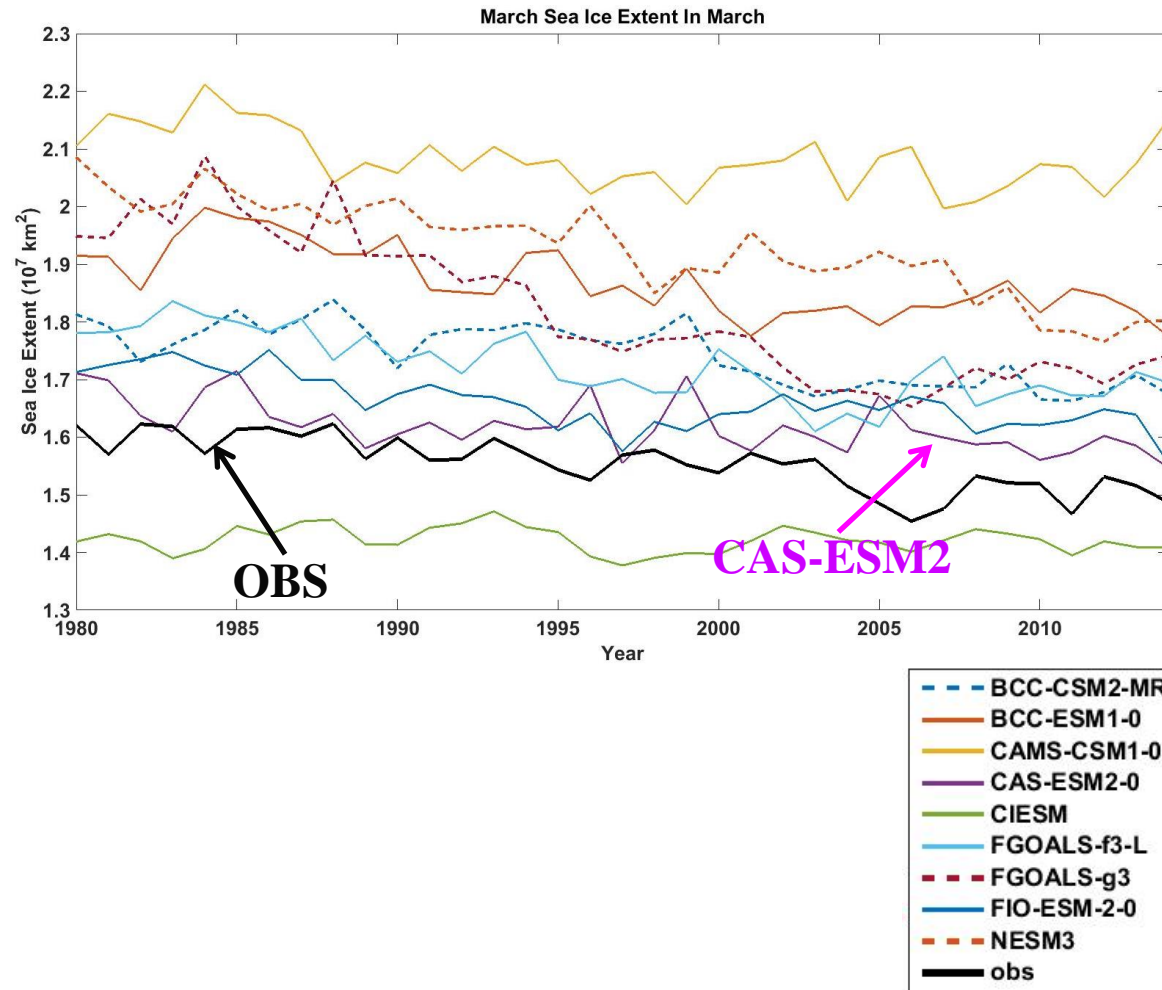


# CAS-ESM对海冰的模拟性能位列国内前列

1980-2014年平均北极海冰范围的季节循环

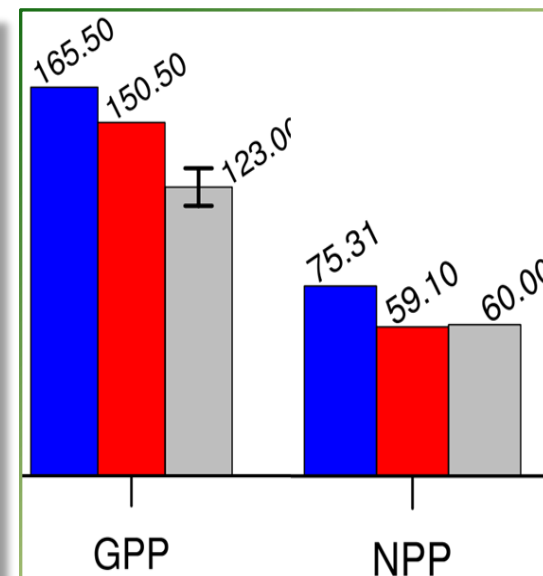
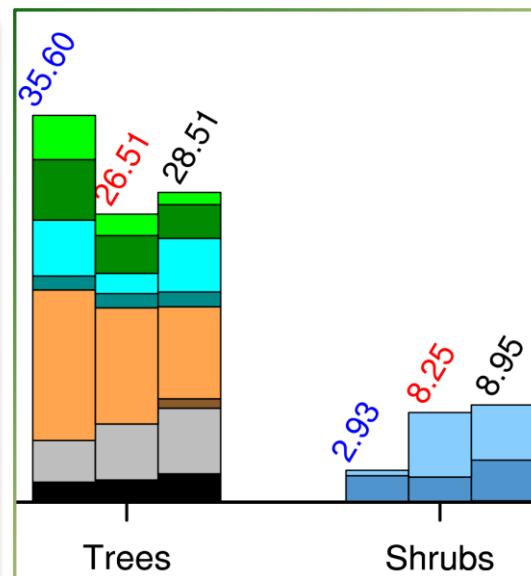
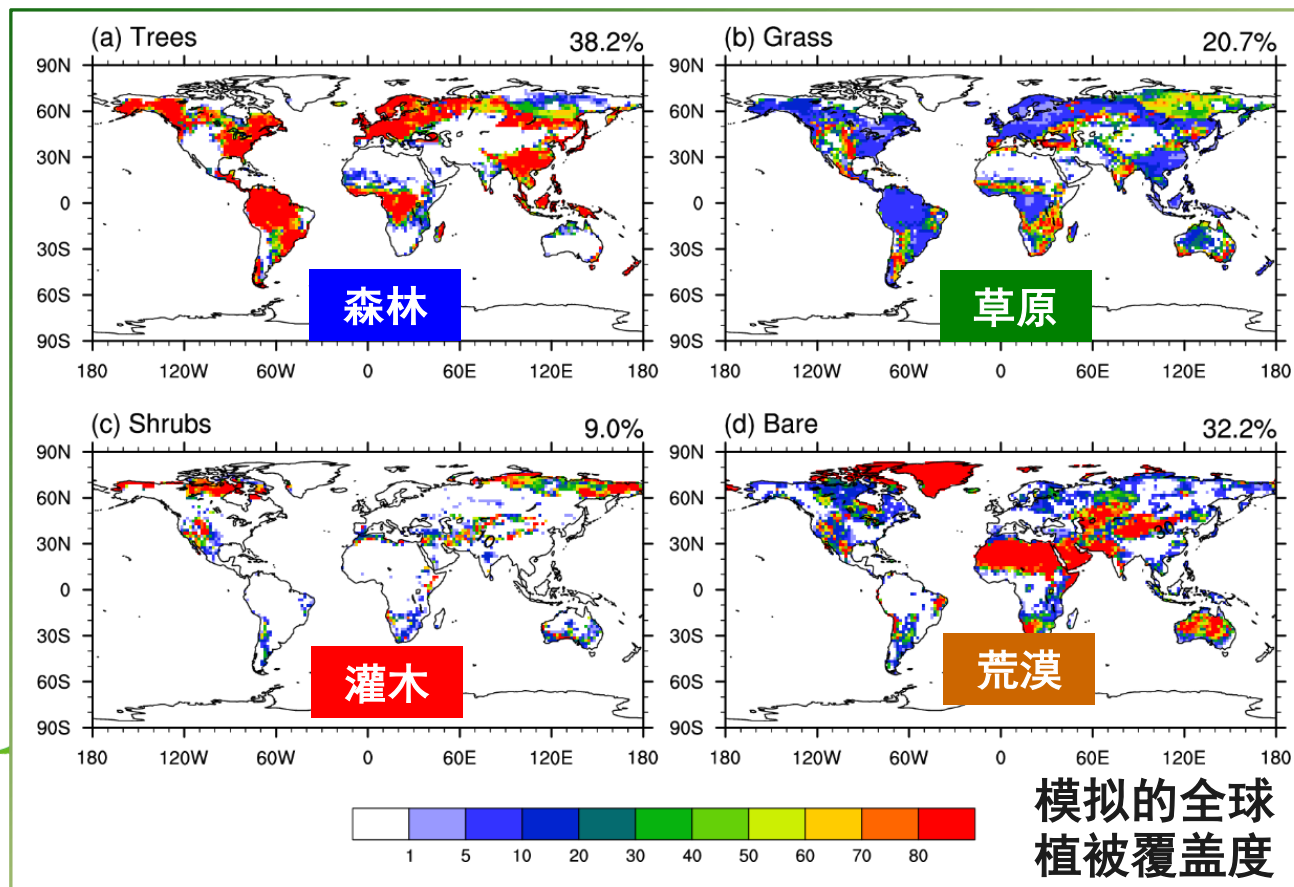


3月北极海冰范围的年际变化



# IAP-DGVM对全球自然植被分布的模拟

**IAP-DGVM显著提升CAS-ESM2对全球植被覆盖度和碳通量的模拟能力。**可很好地再现主要自然植被类型的全球分布格局，模拟的常绿林与落叶林、阔叶林与针叶林的比例与观测一致，正确地模拟出全球灌木林分布及其与草原的区分。



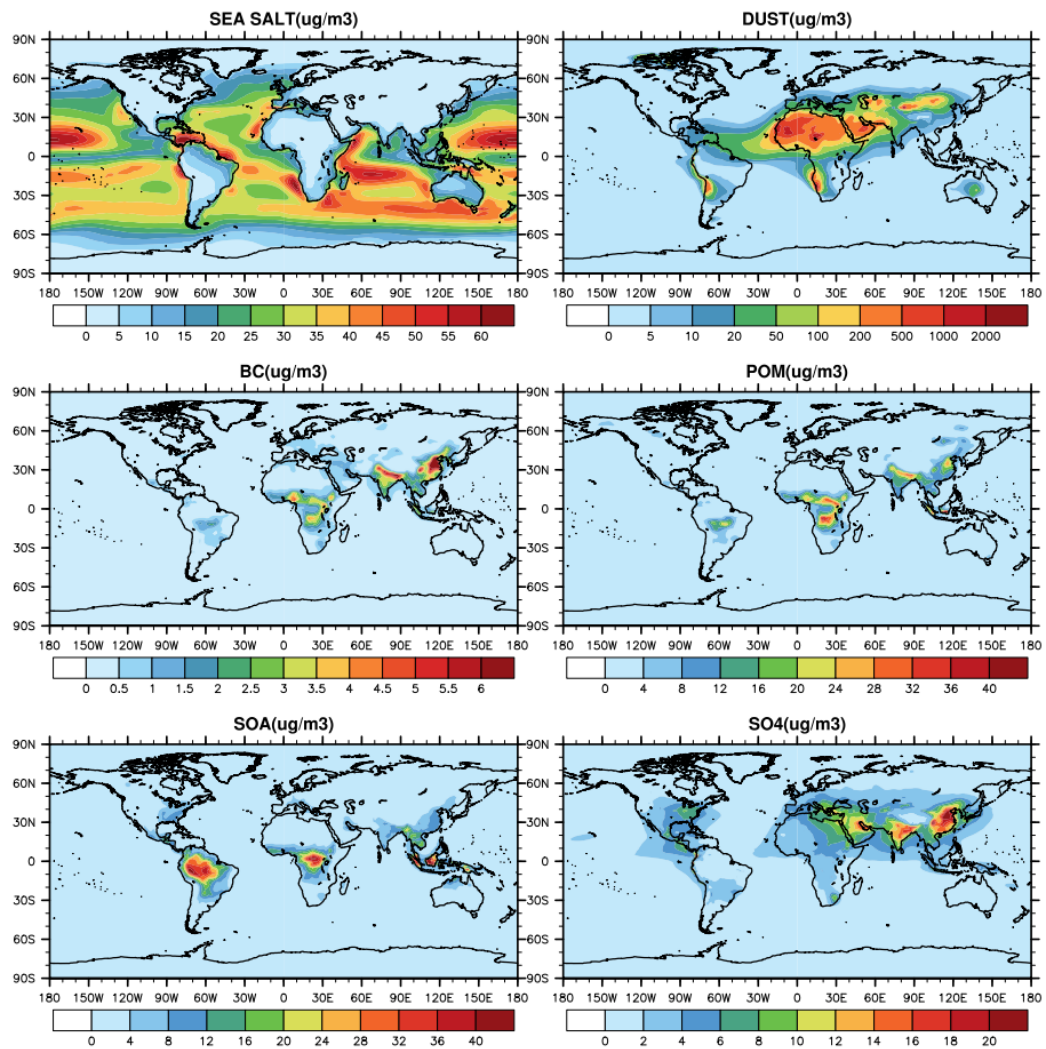
植被覆盖度(%)

碳通量 (PgC/yr)

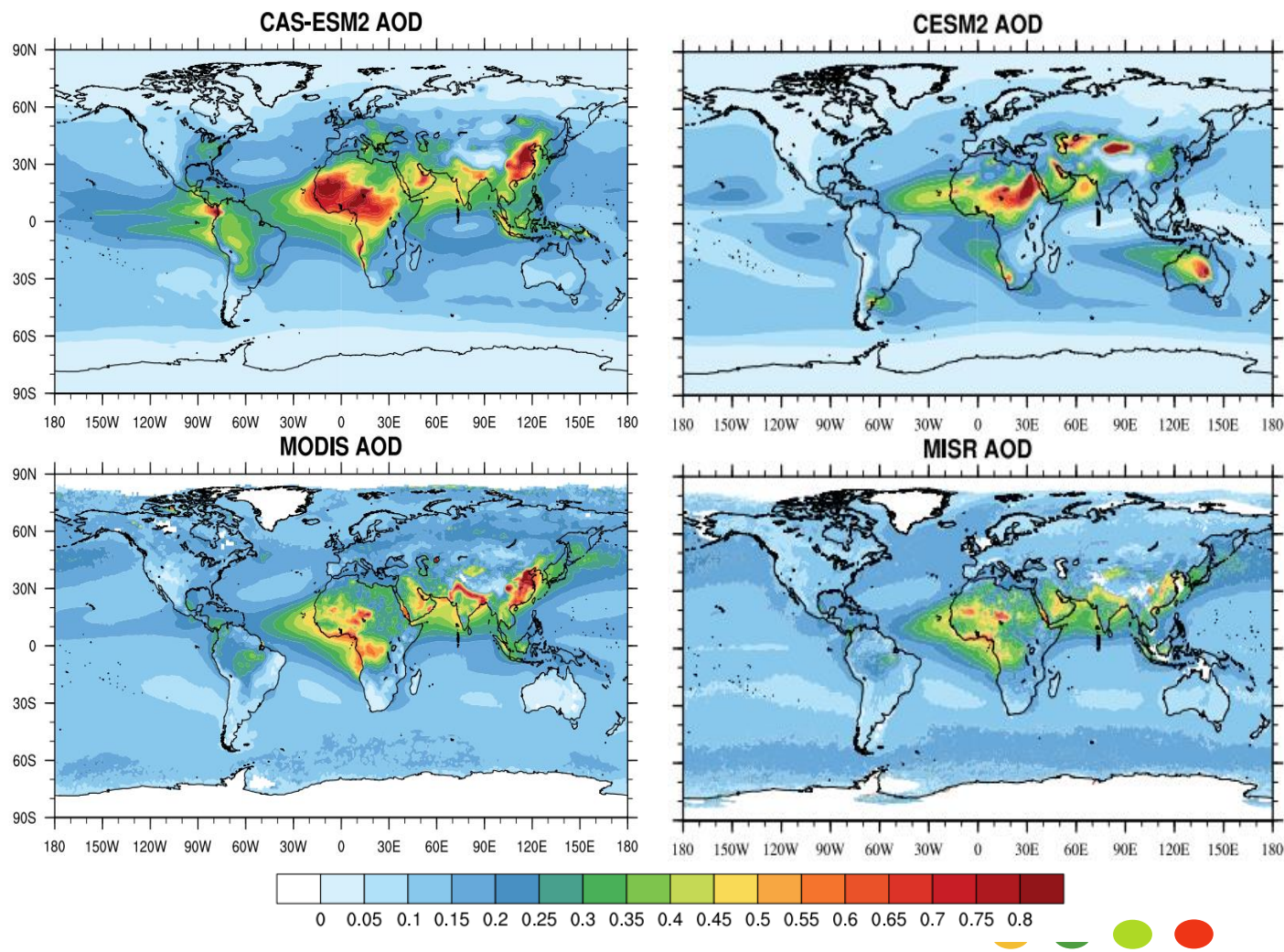


# CAS-ESM2对不同气溶胶组分的模拟

## CAS-ESM2各气溶胶的地表浓度



## CAS-ESM2、NCAR-CESM2及卫星观测的AOD



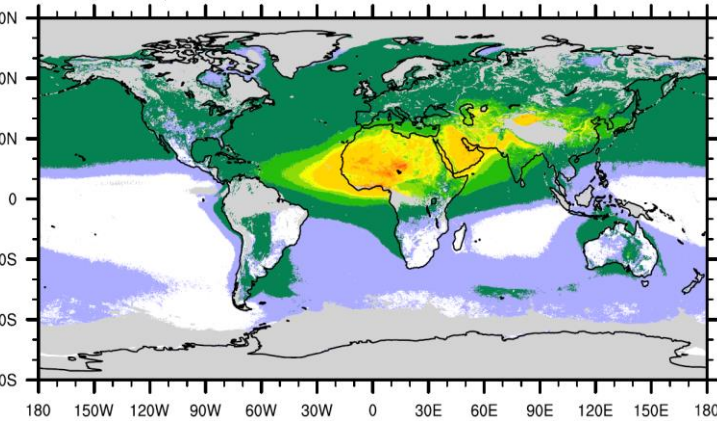
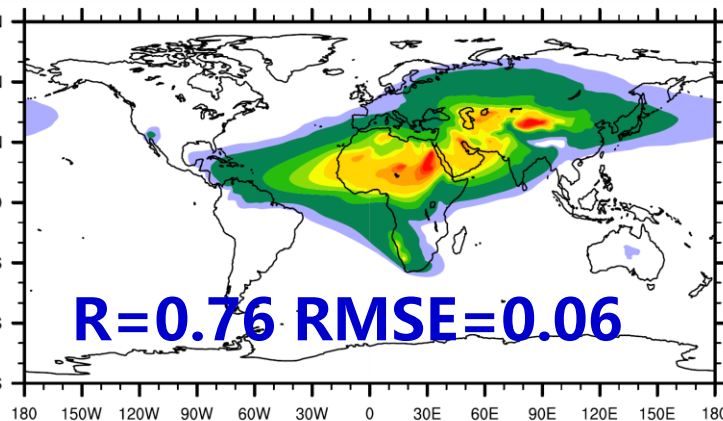
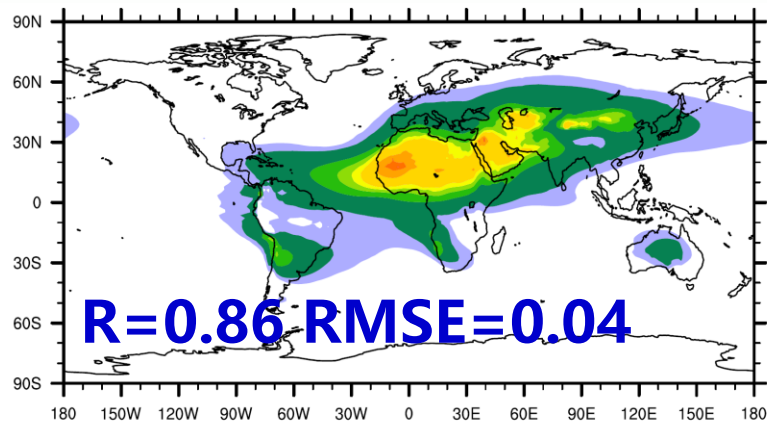
# CAS-ESM2对全球沙尘循环模拟优于国外先进模式

## CAS-ESM2

## 美国CESM2

## 卫星观测 (Gkikas et al., 2021)

全球



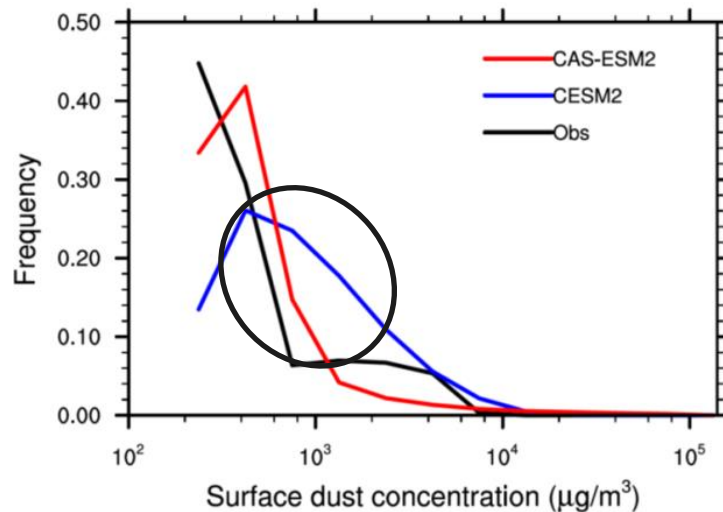
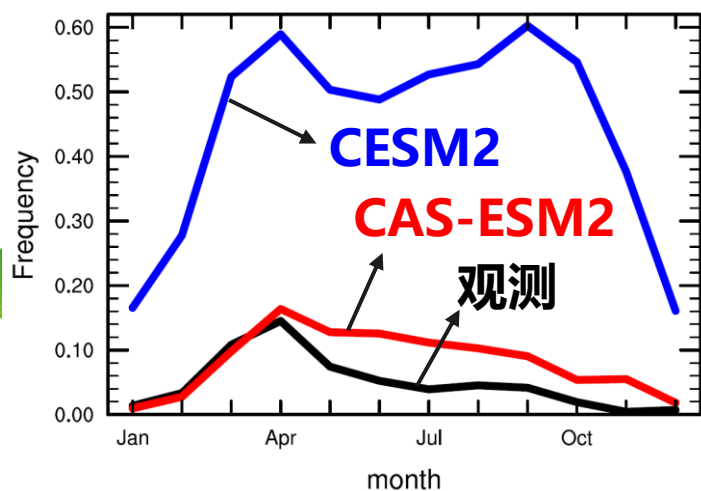
## 沙尘天气频次 (塔里木盆地)

## 东亚沙尘浓度频次分布

CAS-ESM2主要优化:

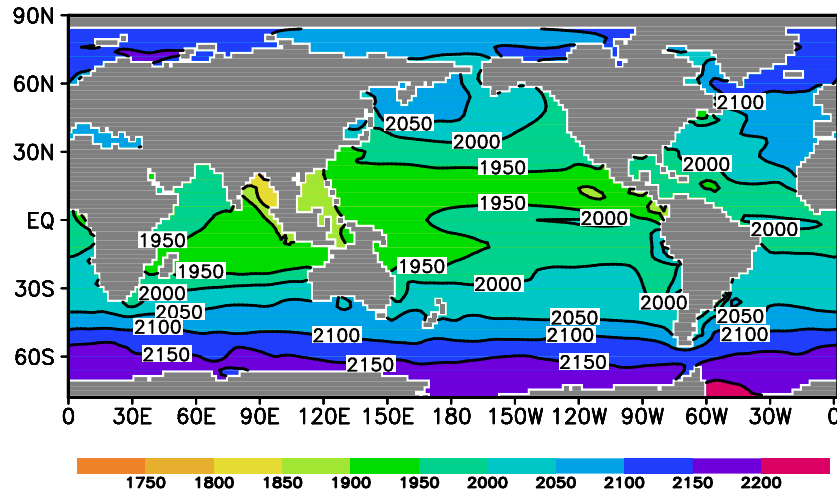
- ❖ 采用更具有物理基础的起沙方案
- ❖ 更符合西北地区实际的下垫面参数

东亚

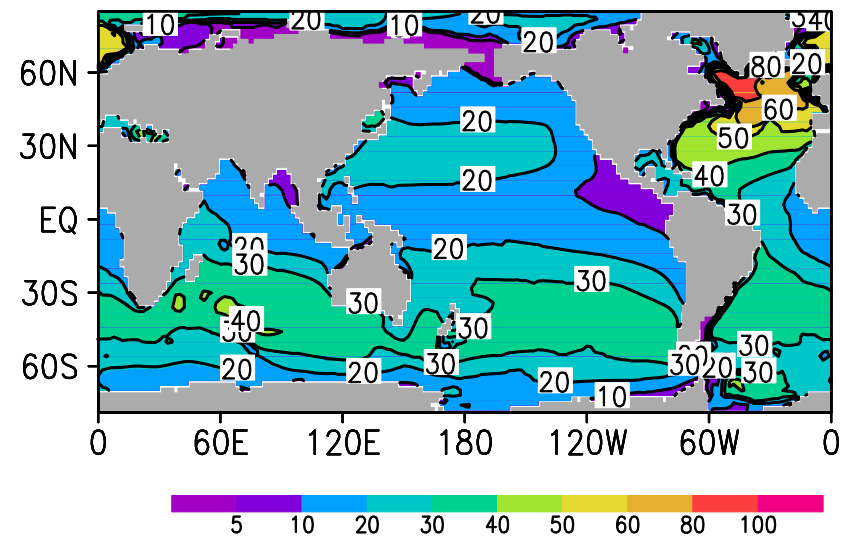


# IAP OBGCM对海洋碳的模拟

## 海面溶解无机碳浓度

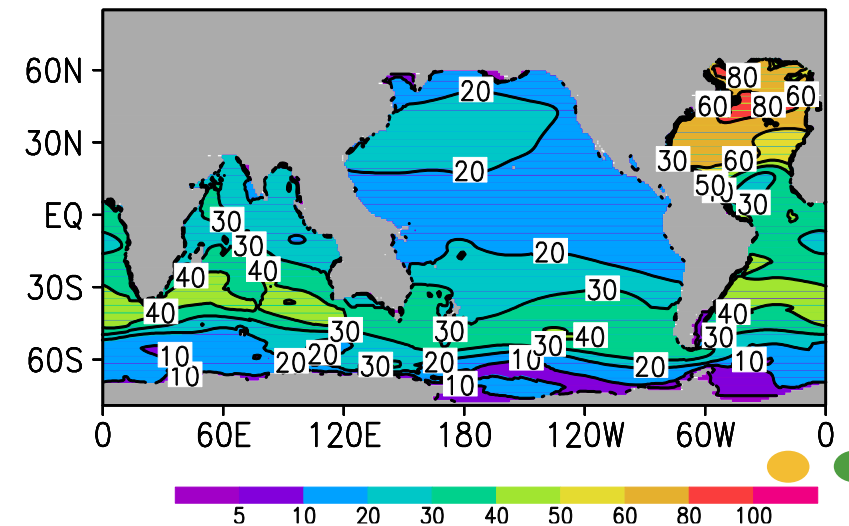
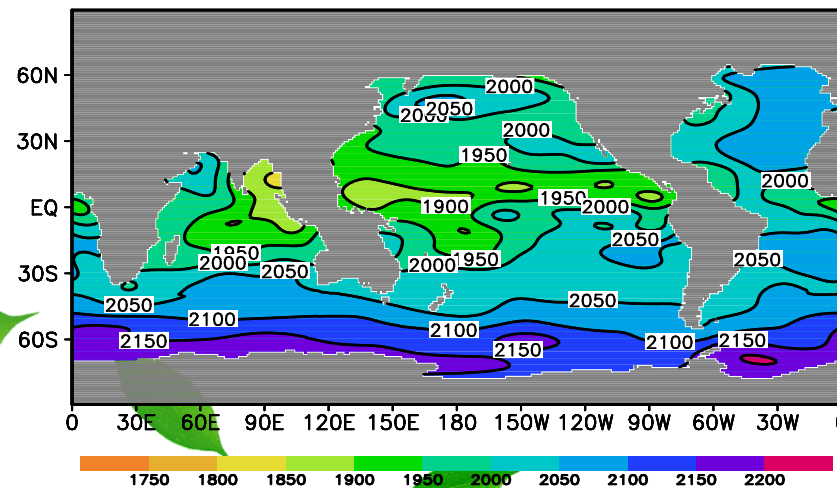


## 海面对人为碳的吸收



模拟

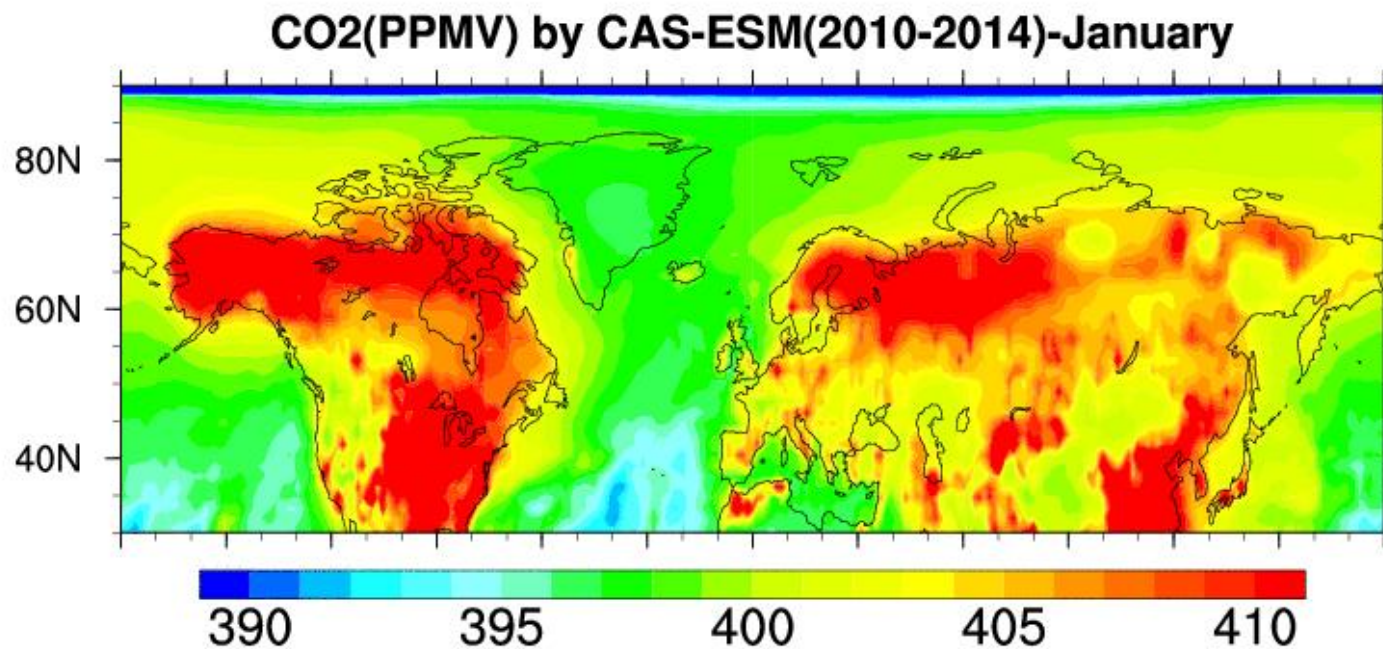
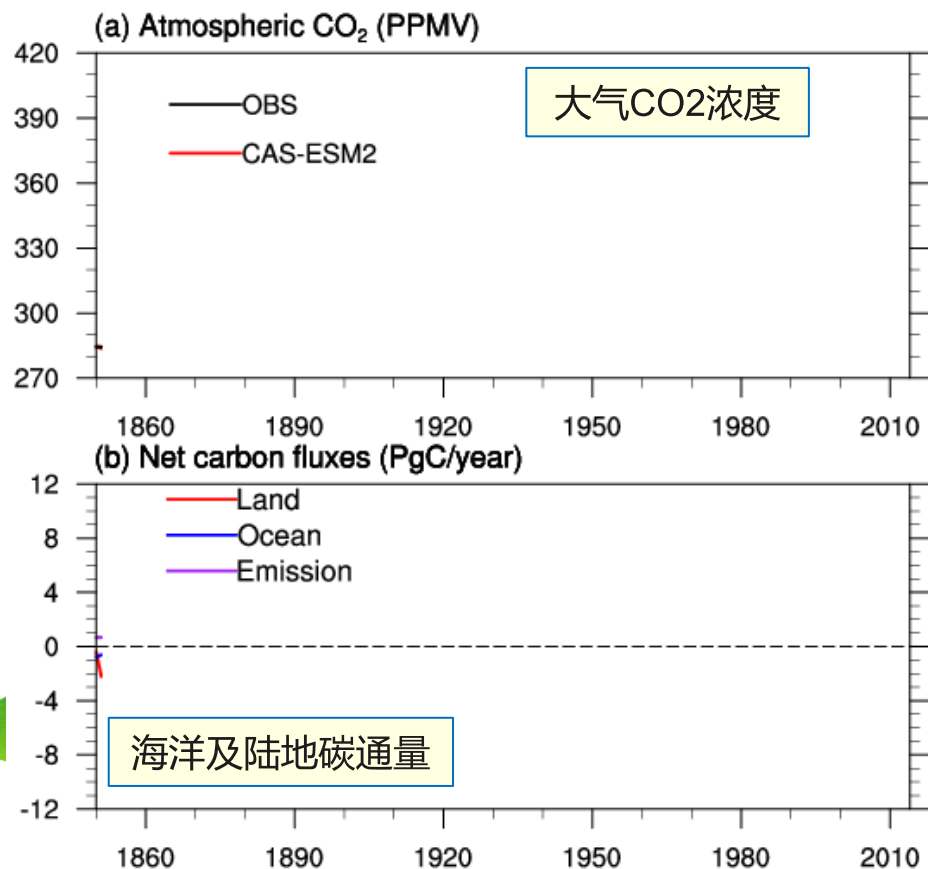
观测



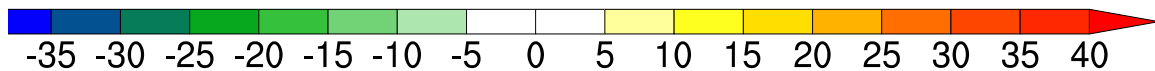
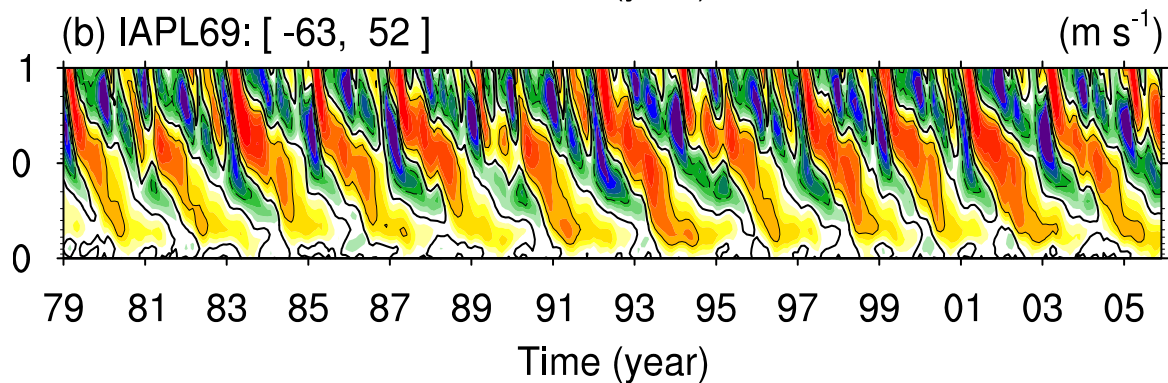
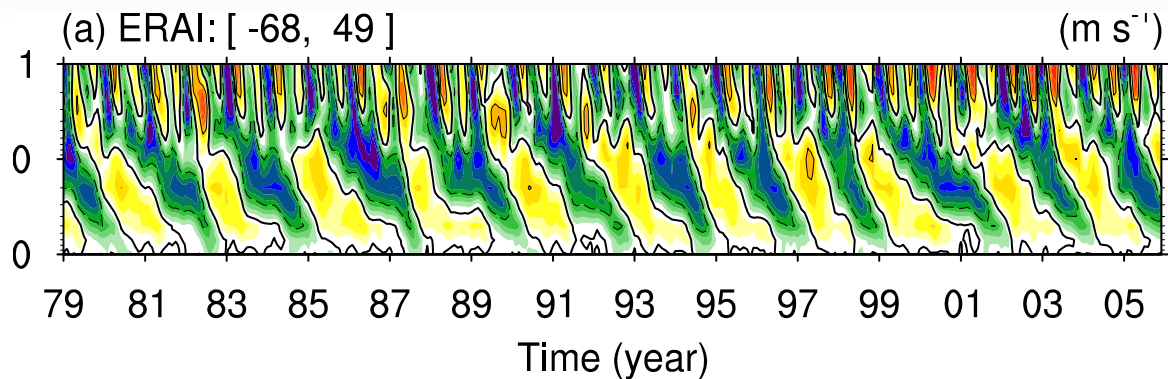


# 实现了海、陆碳循环与大气CO<sub>2</sub>的全耦合模拟

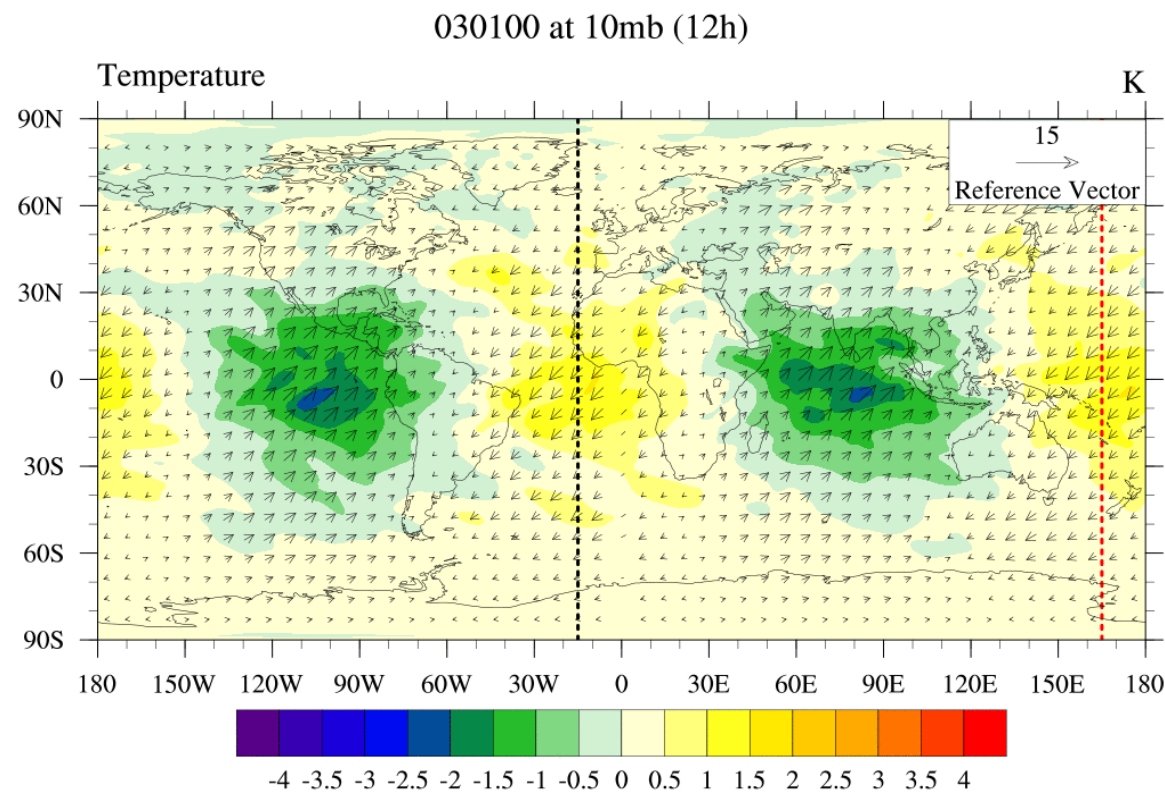
- 成功实现海、陆碳循环与大气CO<sub>2</sub>的双向耦合，并追踪计算大气CO<sub>2</sub>的时空变化，成为国内首个、国际前10%实现全球碳循环-气候全耦合功能的地球系统模式；
- 准确再现大气CO<sub>2</sub>浓度的历史增加趋势和季节变化的空间分布



# 平流层准两年震荡(QBO)和海洋潮汐的模拟



QBO的模拟

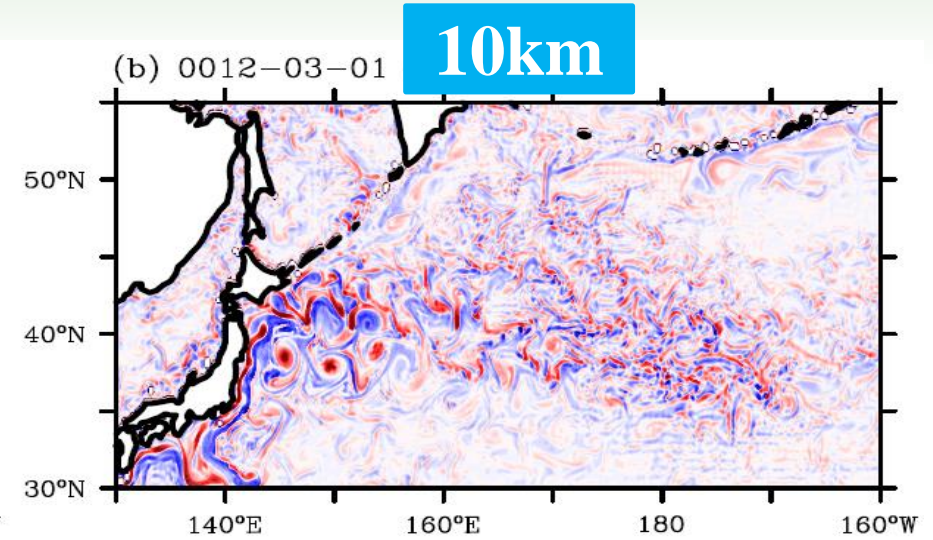
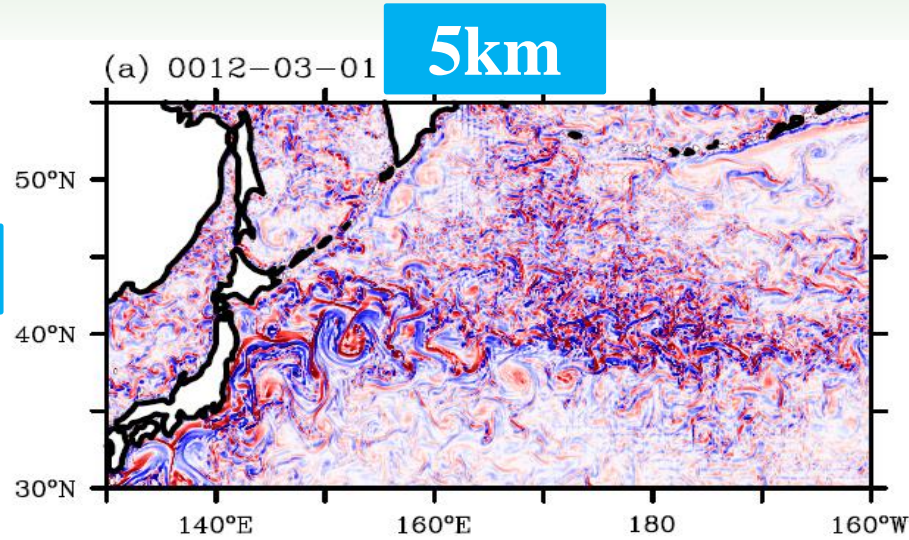


太阳潮汐的模拟 (半日潮)

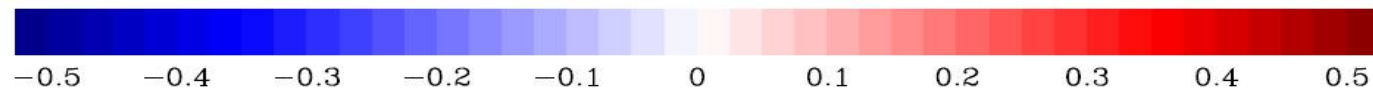
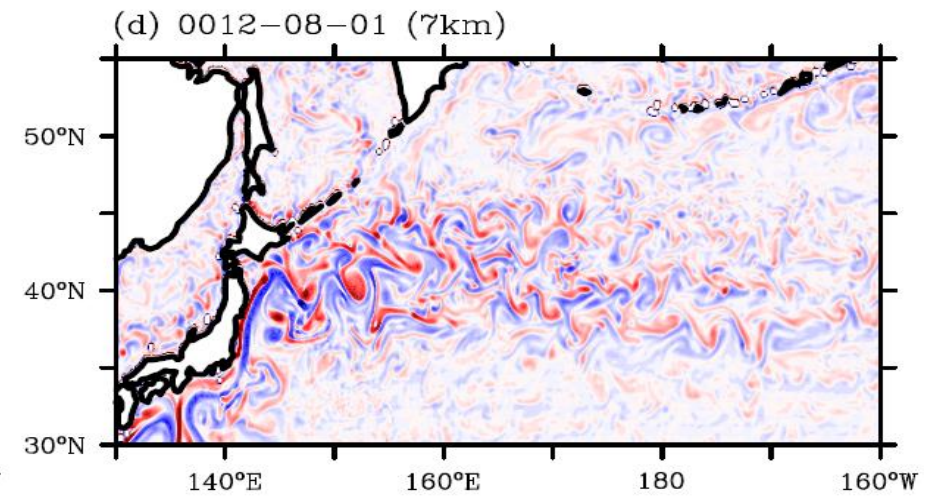
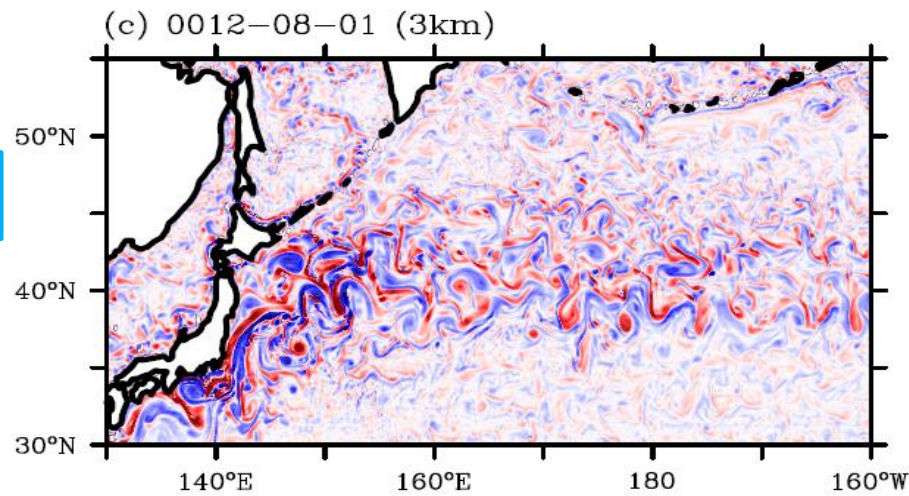


# 高分辨率海洋模式改进了黑潮的模拟

03-01



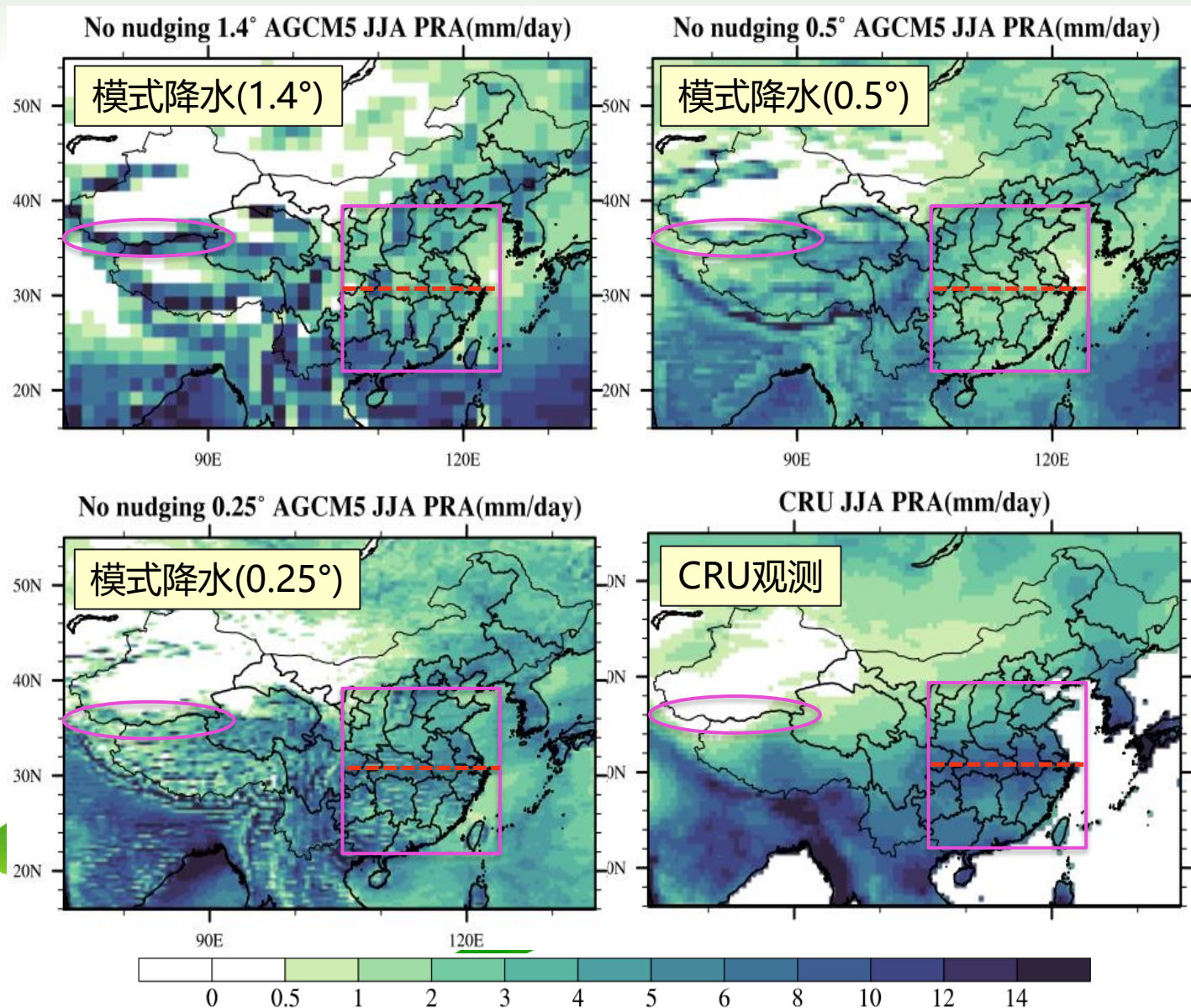
08-01



$\text{zeta}/f (f=10^{-4}\text{s}^{-1})$



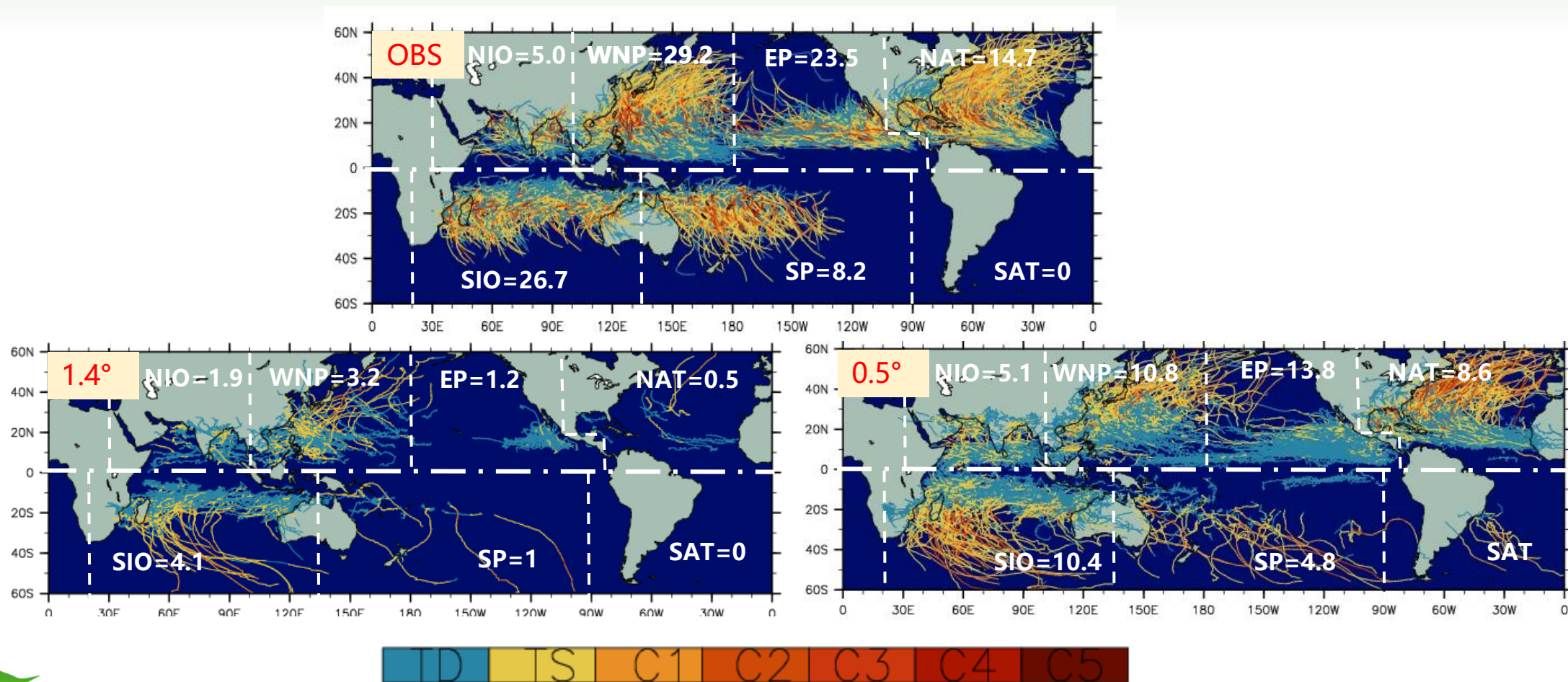
# 高分辨率大气模式改进了我国降水的模拟



25km IAP AGCM模拟的云量



# 高分辨率模式改进了热带气旋的模拟



观测与模拟的TC强度与路径分布

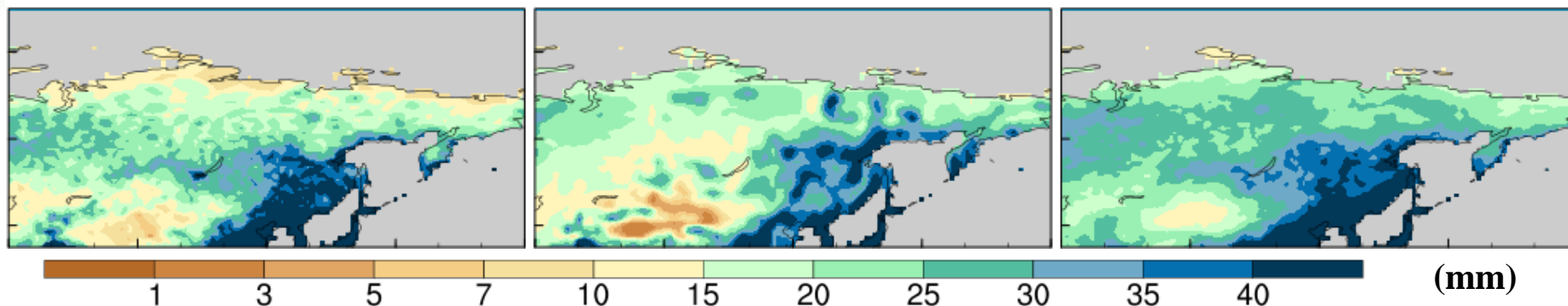
# 高分辨率模式改进了极端降水的模拟

GPCCC观测

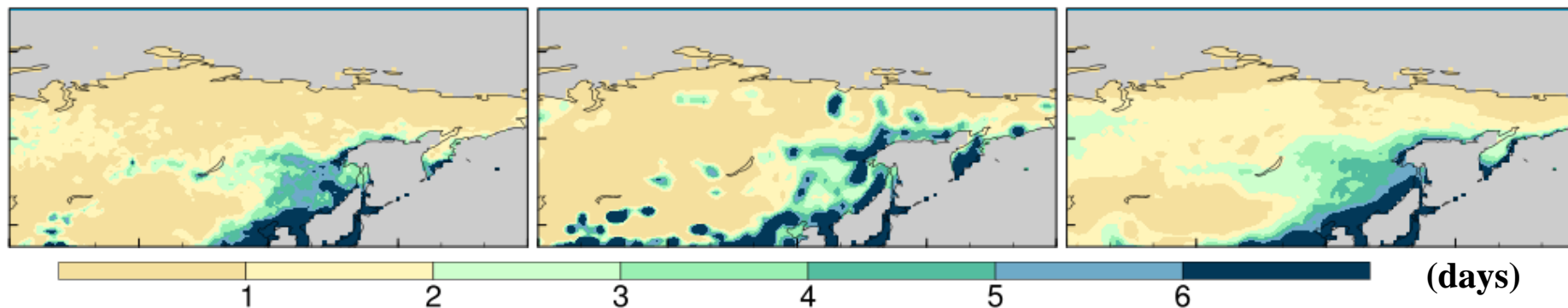
CAS-ESM(1.4°)

CAS-ESM(0.25°)

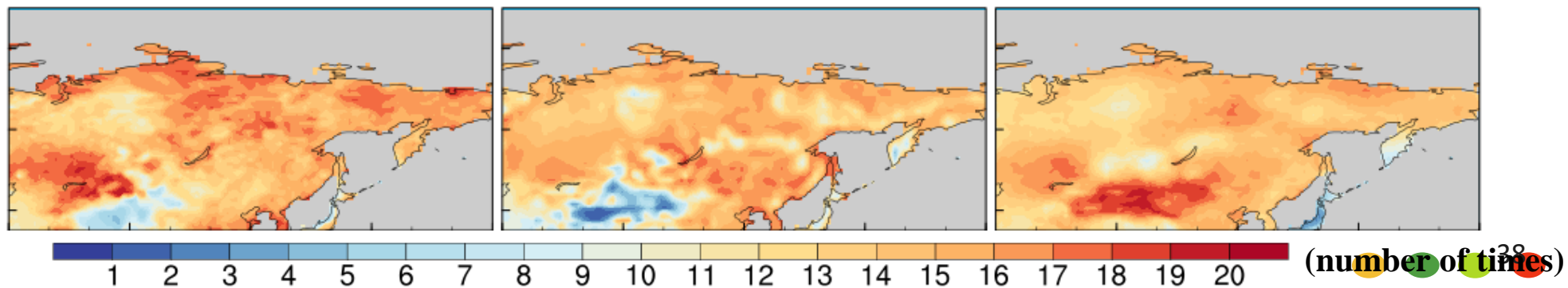
最大日降水量  
rx1day



≥20 mm降水日数  
R20



连续5天无降水  
次数 CDD-N



# 小结

- CAS-ESM模式系统完整，功能完备，具备对全圈层的模拟能力，可用于开展各类的数值模拟试验；
- CAS-ESM整体性能较好，部分指标位居国际前列；
- 具有一些特色的方案和技术，如植被模式、火模块、中高层大气模式、三维并行技术等；
- 模式系统的耦合器和代码编写具有较好的兼容性，可方便地兼容其他分量模式/模块及参数化方案



# 报告提纲

1 CAS-ESM简介

2 CAS-ESM2模拟性能

3 CAS-ESM开放共享





# CAS-ESM开放共享

CAS-ESM2的代码预计于2023年9月正式释放，目前装置的课题用户可以在装置上使用试用版本，该版本与正式版本基本一样。

大装置为课题用户提供如下的软件技术支持服务：

- CAS-ESM2的源代码、用户手册及模式运行培训；
- 公共资源池的观测及模拟数据；
- 提供CAS-ESM2运行中相关问题的技术支持（用户填报《地球系统数值模拟装置技术台账》发至邮箱earthlab-techsupport@mail.iap.ac.cn，技术人员24小时内予以响应）；
- 有关CAS-ESM方案的深度合作问题，可与CAS-ESM团队进行具体沟通。



# Thank You!

