

地球系统科学研究方法

清华大学地球系统科学研究中心

宫鹏

2012年9月10日

发展地球系统科学提高我国对全球 环境变化的预测能力

美国伯克利加州大学
环境科学、政策与管理学系及地理学系教授
森林与环境资源监测评价中心主任
兼

南京大学国际地球系统科学研究所所长

宫 鹏

2002年12月26日

外来物种入侵对人类及环境安全的影响研究与防御性对策

美国伯克利加州大学
环境科学、政策与管理学系及地理学系教授
森林与环境资源监测评价中心主任

南京大学国际地球系统科学研究所所长
宫 鹏

2003年11月13日
北京、人民大会堂

1. 宇宙中地球和人类的发展

我们从哪里来?

银河系



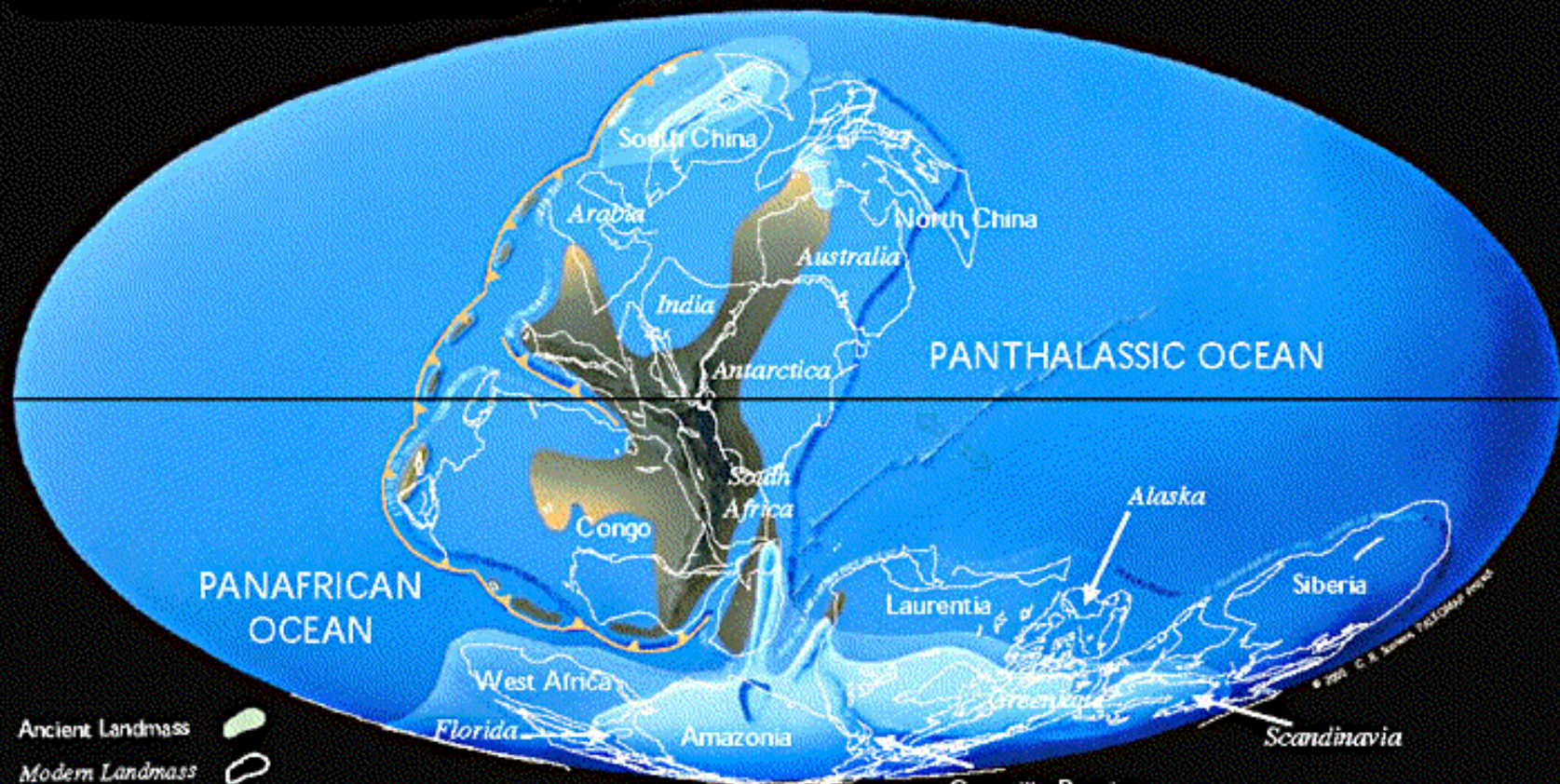
- 150亿年以前宇宙形成
- 宇宙中有1000亿个像银河系这样的星系
- 银河系中大约有2000亿颗恒星
- 太阳是银河系恒星中的一个成员
- 我们生活在太阳系中的地球上
- 地球在46亿年前形成，60亿年之后毁灭
- 地球就像浩瀚宇宙中的一粒尘埃，我们关注的全球变化过程只是漫漫时间长河中的一瞬间





1. 宇宙中地球和人类的发展

6 亿年来地球的演变

6亿5000万年前（前寒武纪）

Late Proterozoic 650Ma



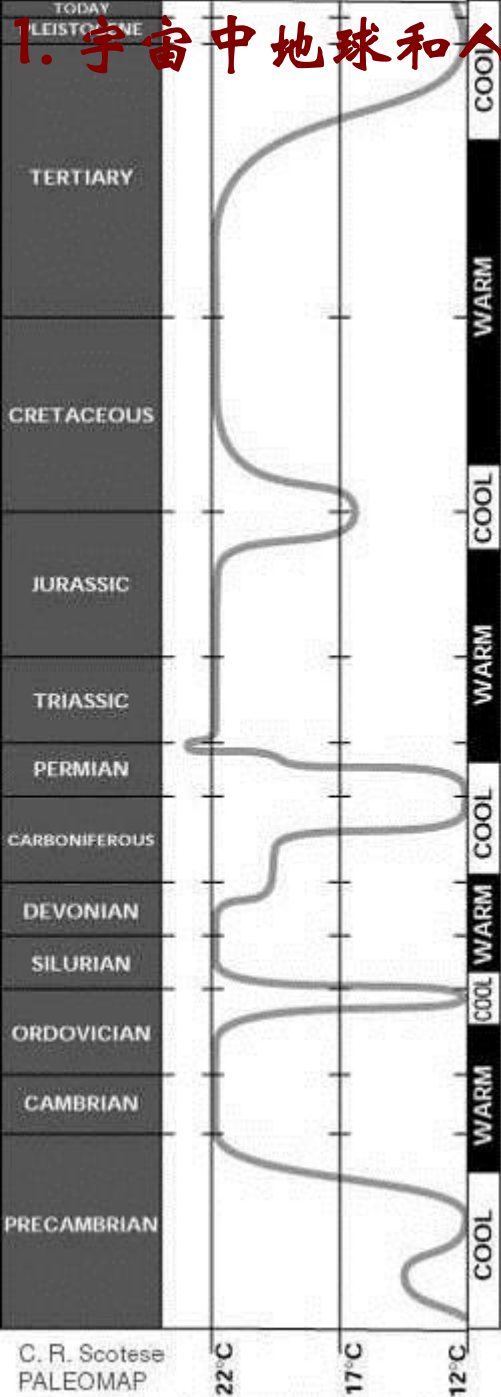
- Ancient Landmass 
- Modern Landmass 
- Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction) 
- Sea Floor Spreading Ridge 

© 1993 C. R. Scotese, TASC/Map Pro, Inc.

1. 宇宙中地球和人类的发展

地球历史上的平均气温

地质年代表



宙	代	纪	同位素年龄 (百万年)		生物进化阶段	
			距今年龄	持续时间	植物	动物
显生宙	新生代 (Kz)	第四纪 (Q)	2.5	2.5	被子植物	人类出现 哺乳动物
		第三纪 (R)	67	64.5		
	中生代 (Mz)	白垩纪 (K)	137	70	裸子植物	鸟类
		侏罗纪 (J)	195	58		
		三叠纪 (T)	230	35		
		二叠纪 (P)	285	55		
	古生代 (Pz)	石炭纪 (C)	350	65	蕨类植物	爬行动物
		泥盆纪 (D)	400	50	裸蕨植物	
		志留纪 (S)	440	40		两栖动物 鱼类
		奥陶纪 (O)	500	60		
		寒武纪	570	70	无脊椎动物	
		震旦纪 (Z)	2400	1830		
	隐生宙	元古代 (Pt)		4500	2100	菌藻类
		太古代 (Ar)				

1. 宇宙中地球和人类的发展

近百万年来人类一次次从非洲向其他大陆迁移



1. 宇宙中地球和人类的发展

五万年前人类足迹已经遍布五大洲



全球变化



- 全球变化指近百年由于人类活动引起的大气、海洋、生物、土壤与岩石圈内发生的变化
- 全球变化与宇宙、地球和人类的演变史和发展史相比只是漫漫历史长河的一瞬间
- ○ ○ ○



2、人类文明的兴衰

— 当前人类将走向何方？

2. 人类文明的兴衰

人类文明发祥地



2. 人类文明的兴衰

Plate 42. Angkor Wat, temples of the Khmer empire at a
A.D. 1400 in what is now Cambodia, due to poor water management
that reduced the empire's military ability to resist enemies.

柬埔寨Khmer王朝由于
水资源管理困难1400
年以后被毁灭的吴哥



墨西哥境内，公元1500年
以前被废弃的玛雅废墟

已经消失的人类文明
(Diamond, 2005)

- Anasazi 和 Cahoka 文明 (曾经在美国境内繁荣)
- 中美洲的Maya 文明
- 南美洲的Moche和Tiwanaku 文明
- 欧洲的Mycenean Greece (希腊)
- 欧洲的Minoan Crete (希腊)
- 欧洲格陵兰Norse文明
- 非洲的Great Zimbabwe文明
- 柬埔寨的Angkor Wat (Kampuchea) 文明
- 太平洋的Easter Island文明

2. 人类文明的兴衰

天绝的古文明-埃及文明

尼罗河畔的灿烂文明

以金字塔和人面狮身像为代表的埃及文明，于距今大约5000年前，公元前3000年前后诞生。埃及文明的历史，从美尼斯王（Menes）统一全埃及，开始了王朝时代初期，而后经过古王国时代、中王国时代、新王国时代到王朝时代末期，其间经历了3000年的反复兴衰更迭。

人们习称「埃及是尼罗河的恩赐」，事实上支撑埃及文明欣欣向荣的，是展开于尼罗河流域的农业。该地农耕发达的原因，是拜每年8~11月的尼罗河泛滥之赐——水涨时，尼罗河从上游带来肥沃的土壤，洪水退去后就留下适于耕作的土地。

其实，过猛的洪水会破坏水土，过小则使耕地萎缩，说不定因而引起饥荒。完全依靠「尼罗河之赐」的埃及文明，仿佛被尼罗河玩弄于指掌之间。



2. 人类文明的兴衰



灭绝的古文明-玛雅文明

在密林中繁荣的文明

玛雅文明在犹加敦半岛(Yucatan)和墨西哥南部附近的热带雨林中诞生、繁盛，最盛的时期称为「古典期」(公元250~900年)。以高大的神龛金字塔林立的地区为中心，与其四周的农村一起形成一个王国，这些好像城邦的王国散布各地。

玛雅文明的伟大成就就在于完成文字和历法的体系。马雅人以20进位法为基础编出几种历法，包括由20个文字和13个数字组成的260天周期历，以20天为1个月，由18个月加上5天而成的365天周期历，以及以公元前3114年8月13日为第一天来计算天数的历法等。

国王利用文字和历法，将即位、战争、祭典的纪录和王朝系谱诱于石碑或平板上，但公元909年以后不再出现，古典期的马雅文明从此消失。

2. 人类文明的兴衰

天绝的古文明-印加帝国

沿着安地斯山脉开展的大帝国

印加族人于公元1200年前后，在秘鲁南部标高3400公尺的山间盆地库斯科(Cuzco)建国。起初只是一小王国，1438年前后第九代国王帕恰克提即位之后，开始开疆拓土。到了16世纪初期，已成为沿着安地斯山脉横贯现在的厄瓜多、哥伦比亚国界到智利中部的大帝国。

「印加」一词本有「国王」之意，实际的国名「他王汀斯由」(四州之国)，因为印加帝国以首都库斯科为中心，将整个国土划分为4个行政区域。印加人没有文字也没有车辆，但遍及全境的道路网和驿站传递信使制度，可使所有的信息得以迅速穿梭于首都与地方之间。

库斯科、马丘庇丘(Machupicchu)等都市，均有以岩石构成的精巧建筑。这些建筑物不利用铁器，仅靠石器和人力造出。印加国王被称为「太阳之子」，握有动员大量人力的权力和财富。

印加帝国



2. 人类文明的兴衰

天绝的古文明-吴哥遗迹

在巨大蓄水设施支撑下的柬埔寨吴哥王朝

吴哥遗迹是指位于现在柬埔寨西北部暹拉州(Siem Reap)洞里湖(Tonle Sap)北岸一带(又称吴哥地方)的砖造遗迹群。其中包括吴哥窟、吴哥都城,以及在吴哥王朝(802~1431年)建造的石造寺院、祠堂、蓄水池、桥梁、宗教都城等62座主要遗迹。遗迹东西两侧并设有长边超过7公里的巨大蓄水池,遗迹的总面积有360平方公里左右。吴哥遗迹的特点是规模宏大、建筑宏伟和华丽观,是东南亚最大的文化遗产。

2. 人类文明的兴衰

影响古文明
持续发展的
5个主要因素

(Diamond, 2005)



2. 人类文明的兴衰

当前人类将走向何方？

- 古文明的消失发生于地球的局部
- 今天人类面临的却是全球性的问题

地球系统科学的由来

- 三种人生态度决定人类全球化不同进程
— 全球化及全球变化不可避免？
- 全球化的问题 — 贪婪导致的均一性危险
- 多样性的必要性
- 人类面临的全球变化挑战
- 地球系统科学出现的必然性
- 地球系统科学的内容、特点及发展趋势

生态主义与资本主义

Krebs,1968

经济体系内的四种资本

- 人力资本：劳力、智力、文化及其组织形式—人际关系
- 金融资本：资金、投资、与货币
- 设备资本：基础设施、厂房、机械和工具
- 绿色资本：资源、生命系统和生态系统

生态主义要求人类与自然和谐发展，是可持续发展的基础。

Table 2 Summary of average global value of annual ecosystem services

Biome	Area (ha × 10 ⁶)	Ecosystem services (\$ ha ⁻¹ yr ⁻¹)																	Total value per ha (\$ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Total global flow value (\$ yr ⁻¹ × 10 ⁹)
		1 Gas regulation	2 Climate regulation	3 Disturbance regulation	4 Water regulation	5 Water supply	6 Erosion control	7 Soil formation	8 Nutrient cycling	10 Pollination	11 Biological control	12 Habitat/ refugia	13 Food production	14 Raw materials	15 Genetic resources	16 Recreation	17 Cultural			
Marine	36,302																	577	20,949	
Open ocean	33,200	38						118		5		15	0			76	252	8,381		
Coastal	3,102			88				3,677		38	8	93	4		82	62	4,052	12,568		
Estuaries	180			567				21,100		78	131	521	25		381	29	22,832	4,110		
Seagrass/ algae beds	200							19,002					2				19,004	3,801		
Coral reefs	62			2,750					5	7	220	27		3,008	1	6,075	375			
Shelf	2,660							1,431		39		68	2		70	1,610	4,283			
Terrestrial	15,323																804	12,319		
Forest	4,855		141	2	2	3	96	10	361		2	43	138	16	66	2	969	4,706		
Tropical	1,900		223	5	6	8	245	10	922				32	315	41	112	2	2,007	3,813	
Temperate/boreal	2,955		88		0			10		4			50	25		36	2	302	894	
Grass/rangelands	3,898	7	0		3		29	1		25	23		67		0	2	232	906		
Wetlands	330	133		4,539	15	3,800					304	256	106		574	881	14,785	4,879		
Tidal marsh/ mangroves	165			1,839							169	466	162		658		9,990	1,648		
Swamps/ floodplains	165	265		7,240	30	7,600					439	47	49		491	1,761	19,580	3,231		
Lakes/rivers	200				5,145	2,117							41			230	8,498	1,700		
Desert	1,925																			
Tundra	743																			
Ice/rock	1,640																			
Cropland	1,400									14	24		54				92	128		
Urban	332																			
Total	51,625	1,341	684	1,779	1,115	1,692	576	53	17,075	117	417	124	1,386	721	79	815	3,015	33,268		

地球生态系统每年的生态服务价值是世界GDP的2-3倍
其中湿地生态价值是农业的100倍、林业的10倍

Costanza et al., 1997, Nature

Numbers in the body of the table are in \$ ha⁻¹ yr⁻¹. Row and column totals are in \$ yr⁻¹ × 10⁹, column totals are the sum of the per ha services in the table and the area of each biome, not the sum of the per ha services themselves. Shaded cells indicate services that do not occur or are known to be negligible. Open cells indicate lack of available information.

追求人与自然的和谐发展

- 恢复已破坏的生态环境
- 节约资源和能源、提高利用率
- 融生态科学和观念于科技和管理之中
- 实现人与自然的和谐发展需要全球的努力
- 正是中国传统文化所追求的
- 地球系统科学的兴起

地球系统科学诞生的背景

- 哲学背景
- 社会背景
- 科技背景



地球系统科学的社会背景

现在有足够的证据证实人类活动在过去100年对地球变化所起的作用超过了地质和气候力量，使全球变化加快

粮食增产

人口增加

资本扩张

科技加速发展

居住环境的改善

股市暴涨

森林、土质、淡水、空气、鱼类

过去50年 损失1/4表土，1/3森林

多样性减少

全球变暖、变干

水/空气污染

金融危机

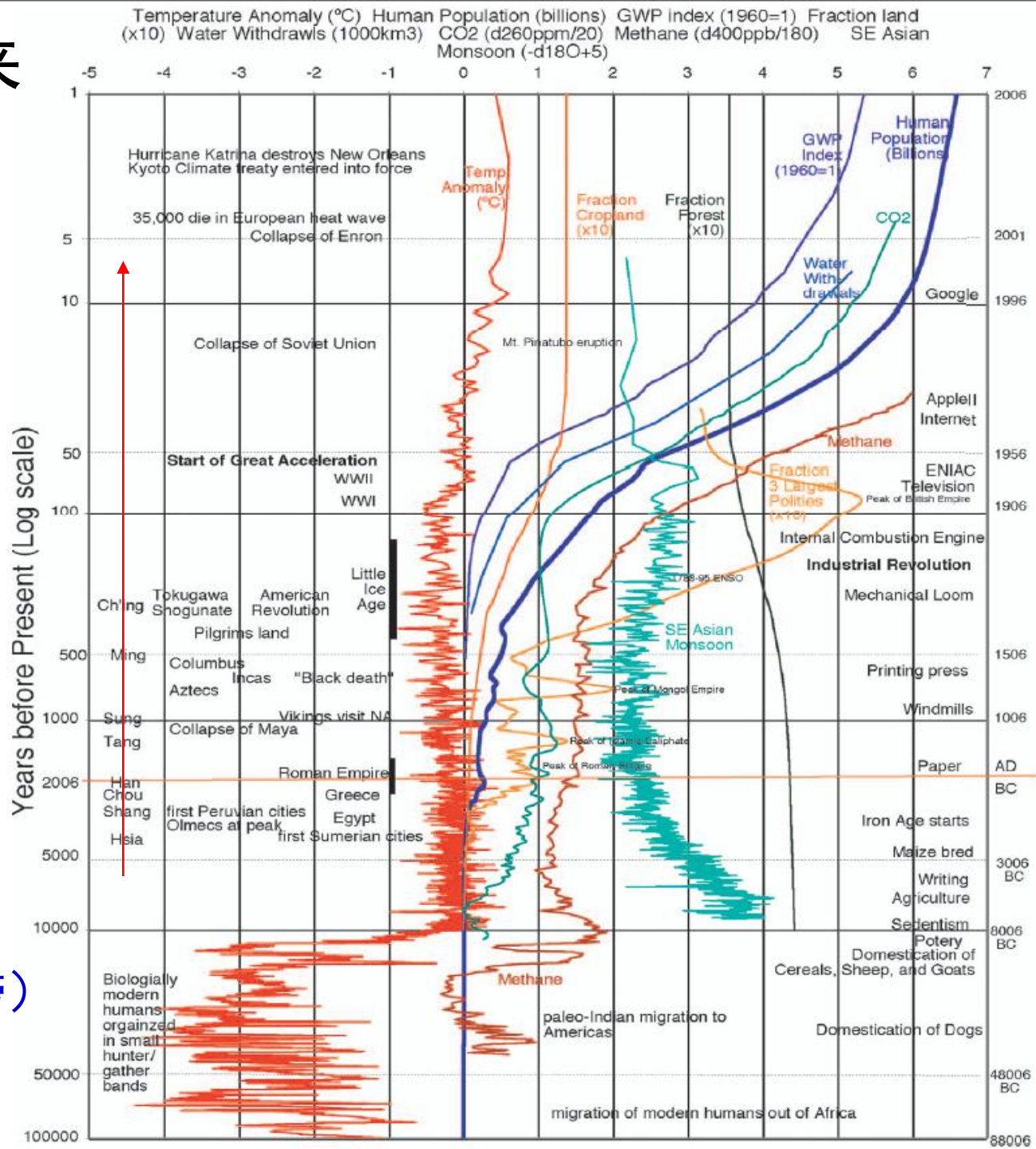
根本原因是资本主义的唯利是图。

过去十万年以来

- 人口总量
- 全球生产总值
- 土地类型比例
- 温度异常
- 用水量
- 大气CO2含量
- 大气CH4甲烷含量
- 东南亚季风

这些全球事件之间的因果关系不清楚

区域的社会文明与生态状况间（如旱涝）的关系也不清楚



多样性才可持续

- 物种在减少
- 土壤类型减少
- 语言
- 文化
- 在大洋脊的火山喷发后，2—3年就出现生命，而只有类型达到一定的数目时，才可持续
- 多样性不仅是自然界生物发展的基本现象，也是社会发展、文化长存的基本法则

军事行动—大型经济实体—大型工程项目—

—应用型技术开发—科学研究—教育—文化

统一意识与多样性 — 管理与科学

科学与教育和工程与军事项目不一样，是不能按照统一意志来指挥和调度的。教授自主研究非常重要

地球系统科学是现代科技发展的必然产物

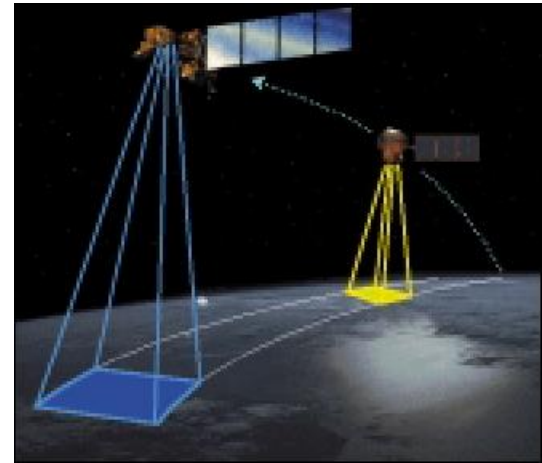
传统地学

学科分化
步行考察
定性描述为主

现代地球科学

综合与交叉
遥感和定点仪器观测
更多的定量模拟

新的科技进步为地球系统科学的发展创造了条件，
提供了可能





地球系统科学是地球科学与生物科学和社会科学等交叉的结果

中心问题

- 地球是如何演变的？
- 这种演变会给地球生命带来什么后果？

地球系统科学的目的

预测地球系统，尤其是地球气候系统，的未来变化，以及化学和生物组成的演化。

使评价未来可能的变化更加科学。

解决的首要问题就是全球变化的问题

全球变化问题

人类活动及全球化

- 跨国企业
- 贸易
- 移民和旅游
- 网络化
- 信息化

自然因素

- 太阳辐射
- 地质作用

环境变化

- 大气组成
- 气候
- 土地利用
- 生物入侵
- 疾病流行

直接影响 (需要解决的问题)

- 碳平衡
- 水量和水质
- 粮食安全
- 公共健康

全球变化的人为驱动力与后果

驱动力

- 人口
- 收入—GDP
- 社会、政治、文化和宗教
- 气候变化
- 施肥
- 土地转化
- 生物入侵

后果

- 淡水短缺、污染
- 森林砍伐、沙漠化
- 海面上升、冰盖退缩
- 城市化
- 土壤侵蚀、污染
- 毒性垃圾增多
- 富营养化
- 疾病流行
- 生物多样性减少

地球系统科学的内容、特点和趋势

整合自然和人为过程、研究不同系统间的交互作用。

以系统科学的手段研究水和能量循环、生态系统和碳循环、大气化学和太阳辐射、海洋和冰川、固体地球等分系统的变化过程。

核心科学领域是生物地球物理学和生物地球化学

建立由地球数据集、优化的起始参数场和模型集所组成的四维数据同化系统。

- 综合性
- 系统性、全球性
- 多学科交叉
- 定量性

地球科学的基本问题及研究趋势转变

地球科学围绕以下四个方面的问题开展研究：

- 地球系统变化的驱动力是什么？
- 地球系统如何响应自然和人为引起的变化？
- 地球系统变化对人类文明的影响是什么？
- 如何预测地球系统未来的变化趋势？
- 从注重纯自然过程到人与自然并重
- 从孤立研究人为过程到系统研究人与自然
- 从改造自然到寻求与自然的和谐
- 从观测与过程理解到观测与过程同化模拟

这些都需要地球系统科学

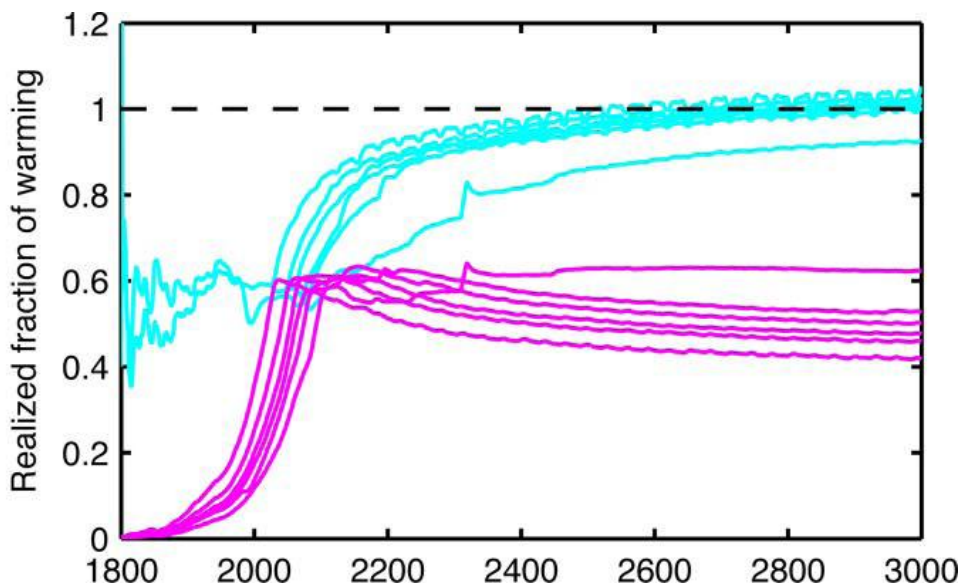
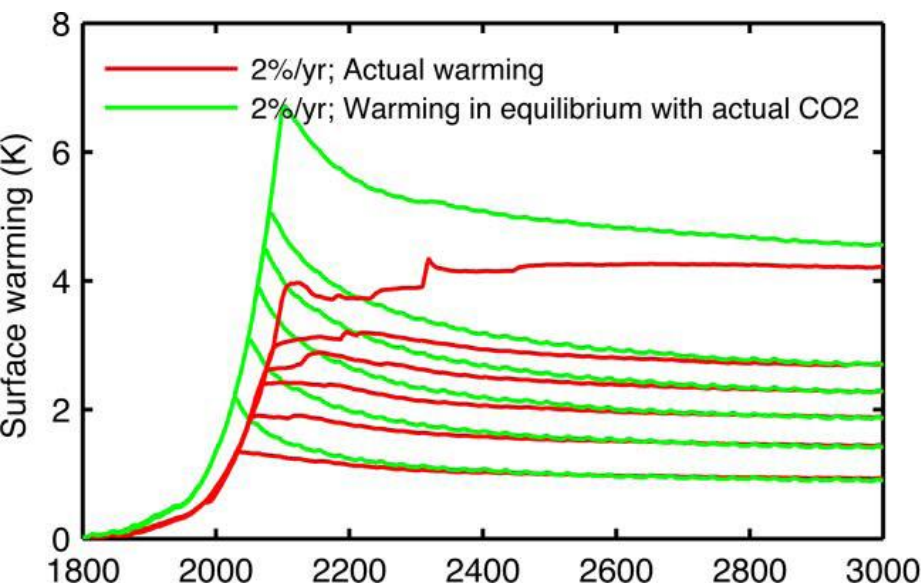
研究地球系统科学所面临的挑战

钱学森先生断言：地理系统是复杂的巨系统

- 由于对陆地、海洋和大气之间的**因果关系了解不足**，还无法预测全球变化对未来气候和社会发展的影响
- 需要用全球长期、全面的观测资料来建立比较准确的气候变化预测模型—**长期资料的收集**
- 复杂的非线性系统，小的变化或扰动有可能引起**不可逆转的系统整体行为改变**

地球气候系统不可逆转性论断

Solomon 2009, PNAS



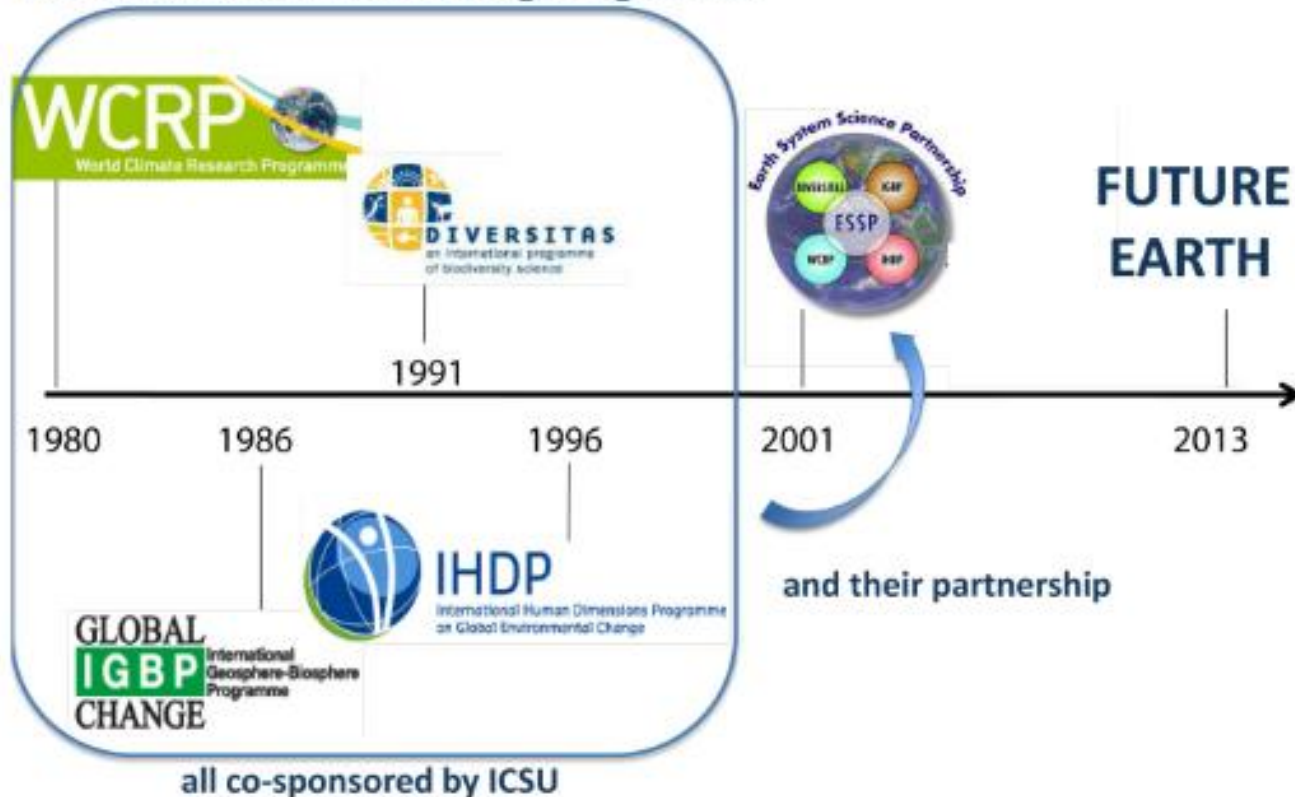
有关地球系统科学的一些情况

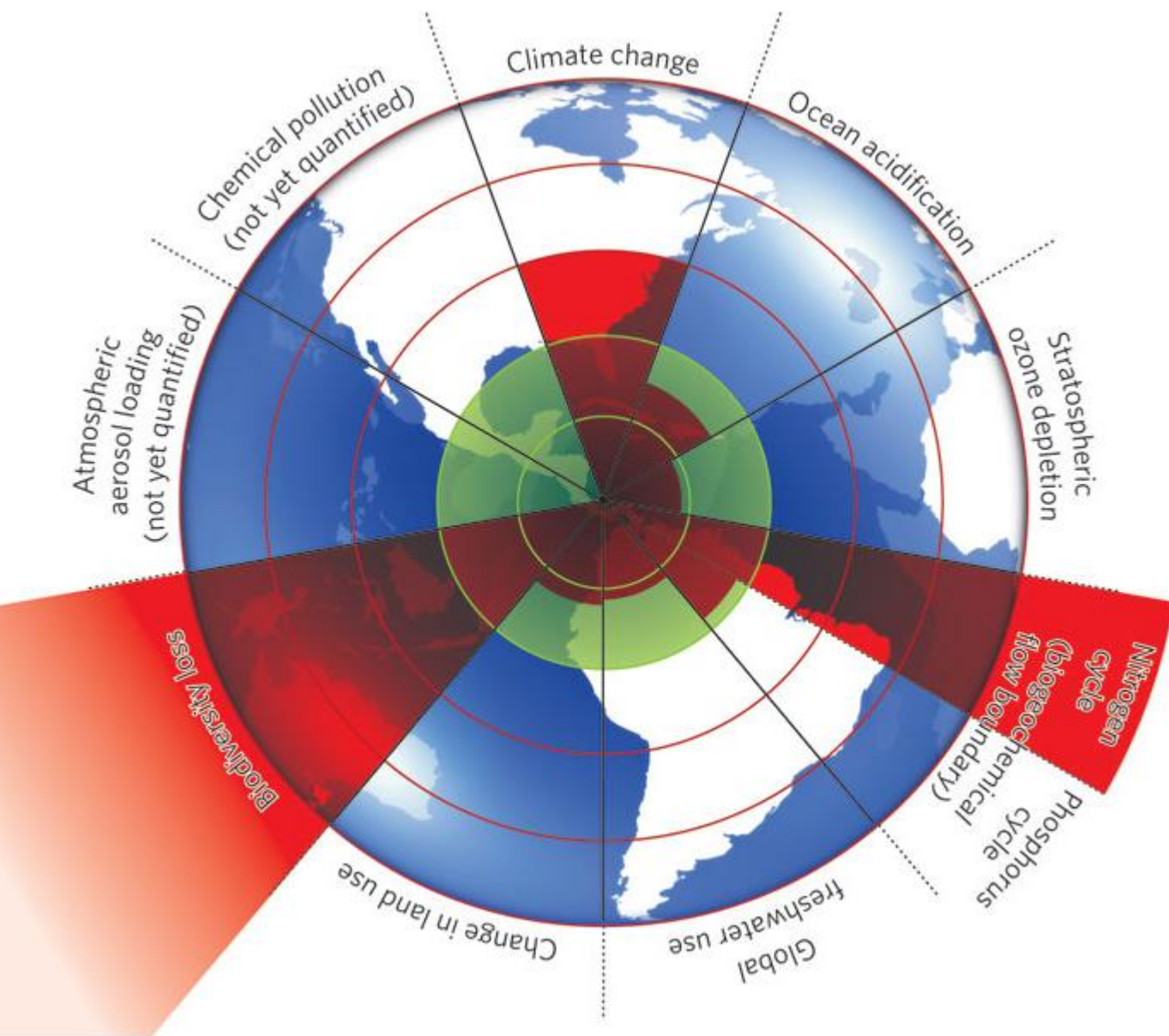
- 1987年美国NASA提出地球系统科学并成书1800余页
- 1990年代加州大学设立地球系统科学系（UCI）或研究所（UCSB）
- 1991年钱学森院士谈地理科学的内容与研究方法（地理学报）
- 1995年黄秉维院士谈陆地系统与可持续发展（中国科学报）
- 1996年宫鹏等写《对地观测技术与地球系统科学》一书（科学出版社）
- 1999年黄秉维院士谈陆地系统科学（科学出版社）
- 1997年乔治梅森大学设地球系统科学系
- 1999年马里兰大学设地球系统科学研究中心
- 2000年南京大学成立国际地球系统科学研究所
- 2001年中国科学院建立地球环境研究所
- 2008年北京师范大学成立全球变化与地球系统科学研究院

ICSU Path of Programme Development

A framework to unify existing bodies

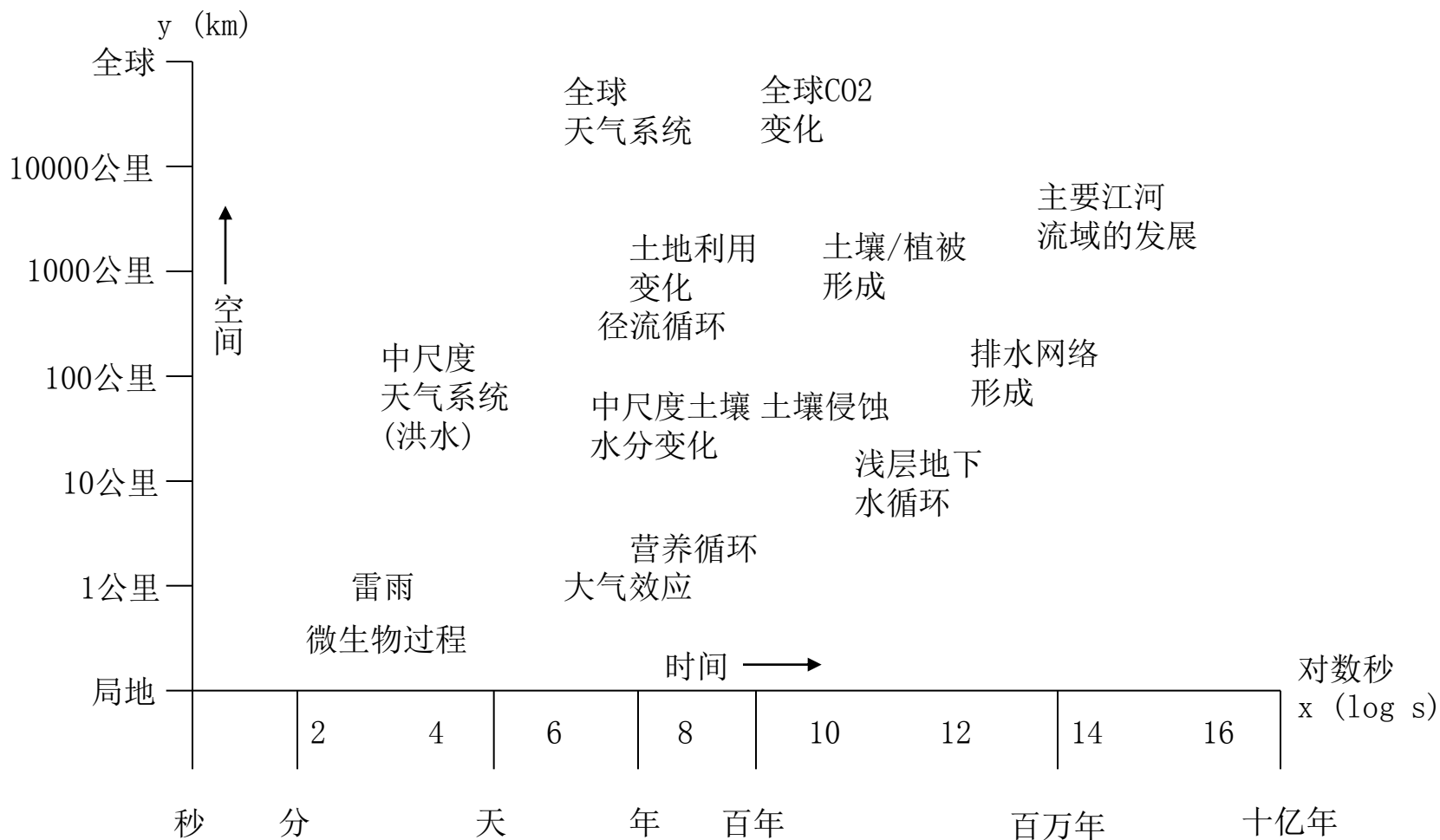
four Global Environmental Change Programmes





- Aerosol
- Chemical pollution
- Climate change
- Ocean acidification
- Stratosphere O3 depletion
- N/P cycles
- Global freshwater use
- Land use change
- Biodiversity loss

Rockstrom et al., Nature, 2009



生态系统生物物理过程的时空尺度(对数形式)

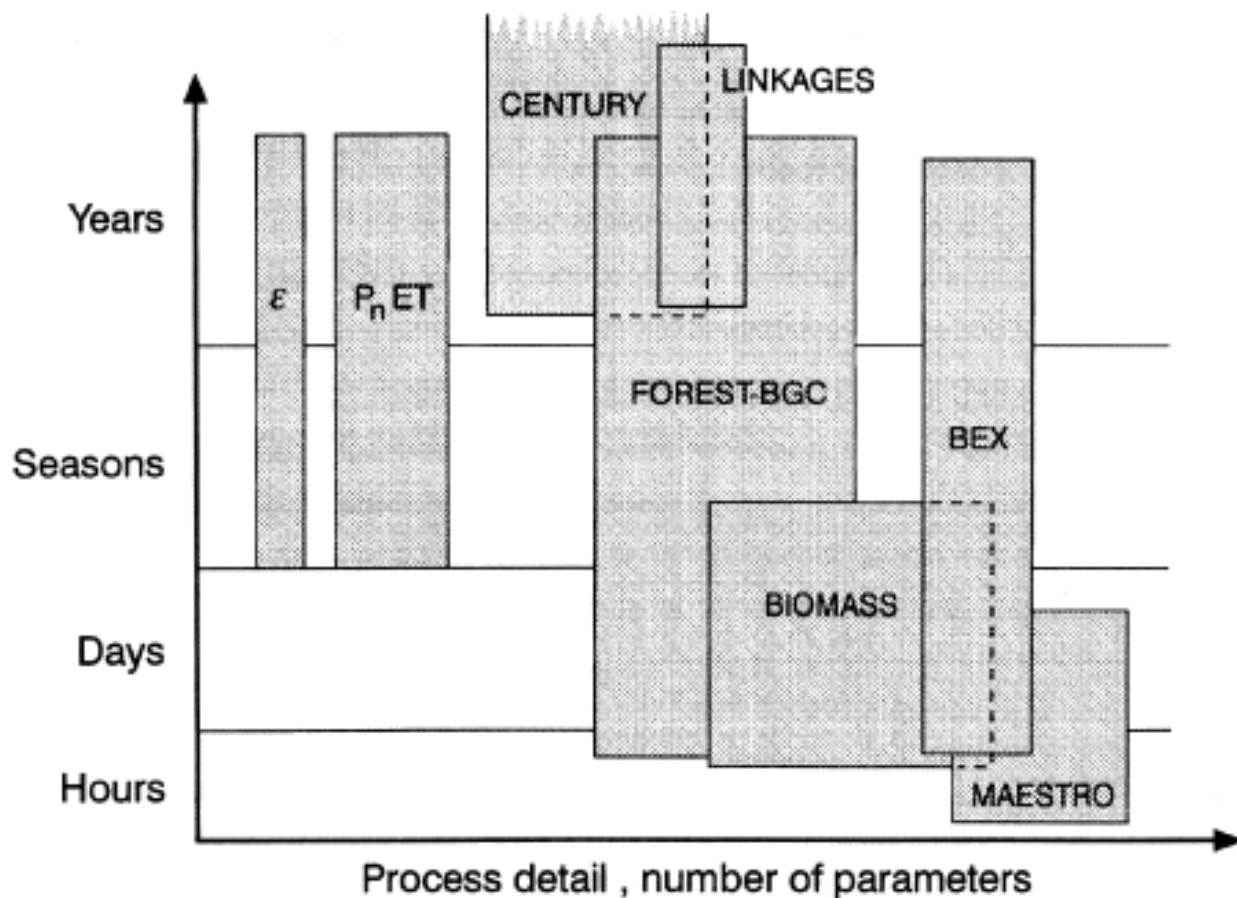
A new 10 year program for future earth

- **Future Earth will be a global platform to deliver:**
- **Solution-orientated** research for sustainability, linking environmental change and development challenges to satisfy human needs for food, water, energy, health;
- **Effective interdisciplinary collaboration** across natural and social sciences, humanities, economics, and technology development, to find the best scientific solutions to multi-faceted problems;
- **Timely information for policy-makers** by generating the knowledge that will support existing and new global and regional integrated assessments;
- **Participation** of policy-makers, funders, academics, business and industry, and other sectors of civil society in co-designing and co-producing research agendas and knowledge;
- **Increased capacity building** in science, technology and innovation, especially in developing countries and engagement of a new generation of scientists.

Big Societal Questions for Future Earth

- How can humanity feed a growing population within sustainable boundaries of the earth?
- How can humanity adapt to 3-4 degree C warmer world?
- How can the world economy stimulate innovation processes and support transformation to global sustainability?

人们开发了许多不同时空尺度的陆表过程模型： 土壤-植被-大气模型



还有
CLM
IBIS
VIC
BEPS
BATS
SiB
等

模型之间的表现有何差异？哪个模型更适用于数据与模型的同化？

未来的地球系统模拟

- Earth system modeling will further develop the integration of human-environment systems and their behavior
- New better data will become available
- New advanced spatial and dynamic tools will be developed and applied
- The focus will shift from understanding historic global change towards the current and future management of human-altered processes
- The new understanding will especially foster policy assessments in the field of biodiversity, food security, poverty and thus sustainable development

未来地球系统包括成分：

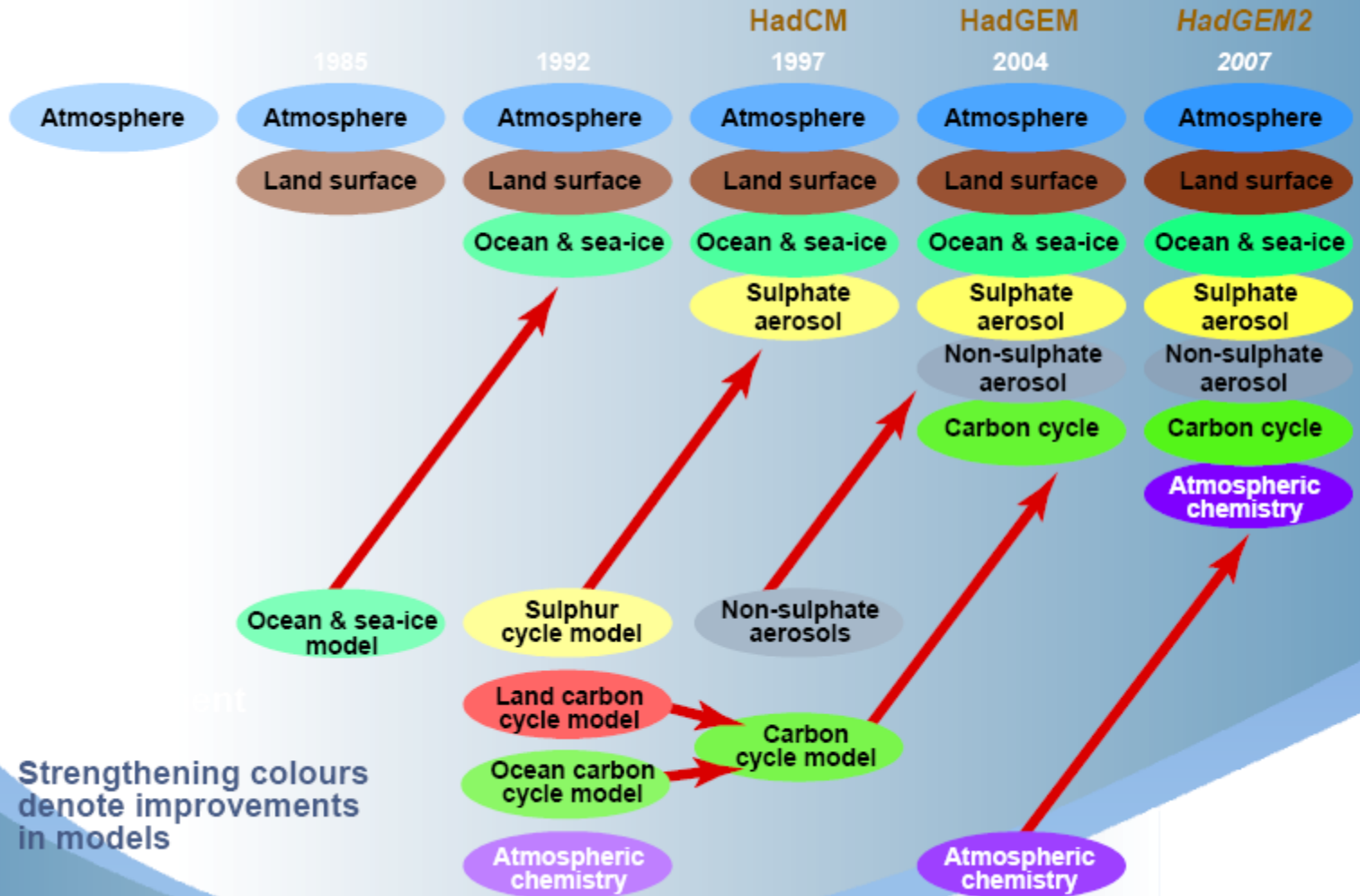
- 物理气候系统
 - 陆地
 - 大气
 - 海洋-冰冻圈
 - 生物地球化学
 - 大气化学-空气质量
- 生物系统
 - 生态
- 社会-经济系统
- 影响
 - 水资源
 - 人类健康
 - 农业
 - 工业
 - 金融

谁在发展地球系统模型？

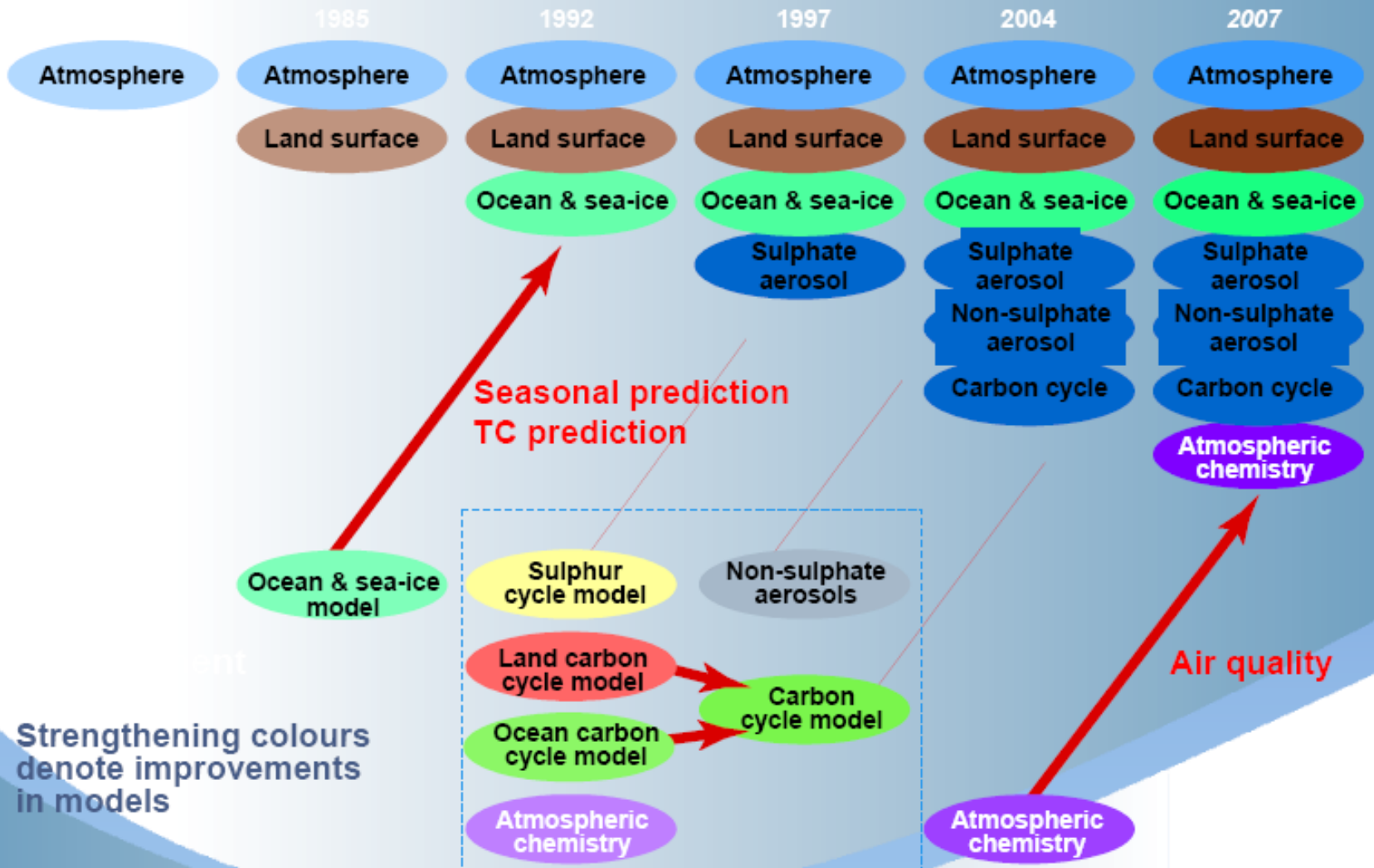
- **Hadley Centre (UK)**
- **IPSL (France)**
- **MPI (Germany)**
- **FRCGC (Japan)**
- **NCAR (USA)**
- **GFDL (USA)**

A common feature of these systems is their increasing level of complexity

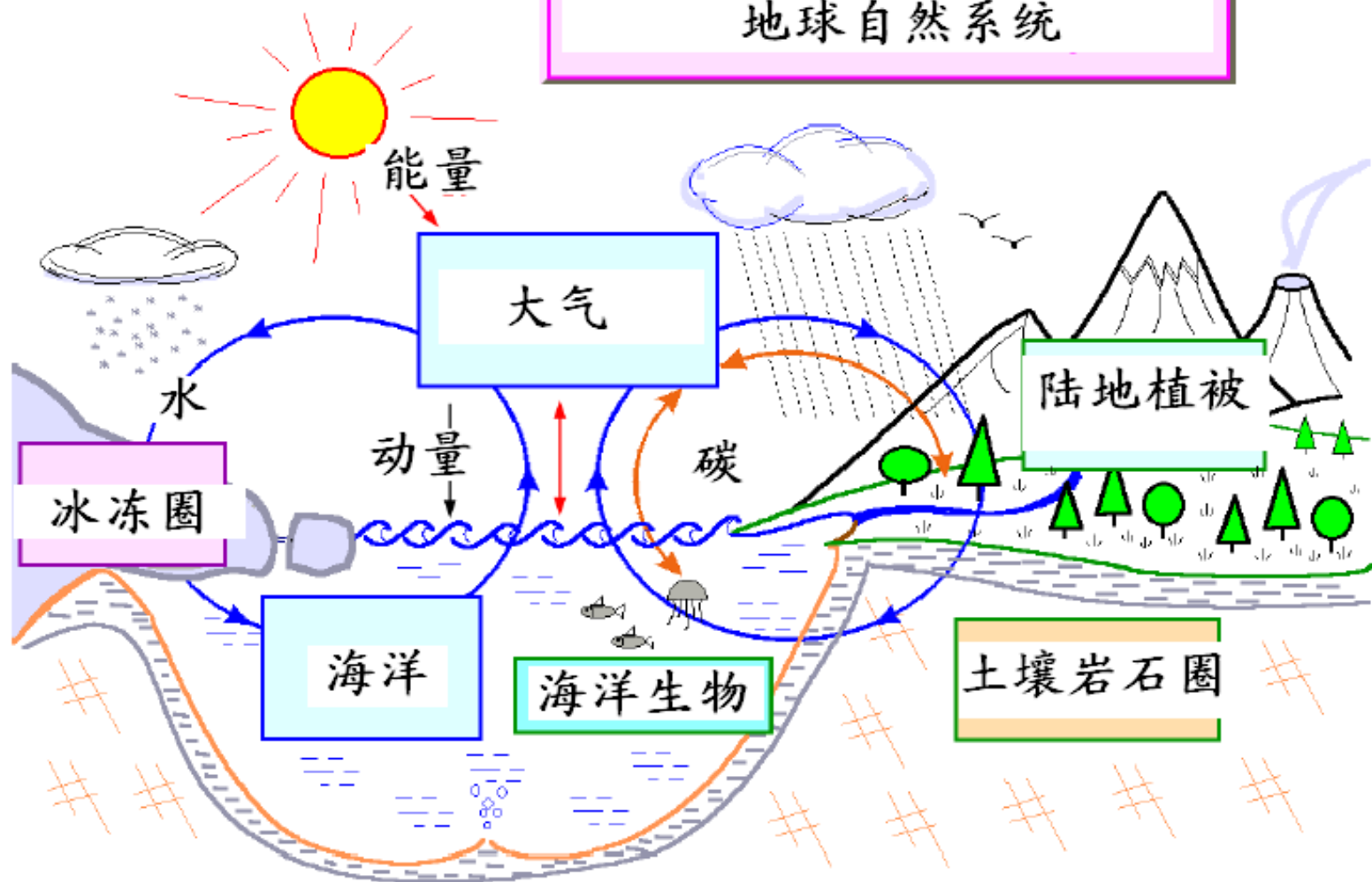
HADLEY CENTRE EARTH SYSTEM MODEL



NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODELS

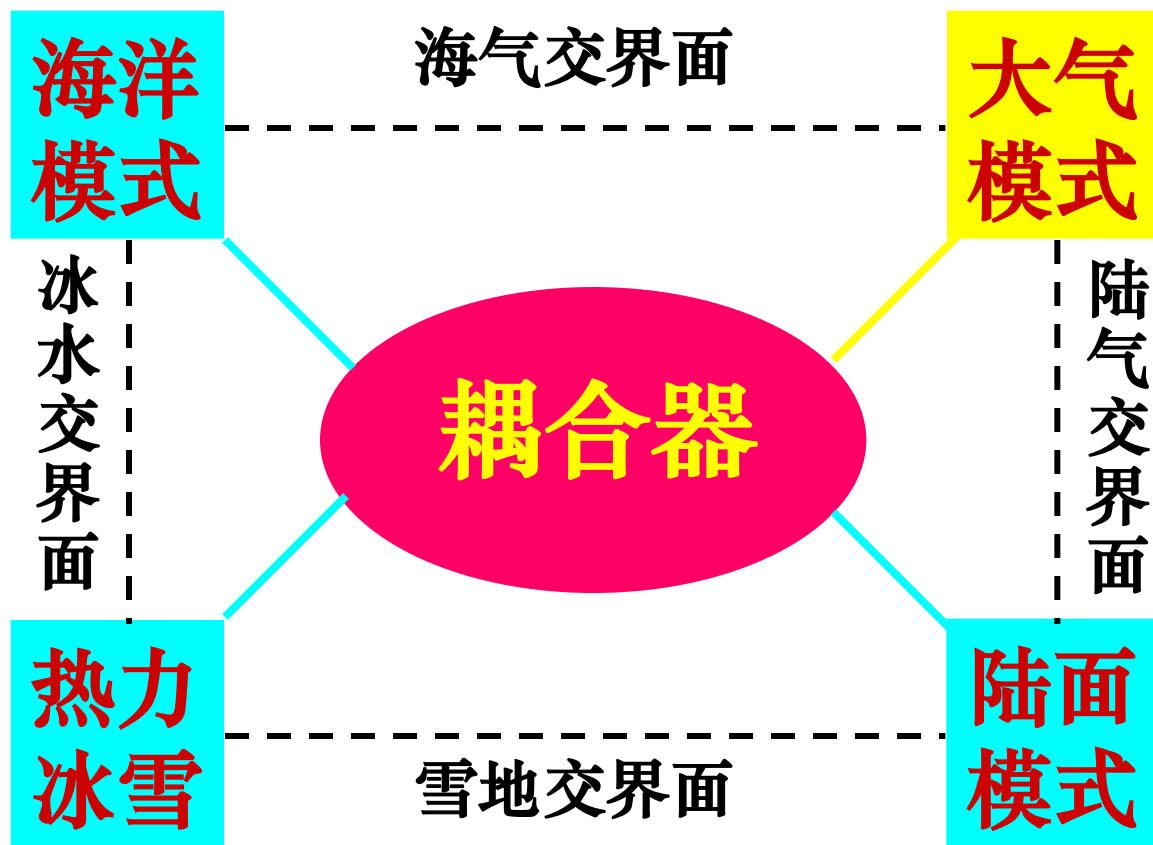


地球自然系统



2. 地球系统模式

物理气候系统模式



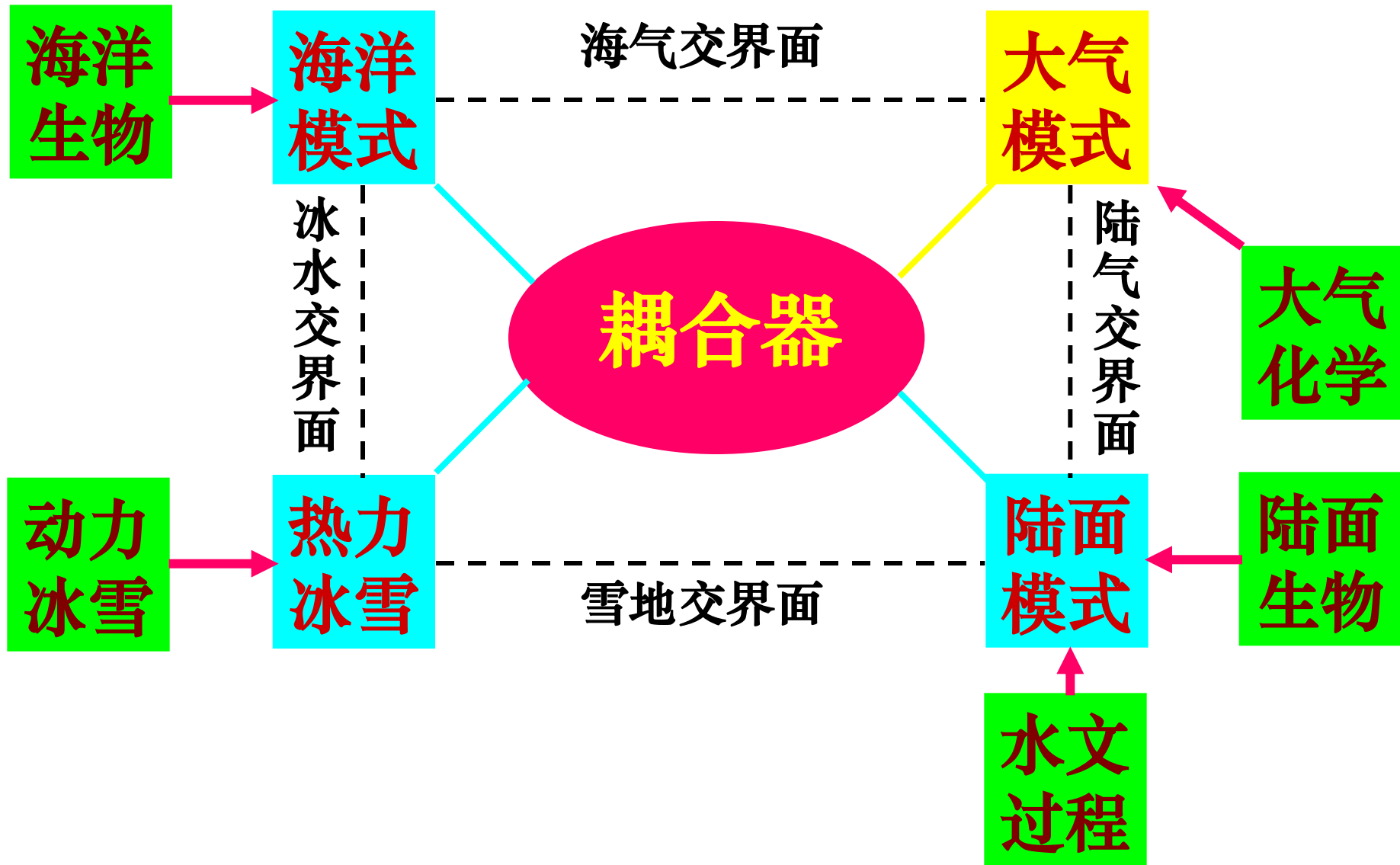
我国地球系统模式研究参考时间表

中期目标（8年）

发展地球气候系统模式。实现生物地球化学和生态动力学过程与物理气候系统模式的耦合，建立起**地球气候系统模式**，为研究诸如碳氮循环、地球臭氧层破坏、土地沙漠化、酸雨等大量与人类社会密切相关的气候与生态环境问题提供新的工具。

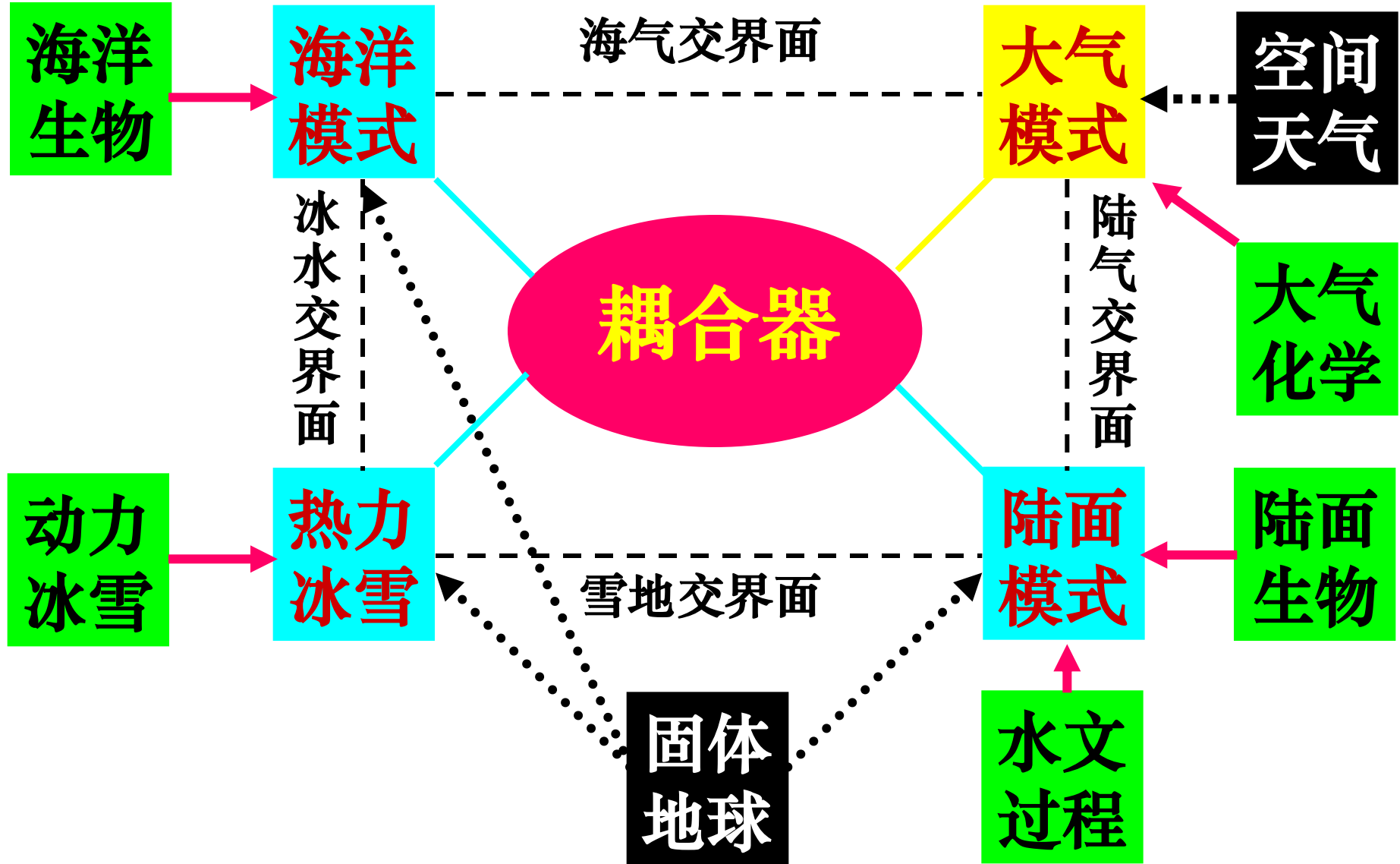
2. 地球系统模式

地球气候系统模式



2. 地球系统模式

地球系统模式



地学中心2010-2012年的一些进展

- A substantially improved earth system model through close collaboration of computer scientists and earth scientists between Tsinghua and Institute of Atmospheric Physics, CAS
- A high resolution model improved from GEOChem to understand atmospheric chemical transport in China and in the vicinity of China
- A widely cited China anthropogenic emission inventory
- Use of biogeochemical model in estimating grain production loss under drought stresses
- Climate diagnosis and attribution work in China
- The world's highest resolution global land cover map, new products, new concepts and new discoveries
- China's environmental monitoring by remote sensing
- Mangrove ecosystem interaction with coastal eutrophication and carbon sequestration – some different results

Example of big questions

- Landscapes are shaped by the uplift, deformation and breakdown of bedrock and the erosion, transport and deposition of sediment.
- Life is important in all of these processes. Over short timescales, the impact of life is quite apparent: rock weathering, soil formation and erosion, slope stability and river dynamics are directly influenced by biotic processes that mediate chemical reactions, dilate soil, disrupt the ground surface and add strength with a weave of roots.
- Over geologic time, biotic effects are less obvious but equally important: biota affect climate, and climatic conditions dictate the mechanisms and rates of erosion that control topographic evolution.
- Apart from the obvious influence of humans, does the resulting landscape bear an unmistakable stamp of life? The influence of life on topography is a topic that has remained largely unexplored.
- Erosion laws that explicitly include biotic effects are needed to explore how intrinsically small-scale biotic processes can influence the form of entire landscapes, and to determine whether these processes create a distinctive topography.

Examples of big questions

- How does vegetation interact with increasing atmospheric CO₂ concentration?
- How do people counteract global sea level rise?
- How do people prevent from flooding damages?
- What are the most likely areas of land slides?
- How to best integrate/assimilate observational data with models?

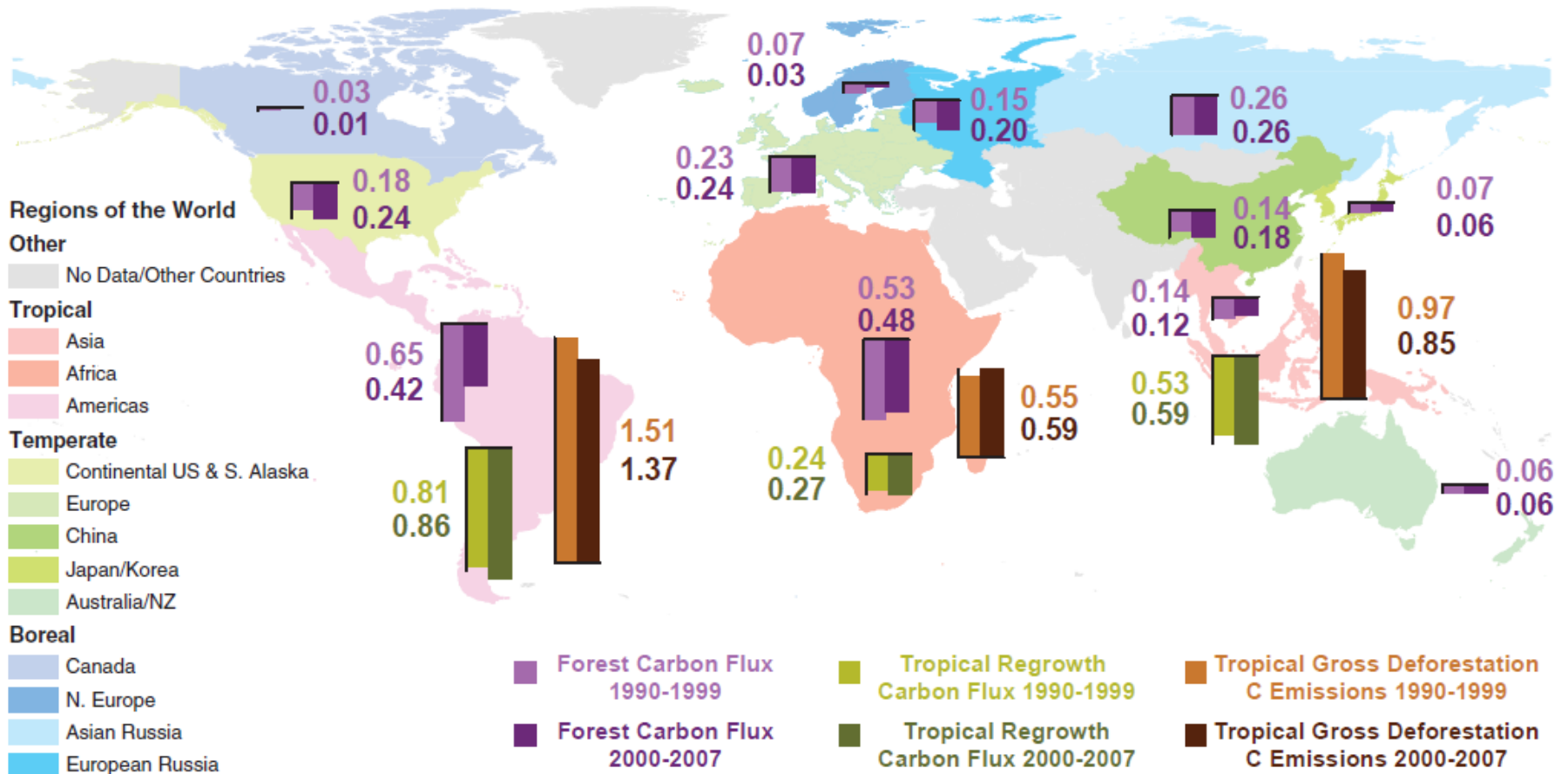
Big Societal Questions for Future Earth

- How can humanity feed a growing population within sustainable boundaries of the earth?
- How can humanity adapt to 3-4 degree C warmer world?
- How can the world economy stimulate innovation processes and support transformation to global sustainability?

地球系统科学中的假设

- The CLAW hypothesis has for 20 years provided the intriguing prospect of oceanic and atmospheric systems exhibiting in an intimately coupled way a capacity to react to changing climate in a manner that opposes the change.

Carbon Sinks and Sources (Pg C yr⁻¹) in the World's Forests

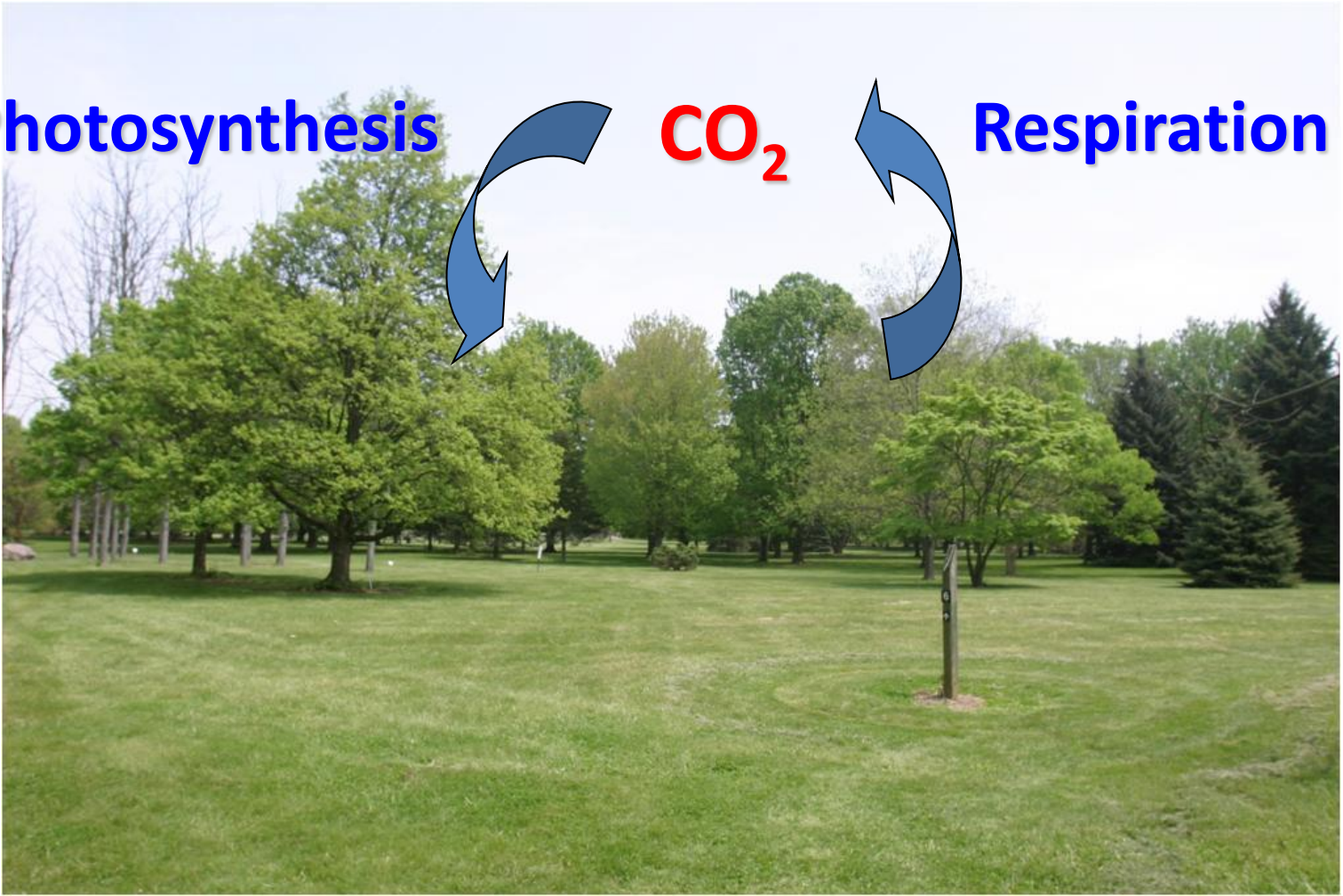


Keeping Carbon in Terrestrial Ecosystems to Battle Global Warming

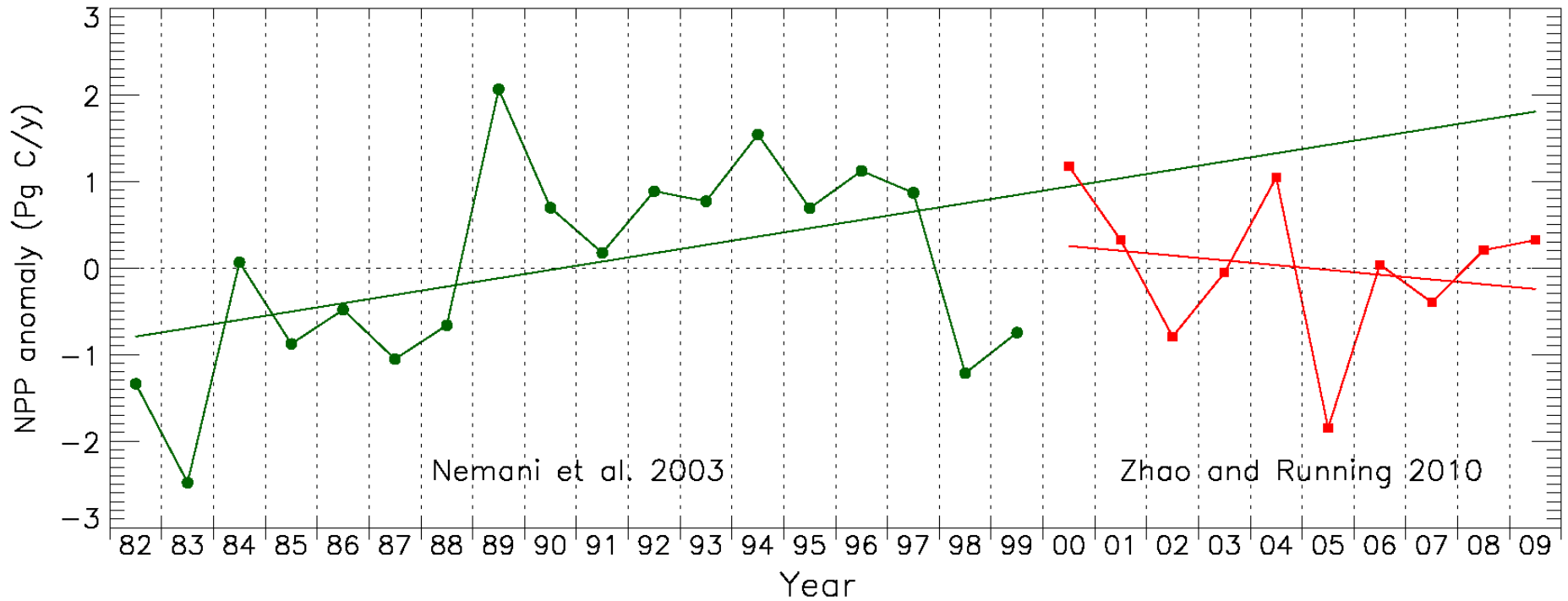
Photosynthesis

CO₂

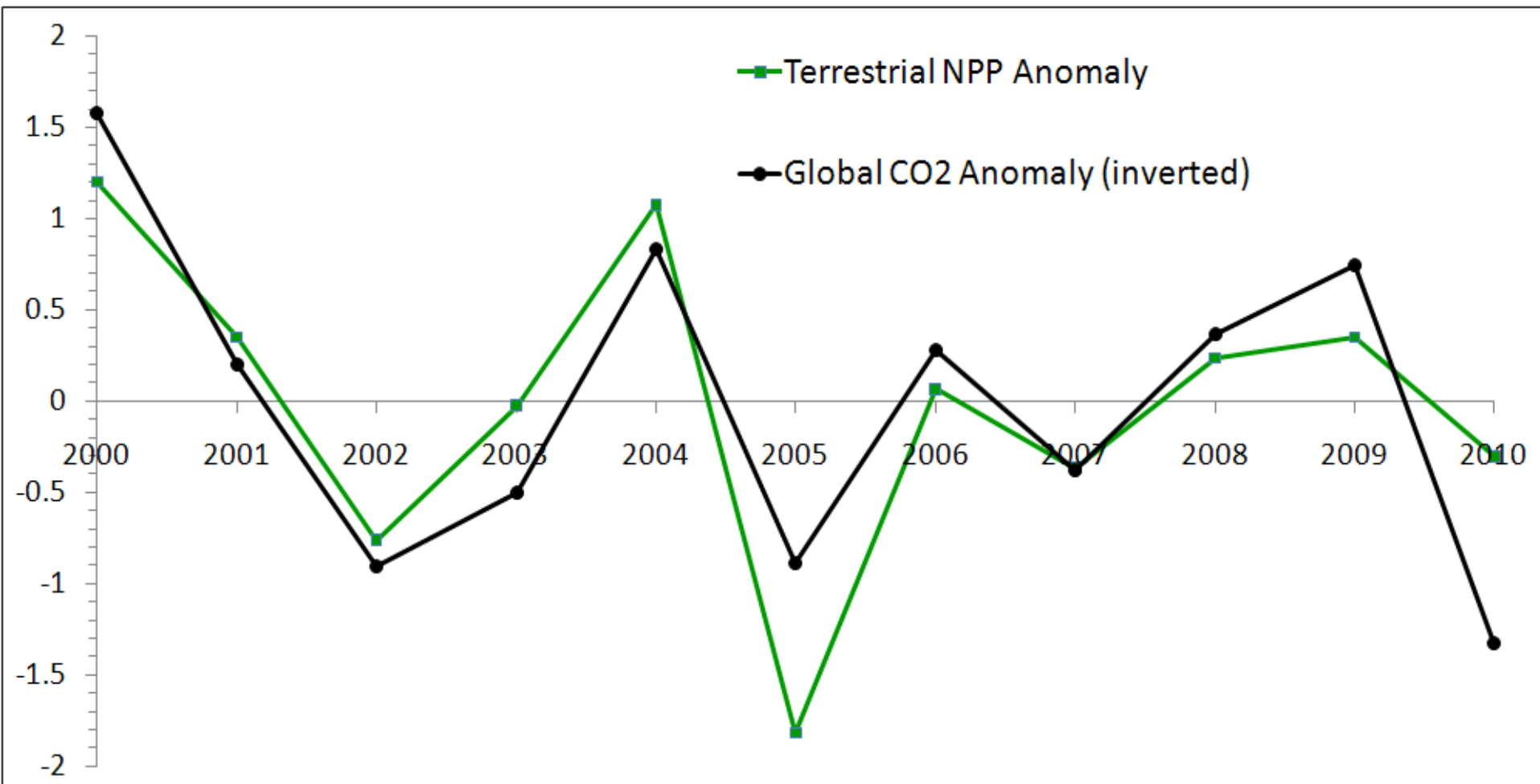
Respiration



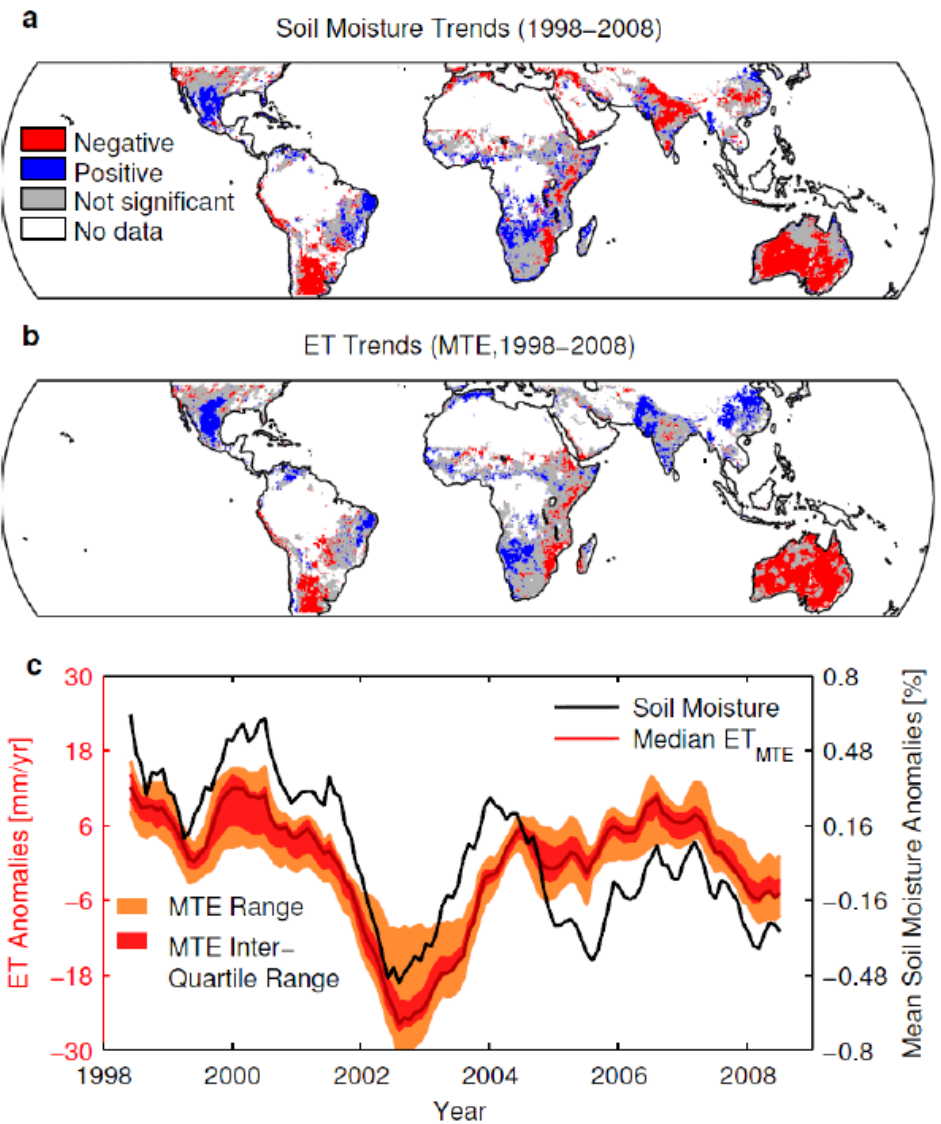
Remotely Sensed NPP change (1982-2009)



Global NPP decreased from 2000 to 2009, with NPP over North Hemisphere continued increasing (winner) and over South Hemisphere decreased; Recent drying trend caused the reduction in NPP in SH.

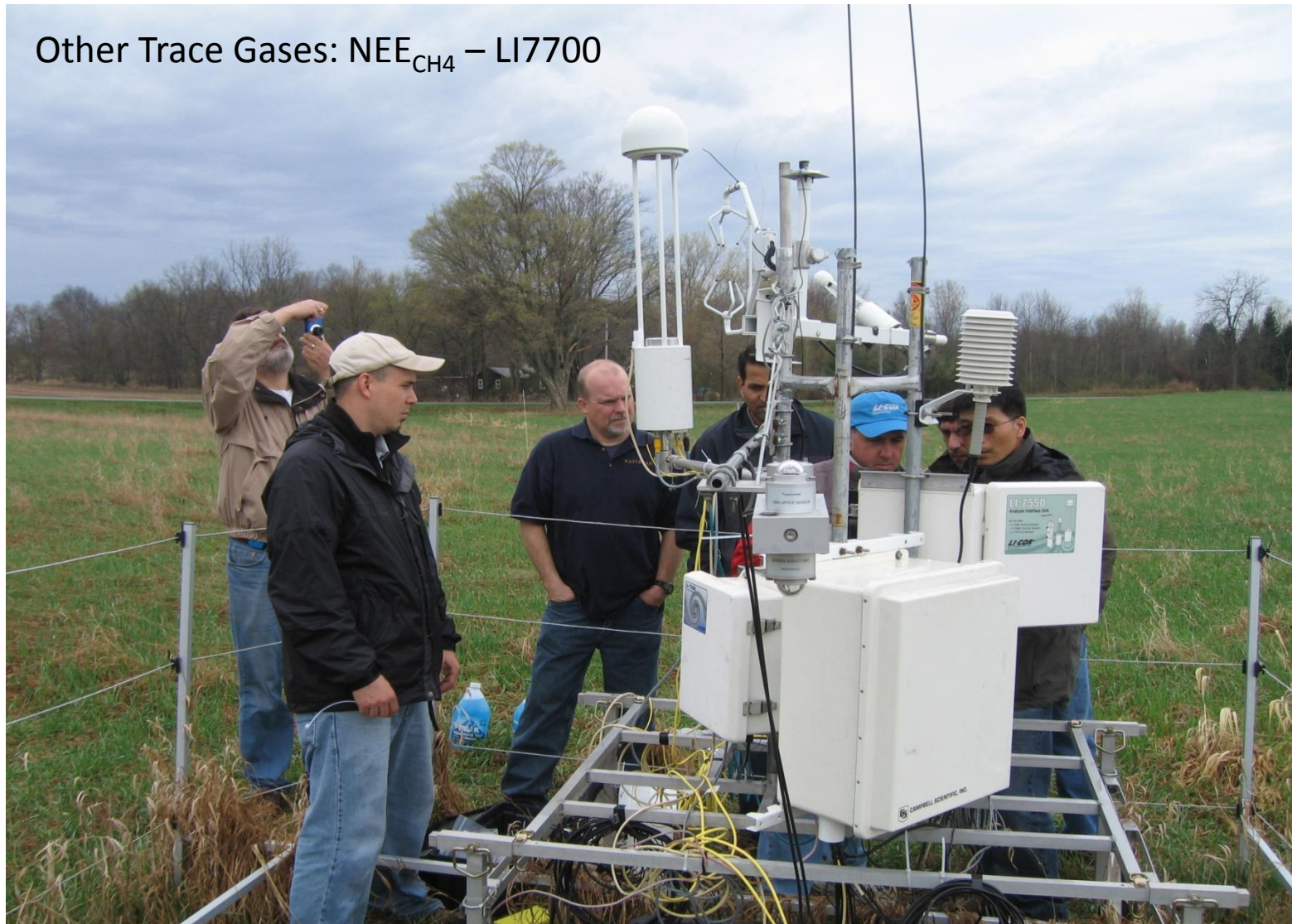


Global annual evapotranspiration (ET) increased on average by 7.1 mm/yr per decade from 1982 to 1997. After that, coincident with the last major El Niño event in 1998, the global ET increase had ceased until 2008. This change was driven primarily by moisture limitation in the Southern Hemisphere, particularly Africa and Australia.

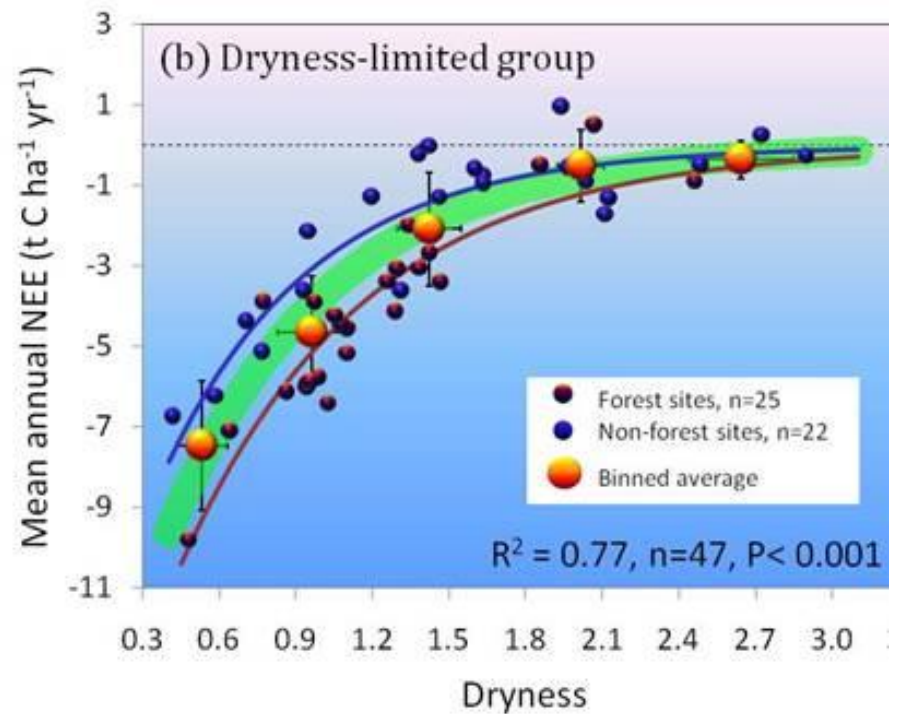
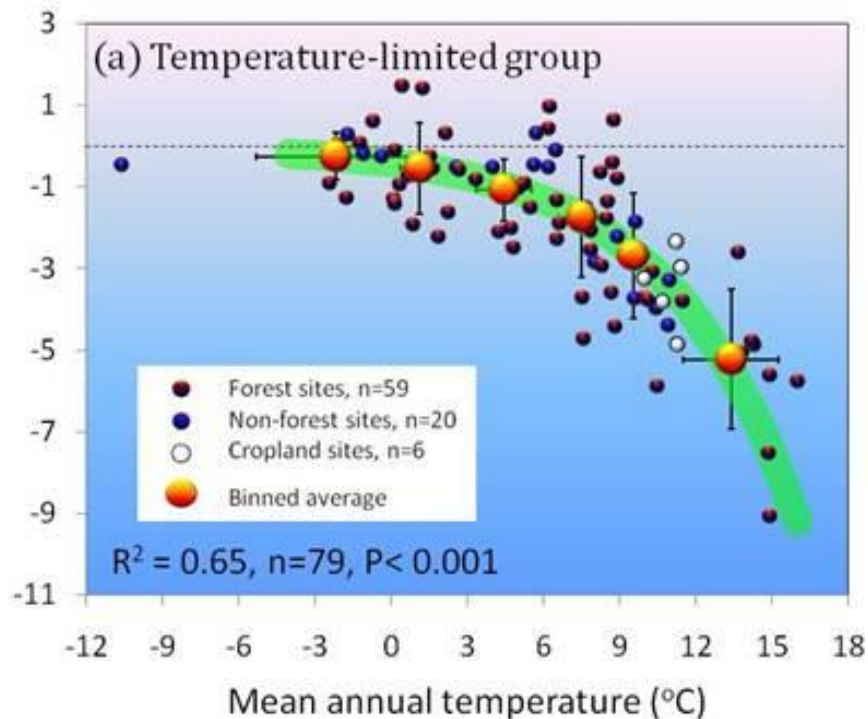


Frontier 4: Coupled biogeochemical cycles (see Front Ecol & Environ)

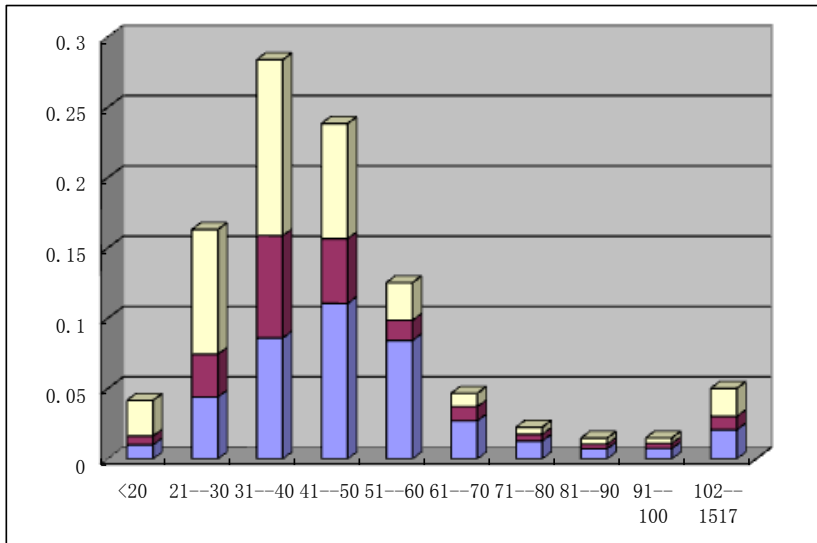
Other Trace Gases: NEE_{CH_4} – LI7700



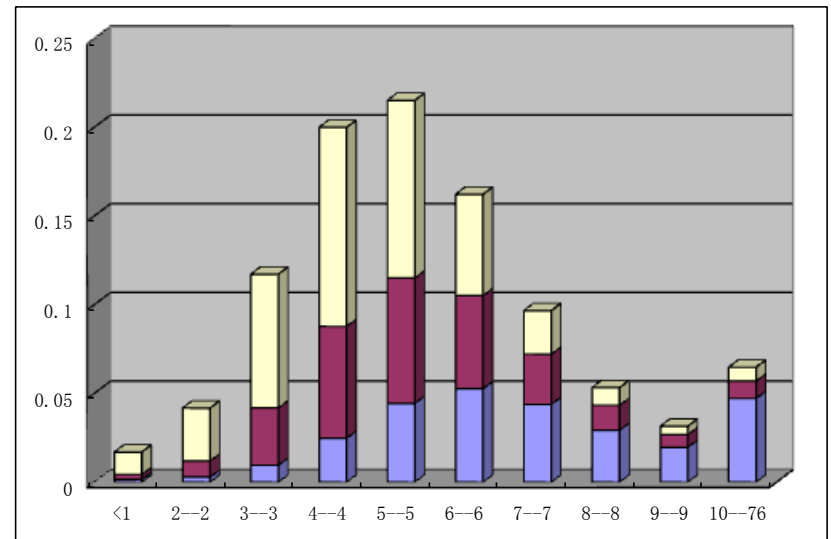
NEE observed at eddy covariance sites is: (1) a strong function of mean annual temperature at mid- and high-latitudes, (2) a strong function of dryness at mid- and low-latitudes, and (3) a function of both temperature and dryness around the mid-latitudinal belt (45°N).



China's cities are developing to low lands

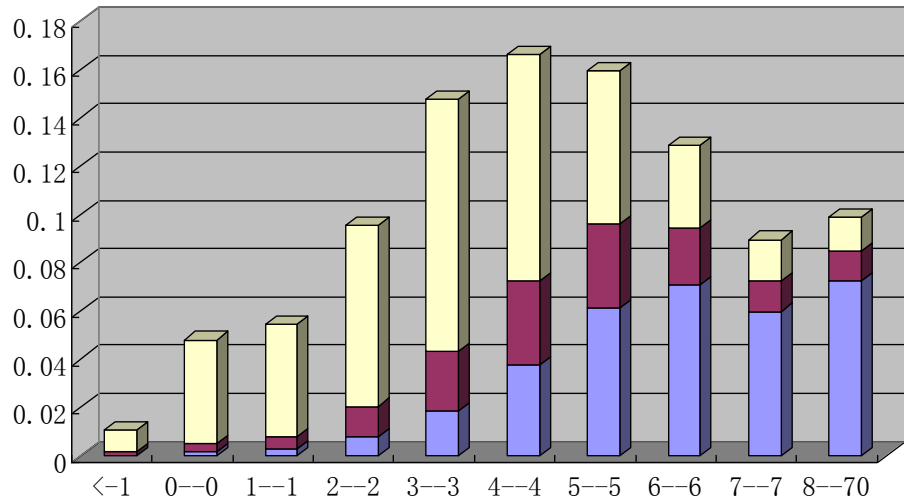


Beijing

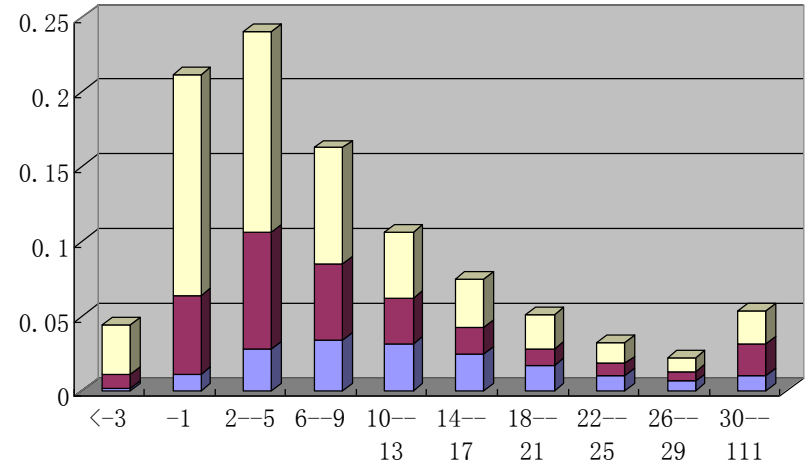


Shanghai

China's cities are developing to low lands

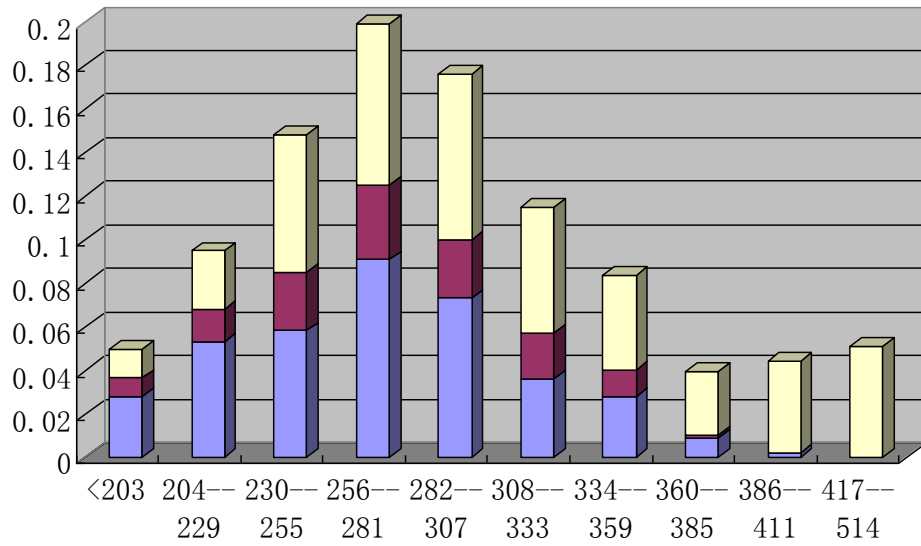


Tianjin



Guangzhou

China's cities are developing to low lands



Chongqing

