1 绪 论

为了规划未来 10 年即 2005—2015 年的工作，世界气候研究计划(WCRP)启动了一项新的战略计划。这不仅是为了应对在认识和预测地球系统的行为过程中产生的新的科学挑战，同时也是迎接 WCRP 为其成果的重要社会应用提供科学基础的新机遇。这项战略计划为：

地球系统的协调观测和预报（COPES)。

它的目标是：

促进对地球系统变率和变化的分析与预测，使成果能够在愈来愈广的实际运用中得到体现，为社会提供直接相关的、有益的和有效的服务。

WCRP 建立于 1980 年，是世界气候计划（WCP)(参见附录 A）的主要组成部分，由世界气象组织（WMO)和国际科学理事会（ICSU）共同组建。自 1993 年起，它还得到联合国教科文组织（UNESCO 中的政府间海洋委员会(IOC) 的资助。基于 WCRP 在过去 25 年所取得的进展，COPES 的开展是完全可行的。由 WMO、ICSU 和 IOC 组成的联合科学委员会（JSC)负责阐明 WCRP 的全部科学理念和目标，并负责组织开展各项研究工作所需的国际协调。在 COPES 的战略框架内，一些战略上的细节，包括主题、特定的目标和优先性还需在这个联合科学委员会和全部 WCRP 项目中继续讨论。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

WCRP成立之初的两个主要目标是：

- 确定气候的可预报性
- 确定人类活动对气候的影响

为实现上述目标，WCRP积极推动和协调一系列基础性研究工作，以了解气候系统中各个分量的行为、相互作用以及它们与更广阔的地球系统和社会需求的关系（见注释框1）。

注释框1　WCRP的特定目标

- 测量大气、海洋、陆地和冰雪圈的变化；
- 提高对全球和区域气候变率与变化以及相关机理的认识和理解；
- 评估全球和区域气候中有显著变化趋势的迹象；
- 发展和改进数值模式使其有能力模拟和评估各时空尺度上气候系统的可预报性并适应于业务预测；
- 研究气候系统对自然和人类引发的强迫的敏感性，并以此估计由特定扰动影响产生的变化。

1997年8月，在瑞士日内瓦召开的关于WCRP的科学大会中，结合以下迫切需要研究的优先领域，重申了WCRP的目标和研究目的：成果、效益与挑战（参见1998年6月发布的WMO技术文件第904号）：

- 评估全球和区域尺度上气候系统的从季节到年

际变化的本质和可预报性，为这些变化的业务预测提供科学根据，以更好地用于气候服务，从而有利于可持续发展。

- 检测气候变化及其成因，测算由人类活动引起的气候变化的量级和比率及其区域变率和相关的海平面升高值，并按要求提交 WMO 和联合国环境规划署(UNEP)的政府间气候变化专门委员会(IPCC)，联合国气候变化框架公约（UNFCCC)，或其他类似的公约。

WCRP 是一个内容丰富的科学计划，它为研究气候及其变率和变化的重要物理过程以及与物理过程相关的方方面面提供了广阔空间。这个计划通过制订研究项目、建立工作组以及开展聚焦于气候系统特定方面及其研究活动来实施。结合近年来针对每一领域中倍受关注的焦点问题，附录 B 描述了 WCRP 的这些研究项目、工作组和其他活动（见注释框 2)的工作情况。WCRP 实施 25 年以来，特别是在通过提倡和协调各国之间开展研究计划的过程中(见附录 C)，其各项工作已经取得了与预期目标相一致的许多重要成果。附录 D 概述了 WCRP 新提出的地球系统的协调观测和预报（COPES)战略框架的发展情况。

注释框 2　世界气候研究计划（WCRP）的内容和工作组

当前，WCRP 的核心计划是：

- 气候变率与可预报性研究（CLIVAR）；
- 全球能量和水循环实验（GEWEX）；
- 平流层过程及其在气候中的作用（SPARC）；
- 气候与冰冻圈计划（CliC）。

WCRP 联合组织了国际地圈-生物圈计划（IGBP）的核心计划、表层海洋-低层大气研究计划（SOLAS）。

此外，WCRP 有三个工作组：

- 数值试验工作组（WGNE，与 WMO 大气科学委员会联合）；
- 耦合模式工作组（WGCM，也作为 CLIVAR 的组成部分）；
- 表面通量工作组（WGSF）。

WCRP 与全球气候观测系统（GCOS）联合发起成立了气候系统大气观测组（AOPC）。

WCRP 与 GCOS 和全球海洋观测系统（GOOS）联合发起成立了气候系统海洋观测组（OOPC）。

作为地球系统科学联盟（ESSP）的成员之一，WCRP 也参与主办了一系列联合活动，参见注释框 4。

2 战略框架

2.1 社会需求和社会效益

气候／地球系统的定量化预测以及与其相关联的不确定性的现实度量所带来的潜在社会经济效益都是巨大的(见注释框 3)。预测的时间尺度可从几周到几十年，甚至达数十年至世纪尺度的气候预估。可信而可靠地量化所有时间尺度上极端天气和气候事件概率的能力对整个社会是至关重要的。通过其一系列的研究计划和工作组，世界气候研究计划（WCRP）正在努力探索，力求使气候预测能够用于保护和管理周围环境（包括水资源和农业），减轻灾害，从而促进人类的健康和安宁。气候变化预估为探讨如何适应气候变化和研究减灾工作的国际协商提供了依据。在第三部分中，我们将比较完整地讨论 WCRP 在气候信息和预测以及相应的服务和应用中的作用。

正如世界气象组织（WMO）新创建的“自然灾害预防和缓解计划”中所提到的，发展中国家尤其需要最优定量化的产品信息。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

注释框 3　气候/地球系统预测

随着在天气预报中一系列开创性工作的开展，依赖于初始条件的气候系统的定量化预测已经取得了长足的发展。正如在所有的科学中那样，不确定性的评估使得预测更为有效，而对有微小差别的初始条件或模式参数进行集合更增强了这种作用。预报产品包括许多实用数据（诸如表面温度、风、降水、大气化学状态、海洋状态、土壤湿度、雪盖、海冰和厄尔尼诺-南方涛动等）的平均值、趋势和统计特征等信息。预测的时间尺度从几周到几十年，甚至达数十年至世纪时间尺度。超过天气预报的时间尺度，预测的能力就取决于气候系统和外强迫的慢变过程。对于 10 年或者更长的尺度，预测能力就受到人类活动、各种排放物和陆面变化的影响。对这些人类活动影响所做的情景分析通常被看作是对未来的预估，而这种预估依赖于所假设的情景。

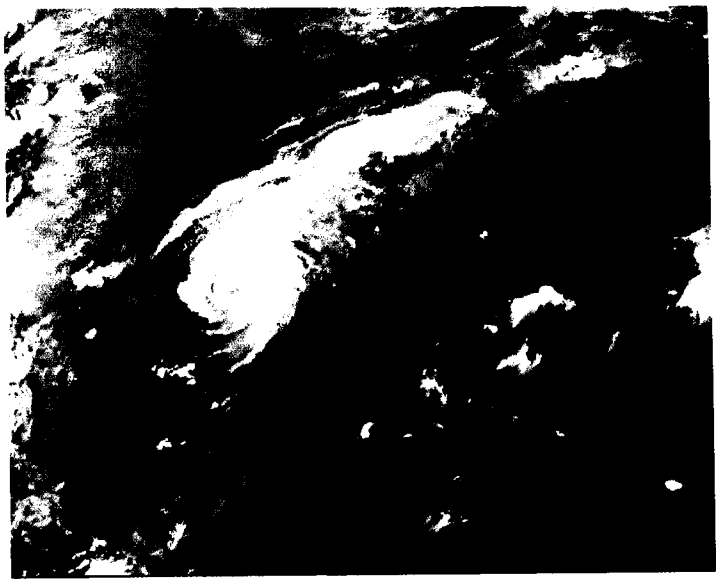


图 2.1　2005 年发生的卡特里娜飓风。WCRP的研究将有助于确定飓风和其他极端天气事件是否在未来变得更加频繁或更加强烈（源自美国 NASA 的地球观象台）

2.2　科学的挑战与机遇

最近，在研究、观测及计算技术领域已经取得了新进展，这使得可向社会转化的相关成果的范围大大地增加了。随着社会对气候预测的可靠性、与人民生命和财产安全相关的产品和服务以及更好的管理气候敏感系统和敏感地区的要求的日益提高，给 WCRP 下一个 10 年的工作提出了令人兴奋的挑战和机遇，尤其是为 WCRP 新

战略框架地球系统的协调观测和预报（COPES）提供了推动力和必要性。

无缝隙预测问题　目前对于连续预测问题有一种新观点，即应该减小短期预测和长期气候预估之间的区别。年代和世纪尺度的气候预估将逐渐演变为一个初值问题，这需要知道大气圈、海洋圈、冰雪圈和陆面（包括土壤湿度、植被等等）的当前观测状态，以便做出反映最新技术水平的年代和年际预测以及最优的气候预估。然而，气候预估也依赖于人类活动对气候系统影响的情景分析和其他一些因子如太阳变化和火山爆发等。这些事件都是不可预测的，但是如果观测到了就可以立即加以考虑。我们知道短期气候和天气会对长期气候行为有重要的影响。另外，较长时间尺度气候变化的区域影响主要会通过较小尺度特征的变化（包括一些极端事件）而被社会所感知。认识到这一点，气候模式可以用尽可能高的分辨率来运行，而这样的分辨率几年前还仅仅用于最好的天气预报模式之中。现在越来越注重模式的追踪能力、描述结构的能力、参数化方案的好坏以及模式应用于不同时间尺度模拟时的性能。尽管预测问题本身是无缝隙的，但对于这个问题最实用的方法是用统一的标准来描述它：针对不同的时间尺度和现象，模式可以有很大的通用性但又把侧重点放在系统的不同方面。

更广泛的气候／地球系统预测在 WCRP 范围里发展和使用的详细物理预报模式耦合了大气、海洋和陆地系统，并逐渐扩展成为包括大气化学、有植被演化的碳循环和相互作用的海洋生态系统的模式。可以预期，与地

球系统的其他分量完全耦合的模式可以像海气耦合模式中发现的那样，有时可以产生完全不同的气候行为。

气候／地球系统的可预报性　　天气预报发展中的一个重要基础是混沌理论和可预报性概念的发展。发展制作更广泛的气候／地球系统预测的一个基本方面就是更深入地拓展这个思想，用以提供一个坚实的基础，为尝试性的预测以及相关技术提供理论支持。模式广度的增加可能导致其中组合的不确定性，并因此增加了模式预测不确定性的可能，这种可能给我们提出了一个新的挑战，需要我们提出新的理论和观测方法。

气候系统行为分析　　评估已经发生的气候事件、定义气候系统的异常和趋势以及确定这些事件受到人类活动和自然变率的影响程度，这是气候系统行为分析中持续的和十分紧迫的需求。

WCRP 在社会经济问题上的应用及 WCRP 分析和预测有效性的证明　天气和气候信息以及从几周到季节时间尺度的预测服务和产品正在越来越多地被人们所使用，然而改善这些产品的性能还有很多工作要做。对于更长的时间尺度，政府间气候变化专门委员会（IPCC）需要尽可能好的气候科学和气候预估来对其定期评估提供科学基础，从而对联合国气候变化框架公约（UNFCCC）的成员国提供建议。气候变化的大部分影响依赖于它的区域表现，因此，对于更为可信的这些产品来说，政治的和社会的需求是很大的。

- 逐渐增加的新型数据流　　已经发射或即将发射的环境卫星将给气候研究提供海量的有效资料

需要全本请访问 www.ertongbook.com

（见图 2.2）。由 WCRP 早期实施的世界海洋环流实验（WOCE）发展而来的、现由气候变率与可预报性研究（CLIVAR）共同资助的海洋浮标 Argo 观测系统，也正在成为海洋资料的一个越来越重要的数据源和正在发展中的气候海洋观测系统的一个主要组成部分。这些资料和其他实地观测资料正在被整合到全球一体化对地观测系统（GEOSS）的框架下，以减少冗余观测并优化信息产品和服务。他们必将应用于后续研究，并转化为经过质量控制的气候资料集，这就要求不断加强气候资料观测的质量和连续的数据校



图 2.2　计划 2005 年末发射的 CryoSat 卫星，可以提供用来确定大陆冰盖和海洋浮冰厚度变化的资料（源自欧洲宇航局（ESA））

准知识。随着观测系统的发展，还必须保持统一的国际标准的精确度（参见 2.3 节）。

- **计算能力的增强和有效性** 计算能力的有效性是指现代计算机系统具有这样一种能力，它可以运行几公里分辨率（许多实际应用所需要的分辨率）的全球模式，运行用于估计不确定性的庞大模式集合，运行利用完全耦合全球气候模式对古气候进行的模拟，以及运行分辨率日益增高的高分辨率区域模式以应对在区域水平上制定适应政策和措施的需求（见图 2.3）。



图 2.3 功能强大的新型计算机系统，如日本的地球模拟器将可能在气候模拟中发挥主要作用（ 源自地球模拟器中心 / 日本海洋科学与技术中心(JAMSTEC)）

- **运行全球模式研究团体数量的增加** 由于气候问题的重要性，目前更多的研究小组具有运行气候模式的能力，这使得我们可以用多模式集合来克服单模式集合中存在的系统缺陷。这也增加

了证明模式行为多样性和理解这种多样性原因的必要性。

- 与日俱增的模式复杂性和真实性　高分辨率模式正在发展，它们包含详尽的物理参数化过程，具有解析云的能力，还包括对其他相关气候过程的详细描述。
- 应用于地球系统的现代资料同化技术　数值天气预报已经表明，通过结合足够精确的预报模式对各种形式资料的分析可以获得气候状态的最优值。这种方案可以实现对基于过去和现在资料的最优大气状态的评估。在这个评估过程中，能够获得关于模式缺陷的有价值信息。将资料同化应用于耦合气候系统的各个分量以及更加广泛的地球系统的设想逐渐成为可能。

加强协作的益处　考虑到 WCRP 对世界气候预测和预估的必要性，拓宽气候／地球系统意味着与国际地圈-生物圈计划(IGBP)和其他地球系统科学联盟（ESSP）的计划（见注释框 4)之间进行更紧密协作和配合的需要。预测问题及其很多应用的无缝隙特性也需要与 WMO 的世界大气研究计划(WWRP)项目全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX,见注释框 5)密切协作。为了确保 WCRP 相关科学能以适当适时的方式应用到日益增长的实际应用中，也尤其需要与世界气候计划的其他主要部分（参见附录 A）紧密合作。关于这些协作以及其他合作的讨论参见 2.7 节。

注释框 4　地球系统科学联盟(ESSP)

ESSP 由如下全部源于国际科学理事会（ICSU）的全球变化计划所组成：

- 世界气候研究计划(WCRP)
- 国际地圈-生物圈计划(IGBP)
- 国际全球环境变化人文因素计划（IHDP）
- 生物多样性计划（DIVERSITAS）

ESSP 目前设立了四项联合计划：

- 全球碳计划 GCP)
- 全球环境变化与食物系统（GECAFS）
- 全球环境变化和人类健康
- 全球水系统计划(GWSP)

WCRP,IGBP 和 IHDP 也联合发起了全球变化的分析、研究和培训系统（START）。

有关 ESSP 和 START 的更详细的讨论分别参见附录 B 以及其中的 B.10 和 B.12 节。

注释框 5　THORPEX：一个世界天气研究计划

全球观测系统研究与可预报性试验（THORPEX）计划，是由 WMO 大气科学委员会（CAS）在 2003 年 5 月召开的第十四届世界气象大会上提出建立的。这是一个为期 10 年的国际合作研究和发展计划，目的是加快改善从一天到两周的强影响天气过程的预报精度，满足社会、经济和环境各方面利益的需求。它的研究主题包括如下几个方面：对天气系统演变和可预报性的从全球到区域尺度的影响、全球观测系统的设计和论证、多模式集合预报、观测资料的获得和同化以及天气预报水平的提高对社会、经济发展的促进作用。这一研究是 WMO 世界天气研究计划（WWRP）的组成部分，同时也是由 JSC/CAS 的数值试验工作组（WGNE）来支持的。

通过 THORPEX 这一研究计划，可以预期会对大气动力过程和可预报性有更深入的基本性的理解。其中需要确定可预报性究竟在多大程度上依赖于诸如季节内振荡中热带对流系统的变化等较大时空尺度的现象，以及研究提前预报介于 1～2 周天气的能力。另一个可以预期的结果是，这一研究计划能大大促进全球和区域天气预报系统的发展。正因如此以及其他一些因素，THORPEX 和 WCRP 这两个研究计划之间正在发展紧密的合作关系。

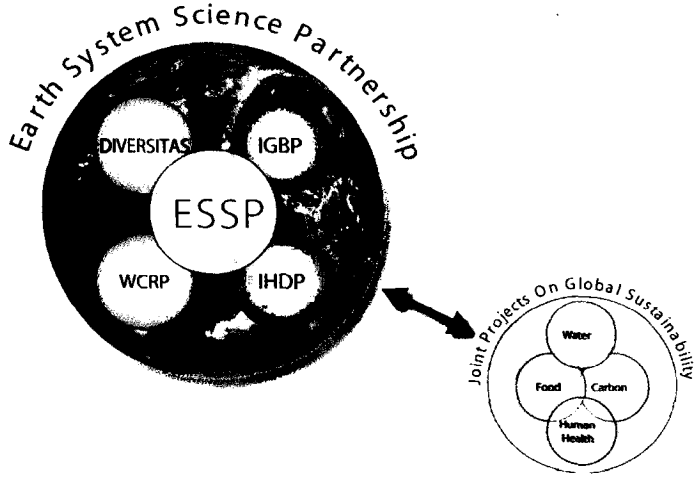


图 2.4 地球系统科学联盟(ESSP)的组成及其全球可持续性联合计划示意图

为了适应社会对准确可靠的气候预测、相关应用以及新的机遇和挑战的日益增长的需求，同时也为了使 WCRP 的研究活动重新聚焦于其最初制定的两大研究目标，WCRP 已经采用地球系统的协调观测和预报(COPES)作为指导其在 2005—2015 年间研究活动的战略框架。这个新计划的名称是很恰当的：“协调”是 WCRP 所给予其科学的一个本质因素；“观测”和量化的“预报”,以及对过程的理解是 WCRP 科学性的支柱;“地球系统”这一概念则表达了由于气候预测和预估的需要而不断扩展气候系统的范畴。

作为 WCRP 新的战略框架，COPES 的研究目标是：促进对地球系统变率和变化的分析与预测，使成果能够

在愈来愈广的实际运用中得到体现，为社会提供直接相关的、有益的和有效的服务。

这一目标不仅完全体现了 WCRP 的两个总目标，而且在做法上也与预报问题的无缝隙特性相一致。通过 COPES 研究框架可以做到：

- 对 WCRP 广泛的研究计划和科学活动进行整合；
- 确定新的具有挑战性的科学研究问题；
- 方便 JSC 对有助于达到 WCRP 目标的研究进展进行总结和评估，并将意见反馈给正在进行的研究项目；
- 在 WCRP 最终目标的基础上，确定具体的子研究目标；
- 在 WCRP 框架下指导正在进行的科学活动，并且激励新的科学研究活动；
- 加深公众对 WCRP产品的科学和社会价值及其重要性的认知和了解。

WCRP 的各项目将继续在 WCRP 科学研究的执行中扮演重要角色。 COPES 作为其战略框架，一方面是以 WCRP 现有的（以及将来的）各项具体研究项目为基础，另一方面也给 WCRP 的这些项目提供背景。只要可能，新的实验、新的研究方向或新的观测活动都将通过目前 WCRP 研究计划的结构来实现，而正如其在过去一直做的那样， WCRP 的结构在实践中也是不断发展和完善的。

2.3 COPES 的观测议题

COPES 的目标使得在研究中要使用多种不同类型的观测资料（见图 2.5 和图 2.6）。比如，研究重要气候变量的观测是如何使不同时空尺度的信息不断增加以及如何提高不同时空尺度气候的可预报性。为此，将观测分为以下三种类型是很有益的：

(1)过程研究观测 ——为了理解关键过程，需要增加连续观测的网络数目。



图 2.5 为了研究赤道太平洋地区海-气之间气体传输，美国国家海洋和大气局（NOAA）在这一地区应用 Ronald H Brown 号船只进行了扰动流的测量

需要全本请访问 www.ertongbook.com