

# 气候系统研究与HUBEX

■ 许小峰

通过中日合作，在这次试验中引入了一些当时在我国科研和业务上还不具备的观测设备，极大丰富了试验中可获取的资料种类，为完成研究任务提供了有力支持。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.001

## 1 HUBEX的历史与科学背景

1998年中国基础科学研究十大新闻评选中，大气科学研究四大试验名列第九，其中，淮河流域能量和水分循环试验和研究（HUBEX）是四大科学试验之一。若追溯HUBEX项目的实际启动时间，该计划1995年就已开始，分为四个阶段进行，即1995—1996年的准备阶段、1997—1999年的实施阶段、1999—2000年的研究阶段和2000年的总结阶段。1998年启动的试验正是在做了充分准备后，正式进入到实施阶段。

尽管在中国年度科技新闻中占有一席之地，但若仅将HUBEX作为在中国开展的一个或一组独立的科学试验，格局则有些窄了。实际上，HUBEX无论是从时间、空间，还是科技内涵上，都有着更广泛的时代背景和深刻的内在价值，与国际地球科学的发展进程有着密切的关联。

谈到HUBEX及在同一时期开展的诸多地球科学相关试验，一个重要的背景是人们对气候问题及重要性的认识取得了整体性的提升和共识；标志性的事件是1974年在斯德哥尔摩召开的世界气象组织（WMO）和国际科学联盟理事会（ICSU）联合召开的“气候的物理基础及其模拟”国际学术讨论会，会上明确地提出了“气候系统”的概念，将气候系统作为大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈相互作用的整体。这一事件为气候问题和地球科学的研究拓展了新的空间，是一次开创性、战略性的转变，明确了完整、系统地思考气候问题的新思路和方法，使各领域的专家逐步从单一学科的研究走向系统和综合。

促使科学界关注和向气候系统研究转变的，还有其他一些重要事件。例如，在20世纪70年代，世界上许多地区出现了历史罕见的严重干旱和其他气候异常现象，对全球粮食生产造成了严重影响，特别是

1968—1973年非洲一些地区出现大旱，造成数十万人死亡，引起全球对气候问题的关注。第一届世界气候大会于1979年2月12—23日在日内瓦举行，名称确定为“世界气候大会——气候与人类”，来自50多个国家的约400人出席了会议。会议通过了“世界气候大会宣言”，提出鉴于气候会影响到人类社会的诸多领域，世界各国要充分利用现有的气候知识，评估气候发生的变化及其人为造成的影响。

此外，地球环境问题从另一角度提醒了人类活动所造成的负面影响，1972年6月在瑞典斯德哥尔摩召开的联合国第一次人类与环境会议上，1300多名代表通过了《人类环境宣言》《人类环境行动计划》等文件，58个国家、152位成员参与完成的报告——《只有一个地球：对一个小行星的关怀和维护》是第一份关于人类环境问题的完整报告，提出了“只有一个地球，人类应该同舟共济”的理念（图1）。

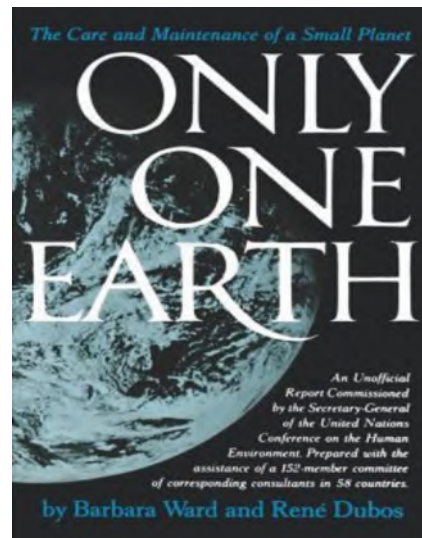


图1 只有一个地球：对一个小行星的关怀和维护

资助信息：国家自然科学基金重点项目（91637211）

在技术方面,1950年,美国气象学家查尼等人率先成功在计算机上输出了第一张数值天气预报结果,开创了天气预报进入到客观、定量制作的新阶段。1975年欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)正式成立,很快就确立了在世界数值天气预报技术领域的领先地位。在数值天气预报技术取得快速进步的同时,人们在不断探索改进数值模式的进程中,也意识到了大气系统运动的复杂性使得大气初始场信息会随时间迅速衰减,难以跨越两周的时间门槛。著名美国气象学家洛伦茨1963年发表了一篇堪称经典的论文《确定性的非周期流》,用一个非常简单的云对流数值积分预报模型,在计算过程中发现大气运动存在的混沌现象,限制了其可预报性。这篇论文发表后十多年才受到广泛关注,被称之为混沌理论,并以“蝴蝶效应”的形象比喻影响到了诸多学科。按洛伦茨的推论,超过一定时间范围后,大气初值信息就会消失殆尽,这个时间期限大约为两周。这一在天气预报研究进程中有些令人沮丧的结论,使不少在积极探索延长数值天气预报时效的科学家多少感到困惑,但并没有使人们止步于此,而是在如何提高可预报性这一问题上进一步加强了探讨和实践,如努力提升初始场的完整性和精度,减少计算过程中的误差,改进数值模式的性能等。另一个重要举措则是如何利用可以影响大气长期变化的外界因子,或被称为对大气长期变化有重要影响的气候信号,如海洋、陆面、冰雪、植被等,这些也正是气候系统所涵盖的重要成员,如能把握这些具有强记忆因子的变化规律,再研究其与活跃大气之间的约束关系,显然有助于延长对大气演变的预测时效。

1979年2月在日内瓦召开的世界气候大会上还拟定了世界气候计划(WCP),并在当年举行的第八次气象大会上得到批准。这是一个完整的设计,涵盖了气候问题的各个方面,包括资料、研究、应用、气候与人类活动的相互影响等,反映了这一时期对气候问题认识的重要变化和进展。同时也是响应第一届世界气候大会的要求,制定计划和采取具体措施提升对气候问题的认识,评估气候发生的变化及人类活动造成的影响。

## 2 GEWEX与HUBEX

前节所述对气候问题认识和研究的历史背景与HUBEX又有怎样的具体关联呢?这就涉及到了在WMO和ICSU共同承担的WCRP计划(1993年,政府间海洋学委员会IOC加盟,图2)。按照预定的目标要求,经过了大约10年左右的努力,围绕WCRP两个

重要研究目标,即气候的可预测性与人类活动对气候的影响,形成了若干个核心计划,如热带海洋和全球大气研究计划(TOGA,1985—1994年,已完成)、世界大洋环流试验(WOCE,1982—2002年,已完成)、全球能量与水循环试验(GEWEX)、平流层过程及其在气候中的作用(SPARC)、北极气候系统研究(ACSYS,1994—2003年,已完成)等,后期又增加了气候变率及其可预报性(CLIVAR,1995年开始)、气候与冰冻圈(CliC,2000年开始)两项核心计划,并启动了耦合气候模式比较计划(CMIP,1995年开始)、国际区域协调气候降尺度试验(CORDEX,2009年开始)等重点计划。其中著名的GEWEX试验于1988年开始启动、准备,于1990年12月被正式批准,成为WCRP的重点核心项目,并延续至今。



图2 WCRP目前的核心计划

GEWEX是一个时间跨度超过了20年的国际执行计划,按初期设计,1990—2002年为启动准备阶段,2003—2012年为全面实施阶段,目标是在全球观测和试验的基础上,对资料进行数值同化处理,研究海洋、陆面与大气间的能量与水分的相互作用、影响及对气候环境的反馈,并将成果应用于预报模式,改善蒸发和降水的模拟能力,提高大气辐射和云雾模拟的精度,最终达到改进气候模式、指导全球及区域的气候变化预测的目的。

选择能量与水循环变化为切入点开展全球性试验研究,可以看出在认识气候问题上出现的系统性转变,开始从不同圈层相互作用的角度来理解气候系统的变化规律。地球上不同相态的水与能量收支及分

布是密不可分的，水汽、云、冰、雪等水的不同形态对地球的辐射收支有着重要影响，从而关系到大气与陆面、海面的能量收支状况。蒸发到大气中的水汽是地球上最重要、最丰富的温室气体，也是大气能量的重要载体；不同高度的云在大气冷暖变化中起着重要的调节作用；而形成的降雨则影响着海陆水量的存储与大陆流向海洋的径流变化。因此，对水循环过程的认识成为预测气候演变的最高优先考虑因素之一，GEWEX的目标则是要研究水的蒸发、云的形成和降水过程整个周期的变化。而对这一演变过程，无论是观测与数据、理解与认识还是数值模拟与预测都存在很大差距，启动这项庞大的研究试验计划确实抓到了气候系统问题的关键点。

但实现这一计划也面临着极具挑战的困难，如何将各类观测系统的设计与运行、资料分析、数据质量控制与同化、气候系统模式研发等协调在一个试验计划内，还要考虑全球与区域的差异、气候的地理分布特征等，靠一个顶层规划设计是难以支撑如此复杂的试验体系架构的，需要通过若干个子系统的协调来共同实现。为此，GEWEX在全球确定了五个试验区：美国密西西比河流域的GEWEX大陆尺度试验区、加拿大麦肯兹克（Mackenzie）GEWEX研究区域、欧洲波罗的海试验区域、南美洲亚马孙河大尺度大气水汽平衡试验区及亚洲季风试验区（GAME）。而GAME又在东亚划分了四个试验区，中国东部的江淮流域被划为四个试验区之一，另三个为南海季风试验（SCSMEX）、GAME-Tibet（青藏高原试验）和GAME-Tropics（亚洲热带试验）。

图3是GEWEX第一阶段的战略实施示意图，首先是在全球范围内建立区域性关键试验区，通过区域过程研究提升对能量和水循环过程的认识，改进中尺度模式的地表耦合和云参数化过程，并通过加强

全球观测提升全球模式的能力，实现对气候变化的预测能力改进，促进对水资源的合理利用。从图中可以看到中国华东地区作为GAME一个试验区的范围，即HUBEX开展试验的区域。

淮河流域作为GEWEX/GAME的一个试验区，其观测和研究结果对全球能量与水循环试验研究具有重要作用，同时对于淮河流域的天气、气候与水循环的研究也极具价值。初夏是江淮梅雨锋的活跃期，受亚洲季风、中纬度冷空气和副热带高压的共同影响，特别是西南季风和副热带高压外围的东南气流向锋区的水汽输送，对大范围降水和中尺度暴雨的维持起到重要作用，常造成严重的洪涝灾害，并直接影响这一流域水文和水循环过程。不同陆面条件下产生的降水性质也有很大差别，从而影响到区域旱涝变化。这也正体现了在该区域开展气象、水文加密观测试验并进行相关研究所具有的特殊意义。

HUBEX试验区主要由 $\gamma$ 中尺度、 $\beta$ 中尺度和 $\alpha$ 中尺度相嵌套的观测区组成（图4）。 $\gamma$ 中尺度观测区设在阜阳、蚌埠、合肥、六安、金寨一线约（140×150）km<sup>2</sup>范围内。在 $\gamma$ 中尺度区域外围嵌套了 $\beta$ 中尺度和 $\alpha$ 中尺度观测区， $\beta$ 中观测区在南京、安庆、武汉、南阳、郑州、济南、青岛、射阳一线约（700×500）km<sup>2</sup>范

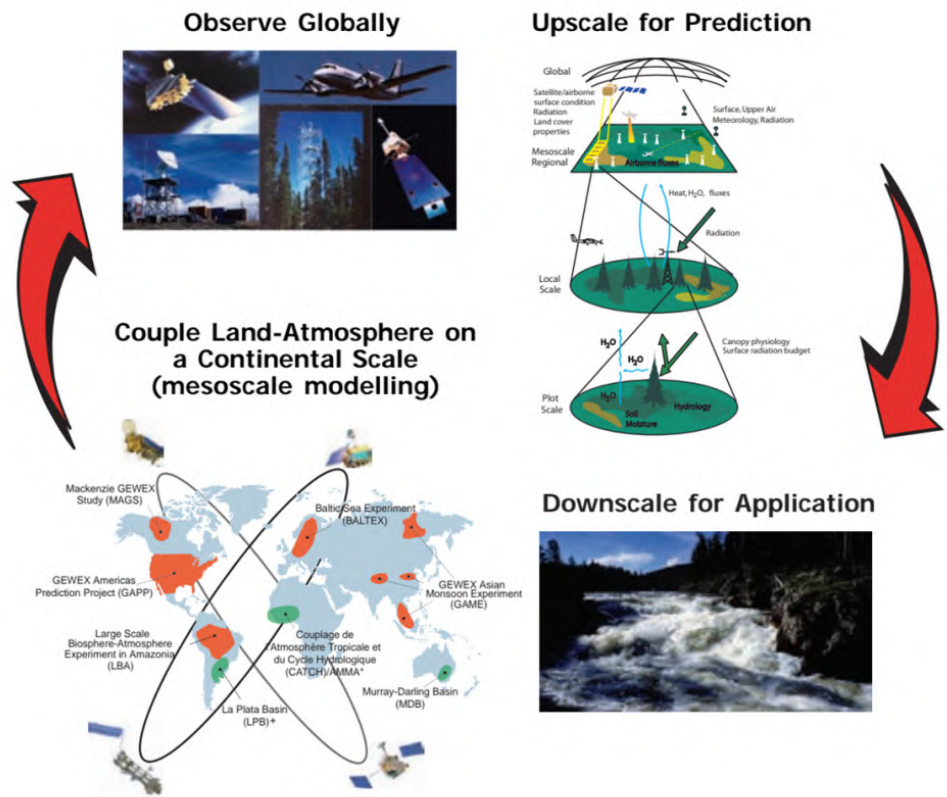


图3 GEWEX第一阶段战略实施示意图

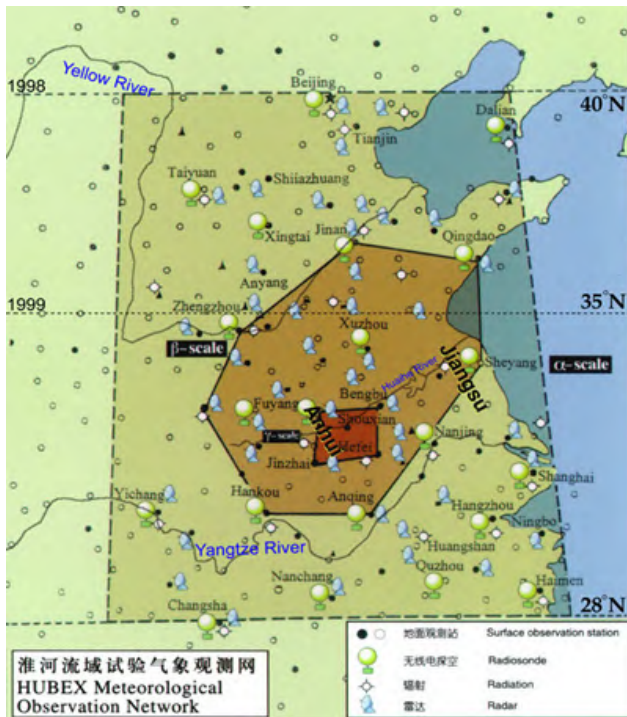


图4 HUBEX试验区

围内， $\alpha$ 中尺度观测区以 $28^{\circ}$ — $40^{\circ}$ N， $110^{\circ}$ — $122^{\circ}$ E为界，约 $1200\text{ km} \times 1500\text{ km}$ 范围。

通过中日合作，在这次试验中引入了一些当时在我国科研和业务上还不具备的观测设备，极大丰富了试验中可获取的资料种类，为完成研究任务提供了有力支持。在流域范围内布设了一个由8部雷达组成的 $\beta$ 中尺度观测网（图5），其中包括3部X波段双偏振多普勒雷达（日本名古屋大学和北海道大学提供），可

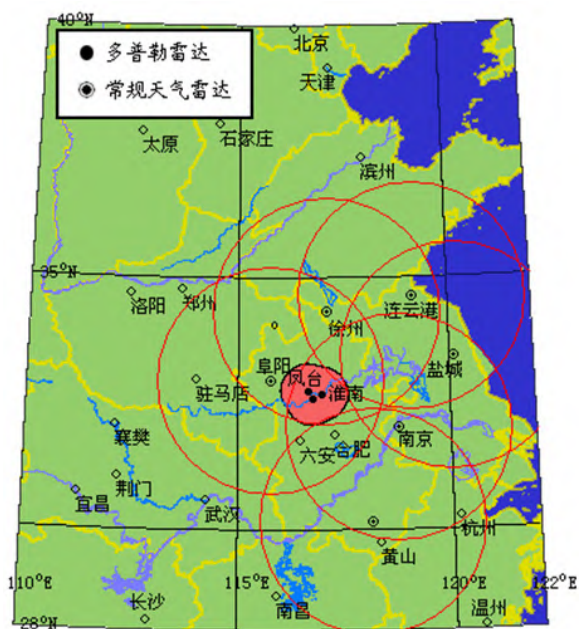


图5 HUBEX雷达观测网

以用来进行双多普勒、三多普勒雷达同步叠加观测。新增加密观测还包括湍流通量（动量、热感、水、 $\text{CO}_2$ ）、双通道微波遥感、辐射、梯度风、温度和湿度廓线、土壤热传导、土壤水份廓线等。通过这些观测实现三维大气运动、陆气相互作用、能量与水循环等过程的综合数据采集，为进一步分析研究、改进模式、提升预报能力提供了有力支持。

### 3 延续HUBEX的现实意义

在淮河流域持续了7年左右的HUBEX已过去20年了，有科学家提出要延续这一试验，启动HUBEX二期，是一个具有继承性、拓展性和现实需求的考虑，应认真规划、设计，做好前期准备。

从继承性和拓展性角度，对于天气、气候、水与能量循环这些复杂的系统性问题，在认识上还存在大量未解之谜，不可能通过一次试验解决所有问题，20年前启动的HUBEX只能算是一个起步。近年来随着对天气、气候问题的持续研究，认识上的深入也带来更多需要解释的问题，如随着我国近几十年来的快速发展，加剧了人类活动对气候、环境、生态等领域造成的影响，而这也是在气候变化领域最受关注的前沿问题，20年前就已提出，但显然并未完全解决，甚至有些问题更为严峻。既是全球性的，也是区域性的，与气候系统各圈层相互影响，更呈现其复杂性，气温持续上升、土地利用、城市化、气溶胶与温室气体的排放、季风的强弱、区域的旱涝、强天气的频发等都与20年前相比有了新的变化，需要切入的问题也随之增多。特别需要关注的是，在21世纪初WCRP制定的2005—2015年十年战略框架“地球系统的协同观测与预报（COPEs）”中，明确提出了无缝隙预报的概念，这一创新性表述的内涵旨在打破中小尺度预报、天气尺度预报、季节预测、ENSO预测、年际预测和气候变化预估之间的界限，在统一系统框架内开展天气和气候预测研究。这一理念的提出，在国际上为地球气候系统的研究开拓了新的视野，近20年来的研究也取得了显著进展，NOAA和ECMWF等都已明确提出了发展地球系统模式的计划，并推动实施。近期，一项引起国际地球科学界关注的进展是由ECMWF科学家尼尔斯·韦迪、彼得·鲍尔和彼得·杜本带领的团队与来自美国橡树岭国家实验室的瓦伦丁·安纳塔拉吉合作，在橡树岭实验室的“顶点”超级计算机上完成了世界上首个全球 $1\text{ km}$ 网格分辨率的季节尺度数值模拟计算，使用的模式为ECMWF集成预报系统（IFS）的改进版本。结果表明，即使在 $1\text{ km}$ 的网格间距下，经过改进的IFS静力数值模型也表现良好，这与动力气

象学中的通常理念有些冲突，如此高分辨率模型一般可能会选择非静力方案。这也表明在天气、气候预测领域中面临大量基本问题有待去探索和揭示，而通过模拟获取的大量精细化信息也为进一步分析研究提供了有力条件。

而从现实需求看，至少从业务能力和应用服务的改进两方面应予以关注。随着监测、预报技术的提升，远超越了20年前的水平，也进一步对技术突破和业务能力提升有了更高的要求，需要通过试验设计进行研究，探索如何克服具体难点。在大量新型探测信息的应用、资料同化技术、参数化方案的改进、多圈层耦合、一体化模式设计、高分辨数值模拟、无缝隙预报的实现、人工智能技术应用等领域，都面临诸多新问题需要解决。2019年6月17日，WCRP联合科学委员会（JSC）发布了新的10年战略规划（2019—2028年），提出了未来10年的四项科学目标，包括对气候系统的基本理解、预测气候系统的近期演变、气候系统的长期响应和构建气候科学研究与社会之间的桥梁（图6）。尽管这些新的目标是面向全球气候问题而提出的，但对于区域气候问题显然也有借鉴意义。

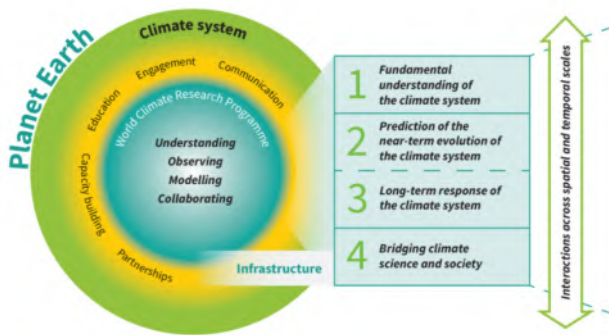


图6 WCRP战略规划2019—2028年四项科学目标

而应用服务方面需求也在迅速增加，自然灾害防御，气候变化应对，水资源与清洁能源的开发利用，生态、农业、城镇建设、环境、交通、旅游、商贸、工程等领域都存在与天气、气候环境密切关联，且量化、精细化、长时效等要求越来越高，缺少系统、扎实的科学试验则难以提供完好的解决方案。一个现实情况是近年来在长江流域、华南、青藏高原等地的科学试验一直在持续进行，而淮河领域的研究则不够活跃，这与其位于我国南北气候过渡带特殊地理位置的重要性显然是不相匹配的。

#### 4 结论

以上从对气候问题认识的提升到与HUBEX相关

的国际事件和研究计划的角度做了简要回顾，包括现实需求的推动、对科学问题的认识、重要会议的召开、相关组织的建立、重要科学计划的实施和进展等，并肯定了重启HUBEX的设想。从中可以看到实际问题的发生和对科学问题的探索推进了对天气、气候及相关领域研究的深化，如因干旱引起的大范围饥荒发生；因人类活动引起的环境、生态、气候变化问题；因不同圈层相互作用引起的地球气候系统变化的复杂性；又因系统的复杂性导致需要开展大规模、多领域的科学试验；对地球系统的整体研究需要各国的广泛合作；对不同时空尺度系统变化的认识又推进了一体化、无缝隙框架的建立等。而对于淮河流域而言，如何跟上需求和科技进展的变化，针对尚未解决的新老问题，在HUBEX已过去20年之际，重新设计下一步的规划和方案，已到了启动之时。

#### 深入阅读

编辑部, 1979. 世界气候大会宣言. 气象科技, (4): 8-9.  
 陈泮勤, 1995. 世界气候研究计划（WCRP）及其进展. 地球科学进展, 10(5): 488-491.  
 黄嘉佑, 1992. 长期天气过程的可预报性研究的进展. 气象科技, (3): 30-37.  
 汤伟, 2012. 世界环保四十年 纪念斯德哥尔摩会议专题——全球不平等、权势转移和环境治理. 绿叶, (5): 13-19.  
 张家诚, 1987. 世界气候计划简介. 甘肃气象, (1): 22-26.  
 赵柏林, 1992. 全球能量与水循环试验（GEWEX）. 气象科技, (2): 18-20.  
 周小刚, 罗云峰, 2014. “九五”基金重大项目“淮河流域能量与水分循环试验和研究”介绍与回顾. 中国科学基金, 18(4): 226-228.  
 Charney J G, Fjörtoft R, Neumann J, 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. Tellus, 2(4): 237-254.  
 Lorenz N, 1962. Deterministic nonperiodic flow. Journal of the Atmospheric Sciences, 20: 130-141.  
 Shukla J, 2009. Seamless prediction of weather and climate: a new paradigm for modeling and prediction research//NOAA. Climate Test Bed Joint Seminar Series. Camp Springs, MD: NOAA.  
 Wedi N P, Polichtchouk I, Dueben P, et al, 2020. A baseline for global weather and climate simulations at 1 km resolution. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, doi: 10.1029/2020MS002192.  
 WMO, ICSU, 1975. Global Atmospheric Research Programme: The physical basis of climate and climate modelling: report of the International study conference in Stockholm 29 July-10 August 1974. WMO, ICSU.  
 WMO, ICSU, IOC, 2005. World Climate Research Programme strategic framework 2005-2015: Coordinated Observation and Prediction of the Earth System (COPEs). WMO/ TD-No. 1291.  
 WMO, 2019. World Climate Research Programme Strategic Plan 2019-2028. [https://www.wcrp-climate.org/images/documents/WCRP\\_Strategic\\_Plan\\_2019/WCRP-Strategic-Plan-2019-2028-FINAL-c.pdf](https://www.wcrp-climate.org/images/documents/WCRP_Strategic_Plan_2019/WCRP-Strategic-Plan-2019-2028-FINAL-c.pdf)

（作者单位：中国气象局）