



清华大学
Tsinghua University

地球系统模式研发及应用国际暑期学校

地球系统模式简介

罗勇

清华大学地球系统科学系



CENTER FOR EARTH
SYSTEM SCIENCE

清华大学地球系统科学研究中心

2022年8月22日

内 容

- 4.1 地球系统模式
- 4.2 模式模拟与验证
- 4.3 气候变化归因
- 4.4 排放情景/社会经济情景
- 4.5 全球气候变化预估
- 4.6 中国气候变化预估



内 容

4.1 地球系统模式

4.2 模式模拟与验证

4.3 气候变化归因

4.4 排放情景/社会经济情景

4.5 全球气候变化预估

4.6 中国气候变化预估



地球科学是一门实验学科



物理实验室



化学实验室



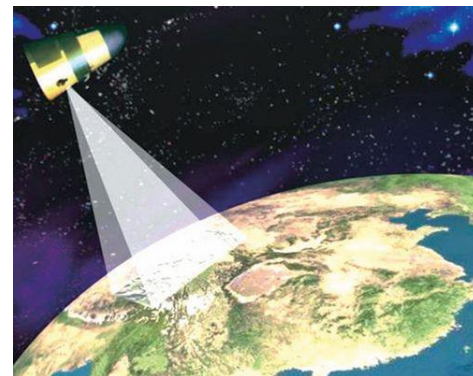
生物实验室



台站观测



野外观测



遥感观测

1946年2月15日世界上的第一台计算机“埃尼阿克”诞生后不久，冯·诺曼等人提议美国军方将计算机用于天气预报。1950年冯·诺曼领导下的普林斯顿高等研究院研制出世界上第一个数值天气预报模式。从此，天气预报（气候系统模拟）就一直是巨型超级计算机的**最大用户**之一。



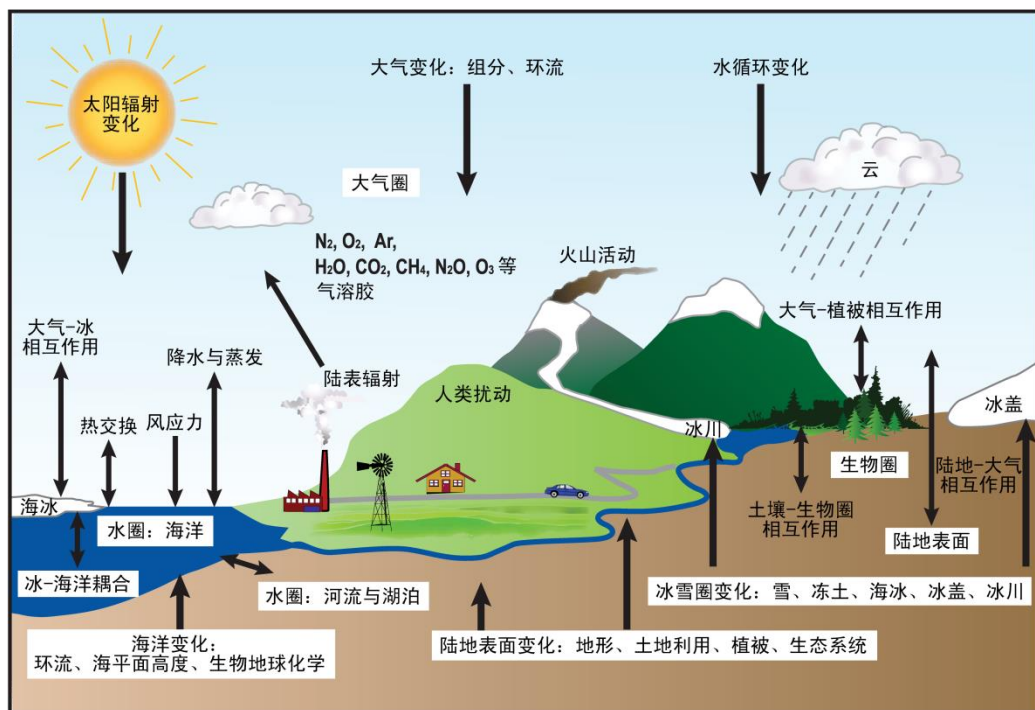
- 在全球尺度上模拟地球系统运行机制
 - 揭示地球系统整体演变规律
 - 预测未来变化

——“数字”实验手段：气候系统数值模拟

——唯一科学工具：气候模式

地球系统模式

基于对动力、物理、化学和生物过程的科学认识建立起来的定量描述气候系统各组成部分状态的**数学物理模型**，利用数值方法进行求解，并通过高性能计算实现对气候系统非线性复杂行为和过程的模拟与预测。



气候系统及其各圈层之间的相互作用



清华大学
Tsinghua University

气候系统模式的分类

- ✓ 气候模式从复杂程度上可分为简单气候模式、中等复杂程度气候模式和完全耦合的气候系统模式。
- ✓ 目前用于气候变化模拟、归因和预估的主要是气候系统模式。
- ✓ 从空间范围上，气候系统模式可分为全球气候模式和区域气候模式。



简单气候模式

- 简单气候模式主要有一维辐射-对流大气模式，一维上翻-扩散海洋模式，一维能量平衡模式，与二维大气和海洋模式等。
- 简单模式的计算量比气候系统模式少得多，因而能用于研究气候对大量不同浓度温室气体排放的响应，还可以用来研究在参数变化范围很大条件下气候对某一特定过程的敏感性。



中等复杂程度的气候模式（EMICs）

- ✓ 包括大气和海洋环流的部分动力学及其参数化，也经常包括生物地球化学循环过程；
- ✓ 可以描述复杂模式中包含的大部分过程，但是以更简化（或更参数化方式）的形式。它们可以直接地模拟气候系统一些圈层间的相互作用，可具有生物地球化学循环；
- ✓ 空间分辨率较低，在计算上比气候系统模式更加有效，即可做几万年气候变化的长期模拟，又可做几千年时间尺度下各种气候敏感性试验。
- ✓ 二维、纬向平均的海洋模式耦合一个简单大气模式（也可能是地转二维或统计动力大气模式）；简化形式的复杂模式；能量—水汽平衡模式耦合OGCM和海冰模式。
- ✓ EMICs能用于研究大陆尺度的气候变化系统各部分耦合的长期大尺度影响。



地球系统模式的三个发展阶段

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。

中间阶段：（地球）气候系统模式

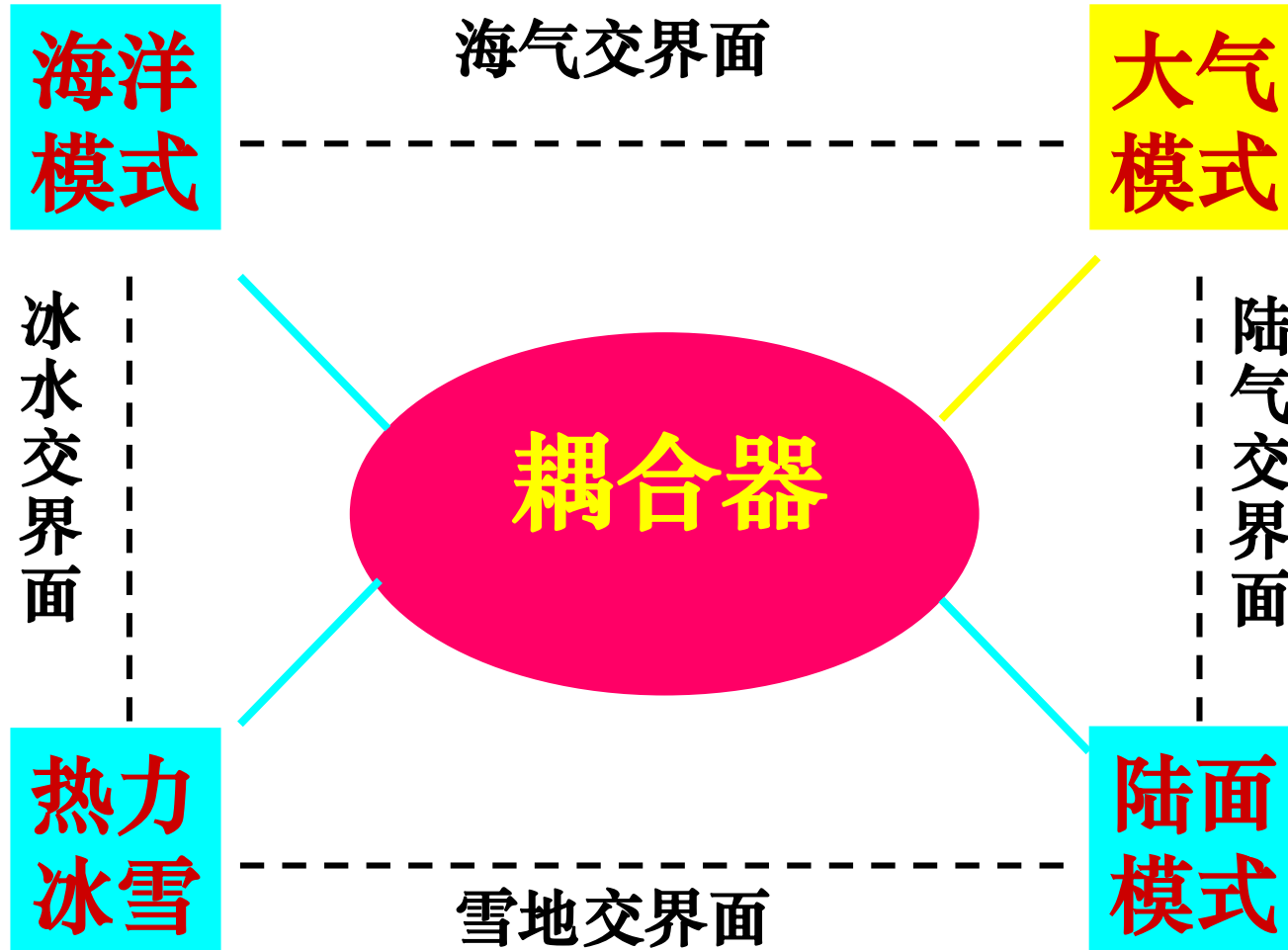
- ✓ 在物理气候系统模式的基础上，考虑大气化学过程和地球生物化学过程（陆面生物、海洋生物）。

成型阶段：相对完整的地球系统模式

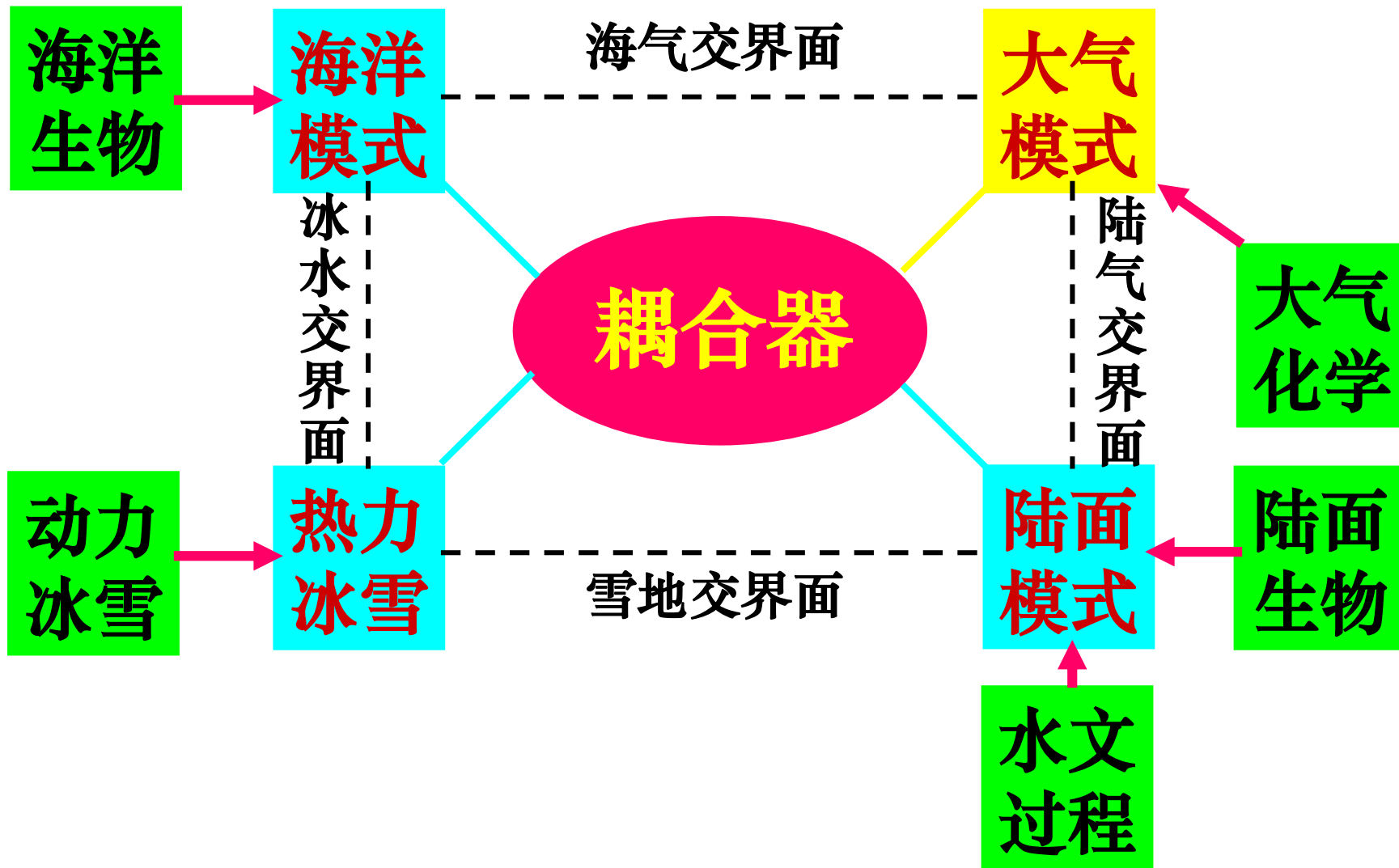
- ✓ 在地球气候系统模式的基础上，进一步考虑其与固体地球（如地球版块移动及其引发的地形变化、地震、火山爆发等）和空间天气的相互作用。



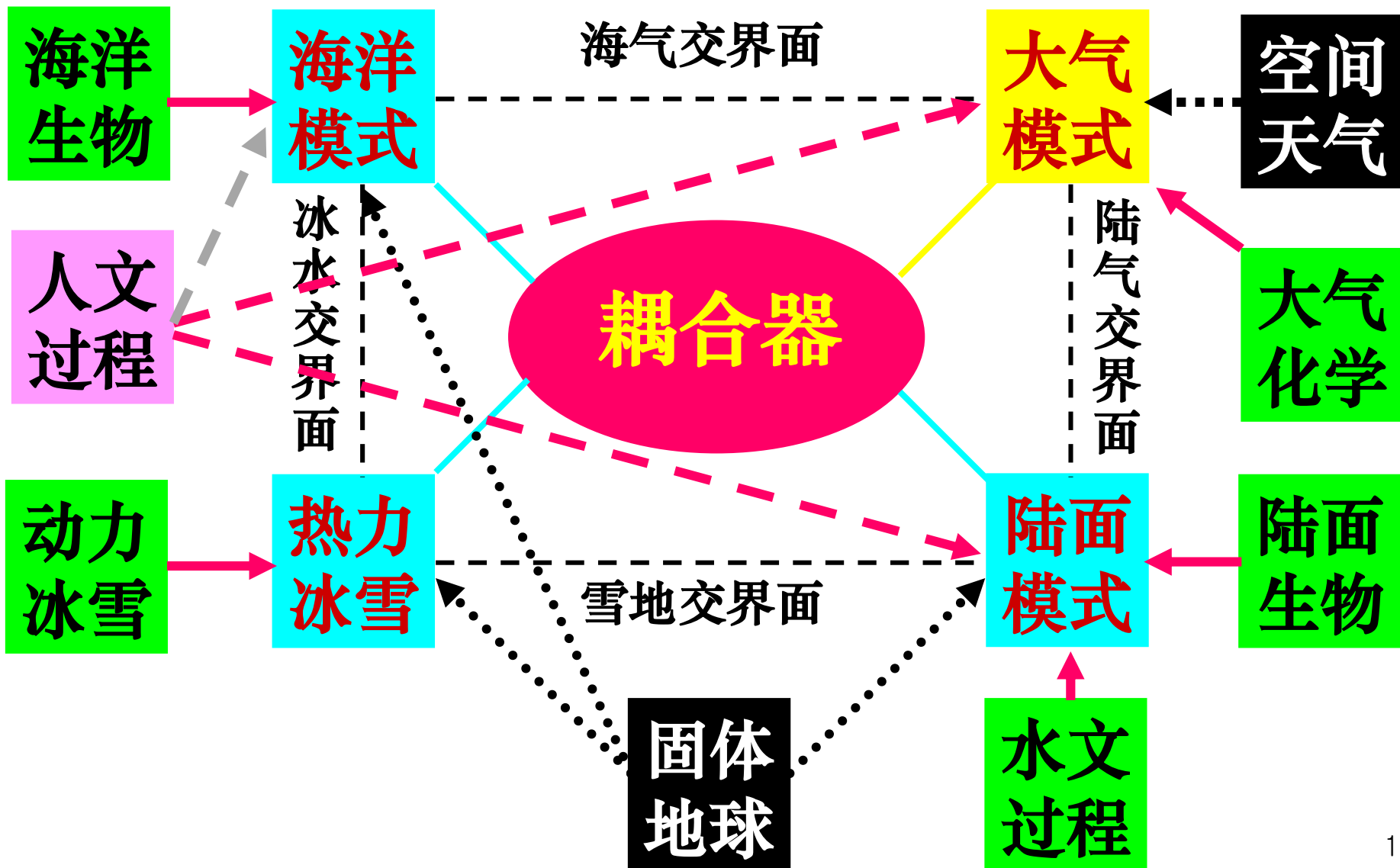
物理气候系统模式



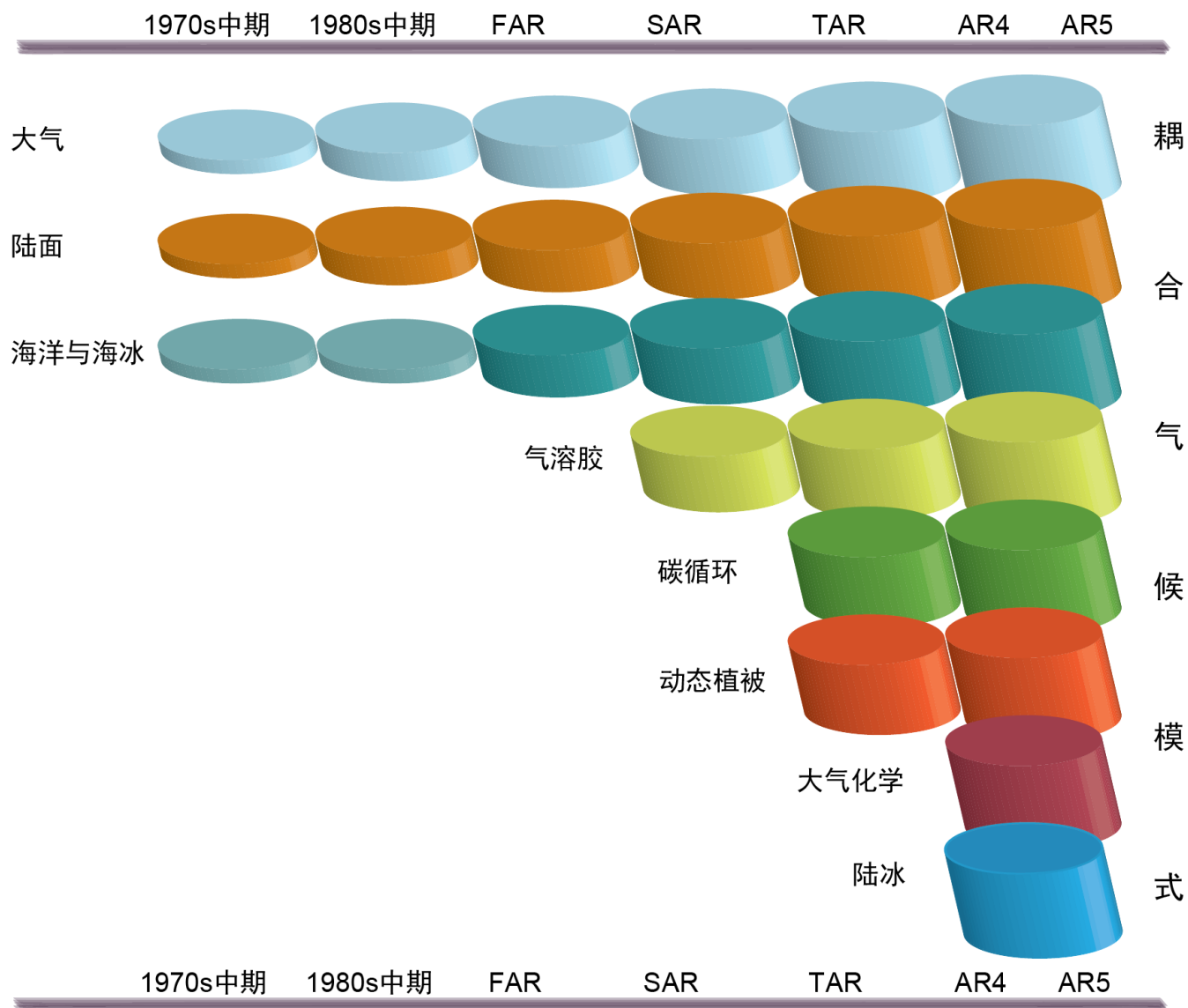
(地球) 气候系统模式



地球系统模式

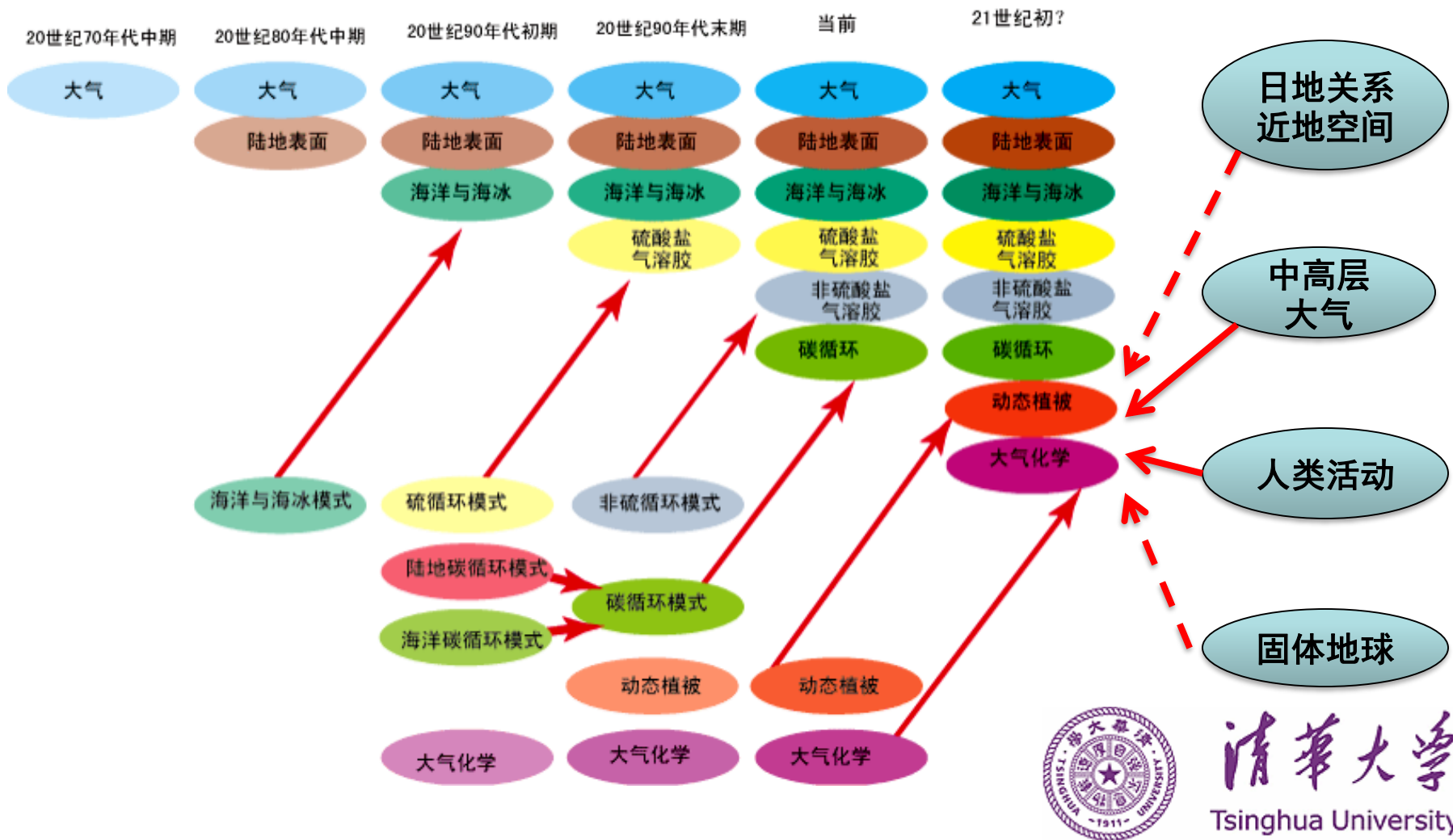


近几十年来全球耦合气候模式的发展



气候系统模式的发展趋势

越来越多的地球系统分量加入到模式中



地球系统模式的发展现状

参加CMIP5的模式组与分辨率

参加耦合模式比较计划CMIP5的模式达57个，来自10个国家和欧盟的23个模式组。

较上一次比较计划CMIP3普遍提高；最高水平分辨率甚至达到了50 km，平均水平分辨率也达到了200 km。

参加CMIP6的模式组与分辨率

从已正式注册的参加CMIP6计划的28个机构的39个模式组看，各模式分辨率普遍达到50公里量级，相比于CMIP5试验计算量增加200倍，存储增加到10-50PB。

其中中国有7个单位的9个模式参与。



大气模式的发展历史

- 早在20世纪初Vilhelm Bjerknes已提出，要把天气预报作为数学物理问题来考虑
- 1922年Lewis Fry Richardson已用数值计算的方法进行了制作天气预报的尝试
- 1950年Jule Charney等做出了世界上第一张可用的500hPa形势预报图。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du}{dt} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x \\ \frac{dv}{dt} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y \\ \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + F_z \\ \frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \\ c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt} = Q \\ p = \rho RT \end{array} \right.$$

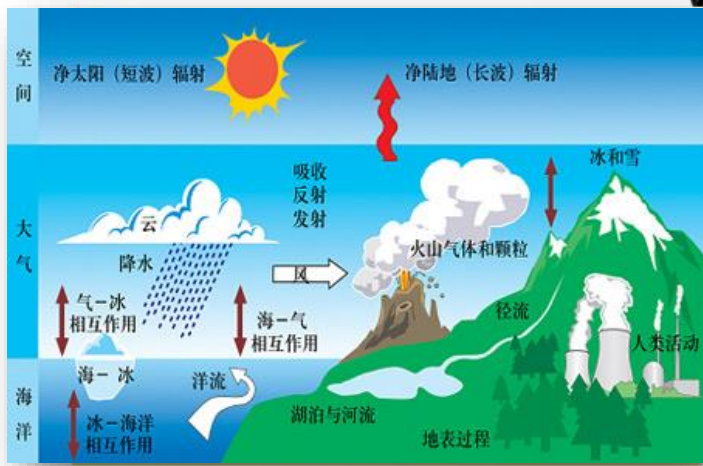
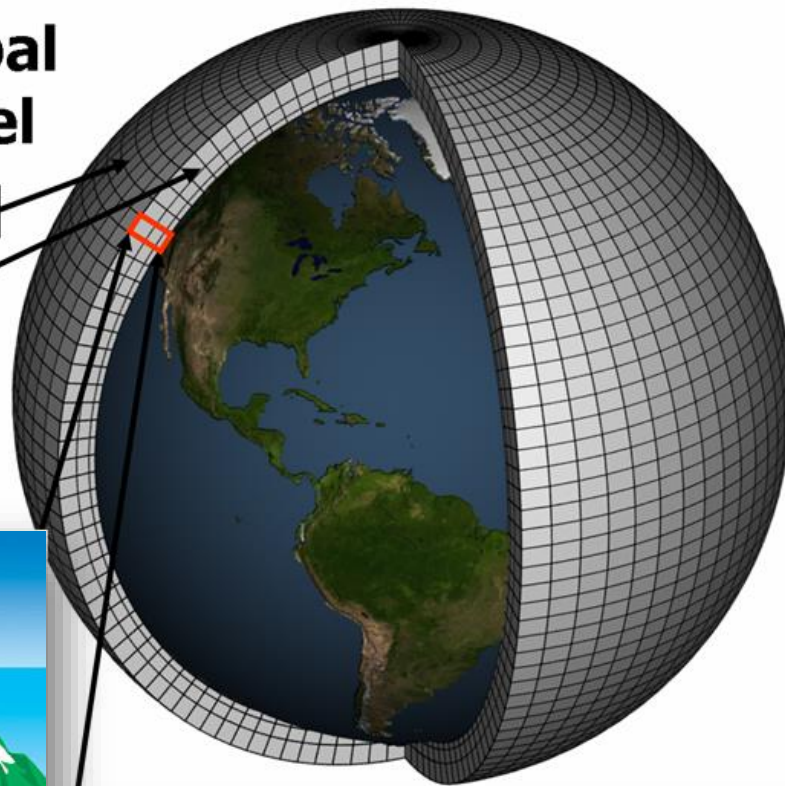
纳维-斯托克斯方程
Navier-Stokes equations
动力框架
Dynamic Core



Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (Latitude-Longitude)

Vertical Grid (Height or Pressure)

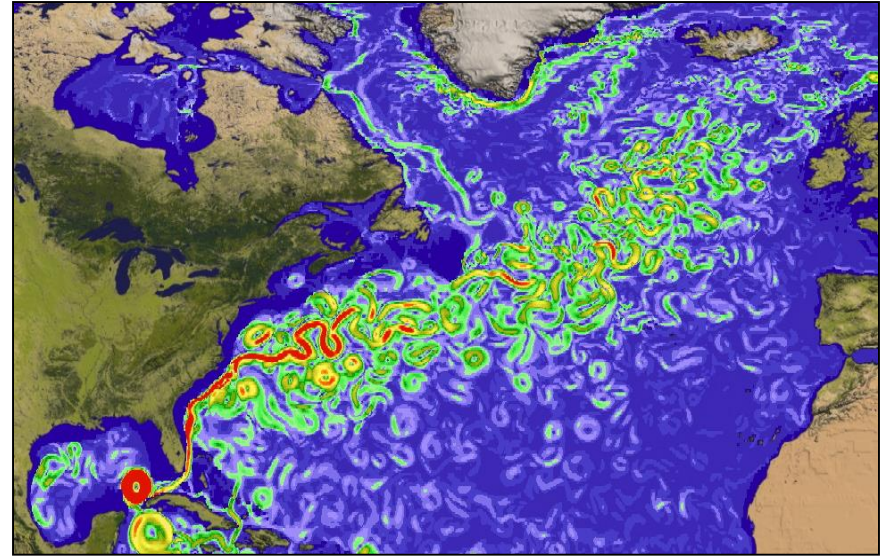
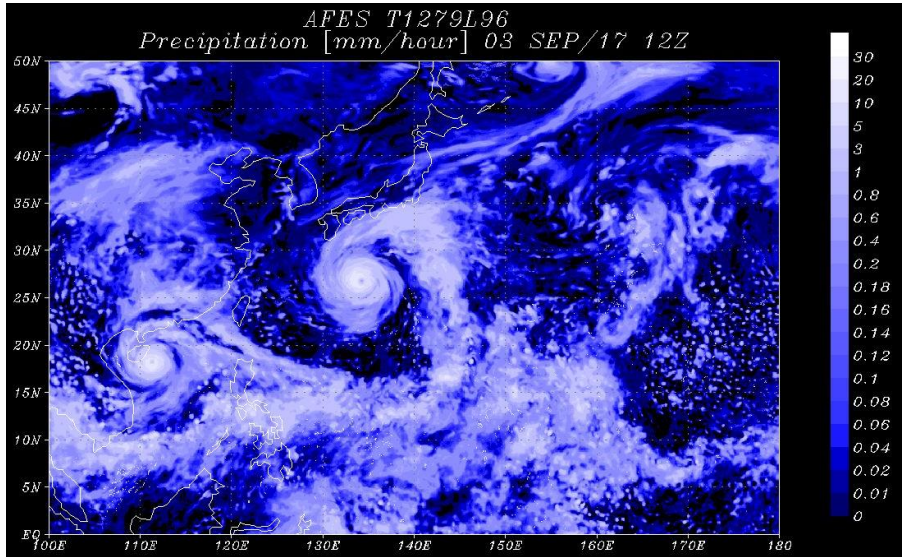


大气（气候）模式示意图（改绘自wiki百科）



气候系统模式的发展趋势

走向“高时空分辨率”



例：形象说明计算量和模式分辨率的关系

- 当前“100公里”的全球模拟
- 提升到“10公里”的全球模拟
- 提升到“<5公里”的全球模拟

地球科学主要学科研究问题的空间尺度：

大气：1公里—一万公里

海洋：百米—一万公里

生态：几公里—一千公里

水资源：几公里—一千公里

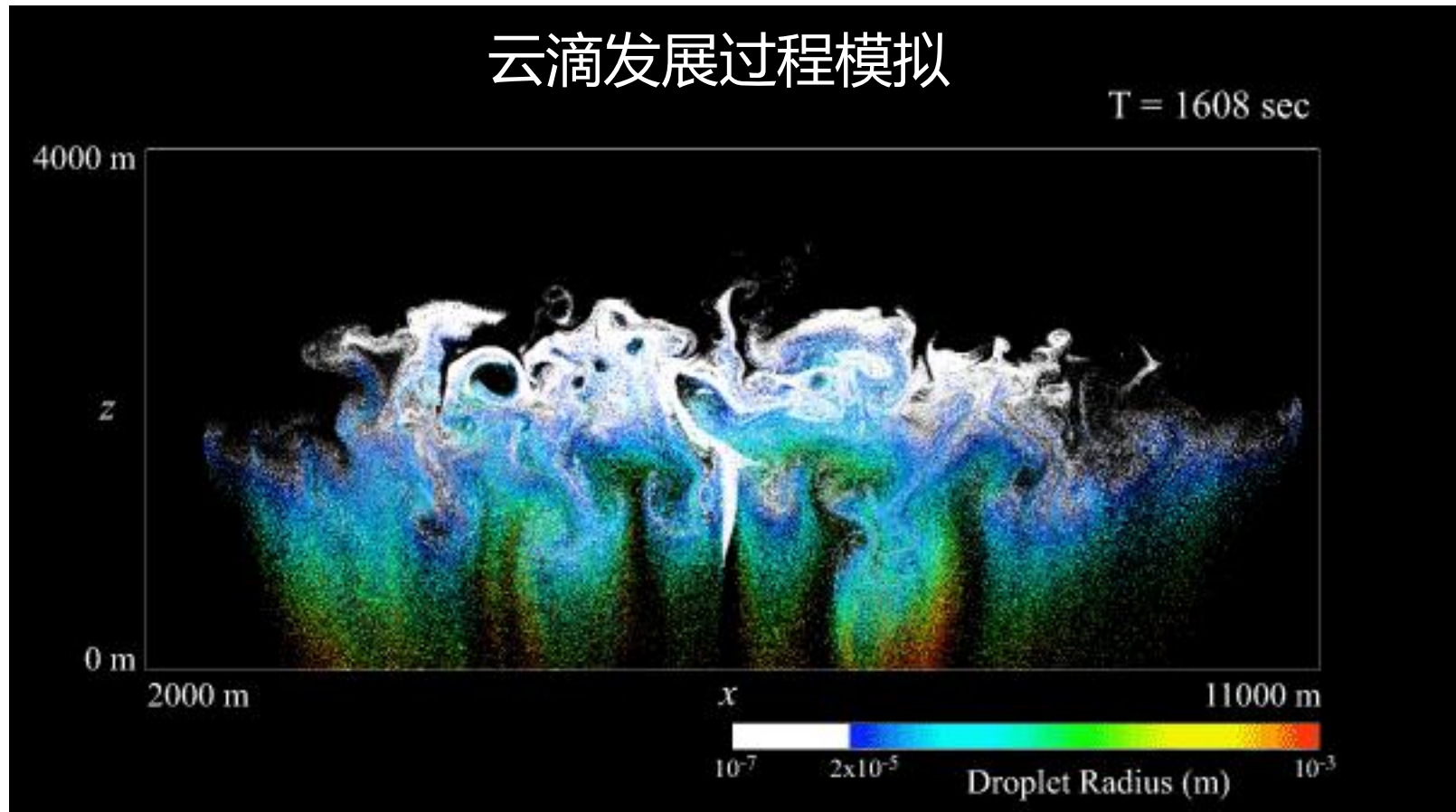
地质灾害：几十米—几十公里

空气污染：街区—城市地区

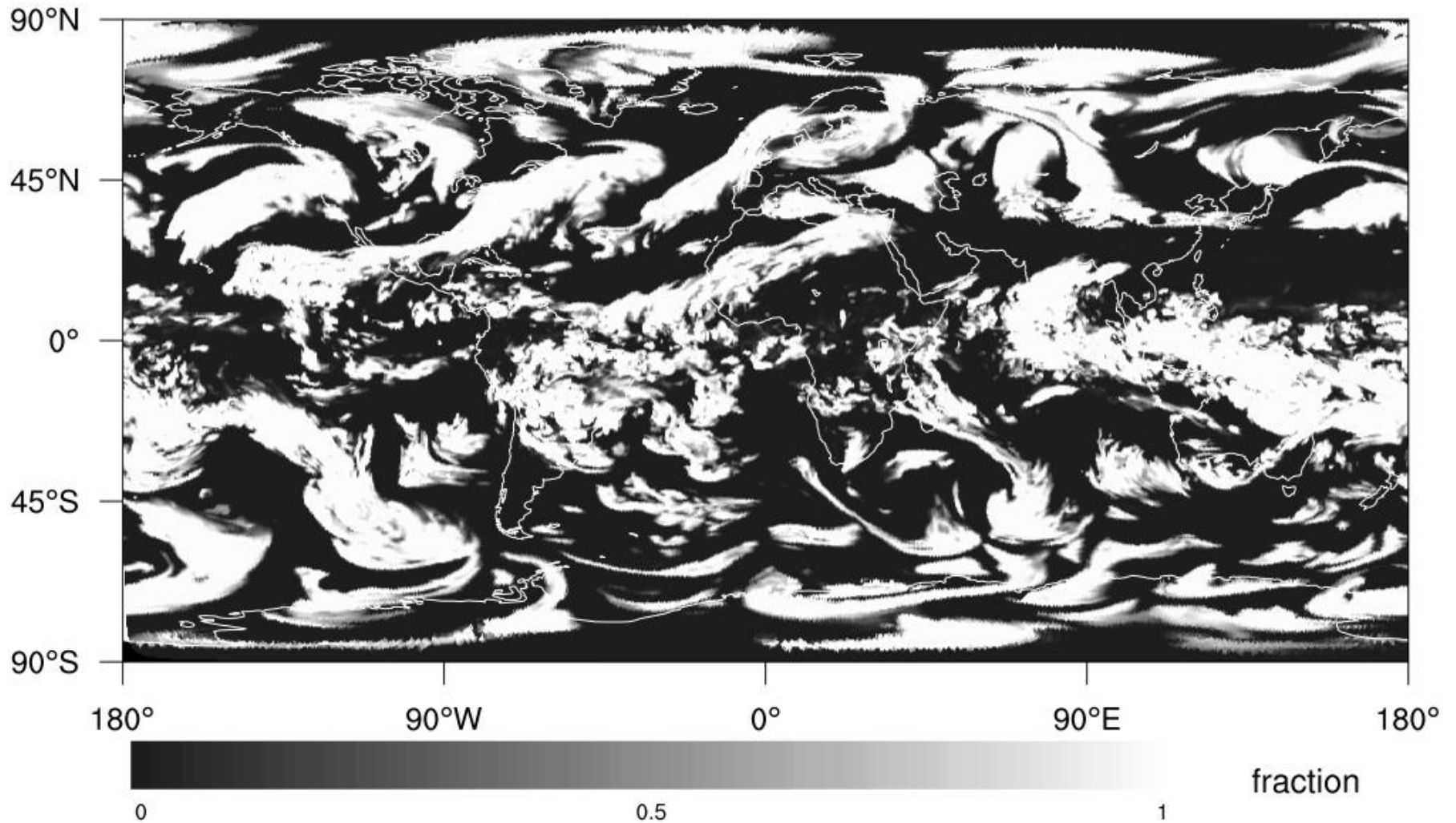
气候系统模式的发展趋势

描述更多的精细过程

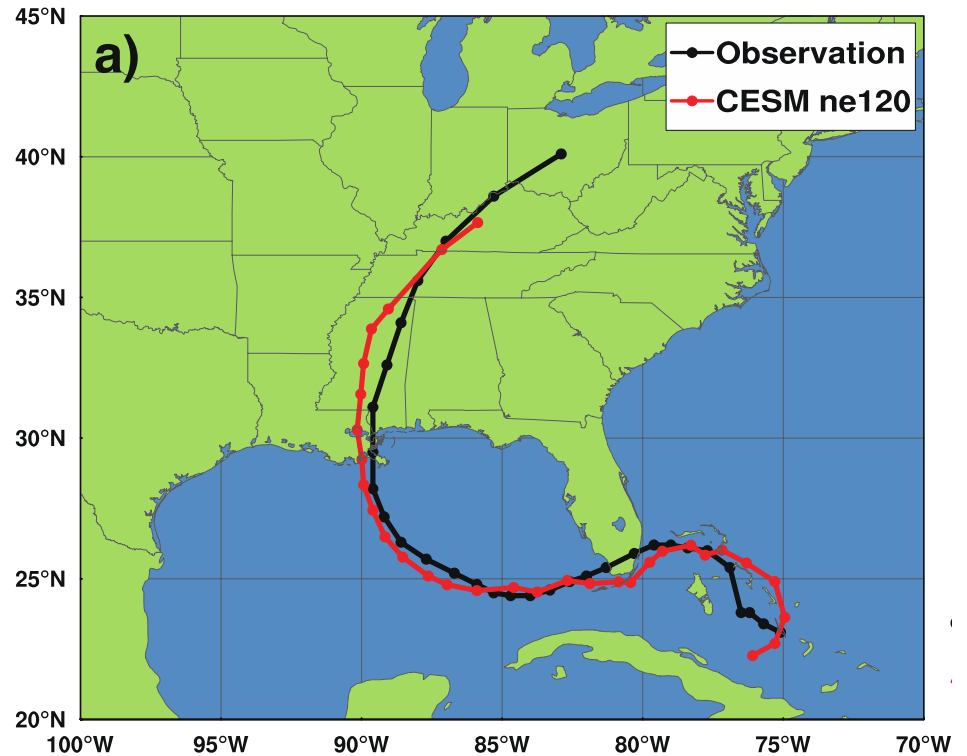
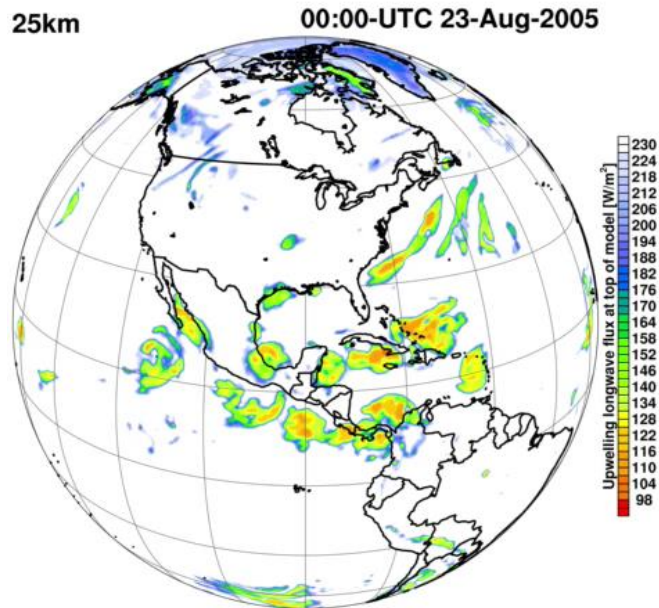
例：云 - 辐射相互作用的计算最重要的部分之一



High cloud animation from a 25 km AMIP simulation



Hurricane Simulation – Katrina (2005)



地球系统模式的程序

Xu-Randall云量诊断公式

$$C_s = RH^p [1 - \exp(-\alpha \bar{q}_l)]$$

Fortran程序

! Alternative calculation for critical RH for grid saturation

! RHGRID=0.90+.08*((100.-DX)/95.)**.5 这是RHGRID的

含义

! PEXP就是经验系数

! RHUM是湿度

! Fortran程序里n次方就是variable**n

CLDFRA(i,k,j)=(RHUM/RHGRID)**PEXP*(1.-EXP(ARG))



地球模式的计算机程序 及其高性能计算极其复杂

程序结构复杂，代码量巨大（e.g.160万行）

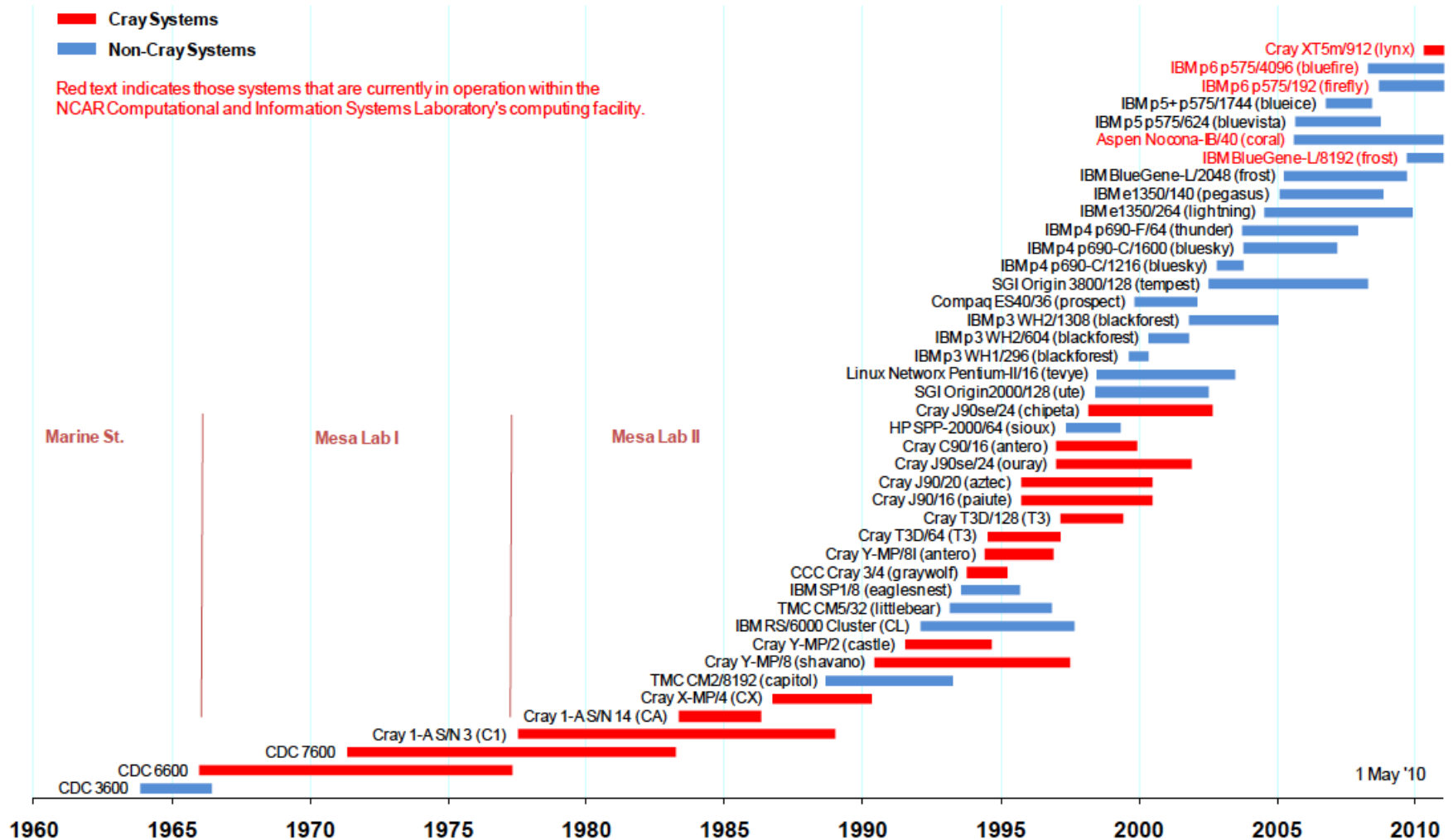
长期积淀的模式程序（30年）与高性能计算机架构的匹配

牵涉超算系统硬件及软件的各个方面

- 应用、编译、并行、运行环境、操作系统、通信、海量存储管理
- 交叉型人才的匮乏

地球系统模拟与超算的发展历史

History of Supercomputing at NCAR



开发向导与
编辑器

源代码

编译器/
调试器/
优化器

其它数据

算法
(并行)

可执行代码

初始场与
边界数据

运行时
环境

气候系统数值模拟 流程

计算结果

数据管理
子系统

可视化与
数据比对
分析工具

标准数据集

气候系统
模式

比对结果

可视化结果

```

c1: a pointer in a list.
a sentinel is used, and the array is 1 more
than the max size of the list.
INTEGER, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: A
INTEGER :: Mark
OPEN (UNIT=1, FILE='DATA')
PRINT *, 'What number are you looking for?'
READ *, Mark
PRINT *, 'How many numbers to search?'
READ *, Nhomany
ALLOCATE(A(1:Nhomany+1))
READ(UNIT=1, PWD=*) ((A(i), i=1, Nhomany)
i=1
A(Nhomany+1)= Mark
DO WHILE(Mark /= A(i))
i=i+1
END DO
IF(i == (Nhomany+1)) THEN
PRINT*, 'ITEM NOT IN LIST'
ELSE
PRINT*, 'ITEM IS AT POSITION ',I
ENDIF
END PROGRAM ch1605

```

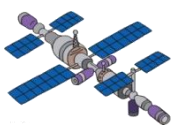
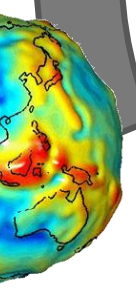
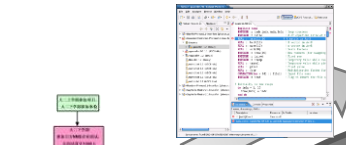
```

1m 01100110 01100101 01100101
01101100 01101001 01101110 01100111
00100000 01101100 01101011 01100011
01101011 01111001 00001010

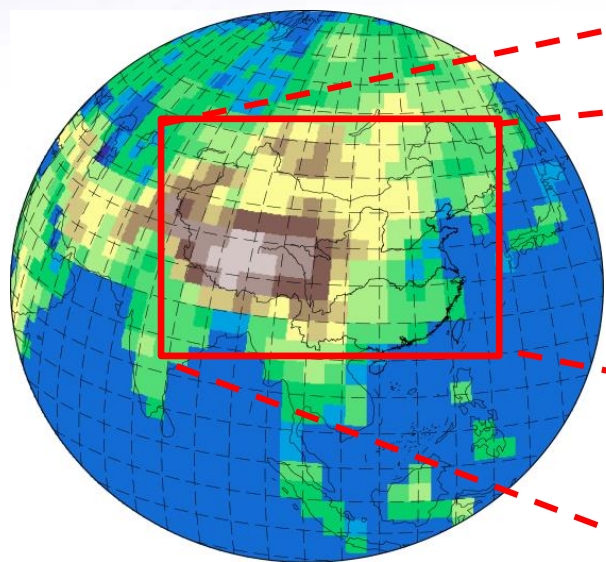
```



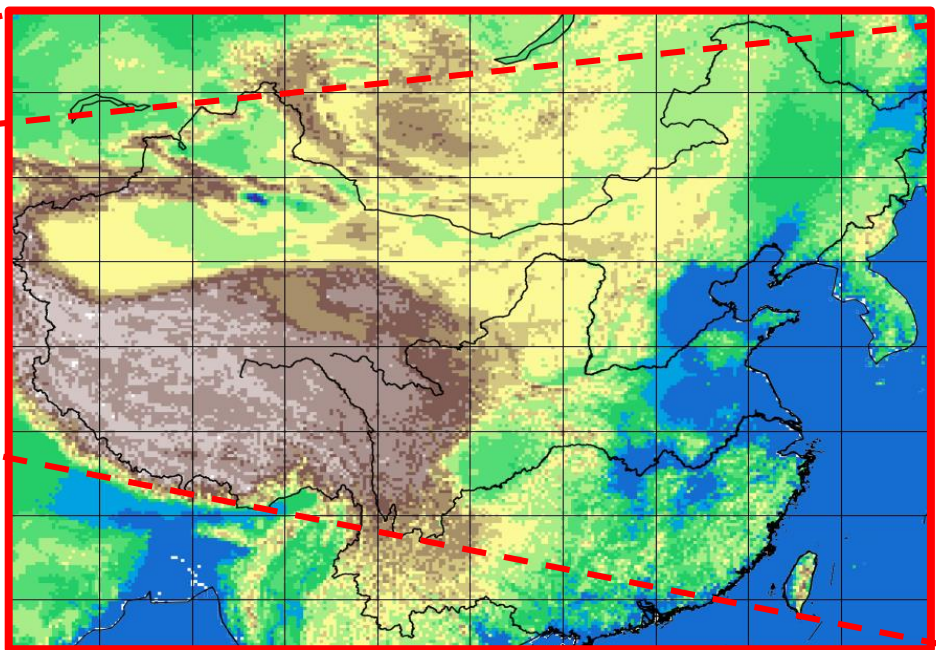
日期	风速	降水	云量	能见度	气压	湿度	温度
1	1217	15000.00	2500	244.90	15.00	2.45	1024.90
2	1217	14200.00	1500	220.00	15.00	2.21	1000.00
3	1217	12070.00	1500	190.40	15.00	1.96	1778.40
4	1217	11114.00	1500	122.27	15.00	1.72	1726.27
5	1217	9051.04	1500	140.00	15.00	1.40	1720.00
6	1217	7900.00	1500	122.00	15.00	1.24	1720.00
7	1217	6425.00	1500	90.00	15.00	1.00	1070.00
8	1217	4902.00	1500	70.00	15.00	0.70	1000.00
9	1217	3070.00	1500	51.24	15.00	0.51	1033.14
10	1217	1770.00	1500	20.00	15.00	0.20	1004.00
11	1217	171.00	0	0.00	1.72	0.00	174.00
12	1217	1.74					



再分析资料/ 全球模式



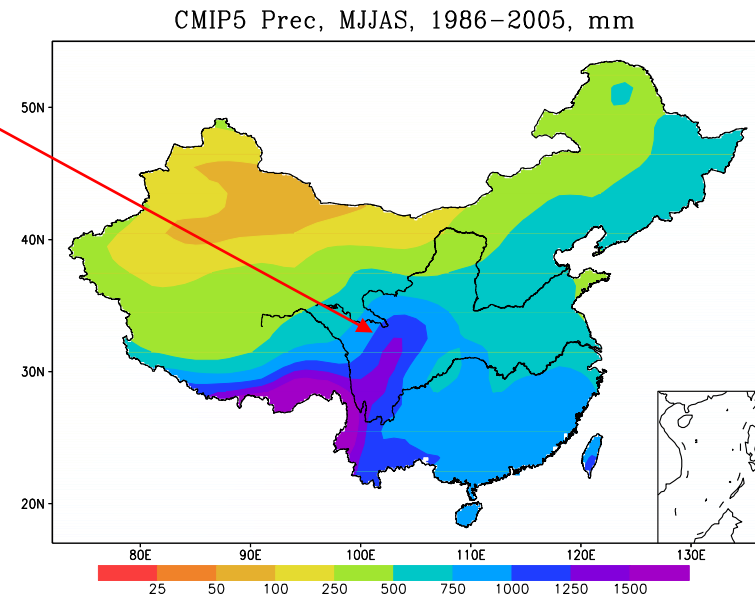
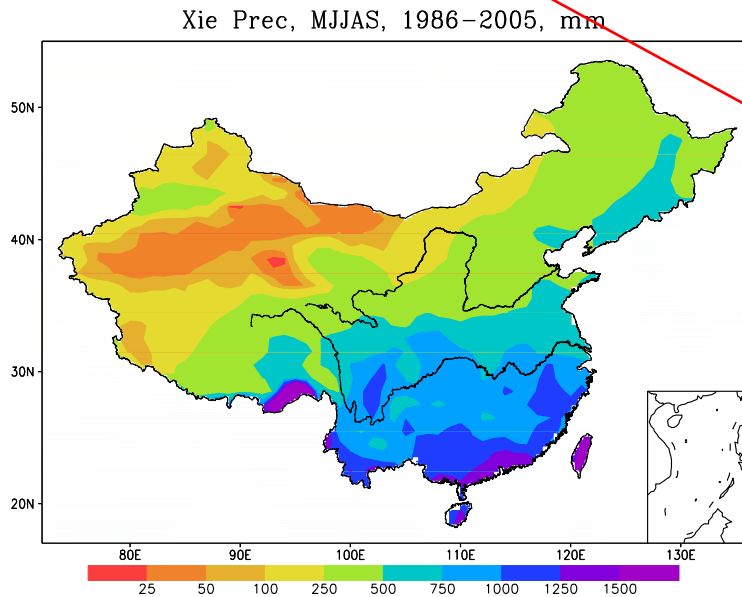
区域模式



由于较高的分辨率，区域模式可以更真实的刻画地形、海陆分布和地表植被特征，及描述较小尺度天气气候系统、极端事件及其变化

全球模式对中国年平均降水的模拟偏差

一般而言，全球模式对东亚季风降水的模拟能力普遍较差，一般会在青藏高原东部产生一个虚假降水中心。研究表明，这主要是由于全球模式的分辨率不足引起的，高分辨率区域气候模式可以在很大程度上改善这一误差(Gao et al., 2006; 2008; 2011)。



东亚5-9月降水的观测和CMIP5多模式模拟(mm)

区域气候模式及降尺度

区域气候模式介绍及基本原理

区域气候变化情景的得到:

✓ **全球气候模式在区域水平的预估:** 全球模式是气候变化预估的基础工具

优点: 世界上多个模式组进行了大量的气候变化模拟, 并包含各种温室气体排放情景, 可以进行不确定性分析

缺点: 受计算机条件的限制, 分辨率较低, 对区域气候的模拟能力较差

✓ **降尺度方法: 动力降尺度和统计降尺度**

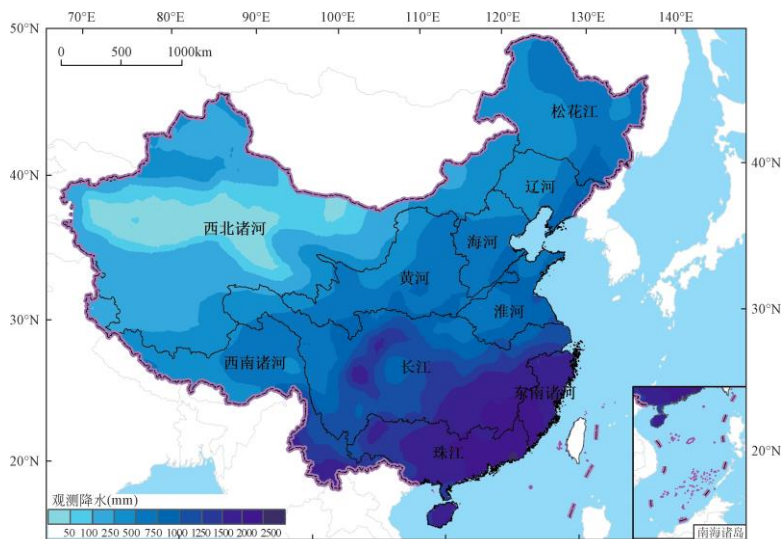
动力降尺度方法包括高分辨率的全球大气模式和变网格模式, 以及**区域气候模式**

优点: 可以捕捉到较小尺度的非线性作用, 所提供的气候变量之间具有协调性

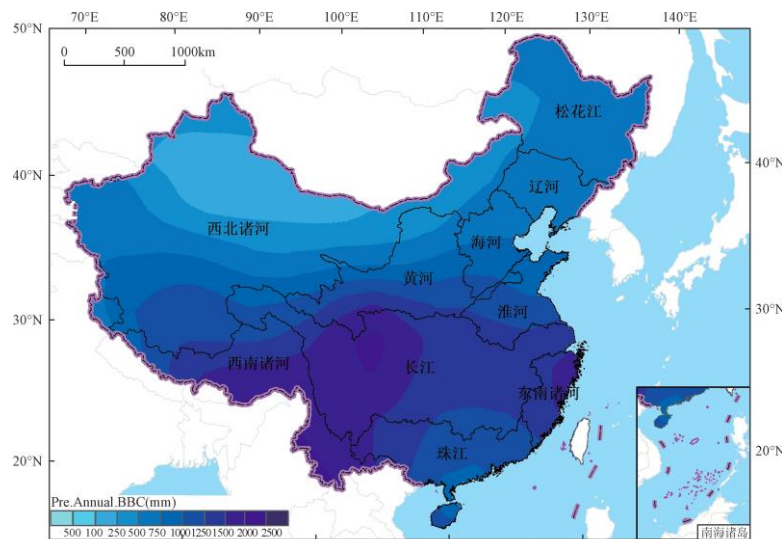
缺点: 计算量大, 所完成的模拟少, 较难进行集合和不确定性分析



全球模式和区域模式模拟的年平均降水

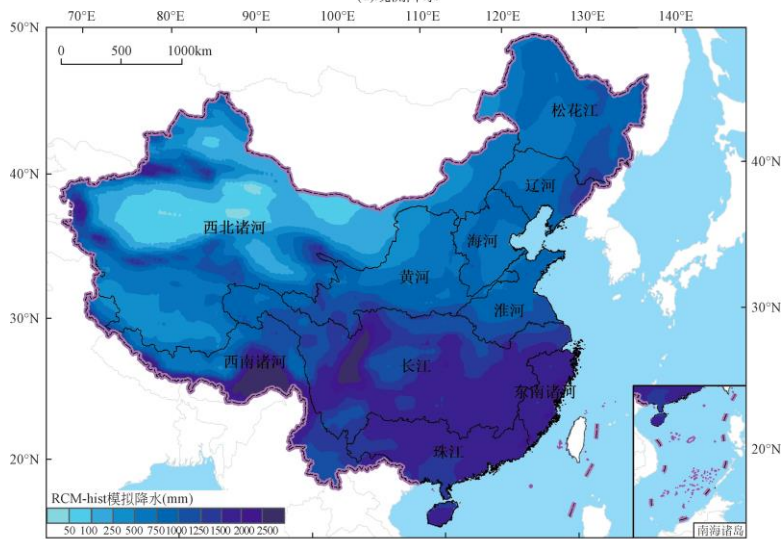


(d)观测降水



(e)Pre. Annual.BBC

观测



(f)RCM-hist模拟降水

区域模式

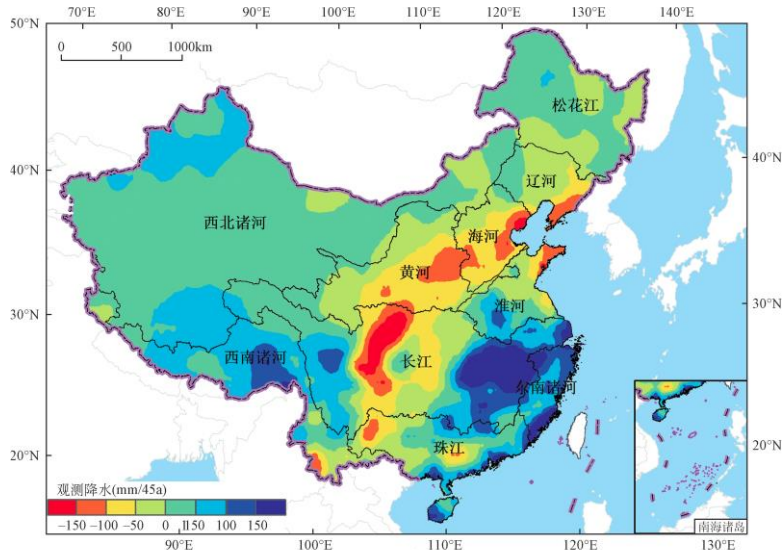
全球模式

Gao et al., 2013

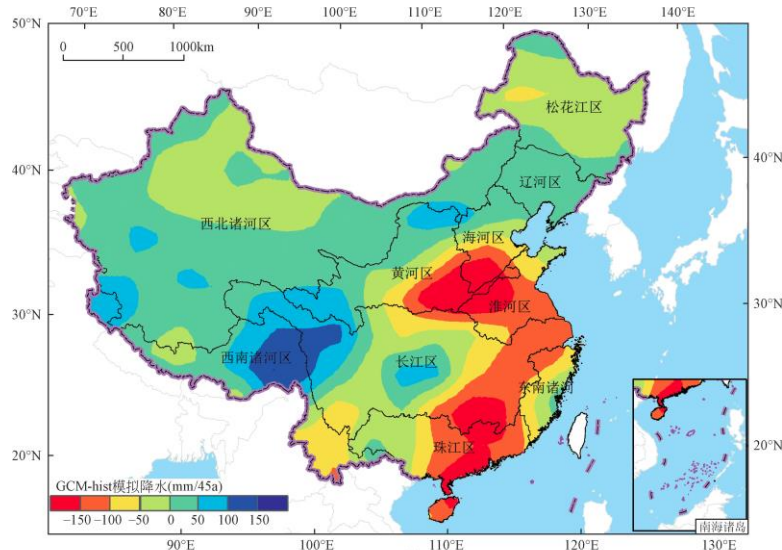


清华大学
Tsinghua University

全球模式和区域模式模拟的年平均降水变化

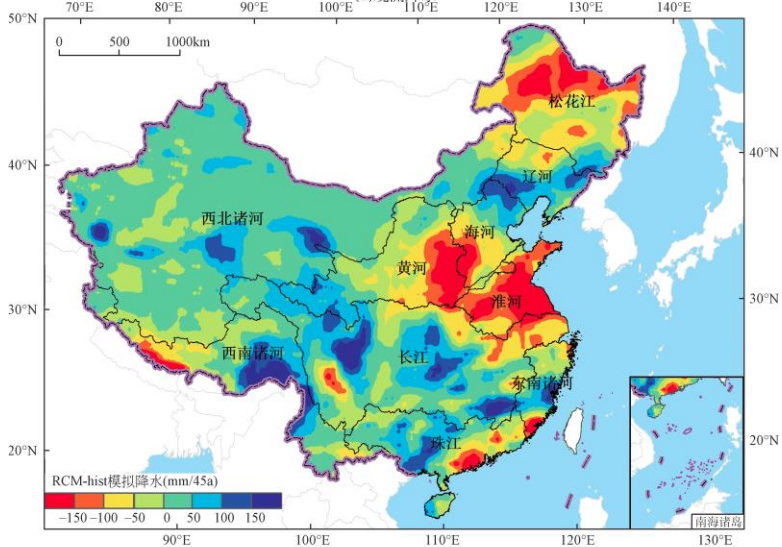


(d)观测降水



(e)GCM-hist模拟降水

观测



(f)RCM-hist模拟降水

全球模式

区域模式

Gao et al., 2013



清华大学
Tsinghua University

区域模式的发展历史

✓ 1990年左右，Robert Dickinson和Filippo Giorgi等首先提出区域气候模拟的概念

✓ RegCM系列模式的发展历史：



✓ 目前在国内应用较多的RCM：MM5及后来的WRF（气候版）、PRECIS、RAMS、RSM、HIRHAM、REMO、RCA、CRCM、RIMES，等

区域模式的发展历史

✓ RegCM4.5的物理过程:

- 陆面: BATS、CLM
- 辐射传输: NCAR CCM3
- 大尺度降水: SUBEX
- 积云对流参数化: Grell, Kuo, Emanuel, TDK等
- 非局地边界层: Holtslag

✓ 气溶胶模块

✓ 沙尘模块

✓ 与不同区域海洋模式的耦合

✓ 开源模式, 其程序和资料可以在

<http://gforge.ictp.it/gf/project/regcm>和

<http://users.ictp.it/RegCNET/globedat.html>上下载, 在Linux或
Unix平台下运行

内 容

4.1 地球系统模式

4.2 模式模拟与验证

4.3 气候变化归因

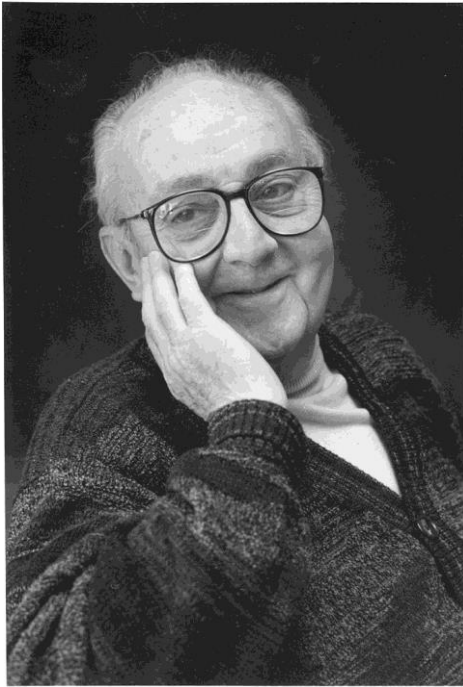
4.4 排放情景/社会经济情景

4.5 全球气候变化预估

4.6 中国气候变化预估



对地球系统模式的质疑



George Box: All models are wrong, but some are useful.

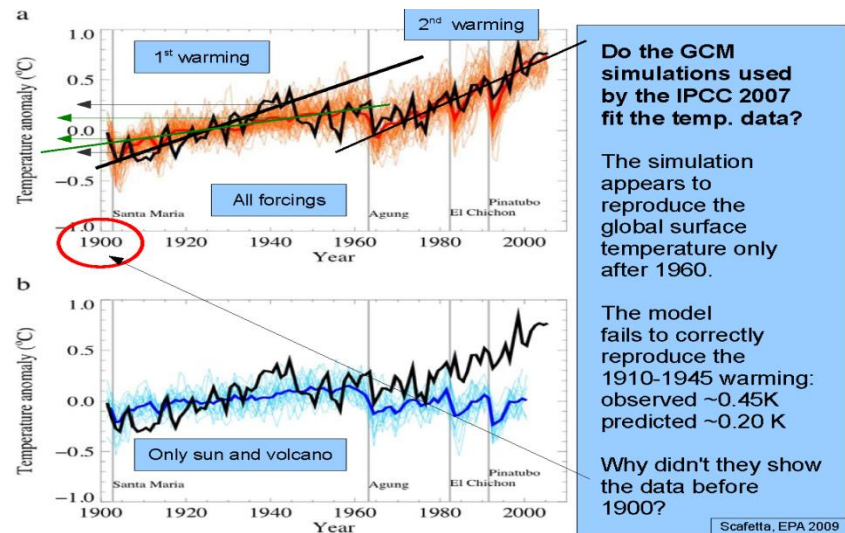
George Edward Pelham Box (1919-2013), one of the great statistical minds of the 20th century



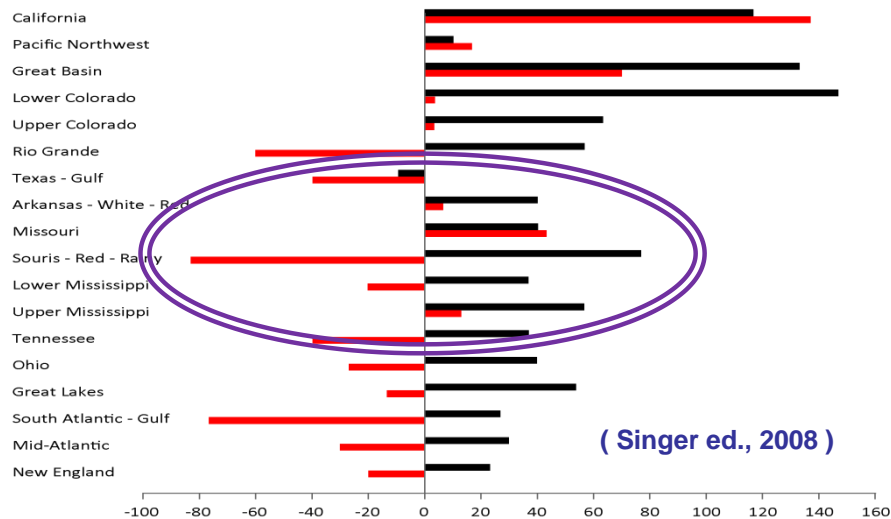
[法] 克洛德·阿莱格尔 (Claude Allegre) 著, 孙瑛 译, 李煜萍 校, 中国经济出版社, 2011



地球模式可靠吗？



Percent Change in Predicted Rainfall - 1990 to 2090 - Two Climate Models



- 没有考虑太阳亮度变化
- 没有准确模拟云的作用
- 不能模拟水蒸汽可能的负反馈
- 不能解释观测到的地球气候的许多特点
- 不能对区域气候变化作出可靠的预测
-
- **结论：**现在还不能依赖气候模式可靠地预测未来气候。

(Singer ed., 2009)

地球系统模式的不确定性

对气候系统中的物理、化学、生物过程科学认识的不足、空间分辨率、次网格过程参数化等，都会导致气候模式的不确定性。

- 云物理过程参数化的不确定因素
- 气溶胶-云-辐射的耦合过程描述的不确定性
- 生态系统对气候变化的响应与反馈过程描述的不确定因素
-

地球系统模式可靠吗？

- 气候模式是在天气预报模式的基础上发展起来的，而后者已有60年历史，目前已成为全世界1—2周天气预报的主要工具，有较高的准确率。
- 利用气候模式制作短期气候预测的能力不断提高。
- 气候模式主要依据外强迫信号和气候系统的耦合强迫（如海洋、陆面）信号以及温室气体含量的缓慢变化所造成的辐射强迫进行长时期的气候预测，因而具有更长的可预报性。
- 气候模式是现今科学界用于预测未来气候变化演变和影响的主要工具，是目前唯一能定量客观提供未来气候变化的手段。



■构建地球系统模式的基础是一套描述地球系统特征的物理定律和数学方程组，它们在物理学和数学或计算数学领域中是完全被证明和公认的。还具备较完备的全球观测资料，它可以使这套方程组计算的结果可与实际情况相比较的标准。

■模拟或复制现代气候的能力。通过与大气、海洋、冰冻圈和陆面观测资料的大量比较和评估表明，气候模式在模拟许多重要的平均气候特征与不同时间尺度分布型和变率两个方面都显示出显著的和不断改进的技巧和成功。

■能够重现或复制过去气候（古气候）和气候变化的特征。气候模式已用于模拟6000年前全新世中期温暖时期或21000年前末次冰盛期的古气候。他们能够模拟出诸如末次冰盛期海洋冷却数值和大范围分布的许多特征。

■模式也能够模拟仪器观测时期（1850年以后）气候变化的许多观测特征，如可以真实地模拟过去一百年的全球温度变化。还可以模拟出每一次火山爆发后造成的随后短期（1-2年）气候变冷（如1991年皮纳图博火山）。

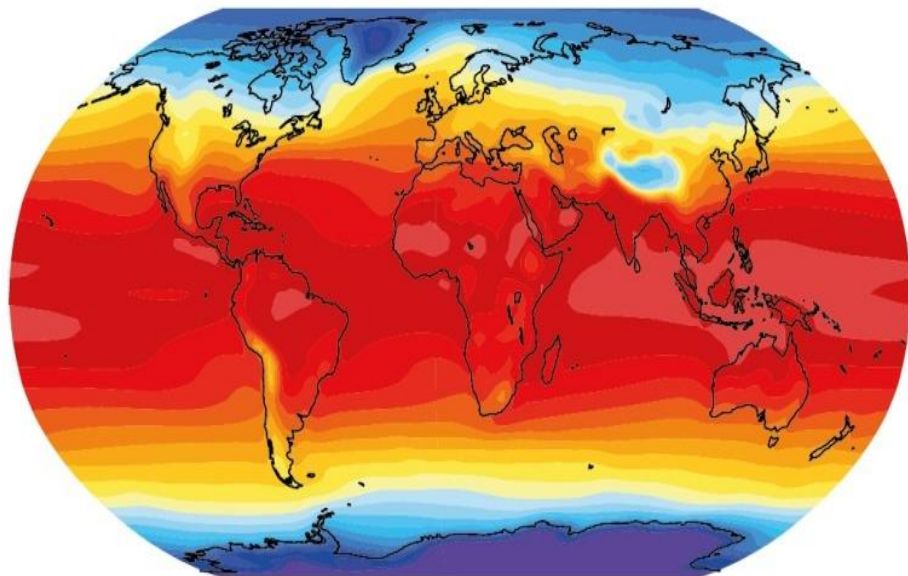
地球系统模式的评估方法

- 总体模拟结果的评估
- 过程分离
- 仪器模拟器
- 古气候研究
- 资料同化和初值技术的使用
- 集合评估技术
-

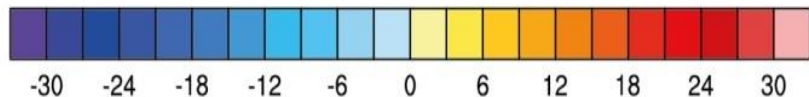


CMIP5 多模式平均模拟的2m气温（1980-2005平均）及其偏差

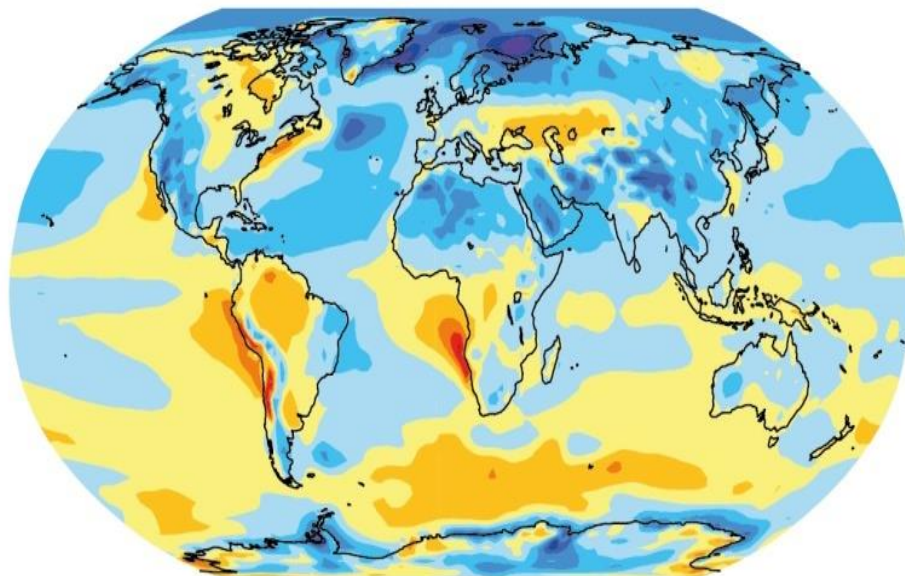
(a) Multi Model Mean Surface Temperature



(°C)



(b) Multi Model Mean Bias



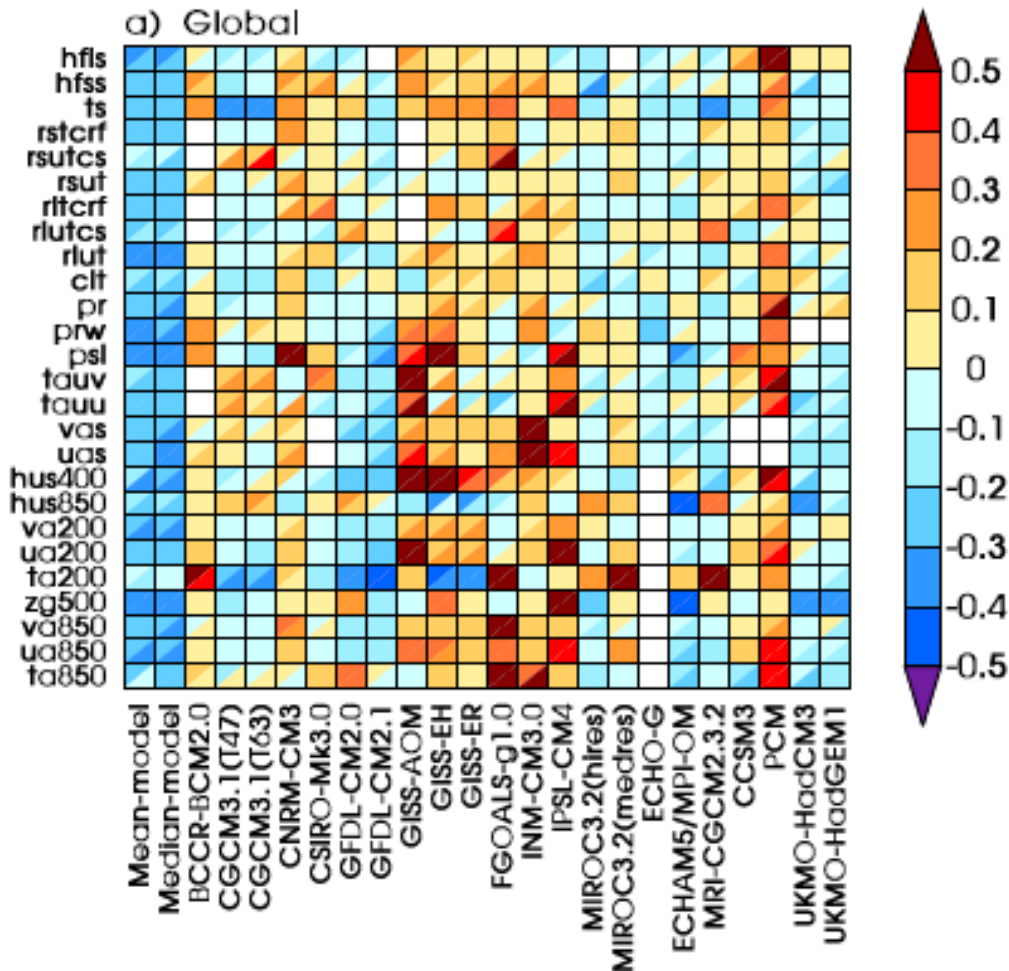
(°C)



CMIP5模式模拟的大尺度温度场具有高可信度

高纬、陡峭地形处偏差较大

Performance metrics



Use quantitative
statistical measures

Simplifies
synthesis and
visualization

Multi-model and
multi-variable

小结

- 自AR4以来，气候模式有明显改进。模式能够再现观测的大陆尺度地表温度分布和多年代际趋势，包括自20世纪中叶以来的快速增温和大规模火山爆发后立即出现的降温（很高信度）。
- 模式模拟地表温度的能力在区域尺度上的可信度要低。然而，对区域尺度地表温度的模拟能力好于AR4的模式（高信度）。
- 自AR4以来，对极端天气气候事件的评估取得了重要进展。模拟的20世纪后半叶极暖和极冷昼夜频次的全球平均趋势与观测基本一致。
- 自第四次评估报告以来，对大陆尺度降水分布的模拟得到一些改进。在区域尺度仍然不能很好地模拟降水，而且由于观测的不确定性使得评估工作仍然很难开展。

小结

- 当前模式能够更好地再现一些重要的气候现象。具有高信度的是，自AR4以来，MME对季风和厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）的模拟有所改进。
- 与AR4相比，气候模式目前包括更多的云和气溶胶过程以及它们的相互作用，但是模式中这些过程的表征和量化仍然是低信度。
- 具有确凿证据的是，与AR4相比，更多的模式能够再现1979年以来夏季北极海冰面积的下降趋势，大约四分之一的模式模拟的趋势与观测的趋势一样大或更大。尽管模式间结果的离散度很大，大多数模式模拟的南极海冰范围呈小幅下降的趋势，这与观测到的小幅增加的趋势相反。

小结

- 许多模式再现了1961年至2005年间观测到的海洋上层（0-700米）热含量的变化（高信度）。在大部分时段，多模式平均的时间序列都在现有观测的估计值范围内。
- 包括碳循环的气候模式(地球系统模式)能够模拟出全球海洋-大气二氧化碳通量分布，包括热带地区的排放和中、高纬度地区的吸收。其中的大多数模式模拟的20世纪后半期的全球陆地和海洋碳汇都在观测的估计值范围内。
- 水汽变化以及大气和地表增暖之间差异的共同影响所造成的净反馈极有可能为正，因此会放大气候的变化。云净辐射反馈可能为正。造成云反馈正负符号和大小不确定性的主要原因是变暖对低云影响的不确定性。

内 容

4.1 地球系统模式

4.2 模式模拟与验证

4.3 气候变化归因

4.4 排放情景/社会经济情景

4.5 全球气候变化预估

4.6 中国气候变化预估



1880年来全球地表温度排名前十最暖年份

Ranking (1 = warm most)	Year	Temperature anomaly relative to the 20th century average (°C)
1	2016	0.99
2	2020	0.98
3	2019	0.95
4	2015	0.93
5	2017	0.84
6	2018	0.79
7	2014	0.74
8	2010	0.72
9 (tier)	2005	0.67
9 (tier)	2013	0.67

Since 1880, the temperature has increased by 0.08°C every ten years. Since 1981, the temperature has increased by 0.18°C every decade. (From NOAA)

气候变化是指气候系统五个圈层的变化

气候系统**五个圈层**中的任何一个圈层的变化都应当视之为气候变化。

全球变暖不仅仅表现在器测数据显示的地表平均温度的上升，海洋热含量增加，冰川退缩、多年冻土活动层加厚、积雪和海冰范围缩小，生物多样性锐减等，都属气候变化的范畴。



检测与归因

检测（detection）：

指揭示气候或者被气候影响的系统在统计上是否已发生变化的过程，而不解释这种变化的原因。

归因（attribution）：

评估多重影响因素对这种变化的相对贡献的过程。

全球气候变化的原因

自然原因

人为原因

海洋

陆地

火山活动

太阳活动

自然变率

温室气体

气溶胶

土地利用

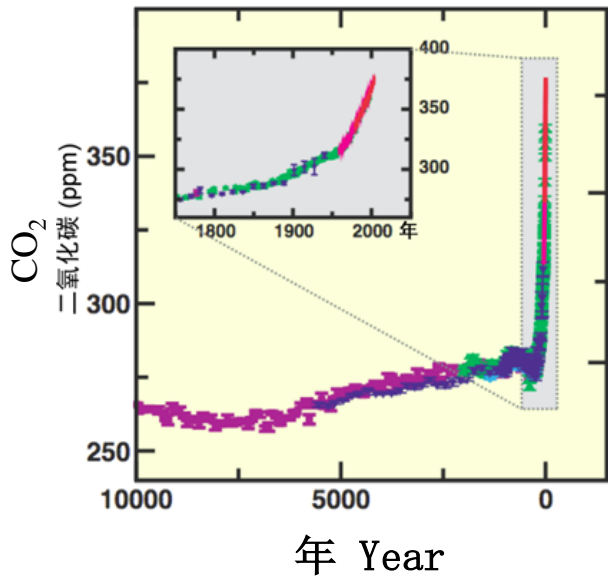
城市化

全球大气温室气体浓度变化vs地表温度变化

The change of global atmospheric greenhouse gas concentration VS the change of surface temperature

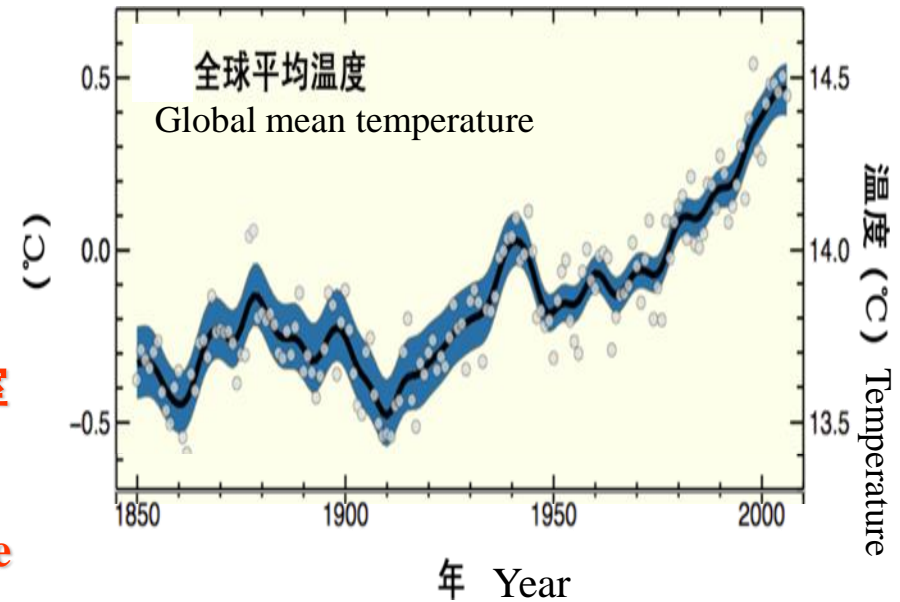
2014年二氧化碳约400ppm
CO₂ approximately 400ppm in 2014

从1880到2012年间全球平均地表温度升高0.85°C
From 1880 to 2012 global mean surface temperature has increased by 0.85°C



辐射强迫 (W/m²)
Radiative forcing (W/m²)

增强的温室效应
Enhanced Greenhouse Effect



统计关系vs因果关系？

Statistical relationship VS Cause-effect relationship?

“指纹”法

基于模式模拟的对不同分离外强迫因子的响应，考虑模拟的响应的不确定性以及气候系统内部变率的影响之后，通过统计分析方法计算出气候“信号”对外部强迫的响应系数（即“比例因子”）的最佳估计值及其不确定范围；



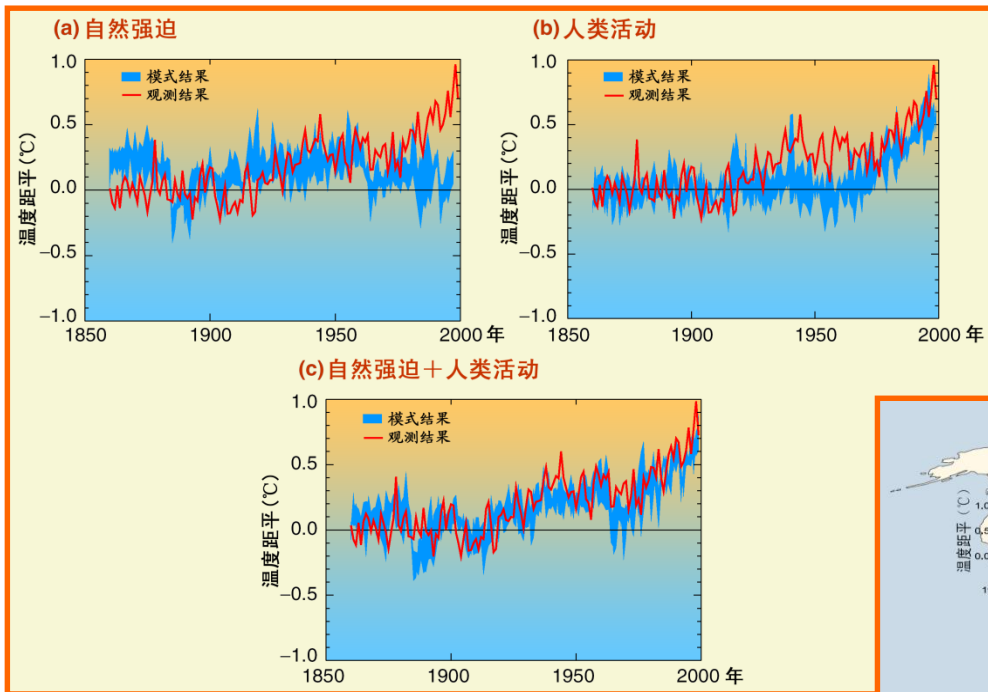
然后，对响应系数做推理检验，在一定置信度水平上确认气候变化的原因。



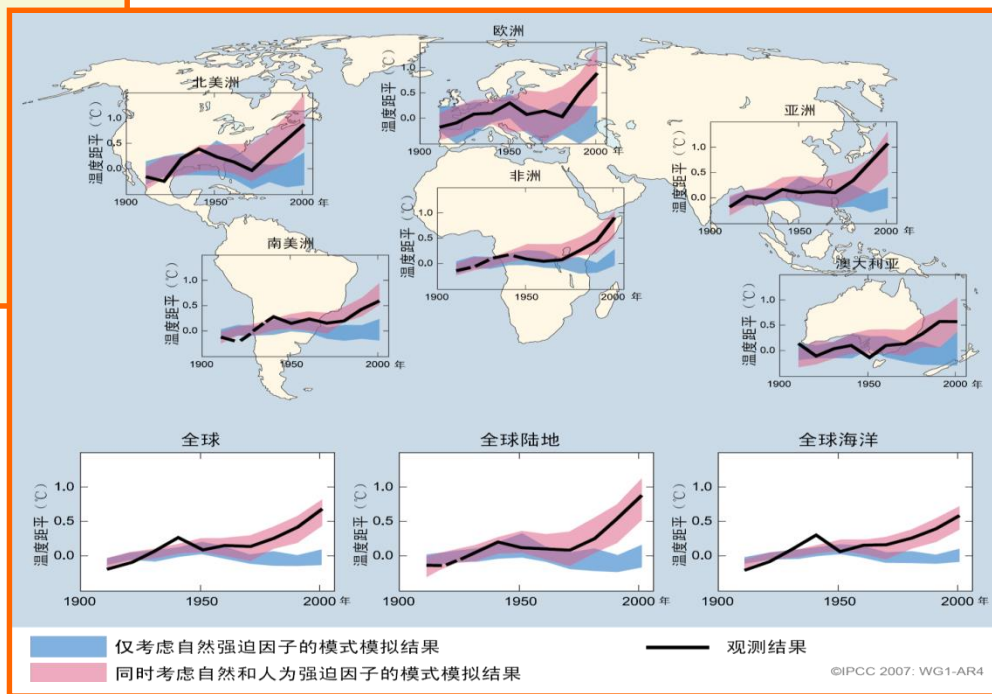
人类活动很可能是20世纪中叶以来气候变化的主要原因

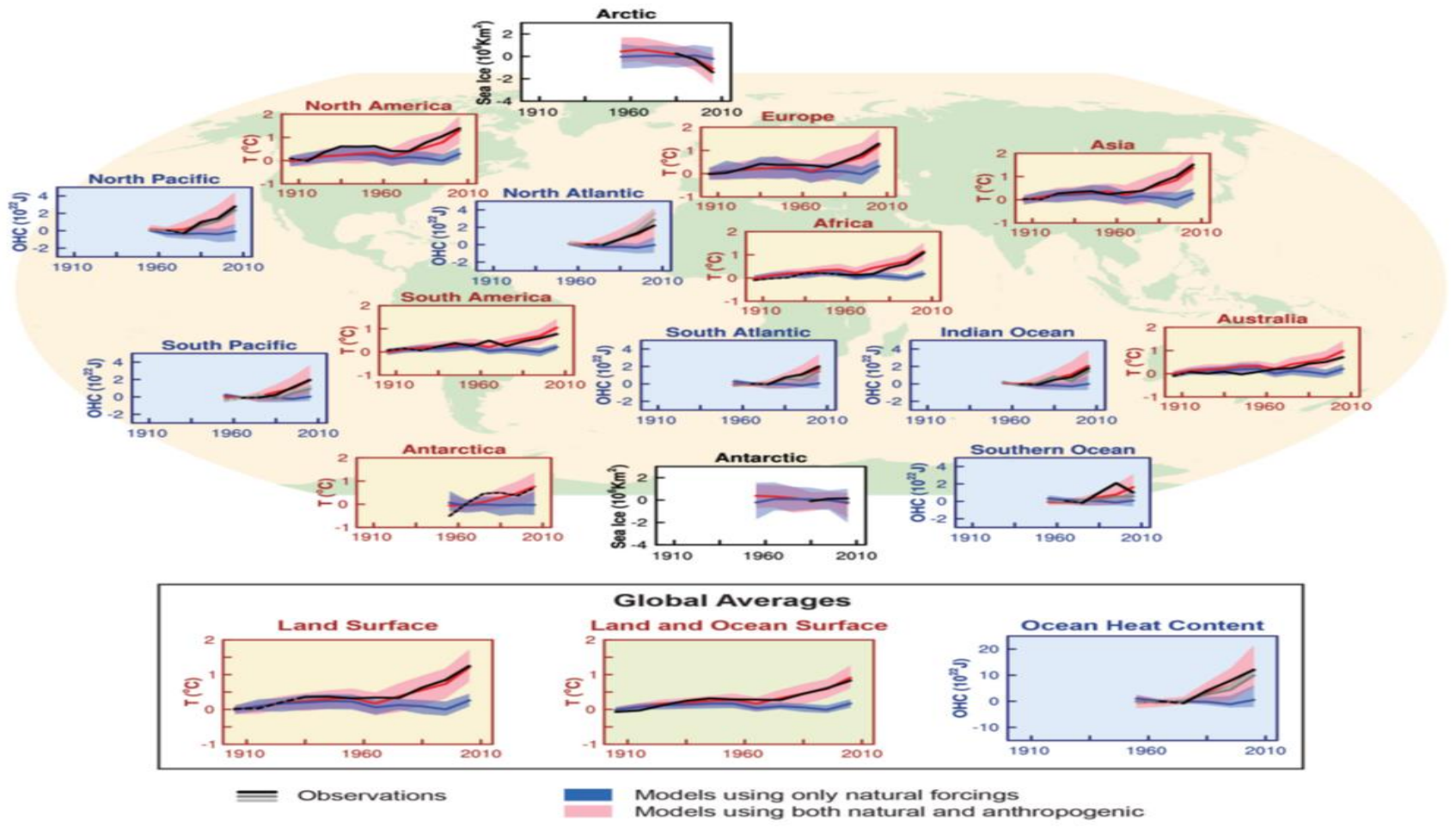
观测到的20世纪中叶以来大部分的全球平均温度的升高，很可能是由于观测到的人为温室气体浓度的增加所致。

IPCC 第四次评估报告 (2007)



IPCC 第三次评估报告 (2001)





观测和模拟的气候变化对比，基于大气、冰冻圈和海洋的三个大尺度指标时间序列，这三项指标分别为陆表气温（黄色填充背景）、北极和南极海冰（白色填充背景）、主要海域的海洋热吸收（蓝色填充背景）。同时，也给出了全球平均变化。所有时间序列都为年代平均，在该年代的中央有标记。在温度图中，如果检测区域的空间覆盖范围小于50%，则观测值用虚线表示。海洋热量和海冰图中实线表示数据覆盖范围较好，质量较高，而虚线表示数据覆盖仅为充足程度，不确定性较高。模式结果为CMIP5多模式均值和集合区间，阴影带表示5-95%的信度区间。¹³

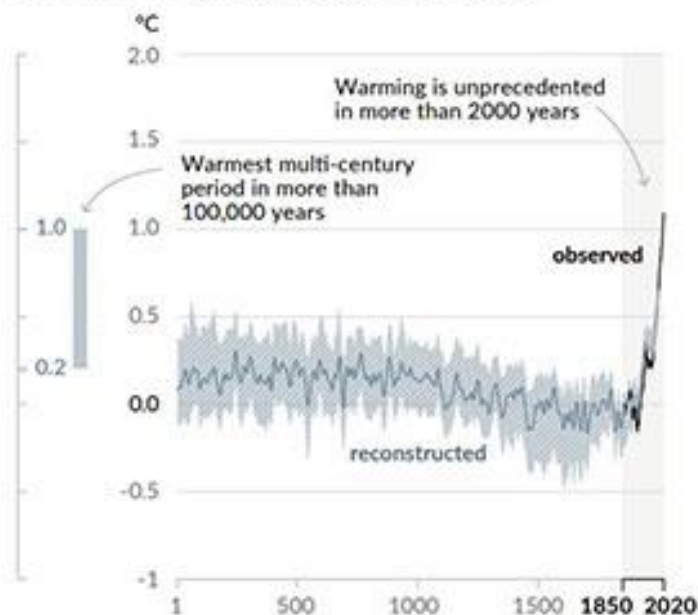
¹³ 对于表面温度，蓝色阴影带为基于17个仅使用自然强迫的气候模式的52次模拟，而红色阴影带为基于使用自然和人为强迫的44个气候模式的147次模拟。在海洋热量图中，分别使用了10个模式的10次模拟和13个模式的13次模拟。在海冰范围图中，考虑了一些模式的子集，这些模式模拟了观测到的1981-2005年海冰气候学的20%以内海冰范围的均值和季节循环（北极：红色和蓝色阴影都为11个模式的24次模拟，南极：红色和蓝色阴影都为6个模式的21次模拟）

It is unequivocal that human influence has induced the widespread and rapid climate warming

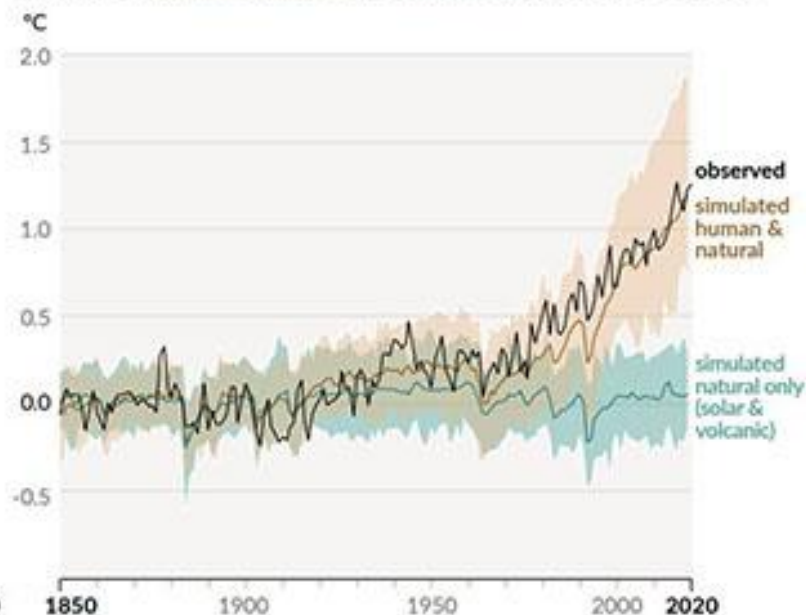
Human influence has warmed the climate at a rate that is unprecedented in at least the last 2000 years

Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)



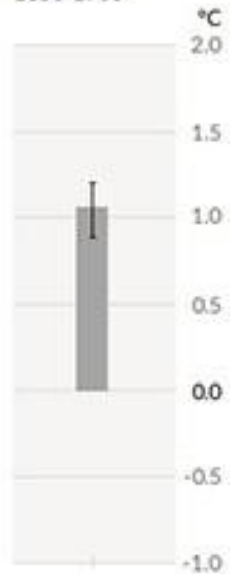
b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850-2020)



Compared with the average temperature before the industrial revolution (1850-1900), the average temperature of the earth has increased by 1.1°C , and the climate warming caused by human activities in the past 2000 years is unprecedented. The temperature change caused by the simulated natural variability (including solar activity and volcanic activity) is relatively stable and will not exceed 0.3°C , while the simulated human activity+natural variability is in good agreement with the observed average temperature change. This shows that the current global warming is mainly due to the emission of greenhouse gases caused by human activities burning fossil fuels and land use.

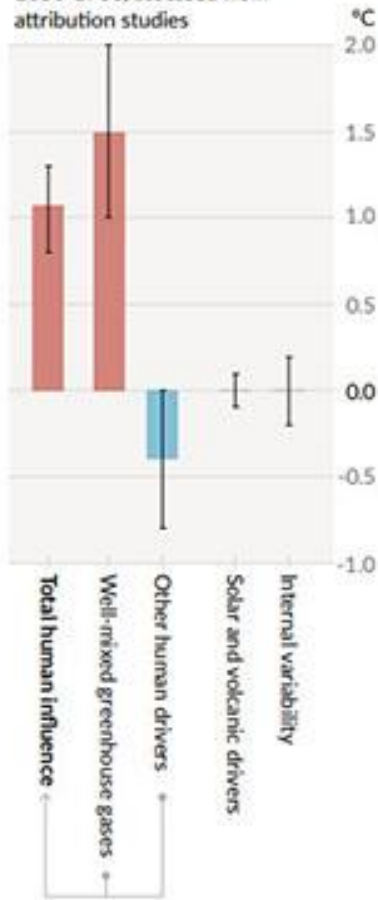
Observed warming

a) Observed warming 2010-2019 relative to 1850-1900

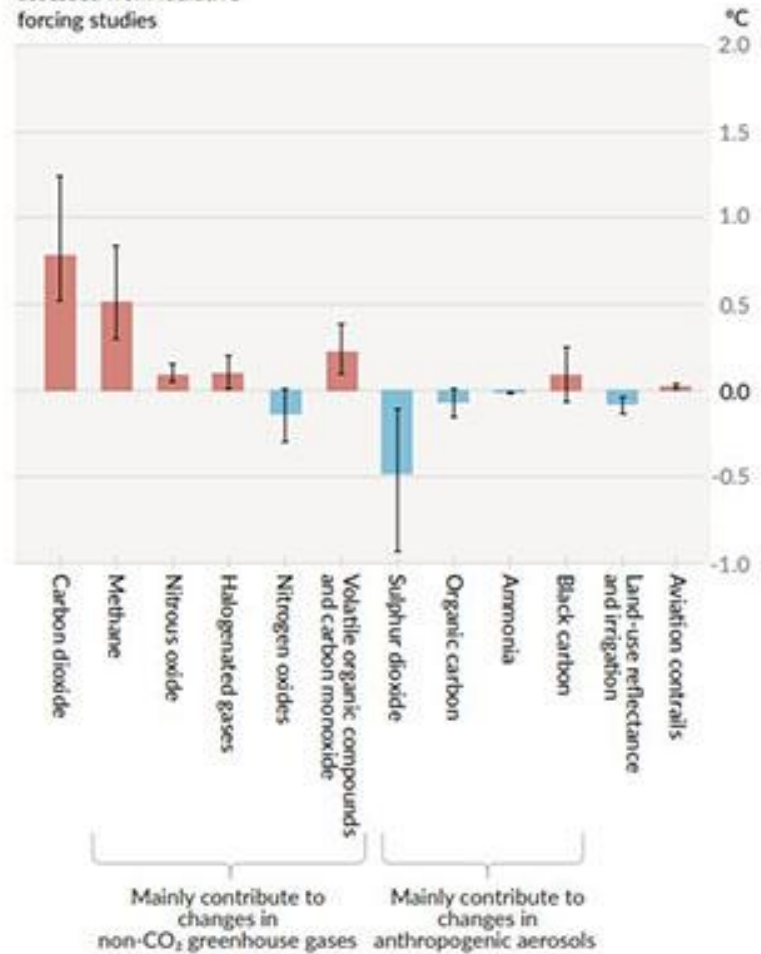


Contributions to warming based on two complementary approaches

b) Aggregated contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from attribution studies



c) Contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from radiative forcing studies



All kinds of mixed greenhouse gases will increase in temperature by 1.5°C, while aerosol gases will decrease in temperature by 0.4°C. The overall effect of solar activity and volcanic activity is not obvious. Greenhouse gases are mainly carbon dioxide, methane and nitrogen oxides, among which carbon dioxide will increase by 0.8°C, methane will increase by 0.5°C, and other gases will have limited temperature increase. Aerosol as a whole will reduce the warming effect of greenhouse gases, among which sulfide has a cooling effect of 0.5°C, which almost offsets the warming effect of methane, while black carbon has a weak warming effect.



- ✓ Human influence is very likely the main driver of the decrease in Arctic sea ice area between 1979–1988 and 2010–2019 (about 40% in September and about 10% in March).
- ✓ Human influence very likely contributed to the decrease in Northern Hemisphere spring snow cover since 1950. It is very likely that human influence has contributed to the observed surface melting of the Greenland Ice Sheet over the past two decades, but there is only limited evidence, with medium agreement, of human influence on the Antarctic Ice Sheet mass loss.

IPCC历次评估报告对人类活动引起的全球变暖可能性的结论不断增强

第一次评估报告确信，人类活动产生的各种排放正在使大气中的温室气体浓度显著增加，这将增强温室效应使地表升温。

第二次评估报告指出，当前出现的全球变暖“不太可能全部是自然界造成的”，人类活动已经对全球气候系统造成了“可以辨别”的影响。

第三次评估报告强调，近50年观测到的大部分增暖可能归因于人类活动造成的温室气体浓度上升（66%以上可能性）。

第四次评估报告明确指出，全球变暖是不争的事实，近半个世纪以来的气候变化“很可能”是人类活动所致（90%以上可能性）。

第五次评估报告进一步指示，观测到的1951–2010年全球地表平均温度的上升，有一半以上是由人为温室气体浓度增加和其他人类强迫共同导致的，这一结论是非常可能的（具有95%以上的可能性）。

第六次评估报告指出，人类活动导致气候变暖的结论是毋庸置疑的（unequivocal）。

内 容

4.1 地球系统模式

4.2 模式模拟与验证

4.3 气候变化归因

4.4 排放情景/社会经济情景

4.5 全球气候变化预估

4.6 中国气候变化预估



预估

- A climate projection is the **simulated response** of **the climate system** to a **scenario** of future emission or concentration of greenhouse gases (GHGs) and aerosols, generally derived using climate models. Climate projections are distinguished from climate predictions by their dependence on the emission/concentration/radiative forcing scenario used, which is in turn based on assumptions concerning, for example, future socio-economic and technological developments that may or may not be realized.
- A projection is a potential future evolution of a quantity or set of quantities, often computed with the aid of a model. Unlike predictions, projections are conditional on assumptions concerning, for example, future socio-economic and technological developments that may or may not be realized.



排放情景

- 最早使用的气候变化情景，包括气温和降水增量情景、CO₂倍增和渐进递增情景，仅考虑了温室气体浓度的简单变化。
- IPCC在1990年构建了SA90情景，作为气候模式的输入，其中社会经济情景中的人口和经济增长假设相同，只有能源消费不同。
- 1992年，IPCC发布了IS92系列情景，将排放情景划分为6种（IS92a~IS92f），IS92a情景下的辐射强迫与CO₂浓度以每年1%速度增加情景相当，社会经济情景中分别考虑了高、中、低三种不同的人口和经济增长及不同的排放预测，考虑了与能源、土地利用等相关的温室气体排放，CO₂排放曲线能够较合理地反映当时各研究机构得出排放趋势。



- **1996年，为了有效地更新和替代IS92系列情景，IPCC开始制订新的排放情景，即《IPCC排放情景特别报告》公布的SRES情景，设计了4类不同的社会经济情景（未来全球发展框架），即A1、A2、B1、B2情景族。**

A1情景族描述了经济高速发展，全球人口在21世纪中达到峰值，高排放情景的世界，并细化为3组来描述了能源系统中技术变化的不同方向，即化石燃料密集型（A1FI）、非化石燃料能源（A1T）以及各种能源之间的平衡（A1B）；

A2情景族描述了人口持续增长，人均经济增长和技术变化有明显地方性，全球化不明显的世界；

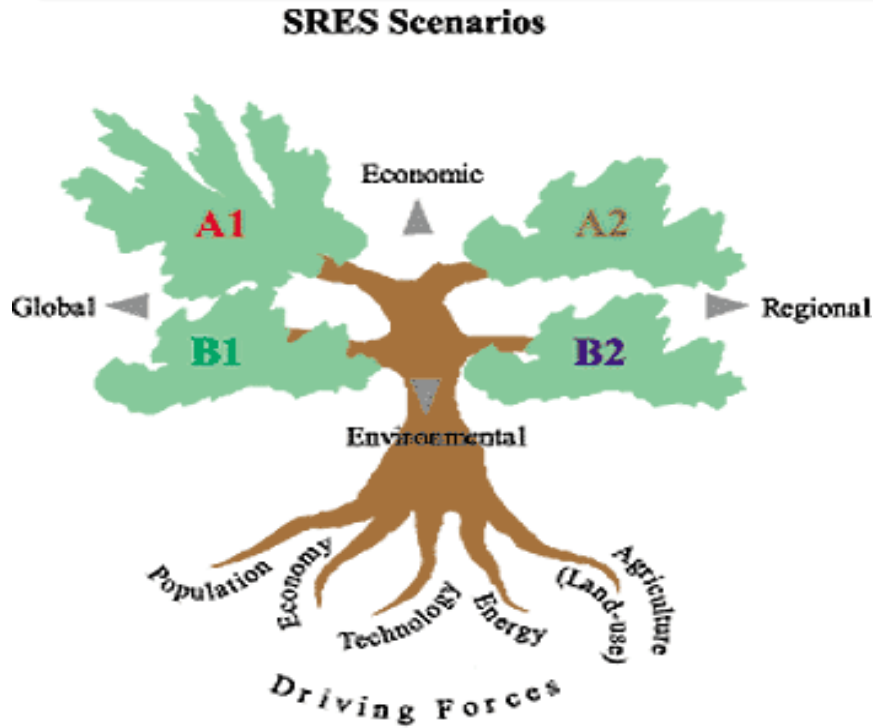
B1情景族描述了人口发展同A1，但经济结构向服务和信息业转变，强调从全球角度解决经济、社会和环境可持续性问题的低排放情景的世界；

B2情景族描述了人口增长低于A2，经济中等发展，技术更多样化，侧重于从局地解决经济、社会和环境可持续性问题的世界。

- 依据4类情景族，SRES 确定了40种不同的排放情景，并为A1B、A1FI、A1T、A2、B1和B2这6组情景分别选择了一种解释性情景。2001年的第三次评估报告和2007年的第四次评估均使用了SRES情景。
- SRES情景反映了人口、经济增长和能源结构对排放的影响，但并不能完全反映气候公约中稳定大气温室气体浓度的目标，也不能反映人为减排等因素的影响，IPCC 在2007 年发布了温室气体稳定浓度。

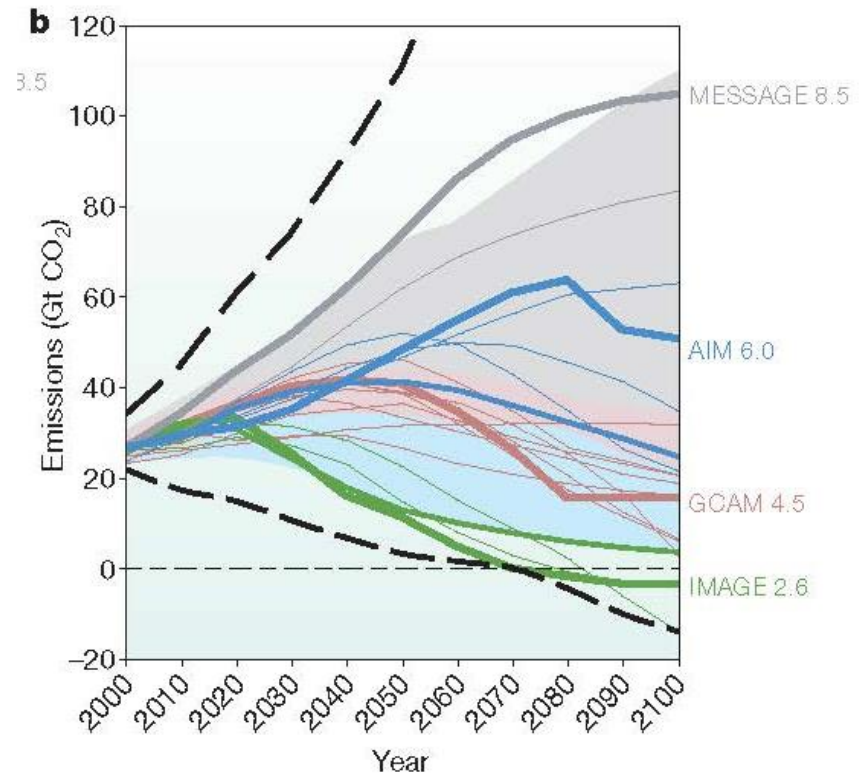
气候变化情景 (温室气体排放情景)

- SRES 1996—



4类未来全球发展框架，40种排放情景，为A1B、A1FI、A1T、A2、B1和B2这6组解释性情景。

- RCPs 2007—



用单位面积的辐射强迫表示未来100年温室气体稳定浓度，其强度范围分别为RCP8.5、RCP6、RCP4.5和RCP3-PD

典型浓度路径 (RCPs)

- 由于达到稳定浓度情景的途径有很多，IPCC在新情景的研究中使用了典型浓度路径 (RCPs)，即用单位面积的辐射强迫表示未来100年温室气体稳定浓度的新情景
- 其强度范围分为RCP8.5、RCP6、RCP4.5和RCP3-PD，其中，RCP4.5是中短期（2030年）适应气候变化的新情景，RCP3-PD是短期适应气候变化的低排放情景

典型浓度路径(RCPs)的特征

名称	路径形式	辐射强迫	CO ₂ 相当浓度
RCP8.5	持续上升	2100年的8.5 W/m ²	~1370 CO ₂ -eq
RCP6	没有超过目标水平达到稳定	2100年后稳定在6 W/m ²	~860 CO ₂ -eq
RCP4.5	没有超过目标水平达到稳定	2100年后稳定在4.5W/m ²	~650 CO ₂ -eq
RCP3-PD	先升后降，达到稳定	2100年的小于3 W/m ²	~490 CO ₂ -eq

气候变化情景中对社会经济发展情况的假设

阶段	社会经济假设	特点/变化
SA90情景及之前	所有社会经济情景的人口和经济增长 假设相同 ，只有能源消费不同	最早使用的全球情景，简单的温室气体浓度变化描述和假设
IS92系列情景	分别考虑 高、中、低的3种人口和经济增长 及不同的排放预测,代表未来世界不同的社会、经济和环境条件	考虑与能源、土地利用等相关的CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O和S排放，排放曲线能较合理地反映当时各研究机构得出的排放趋势
SRES情景	建立4种可能的社会经济发展框架 ，考虑人口、经济、技术、公平原则、环境等驱动因子；其中A1和A2强调经济发展，但在经济和社会发展程度上有所不同；B1和B2强调可持续发展，但在发展程度上存在不同	温室气体排放预测与社会经济发展相联系。出现 情景族 ，表示有着相似的人口统计、社会、经济、技术变化的情节的多个情景组合
RCPs/SSPs情景	基于RCPs定义SSPs ，体现辐射强迫和社会经济情景的结合，每一个SSP代表一类相似社会经济发展路径，包括人口、经济、技术、环境、政府管理等因素和指标；统一各个研究团体间对社会经济发展的不同假设	改变根据社会经济假设确定排放情景，输入模式，据预测结果进行综合评估的研究框架。SSPs包含了已有情景中的社会经济假设，可用于全球、区域和部门， SSPs矩阵 可以更好地进行脆弱性分析，满足气候变化适应与减缓研究的需求

五次IPCC评估报告情景的构建

IPCC报告	情景构建	达到CO ₂ 加倍时间
第一次	BEST继续照常排放	大约2030-2040年
第二次	IS92 (a,b,c,d,e) 每年增加1%	大约2070年
第三次	SRES (A1, A1FI, A2, A1B, B1, B2)	大约2070年~达不到
第四次	SRES (A1, A1FI, A2, A1B, B1, B2)	大约2070年~达不到
第五次	RCP (8.5, 6.0, 4.5, 2.6)	21世纪中后期~达不到

在六次IPCC评估报告中，依据不同社会经济情景的给出了达到CO₂加倍时间。

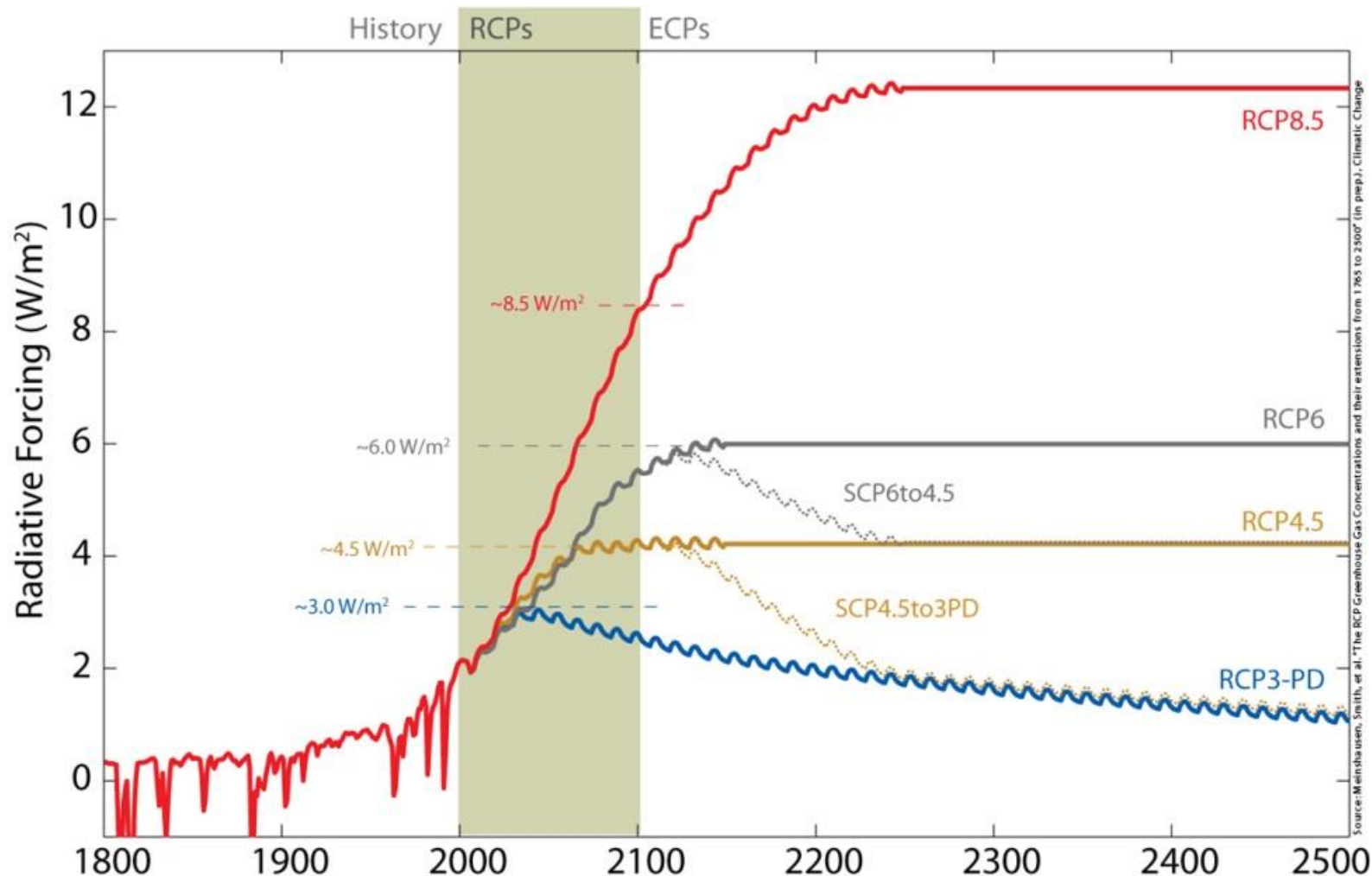


表 4.1 典型浓度目标 (van Vuuren et al. 2011b)

情景	描述
RCP8.5	辐射强迫上升至 8.5W/m^2 ，2100 年 CO_2 相当浓度达到约 1370ppm
RCP6.0	辐射强迫稳定在 6W/m^2 ，2100 年后 CO_2 相当浓度稳定在约 850ppm
RCP4.5	辐射强迫稳定在 4.5W/m^2 ，2100 年后 CO_2 相当浓度稳定在约 650ppm
RCP2.6	辐射强迫在 2100 年之前达到峰值，到 2100 年下降到 2.6W/m^2 ， CO_2 相当浓度峰值约 490ppm

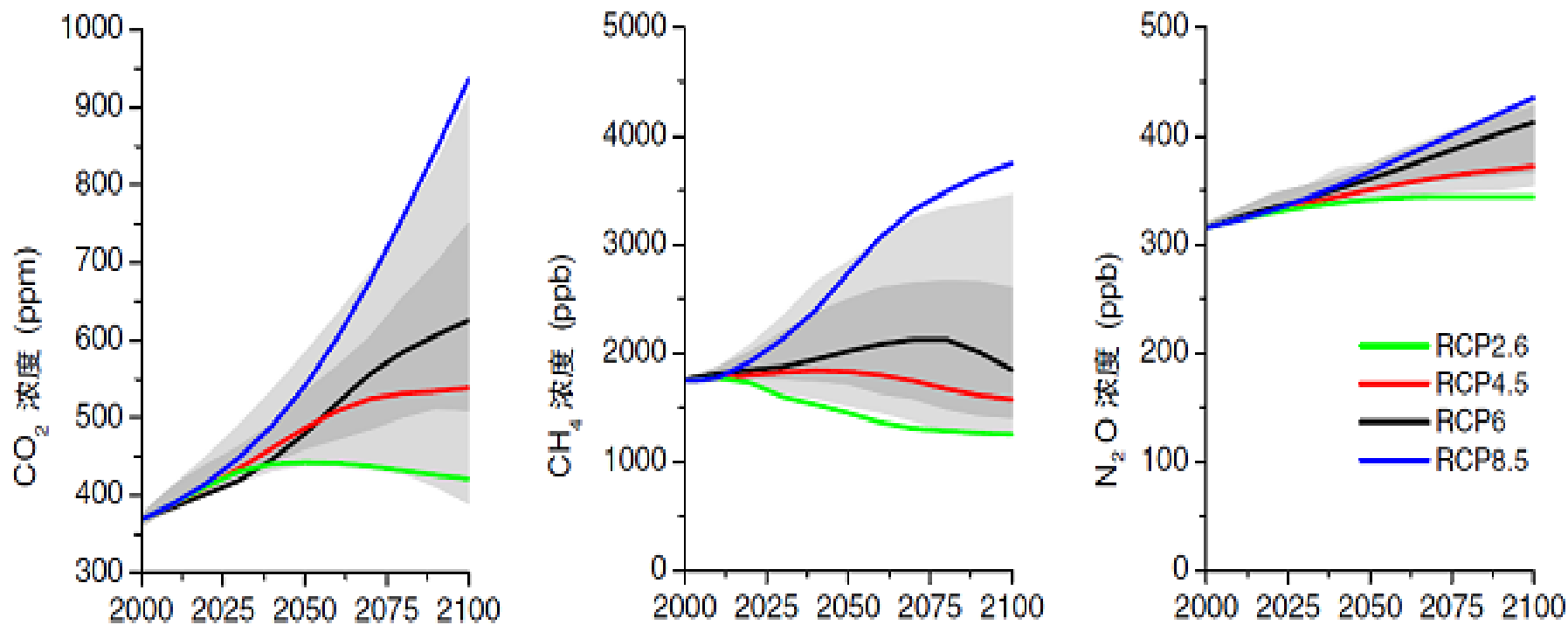


表 4.2 温室气体浓度观测值 (AD1765-2005) 及预估值 (AD2050-2300,RCP2.6/RCP8.5)
(Meinshausen et al. 2011c)

温室气体	1765	1800	1850	1900	1950	2000	2005	2050	2100	2150	2250	2300
CO ₂ (ppm)	278	283	285	296	311	369	379	443/541	421/936	399/1429	371/1962	361/1962
CH ₄ (ppb)	722	742	791	880	1147	1751	1754	1452/2740	1254/3751	1245/3648	1253/3481	1256/3481
N ₂ O(ppb)	273	274	275	280	289	316	319	342/367	344/435	342/490	340/527	340/527
HFCs(ppt)*	0	0	0	0	4	81	127	599/839	862/1402	874/1614	886/1702	888/1702
ODS(ppt)**	0	0	0	2	22	999	1004	567/652	267/229	147/94	53/20	34/20

* HFCs 中还包含 PFCs 及 SF6 (HFC-134a 相当浓度)

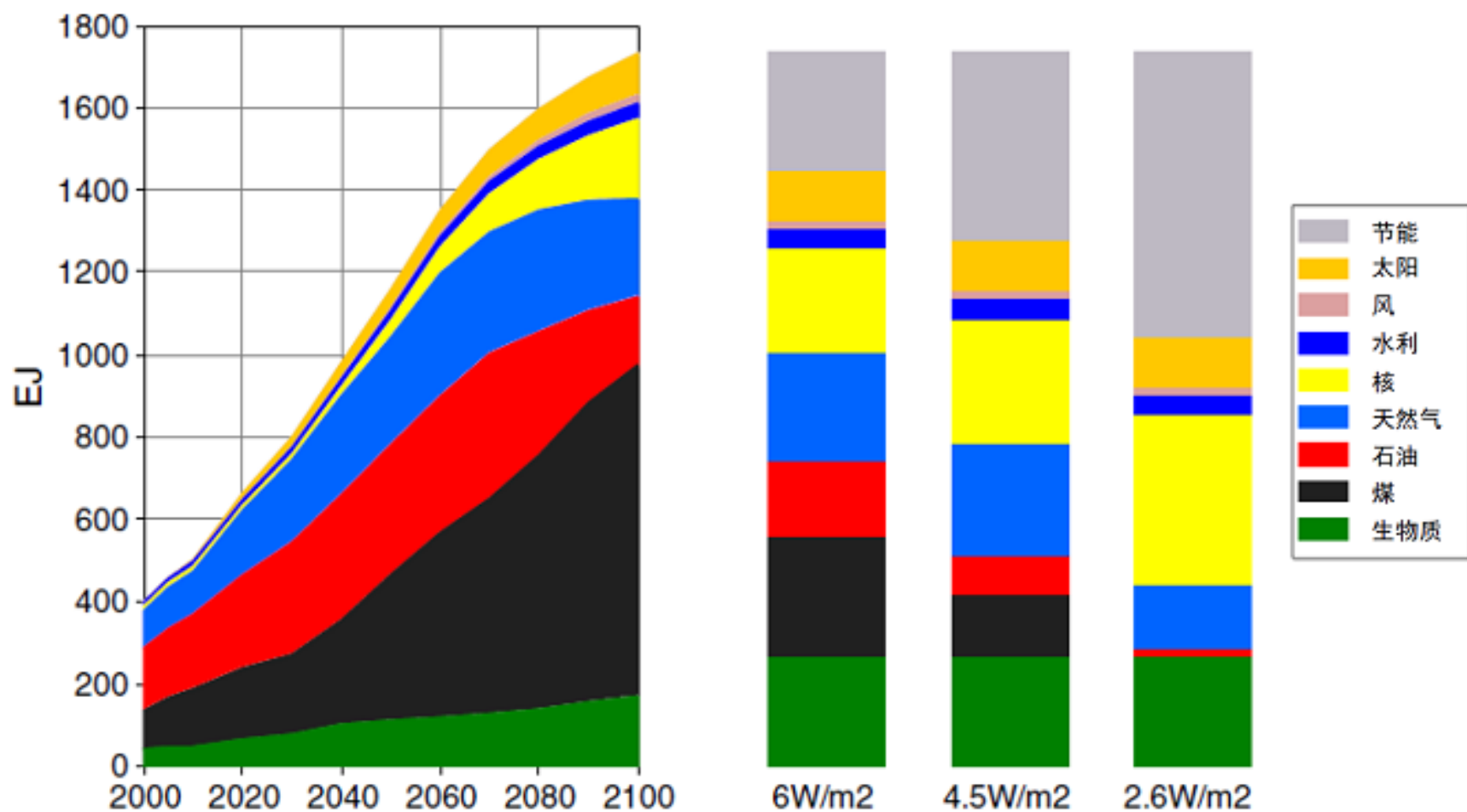


图 4.2 2000-2100 年 RCP8.5 方案的能源结构（左）及 RCP6.0、RCP4.5 及 RCP2.6 情景下 2100 年的能源结构（右）（EJ 即 10^{18} J）（van Vuuren et al. 2011b）

内 容

4.1 地球系统模式

4.2 模式模拟与验证

4.3 气候变化归因

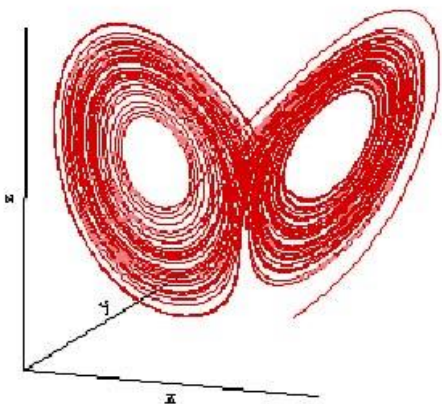
4.4 排放情景/社会经济情景

4.5 全球气候变化预估

4.6 中国气候变化预估



气候变化预估可靠吗？



Edward Norton Lorenz

1917 – 2008

主要贡献：

混沌理论，20世纪60年代，混沌之父



清华大学
Tsinghua University

可预报性问题

- ✓ 预警-预报-预测-预估
- ✓ Early warning-Forecast-Prediction-Projection
- ✓ 24小时-2周-18个月-年代际以上



预估

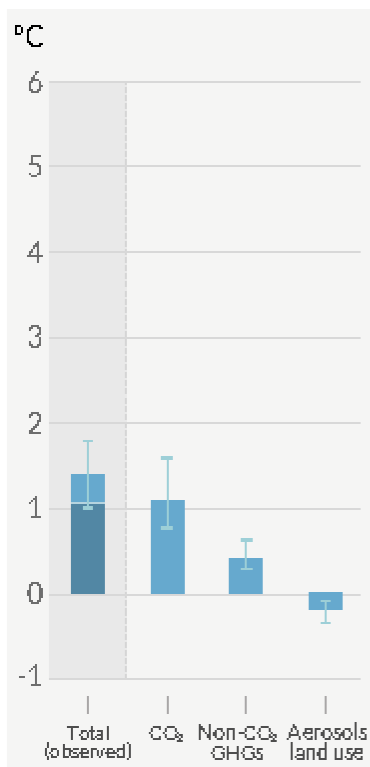
- A climate projection is the **simulated response** of **the climate system** to a **scenario** of future emission or concentration of greenhouse gases (GHGs) and aerosols, generally derived using climate models. Climate projections are distinguished from climate predictions by their dependence on the emission/concentration/radiative forcing scenario used, which is in turn based on assumptions concerning, for example, future socio-economic and technological developments that may or may not be realized.
- A projection is a potential future evolution of a quantity or set of quantities, often computed with the aid of a model. Unlike predictions, projections are conditional on assumptions concerning, for example, future socio-economic and technological developments that may or may not be realized.



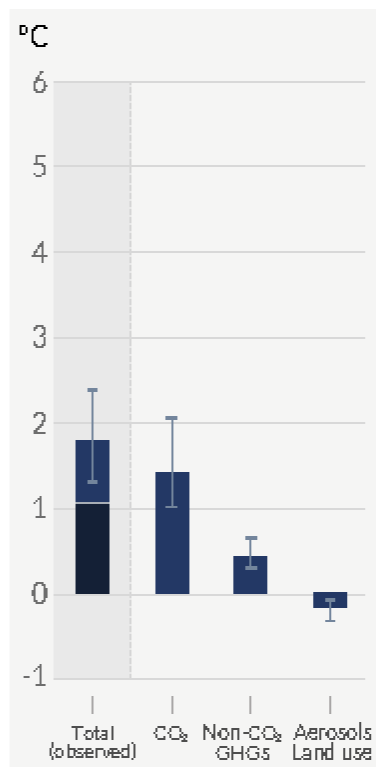
b) Contribution to global surface temperature increase from different emissions, with a dominant role of CO₂ emissions
b) Contribution to global surface temperature increase from different emissions, with a dominant role of CO₂ emissions

Change in global surface temperature in 2081-2100 relative to 1850-1900 (°C)

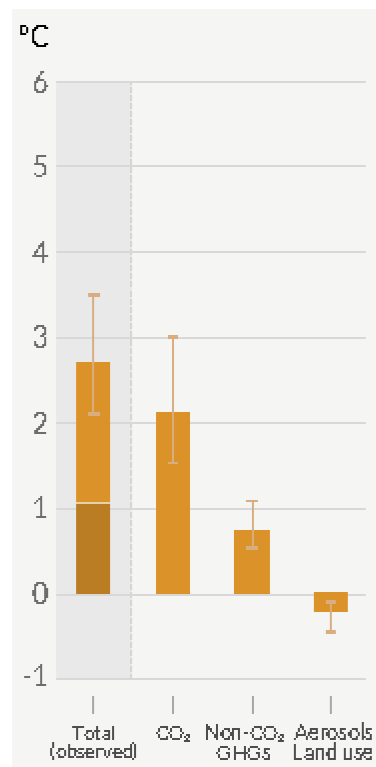
SSP1-1.9



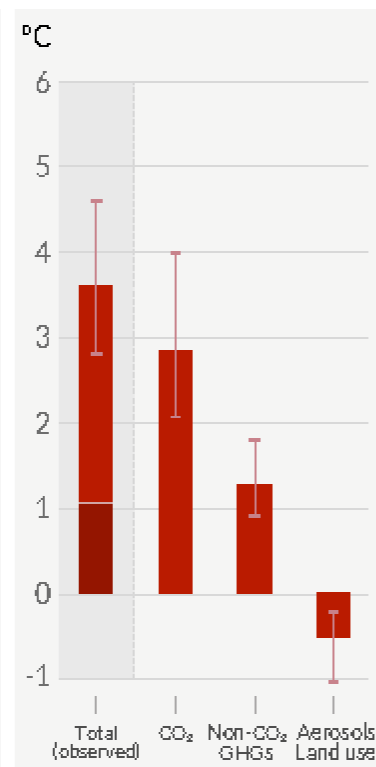
SSP1-2.6



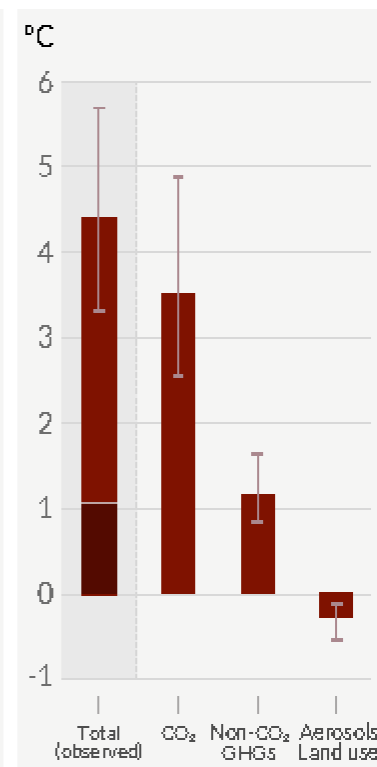
SSP2-4.5



SSP3-7.0



SSP5-8.5



Total warming (observed warming to date in darker shade), warming from CO₂, warming from non-CO₂ GHGs and cooling from changes in aerosols and land use

全球日降水增强，变率和极值增加



Multi-model annual mean long-term changes in daily precipitation statistics

(a) SSP1-2.6 dry days per year

31

(b) SSP1-2.6 daily precipitation intensity

31

(c) SSP2-4.5 dry days per year

29

(d) SSP2-4.5 daily precipitation intensity

29

(e) SSP5-8.5 dry days per year

31

(f) SSP5-8.5 daily precipitation intensity

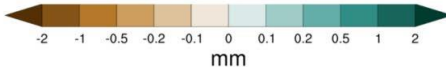
31

- 在大多数地区及所有排放情景下，水循环变率和极值的增加将高于平均变化。
- 在许多陆地地区，降雨天数减少，但日平均降水强度增加。
- 几乎所有地区的降水极值都将增加。

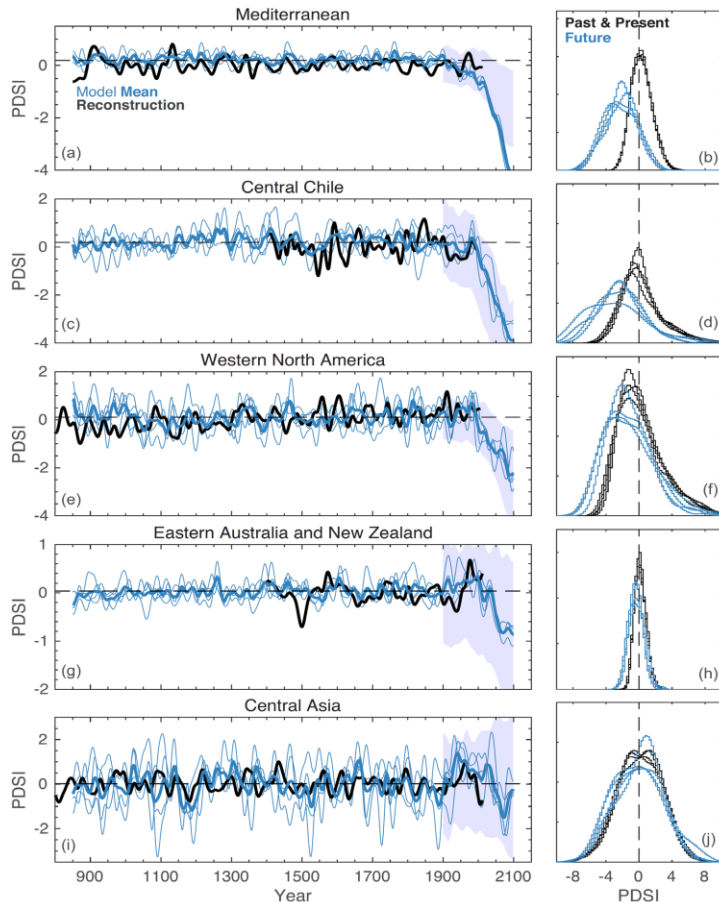


days

Color High model agreement ($\geq 80\%$)
Low model agreement ($< 80\%$)



mm



In some regions, drought is expected to increase under future warming



大气对水需求增加 → 增加蒸发量 → 干旱地区加剧干旱

- 地中海、北美西南部、南非、南美洲西南部和澳大利亚西南部土壤水分的减少（高置信度）。
- 遭受干旱频率增加和严重程度加剧的总陆地面积将会扩大（高置信度），在地中海、南美洲西南部和北美西部，未来的干旱将远远超过过去千年所见到的变化幅度（高置信度）。
- 一些热带地区预计也将经历更严重的干旱：亚马逊和中美洲（高置信度）。

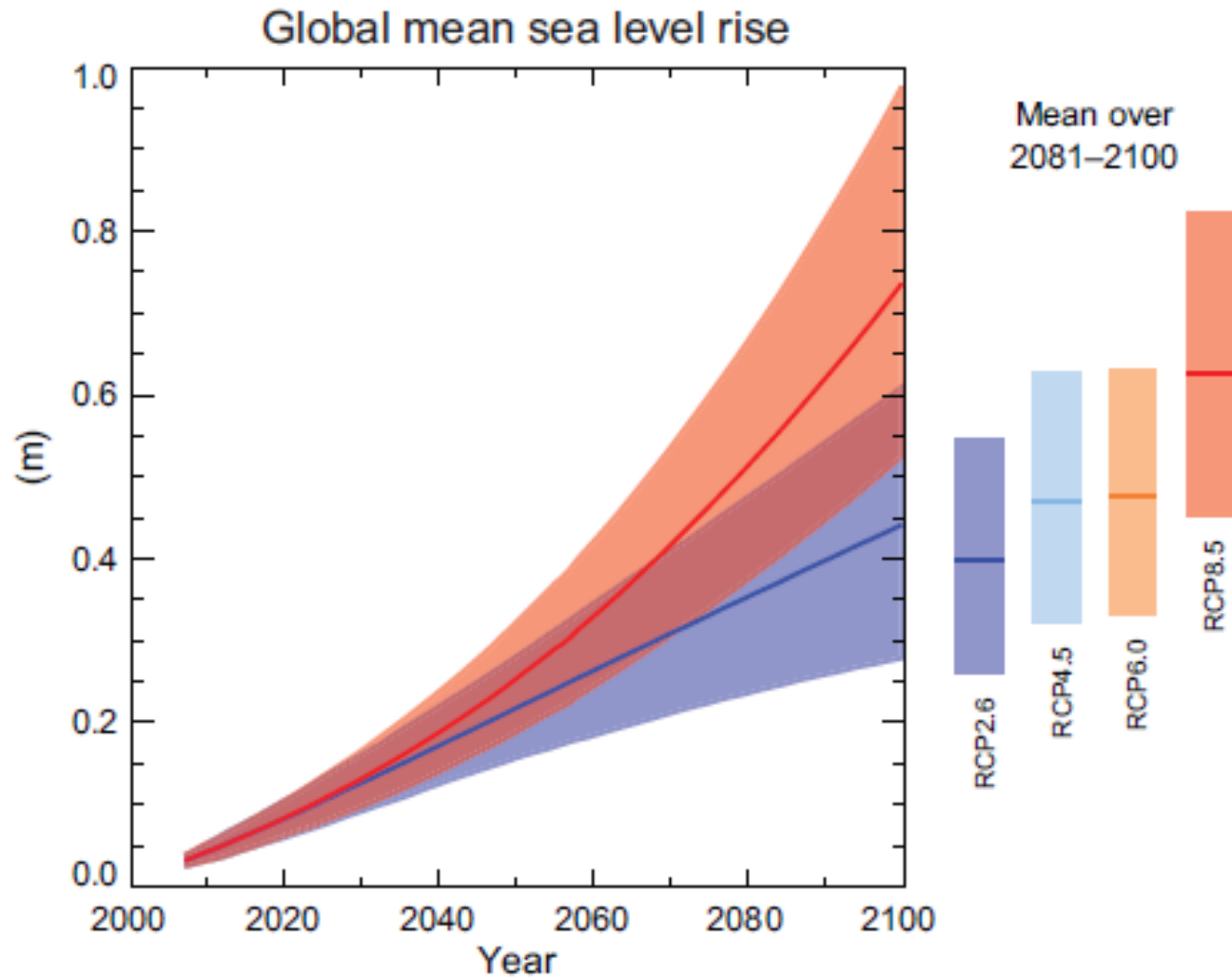


Figure SPM.9 | Projections of global mean sea level rise over the 21st century relative to 1986–2005 from the combination of the CMIP5 ensemble with process-based models, for RCP2.6 and RCP8.5. The assessed *likely* range is shown as a shaded band. The assessed *likely* ranges for the mean over the period 2081–2100 for all RCP scenarios are given as coloured vertical bars, with the corresponding median value given as a horizontal line. For further technical details see the Technical Summary Supplementary Material (Table 13.5, Figures 13.10 and 13.11; Figures TS.21 and TS.22)

海洋： 预计在所有RCP情景下全球海洋都将变暖。由于长时间从海表向深海传热，即使温室气体排放量减少或浓度保持不变，海洋变暖也将持续数个世纪。

冰冻圈： 很可能的是，21世纪随着全球气温的升高，北极海冰面积将继续缩小、变薄，北半球积雪将减少。几乎是可以肯定的是，北半球高纬度地区的近地表冻土面积将减少。预计在所有RCP情景下冰川体积都会减少。

海平面： 21世纪全球平均海平面将上升。自第四次评估报告以来，关于全球平均海平面上升的预测的信度有所提高，因为基于过程的模式与观测和物理认识的一致性有所提高，以及引入了冰盖快速的动态变化。

碳和其它： 在所有RCP情景下，2100年大气中二氧化碳浓度都比现在要高，这是21世纪累计排放到大气中的二氧化碳进一步增加的结果。部分由人类活动排放到大气中的二氧化碳将继续被海洋吸收。未来被地表吸收的二氧化碳取决于模式和情景。几乎确定的是，由此产生的海洋碳储存将加剧海洋的酸化。

《IPCC管理极端事件和灾害风险， 推进气候变化适应特别报告》主要结论

未来的变化

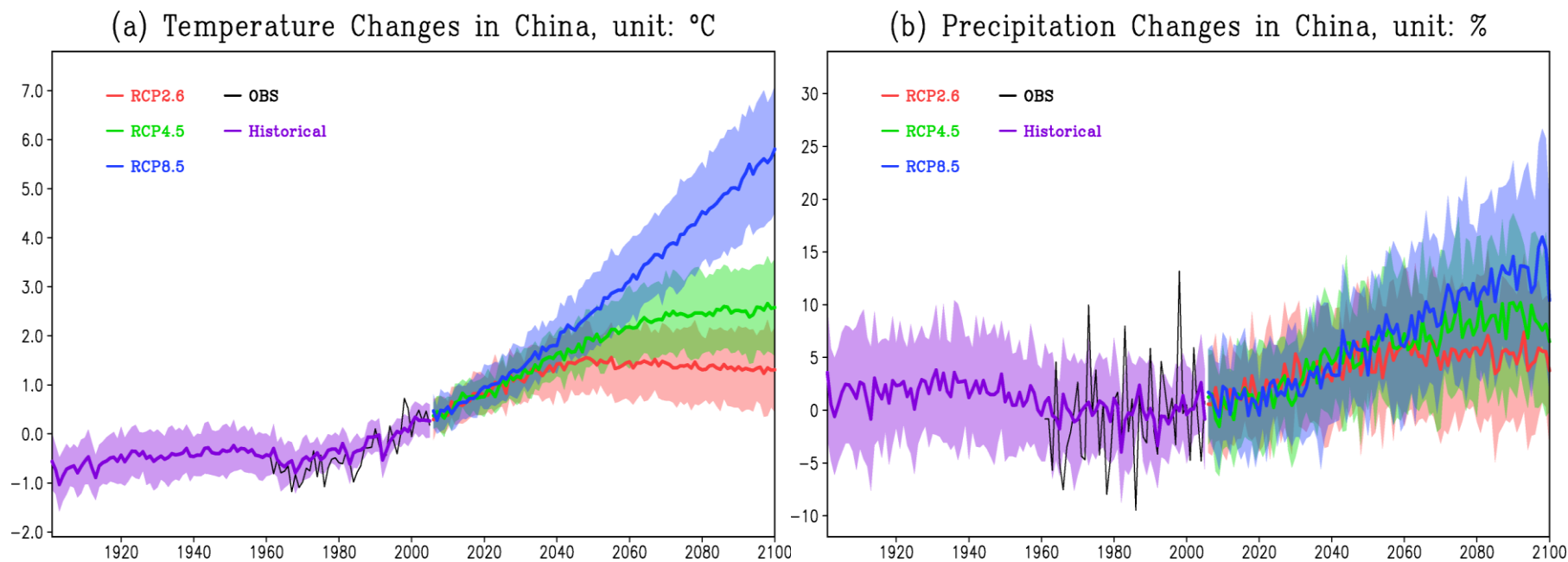
- 在全球尺度上，21世纪全球**极端高温事件**将增加，**极端低温事件**将减少（几乎确定）。而大多数陆地区域的**热浪持续时间、发生频率和强度**很可能增加。
- 21世纪许多地区的**强降水事件**发生频率可能增加。
- 21世纪**热带气旋**的最大平均**风速**将可能增加。热带气旋的**数量**可能减少或基本保持不变。
- 未来**极端事件**对**高影响行业**（如**水利、农业和粮食安全、林业、健康和旅游业**）将有更大的影响。
- **暴露度的增加**将导致热带气旋造成的**直接经济损失增加**（高信度）。

内 容

- 4.1 地球系统模式
- 4.2 模式模拟与验证
- 4.3 气候变化归因
- 4.4 排放情景/社会经济情景
- 4.5 全球气候变化预估
- 4.6 中国气候变化预估

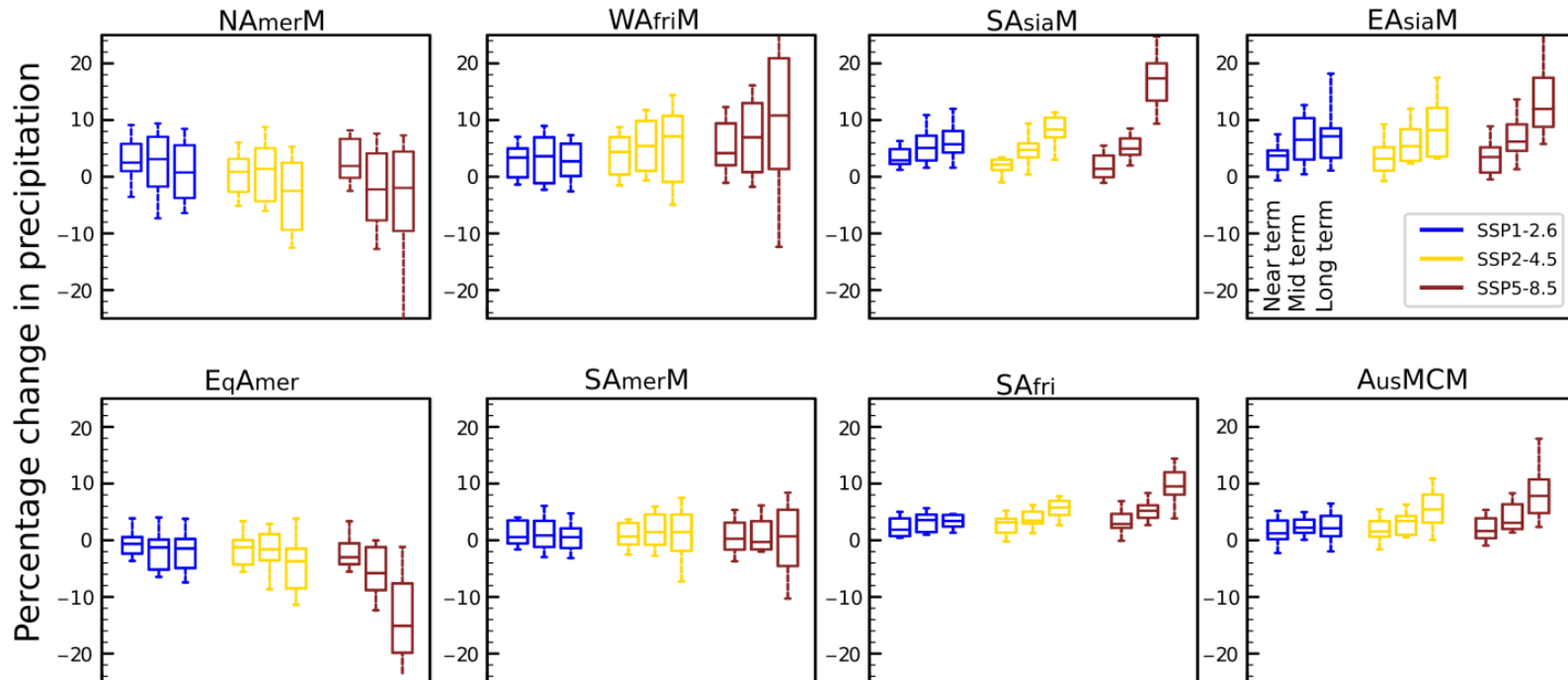


RCP2.6、4.5和8.5情景下21世纪中国地区温度、降水的年平均变化（相对于1986-2005年）



中国区域平均温度将持续上升，2030年前增温幅度、变化趋势差异较小，2030年以后不同RCP情景表现出不同的变化特征。RCP2.6情景下，2050年以前温度持续上升，2050年以后温度增加趋势不明显，表现出一定的下降趋势；RCP4.5情景下，2070年以前温度持续上升，2070年以后温度增加趋势变缓慢；RCP8.5情景下温度将持续上升，增温幅度在21世纪末达到5.0°C以上。

Projected future changes in precipitation over monsoon regions



based on 24 CMIP6 models and three SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5)

- 夏季季风降水预计在南亚、东南亚和东亚地区会增加，北美季风降水预计会减少。
- 南北美洲、萨赫勒地区的季风季节将会推迟。

21世纪末及以后的全球变暖主要取决于累积CO₂排放

1. 如果将1861—1880年以来的人为CO₂累积排放控制在1000 GtC（约合3670 GtCO₂），人类有>66%的可能性把2100年升温幅度控制在 2°C（相对1861—1880年）以内；
2. 如果把人为CO₂累积排放限额放宽到1570 GtC（约合5760 GtCO₂），那么只有>33%的可能性实现温控目标。
3. 在高排放情景下，人类可能无法实现“升温不超过2°C”的目标。
4. 到2011年，人类已经累积排放了515 [445~585] GtC（约合1890 [1630~2150] GtCO₂），未来留给人类的碳排放空间极其有限。因此，未来要实现“升温不超过2°C”的目标，需要全世界共同努力，大幅度减少温室气体排放。

思考题

- ✓ 气候模式的数值模拟结果为什么是有科学基础和可信的？
- ✓ 为什么要进行区域尺度的气候变化预估？
- ✓ 排放情景对气候变化预估的意义何在？





清华大学
Tsinghua University



谢谢关注!

