

地球系统模式简介

王斌

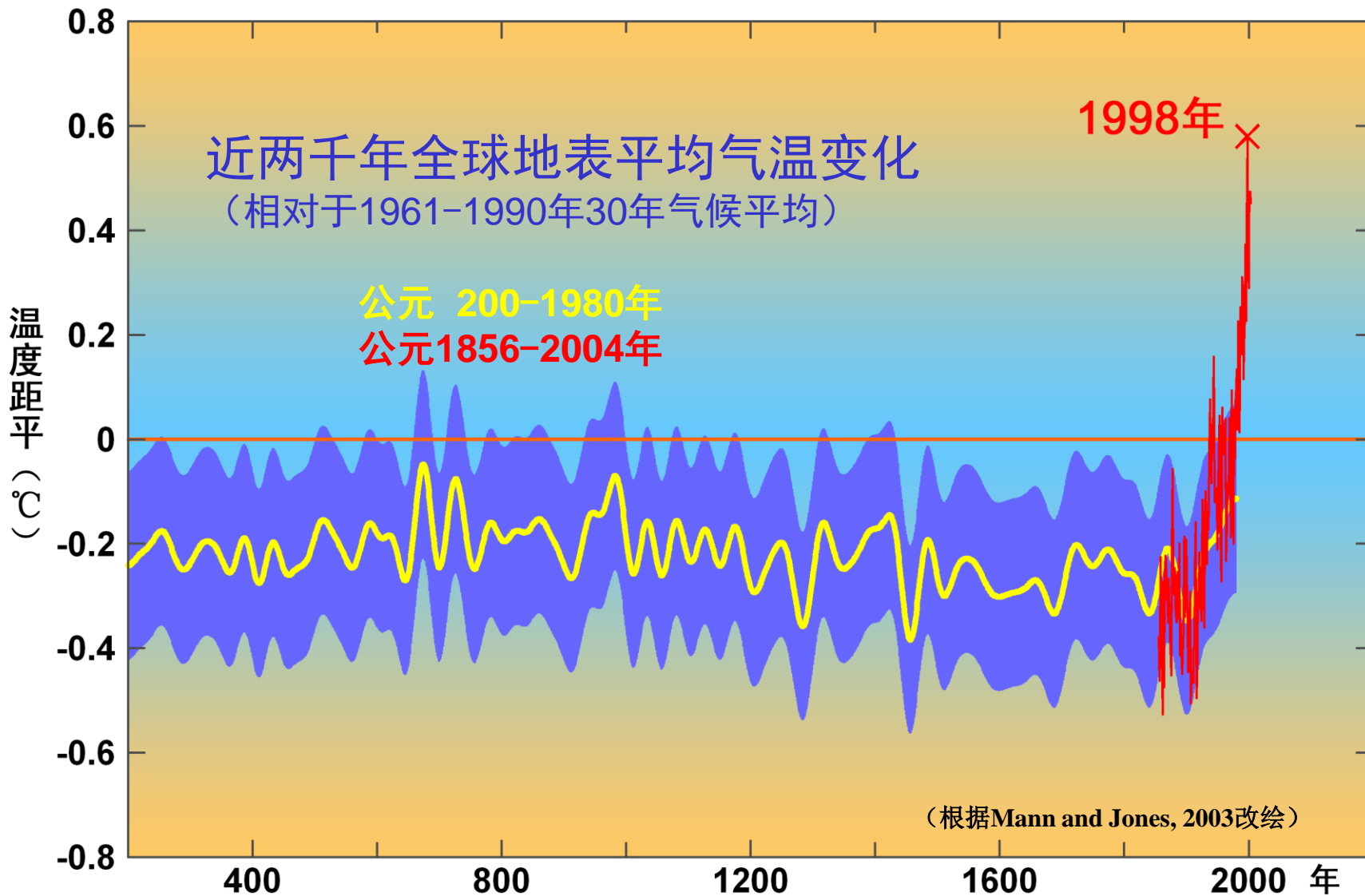
清华大学地球系统科学研究中心

中国科学院大气物理研究所

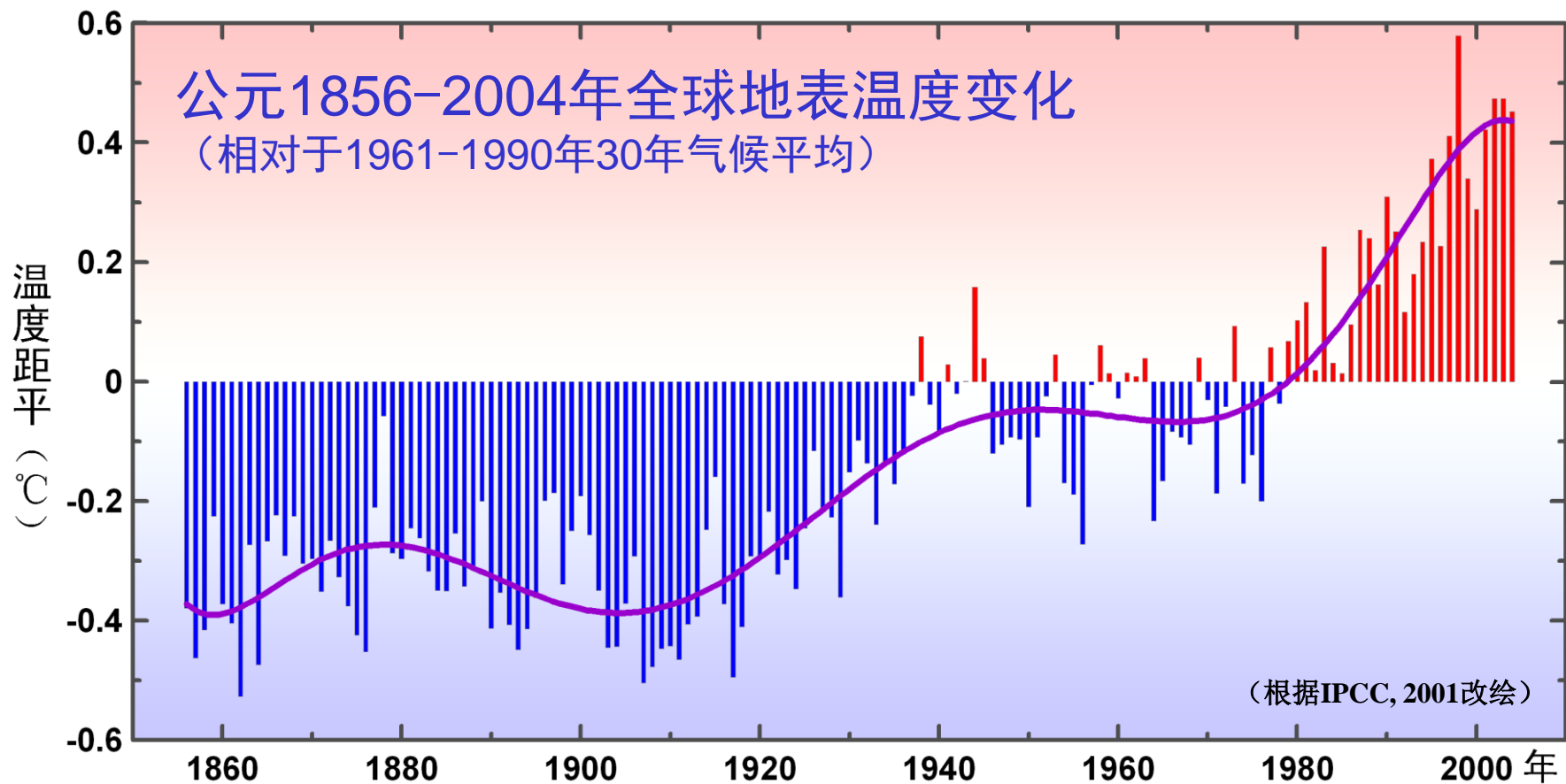
2012年10月15日，伟清楼610

科学背景

- ◆ 近百年全球气候以变暖为主要特征；
- ◆ 全球气候变暖正在改变地球、影响人类；
- ◆ 全球变化问题倍受各国政府和科学家的关注；
- ◆ 如何定量研究全球变化、预测未来趋势？



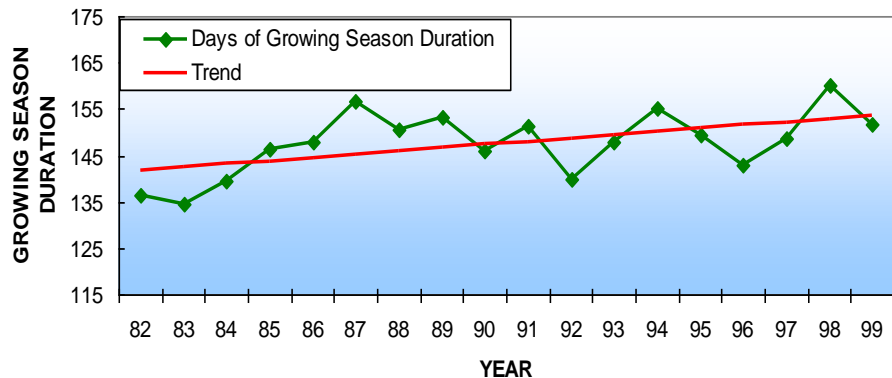
20世纪是过去2000年中最温暖的100年。



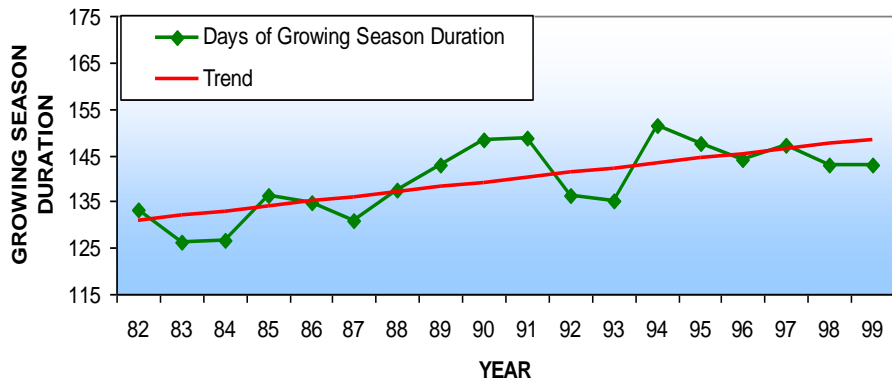
- 1860-2000年全球地表温度上升0.4-0.8°C（平均0.6°C）；
- 近百年间最暖的10年均出现在1990年以后；
- 20世纪以来，1998年最暖，2002年和2003年分别为第二和第三暖年，2004年为第四暖年。

全球变暖正在改变地球

NORTH AMERICA (40N~70N)



EURASIA (40N~70N)

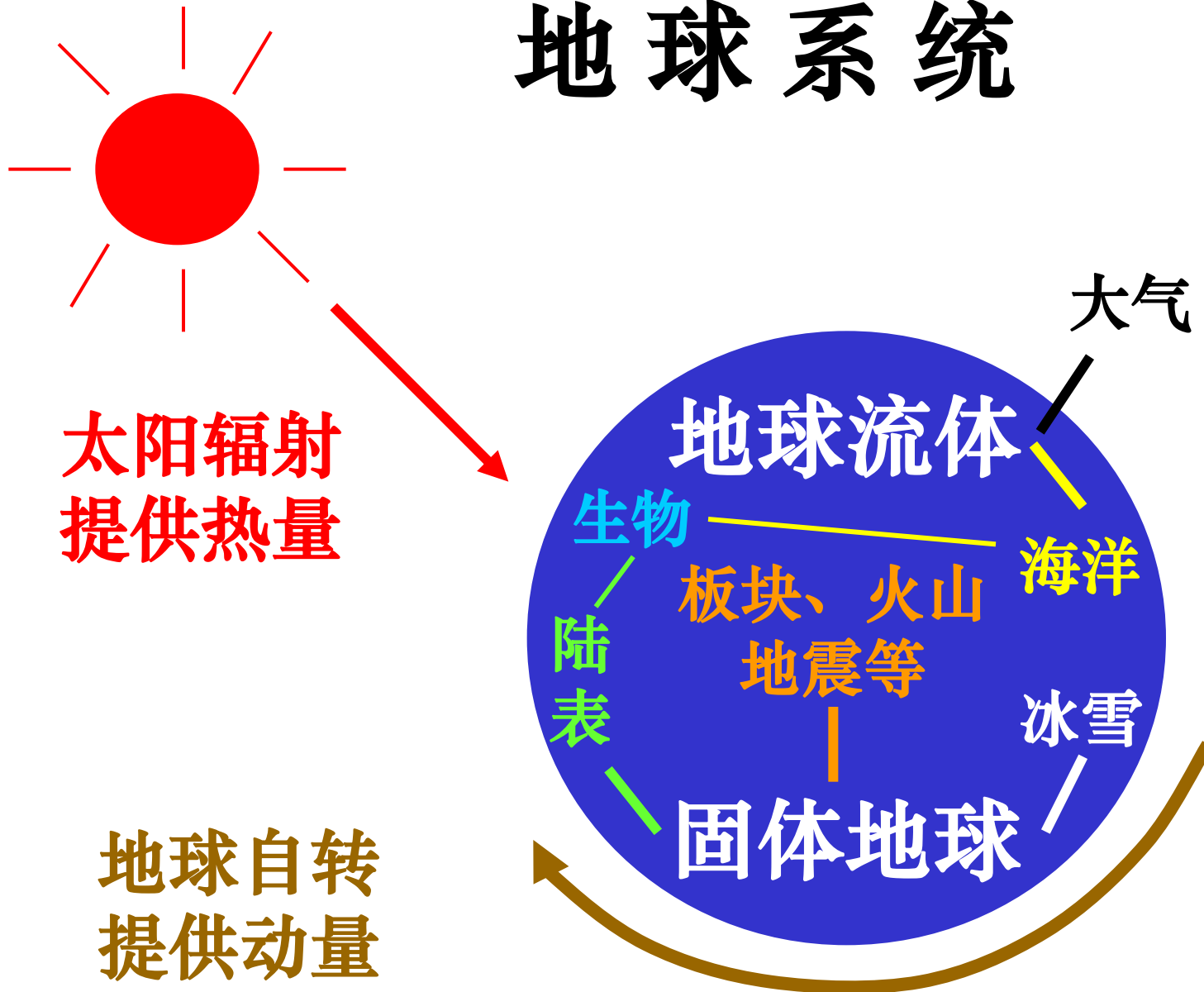


- 暖冬
- 北极海冰的退缩
- 冰川融化
- 海平面升高
- 动物迁移
- 海洋生物的迁移
- 热浪
- 冻雨

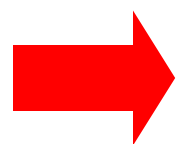
问题

- 1、是什么导致了全球变暖？
- 2、未来将继续变暖吗？
- 3、人类将怎样应对？

地球系统



内容目录



1、定义及战略意义

2、主要研究计划

3、模式综合介绍

4、存在的问题与展望

什么是地球系统模式？

是基于地球系统中的动力、物理、化学和生物过程建立起来的**数学方程组**（包括动力学方程组和参数化方案）来确定其各个部分（大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈）的性状，由此构成地球系统的**数学物理模型**，然后用**数值的方法**进行求解，并在计算机上付诸实现的一种**大型综合性计算机软件**，它能够反映**地球各圈层之间的相互作用**。

地球系统模式的三个阶段

1、基础阶段：物理气候系统模式

以**地球流体**为主体，固体部分只考虑**陆面过程**，模式只能描述系统的**动力过程**和**物理过程**

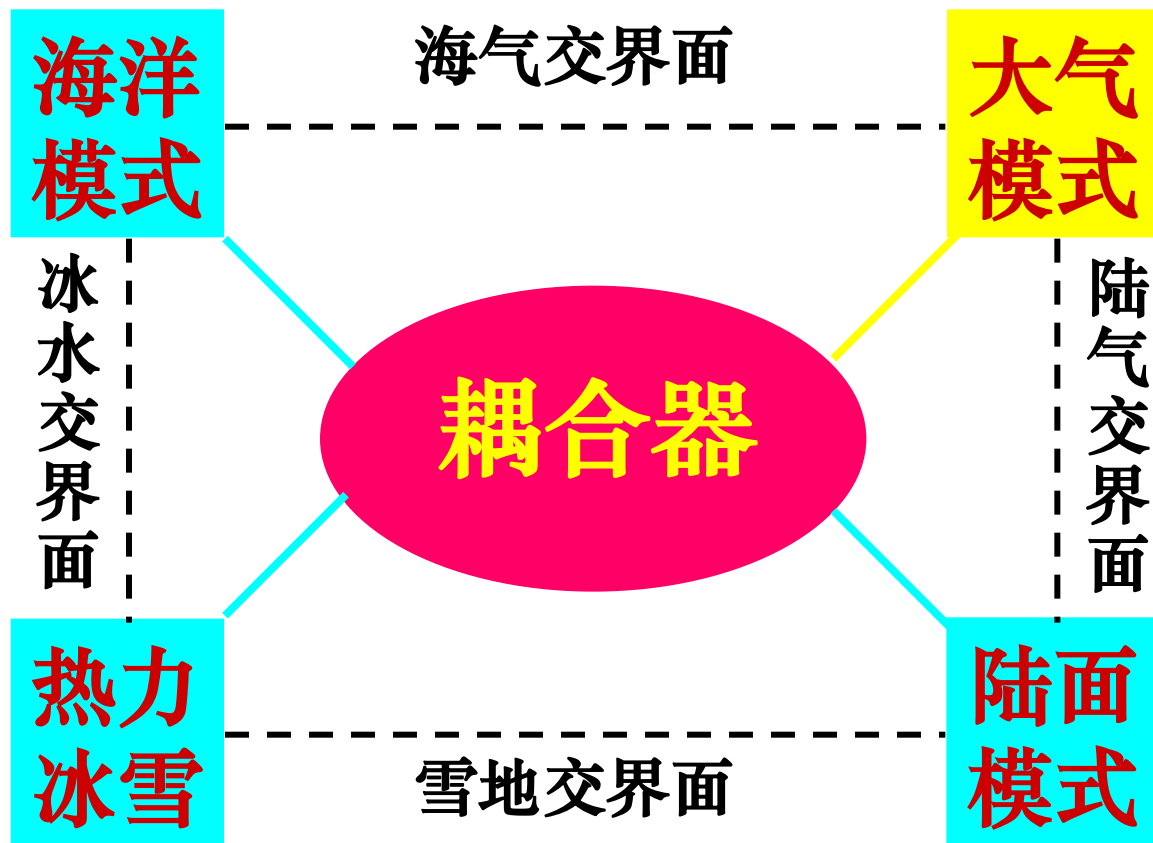
2、中间阶段：地球气候系统模式

在**物理气候系统模式**的基础上，考虑**大气化学过程**和**地球生物化学过程**（陆面生物、海洋生物）

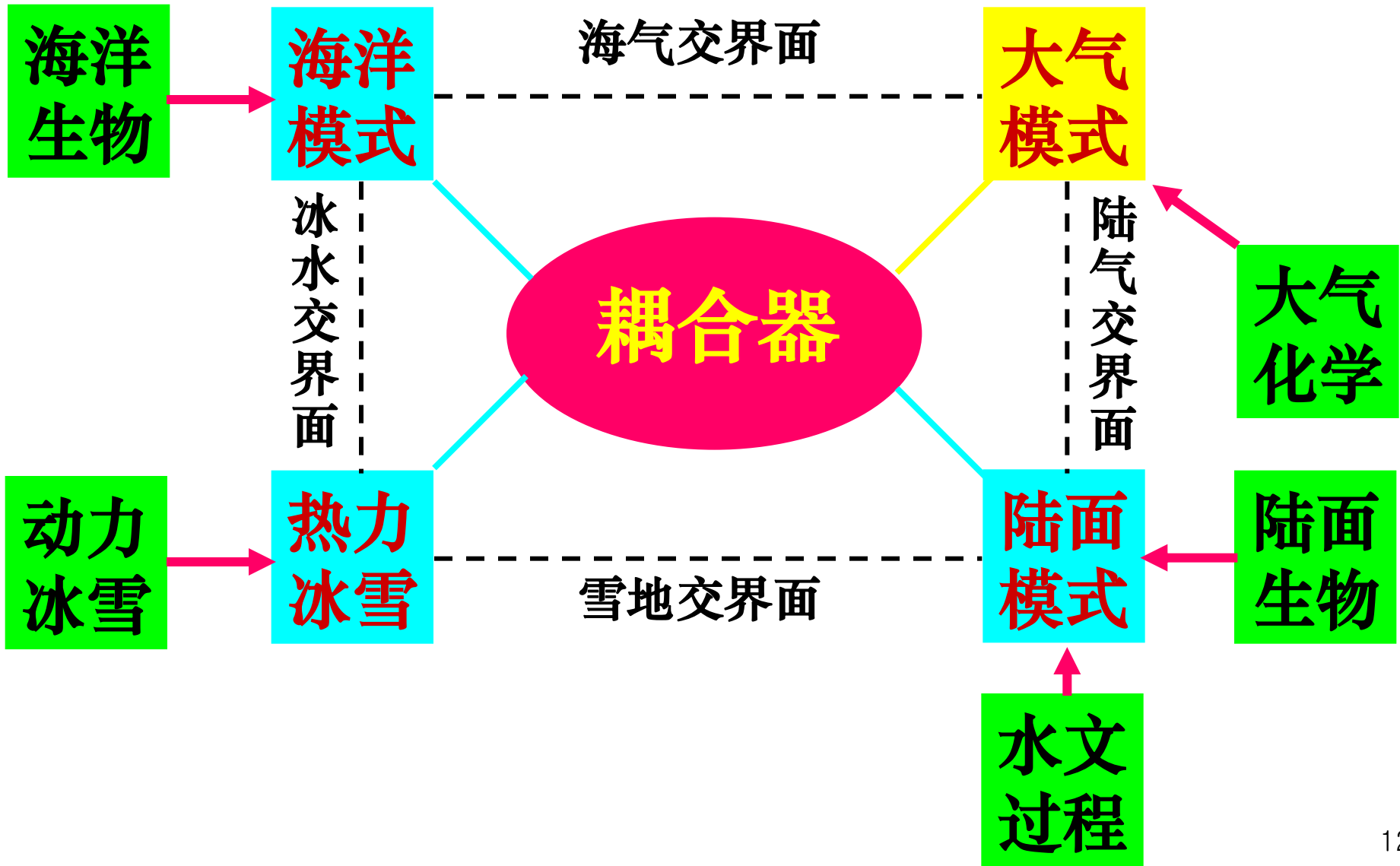
3、成型阶段：相对完整的地球系统模式

在**地球气候系统模式**的基础上，进一步考虑其与**固体地球**（如地球版块移动及其引发的地形变化、地震、火山爆发等）和**空间天气**的相互作用

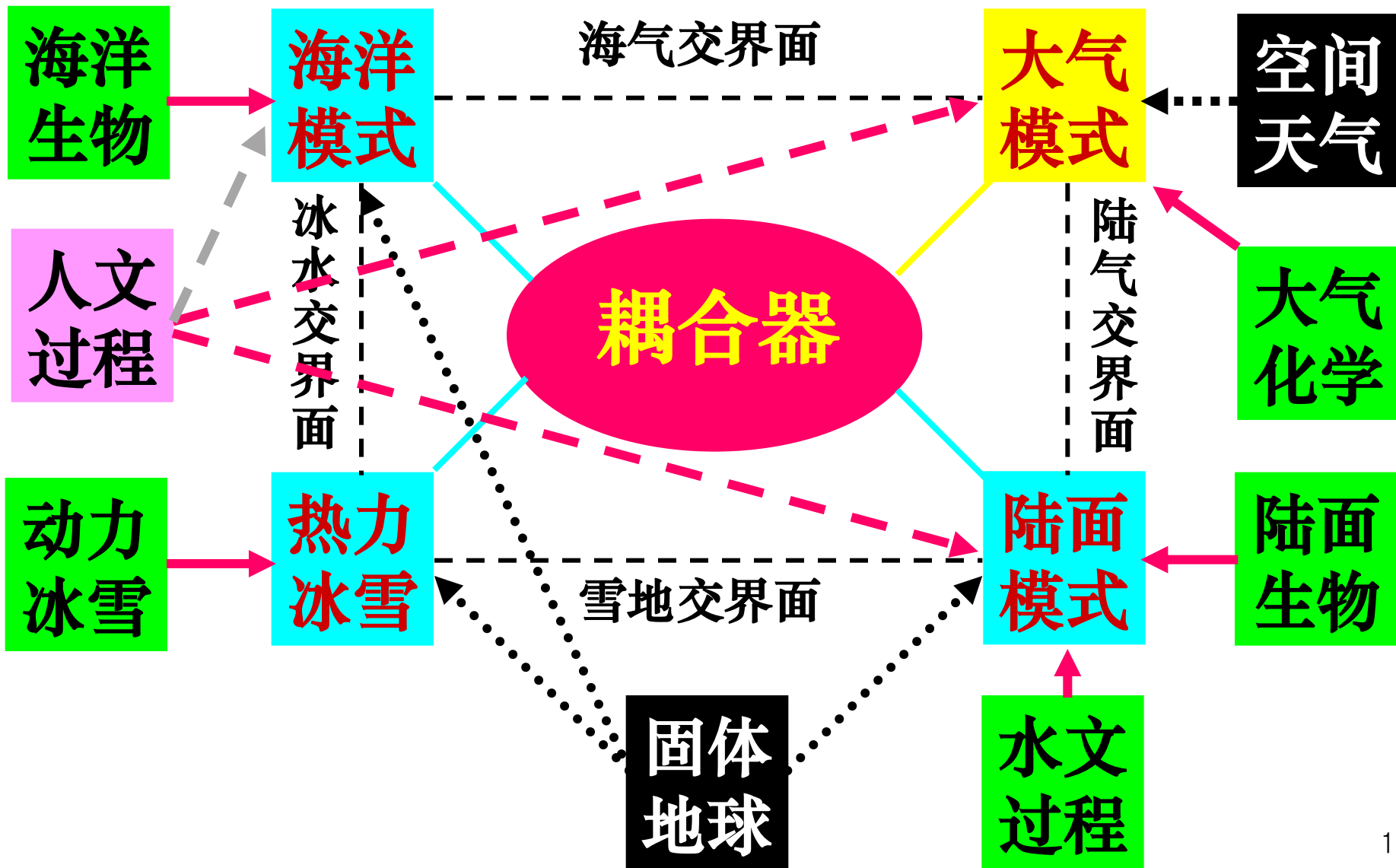
物理气候系统模式



地球气候系统模式



地球系统模式

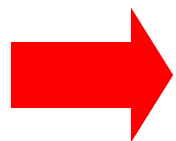


地球系统模式的战略意义

- 1、全球变暖正在严重影响着人类的生产活动与生活环境，这是各国政府与科学家必须面对的重大问题。这样，耦合各圈层的地球系统模式就成了全球变化研究的最重要的、不可替代的研究手段之一。
- 2、地球系统模式集地球系统中的科学问题和实现模拟的高新技术（如高性能计算机技术、卫星和雷达等观测技术）于一体，成为科学与技术有机结合的系统工程体系，目前也成为了衡量一个国家综合实力的标准之一。

内容目录

1、定义及战略意义



2、主要研究计划

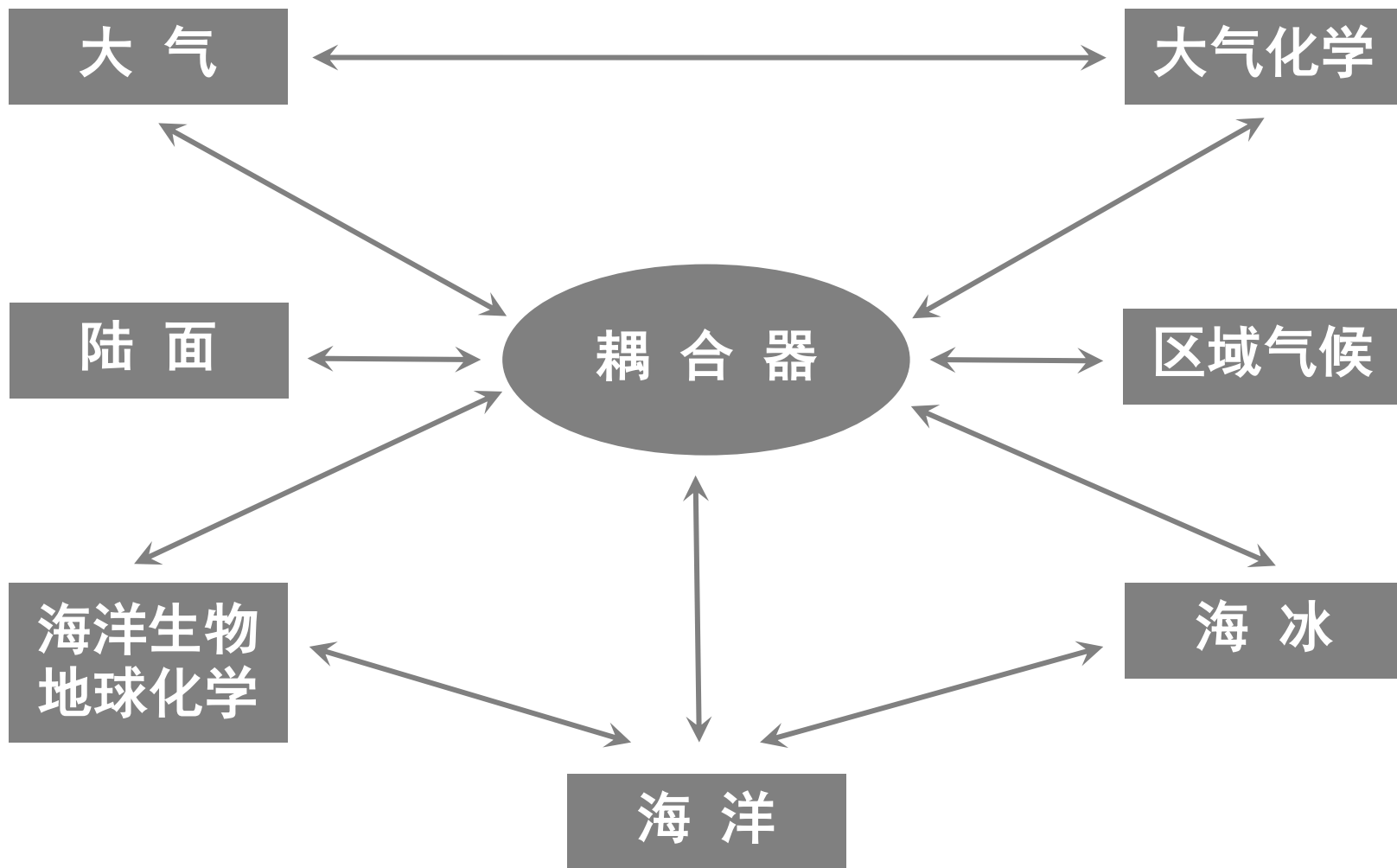
3、模式综合介绍

4、存在的问题与展望

地球系统模式中包含的物理、化学和生物过程几乎涉及到了地球科学中的绝大多数研究方向，其实现又密切依赖于计算科学（包括算法、计算机硬件及其软件），是一个巨大的系统工程，不可能是一个人、一个课题组甚至一个研究所能够完成的，必须有相应的管理机构从中协调。目前国际上大多都是由国家出面甚至多个国家联合（如欧盟）支持一个庞大的研究计划来发展地球系统模式。

国外几个主要的研究计划

- 1、**共同体气候系统模式发展计划**（美国）
（CCSM, 2001-2005, NCAR; NSF和DOE支持）
- 2、**地球系统模拟框架计划**（美国，19个单位参加）
（ESMF, 2001-2010; 由NASA, DoD和NSF支持）
- 3、**地球系统模拟集成计划**（欧盟，22个单位参加）
（PRISM, 2001-; 特点：选用10个优秀的耦合气候模式进行集成模拟研究）
- 4、**地球模拟器计划**（日本）
（Earth Simulator, 1997-; 日本科技厅、原子能所、国家空间发展署、海洋科技中心、理化所等支持）



PRISM 模式结构示意图

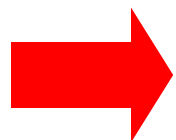
国内的主要研究计划

- 一、 “全球气候系统模式联合研究计划”
(2001-2005; LASG、CAMS、南大等)
- 二、 “中国应加速发展自己的气候系统模式”
(2002, 基金委内参简报)
- 三、 “全球变化研究国家重大科学研究计划”
(2010, 科技部)

内容目录

1、定义及战略意义

2、主要研究计划



3、模式综合介绍

4、存在的问题与展望

地球系统模式的发展历史

- ◆ 大气环流模式 (AGCM)
- ◆ 陆面过程模式 (LSM)
- ◆ 海洋环流模式 (OGCM)
- ◆ 海冰模式 (SIM)
- ◆ 海气耦合模式 (CGCM或AOGCM)
- ◆ 气候系统模式 (CSM)
- ◆ 地球系统模式 (ESM)

常用模式缩写的全称

- ◆ **GCM: General Circulation Model**
- ◆ **AGCM: Atmospheric GCM**
- ◆ **OGCM: Oceanic GCM**
- ◆ **CGCM: Coupled GCM**
- ◆ **AOGCM: Atmosphere-Ocean GCM**
- ◆ **LSM: Land Surface Model**
- ◆ **SIM: Sea Ice Model**
- ◆ **CSM: Climate System Model**
- ◆ **ESM: Earth System Model**
- ◆ **NWP: Numerical Weather Prediction**

大气环流模式

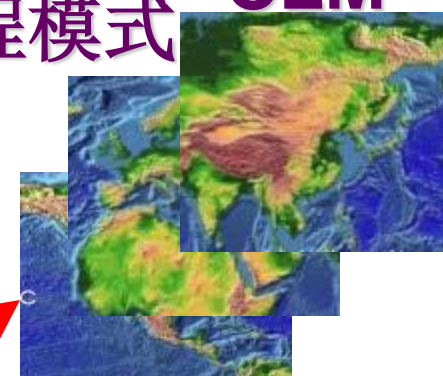
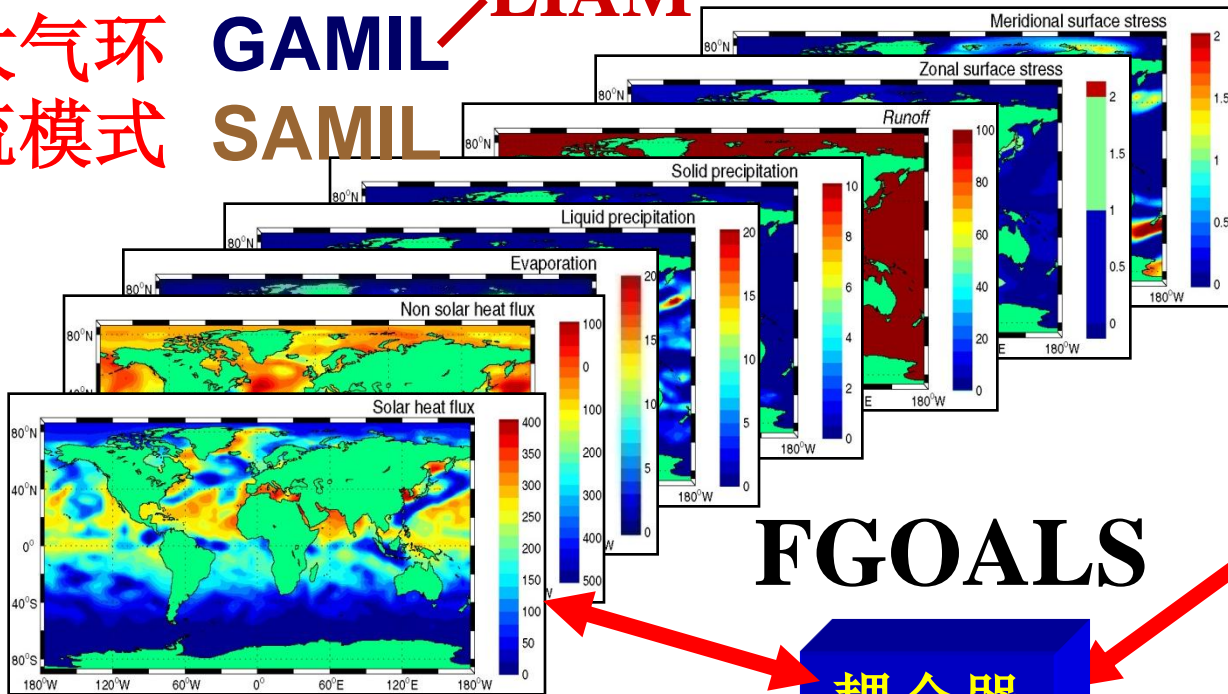
GAMIL
SAMIL

LIAM

M-SDGVM

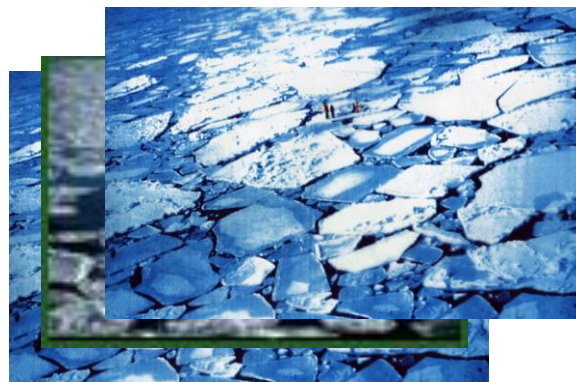
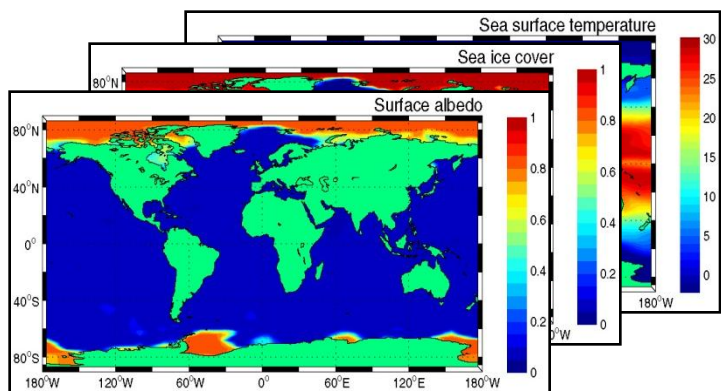
陆面过程模式

CLM



FGOALS

耦合器
cpl5

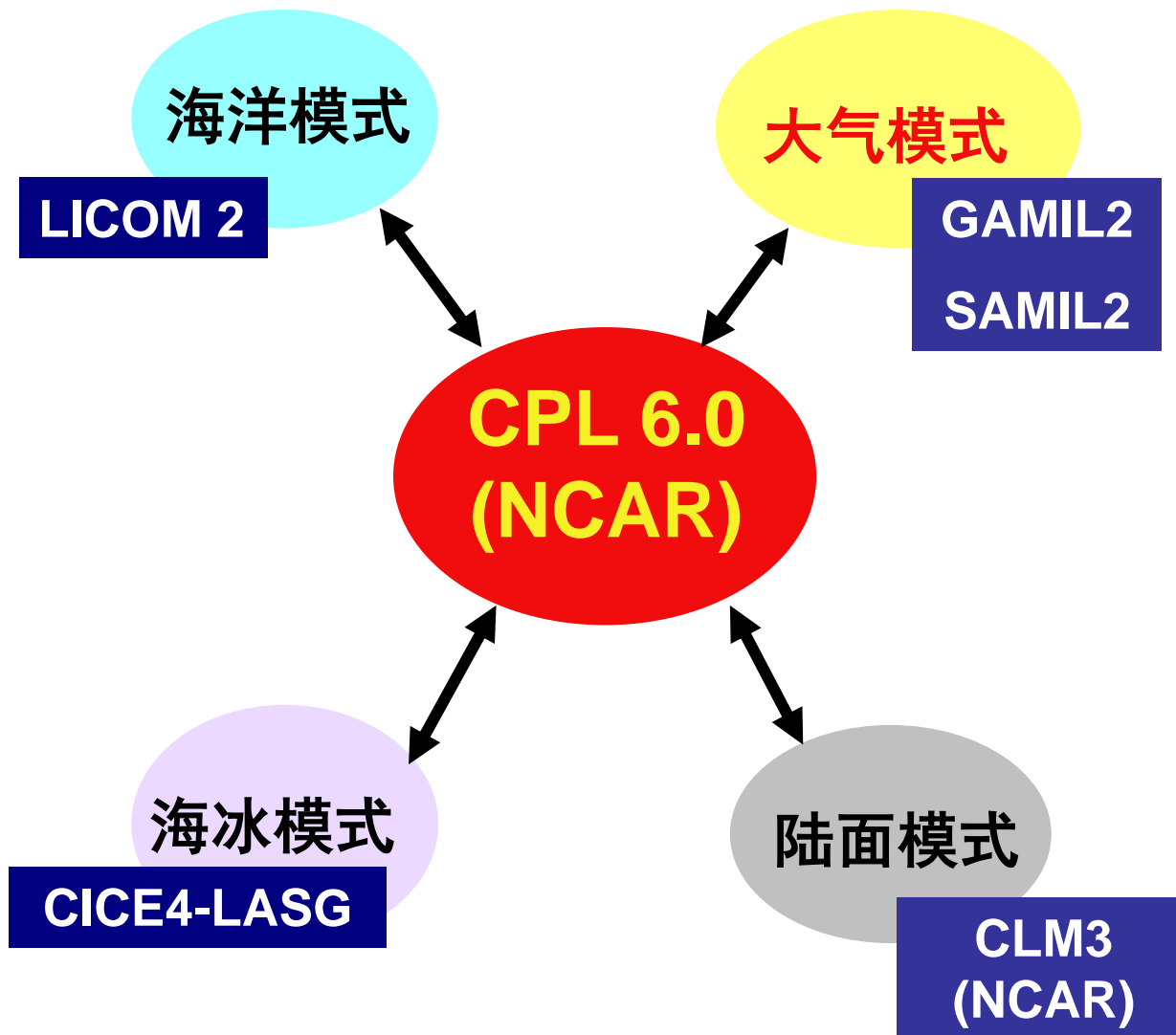


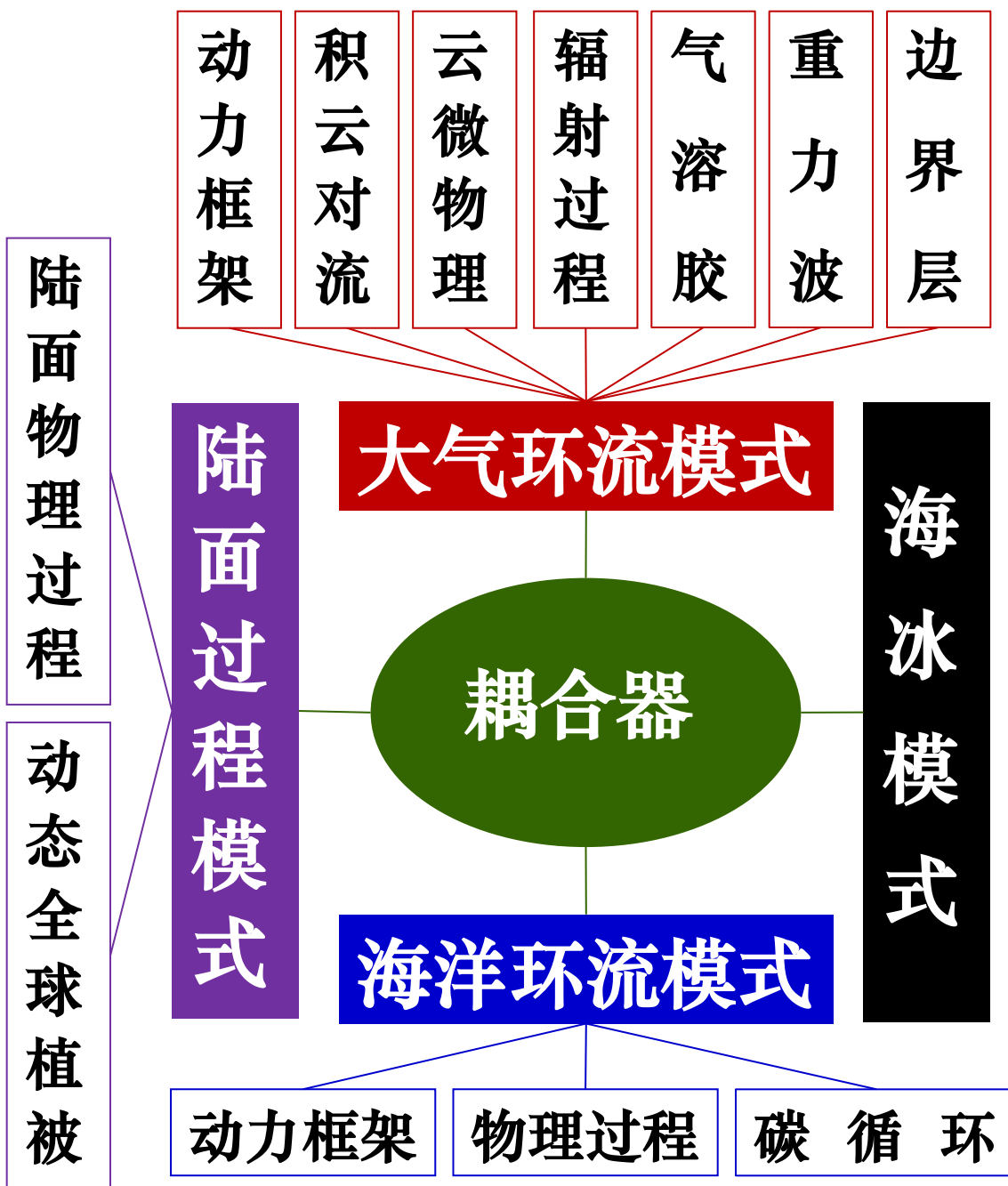
大洋环流模式: LICOM

海冰模式: CSIM4

FGOALS2 结构图

(Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model Version 2)





分量模式

- 耦合方案
- 大气环流模式
- 陆面过程模式
- 海洋环流模式
- 海冰模式

物理气候系统模式耦合方案

一、**通量调整为主**（2000年以前）

二、**直接通量耦合**（2000年以后）

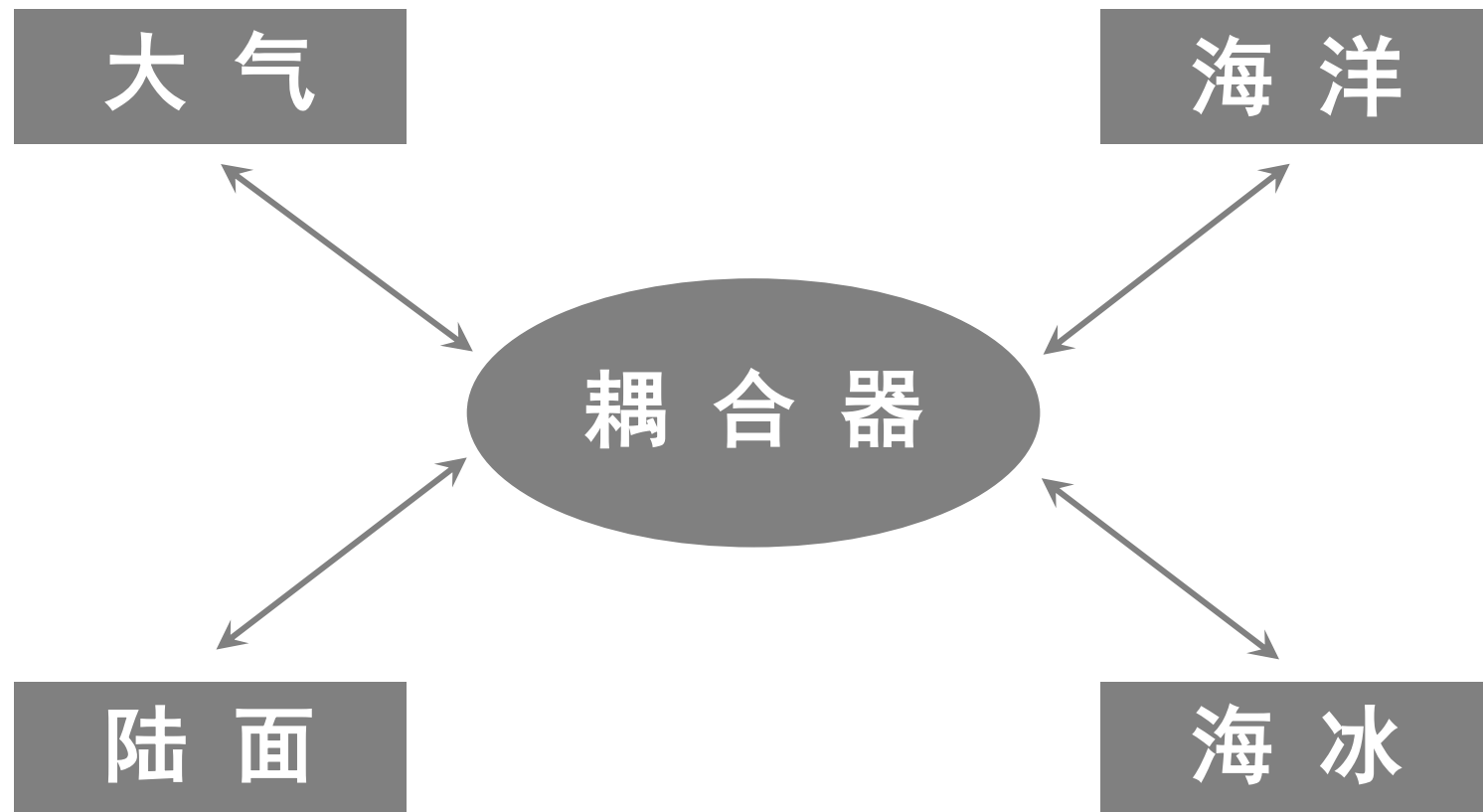
这是物理气候系统模式发展的一个进步，可排除“人为调整”的主观影响，更客观、更自然地描述圈层间的能量和物质的交换。其实现方案有二种：

1. “**可插拔式**”的模块化框架（**耦合器**）

2. “**海气耦合式**”的非模块化耦合框架

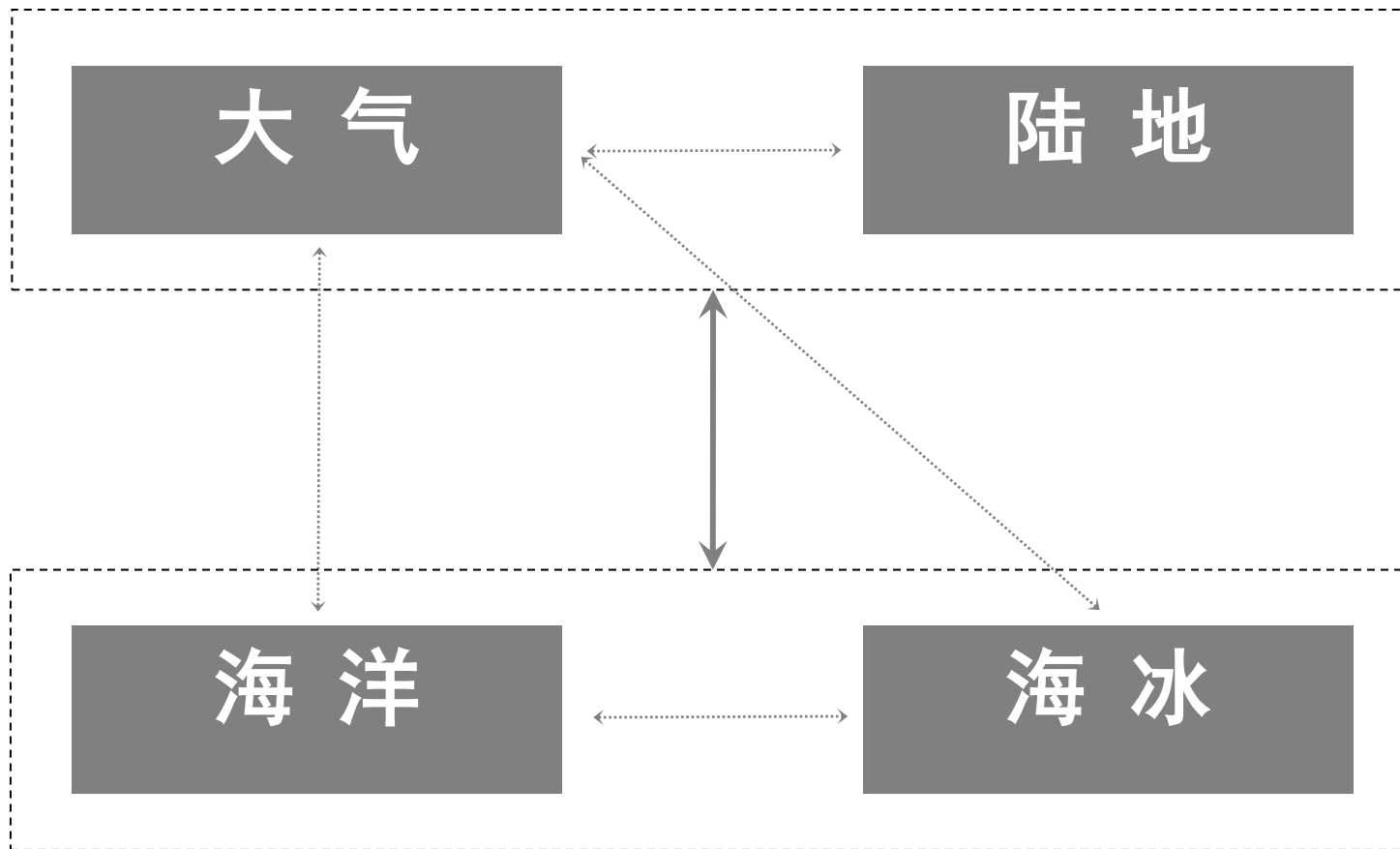
（**没有单独耦合器的**）

“可插拔式”模块化框架



模块化物理气候系统模式结构示意图

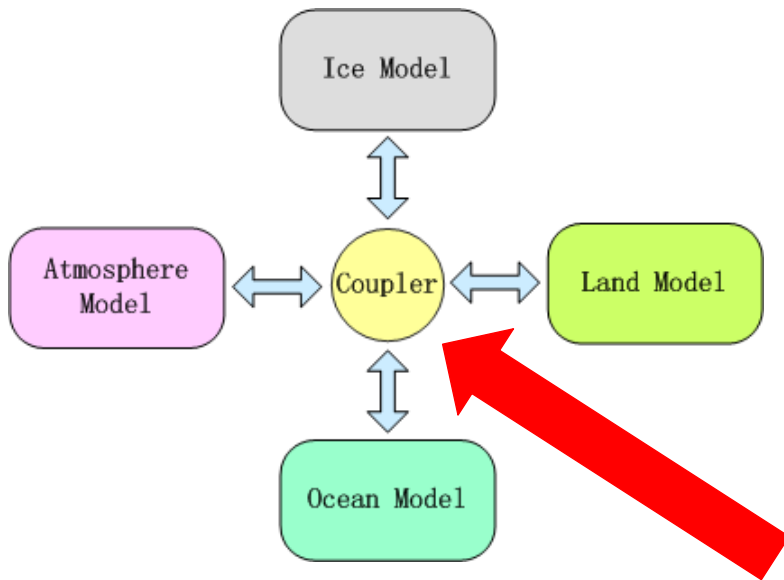
“海气耦合式”非模块化框架



非模块化物理气候系统模式结构示意图

Lack of direct flux exchange in available couplers

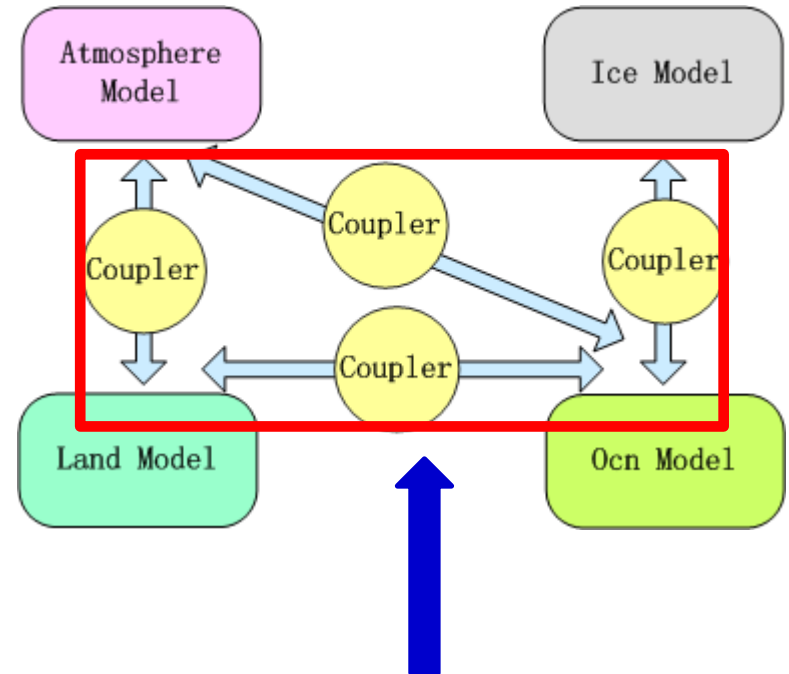
NCAR Coupler



**Centralized flux coupler
without direct flux exchange**

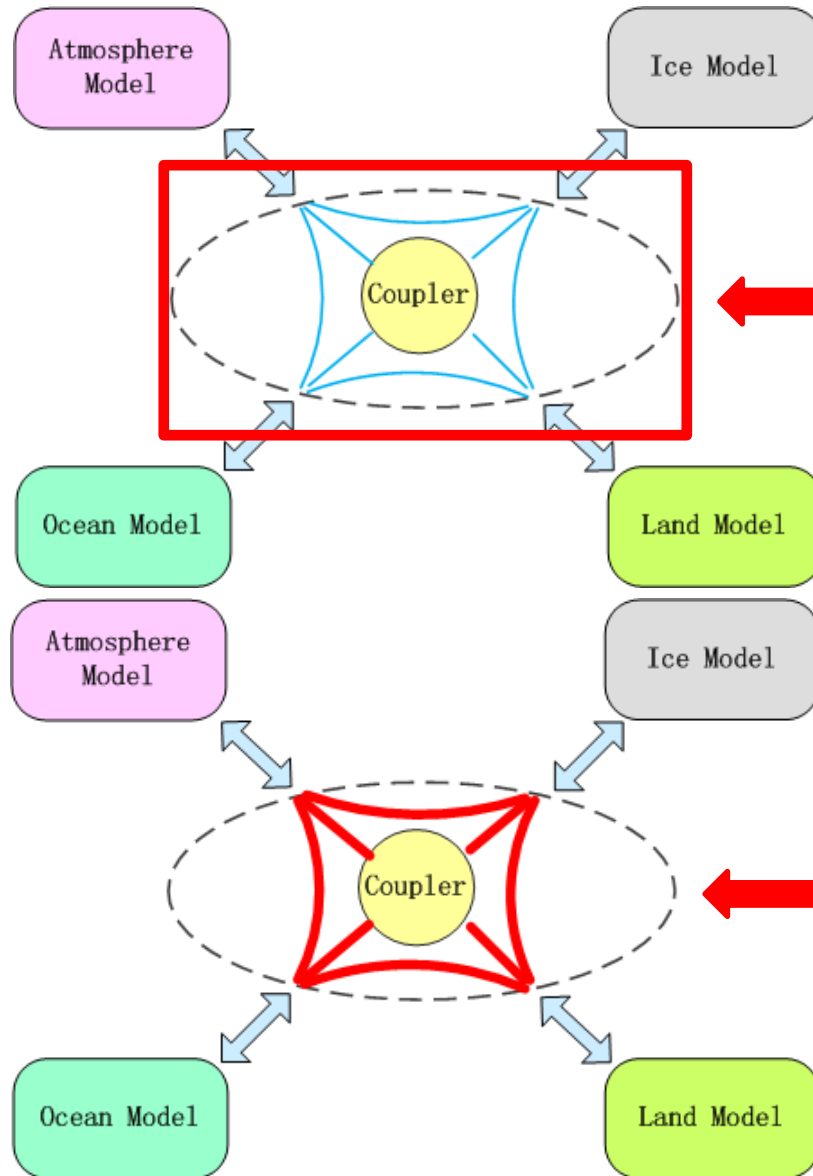
(Liu et al, 2011)

OASIS Coupler



**Decentralized
non-flux coupler
without direct
flux exchange**

C-Coupler: to overcome the imperfection (the first coupler developed by Chinese scientists)



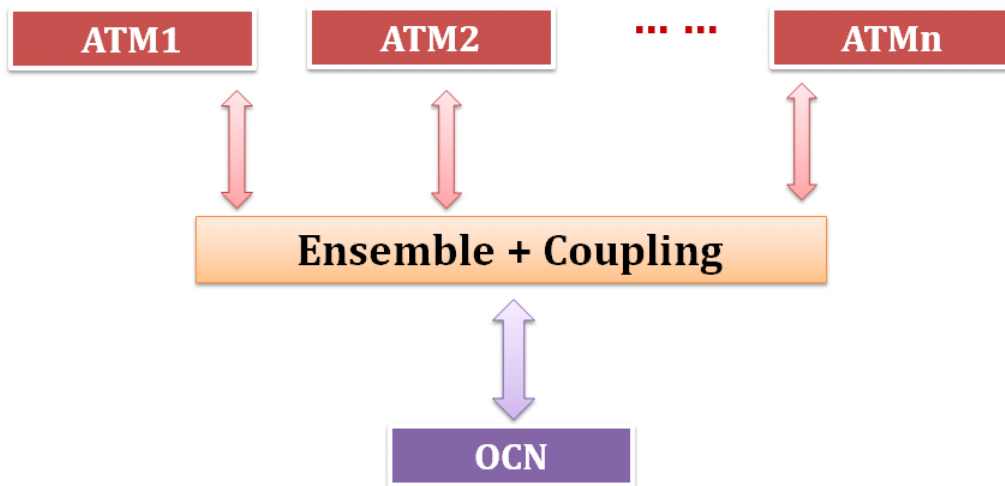
**Centralized flux coupler
for modularization
and standardization**

**Direct flux exchange for
better parallel efficiency
of high-resolution models**

(Liu et al, 2011)

Ensemble coupling software framework

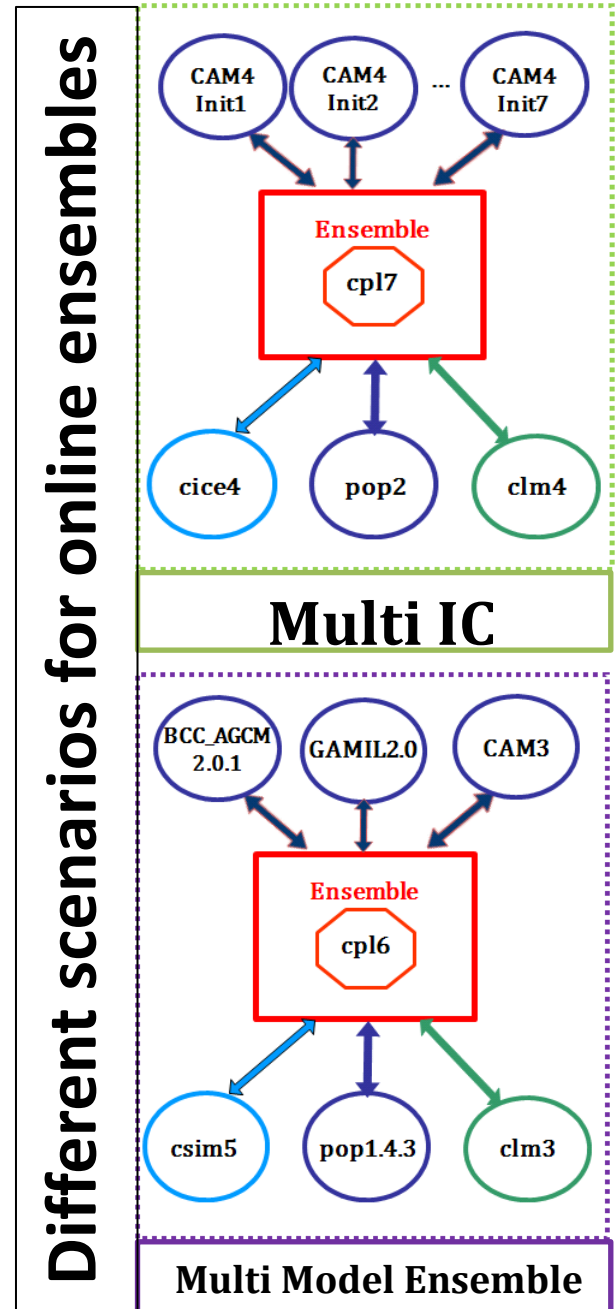
Online ensemble tool for coupled climate model



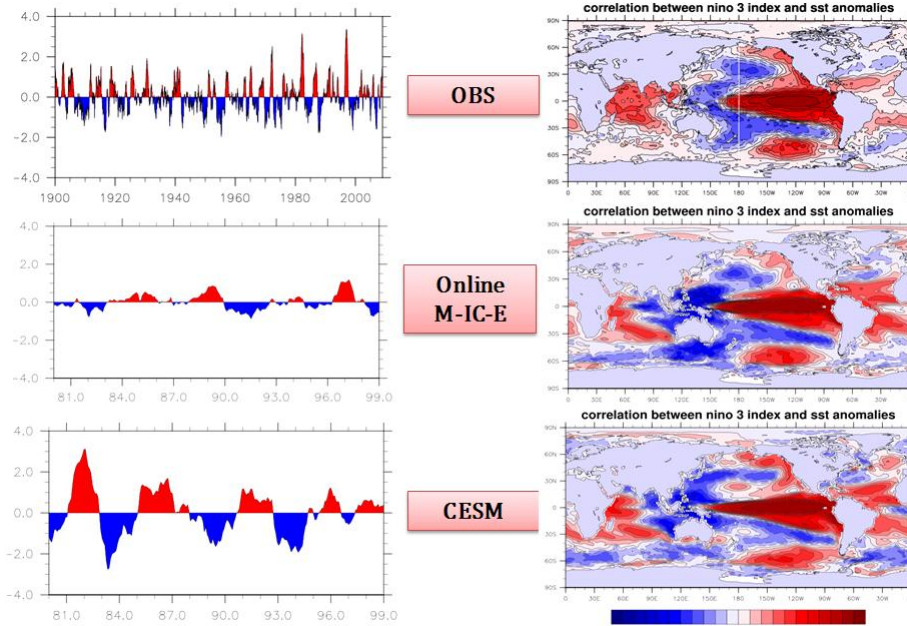
Motivation

How weather noise / atmospheric model uncertainty impacts the climate response?

(Xue et al, 2011)



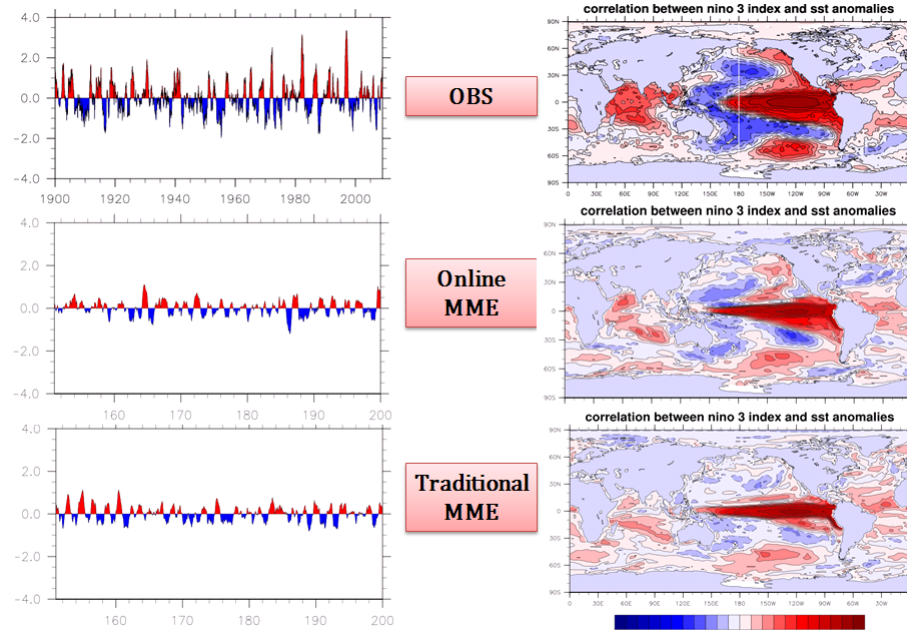
ENSO



(Xue et al, 2012)

Online Multi-initial condition ensemble

Single initial condition



Online Multi-model ensemble

Offline Multi-model ensemble

(Xue et al, 2011)

分量模式

- 耦合方案
- 大气环流模式
- 陆面过程模式
- 海洋环流模式
- 海冰模式

大气环流模式

动力框架

- ◆ 动力学方程组及其守恒性
- ◆ 垂直坐标系及其优缺点
- ◆ 数值方法与网格配置

物理过程

- ◆ 辐射过程
- ◆ 积云对流过程
- ◆ 格点降水过程
- ◆ 气溶胶效应
- ◆ 边界层过程
- ◆ 重力波拖曳
- ◆ 陆面过程

斜压大气非静力平衡方程组

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{a \rho \cos \theta} \frac{\partial p}{\partial \lambda} - f v + \tilde{f} w = F_u \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial v}{\partial \theta} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{a \rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + f u = F_v \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial w}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial p} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g - \tilde{f} u = 0 \\
 \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \theta} + w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{C_p \rho} \frac{dp}{dt} = F_T + \frac{1}{C_p} \dot{H} \\
 \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial q}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial q}{\partial \theta} + w \frac{\partial q}{\partial z} = F_q + \dot{Q}_q \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \theta} \left(\frac{\partial u \rho}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \cos \theta \rho}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial w \rho}{\partial z} = 0
 \end{array} \right.$$

斜压大气静力平衡方程组

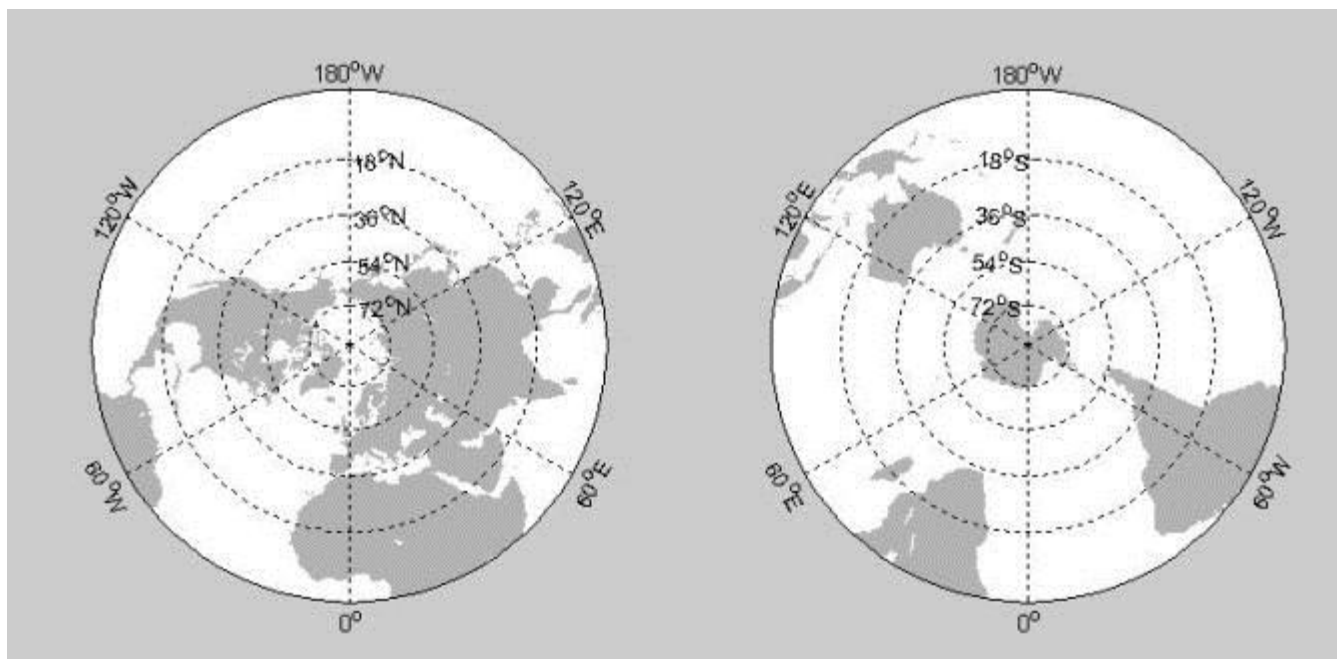
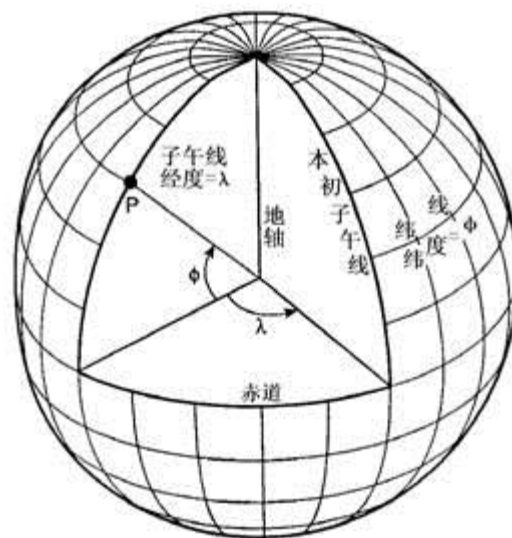
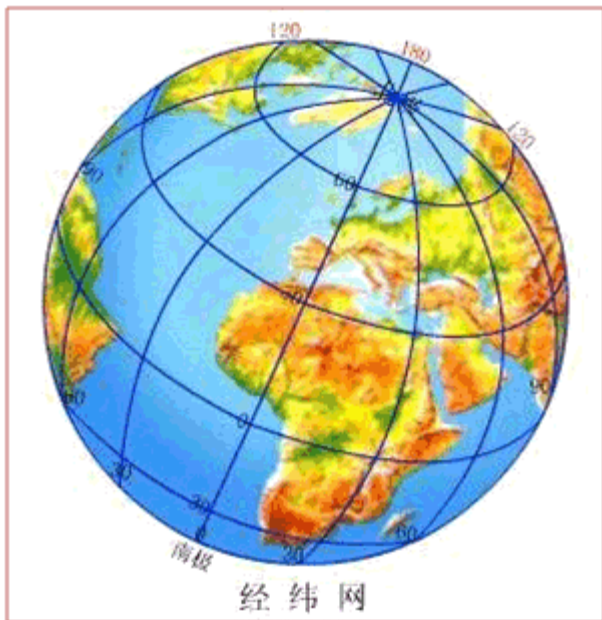
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{a \rho \cos \theta} \frac{\partial p}{\partial \lambda} - fv = F_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial v}{\partial \theta} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{a \rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + fu = F_v \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \theta} + w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{C_p \rho} \frac{dp}{dt} = F_T + \frac{1}{C_p} \dot{H} \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial q}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial q}{\partial \theta} + w \frac{\partial q}{\partial z} = F_q + \dot{Q}_q \\ \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = 0 \end{array} \right.$$

where $f = 2\Omega \sin \theta + \frac{u}{a} \tan \theta$

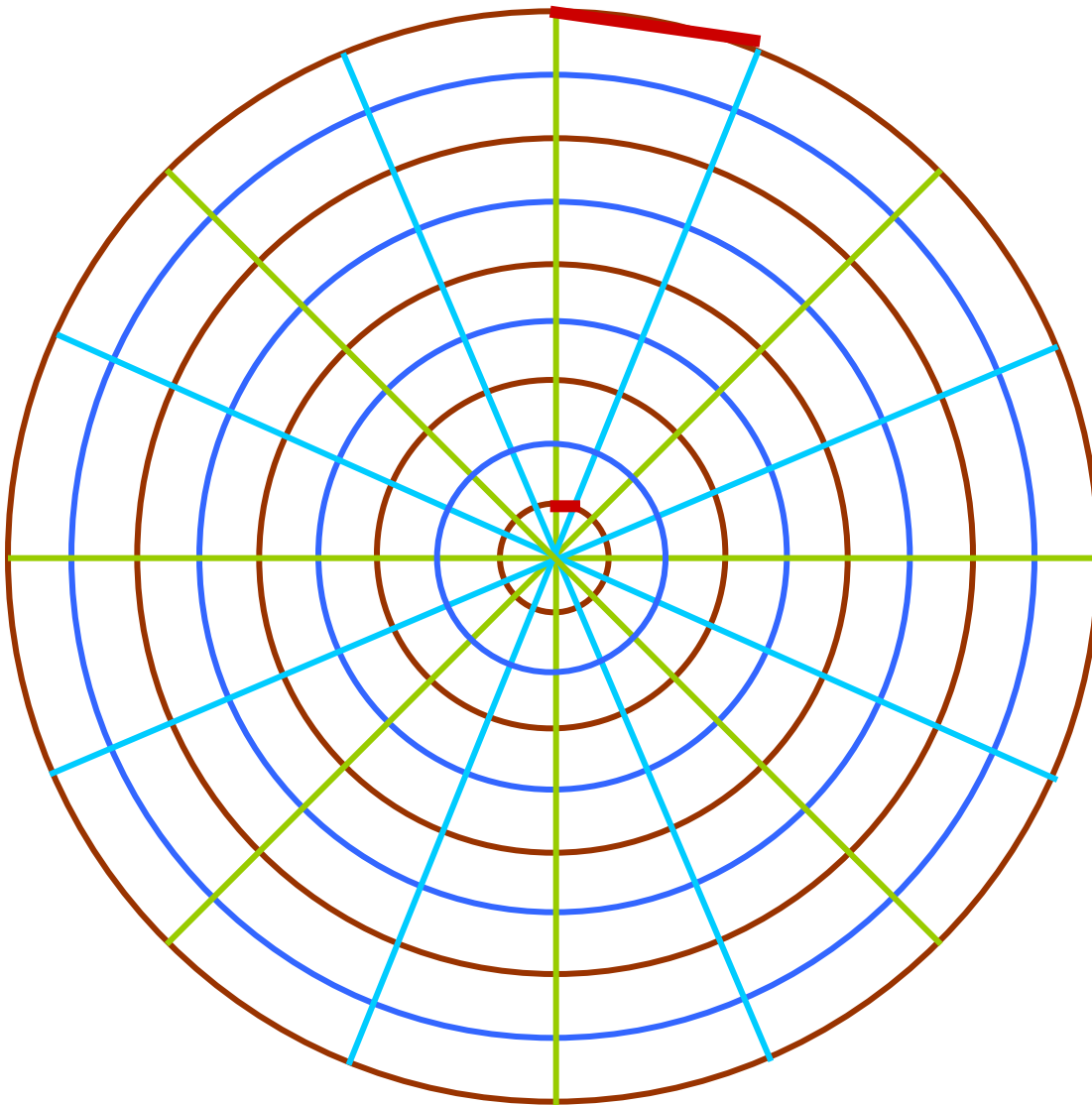
$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial p}{\partial \theta} + w \frac{\partial p}{\partial z}$$

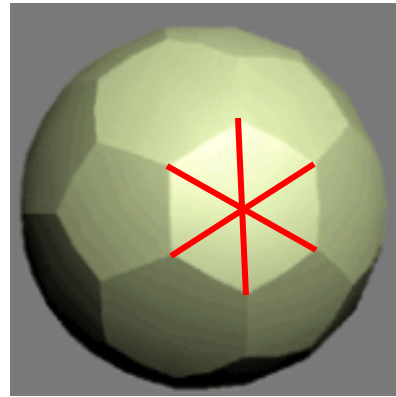
正压浅水波方程组

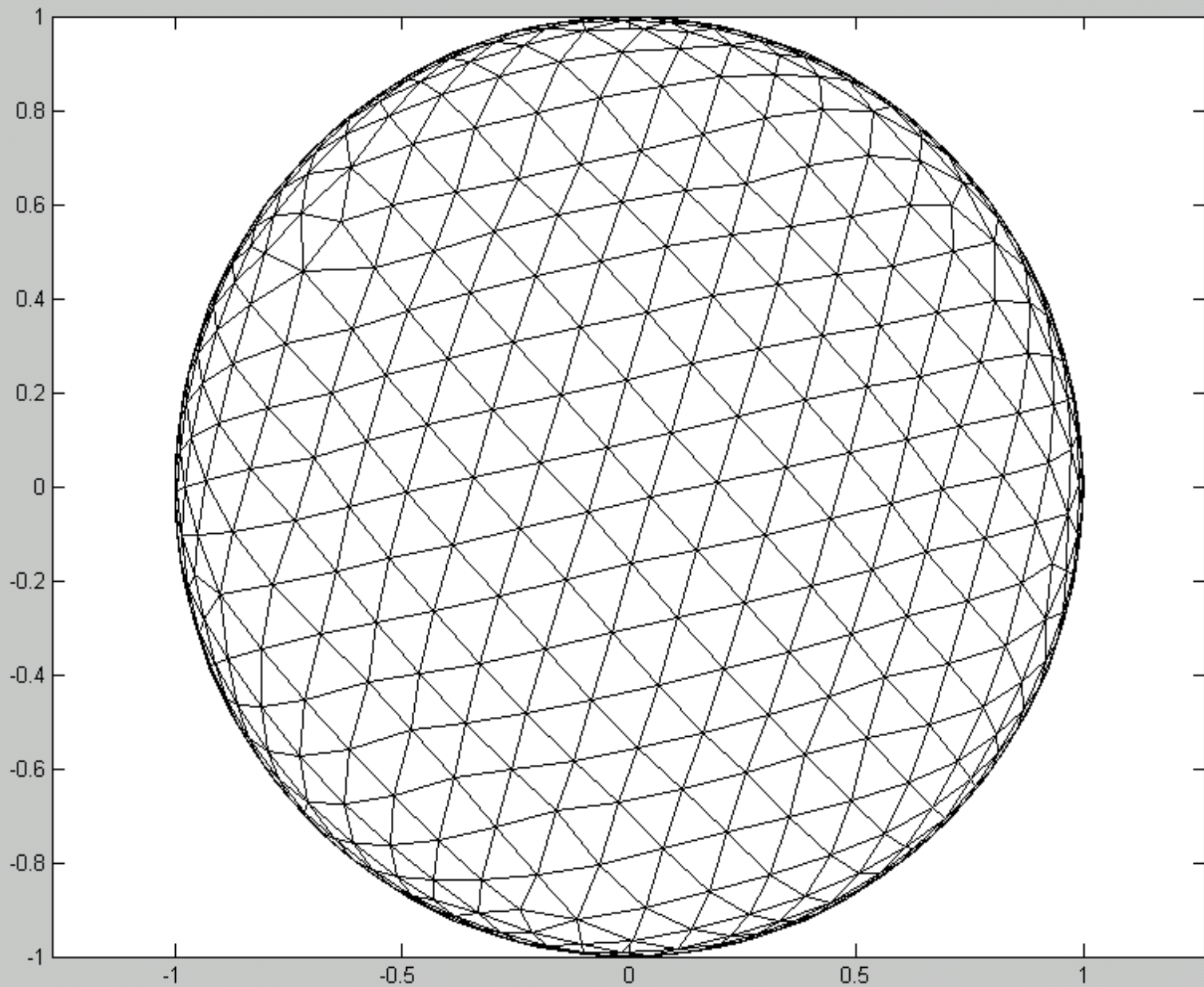
$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - f v = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \theta} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{1}{a} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + f u = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \theta} \left[\frac{\partial u \phi}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \cos \theta \phi}{\partial \theta} \right] = 0 \end{cases}$$



经纬度网格带来的麻烦







AGCM-动力框架

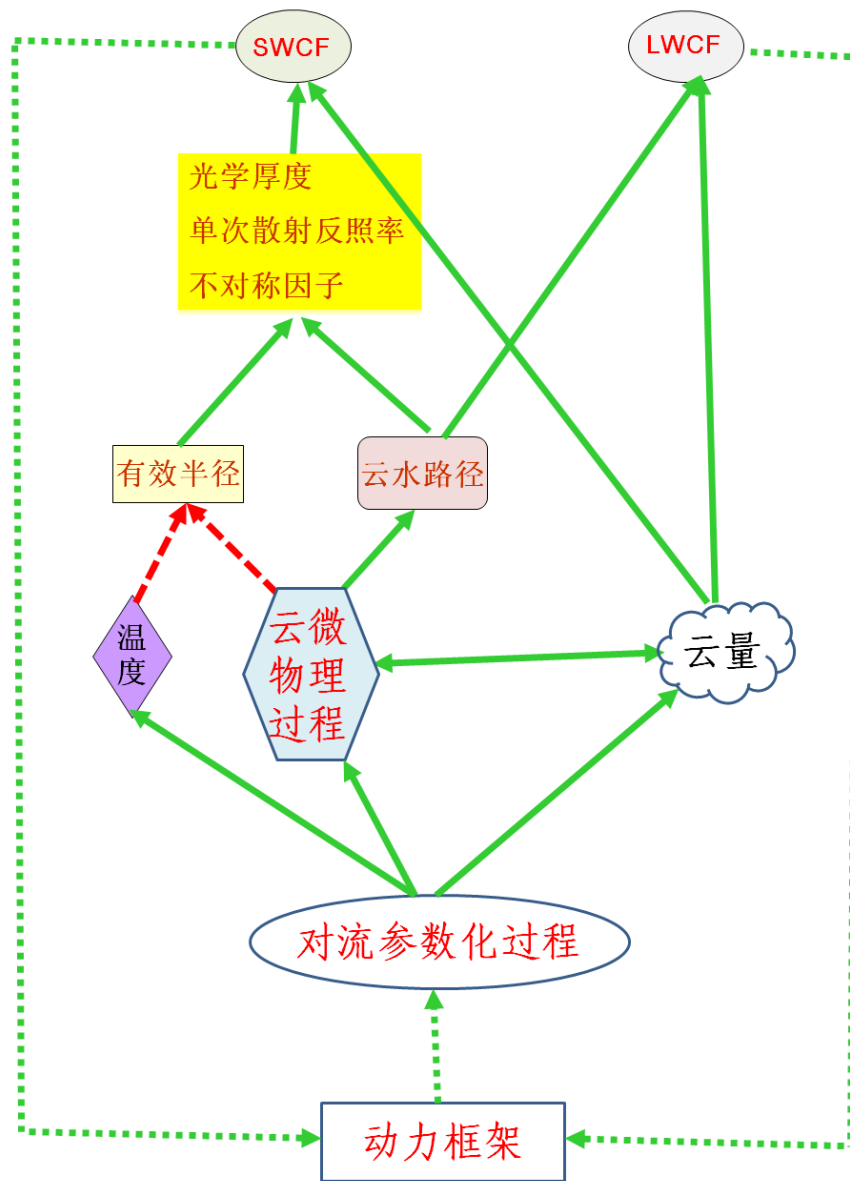
- 1、谱模式
- 2、半拉格朗日模式
- 3、有限差分模式
- 4、有限体积模式

大气模式GAMIL的主要改进 (从AR4 到 AR5)

	AR4 (GAMIL1.0)	AR5 (GAMIL2.0)
Convective Scheme	Zhang and McFarlane(1995)/Hack (1994)	Zhang and Mu (2005)/Hack(1994)
Convective cloud fraction	Rasch and Kristjánsson (1998)	Xu and Krueger (1991)
Cloud microphysical scheme	Rasch and Kristjansson (1998)	Morrison and Gettelman (2008)

In addition, some parameters in shallow, deep convection and boundary layer schemes are tuned in GAMIL2.0 comparing with GAMIL1.0

序号	变量名	变量描述	文件名
1	cmftau	characteristic adjustment time scale of shallow cape	moistconvection.F90
2	c0	rain water autoconversion coefficient for shallow convection	moistconvection.F90
3	capelmt	threshold value for cape for deep convection	zm_conv.F90
4	ke	evaporation efficiency for deep convection	zm_conv.F90
5	c0	rain water autoconversion coefficient for deep convection	zm_conv.F90
6	rhcrit	threshold value for rh for deep convection	clousure.F90
7	alfa	Initial downdraft mass flux	zm_conv.F90
8	rhminl	minimum rh for low stable clouds	cloud_fraction_MG.F90
9	rhminh	minimum rh for high stable clouds	cloud_fraction_MG.F90
10	kvm	diffusion coefficient for momentum	vertical_diffusion.F90
11	kvh	diffusion coefficient for heat	vertical_diffusion.F90
12	wsub	sub-grid vertical velocity for aerosol activation	cldwat2m.F90
13	conke	rate of evaporation of stratiform precipitation	cldwat.F90
14	icritc	threshold for autoconversion of cold ice	cldwat.F90
15	icritw	threshold for autoconversion of warm ice	cldwat.F90



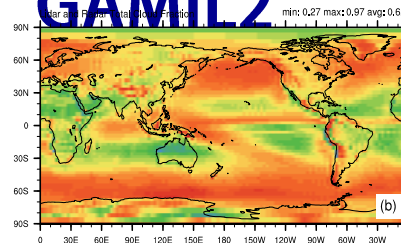
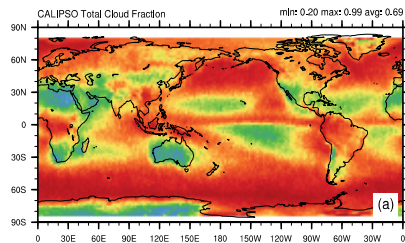
云辐射强迫概念图

气候平均态—云量分布

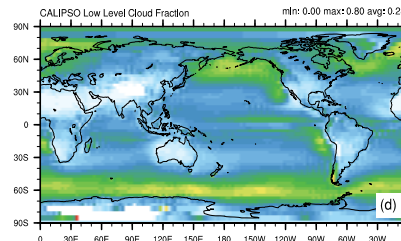
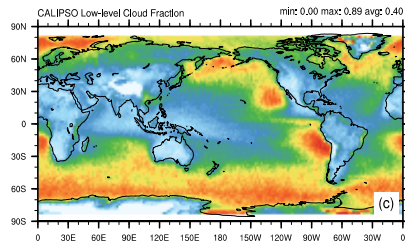
观测-CALIPSO 模拟-

GAMIL2

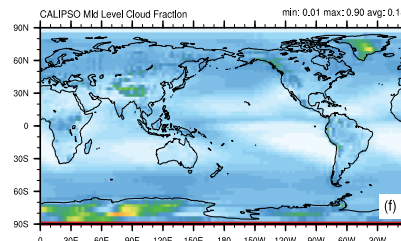
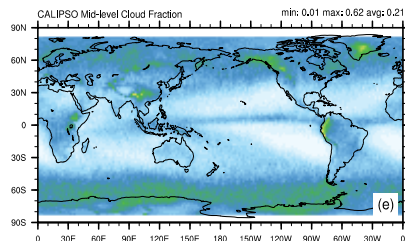
总云量



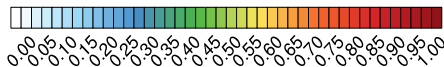
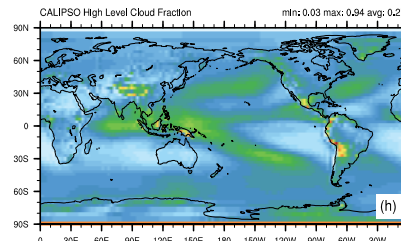
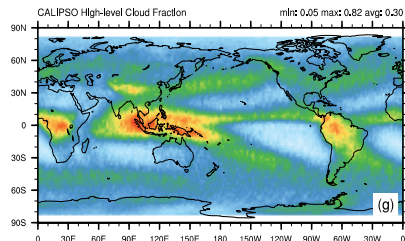
低云量



中云量

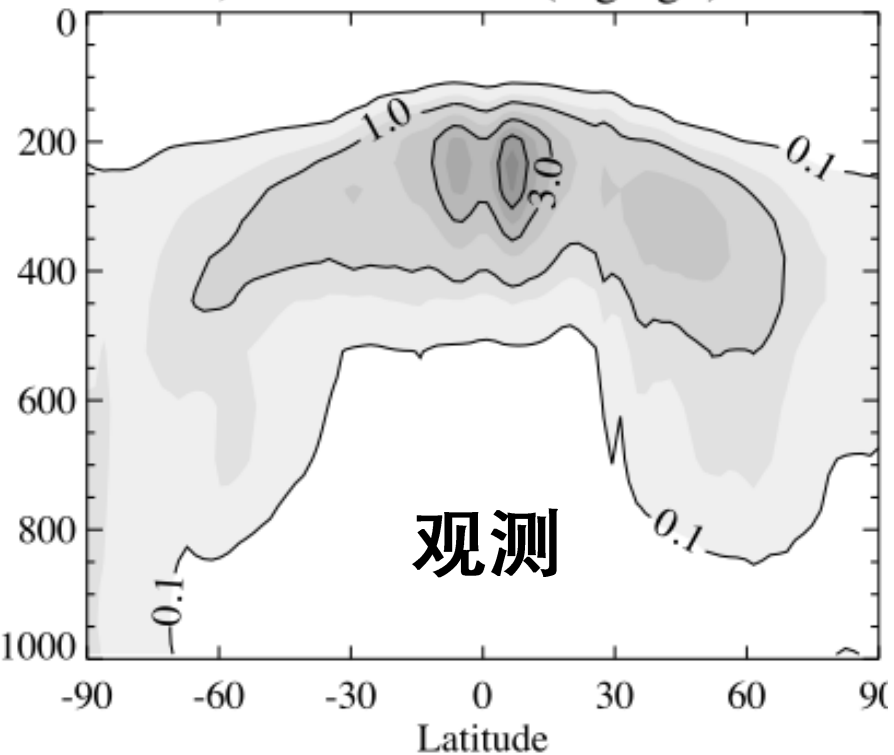


高云量

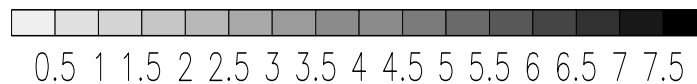
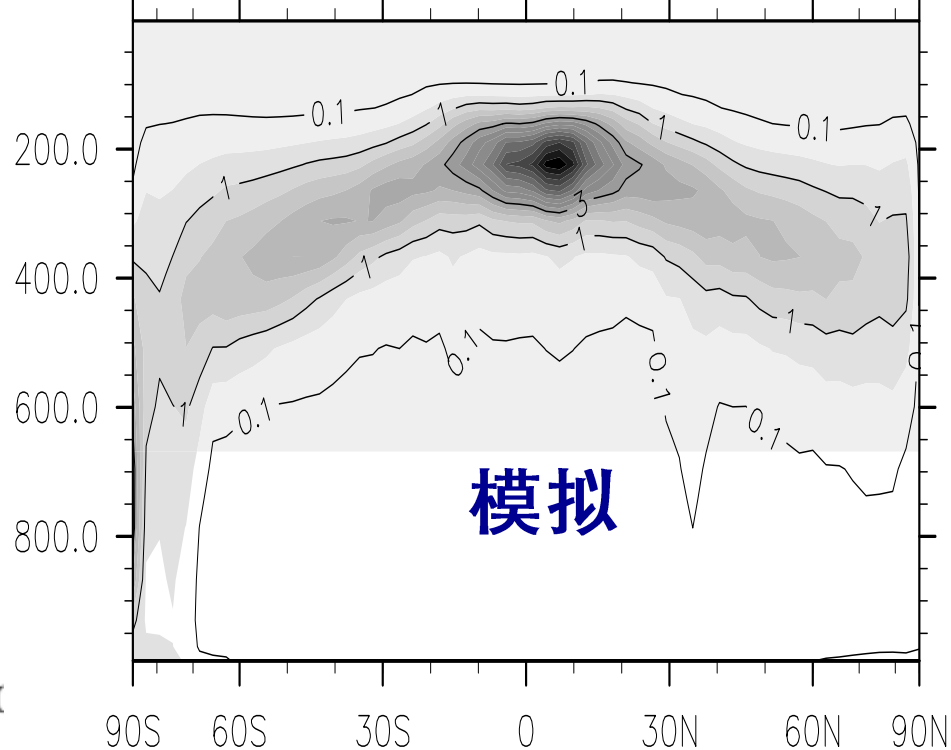


云冰含量的对比

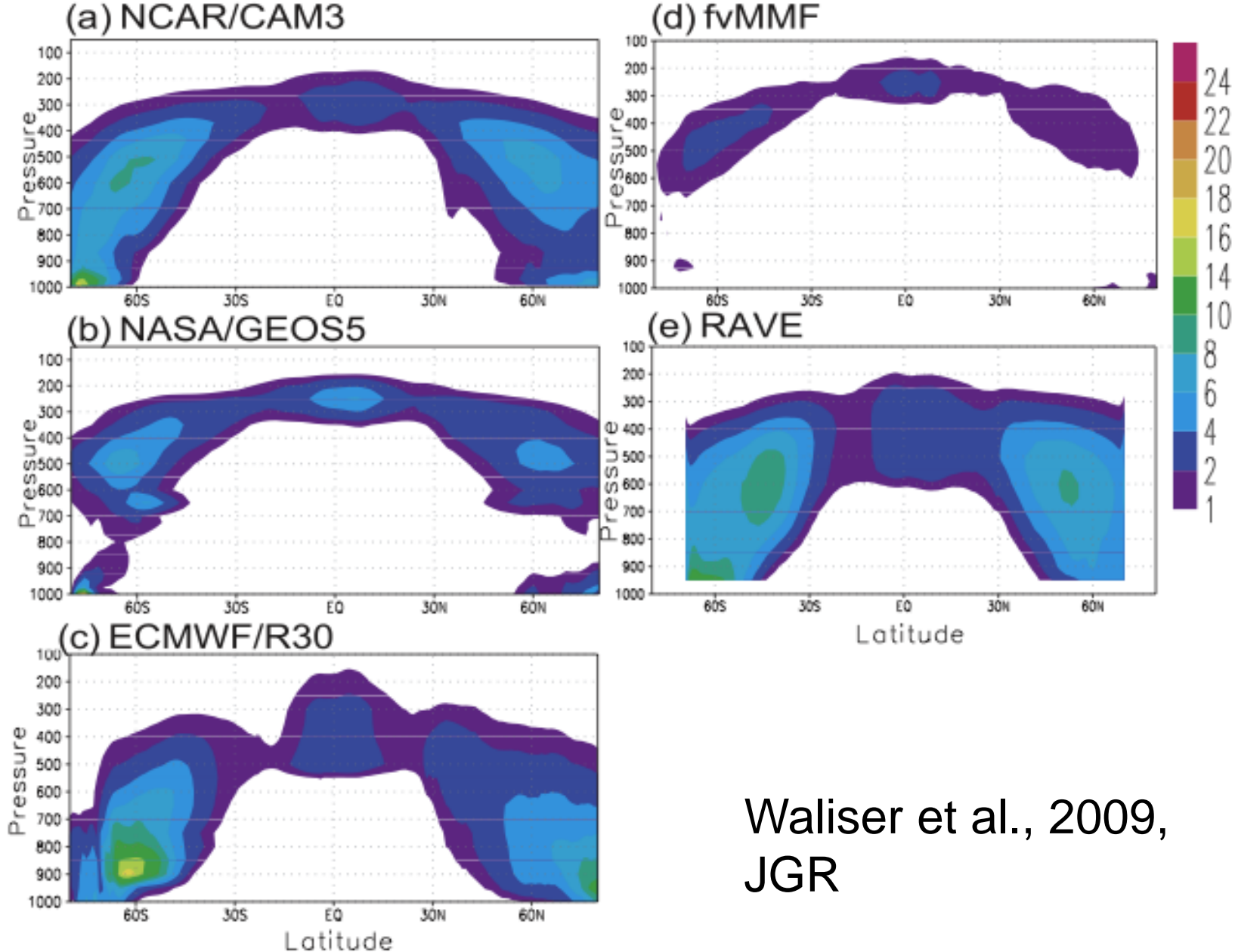
A) ICE Cloud Ice (mg kg^{-1})



CLDICE mg/kg



Gettelman et al., 2010, JGR



Waliser et al., 2009,
JGR

Figure 9. Annual and zonal mean values of cloud ice water content (IWC; mg m^{-3}) from (a) NCAR CAM3 (1979–1999), (b) NASA GEOS5 (January 1999 to December 2002), (c) ECMWF R30 analysis (August 2005 to July 2006), (d) fvMMF (July 1998 and January 1999), and (e) RAVE GCM (1998).

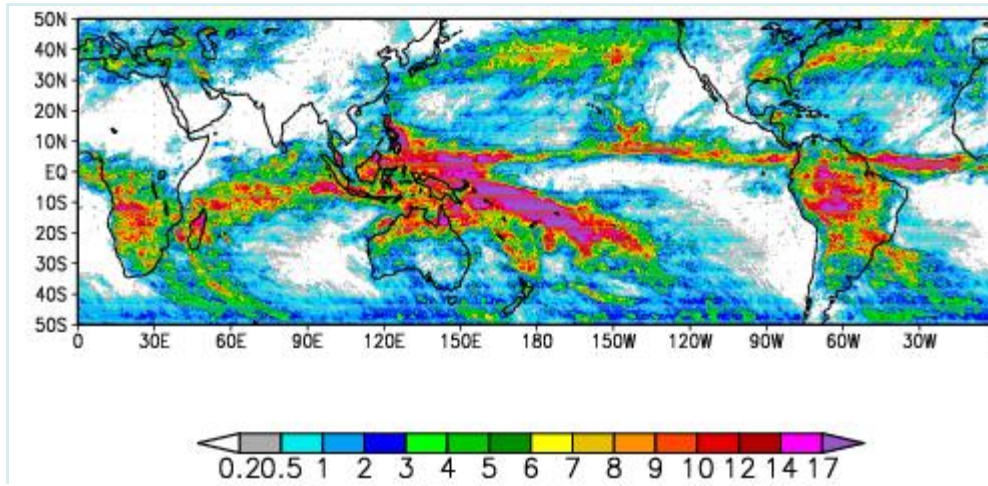
GAMIL 2.0的不同分辨率及稳定性

Horizontal Resolution	Time Step (unit: s)	Scheme for DC
2.8° × 2.8°	240	Analytical solution to zonal surface gravity waves, implicit solution to zonal internal gravity waves, and explicit solution to other terms.
1.0° × 1.0°	060	
0.5° × 0.5°	015	
0.25° × 0.25°	004	
0.125° × 0.125°	001	

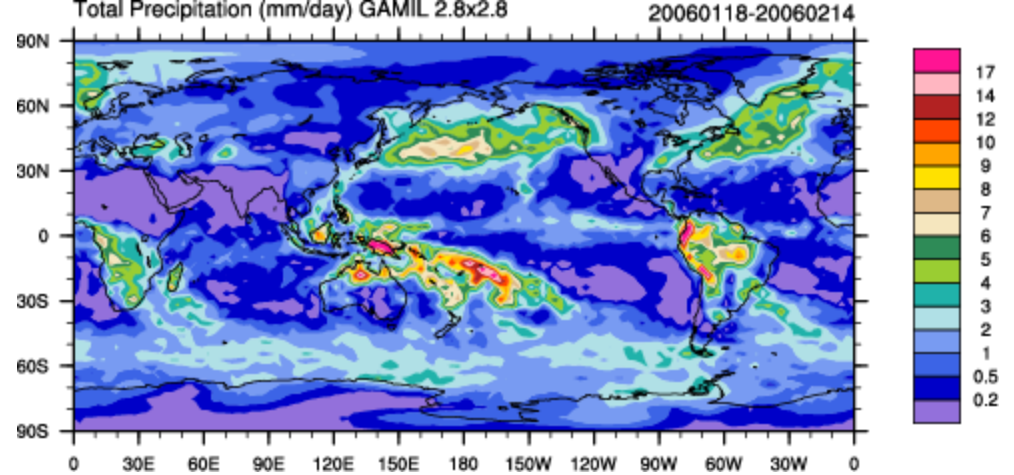
TWPICE

(Tropical Warm Pool
International Cloud Experiment)

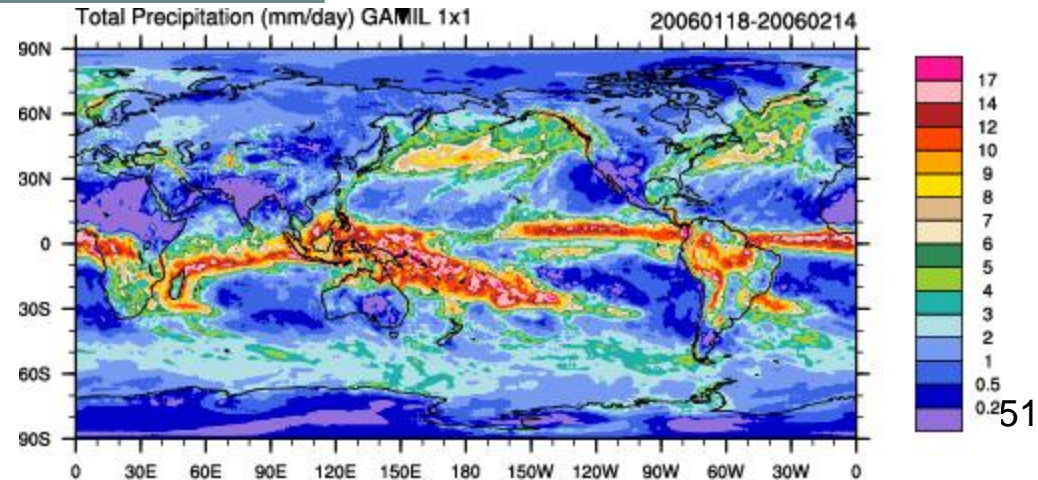
TRMM



HIGH (GAMIL 2.0) (1.0° × 1.0°)



MED (GAMIL 2.0) (2.8° × 2.8°)

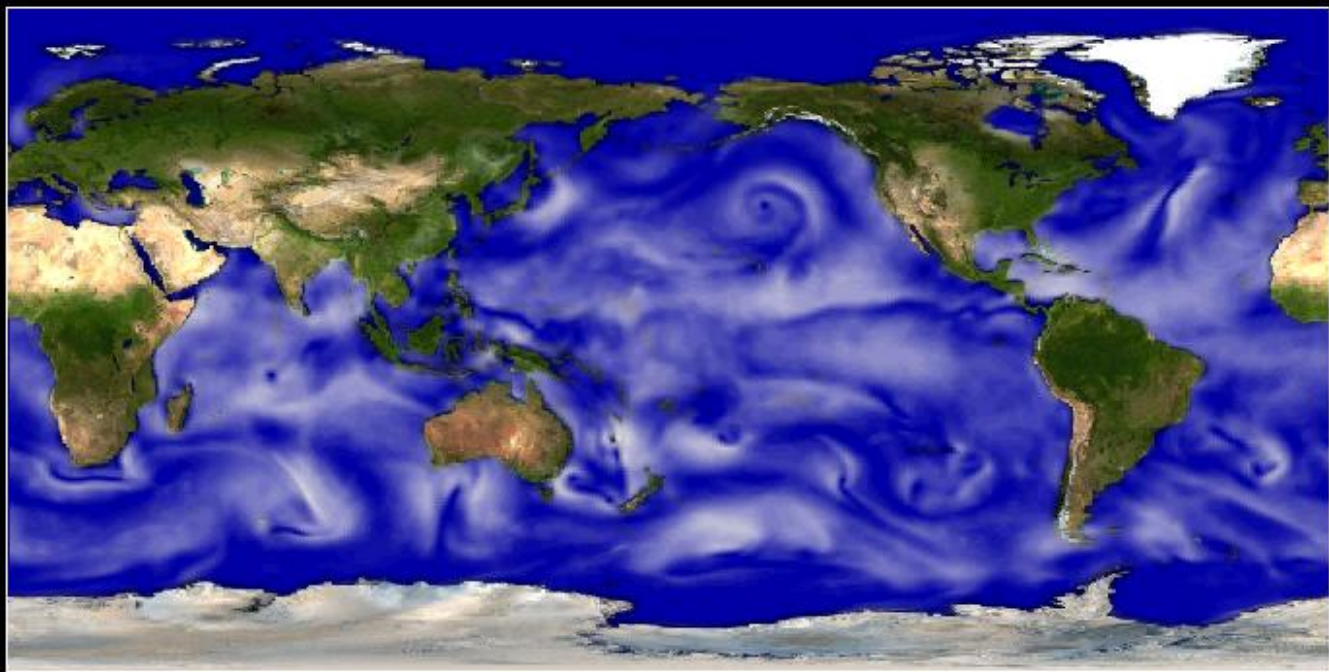




GAMIL 25公里分辨率的水汽模拟



2004年5月11-20日， σ 层最底层



全物理过程 + 细致地形

分量模式

- 耦合方案
- 大气环流模式
- 陆面过程模式
- 海洋环流模式
- 海冰模式

什么是陆面过程模型？

陆面过程模型：

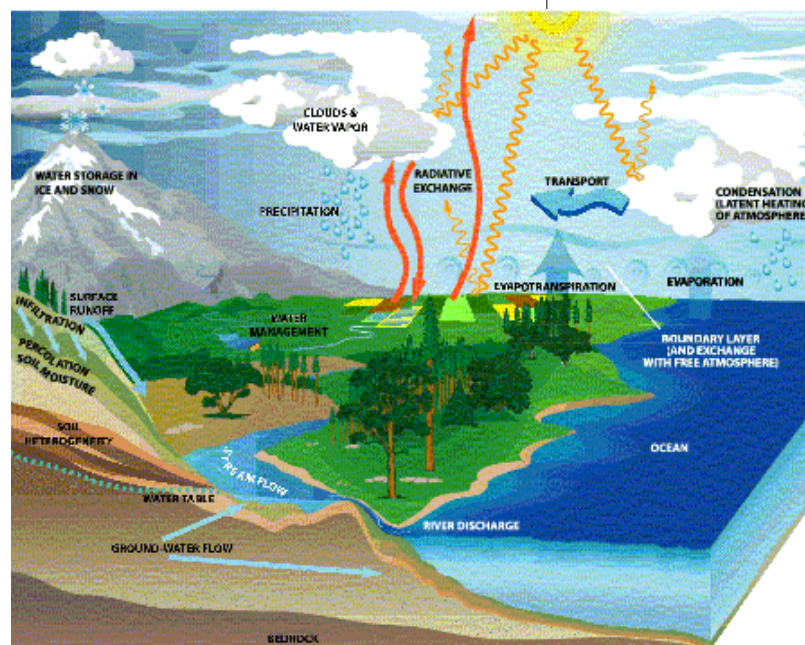
— 大气模型下边界条件

- 大气边界层模拟
- 气候模拟
- 数值天气预报
- 4-D 资料同化

— 水文模型的上边界条件

- 水资源估算
- 作物用水
- 径流模拟

— 大气/水文/生态模型的交界面



预报变量与预报方程

T_c	冠层叶面平均温度 (K)
W_{dew}	冠层积水 (mm)
T_j	土壤和雪层温度 (K)
$W_{\text{liq},j}$	土壤和雪层液态水含量 (kg m^{-2})
$W_{\text{ice},j}$	土壤和雪层固态水含量 (kg m^{-2})
Δz_j	雪层厚度 ($j = \text{snl}+1, \dots, -1, 0$)

能量平衡方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=i,l,v,d} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k h_k dV = \sum_{k=i,l,v} \int_S U_k h_k \cdot dS + \int_S \lambda \nabla T \cdot dS + \int_{\Delta V} R dV$$

Rate of change
in stored heat

Convection

Conduction

Radiation

where

ρ_k Intrinsic density of constituent,

θ_k Partial volume of constituent,

h_k Specific enthalpy for three water phases and dry soil,

U_k Mass flux,

λ Thermal conductivity,

R Radiation,

d, i, l, v (for dry soil, ice, liquid and vapor)

水平衡方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k dV = - \int_S \mathbf{U}_k \cdot d\mathbf{S} + \sum_{k'} \int_{\Delta V} M_{k'k} (1 - \delta_{k'k}) dV + \int_{\Delta V} S_k dV$$

Time rate
sinks

of mass change

Mass flow

Phase change

Sources or

where

ρ_k Intrinsic density of constituent

θ_k Partial volume of constituent

\mathbf{U}_k Mass flux

$M_{k'k}$ Phase change from phase k' to phase k

$\delta_{k'k}$ Kronecker delta

S_k Source or sink term

d, i, l, v (for dry soil, ice, liquid and vapor)

主要陆面物理过程模式

- ◆ 简单模式（如Bucket model）
- ◆ 中等复杂程度模式（如UKMO, ISBA）
- ◆ 复杂模式（如BATS, SiB, SSiB, CoLM）

全球植被生态动力学模式

(Dynamic Global Vegetation Model – **DGVM**)

- 模拟全球（自然界）植被的分布、结构及其变化的中等复杂动力学模式（中等复杂是指相对于大气环流模式及陆表过程模式而言。事实上，生命／生态系统比物理系统、化学系统更为复杂，而目前我们对其认识尚很初步，因而目前生态模式中的不确定性还很大）；
- 其特点是符合现有的陆表过程模式的框架结构，便于与大气环流模式耦合，用于全球气候和环境变化研究；现已成为地球系统模式的一个重要组成部分。
- DGVM始于上世纪90年代，目前国际上研究仍处于比较初步阶段。我国国内关于DGVM的理论研究还很少。

DGVM的主要组成部分

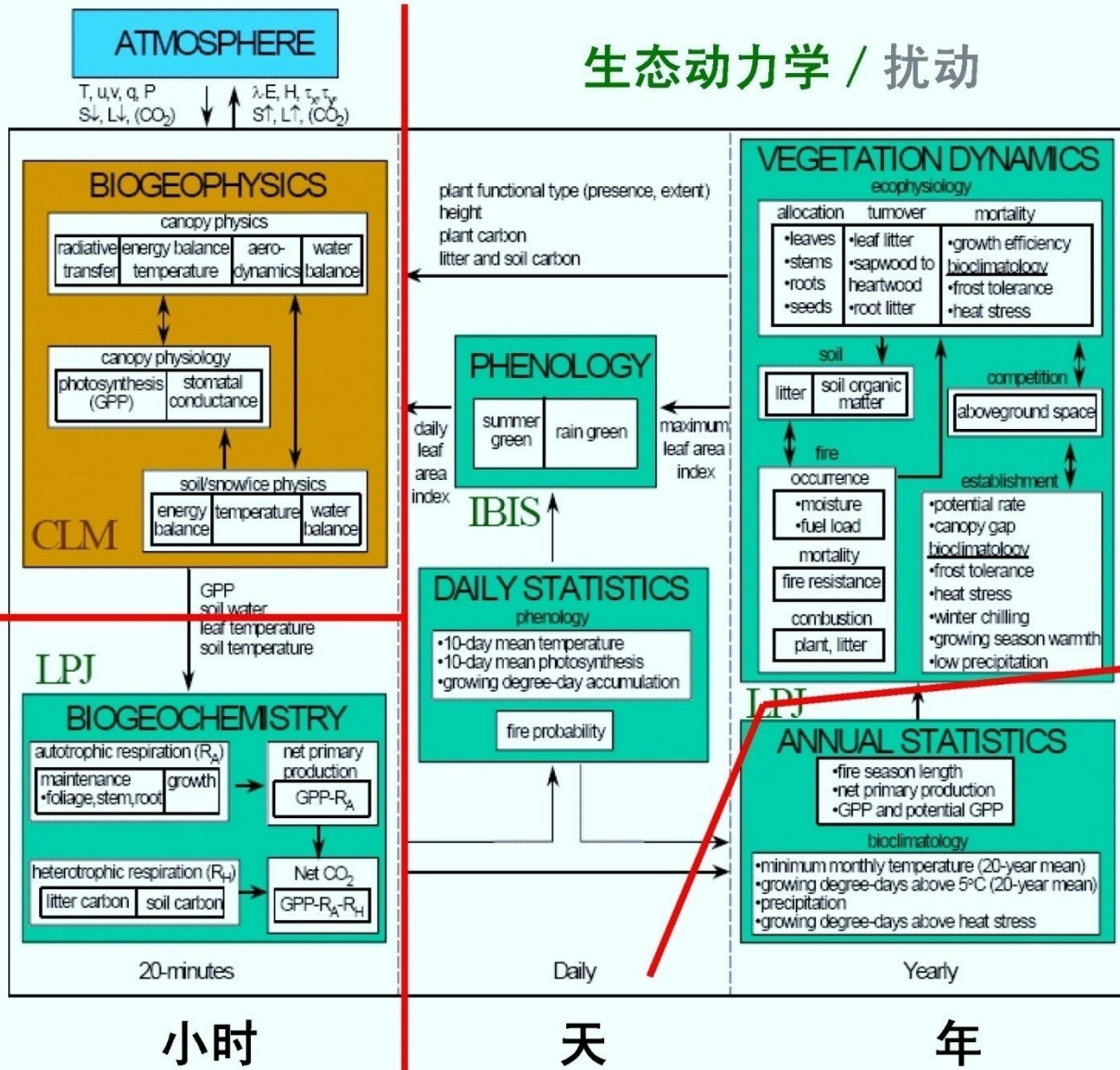
生物地球物理

生物地球化学

生态动力学 / 扰动

CLM-DGVM
的框架示意图
(Levis et al. 2004)

生物
地理学



小时

天

年

目前国际上一些主要的DGVM

- **LPJ – Germany, Sweden**
- **VECODE – Germany**
- **HYBRID – U.K.**
- **SDGVM – U.K.**
- **TRIFFID – U.K.**
- **CLM-DVGM – U.S.**
- **IBIS – U.S.**
- **MC1 – U.S.**
- **ED (Ecosystem Demography Model) – U.S.**
- **SEIB-DGVM – Japan**

分量模式

- 耦合方案
- 大气环流模式
- 陆面过程模式
- 海洋环流模式
- 海冰模式

海洋动力学基本方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + w \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \nabla p + f^* \mathbf{V} \times \mathbf{k} = F_\lambda \mathbf{i} + F_\theta \mathbf{j} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla^* \cdot (\mathbf{V} \rho) + \frac{\partial w \rho}{\partial z} = 0, & \frac{\partial p}{\partial z} = \rho g \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{V} = u \mathbf{i} + v \mathbf{j} \\ \nabla = \frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \mathbf{i} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{j}, & \nabla^* = \frac{1}{a \cos \theta} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \mathbf{i} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{j} \cos \theta \right) \end{cases}$$

F_λ, F_θ 分别为纬向和经向的湍流粘性项

海洋位温、盐度方程

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)T + w \frac{\partial T}{\partial z} = F_T + Q_{pen} + C_T \\ \frac{\partial S}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)S + w \frac{\partial S}{\partial z} = F_S + C_S \end{cases}$$

其中 F_T, F_S 分别为温度和盐度的湍流扩散项

C_T, C_S 分别为因层结不稳定导致的温度和盐度的对流

Q_{pen} 为穿透加热项

关于海洋连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla^* \cdot (\mathbf{V} \rho) + \frac{\partial w \rho}{\partial z} = 0$$



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \rho + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\nabla^* \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

Bousinesq近似



$$\nabla^* \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \rho + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \right)$$

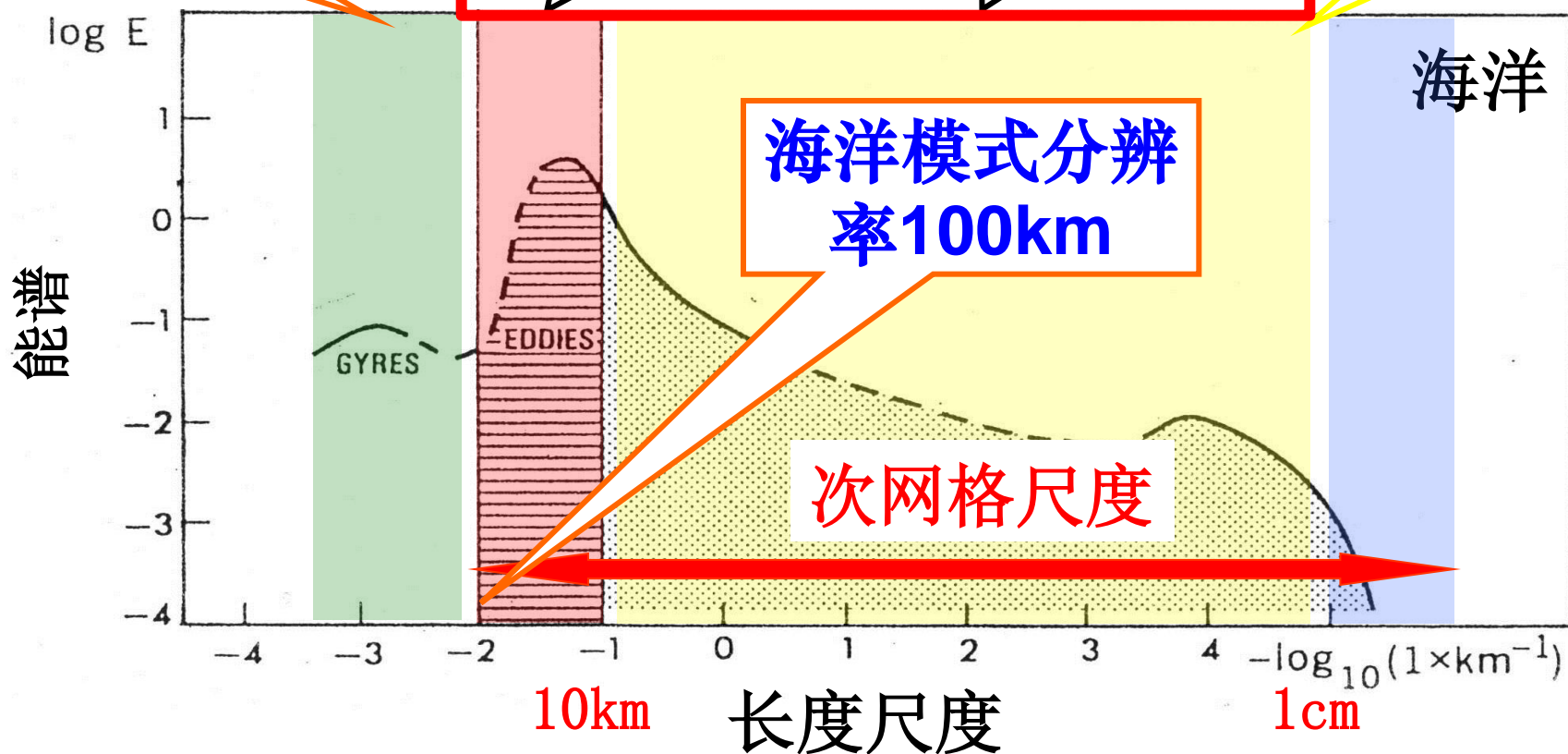
海洋动能谱, 次网格尺度过程

大尺度环流

中尺度涡

湍流

分子运动



海表边界层混合参数化方案

- **整体 (Bulk) 混合层方案**: 混合层中速度、温盐是均匀的, 将混合层作为一个整体

Kraus and Turner, 1967

Price, Weller, and Prinkel, 1986, (PWP)

Chen et al., 1994

- **连续方案**: 一阶或高阶闭合计算整个水柱中的垂直混合

Pacanowski and Philander, 1981, PP (1阶闭合)

Large et al., 1994, KPP (1阶闭合, 非局地)

Mellor and Yamada, 1982

Canoto et al., 2001

关于中尺度涡旋参数化

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + [(\mathbf{V} + \mathbf{V}^*) \cdot \nabla]T + (w + w^*) \frac{\partial T}{\partial z} = R(A_T, T) \\ \frac{\partial S}{\partial t} + [(\mathbf{V} + \mathbf{V}^*) \cdot \nabla]S + (w + w^*) \frac{\partial S}{\partial z} = R(A_S, S) \end{cases}$$

其中 $R(A_T, T)$, $R(A_S, S)$ 分别为温度和盐度在等密度面的扩散项

A_T, A_S 分别为它们的扩散系数

确定涡度速度 \mathbf{V}^* 和 w^* 的方案

\mathbf{A} 是一个二阶张

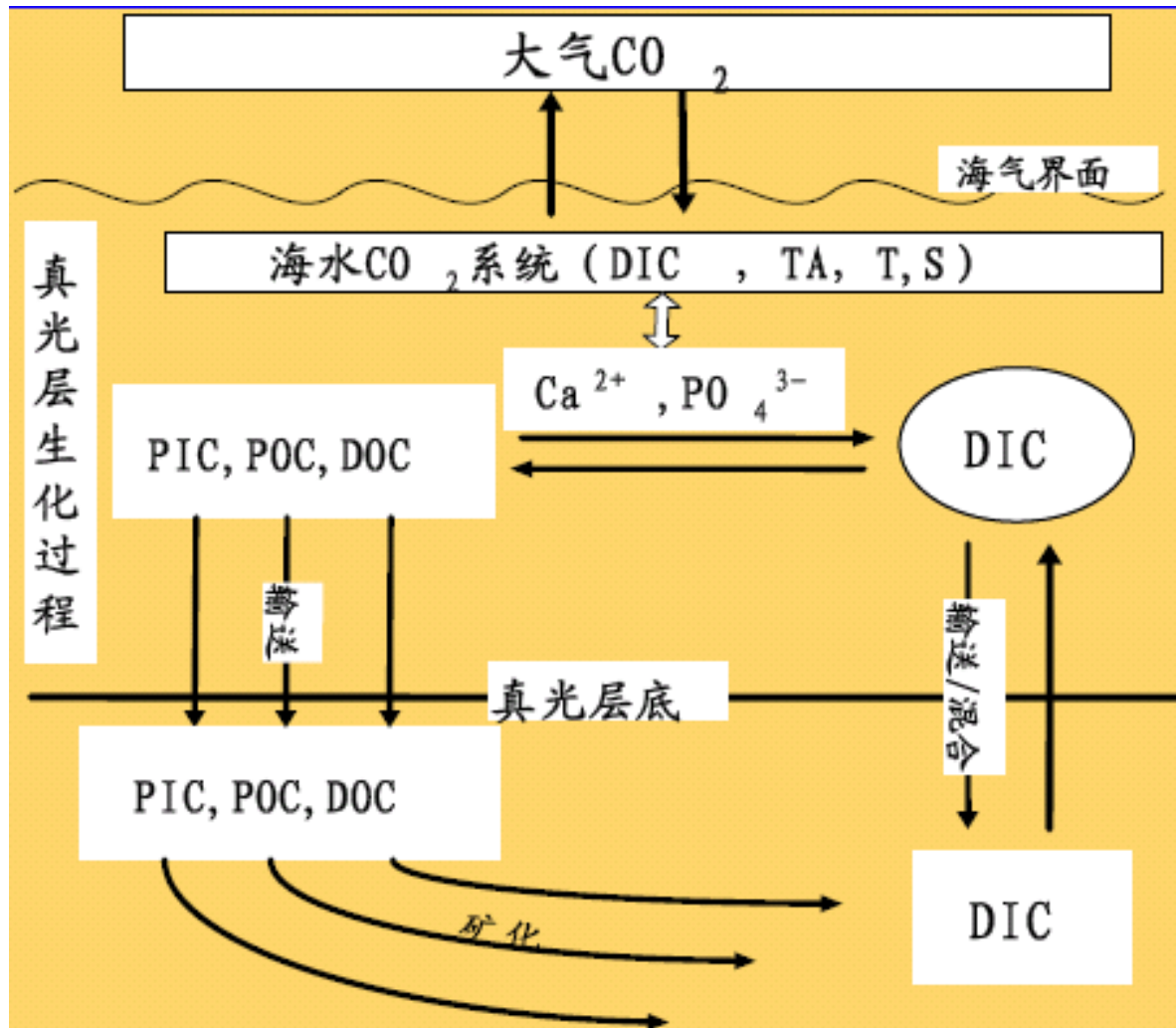
$$\mathbf{V}^* = \overline{h'_\rho \mathbf{V}' / h_\rho} \quad \nabla \cdot (\overline{\mathbf{V}' \mathbf{T}'}) = \nabla \cdot (\mathbf{A} \nabla T)$$

h_ρ — 两个等位密度面之间的厚度

其他物理参数化过程

- ◆ 对流过程
- ◆ 太阳短波辐射穿透方案
- ◆ 盐析
- ◆ 底边界层
- ◆ 水平粘性和扩散
- ◆ 内波
- ◆ 潮汐
- ◆ 波浪

海洋生物地球化学模式 (OBGCM)



DIC:溶解无机碳

PIC:颗粒无机碳

POC:颗粒有机碳

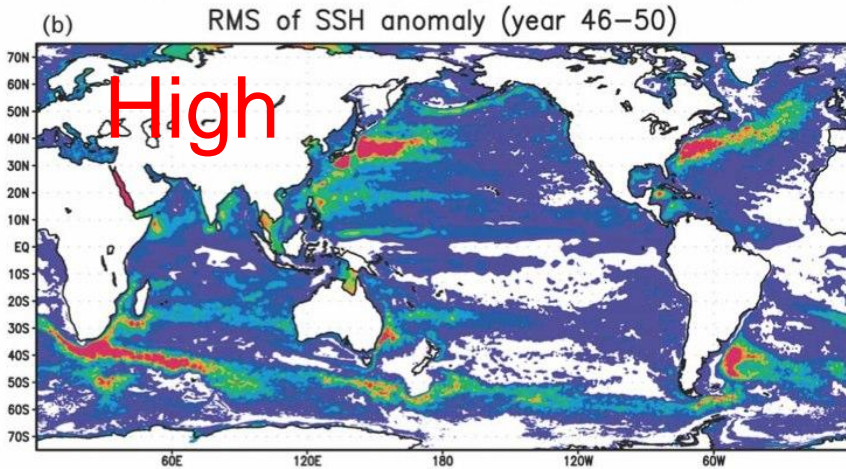
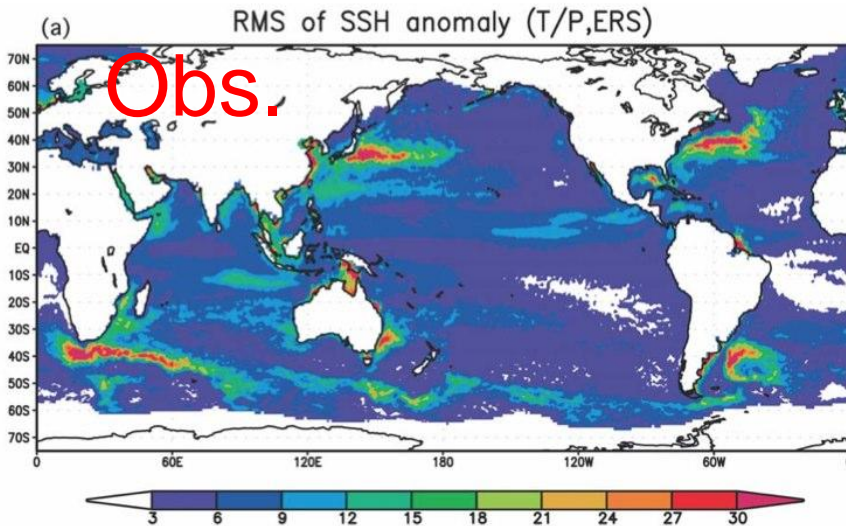
DOC:溶解有机碳

海洋模式LICOM的主要改进 (从AR4 到 AR5)

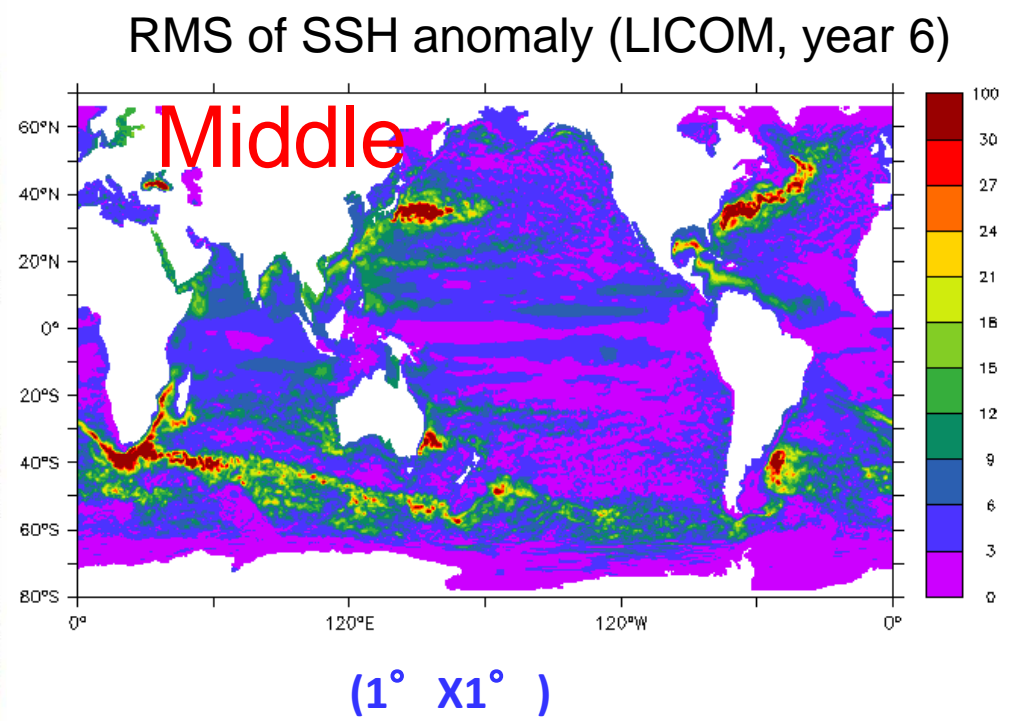
	LICOM 1.0	LICOM 2.0
Horizontal Resolution	1° X1°	1° X(0.5° ~1°), 0.1° X0.1°
Vertical Resolution	30 levels (25m in upper 300m)	30 levels (10m in upper 150m)
Vertical Mixing	Pacanowski & Philander (1981)	Canuto et al. (2001)
Meoscale eddy parameterization	Gent & McWilliams (1990)	Gent & McWilliams (1990) Large et al. (1997)
Horizontal Diffusion	2X10 ⁴ m ² /s	3X10 ³ m ² /s
SW Radiation Penetration	Constant (Paulson & Simpson, 1977)	Chlorophyll dependent (Ohlmann, 2003)

LICOM: LASG/IAP Climate Ocean Model

观测与LICOM模拟的SSH距平的均方根

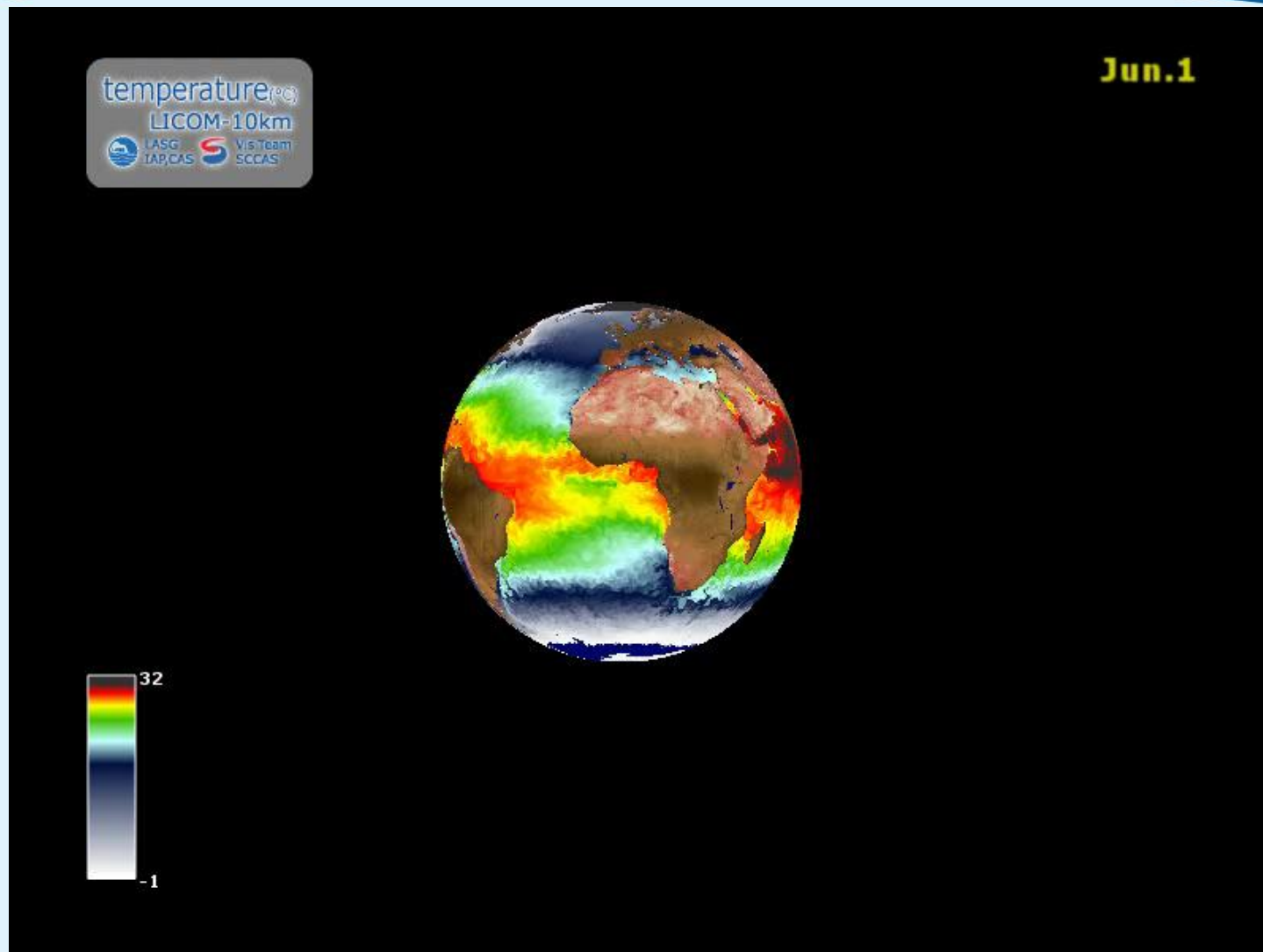


($0.1^\circ \times 0.1^\circ$)





LICOM10公里分辨率的海温模拟



分量模式

- 耦合方案
- 大气环流模式
- 陆面过程模式
- 海洋环流模式
- 海冰模式

海冰动力学方程

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = -mf\vec{k} \times \vec{V} + \tau_a + \tau_w - mg\nabla H + \boxed{\nabla \cdot \sigma}$$

Coriolis

Air & Water Drag

Sea Surface Tilt

Internal Ice Stresses

$$\tau_a = \rho_a C_a |\vec{V}_a - \vec{V}_i| (\vec{V}_a - \vec{V}_i)$$

$$\tau_w = \rho_w C_w |\vec{V}_w - \vec{V}_i| (\vec{V}_w - \vec{V}_i)$$

Elastic
Viscous
Plastic



海冰热力学方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \mathbf{G}_{TA} - \nabla \cdot (\vec{v}A) + \mathbf{G}_{MA} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \mathbf{G}_{TV} - \nabla \cdot (\vec{v}V) + \mathbf{G}_{MV} \quad (2)$$

\mathbf{G}_T source/sink due to thermodynamic processes

$-\nabla \cdot (\vec{v}A)$ change due to horizontal advection

$-\nabla \cdot (\vec{v}V)$

\mathbf{G}_M source/sink due to mechanical redistributions



CICE: Los Alamos Sea Ice Model

- An elastic-viscous-plastic (EVP) ice dynamics (*Hunke and Dukowicz, 1997, 2002*)
- An energy-based ridging scheme (*Thorndike et al., 1975*) and an ice strength parameterization (*Rothrock, 1975*)
- Horizontal advection via an incremental remapping scheme (*Lipscomb and Hunke, 2004*)
- An energy conserving thermodynamics model (*Bitz and Lipscomb, 1999*)

.....

Changes of sea ice model (AR4 to AR5)

	AR4	AR5
Model	CSIM4	CICE4_LASG

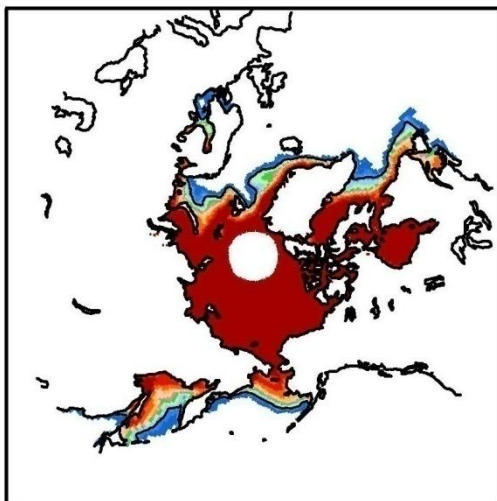
Major improvements in physical parameterizations:

- Spatiotemporal varying sea ice salinity
- More realistic disposition of solar radiation in snow and ice

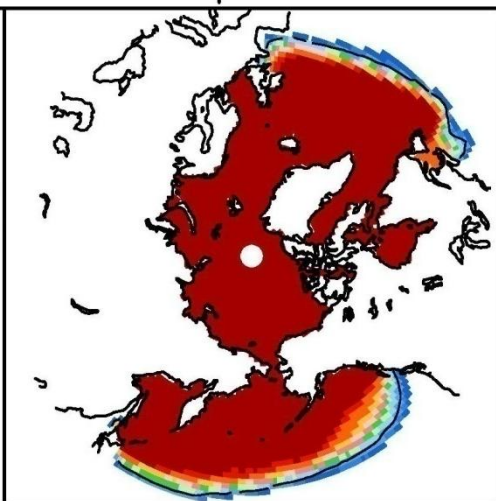


Sea ice concentrations

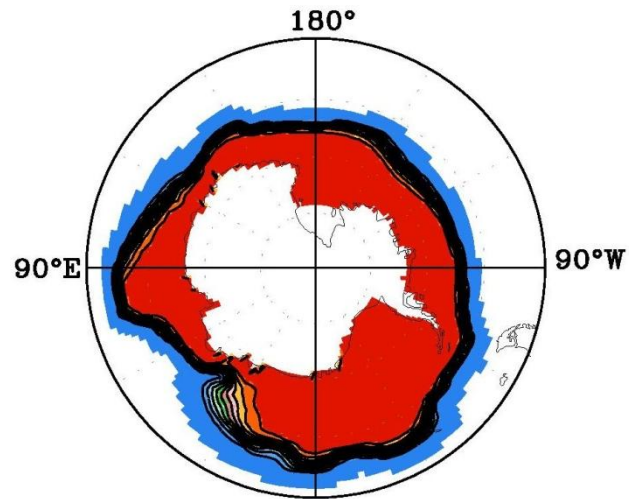
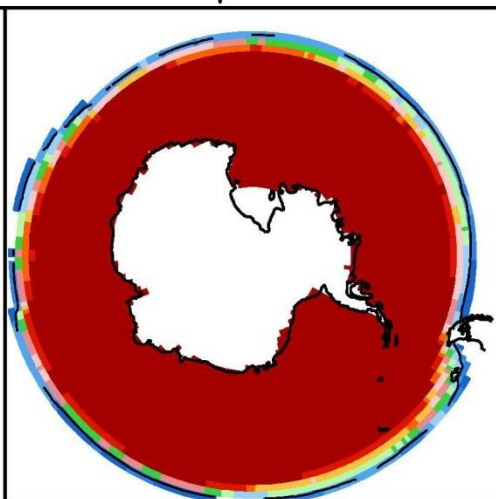
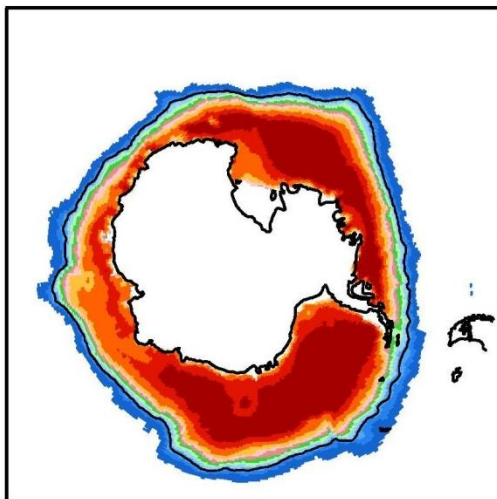
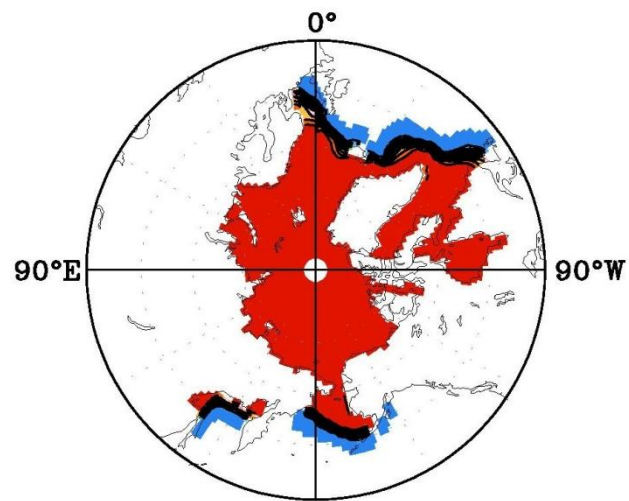
Observation



CSIM4



CICE4_LASG



我国耦合模式的新进展

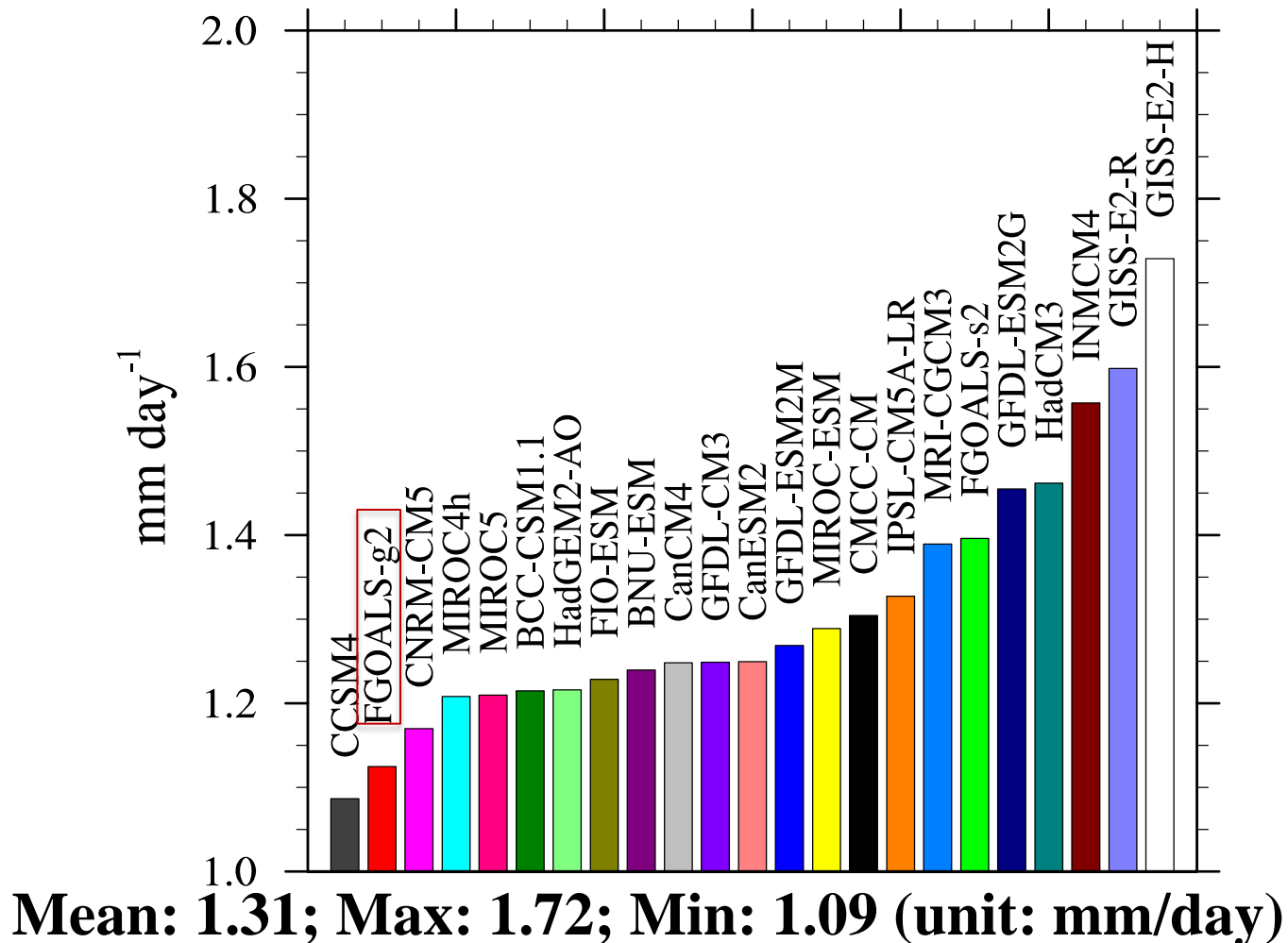
CMIP5 models in China

Group Name	Institution	Model Name
LASG-CESS	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; Tsinghua University	FGOALS-g2
LASG	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	FGOALS-s2
BNU	Beijing Normal University	BNU-ESM
BCC	Beijing Climate Center	BCC-CSM 1.1
FIO	First Institute of Oceanography	FIO-ESM1.0

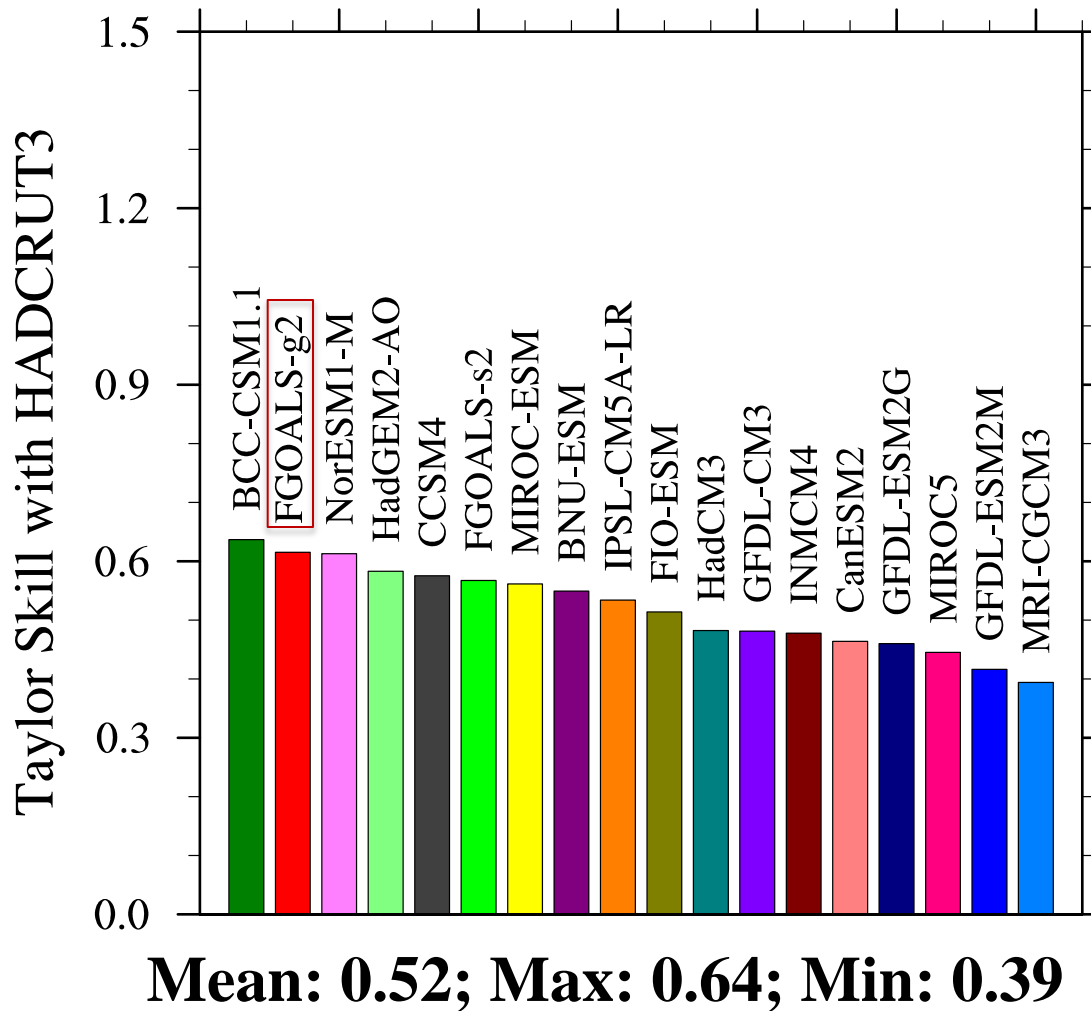
Main Variables Evaluated

Variable name	Component	Evaluation Method
Precipitation	Globe	Root Mean Square Error
Global mean SAT anomaly (SATA)	Detrend of SATA	Taylor skill (Taylor, 2001)
Tropic SSTA annual cycle	Pacific	Pattern Correlation
Warm extremes	1980-1999, 21 regions	Relative RMS
Asian Monsoon	JJAS mean, annual cycle index	Pattern Correlation
ENSO	SD, variance annual cycle, amplitude, zonal wind stress	Direct comparison or correlation with observation

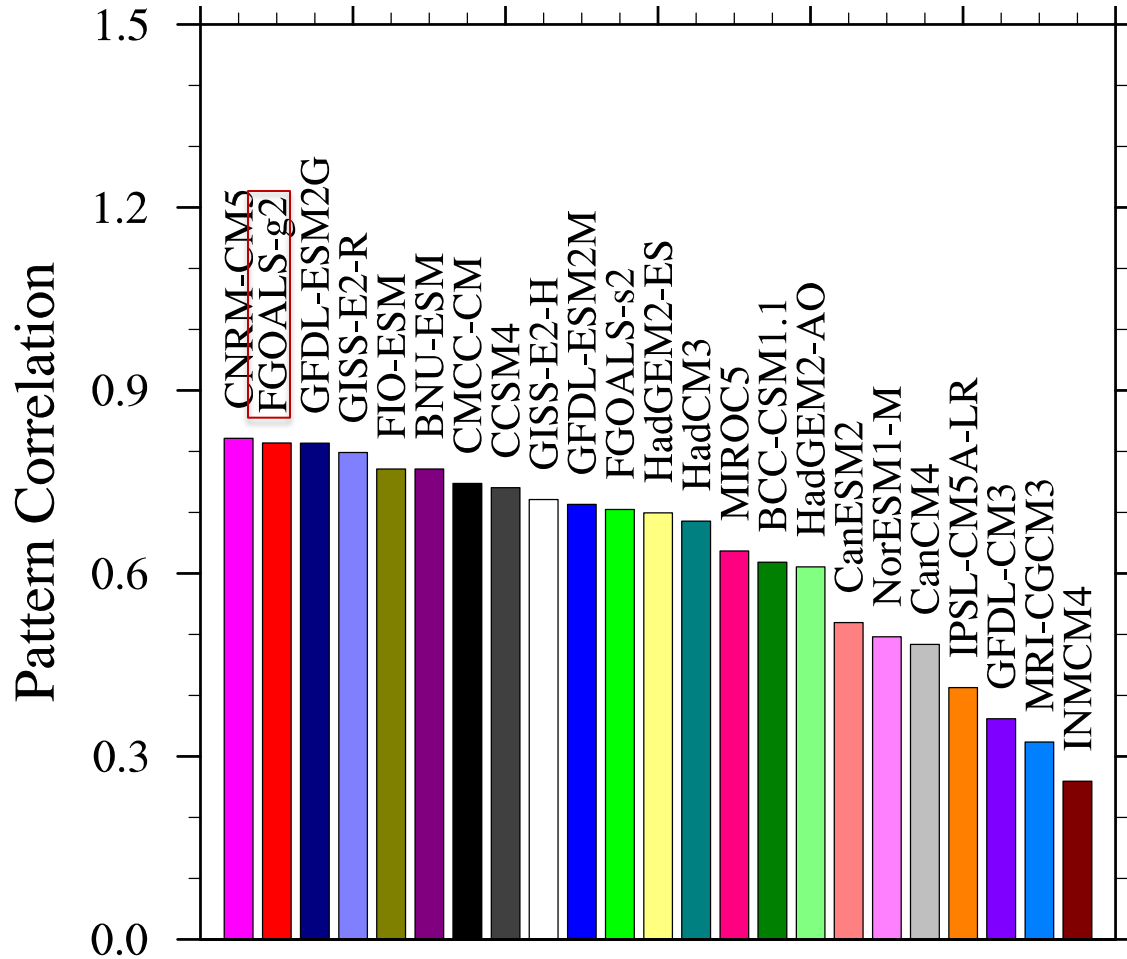
Global area-weighted mean RMSE of Precipitation (1980-2005)(OBS: GPCP)



20th Century SAT Variation (1870-2005)

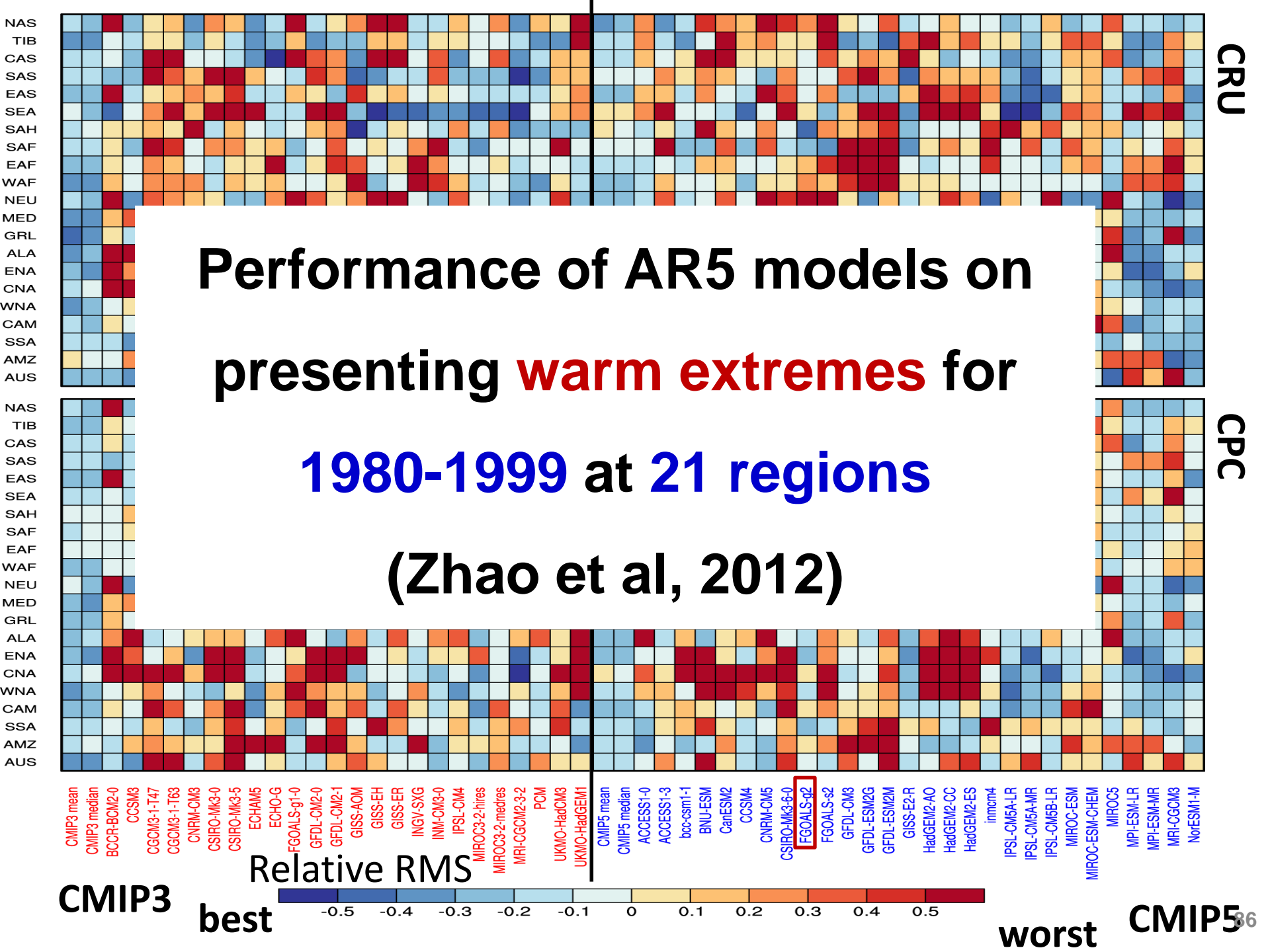


Tropic Pacific Annual Cycle (2°S-2°N, 120°E-80°W)

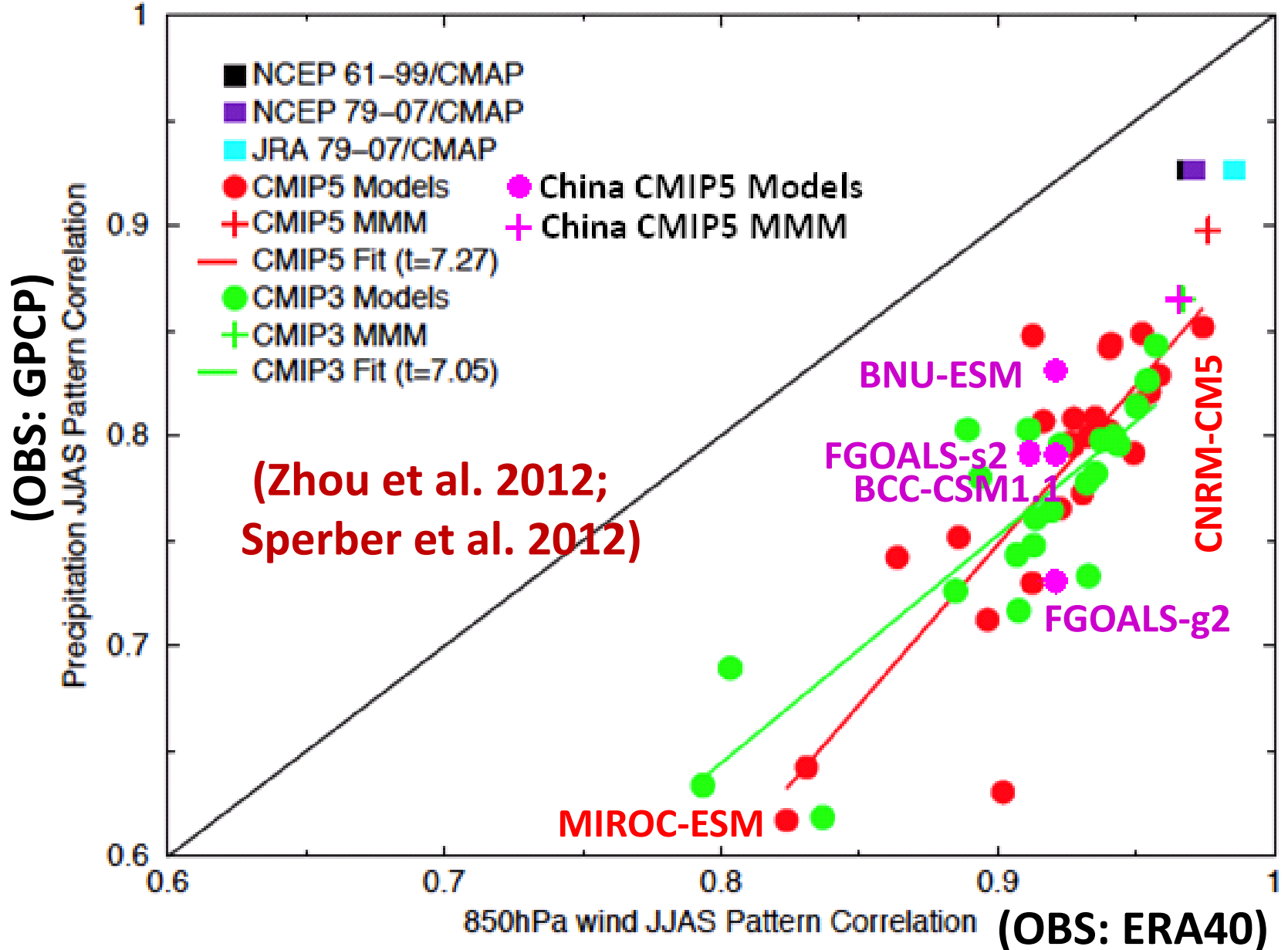


Mean: 0.63; Max: 0.82; Min: 0.26

Performance of AR5 models on presenting warm extremes for 1980-1999 at 21 regions (Zhao et al, 2012)

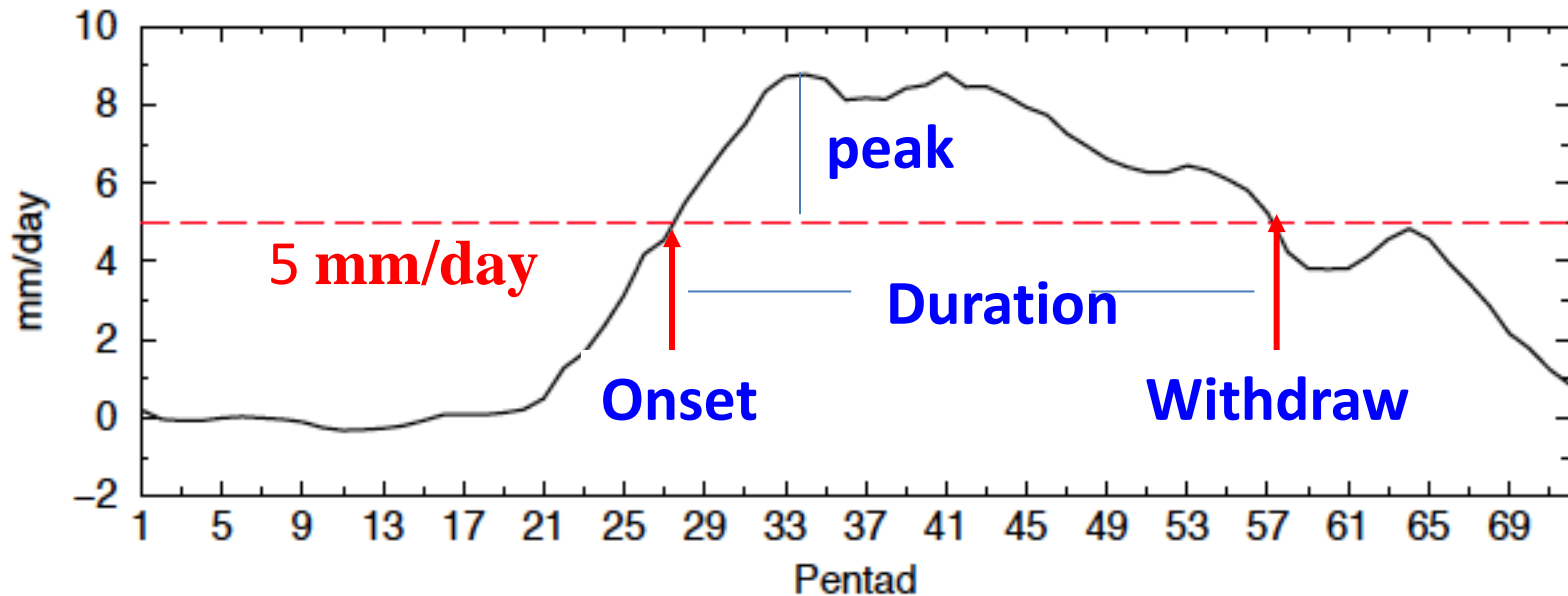


Skills of CMIP Models on JJAS Asian Precipitation and Wind



Summer monsoon annual cycle index

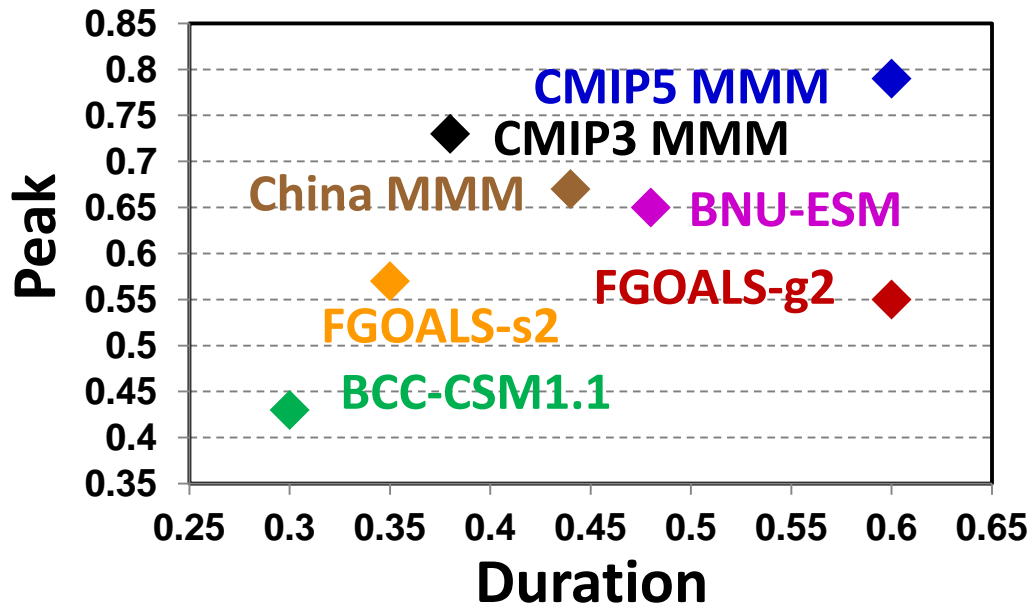
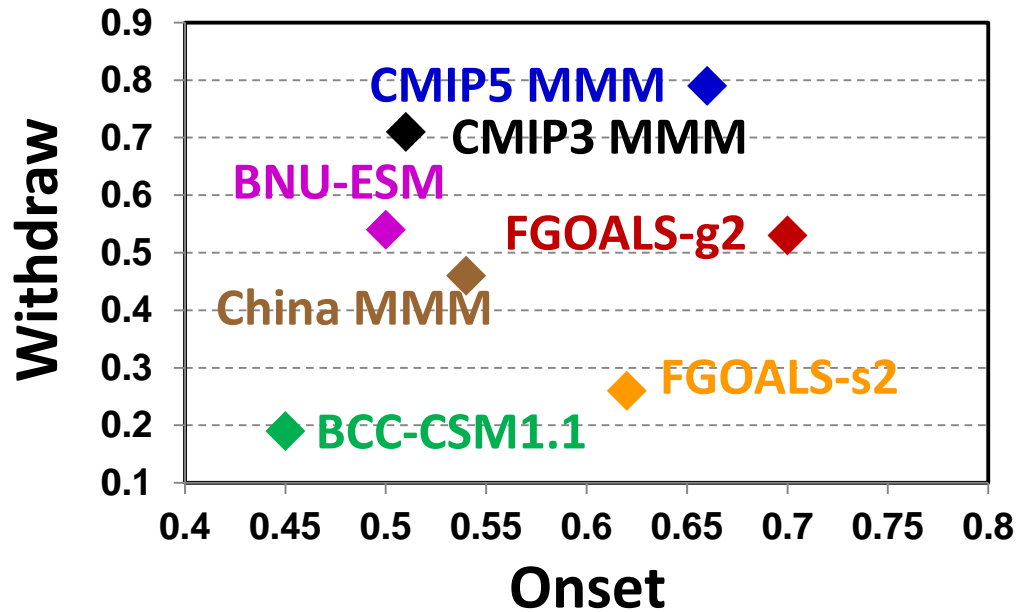
Relative rainfall rate in the Bengal Bay region



(Sperber et al.
2012)

Asian summer monsoon

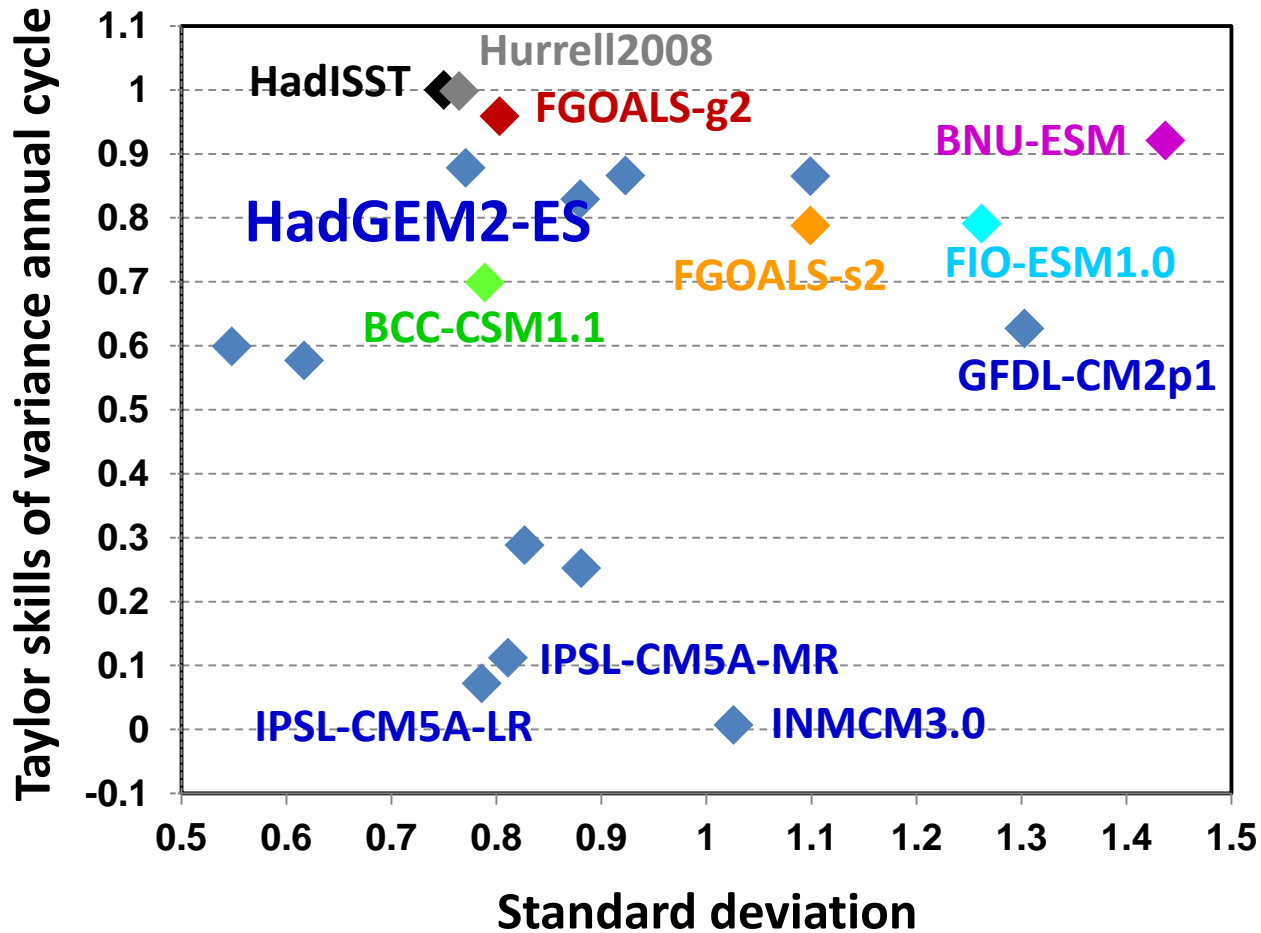
(Zhou et al. 2012; Sperber et al. 2012)



- 1) Comparing with CMIP3 models, CMIP5 models improve the Asian summer monsoon significantly;
- 2) China MMM performs better than CMIP3 MMM on onset and duration, but worse on withdraw and peak;
- 3) FGOALS-g2 presents better onset and duration but worse withdraw and peak than both CMIP3 MMM and CMIP5 MMM;
- 4) FGOALS-g2 presents better onset, withdraw and duration but worse peak than China MMM.

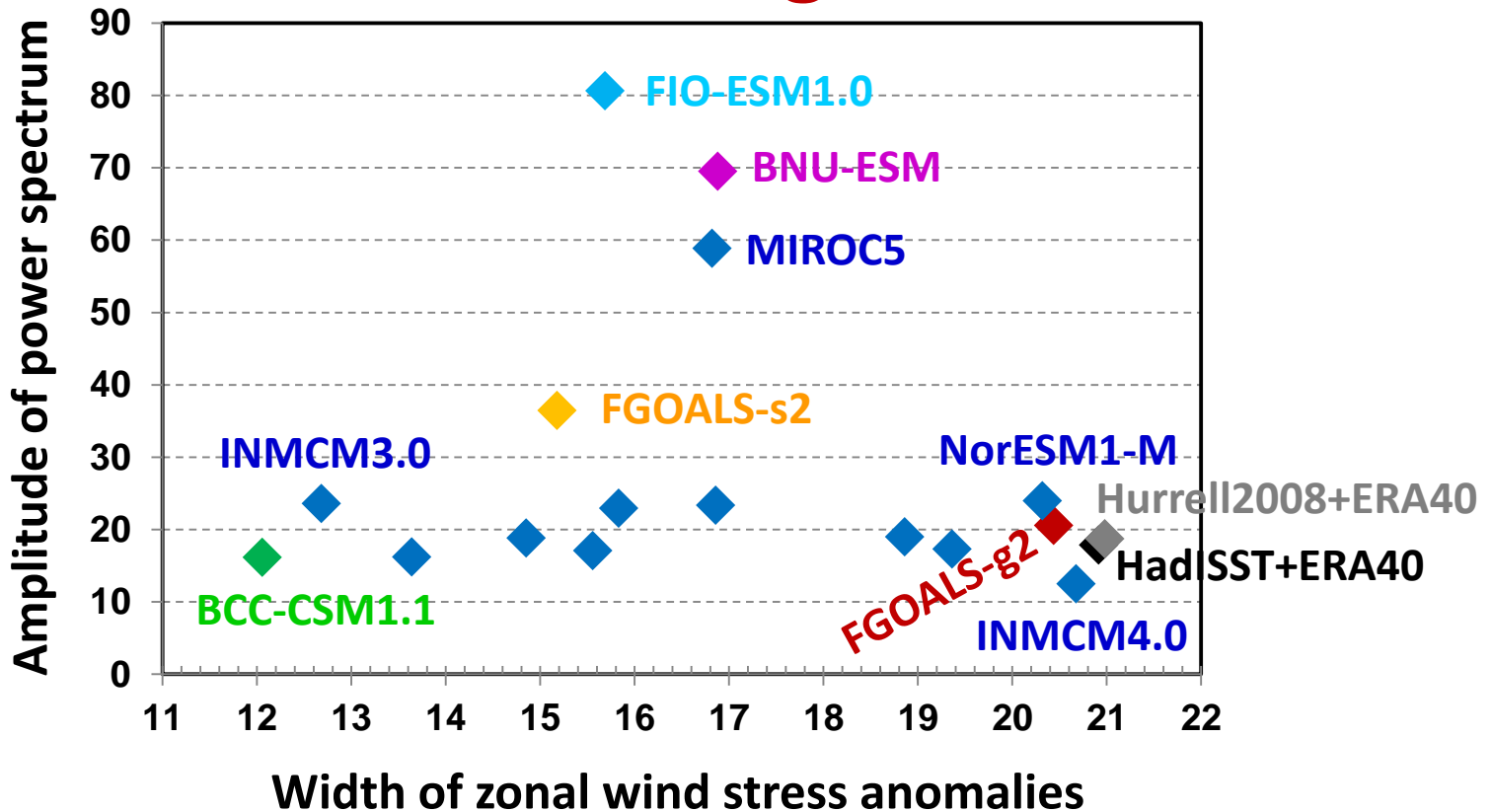
(OBS: GPCP)

Nino 3.4 region



Other models: CNRM-CM5, INMCM4.0, MIROC5, MIROC-ESM, MPI-ESM-LR, NorESM1-M

Nino 3.4 region



Other models: CNRM-CM5, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MPI-ESM-LR

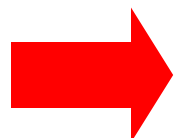
(Huang et al, 2012)

内容目录

1、定义及战略意义

2、主要研究计划

3、模式综合介绍

 4、存在的问题与展望

模式对三个问题的回答

- 1、是什么导致了全球变暖？ **人类活动**
- 2、未来将继续变暖吗？ **继续变温**
- 3、人类将怎样应对？ **减排、环保**

“全球气候变化的归因 --- 是人类活动产生的” 之结论的认识在加深

IPCC关于气候变化成因的认识逐步深化：

第一次评估报告（1990年）：近百年的气候变化可能是自然波动或人类活动或二者共同影响造成的；

第二次评估报告（1995年）：定量表述人类活动对全球气候的影响能力仍有限，且在一些关键因子方面存在不确定性。但越来越多的各种事实表明，人类活动的影响已被觉察出来。

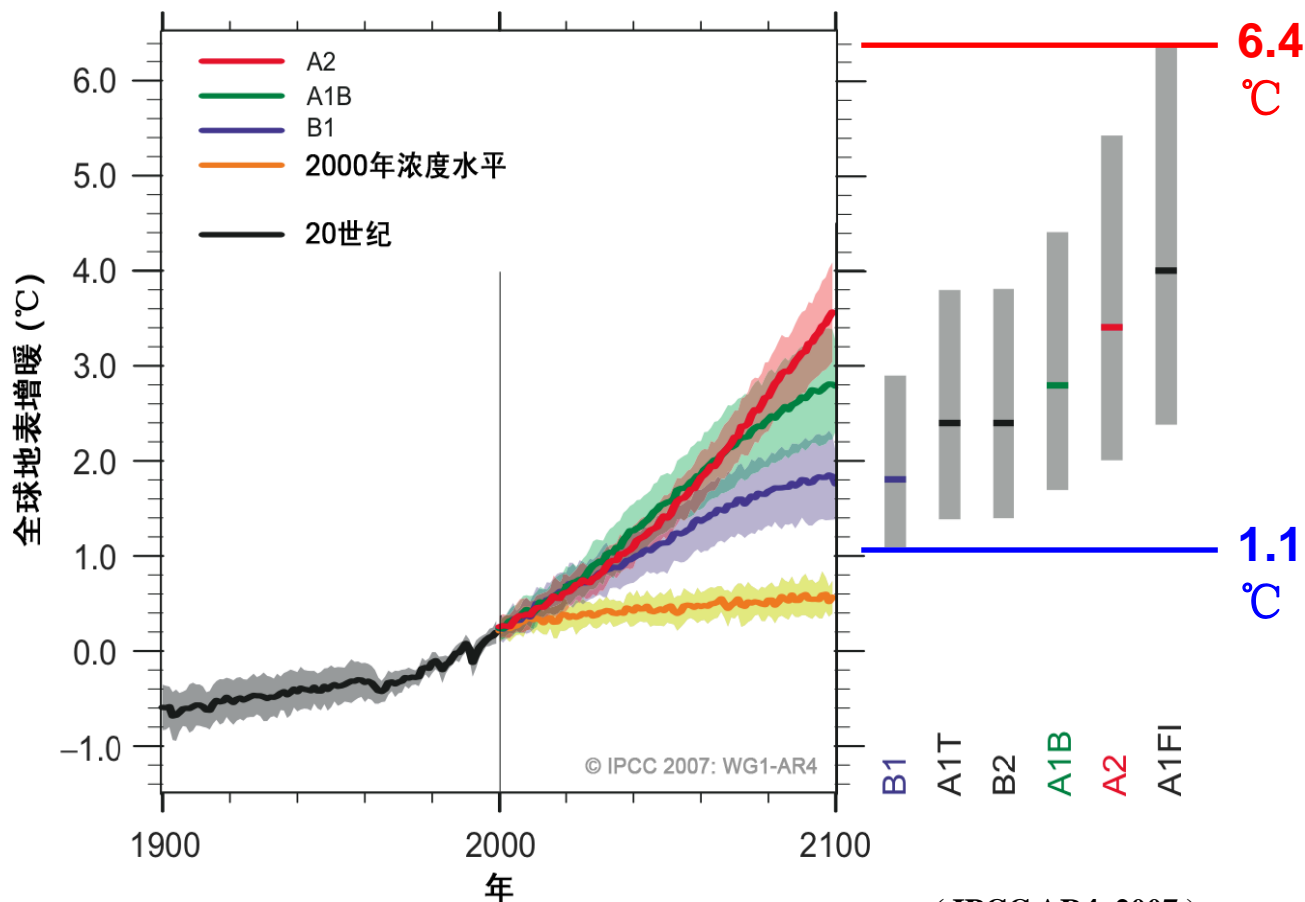
“最近50年的气候变暖是由人类活动产生的”这一结论的可信度提高

IPCC关于气候变化成因的认识逐步深化：

第三次评估报告（2001年）：新的、更强的证据表明，过去50年观测到的大部分增暖**“可能”**归因于人类活动（**66%以上可能性**）；

第四次评估报告（2007年）：人类活动**“很可能”**是气候变暖的主要原因（**90%以上可能性**）。

气候模式模拟出不同排放情景下的 增暖预估结果



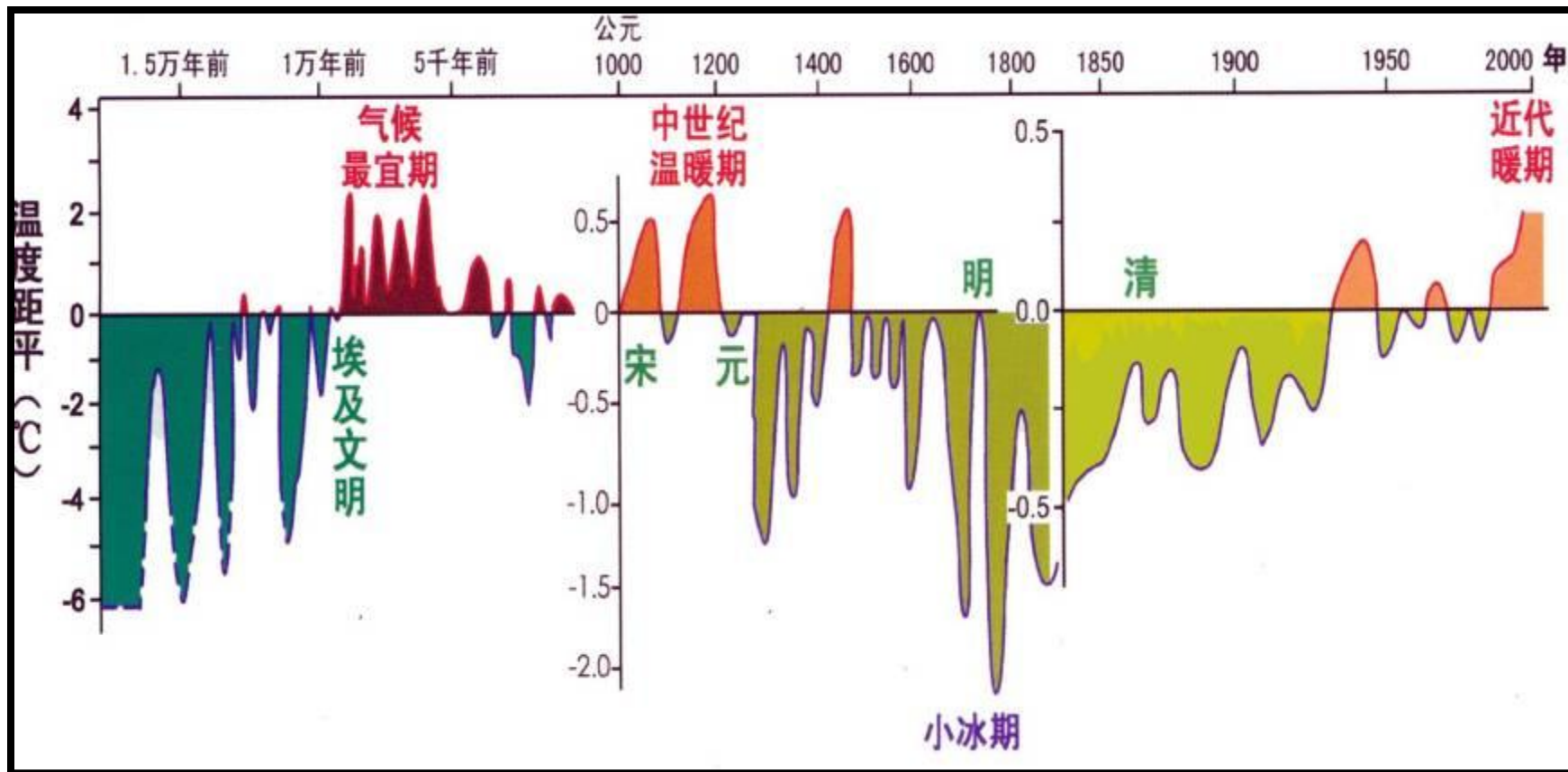
(IPCC AR4, 2007)

在多个温室气体排放情景下，本世纪末全球平均升温幅度大致为1.1–6.4°C。对于低排放情景 (B1)，升温为1.1–2.9°C，对于高排放情景 (A1FI)，升温为2.4–6.4°C。

存在的疑惑与问题

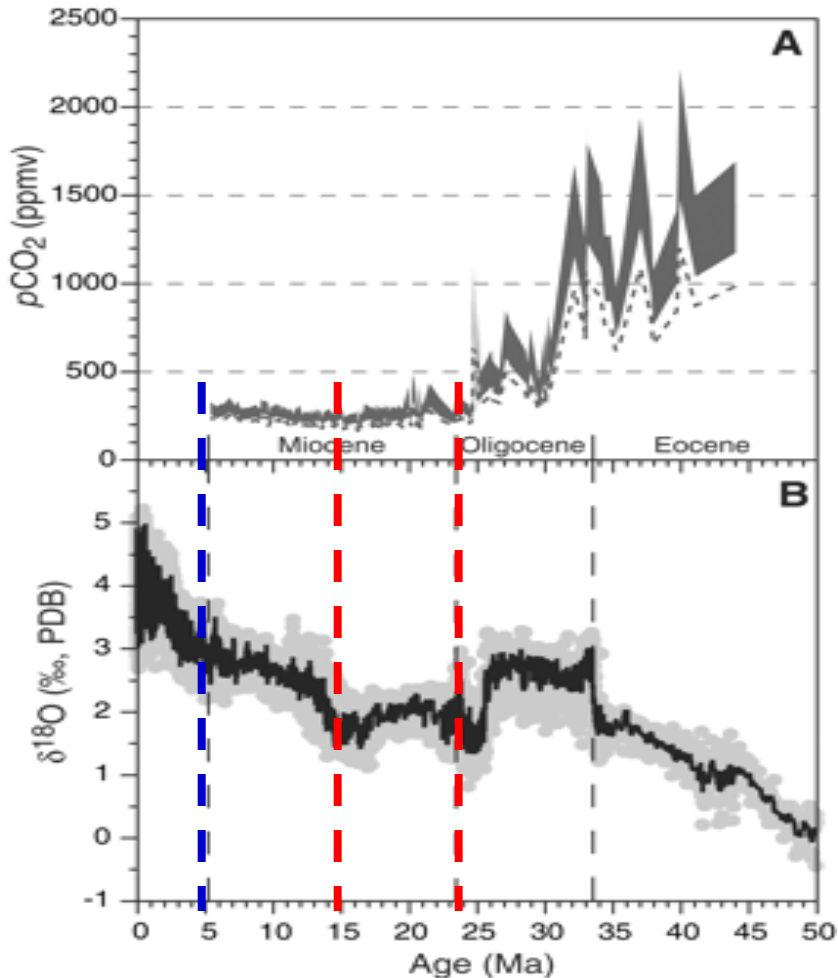
- 1、真的是**人类活动**导致了全球变暖？
- 2、未来真的会**继续变暖**吗？
- 3、**模式的结果**是否可信？

欧洲-大西洋地区近万年来气温变化基本特征



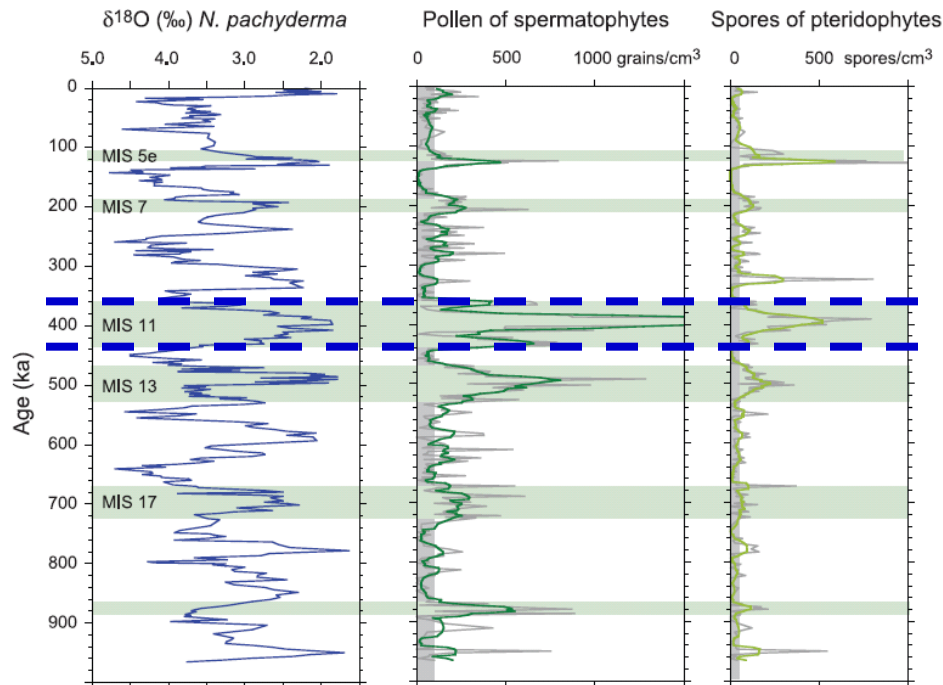
(Mann, 1999)

新生代50Ma以来大气CO₂浓度变化：高温与低CO₂浓度的组合



(Pagani et al., 2005)

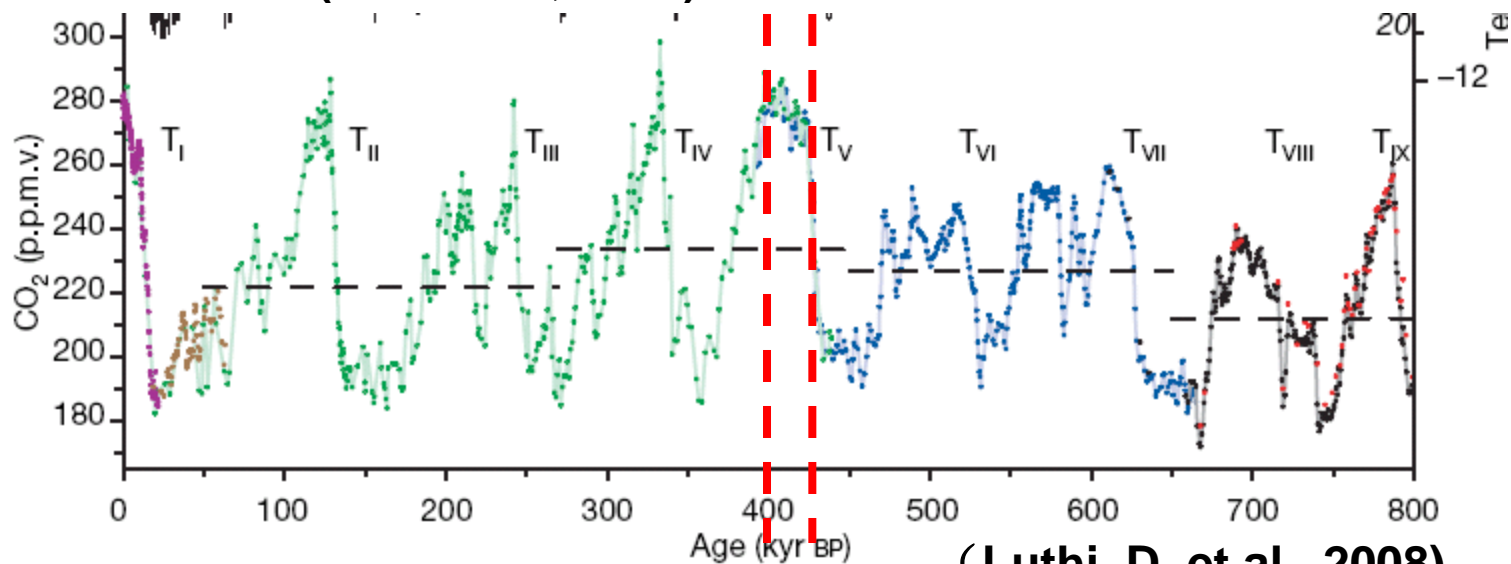
CO₂大约在30Ma前后降到1000 ppmv以下，在24Ma降到工业革命前的浓度水平，一直持续至今。但从24-15 Ma全球温度比现在高很多，南极冰盖很小，北极没有冰盖。是全球高温与低CO₂浓度组合的一个实例。



低温和高浓度CO₂的组合

左上图中中间的曲线显示，大约40万年以来，格陵兰在间冰期期间植被覆盖度也较低，表明冰盖比以前的间冰期大，温度较低；而南极冰芯揭示出40万年后的间冰期CO₂浓度比以前有所增加(下图)；可作为高浓度CO₂与较低北极温度组合的一个实例

(De Vernal, 2008)



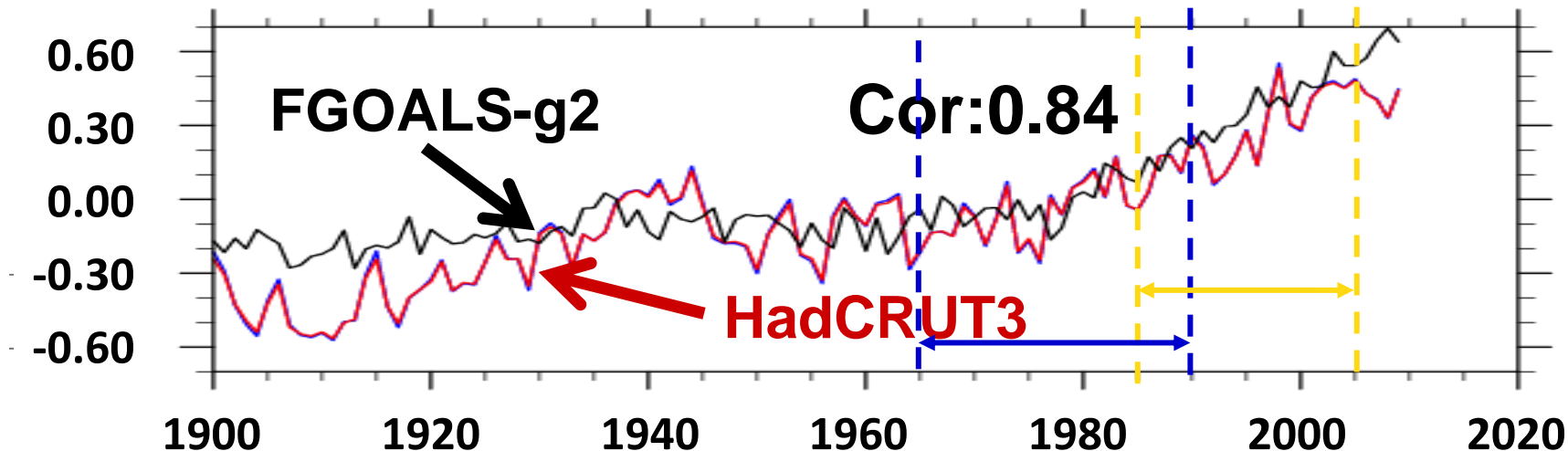
(Luthi, D. et al., 2008)

关于全球变暖认识的不同声音

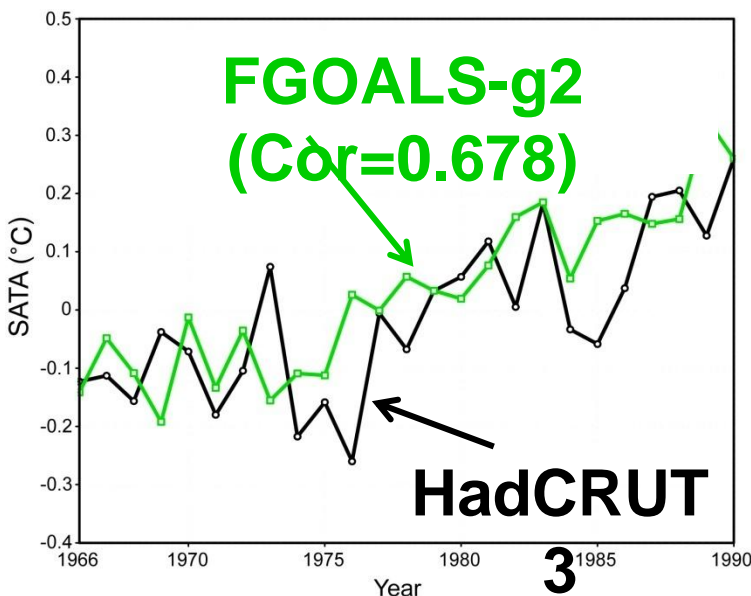
- 1、认为“人类活动导致全球变暖”是一场**骗局**，太阳活动的变化才是真正的元凶；
- 2、认为地球气候可能会出现**突变**，即可能突然转为变冷。

Surface Air Temperature Anomalies by FGOALS-g2 (2nd sample of historical run)

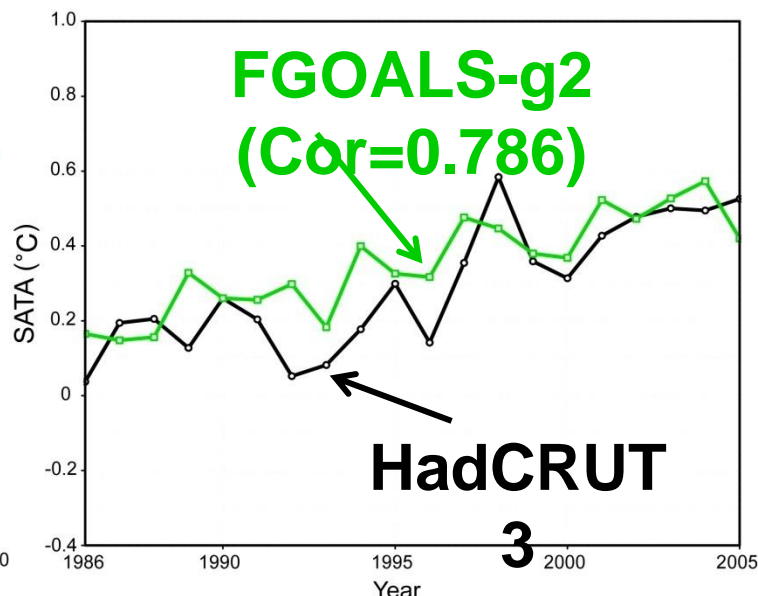
Surface air temperature anomalies (SATA)



1966-1990



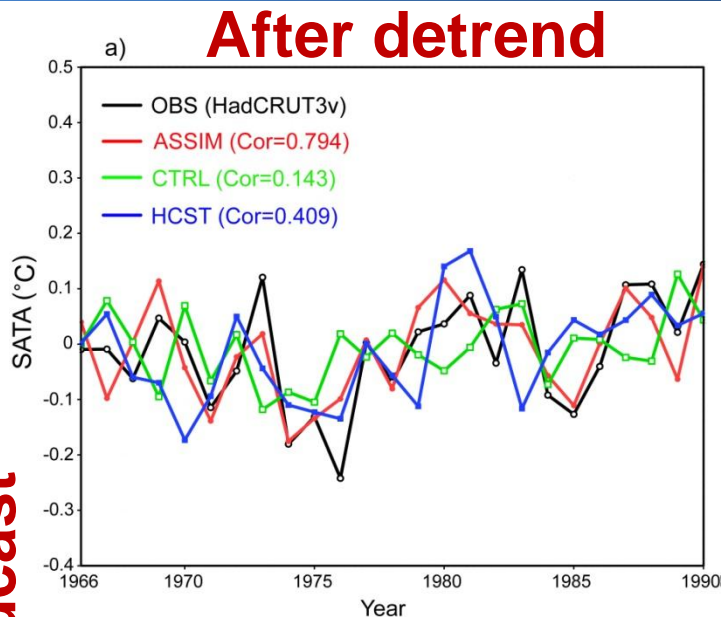
1986-2005



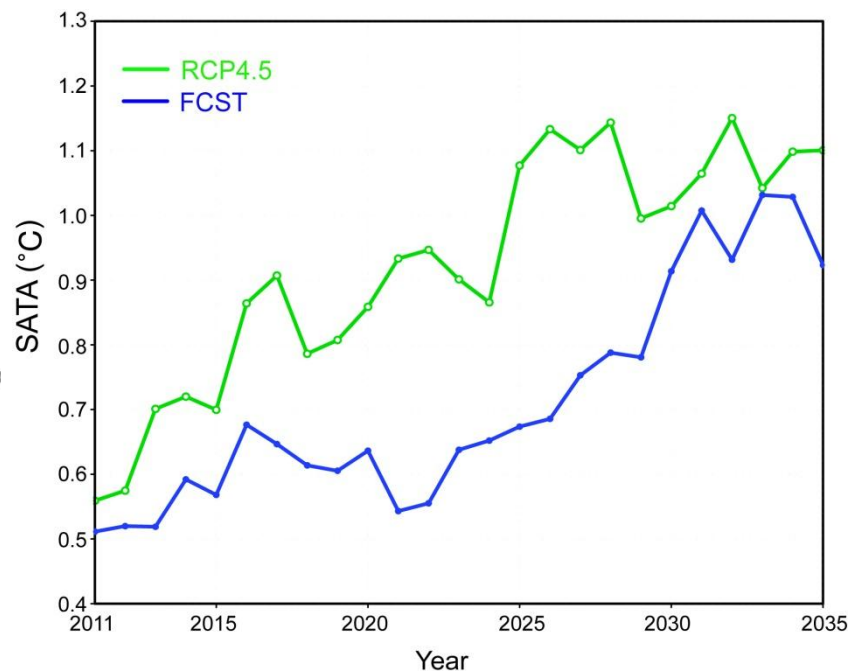
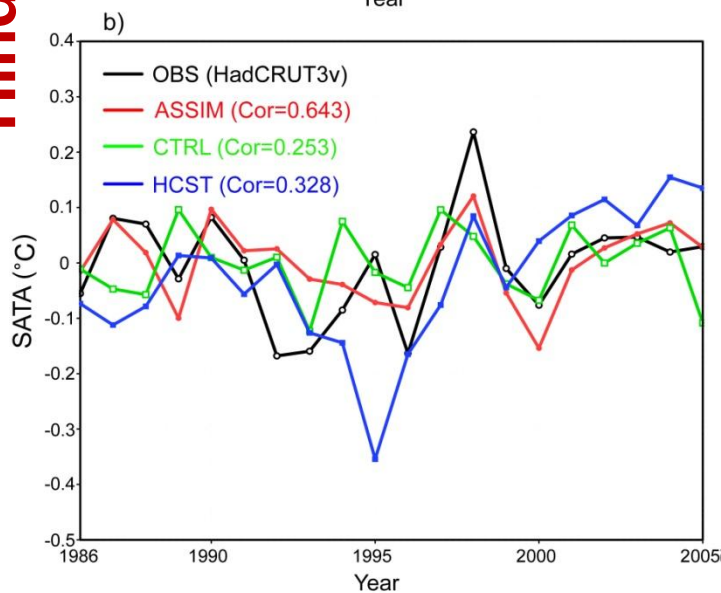
30-year predictions of SATA by FGOALS-g2

1966-1990

Hindcast

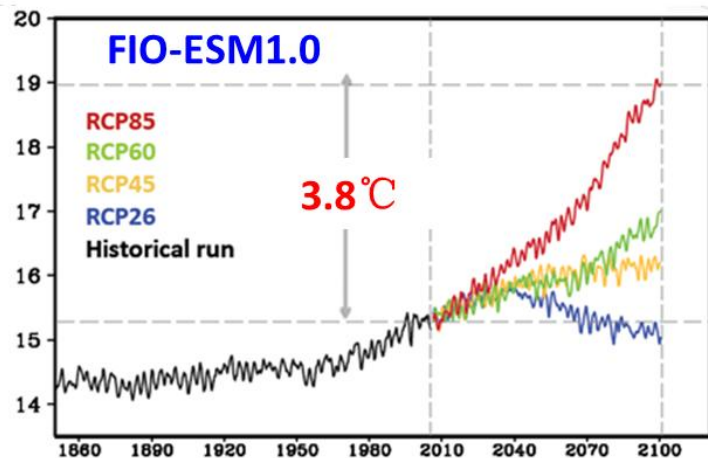
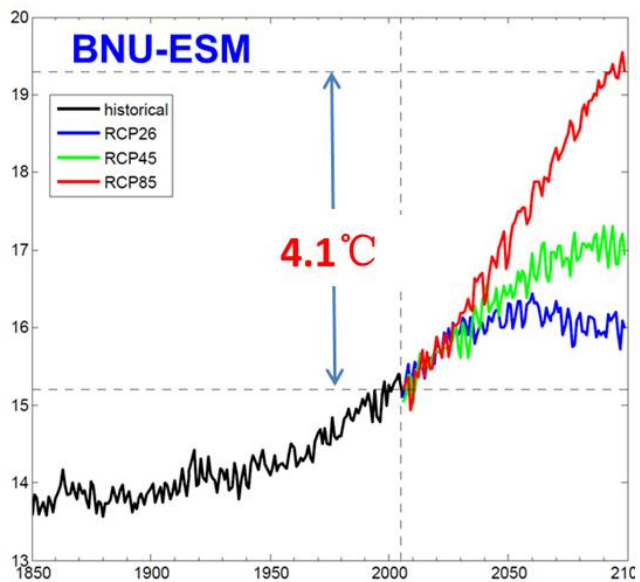
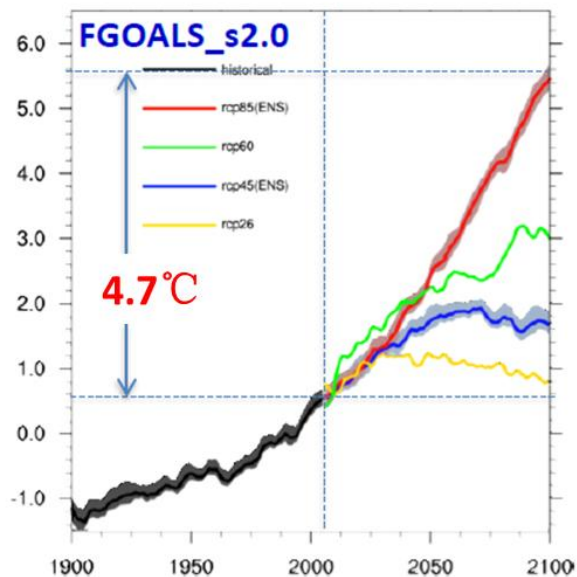
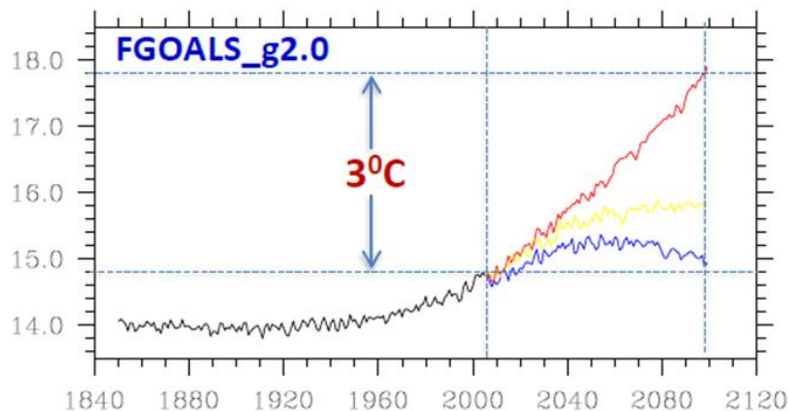


1986-2005

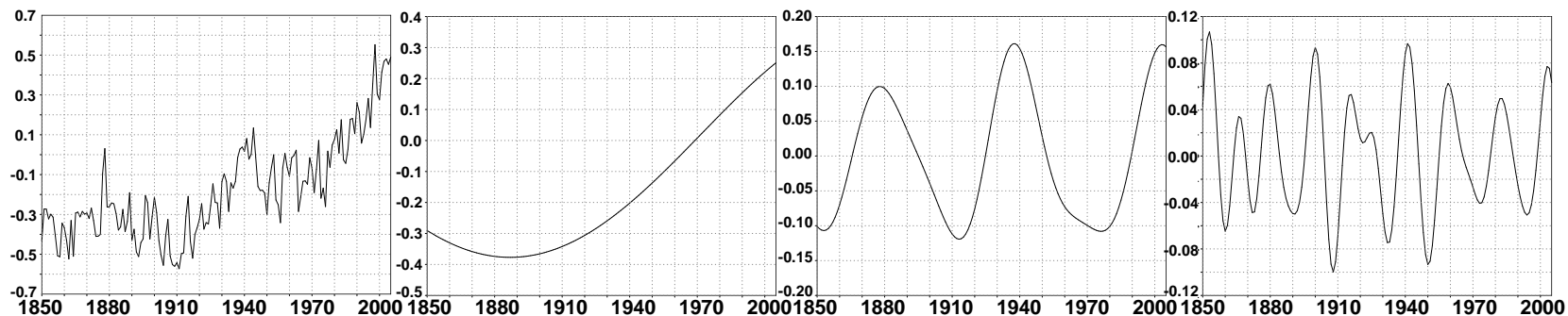


2011-2035
(Forecast)

历史试验及未来RCP情景试验全球平均表面气温变化



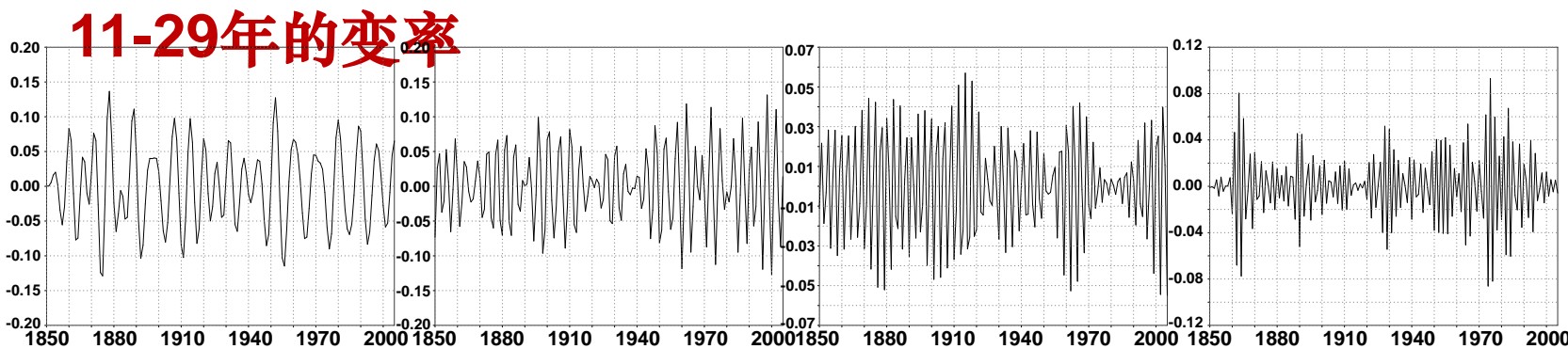
全球平均表面气温变化时间序列的自然模态分解 (观测)



原序列

非线性趋势

32-92年的变率



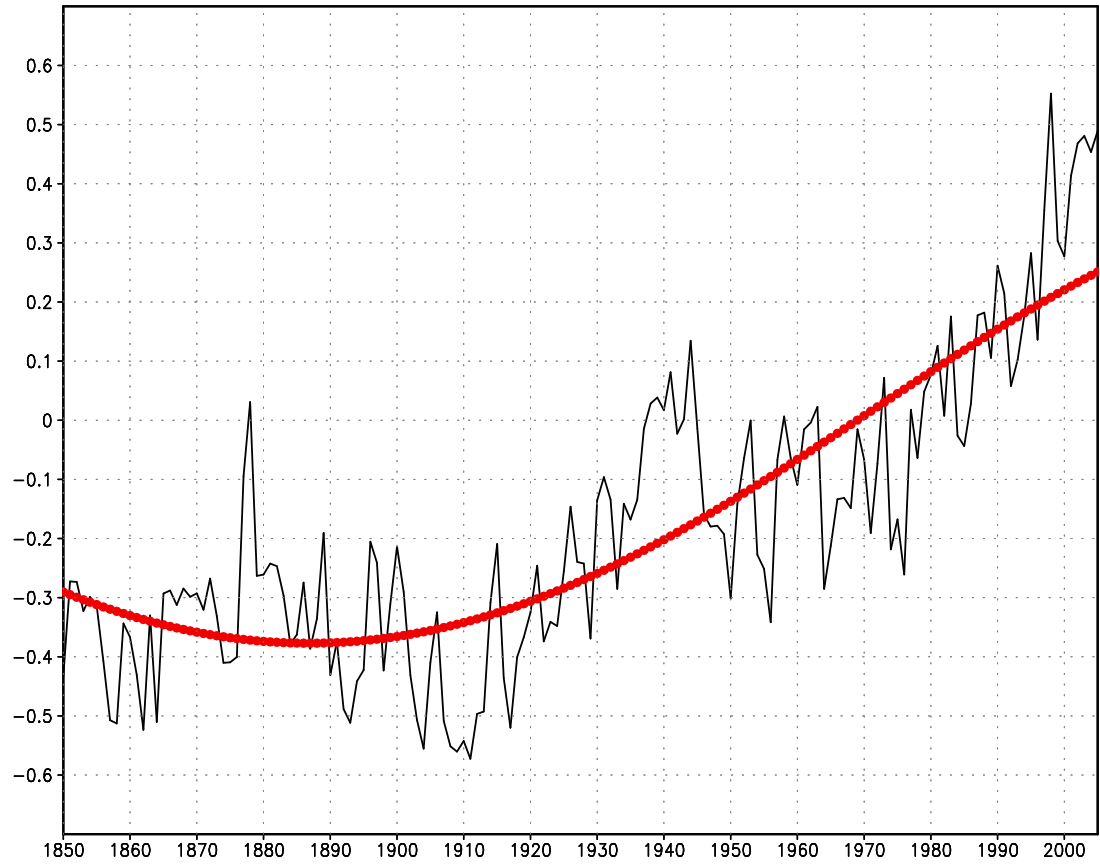
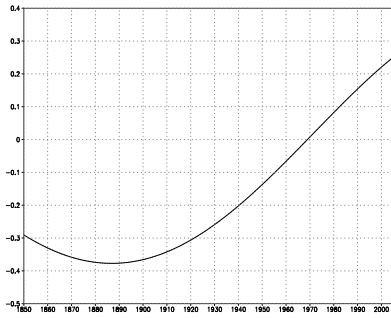
11-29年的变率

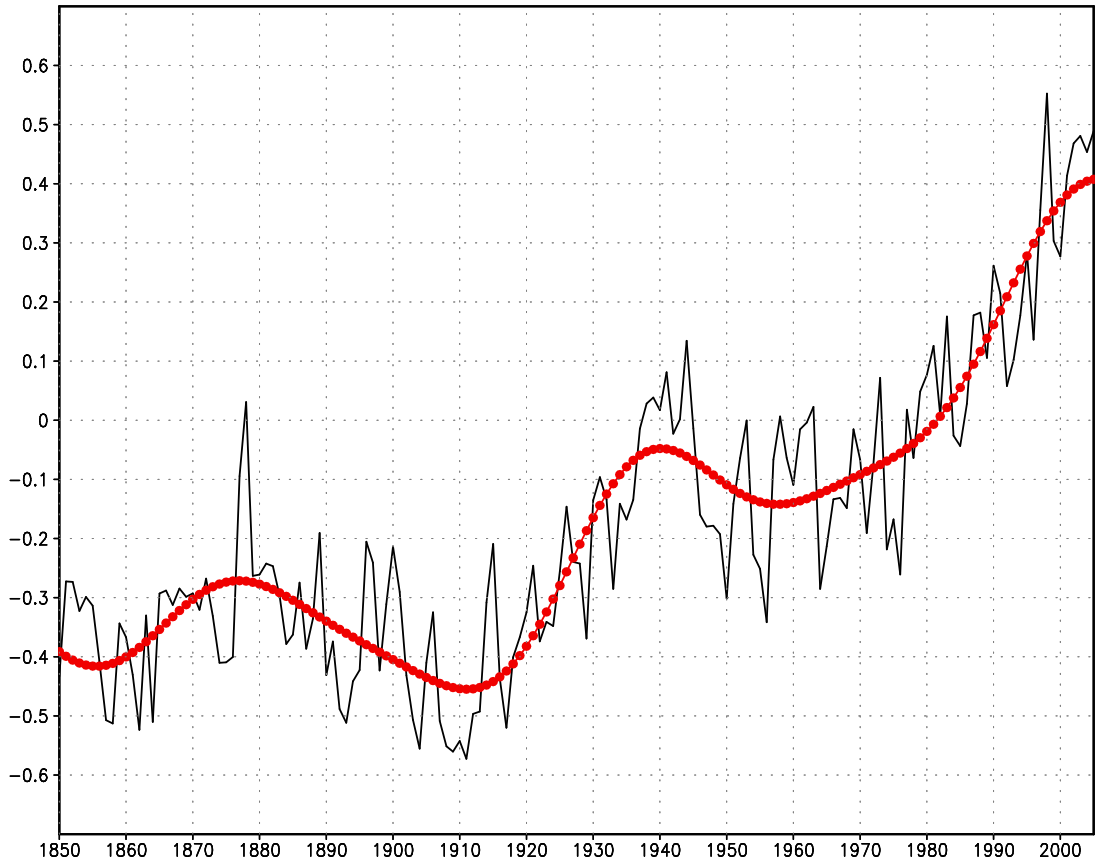
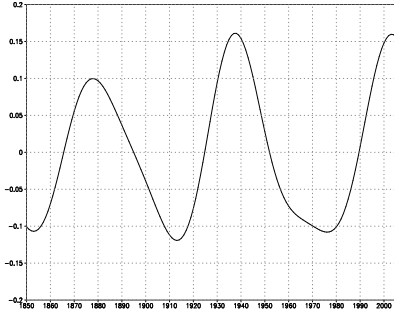
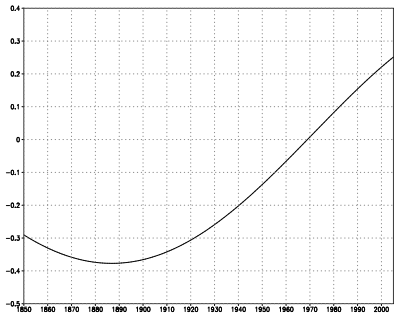
5-10年的变率

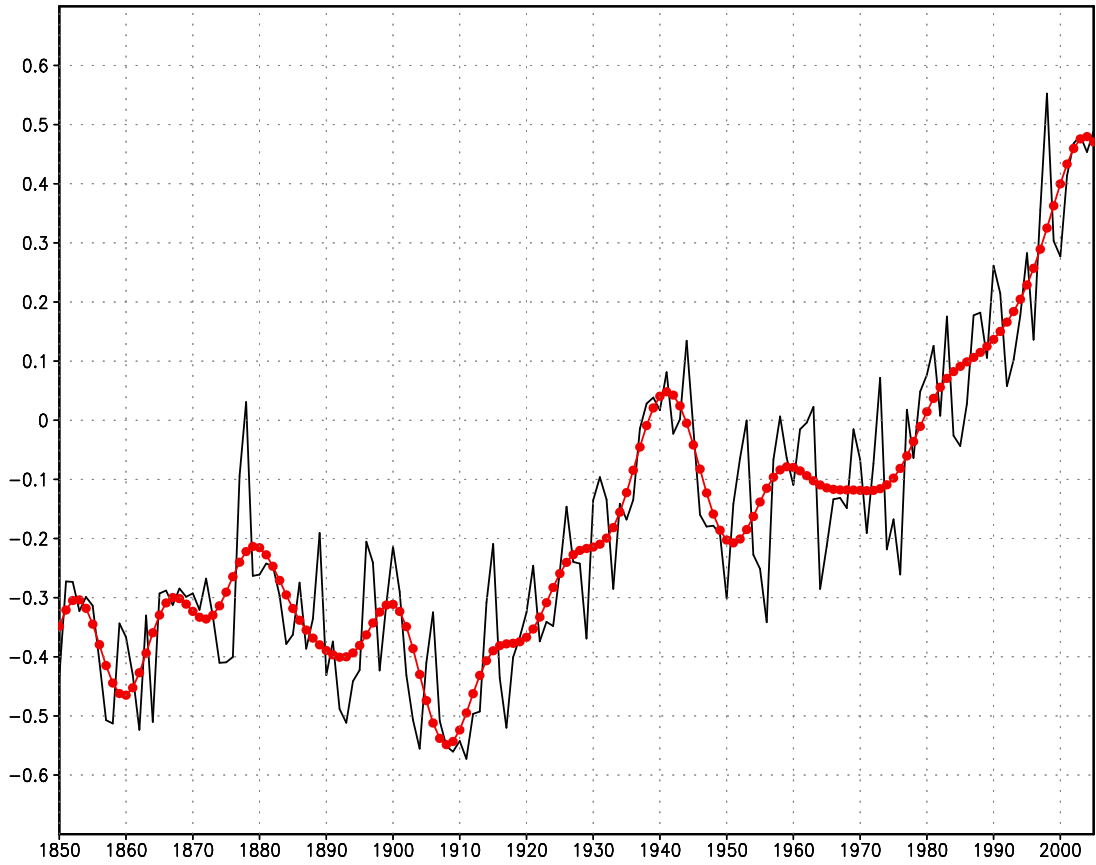
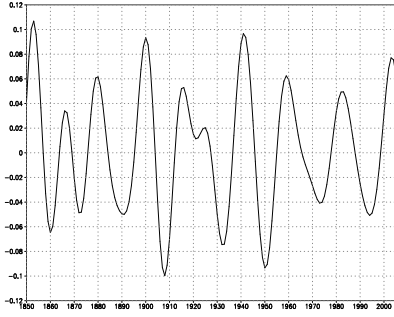
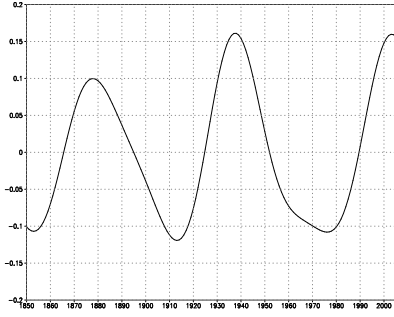
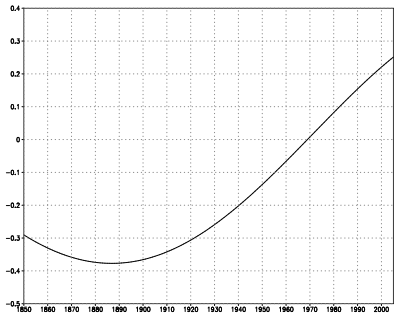
2-2.6年的变率

3-5年的变率

2.6-3年的变率







模式结果的可信度和不确定性



可信度



全球平均结果



长期变化趋势



不确定性



温室气体排放情景是假设的；基于不同的人口增长率、经济发展速度、技术进步水平、环境条件、全球化情况和公平原则等假设。



预测结果的不确定性：资料不完整，模式物理过程不完备（如云和辐射的作用），降水模拟和区域气候模拟误差比较大。

减少模式的不确定性

更加正确地认识全球变化的归因与影响

中国科学家任重而道远！

谢谢!

