

破解谜题:研究气候变化对全球的影响(I)

美国国家科学基金会

编者按 气候变化是 21 世纪影响人类生活的最重要的因素之一,但气候变化的原因,特别是气候变化与人类活动之间的关系问题仍然是科学中的未解之谜。美国国家科学基金会(NSF)高度重视气候变化对全球的影响研究,其对全球变化研究的资助遍及几乎所有部门,包括地球科学部,极地计划办公室,生物科学部,社会,行为与经济科学部,工程学部,国际合作办公室,数理科学部,教育与人力资源部,网络基础设施办公室,计算机及信息科学与技术部等,资助工作取得了丰硕的成果。2009 年 8 月,NSF 主任办公室联合上述资助部门,发布了题为《破解谜题:研究气候变化对全球的影响》的报告,从天空、陆地、冰域、海洋、生命和人类等 6 个方面探讨了全球变化研究中的重要问题,展示了 NSF 资助的相关研究取得的主要成果。

1 绪论

1.1 地球的气候变化

说到天气与气候的区别,科学家常一语概之:“气候是你所期望的,而天气是你实际得到的。”气候是某一地区天气的长期均值^①,是影响生态系统健康的一个要素。虽然多数物种经得住天气的骤变(如热浪、洪水、寒潮的袭击),却往往因经不起气候的长期演变而灭绝。全球气候是指世界各地天气趋势的平均状况。诸多研究表明,总体而言,地球的气候在变暖。

研究表明,使用化石燃料、农耕及土地利用等人类活动,是以往 250 年来温室气体浓度不断上升的主要原因。此外,气溶胶的活动和地表变化也在改变着地球的气候,极有可能自 1750 年以来,人类活动对气候产生了“变暖”的净效应。了解气候系统的人为变化及其后果,是美国国家科学基金会(NSF)开展气候变化研究的主要动因。

NSF 资助的气候研究发现,气候变化的迹象几乎遍及全球每个角落——从冰天雪地的两极到赤道地区的各种生态系统,无一幸免。地球的气候影响着地球的天空、陆地、冰域、海洋、生命和人类,这些因素反过来又影响了气候。

为了弄清气候变化之谜的方方面面(包括已知的、未知的以及人类防备未来之道),必须对所有参与构成地球气候系统并与之相互作用的物理系统、自然系统和人类系统的所有领域进行全面的研究所。

研究人员在合作揭开气候之谜的过程中,也改变着人们从整体上了解地球系统的方式。科学界已经意识到,为了研究科学或工程中跨领域的问题,必须进行跨学科研究。实际上,由于地球气候的复杂性,气候研究几乎涉及科学、数学及工程的每一个领域。

跨学科研究是 NSF 对科学研究最重要、也可以说是最具

影响力的贡献——为了应对各研究共同体的不同需求,NSF 积极支持那些吸收了跨学科专家的研究队伍。与其他承担科学任务的政府机构相比,NSF 的条件得天独厚——其资助的研究活动、基础设施和教育培训涵盖了科学和工程领域的所有学科。

侧重于资助前沿研究的 NSF,在支持各联邦机构应对气候变化的广泛努力方面也处于有利地位:监控和应对气候变化及气候变率(climate variability)^②的美国政府各职能部门为了开展这项重要工作,需要创建强劲而富有活力的基础,NSF 资助的基础研究正是创建这一基础的关键。基础研究有力地支持了我们对地球气候变化的认识,在发现新知、开发工具以协助人类应对全球气候变化的影响方面,还将继续发挥关键作用。为了协助美国及全世界应对全球气候变化的挑战,NSF 必须继续大力支持美国学术界的开创性研究和世界级的教育计划,以继续培育新一代人才,激发新的思想。

NSF 的工作人员和资助者常常彼此合作,并与其他政府机构和国际组织联合,强化气候变化领域的研究目标,探索科学问题的未知答案。他们积极参与美国“气候变化科学计划”(CCSP),并为该计划发布的大量的《综合评估报告》撰文。作为美国南极研究的领军机构,NSF 负责协调与推进其自身以及其他职能部门资助的近极地研究活动,如有关全球气候变化的一些关键观测数据的采集。

数十位受 NSF 资助项目的研究者,包括 40 多位来自美国大气研究中心(NCAR)——该中心是受 NSF 资助的、堪称气候研究领域国家财富的研究机构——的研究者,也已加入联合国政府间气候变化专家委员会(IPCC)。在最新的 IPCC 评估报告的形成过程中,不少受 NSF 资助项目的研究者担当了领导角色。他们还将继续按照报告所确定的研究目标进行

本文转载自国家自然科学基金委员会政策局编《学科政策动态》2011 年第 4—6 期,由中国科学院国家科学图书馆汪凌勇、黄龙光译自 <http://www.nsf.gov/news/nsf09202/nsf09202.pdf>,国家自然科学基金委员会龚旭、韩宇校。

① 严格而言,气候的定义是:相关的量在一定时期内,短至几个月,长到数千年乃至数以百万年计的均值和变率,这些变量的均值通常为 30 年期。

② 气候变化是指气候平均状态在统计学意义上的巨大改变,或者持续较长一段时间(典型的为 10 年或更长)的气候变动,以几十年为统计时段的差异(平均值、距平值);而气候变率是指在统计时段内各个年份(年代)之间的差异——校者注。

研究并取得积极进展。

NSF 资助的有关气候变化减缓策略和适应策略的前沿性基础研究(包括地球工程学),在未来将日趋重要。NSF 强调研究的探索性、基础性和潜在的成果转化性,使其在为各职能部门、各大公司和其他组织确定可供采纳或探讨的最有前途的策略方面,自然而然地成为领军机构。NSF 对经济学研究的支持,包括其资助的排放量交易方案以及将经济理论融入气候建模的研究,将有助于为政府气候政策的确定提供科学依据。

NSF 的投资对我们认识地球上气候的过去、现在和可能的未来发挥了举足轻重的作用。在 1950 年成立之初,NSF 就资助了 Charles David Keeling 等气候学家的研究。Keeling 的研究数据表明,大气中 CO_2 的浓度在升高,这被认为是支持“人为气候变化说”的早期关键证据。NSF 数十年的项目资助使人类在认识气候变化及其变率的原因和后果方面,取得了许多基本发现和重大进展,诸如古气候记录、计算的气候模型以及气候变化的经济模型。未来全球的注意力会转向应对和治理气候变化的影响,届时 NSF 资助的基础研究将继续为包括能源和地球工程在内的诸多领域的技术进展提供必要的平台。

1.2 综合各方面的研究

地球变化的证据已远远越出了某一科学或工程领域的范畴。

生态学家注意到他们所研究的物种栖息地的明显变化:某个物种分布的变化,首次吐芽或首次开花日期的改变,植物生长率的变化,甚至出现某些适应气候变暖的演化迹象。

海洋学家记录到了海水温度的升高和海洋酸度的增大,这些变化改变了海洋食物链底层生物的特性,有些数百年生生不息的珊瑚礁因海水温度超出其生存能力而毁于一旦。

极地学家观察到北极海冰大片消融,北半球夏季自由流淌的溶水量之大是以往很难见到的。冰川学家则见证了那些庞大的冰架在几天之内就先后崩塌,坠入海中,成为冰山,随波逐流;以往人们认为,以其冰架之巨,除非出现灾难性的环境巨变,否则难以撼动。

社会学家记述了土著居民的惶惑和不安。遍查代代相传的文化认知,像人们今日所遭遇的环境变化,的确于史无考。

通过年轮数据、冰核数据和其他历史佐证的分析,古气候学家发现,当今 CO_2 的浓度和地球的平均温度,均已接近数十万年一遇。

为了降低排入大气中 CO_2 的总量,具有创新精神的科学家和工程师闻风而动,响应号召,积极寻找替代能源。计算机专家创建新工具,以协助地球科学家、决策者及公众认识全球气候变化;社会学家则研究影响环境的人类决策和行为;通过研究土地利用、城市规划、建筑设计和人为气候变化相关经济因素等问题对于气候变化的人为影响以及人类的应对策略问题,科学界开始触及一些更微妙、更本质的问题。

本报告讨论的是气候变化领域的研究人员所面临的若干重大问题,以及 NSF 所资助的项目如何研究这些难题。为

了预测未来地球的气候,正在开发复杂的计算机模型并使之日臻完善。气候模型精度的提高,得益于分布在海洋、极地、陆地以及近地轨道上的观测网络的气候条件观测。地球气候的历史记录是洞悉以往气候周期变化机制的重要资料,也是精细调整计算模型以精确模拟以往气候的得力助手。但了解气候并不只是为了追溯历史:随着对地球气候变化机制认识的深化,我们也能更好地应对全球气候变化及其变率的影响。借助社会科学、经济学和行为科学,我们正在研究人类如何成为影响气候变化的内在因素,以及如何调整人类的行为,以减缓对地球气候的影响。为了减少人类活动所导致的大气碳含量的增长,物理学家和工程师正在研究产生、储存和使用能源的替代性方法。对于未来人类可能需要的用以消解各种气候变化效应的工具,科学界也在构筑其科学基础。

1.3 计算工具

未来对地球气候的预测,有赖于先进的计算硬件、计算软件和网络能力的开发。对计算资源需求的增长,源于气候模型的日益复杂化,如今这类模型的发展是将越来越多的地球气候系统的物理参数囊括在内。为此,计算机的硬件系统不仅包括更大更快的超级计算机,而且还引入了全新的计算机架构(如可并行处理大量数据的数据中心)和新的设备(如智能传感器、智能电话及机器人),用以采集数据。为了充分利用硬件方面的进展,软件的可靠、先进与智能化至关重要。软件的发展应包括日益繁杂的算法、新的数据表达法,以及新的编程模型和语言。新的网络工具将不仅可以连接计算机和研究人员,还是采集远程数据的关键,这些数据来自远程传感器和仪器,诸如卫星、浮标和环境传感站。观测工具的网络化对气候认识的深化至关重要,这一点在下文将会论及。网络化挑战科学家和工程师——需要将通过各种平台、各种网络采集到的巨量数据整合起来。

1.4 观测网

新的观测能力、网络能力和计算能力扩大了我们研究与认识环境乃至世界的范围,利用观测网,既可搜集创建未来气候模型所需的数据,又可进一步认识气候变化影响全球动植物的机制。

为了满足研究共同体日益增长的数据需求,NSF 扩展其观测网架构,其中有些是国际合作的高精尖网络,如“国家生态观测网”(NEON)和“海洋观测计划”(OOI)。这类网络利用了网络基础设施和计算连接技术方面的最新成果,属于 NSF 的核心实力。如“临界观测网”(Critical Zone Observatories)等其他观测网尚在起步阶段,但已为未来的观测方法提供了极为重要的试验场。

NSF 与各政府机构及国际组织合作,构建观测架构,包括构建整体监测地球的系统。例如,“全球综合地球观测系统”(GEOSS)这个跨机构且跨国界的系统就能协调各方的观测,改进数据管理,加强数据共享。NSF 建立的陆基观测系统作为卫星数据的补充,加入了美国国家航空航天局(NASA)、国家海洋与大气管理局(NOAA)和国家地质勘探局(USGS)的星基

观测计划。

气候变化无国界,其破坏性影响首先出现在发展中地区。气候变化的研究始终需要国际合作,气候变化对科学构成了全面而巨大的挑战,国际合作在所难免,NSF 积极鼓励美国研究人员及其国际同行之间开展国际合作。

1.5 解开气候之谜

人类对地球的认识,目前可能是增长最快的时期。前沿性的基础研究,特别是跨领域多学科研究的成果,对于管理未来社会所需要的决策支持系统的创建至关重要。

为方便起见,本报告对地球系统的各部分分别加以论述,先讨论地球的大气、海洋和冰域这3个物理系统,再论述地球生命,最后涉及的可能是最活跃且最具挑战性的部分——人类活动。需要指出的是,气候之谜的各个部分是相互联系的,为了全面认识气候的变化和变率,每个部分都必不可少。本报告的正文部分重点讨论若干重要计划和研究领域,每一部分都涉及一些我们精选的研究热点,以期概述 NSF 气候变化项目的广度与深度,但这些研究远非 NSF 气候研究的全部。实际上,NSF 每年都要资助数以千计的项目,从短期研究、个人研究直至大规模研究中心的长期研究和大型设施长期的环境观测。其中许多项目涉及地球气候系统的某些方面,有些项目则在构建未来气候变化研究崭新思路的基础。

Vannevar Bush 和其他最初将 NSF 的理念于 1950 年变成现实的有识之士,当时无法预知计算机和网络对科学与工程研究究竟会带来哪些具体的影响;正如他们一样,我们目前也无法确知未来究竟会出现哪些技术,可以用于气候变化研究以及用于减缓策略和适应策略。但我们的确知道:我们采用的研究模式已被证明是一条正确的道路。

2 天空

地球上将海、陆、冰、生命以及人联系在一起的,就是大气。大气永不停息地流动着,这种状况就形成了天气和气候。具体而言,空气的密度、温度、湿气的构成、风力状况、化学构成和气溶胶含量等许多大气变量的综合作用决定了天气和气候。气候系统各部分之间无不相互影响,因此,预测未来的天气和气候殊非易事,难怪不少世界级的气候及大气科学的领军人物均精通混沌理论。

NSF 资助各种层次的大气研究,从个人项目到大型研究和教育中心的研究。NSF 资助的名为“天空”的研究领域,涵盖了整个大气范围并有所延伸:从对流层(低层大气)直至太阳(高层大气及日地过程)。NSF 的一项大型投资就是位于科罗拉多州波尔得(Boulder)的国家大气研究中心(NCAR),该中心进行许多重要的大气科学研究,包括“通用气候系统模式”(CCSM)计划以及“高分辨率天气研究与预报(WRF)模式”计划。CCSM 是美国学术界最重要的全球气候模式,该模式也为联合国政府间气候变化专家委员会(IPCC)报告的相关研究成果做出了重要贡献;WRF 与全球通用气候系统模式配合使用,以模拟和预报各区域及更小范围内的气候变化。该中心

的研究人员利用模型、雷达、气象观测气球以及卫星数据等一系列先进工具和技术,致力于弄清全球性和区域性气候变率和变化的影响。

2.1 气候建模

为了模拟影响地球大气诸多因素之间的相互作用,气候研究者致力于研发气候模型,来自海洋、生态系统、陆地、雪域和冰层的各种因素作为“系统输入”。气候系统的各个部分高度复杂,密切相关,必须同时考虑,统一建模。将实际现象转化为复杂的数学描述,这样的气候模型可用于检验假设,进行预报,并对环境变暖的减缓策略进行评估。

随着研究者对气候系统复杂性认识的不断深入,他们致力于将这一复杂性体现在气候模型中,这需要不断强大的超级计算能力。自 20 世纪 50 年代诞生真空管计算机以来,研究人员一直在采用最新的计算技术来增强气候建模的能力。如今模型之复杂令人瞠目:对气候自然波动和周期性的模拟,短到每小时的状况(如大型锋系)或每个月的情况(如喷射气流的变化),长至数十年,甚至几百年(如海洋环流和冰川类型的演变)。

随着气候模型的成熟,其空间分辨率得以提高,这导致计算需求的激增——计算复杂度的提升的确可以提高模型的总体精度,但这也需要日益精密的软件和日益庞大的计算资源。作为分析、可视化和预报用途的算法和数据结构的软件,必须跟得上物理概念日益复杂的步伐,这对设计模型的科学家和工程师构成了严峻的挑战。

为了检验模型预报未来气候的精度,气候建模者将模拟结果与采自冰芯、沉积岩心、树木年轮和其他类似数据源(详见本报告“冰层”和“陆地”这两部分)的历史记录进行对比;也可模拟季节变化的年周期,并按年度比较预报的气候与实际气候。

2.2 通用气候系统模式

作为世界上大气环流的主流气候模式之一,通用气候系统模式(CCSM)在各种综合性气候模式中别具一格:它不为某个机构所独有,而是属于整个气候共同体。国家大气研究中心将其底层计算机代码在互联网上免费公布,世界各地研究机构数以百计的专家都在携手合作改进 CCSM,全世界的研究者均可利用 CCSM 进行气候实验。

NSF 和美国能源部共同资助的 CCSM 将继续得到改进并做出适应性调整,以回答研究共同体关于气候的各种问题,并容纳下一代建模所需的各种复杂过程。CCSM 用户的最终目标是将地球上所有自然和人为的过程与全球气候之间的相互作用全部包括进来,连微小的反馈环也不放过。例如,未来的气候模式或许能估计气温偏高时北半球森林的健康状况和地理分布,并监测那些经过景观改造的森林吸收大气中 CO₂ 的能力。气候模式研究还有一个重要目标,即在全球气候变暖的背景下,预报飓风、局地强风暴等极端天气事件的频度和强度。

研究者希望利用 CCSM 高信度地预报全球气候和各区域

气候,有价值的区域气候预报有助于决策者解决某些作物适种区的确定、北冰洋海冰存量的预测等问题。CCSM 预报也可协助商界领袖估计未来的状况,如家庭供热、制冷对能源需求的变化,以及随着作物生长季的变化调整种植计划。

CCSM 等众多全球尺度气候模式近期的一个头等目标,就是发展一种在 10—20 年的时间尺度上预报未来气候及其影响的能力,而且预报的空间范围应达到对未来决策者具有价值的尺度,为此,需要更多的信息、更高级的观测架构和更多的计算资源。

就与气候建模相关的大气研究,下面介绍一些关键性的前沿研究领域。

2.3 大气研究前沿

NSF 资助的许多研究都致力于深化人们对地球大气的物理学、化学和动力学的认识,有些 NSF 的受资助者则致力于弄清大气中各种气体和颗粒物的全球自然周期性,这些领域的探索为气候模型的发展和测试提供了宝贵的资料。

2.3.1 气溶胶研究

气候研究必须首先确定大气的组成,NSF 大气研究的项目就是围绕大气的成分来安排的:大气中存在的分子、分子所经历的反应及其对气候系统能量的影响、包括人为污染物在平流层中臭氧的化学分解过程中所起的作用。

近年来,研究者日益关注气溶胶在大气的物理构成和化学组成中所起的作用。气溶胶是悬浮于大气中的细颗粒物和液滴,其产生既可源于自然系统,又可来自人类活动,如燃料的燃烧。气溶胶比分子大,由于其大小和物理性质各异,有些散射阳光,有些则吸收阳光。气溶胶还参与大气中的化学反应,可作为形成云的种子颗粒。

因此,为了建立气候模式,必须详细了解气溶胶——气溶胶怎样影响进、出大气的能量,如何影响大气中总的化学成分。研究者特别感兴趣的是彻底弄清来自空气污染的气溶胶是怎样影响地球气候的,如:发展中国家工业和交通的增长怎样带来气溶胶的增加,这样形成的气溶胶其性质和分布方式究竟如何。

受 NSF 资助项目的一个特别重点是大气棕色云(ABC)。大气棕色云是由化学物和气溶胶混合而成的棕色污染物云团,经常出现于东南亚,源于燃料燃烧、机动车尾气排放、工厂废气排放等人类活动。

强有力的研究证据表明:亚洲污染所形成的 ABC 正在增大冬季太平洋风暴的强度。

2.3.2 云的研究

科罗拉多州立大学的大气过程多尺度建模中心(CMMAP)是一个新建的 NSF 科学与技术中心,致力于云的研究。普通人很熟悉云这种大气现象,但建模者却很头疼:其形状不断变化、时空尺度多变(云在水平、垂直方向上的尺度小到几百米,大到数千米),在模型中很难描述。

云既反射阳光,又吸收地面热辐射,在气候建模中至关重要。IPCC 第四次评估报告认为,气候模型中“最大的不确定

性仍源自云反馈”。CMMAP 致力于改进气候模型中对云的表征,这种方法称为“多尺度建模框架”(MMF),可为其他复杂天气变量的建模提供范例。MMF 将较小空间尺度的云模型嵌入较大尺度的气候模型中,采用这种“模型套模型”的方式,不同尺度上模拟的物理过程之间可相互作用,这样结合而成的模型,其复杂度和精度均有提高。“模型套模型”是个很好的模板,可望将其他小尺度现象并入全球尺度的气候模型中。

2.4 风暴

地球上海水面温度的上升可能会增大海上风暴的强度,目前的气候模型无法模拟飓风,人们对气候与飓风频度、强度和发生地之间复杂的相互关系还不是很了解。随着全球气候模式的进一步改进,将来也许能建立起飓风行为的某些方面与人为气候变化之间的联系。此外,利用诸如得克萨斯大学建立的太拉网格巡察者(TeraGrid Ranger)这样功能强大的计算机系统,将能更精确地模拟风暴行为,以协助墨西哥湾沿岸地区制定出更有针对性的应对飓风的计划。

就美国形成其他强对流天气的大尺度气象条件,NSF 资助的利用气候模式进行的研究表明:由于气候变化,形成强雷暴的天数可望增多。

2.5 地球系统中的相互作用

大气与大气系统中,大气之外的每一部分之间的物理化学相互作用非常重要,需要继续深入研究。

2.5.1 海洋

地球系统各组成部分中,对大气影响最大的可能就是占地球表面 71% 的海洋。海洋好比是 CO₂ 的“地漏”,可在水-气界面处溶解部分 CO₂。此外,海洋也为浮游植物和其他生物提供了生存环境,这些生物的组织中吸收了碳,并随着生物体的死亡将碳带至海底。

海洋与大气之间的水交换,以及与之伴随的能量交换,形成了全球的天气和气候。海洋是气溶胶前体(形成气体颗粒物或液滴的化学变化的起始物质)的一个主要来源,形成的气溶胶在气-水界面处进入大气。天空与海洋之间这种复杂的“取/予”关系是气候建模的关键,建模计算需弄清怎样描述海洋的作用(海洋对气候的作用详见本报告“海洋”部分)。

2.5.2 冰雪

地球系统的另一个重要组成部分就是所谓的“冰冻圈”(cryosphere),即地球上冰雪覆盖的区域,尤其是极地地区。亮白的冰面是理想的太阳光反射器,将 75%—95% 的太阳射线返回太空,太阳辐射中被反射的比例称为地表反照率(albedo)。相比之下,陆地和水面只能反射不到 30% 的太阳光(地表反照率的讨论详见本报告“冰”这一部分)。

太阳光未被反射回太空的部分,则被照射的表面所吸收,使其升温。因此,对气候建模至关重要的,就是掌握地球所覆盖冰面的面积和位置,包括极地冰、冬季覆盖北半球大部分区域的降雪,以及世界各地高山冰川区终年不化、历年积累的冰雪。由于冰易形成正反馈(冰面的融化露出吸热性的地表和海水,增大了这些表面的暖化,这又反过来使更多

的冰融化),气候模式必须准确地捕捉冰、雪的效应(地球冰雪的气候效应详见本报告“冰”这一部分)。

2.5.3 生命与陆地

地球生命的存在,显著改变了大气的成分。地表所覆盖植被的多少直接关系到地表的“固”碳量和从大气中去除碳的量。某一地区土壤中的微生物,也可对该地区碳和其他化合物的排放产生明显的累积效应。植被影响太阳能的吸收量,如阴暗的森林要比干燥的草原吸收更多的阳光。

植物也会影响地面和大气之间的水循环,用地性质的改变(如林地转为农田)会显著影响该地块与大气之间碳循环、热循环和水循环的方式。以往的气候模式往往过于简化地面覆盖和土地性质的影响,今后的气候模式会充分考虑这些效应,以提高气候预报的精度。上述系统与大气之间相互作用的详情,参见本报告“土地和生命”部分。

2.6 观测网

大气科学在本质上是观测性的,虽然日常的大气研究大都在计算机上进行,但必须使用来自现实世界的输入值。建模者必须了解所研究地区地面覆盖(如冰面、植被)的变化,只有对各战略性气候地区进行准确持续的观测,才能提高气候模式的精度。海上观测设施可协助建模者跟踪影响气候状况的参数,如洋流、温度趋势和盐度(详见“海洋”部分)。卫星观测也攸关建模,其观测内容从格陵兰和南极的冰盖到赤道地区土地使用的大趋势,无不尽收眼底。

2.7 结论

50年前,Charles David Keeling在Roger Revelle的指导下开始记录夏威夷莫纳·鲁阿(Mauna Loa)地区的CO₂水平。自此50年以来,为了认识地球大气的变化,我们历经艰辛。如今,对于形成区域气候和全球气候的各种大气过程的认识和预报,依然任重道远。以下介绍NSF“天空研究”计划下各主要项目的研究进展,这些项目大小各异,范围不同,但都有助于推进人类的气候认识、培育新一代的研究者,使他们能够继续进行这项重要的工作。

附:天空研究成果选粹

(1) 加强气溶胶-云相互作用研究

最近的研究表明:靠近公路的居民所受的交通污染与其健康风险的增大有联系。尚不清楚哪些因素导致了风险的增大,但这些因素中可能包括颗粒物浓度的增加。

这项研究中,科罗拉多州立大学的研究者利用NSF对“重大研究的仪器资助”,于2008年1月在内华达州拉斯维加斯一所紧靠US-95号公路的小学校园内部署了美国重航空气器研究公司(Aerodyne Research Inc)的气溶胶质谱仪(AMS),对公路附近的颗粒物进行了测量。AMS以高时间分辨率测量直径小于1 μ m的颗粒物的质量浓度,这种颗粒物与对健康的不良影响之间有着很强的联系。将这种技术与对污染气体和气象变量的测量结合起来,形成了考察大气颗粒物的含量和组成的短期变动的一种新的视角,以及将这些变动与污染源

相联系的一些新的方法。富含有机碳的颗粒物浓度的偏移与早上交通高峰时交通流量的增大有关,但出人意料的是,深夜及凌晨时,也观测到了这种颗粒物的短时剧增。

(2) 太平洋风暴轴的增强与亚洲污染的关联

2004年2月19日,阿卡(Aqua)卫星上通过中分辨率成像光谱仪(MODIS)拍到的图像显示:中国华东地区的上空,弥漫着一大块灰霾,沿着图像所示的场景左侧的沟壑山谷聚集。在许多地区,灰霾甚至将海岸平原完全遮蔽。不幸的是,该地区出现这般光景并非罕见,尤其到了冬天,人们需要燃烧更多的煤和柴。这时,中国东南部无数的火堆在燃烧,这可能也是导致灰霾的原因之一。

得克萨斯农业与工程大学的Zhang Renyi发现:太平洋上深对流云增加的趋势可能是由于亚洲大陆污染的增加。在这个NSF主持的项目中,该小组利用国际人造卫星云气候学项目的数据分析相当于20年的太平洋云统计数据。他们发现,北太平洋上空深对流云的数量明显增加,尤其是在冬季的几个月里。

污染增加了大气中的气溶胶,以往的研究表明:气溶胶的增多减小了云中液滴的尺寸,从而延滞了降水事件的发生,使云变得更为活跃。为了确认所观测的太平洋风暴轴的增强的确源自污染,必须排除海水表面温度、季风和厄尔尼诺事件等自然因素的影响。已经认定:上述自然因素均无法解释观测到的云层覆盖的变化。为了进一步研究“污染关乎风暴轴增强”的假设,Zhang将“天气研究和预报”的计算机模型加以调整,将污染对云的影响包括进来,结果发现,实际观测到的深对流云的变化趋势,在用以解释亚洲污染物外流所造成影响的模型模拟中可以再现。

(3) 新的计算机模型协助沿海地区防备风暴潮

墨西哥湾和世界其他地区最近的气象事件表明:面对风暴潮,沿海地区的居民和基础设施表现脆弱。为此,得克萨斯大学奥斯汀分校的研究者利用“太拉网格巡察者”计算系统开发“高级环流风暴潮模型”。飓风季来临前,该模型用于设计和规划模式;风暴登陆前,用于预报模式;风暴之后,用于事后模式。研究者正在将得克萨斯州墨西哥湾沿岸地区的情形高度细节化,研发一种新的密集计算模型,将为得克萨斯州模拟数以百计的飓风,研制洪灾风险图,并研究洪灾高风险地区,如休斯顿-加尔维斯顿走廊及布朗斯维尔地区。

(4) 气候变化会增多强雷暴吗?

普渡大学Robert Trapp研究小组最近利用全球气候模型和高分辨率的区域气候模型,研究形成美国强对流天气的大规模气象条件。研究者认为:21世纪末出现强雷暴的天数可能会因气候变化而增加。

目前的气候模型无法模拟雷暴这样的小型天气现象,但可模拟温度、湿度、风力这些影响强对流风暴因素的大规模分布率。研究发现:温室气体排放引起的气温上升,导致形成强雷暴的两大因素对流有效位能和风切变一增一减,前者之增不仅弥补而且超过了后者之减,使得气象条件支持形成强

雷暴的天数增多, 预计夏季这几个月较之以往增幅最大, 尤其在美国的东部和南部。

保险规划师必须将破坏性强对流天气出现频率的上升趋势考虑在内, 以更好地规划对建筑物、汽车和农田的保险。

(5) 利用 NSF 资助的新型飞机研究大气颗粒物的形成

NSF 资助的高性能环境研究机载仪器平台 (HIAPER) 初期的科研使命之一, 就是对对流层上部和平流层底部颗粒物的形成进行采样。在这个引起研究者兴趣的区域中, 直径 4—8nm 的颗粒物具有很高的数浓度, 这种颗粒物可发展为对云的形成至关重要的云凝结核。对流层气团和平流层气团的混合处称为对流层顶折叠, 在该区域附近, 观测到了新颗粒物形成数的增加。研究者还观测到, 日出后不久, 新颗粒物的形成数也会增加。这种增加甚至在日落之后还会继续。利用这种日出/日落实验, 可计算出气溶胶形成云凝结核及其增长率。对云凝结核的形成及其增长率的估算表明, 另一种物质可能也参与了对流层上部颗粒物的形成。HIAPER 的冬季观测显示: 新颗粒物的形成, 在赤道多于中纬度地区。

(6) 将基于气候模型的预测与雪覆盖模拟相联系以提高预报精度

冬季各月份陆地上的雪覆盖, 对气候建模的影响力可能超过原先的估计。NSF “员工早期生涯发展计划” (CAREER) 的受助者加州大学洛杉矶分校的 Alex Hall 小组惊喜地发现, 雪覆盖区的地表反照 (地表反射的太阳辐射量) 反馈与美国大陆夏季气候变化的气候模型预报之间有联系。地表反照在此情况下即为雪表反照, 在 NSF 资助的一个项目中, Hall 发现, 各种气候模型处理雪表反照的方式各不相同, 对雪盖的模拟差异巨大: 雪表反照的高反馈模型, 冬季和早春的雪盖量明显减少, 导致水短缺, 这种水短缺又普遍体现在土壤水分的模型中, 导致较高的蒸发蒸腾和较高的温度预报。Hall 认为, 如果在气候模型中采用较为现实的雪表反照反馈, 就能大幅度提高美国十年度或百年度气候预报的质量。

这项研究之前, 研究者并不将雪表反照反馈视为影响气候模型灵敏度的一个要素, 而将注意力集中在湿对流过程和云的参数化上。这项崭新的研究会使得气候建模者正视雪表反照问题, 可能会对雪表反照进行新的测量, 并对雪盖和雪表反照的建模产生新的研究兴趣。目前的全球气候模型, 其预报对决策者和工商界的作用有限, 特别是区域气候变化的建模亟需改进, 区域气候预报的改进将使为决策提供的数据的精准度远高于目前的数据。

(7) 跟踪亚太地区的烟羽状大气污染 (pollution plume)

研究者在研究烟尘等气溶胶的移动, 这些气溶胶常以烟羽状从亚欧地区飘过太平洋, 进入北美上空。这种横贯亚欧—太平洋—北美的羽状烟尘 (烟羽) 是地球上分布最广的污染事件之一, 为了研究这种现象, 国家大气研究中心 (NCAR) 部署了 NSF/NCAR 湾流 5 型 (Gulfstream V) 飞机 (G-V), 以支持 2007 年 4 月和 5 月进行的太平洋烟尘实验 (PACDEX)。

以往的研究一直缺乏能够对飘过太平洋的烟羽的演变

进行现场采样的机载平台, G-V 的出现不仅填补了这一观测空白, 还为观测穿越太平洋上温带云系统的由自然和人为因素共同形成的大规模的烟羽打开了一扇新的大门。利用 G-V, PACDEX 的研究者不仅可近距离地观测上述系统, 还有机会研究气溶胶从对流层的底部演化到上部过程中的理化特性, 同时研究气溶胶在穿越太平洋的过程中形成云凝结和冰核时纵向和横向的成分, 并研究各尺寸云的分布谱及其液态水和冰状水的含量。通过观测人类活动对混合相和冰相卷云系统的影响, PACDEX 数据开辟了研究的新前沿。除了监测欧亚大陆—太平洋—北美烟尘带的特性, 本项开创性的实验还用以进一步测试 G-V 并充分利用其独特的性能。PACDEX 是美国科学界已有的复杂研究基础设施的一个典型代表, G-V 是世界上最先进的机载平台。利用 NCAR 在后勤、技术和数据方面的支持性服务, 美国的研究共同体得以实施复杂的观测计划, 从而获得对复杂大气系统前所未有的深入理解。

(8) 新的研究发现: 人类活动升高了飓风形成区的海洋温度

来自美国劳伦斯·利弗莫尔 (Lawrence Livermore) 国家实验室和国家大气研究中心等 10 家研究中心研究人员组成了一个研究小组, 使用了 22 种大气系统计算机模型。该小组 2006 年 9 月发表的一项研究表明, 大西洋和太平洋的热带区域 (飓风的主要形成区) 的海水面温度 (SST) 在过去一百年中的上升, 主要源于人类活动导致的温室气体浓度的上升。

为了弄清 SST 变化的原因, 以往的研究集中于广阔的海域 (如整个大西洋或太平洋盆地) 中温度变化的均值, 而这项新的研究将 SST 变化的研究区域锁定在比以往小得多的飓风形成区。通过对 1906—2005 年这 100 年的研究, 该小组发现, 在大西洋和太平洋飓风形成区观测到的 SST 的上升, 其中大部分很可能 (84% 的概率) 是人为因素 (主要表现为温室气体排放的增加) 造成的。

飓风这种复杂的现象受到各种物理因素的影响, 如 SST、风切变、水蒸气以及大气的稳定性。上述飓风形成区 SST 的上升虽然不是决定飓风强度的唯一因素, 但可能是影响飓风的关键因素之一。

(9) 本世纪全球会更暖更湿润吗? 计算机模拟支持这种观点

美国国家大气研究中心、得克萨斯理工大学和澳大利亚气象局研究中心联合进行了一项新的研究, 这一基于几种世界上最先进的气候模型的研究表明, 最近出现的一系列重大气候事件 (如欧美的酷热难当, 美国西部的长时间干旱, 横扫北美洲和欧亚大陆大部分地区的大雨、暴雪) 可能意味着较长期的气候变化即将到来, 世界大部分地区将面临热浪、强降水和其他极端天气方面更大的风险。

以往许多研究关注的是, 随着温室气体的增加, 下个世纪的平均温度或平均降雨量会有怎样的变化; 而上述新的研究针对的是给社会和生态系统造成最大破坏的热浪、强降雨等极端天气。最近, 政府间气候变化专家委员会组织了一些

广泛而复杂的计算机建模工作,本项目的研究就是利用这些建模的首批分析之一,具体采用了法、日、俄、美等国相关研究中心的超级计算机中9个不同气候模型对1980—1999年和2080—2099年间的数据进行模拟。在对2080—2099年的模拟中,每个模型都按大气中积累的温室气体含量的不同分别进行了3种模拟。采用3种含量,是为了体现全社会未来数十年中在“减少CO₂和其他温室气体排放”方面采取行动迅速程度上的不确定性。纵观这3种温室气体模拟,所有的模型都认为,到2080—2099年间会发生如下变化。

① 在地球上几乎所有的陆地区域,极暖之夜的数量和热浪持续的时间都将大幅度增长,热浪中的极暖之夜往往因居民和建筑物无法利用夜晚驱走白天的酷热而导致人员死亡。

② 约北纬40°以北的大部分地区(包括美国北方各州的北部地区、加拿大,以及欧洲的大部分地区)都将遭遇强降水天数的激增。

③ 作为形成并加剧旱灾的几个要素之一的干旱,其持续期将显著拉长,横扫美国西部、欧洲南部、巴西东部和若干其他地区。

如按最低排放的情形来模拟,则上述效应最弱。本项目研究由三方联合资助: NSF(国家大气研究中心的主要资助者)、能源部以及环保署。

(10) 气候变化对臭氧分布的影响

日益吸引科学家兴趣的,是研究全世界被CO₂暖化而可能导致的种种效应。华盛顿大学和加州理工学院的研究人员利用NSF的资助,采用各种计算机模型模拟攸关臭氧浓度的中层大气的循环。模拟表明,低层大气的升温(如模拟CO₂浓度翻倍导致的升温)会加剧大气的循环,后果之一就是南北半球高纬度地区臭氧总量会增大,而赤道地区的臭氧水平会降低。对于这一重要结论,研究者应在臭氧恢复的建模中加以考虑。

(11) 化石燃料的燃烧打断了自然的碳循环

大气中总是存在着碳,这种自然存在的一定量的碳可被植物的光合作用吸收,再通过分解返回大气。碳也被海洋吸收,在海洋这架碳传送带上传递数百年后再返回大气。化石燃料的燃烧打破了上述系统间的自然平衡。研究者最近采用通用气候系统模式(CCSM)中一种有针对性的变体,研发全球碳循环的计算机模拟。这类模型显示,大气中过多的碳留存导致了全球气候变暖。升高的温度不仅使土壤变干,阻碍了热带植物的生长,降低了光合作用率,而且提高了海洋表面的温度,减慢了海洋这架“碳传送带”的运转,使碳更难以通过与其他物质的混合而沉入大海。这些变化导致碳和各气候系统之间形成了正反馈:气候变暖增加了人类产生的CO₂在大气中留存的比例,这反过来又加剧了气候的变化。

(12) 未来的热浪:更剧烈、更频繁、更持久

国家大气研究中心的一项研究表明,21世纪北美和欧洲的热浪会更剧烈、更频繁、更持久。模拟显示,大气中吸热性温室气体的含量增加了,这加剧了异常的大气环流模式,这

种模式在欧洲和北美的热浪中已被观测到。该模式较之以往更为凸显,酷热席卷地中海地区以及美国的西部和南部,欧洲其他地区也更易酷暑难当。这些现象非同小可,较之其他气候事件而言,热浪杀人的时间更快,人数更多。例如,1995年的芝加哥热浪死亡739人,被2003年巴黎热浪卷走的生命据信高达15000人。

以10年为单位,研究者对最近(1961—1990年)的情况和未来(2080—2099年)可能的态势进行了比较,以确定温室气体和硫酸盐气溶胶影响欧美气候的可能方式。其模型假设:在减缓温室气体的积聚方面,政策干预成效不大。在上述两场热浪中,温室气体导致的气压改变都造成了酷热的晴空,这又拉长了地表的炎热。本项目也模拟了热浪来袭时,欧美地区由于CO₂在大气中的积聚,也出现了类似于上述热浪的气压改变,并且变化更为剧烈。

模拟表明:热浪来得更持久且更频繁,在欧美部分地区,夜间最低气温的增幅高达3℃。这个结果非常严重,医疗专家报告,在芝加哥的那场热浪中,对健康最严重的威胁来自连续几夜缺少降温能力。

(13) 美国犹他州盐湖城谷地的城市痕量气体排放研究:城市冠层过程、人为排放和社会建构之间的相互作用

多学科研究小组将研究盐湖城谷地的城市地表覆被对空气质量和温室气体排放的多重相互影响,其目的在于帮助人们深化对城市大气分布过程复杂性的认识,并为影响城市大气的社会、物理、化学和生物因素提供一个评估框架。盐湖城谷地是研究这些问题的理想模式系统,其气候记录翔实,城内广布树林,城外则为沙漠生态系统,城市快速扩张的势头明显。市政府、周边县政府和州政府都同意参与这个项目,不仅参加研讨,为气候模型的发展提供输入,而且讨论该项目的研究成果对政府政策的影响。研究小组将开发一个用户界面友好型的系统动力学模型,决策者可利用这一工具探索严重影响当地空气质量和温室气体排放的因素。该模型也将用以评估未来城市发展的影响,该项目的社会科学研究组在项目的始末期对决策者进行问卷调查,以评估高校研究者与政府决策者之间合作的有效性。

温室气体和其他大气污染物大都源于城市,因此我们必须深化对城市大气分布复杂性的关键方面的认识。重点研究那些影响盐湖城谷地CO₂、水蒸气和挥发性有机化合物(VOC)排放的复杂因素,研究的手段是大气测量、交通监控、建模、遥感,以及能耗数据的汇总。水蒸气和CO₂是影响局地气候、区域气候和全球气候的重要温室气体,而VOC则是形成城市烟雾的先兆。所有这些痕量气体的排放均来自人类活动和城市植被,为了测量这些气体的浓度和排放,追踪其源头,评估城市大气分布有效管理的影响,有必要开展大气科学、社会科学、城市规划、城市建设和生态学之间的跨学科合作。通过将科学测量技术应用于定量模型,以及与当地决策者的合作,本项目将对减少温室气体排放、保持空气质量高标准和提高市民生活质量的行之有效的方法进行评估。

(14) 利用气溶胶特征实验进行东亚气溶胶的单颗粒物研究

为了充分认识污染对气候的影响并建立模型,必须更多地了解污染物,特别是污染物的具体构成。在2001年春天进行的亚洲区气溶胶特征实验(ACE-Asia)期间,James Anderson小组搜集了大气中气溶胶的一些样本。ACE这个国际性的重大野外研究计划旨在表征西北太平洋地区的气溶胶,并弄清气溶胶对该地区辐射平衡的影响。研究者搜集来自空中和地面搜集点的气溶胶,然后利用自动扫描电子显微镜和手动传输电子显微镜对样本进行分析。分析所获得的详细信息,包括颗粒物的组成、各尺寸的分布率、形状以及混合的状态,其中形状和混合状态的信息是用别的方法很难获得,却是确定气溶胶在区域气候中作用的关键信息。

研究的最大发现可能是东亚颗粒性污染物的多样性,即便是未与城市污染混合的样本也是如此。尘状颗粒物的矿物学特性和尺寸、形状的分布率都各不相同,这可能是因为污染物源自不同地区,具有不同的运输史。矿物性颗粒物的聚并现象十分普遍,聚并度的差异影响了颗粒物尺寸和形状的分布率。形状的分布率实际上很分散,说明不考虑观测结果而以简化形状的假设用于颗粒物光学特性的建模并不可行。尘状颗粒物一旦与城市污染物混合,会产生若干后果,其中对气候变化最重要的可能是普遍存在的黑碳与矿物性尘状颗粒物的聚并。这种聚并体能够吸收光,而多数气溶胶颗粒物只能散射太阳光。研究者也观测到颗粒物之间一些其他性质的相互作用,充分认识污染与太阳光之间的相互作用,必须将其考虑在内。

(15) 气候变化影响地球的外层大气

国家大气研究中心和宾夕法尼亚州立大学的联合研究表明,气候变化不仅影响低层大气,也会影响高层大气——到2017年,燃烧化石燃料排放的CO₂将使地球外层大气的密度降低3%。这一研究证实了最近卫星观测的发现,即热层这一大气的最高层正在变“稀”。热层密度的降低减小了地球对低地轨道卫星的吸引力,延长了卫星的留空时间。外层大气的密度预报可望协助NASA和其他机构更为精确地计划卫星的燃料需求,确定发射时间,因此可节省数以百万美元计的开支。

CO₂使热层降温,但使近地大气(对流层)变暖,这种看似矛盾的作用源于大气密度随高度的下降。在近地空域,CO₂吸收了离开地球指向太空的辐射,但在密度较高的底层大气,气体分子还没来得及将能量辐射到太空,就与其他分子发生碰撞,使CO₂分子释放出热能,从而加热了空气;而热层的大气要稀薄得多,CO₂分子如与氧分子碰撞就吸收了能量,在另一次碰撞发生之前,CO₂有足够的时间把能量辐射到太空,从而产生降温效应。

温度一降,热层就出现沉降,在给定高度的大气密度随之减小。影响热层的因素还有11年的太阳活动周期,即在太阳活动的活跃段,来自太阳的紫外线和高能粒子增加,使高层大气温度升高,范围扩大;在太阳活动的减退期,热层沉

降,温度降低。

为了分析近些年的太阳活动周期,探究未来的动向,研究小组的高层大气建模综合考虑了太阳活动周期和人类活动导致的CO₂增加。该模型基于“未来10年太阳周期的活跃度会偏高”的预测,模拟显示从1970—2000年的30年间,热层密度每10年下降1.7%,30年累计下降约5%,这与实际观测相符。该小组还发现,太阳活动高峰时的热层密度下降要比活动低谷时快3—4倍。

(16) 用统计工具识别云

加州大学伯克利分校和宾夕法尼亚州立大学的研究者与NASA的喷气推进实验室合作,以创建用来侦测云的形成并对云的形成加以建模的新技术。气候建模的关键之一,就是通过云的形成和移动理解天气模式。目前利用卫星技术监测云的发展水平不高,而新的技术可望提供精准信息,以提高气候建模的可预报性。

本研究致力于利用NASA对地观测系统的特拉(Terra)卫星上的多角度成像技术,来改进从太空侦测云(尤其是北极上空的云)的能力。初步观测显示,卫星成像的精度至少提高了20%。这项技术如果可行,将极大地提高气象精度,从而改进软件和建模技术。

(17) 为何此云有雨落在我头上?

对于积云这种天空中飘荡的最简单且最“纯”的云,一个多学科小组正在进行深入研究。为此,他们在研发新的可视化和分析工具,以洞悉那些控制积云的降水发展的因素。积云分布于地球大部分地区,常见于刮贸易风的区域。这种云既影响热平衡和水分平衡,也会影响进、出地表的辐射量。积云在目前的全球气候模型中远未充分体现,本研究应能改进其在各种气候模型中的体现度。积云比较简单(其内不含冰),可借以研究有关暖雨这个与其他类型的云相关的过程及其降水发展过程中的一些“老大难”的基本问题。这方面的研究成果可望为降水性洪涝灾害的预报提供有益的信息,从而协助农业生产。

(18) 大气棕色云项目进一步增强了美国在大气研究和教育领域的领先地位

大气棕色云(ABC)来自包含气溶胶颗粒物的大气污染物排放,“ABC计划”是个多边合作的国际项目,涉及知名大气学家和研究者、亚洲各国政府以及亚、欧、美的相关研究机构,以弄清ABC这一亚太地区重大环境挑战的成因和影响。该项目由联合国环境计划指导委员会提供指导,由美国斯克里普斯(Scripps)海洋研究所的V. Ramanathan小组负责实施。不像温室气体、全球变暖这类有争议的问题,亚洲各国对污染性气溶胶对气候的负面影响均无异议。在南亚和亚太这个容纳了全球一半以上人口的地区,“ABC计划”凸显了美国在气候研究和教育领域的领先地位。

“ABC计划”的目标是:在南亚和亚太地区发展气候研究方面的有形基础设施、人力资源、人才和研究机构网。核心目标之一是发展地面观测站和ABC培训学校。过去14年里,共

建成气候观测站 14 座,其中马尔代夫、尼泊尔和印度各 2 座,中国 3 座,巴基斯坦、泰国、韩国、日本和美国各 1 座。当地的研究者和技术人员负责设备的维护,并利用部署的仪器开展辐射、气溶胶的成分及其中的气相成分、降水的化学机制和气象方面的观测。在培训学校方面,第一所于 2004 年 10 月在泰国开学,第二所于 2006 年 12 月在马尔代夫开学。

(19) 北美季风研究

作为北美季风(NAM)领域的大型国际野外研究的一部分,新墨西哥矿业及科技学院(New Mexico Tech)地球与环境科学系(EES)的一组本科生和研究生在墨西哥的索诺拉(Sonora)进行了将近 3 周的 NAM 研究。NAM 是一种控制美国西南部和墨西哥西北部夏季的水文、生态状况的年度区域大气现象,影响广泛,其生态水文学研究需要美、墨两国学者的携手合作。

在两国联合研究中发挥了关键作用的新墨西哥矿业及科技学院的地球与环境科学系,利用 NSF 和美国海洋暨大气总署的资助进行若干研究项目,这些项目的跨国合作涉及墨西哥的索诺拉大学和索诺拉理工学院以及美国的亚利桑那大学、新墨西哥大学和国家大气研究中心。2007 年,来自两国的 21 位学生和研究者参加了“索诺拉野外研究计划”,并进行了科学和文化交流。

这些学生参与了墨西哥索诺拉州偏远北部山区一系列生态水文实验的计划、组织与执行。北美季风的预报,对于受其影响的地区很有价值。

3 海洋

海洋覆盖了地球表面约 71% 的面积,并拥有一些最富饶的生态系统。洋流和海洋表面温度导致天气变化并形成气候。海洋表面的蒸发是地球上大部分降雨的来源。海洋吸收和储存能量的能力,使它可作为对抗极端气候变化的缓冲。更重要的是,海洋具有一项巨大的能力——从大气中消除 CO₂。研究人员估计,人类活动产生并排放到空气中的 CO₂ 被海洋吸收了近 1/3。

NSF 所资助的研究人员一直在寻找精确的模型来模拟海洋的特性和环流,因为海洋环流在地球气候中有着重要的作用。研究人员现在了解到,海洋如大气一样,是全球气候模型(如 NSF 资助的公共气候系统模型 CCSM)中至关重要的一环。近几十年来,研究人员已经证明,海洋在将能量输送至世界各地中发挥着重要的作用,甚至有研究人员将海洋称为“全球热机”。

储存在海洋中的热使得大气变暖——沿海地区的温带气候比同纬度的内陆地区的温度波动要小很多,就可证明这一点。海洋的热传递引起的大气温度梯度会影响海洋风的模式。风驱动的海浪可将大气中的能量转移到海洋中,也是洋流模式背后的驱动力。温度和盐度是影响海水密度的重要变量,同时还是垂直海洋环流的驱动力。海水密度随盐度增加或温度降低而增加,温度更低、盐度更大的海水,比温度较

高、盐度较低的海水密度大,并会下沉至较深的海洋深处。

海洋表面的变暖或变冷对大气有着深远的影响。例如,在太平洋热带海洋地带,厄尔尼诺现象与温度较高的海水密切相关,延伸范围比正常海水要广。厄尔尼诺事件对人类活动影响深远,研究人员应用 CCSM 模型和其他全球气候模型预测厄尔尼诺事件的发生及影响。

阐释海洋在地球系统碳循环中的作用,一直是 NSF 资助的研究人员面临的一个挑战。海洋可容纳的 CO₂ 是大气的约 50 倍。即使是海洋碳循环轻微的变化,都可能大大地影响大气中 CO₂ 的总量。研究人员发现的证据表明,海洋碳循环是转换到冰河期以及从冰河期中转换出来的重要因素。建模人员需要知道海洋能吸收多少人类活动所产生的 CO₂。生态学家和海洋学家设法了解这一吸收过程如何影响海洋生态系统和化学,如何影响海洋重要生态系统服务的可持续性。

随着海洋 CO₂ 溶解量的增加,海洋的酸性也随之增加。NSF 资助的研究人员发现,酸度的增加改变海洋的化学平衡,导致生态系统的潜在重大破坏,尤其是对有壳的物种或外骨骼物种,如浮游植物、贝类和珊瑚的破坏。由于浮游植物是食物链的基础,珊瑚礁能提供重要的栖息地,因此,海洋酸化将对整个海洋系统产生巨大的影响。温度较低的海洋,包括极地生态系统,特别容易被海洋酸化损害,因为冷水的 CO₂ 溶解度比温水高。

3.1 海洋建模

洋流具有长距离传递大量热能的能力。理解洋流与大气温度和海洋温度之间的关系至关重要,因为科学家发现的证据已表明,过去全球变暖事件已经大大地改变了海洋环流的模式。变化中的洋流可能对全球天气有着深远的影响,包括主要天气模式发生的地点和时间,如季节性季风雨。海洋生态系统和具有重要商业意义的渔业,也将受到严重的影响,因为太多海洋生物的生命周期都依赖于海洋环流模式。基于这些原因,气候建模人员在全球气候模型中必须尽可能多地考虑关于海洋的细节,以提高气候预测能力。

3.2 大气与海洋的交换

NSF 资助的研究人员已经部署了测量仪器来表征海洋与大气之间的气体通量,目的是改进全球气候模型中的大气——海洋交换模拟。这些测量仪器包括舰载传感器和浮标。舰载仪器使得研究人员能研究与气候相关的气体的地理分布,包括来源于海洋的气溶胶前体(aerosol precursors)。浮标使得研究人员能在相当长的时期内在特定位置表征 CO₂ 等气体的大气—海洋交换。这些测量为理解各种情况下的海洋酸化和大气—海洋反应提供了重要的信息。

3.3 学术研究船队

研究海洋的生物学、化学和物理过程的研究人员严重依赖于海洋研究考察船。学术研究船队由 23 艘大学—国家海洋实验室系统的船只组成。这些研究船只大小不一,续航时间和能力各异,使得 NSF 和其他联邦机构支持的科学家能够从沿海地区到远海和深海开展海洋研究。对学术研究船队的资

助包括投资于船只的运行、舰载科学设备、海洋仪器和技术服务以及潜水器。NSF 拥有其中的 7 艘研究船。

3.4 海洋气候记录

海洋深处为研究人员提供了一些寻找地球气候历史证据的最佳位置。在深海海底的许多位置发现的厌氧环境,让海洋生物有机物质的形成免受干扰,使海洋沉积物在上千年的积累中不受干扰。海洋沉积物由有孔虫类等生物的残留物组成,有孔虫类是一种微观单细胞生物,从溶解于海水的矿物质中形成壳。

有孔虫类在揭示地球气候历史中发挥了关键的作用。研究人员可测量氧同位素在它们壳上所占比例,以此来决定它们存活年代的海洋温度。海底岩心试样包括有孔虫类和其他沉积物的残留物,为科学家研究特定地点过去的气候条件提供了条件。北极海底岩心表明,5 千万年前北极是亚热带气候,全球气温变暖使得当时北极附近生活了大量的生物。

综合大洋钻探计划(IODP)是 NSF 最重要的海洋岩心钻探计划,也是一项国际海洋研究计划,从海底沉积物和岩石中探索地球的历史和结构。合作方日本的研究船地球号(Chikyu)于 2002 年 1 月启动,2003—2006 年进行舾装和测试,并于 2007 年开始进行 IODP 活动。

3.5 美国全球海洋生态系统动力学

美国全球海洋生态系统动力学(GLOBEC)计划是一个由海洋学家、渔业科学家和海洋生态学家设计的多学科研究计划,旨在研究气候变化如何影响海洋生态系统和渔业。通过计算机模型,美国 GLOBEC 研究人员正在开发并应用使用先进技术的大型观测计划。GLOBEC 结合建模、大尺度和时间序列观察以及回顾性研究,获取地方、区域和洋盆尺度的生态系统动力学情况,从而了解海洋动物种群数量的波动。

海洋生态系统依赖于构成食物链基础的最小微生物,这些微生物是浮游植物,它们能吸收 CO_2 并将其转化为有机物质。海洋食物链更高级别生命的数量依赖于浮游植物的数量,这又反过来依赖于溶解在海水中的营养物的数量。气候变化影响了环流,而环流决定了海洋中溶解的营养物的分布。GLOBEC 计划探寻气候变化如何改变整个海洋生态系统(包括经济上举足轻重的鱼类)的分布和数量。

3.6 小结

海洋拥有若干个地球上最多样化和最丰富的生态系统。自 NSF 资助的研究人员开始探索海洋及其物理、化学和生物过程以来,他们在几十年里发现了海洋温度和酸度增加所带来的变化的证据。他们的工作对气候模型和提高人们对碳排放增加和温度上升给海洋带来后果的认识至关重要。下面的研究亮点列出了 NSF 资助的一些海洋研究计划,这些研究计划为学生提供培训,确保将继续打造关于海洋的知识库。

附:海洋研究成果选粹

(1) 逆向过程:全球变暖中洋流的变化

洋流被认为是驱动地球气候的引擎,因为洋流具有远距

离高效传输热量的能力。同时,科学家们一直怀疑全球气候变化可能会从根本上改变海洋环流模式。现在,斯克里普斯海洋学研究所(Scripps Institution of Oceanography)的研究人员分析了 NSF 大洋钻探计划(ODP,IODP 的前身)所收集的海底岩心,提供了在遥远的过去海洋环流模式响应全球变暖突然变化的直接证据。

在《自然》杂志发表的一篇研究论文中,科学家 Flavia Nunes 和 Richard Norris 分析了有孔虫类贝壳中的碳,重建了过去的海洋环流模式。碳是良好的洋流追踪器,因为深海物质在形成和成长时碳含量是不一样的。通过分析 ODP 从大西洋、太平洋、印度洋和南大洋等 14 个地点的深海岩心中发现的有孔虫类,研究人员确定了在 5500 万年前发生了一次重要的全球变暖事件。碳分析表明,该时期前后,大多数深水形成(deepwater formation)发生在南半球。但是,当全球变暖开始,短短 5000 年左右(地质时间上 5000 年是一个很短的时间),深水形成从南半球转移到北半球。深水形成的半球转换持续了约 4 万年,但接下来的 10 万年或更久是海洋环流模式的转换。

该研究发现了一个重要的古代全球变暖事件,并证实全球变暖确能导致海洋深水形成地点的快速半球转换。根据同期全球变暖的更多证据,该研究提出了海洋环流未来变化的可能性。

(2) 涡流相关的大气-海洋交换测量

该项目为更好地理解大气-海洋相互作用,特别是海洋和大气之间的气体通量,迈出了创新的一步。研究人员改良了最新开发的舰载用大气压离子化质谱仪(APIMS),用 APIMS 测量对全球气候很重要的痕量气体的大气-海洋交换。二甲基硫醚(DMS)是一种重要的生物痕量气体和自然二次气溶胶前体,APIMS 对海洋-大气中 DMS 的初步直接测量结果非常成功。在最近的一篇研究论文中,研究人员报道了美国海洋与大气管理局(NOAA)研究船赛沃德·约翰逊(Seward Johnson)号以前所未有的精度从开放水域获取了 DMS 交换通量,他们还计划将 APIMS 目标扩大到许多其他气候相关的海洋边界层痕量气体。APIMS 将使 DMS 和其他痕量气体的测量有足够的时间分辨率和精度,从而开展关键工艺研究和提高全球气候模型中大气-海洋的参数化。

(3) 贯穿上新世—更新世冰期的东部热带太平洋演化

布朗大学的一个研究小组最近发布了一项研究,对过去 500 万年前气候敏感的东赤道太平洋(EEP)海洋表面条件(过去的温度和生物生产力)的演化进行了持续观察。他们监测了现代厄尔尼诺地区的重要特征,当巨大的冰原在北半球首次开始发展和衰落时,这些特征随时间推移而演化。

布朗大学小组采用新的有机地球化学方法,确定了过去海洋表面的温度。他们在东太平洋赤道正南方发现的长条深海岩心中提取了烯酮(由一种海洋藻类合成的分子)。在确定两种主要的烯酮所占的比例后,研究人员高精度地确定了海洋表面过去的温度。该岩心中所含底部栖息的有孔虫类的

氧同位素比例,还提供了过去冰河时代的线索。由于太平洋底部的水最终来自北半球和南半球的高纬度地区,将烯酮数据(表面条件)与深海底的同位素数据进行比较,该小组就可以直接比较一个重要热带地区对高纬度地区冰河时代的演化的响应。该研究的主要发现是,EEP在过去500万年间冷却相当稳定,其温度以每100万年 1°C (1.8°F)的速率下降。

(4) 首次北冰洋钻探发现亚热带的过去

IODP是由NSF、日本文部科学省、欧洲大洋钻探联盟以及中国科技部联合资助的。2004年夏天,当历时6周的北极探险之旅(ACEX)计划结束后,IODP开创了钻探的新时期。自20世纪60年代以来,国际组织在全球各大洋进行了科学钻探,但从未在如此高纬度的地区钻探过,该地区离北极仅仅250km。两艘破冰船时刻保持警戒,使维达·维金号(Vidar Viking)不被厚达4m的冰损伤。维达·维金号是一艘经过特别改良的船,上面安装有英国地质调查局的钻探设备。

ACEX发现的岩心由近300m的沉积物组成,展示了约5500万年前的地球历史。目前,这些样品已经提高了人们对北极气候和北冰洋历史的认知。人们发现的最老的沉积物来自古新世-始新世极热(Paleocene-Eocene Thermal Maximum)时期,该时期的地球远远热于现在。早期模型指出,北极在该时期是亚热带气候,ACEX沉积物心的碳同位素分析证实了这一点。该岩心还挑战了人们关于北冰洋盆地开放的传统认知,指出北冰洋盆地比板块构造重建所预测的历史更久远。一个惊人的发现是一块长度超过140m的叠层、富含有机物的沉积物,表明了有助于石油在邻近的更深的盆地形成的条件。最后,ACEX岩心还有望提供北冰洋结冰条件出现的时间的全新数据(IODP下一个钻探计划不需要破冰船。2005年,IODP钻探了塔希提岛的珊瑚礁系统,获得了全球气候变化的不同类型的证据)。

(5) 跟踪塔希提岛珊瑚礁的海平面和环境变化

NSF资助的IODP 310探险的地点是法属波利尼西亚的塔希提岛周围的珊瑚礁,310探险是使用任务专用平台的第二次探险,由欧洲大洋钻探联盟科学执行机构主持。联合首席科学家是法国的Gilbert Camoin和日本的Yasufumi Iryu。310探险的目标是建立塔希提岛在冰川期以后海平面上升的过程,界定该区域在过去10000—20000年前时期的海洋表面温度变化,并分析海平面变化对珊瑚礁生长的影响。冰川冰原的波动大大地改变了海平面和海洋的盐度,这两者反过来又影响了洋流和全球气候。由于珊瑚生长年轮的高分辨率,珊瑚礁(如塔希提岛珊瑚礁)是海洋表面温度和海平面的很好指标,其精确的年代测定确定了冰川期和冰消期。这一独特的记录离不开IODP钻探。目前正在对这些岩心进行分析,以完成310探险的科学目标。

(6) 海底浅层意外发现“冰冻”天然气

在NSF资助的IODP 311探险中,一个由科学家组成的国际研究小组研究了天然气水合物是如何形成的。2005年秋天,该研究小组在43天的探险中,使用了美国研究钻探

船——联合海洋机构地球深层取样(JOIDES)解决号(Resolution)。天然气水合物是大规模冰冻的天然气,由于含有甲烷,所以有着重要的意义。天然气水合物也是一种重要的潜在能源资源。天然气水合物沉积物通常能在水深超过500m的离岸地点的海底和北极永久冻土地区被发现。311探险的科学家们由加拿大蒙特利尔麦吉尔大学的Michael Riedel和美国地质调查局的Timothy Collett带队。科学家们没有实现其研究天然气水合物如何形成的意愿,相反,他们在海底50—120m深的相对浅层发现了异常高浓度的天然气水合物。天然气水合物的低压稳定性意味着它们可能更容易得到开采,但是当地震引发海底崩塌时,这在西北太平洋海岸附近的地质活跃地区(被称为北卡斯卡底古陆边缘)很常见,它们也更容易从沉积物中释放出来。此外,由于甲烷是引起全球变暖的温室气体,而且海洋温度上升可能是海底天然气水合物融化的主要原因之一,所以有一个潜在的正反馈:温度上升的海洋导致更多甲烷释放,甲烷的释放又会导致海洋温度继续上升。

(7) 北太平洋环流振荡:连接海洋气候与生态系统变化的新气候变化模式

东北太平洋的海洋盐度、养分、叶绿素、各种浮游动物以及鱼类等的年代际振荡很多年来都无法解释。它们通常与太平洋年代际振荡(PDO)地区大规模气候变化最常用的指标关联甚少。最近,佐治亚理工大学的Emanuele Di Lorenzo和夏威夷大学的Niklas Schneider提出了一种新的气候变化模式,即北太平洋环流振荡(NPGO)。他们指出,NPGO的变化与之前无法解释的盐度、养分和叶绿素的振荡有着极大的关联。

NPGO模式中的振荡是由与控制盐分和养分浓度相同的基础过程所驱动的。在加利福尼亚海流系统,NPGO突出反映了风的变化。风能引起沿岸上升流,上升流指的是富含养分的亚表面冷水被带到表面的过程。这些结果强烈地支持应用NPGO作为上升流强度和养分流动的主要指标,乃至加利福尼亚海流系统地区生态系统潜在变化的主要指标。养分流动的变化使得模拟的叶绿素浓度产生振荡,叶绿素浓度是浮游植物浓度的一个指标,与观测到的叶绿素高度相关。该模拟支持一个假说,即加利福尼亚海流系统地区的浮游植物生物量的变化主要是由与NPGO相关的风驱动的上升流的变化引起。NPGO因此为驱动海洋生态系统动力学的机制变化提供了一个重要指标。

这种“自下而上”的力量与之前的捕鱼数据和卫星获得的叶绿素浓度是一致的,并强调了需要更好地理解加速海洋中更高食物链层次养分流动的影响。研究人员还指出了NPGO模式可扩展至北太平洋之外,是全球气候变化模式的一部分。在对全球变暖的观测和模型模拟中NPGO变化性的扩大,表明NPGO可能会在加速全球规模海洋生态系统的年代际变化中发挥越来越重要的作用。

(8) 海洋酸化与极地生态系统

海洋酸化是由海洋吸收 CO_2 所引起的。海洋吸收 CO_2 ,引

起一系列平衡反应的自然发生,这些平衡反应涉及碳酸盐、碳酸氢盐和氢离子,而这三者构成了碳酸盐循环。这些平衡反应的结果之一,是氢离子浓度上升(即 pH 值下降),从而导致形成碳酸钙的碳酸盐离子下降。碳酸钙是珊瑚、有壳无脊椎动物等很多海洋生物骨骼的重要成分。海水中碳酸盐的不饱和可能会促进贝壳的溶解或抑制贝壳的形成。

海洋酸化对海洋生物、生态系统和生物地球化学的影响是非常深远的。如果有壳生物不能形成骨骼,或如果有壳生物遇到不饱和海水,则海洋生物多样性、食物网结构和生物地球化学功能都会被影响。无壳生物也可能面临危险,因为 pH 值会影响其生理过程、代谢反应以及金属和毒素的吸附-解吸反应。

极地生态系统尤为容易产生海洋酸化,因为冷冻海水能溶解更多的 CO_2 ,因此,极地海洋的表层海水更接近不饱和的临界点。模型预测显示,到 2100 年,南大洋可能会出现文石不饱和,文石是碳酸钙的一种易碎、在生物中产生的形式。极地生态系统的重要成员有翼足目类和颗石藻类等,它们都依赖碳酸钙来形成骨骼或保护性部位。食物网结构和碳埋藏可能会大幅改变。

加州州立大学的 Vicky Fabry 和罗得岛大学的 Brad Seibel 以及加州大学圣巴巴拉分校的 Gretchen Hofmann 正采取多管齐下的方法,来确定南大洋翼足目类对海洋酸化的响应,翼足目类是一种重要的浮游动物。Fabry 和 Seibel 定量分析了 CO_2 含量升高和碳酸盐不饱和海水对贝壳形成的影响以及生物能量学的亚致死效应。Hofmann 从遗传学角度研究了翼足目类对钙化应力的响应。她对海胆幼体的研究表明,当幼体处于不饱和海水中,形成贝壳的基因的活性大大提高,而幼体骨骼的发育变慢了。这与跨政府小组对未来海洋条件的气候变化情景的预测是一致的。Hofmann 目前正使用基因微阵列来确定南极翼足目类对大气中 CO_2 含量上升和不饱和海水的基因响应,以呼应 Fabry 和 Seibel 的钙化和能量学研究。

(9) 冰消期大气 CO_2 上升机制的海洋放射性碳证据

在人类影响气候系统之前,自然过程控制着大气温室气体浓度。上个冰河时代(距今约 11000—19000 年),地球出现的大谜团之一是当冰川冰原融化时,大气 CO_2 快速增长。科学家已经弄清,在这个时期大气的碳-14(^{14}C ,碳的一种不稳定同位素)含量下降了约 35%,目前对这一放射性碳难题(当大气中 ^{14}C 含量下降,大气中 CO_2 快速上升)的假设是,大量积累 CO_2 的海洋深层水突然上升至海洋表面并释放 CO_2 。储存的 CO_2 分子与大气已隔离了数千年(这使得其 ^{14}C 水平下降),因此使得冰后期大气中的 CO_2 显得年代更久。

对这种“老”海水的研究终于发现了第一个线索。一队由科罗拉多大学 Thomas Marchitto 带领的受 NSF 资助的科学家,通过分析在下加利福尼亚海面 700m 水深处收集的底栖的有孔虫类化石,找到了失踪的海水质量:这些样品的 ^{14}C 数据表明,在冰消期的两个时期里,这些中间水沉积物与老的

^{14}C 含量少的海水发生了接触。研究人员提议,在冰消期,一股老海水通过南极中间水流从南大洋向北前进,当这股老的、富含 CO_2 的、 ^{14}C 含量少的海水沿着下加利福尼亚海岸和其他地方前进时,海水中过溶解的 CO_2 离开了海洋。这造成了大气中放射性碳含量的减少并导致大气中 CO_2 含量的快速上升,正如高纬度冰芯记录的那样。这些发现为深海冰消期 CO_2 资源提供了首个直接证据,为解决这一基础性谜团提供了一个可检验的假设。

(10) 跟踪海洋的运动、温度及其他

海洋的广阔和热容量使其在地球气候中有着举足轻重的作用,其他重要的海洋问题包括生物多样性、渔业动态、航运和国际政策。然而,海洋规模巨大,地处偏远,虽然覆盖了地球表面 70% 的面积,但要对其进行观测是相当困难和昂贵的。在 NSF 资助的圣迭戈超级计算机中心(SDSC)的研究人员帮助下,气候科学家 Carl Wunsch 与海洋环流与气候测算联盟(Estimating the Circulation and Climate of the Ocean Consortium)的其他科学家正研究更好地估计全球海洋的物理条件:速度、温度、盐度和其他因素。通过利用 SDSC 超级计算机的能力,科学家们建立了名为“虚拟海洋”的巨大模拟,可以通过填补少量海洋测量所造成的不足,梳理出海洋状态的精准测算。为了帮助气候科学家及其他科学家,该小组正在提供关于海洋条件的可用的最精准信息。

(11) 风与海洋涡流之间的相互作用促进亚热带海洋表面水域更高的生物生产力

参与 NSF 资助的涡流动力学、混合、输出和物种组成(EDDIES)计划研究的海洋学家已经证明,偶然发生的涡流驱动的上升流可能为亚热带海洋提供维持主要生产力所需养分的很大一部分。海洋涡流(有暖水或冷水芯的海水圆形旋转体)通过增加冷、富含养分的海水上升流到达海洋表面,从而促进海洋生产力,其重要性已经被推测了十多年。在海洋的大型区域,如亚热带北大西洋,其特点是生产力低下,原因是由于植物养分无法输送到阳光照射的海洋表面地带,浮游植物的生长受到限制。然而,这些地区的生产力比基于现有对海洋混合过程了解所预期的要高。在 2004 年和 2005 年,EDDIES 研究人员采样了北大西洋 10 种不同的海洋涡流。两种不同的类型分别被多次采样,它们是“飓风”涡流(逆时针方向旋转,以屋顶形状将致密表面推向中心)和“模态水”涡流(海洋表面以下的大量恒定密度的水沿顺时针方向旋转)。不同类型的涡流有着不同的表面特征,使得研究人员能使用遥感技术对其定位,然后通过在其涡核释放表面漂流浮标进行标记和跟踪。这种精密的方法使得研究人员能对两个月内涡流及其演化的详细信息进行采样,用两艘研究船进行跟踪,使用高科技仪器,如视频浮游生物记录器、声学多普勒海流剖面仪和传导性、温度、深度记录器以及直接测量温度、盐度和浮游生物浓度等海水属性的水平和垂直分布的跟踪仪。

该项研究的主要结论是,飓风涡流和模态水涡流与风的相互作用引起非常不一样的生物响应。涡流-风相互作用通

过将表面海水从涡流中心移走,增加了模态水涡流中养分的垂直供应。这维持了海洋表面的主要生物生产力,产生亚表面浮游植物和浮游动物群体的最大数量。这些结果解释了如何在海中央地区能获得比预期更高的生产力,并指出了涡流-风相互作用的显式表示及在未来海洋和气候模型中的响应。

(12) 近几十年北大西洋增加了多少过剩的淡水?

自 20 世纪 60 年代晚期以来,由于温室效应引起的冰川融化和降水增加,北大西洋的大型区域变得越来越淡,这使得北极和亚北极海域的大陆径流增强了。在同一时间,盐度记录表明,来自北极的额外的海冰和淡水,大量流入北大西洋。但是,直到现在,已经流入的淡水量和速率尚未弄清。根据气候模型,过剩的淡水会改变海洋密度,减少输送到北方的热量,以及大幅降低北半球地区的温度。

伍兹·霍尔海洋研究所的 Ruth Curry 和挪威气象局的 Cecilie Mauritzen 分析了北大西洋过去 55 年的数据,估算北大西洋增加了多少淡水,以解释所观测到的盐度变化。平均每年约有 5000km³ 的淡水从北极流入北大西洋,这比密西西比河流出的水多约 10 倍。但是,在 1965 年到 1995 年间,有额外的 19000km³ 的淡水流入了北方海域。

(13) 沿海地区观察与预测科技中心

沿海地区是美国人口密度最大和最发达的地区。它们拥有高生产力的生态系统和资源,对许多变化规模都很敏感,在全球元素循环中发挥了关键作用。自然事件和人类活动集中在沿海地区,使得可持续沿海资源和生态系统的开发变得困难,并容易引起争议,历史上许多决策的科学依据都不足。与以往一样,目前有许多科学依据还是不足的,在各学科、各项技术以及不同规模之间的界面上知识的持续进展需要前所未有的发展,跨学科性质的海洋学更是如此。

2006 年,NSF 资助成立了一个新的科学技术中心,即沿海地区观察与预测(CMOP)科技中心。CMOP 的任务是应用观察与预测技术研究沿海地区,以方便长期综合描述和分析沿海地区的物理、化学和生物学。CMOP 将使研究人员侧重于新颖的技术和科学机遇,解决气候对沿海地区影响、沿海地区在全球元素循环中的作用以及人类影响向海洋延展等主要问题。这项工作以哥伦比亚河为研究重点,将产生对重要而相当脆弱的河流-海洋生态系统的变革性理解。

CMOP 的伙伴关系是建立在俄勒冈健康与科学大学、俄勒冈州立大学以及华盛顿大学应用物理实验室之间互补的专业知识之上的。这 3 个机构在西北太平洋地区有着强大的研究、教育和外联(outreach)资本。科技中心的必要元素是侧重于先进计算技术和可视化技术、海洋仪器仪表和分子传感器的教育合作伙伴和行业合作伙伴。

整合到 CMOP 的是针对西北太平洋的河流-海洋实验平台观测站,由模拟系统、观测网络和信息系统组成。所有这些旨在取得基础性科学进展,并向科学家、教育家、资源管理者

和感兴趣的市民传递更多可靠信息。

(14) 珊瑚礁白化:生存新策略

珊瑚白化是一种由于海水温度上升引起的应激反应,该反应中,珊瑚失去为它们供应养分的名为虫黄藻的共生藻类。在影响全球气候变化的许多记录中,珊瑚白化继续吸引着全球珊瑚礁生物学家的关注。最近,俄亥俄州立大学的 Andrea Grottoli 在夏威夷海洋生物研究所开展的研究发现,当某些特定的珊瑚白化时,它们会通过从附近的海水中进食浮游动物来继续生存下去。

久为人知的是,珊瑚以浮游动物为食,一些品种的珊瑚似乎能通过提高进食的速率,补偿往常由安全寄居在珊瑚中浮游动物所供应的食物的损失,从而在白化中生存。格罗托里及其小组通过对 3 种在夏威夷珊瑚礁中发现的珊瑚进行喂食和生理学研究,发现了这一现象。珊瑚白化的一个常见效应是堆状的珊瑚比枝状的珊瑚更容易从白化事件中存活下来。该研究发现,其中一种珊瑚,即名为疣表孔珊瑚(*Montipora capitata*)的枝状珊瑚,在白化后展示出最大的进食浮游动物的速度和更快的恢复速度,并发现另一种名为扁缩滨珊瑚(*Porites compressa*)的枝状珊瑚在白化后却没什么变化。

这些结果意味着,基于形态学预测珊瑚生存或恢复有例外,许多品种的珊瑚可能能在热应力和白化的反复作用后,通过提高进食速度继续生存下去。面临持续的环境压力时增加进食,依赖于水中浮游动物的可得到性,这种可得到性可能会被同样的热应力事件所影响。

(15) 热带海洋变咸和两极附近海水变淡:全球气候变化的更多迹象

过去 40 年,热带海洋水域急剧变咸,而靠近地球两极的海水则变淡了。这些大规模相对快速的海洋变化,意味着最近的气候变化(包括全球变暖)可能会改变调节蒸发和降水以及全球淡水循环的基本系统。该研究由伍兹·霍尔海洋研究所的 Ruth Curry 带领,提供了全球水循环正在增强的直接证据。这个结果与全球变暖假设是一致的。全球变暖假设指出,当地球温度上升,海洋蒸发将增加。通过对比最近和历史的盐度观测结果,研究人员观测到,热带和亚热带大西洋区域的表面水域显著变咸。同时,在高纬度的北大西洋和南大西洋,其周围大量的海水变淡。这一趋势从 1990 年开始有加速的现象,1990 年至今,有 10 年是自 1861 年有记录以来最热的年份。科学家估计,热带大西洋的净蒸发率在过去 40 年增加了 5%—10%。这些发现非常重要,尤其是在全球很多地区都面临严峻的淡水资源压力时。全球水循环的加速可能会影响全球降水模式,降水模式影响着干旱、洪水和风暴的分布,严重程度和频率。它还将快速增加大气中的水蒸气,从而使全球变暖进一步恶化,因为水蒸气本身就是一种强大的吸热的温室气体。它还将继续淡化北大西洋的海水,直到破坏海洋环流和引发进一步的气候变化。

(未完待续)