

气候变化科学国际发展态势分析

曲建升, 张志强, 曾静静

(中国科学院国家科学图书馆兰州分馆, 兰州 730000)

摘要: 气候变化科学研究经过数十年的发展, 已经具备了相对完善的学科体系、相当规模的科研体系和科学家队伍, 并积累了一系列的科学研究成果。气候变化领域的科学研究活动在很大程度上依赖于跨区域、跨国界的, 集成多种手段和技术的, 融合不同圈层或对象的区域性或国际性的研究网络和计划, 其特点是以国际研究组织和研究计划为主体, 以国家研究计划和研究机构为支撑, 全球范围的科学界广泛参与的开放框架。开放、交叉和综合是国际气候变化科学研究得以成功实施的关键。对《科学引文索引》(SCI) 和《社会科学引文索引》(SSCI) 文献数据库 2003—2007 年气候变化科学论文的计量分析表明, 美国、英国、德国、加拿大、法国、中国、澳大利亚等国是气候变化研究领域最重要的参与国家, 中国科学院、美国科罗拉多大学、美国国家海洋与大气管理局、美国国家大气研究中心等是该领域最重要的研究机构。

气候变化科学研究和观测成果不断证实全球气候变化是全球气候系统的变化, 全球气候系统正在变暖是毋庸置疑的事实。政府间气候变化专门委员会(IPCC)2007年发布的第四次评估报告的成果表明, 过去的一百年全球平均地表温度上升了 0.74°C , 全球降雨的时空分布出现明显变化, 极端天气发生的概率明显增加。并预测, 到21世纪末, 全球地表平均将增温 $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$, 全球海平面平均将上升 $0.18\sim 0.59\text{m}$ 。有关人类活动对气候变化驱动作用的认识不断深入, IPCC第四次评估报告中指出最近50年气候变化主要是由人类活动引起的, 这一结论的可信度已由原来的66%提高到了目前的90%, 人为导致的温室气体浓度增加“很可能”(90%以上的可信度)是导致气候变暖的主要原因。

气候变化科学研究的关注重点从认识气候变化的事实, 寻找气候变化的原因与驱动机制, 到评估气候变化的影响, 预测未来气候变化情景等逐渐深入。人们已经认识到气候变化是一种不可避免的事实, 唯有采取积极措施应对才是正确的选择。提高以减缓和适应为核心的人类气候变化应对能力的科学研究正成为当前的研究热点。气候变化减缓与适应是人类社会应对气候变化挑战不可或缺的两个方面: 减缓气候变化是“主动出击”的应对战略, 主要指人类通过削减温室气体的排放源或增加温室气体的吸收汇而对气候系统实施的干预措施; 适应气候变化是“积极防御”的应对战略, 主要指增强人工生态系统和人类社会抵御气候变化冲击的适应和恢复能力。

气候变化科学研究仍面临很多挑战, 从发展趋势上来说, 发展跨越历史、现在和未来的气候变化评估、预测和预警研究将成为气候变化科学研究的重要方向, 社会科学将更多地介入气候变化科学研究并成为气候变化科学研究的重要特征, 适应和减缓将成为气候变化科学研究的重要内容, 气候变化科学研究将推动构建新型的世界观和价值观体系并为之提供必需的科学基础。

当前和未来一段时期气候变化研究将重点关注: ①气候变化科学中的关键性的基础科学研究; ②气候变化中的不确定性研究; ③气候变化影响、反馈机制与预测研究; ④气候变化的社会学方面研究; ⑤针对提高气候变化适应与减缓能力的开发研究; 以及⑥发展有利于实现气候变化目标的国际合作框架等。

我国也需要根据社会经济发展现状、研究的科学基础和自然条件, 针对气候变化相关的基础科学问题、技术开发、应对策略等开展有针对性的专门研究, 提高我国在气候变化挑战中的可持续发展能力。

关键词: 气候变化; 气候变化科学; 研究计划; 影响; 减缓; 适应; 文献计量分析

1 气候变化科学计划概述

1.1 气候变化科学研究的起源与发展

气候变化 (climate change 或 climatic change) 的理念在 20 世纪初期就已经出现 (Berry, 1923; Brooks, 1926; Dachnowski, 1922; Penck, 1914; Lamb H H, 1995; Fleming, 1998)。在这一时期及此前的气候变化主要指地质历史时期或仪器观测的气候记录的变化, 还较少关注气候变化对人类的影响。美国地理学家亨丁顿 1907 年的《亚洲的脉动》(Huntington, 1907) 是关于气候变化对文明影响最早的著作。1941 年美国农业部出版的农业年报 (Department of Agriculture/US, 1941), 以气候变化 (climatic change) 为题专门阐述气候变化的渊源和影响问题, 在关注地质历史时期的气候变化基础上, 发展了气候变化的概念, 提出在地质历史时期气候的变化是正常 (normal) 的, 并开始关注现代气候变化在不同区域的表现、对健康以及农业各方面的影响。

在 20 世纪后半叶, 是气候变化研究不断深入、研究方法不断发展、成果不断积累的时期 (Korec, 1975; Lamb, 1966; Mendonca, 1979; Ausubel *et al*, 1980; Firor, 1990; Trenberth, 1989; 葛全胜等, 1989), 气候变化的研究领域不断扩展, 逐步从大气科学领域向交叉领域发展。1975 年, “气候系统”作为一个科学概念被科学界接受, 标志着气候变化不再仅是与气候学有关的科学问题, 而是一个多学科、跨学科的科学主题, 与气象学、海洋学、地质学、冰川学、生物学和新技术等诸多学科有着密切联系 (WMO-ICSU Joint Organizing Committee, 1975), 但此时气候变化仍是属于自然科学领域的名词。

自 20 世纪 90 年代开始, 随着国际社会对全球变化、气候变化和全球环境变化等所指的环境问题的日益关注, 以及在《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 框架下逐步发展的全球一体的气候变化减缓行动, 使气候变化跨越科学的界限, 成为与政治、外交、经济、健康等密切相关的复杂主题 (Zwerver *et al*, 1995; Arrhenius *et al*, 1990; Lawrence Livermore National Laboratory, 1990), 气候变化、温室气体、全球变暖等已经成为全球妇孺咸知的公共问题甚至政治核心问题。2007 年 10 月 12 日, 当挪威诺贝尔委员会宣布将 2007 年度诺贝尔和平奖授予致力于气候变化科学评估的政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 和致力于传播气候变化知识的美国前副总统戈尔之时, 气候变化问题无疑成为了当今世界的最强音。更多的国家、组织和公众已经汇集到应对气候变化挑战的旗帜下, “在气候变化超出人类的控制之前, 人类必须立即行动起来了”。

1.2 国际气候变化科学研究计划

气候变化科学的研究对象范围广, 涉及从局地到全球各个尺度的大气圈及其与地球系统各个相关子系统的界面。研究手段和角度多样, 目前的研究工作可以利用现场观测和遥感、模式模拟、分析研究等多种手段, 从水圈、岩石圈、冰冻圈、生物圈和人类活动与全球气候的相互影响和反馈等多个角度开展。研究内容多样, 涉及气候变化驱动力与科学事实、气候变化影响与响应以及气候变化的减缓与适应等多方面内容。

气候变化科学研究作为一门面向复杂科学问题的交叉学科, 其研究活动的开展在很大程度上依赖于跨区域、跨国家的, 集成多种手段和技术的, 融合不同圈层或对象的区域性或国际性的研究网络和计划。在气候变化科学领域的国际大型计划中, 一些国际组织发挥了重要作用。这些国际组织处于大多数研究计划的顶层, 负责研究计划的发起、资助和协调, 其中以国际科学理事会 (ICSU, 即原国际科学联合会理事会, 1998 年更名)、世界气象组织 (WMO) 等最有影响力。ICSU 作为国际科学舞台的重要组织, 直接或间接地对国际气候变化科学研究进行了大量的资助。WMO 作为联合国下属的专门性机构, 在设立、支持气候变化科学研究计划方面作用最为突出, 在其支持的项目中, 又尤以世界气候研究计划 (WCRP) 最具代表性 (曲建升等, 2005)。

世界气候研究计划 (WCRP) 是 1967~1980 年执行的全球大气研究计划 (GARP) 和 1979 年全球

大气观测试验 (FGGE) 的延续。WCRP在成立之初就将发展对自然气候系统和气候过程的科学认识作为主要任务, 以确定人类对气候的影响程度, 更准确地预测气候。在过去的20余年里, WCRP已经在认识气候系统的单个组分(海洋、陆地、大气和冰冻圈)及其相互作用的变率和可预报性方面取得了大量的进展, 目前正在实施面向“地球系统的协调观测与预报”(COPEs)的新一轮研究战略(WCRP,2005)(图1)。除综合性的WCRP外, 国际上还设立了很多全球或区域尺度上的专门性的研究计划(表1)。正是在这些研究计划的探索和引领下, 国际气候变化科学认识不断发展。

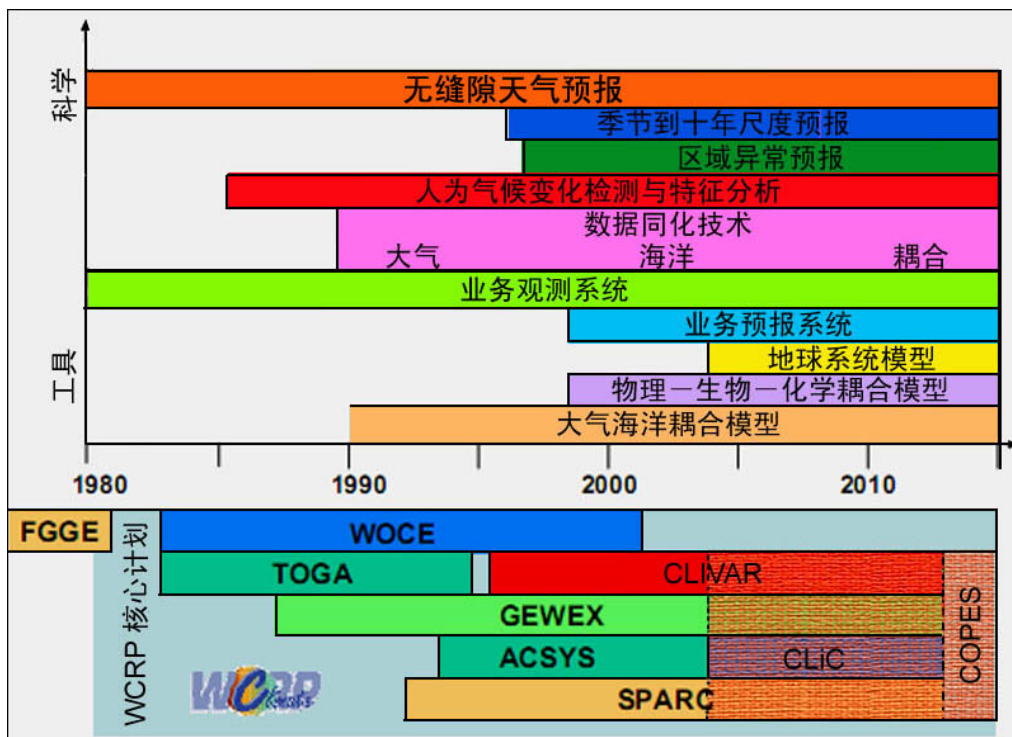


图 1 WCRP 业务发展历程与规划示意图 (WCRP, 2005)

表 1 气候变化科学领域主要的国际研究计划

计划名称	启动时间	执行信息	主要研究内容
世界气候研究计划 (WCRP)	1980	由国际科学理事会 (ICSU)、世界气象组织 (WMO)、联合国教科文组织政府间海洋委员会 (IOC) 联合资助。	全球能量与水循环试验 (GEWEX); 气候变率及其可预报性 (CLIVAR); 气候与冰冻圈 (CLIC); 平流层过程及其在气候中的作用 (SPARC); 地球系统的协调观测与预报 (COPEs)。
国际全球大气化学计划 (IGAC)	1988	由国际地圈生物圈计划 (IGBP) 和国际大气化学和全球污染委员会 (CACAP) 共同资助。	确定大气中长、短寿命化学成分的全球分布及其浓度变化; 为大气中化学物质的分布控制过程和它们对全球变化和空气质量的影响提供一个基本认识; 通过发展大气过程对地球系统的响应和反馈的综合认识, 提高对未来 10 年内大气化学成分预测能力。
过去的全球变化研究计划 (PAGES)	1991	国际地圈生物圈计划 (IGBP) 的核心计划	过去的气候强迫; 过去气候和环境动力学; 全球尺度的过去气候变化及其内部机制; 过去的人类-气候-生态系统的相互作用。
上层海洋-	2003	IGBP 和海洋研究科学	海洋与大气之间的生物地球化学相互作用和反馈;

低层大气研究计划 (SOLAS)		委员会(SCOR)的核心计划	海—气界面的交换过程和海洋大气边界层中的运输和转换作用； CO ₂ 和其他长寿命辐射活性气体的海—气界面通量。
陆地生态系统与大气过程综合研究 (iLEAPS)	2004	IGBP 的核心计划	CO ₂ 、CH ₄ 、易挥发有机成分、氮氧化物等成分的陆—气交换； 陆地生物群落、气溶胶与大气成分的反馈； 土地覆盖—水—气候间的反馈； 土壤—冠层—边界层系统中物质与能量转换的计算与模拟合。
全球碳计划 (GCP)	2001	地球系统科学联盟 (ESSP)的核心计划。	模式和变率：全球碳循环中主要的碳汇和碳通量的时空分布； 过程、控制和相互作用：控制碳循环动力学的根本机制； 碳管理：碳—气候—人系统的未来趋势及碳管理的机会与能力。
全球气候观测系统 (GCOS)	1992	由 WMO、IOC、联合国环境规划署(UNEP)和 ICSU 共同资助	气候系统监测、气候变化验证以及气候变化的影响与响应的监测； 气候数据在各国经济发展领域的应用； 开展专门性的研究，改善对气候系统的理解、模拟和预测工作。
美国气候变化科学计划 (CCSP)	2001	美国。是 1990 年设立的美 国全球变化研究计划 (USGCRP) 的继承和发展	认识过去及现在的地球气候和环境并揭示其变化原因； 改进对地球气候和相关系统发生变化的驱动因素的定量研究； 减少地球气候和相关系统变化研究中的不确定性； 了解不同的自然生态系统、人工生态系统、以及人类社会对气候和相关环境变化的敏感性和适应性。
英国气候影响研究计划 (UKCIP)	1997	英国	建立英国气候变化影响的综合评估研究网络，面向投资者、研究人员以及政府部门提供区域和国家尺度上的气候变化的影响以及适应性举措等方面的研究信息。
亚马孙流域大尺度生物圈—大气圈实验(LBA)	1995	巴西发起，美洲一些国家以及 IGBP 等国际组织广泛参与	定量分析与研究亚马孙流域中控制能量、水、碳、痕量气体和氮等 诸多循环的自然、化学和生物因素，确定其与全球大气的关系； 定量分析与预测在森林砍伐、农业耕作等土地利用变化以及气候变化的情景下，能量、水、痕量气体和氮的循环的响应机制； 确定亚马孙流域与大气间主要温室气体和物质的交换与调节机制； 从区域和全球的尺度为亚马孙流域的可持续发展和生态系统保护政策提供定量和定性的信息。
季风亚洲区域集成研究计划 (MAIRS)	2006	中国科学家发起和运行的 ESSP 的第一个区域集成研究项目	土地利用与覆盖变化对季风气候及区域水循环、水资源的影响； 气溶胶排放对大气能量收支和季风降水的影响过程及其机制； 人类活动影响的区域气候变化对全球气候变化的影响和响应。
北美碳计划 (NACP)	2002	美国	进行大气测量，研究陆地和海洋系统影响大气CO ₂ 浓度的机制，为碳源和汇的判断提供重要依据； 建立能够整合并集成观测数据的模型； 对陆地及相邻海盆中的碳储量和碳通量进行测量，以便于评估那些最终决定大气成分的机理。

1.3 国际气候变化科学研究体系的特点

气候变化领域的科学研究活动在很大程度上依赖于跨区域、跨国家的，集成多种手段和技术的，融合不同圈层或对象的区域性或国际性的研究网络和计划，其特点是以国际研究组织和研究计划为主体，以国家研究计划和研究机构为支撑，全球范围的科学界广泛参与的开放框架。开放、交叉和综合是国际气候变化科学研究得以成功实施的关键。具体而言，国际气候变化科学研究计划框架具

有以下特点。

1.3.1 多学科交叉支持

气候变化问题与自然和社会多部门具有错综复杂的关系，因此气候变化科学的组织模式及其发展围绕着了解气候变化的复杂驱动机制和影响方面开展，并利用了多学科的先进技术和研究手段。以气象学和气候学为主的大气科学是气候变化科学研究的主要学科，随着研究的深入和领域的拓展，地质学、地理学、海洋学、水文学、遥感和对地观测等地球科学其他学科以及生态学、植物学、动物学、环境科学、物理学、化学、空间科学和技术科学等学科也广泛介入，并成为气候变化科学研究不可或缺的重要学科支撑。社会科学的进入是气候变化科学研究最重要的发展阶段，这实现了气候变化科学研究从基础科学向应用科学的拓展，并进而构建了更广泛的多学科研究格局（图2）。

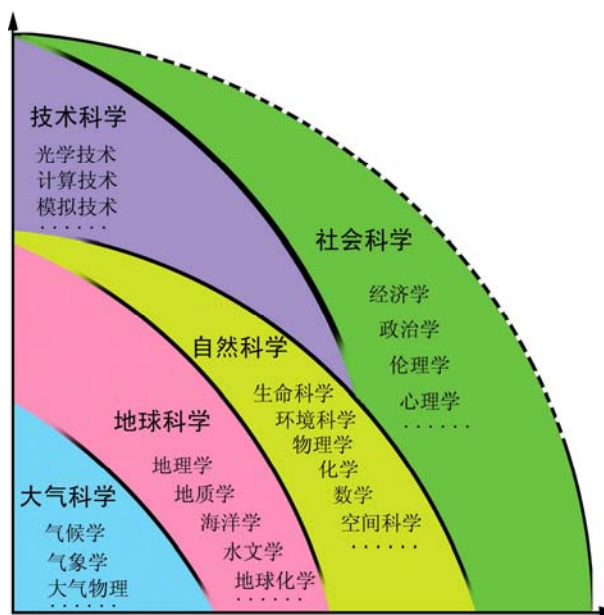


图2 气候变化科学研究多学科研究示意图

目前的气候变化科学研究计划体系包含了众多相关学科的技术和研究队伍，形成了多学科研究网络，这使气候变化科学领域组织专门的主题研究活动具有重要的优势和非常高的研究效率。单个的气候变化研究计划虽然多以某个学科领域为主，但无不兼容了多学科研究力量或体现了多学科的研究思维。如跨海洋、大气科学的 SOLAS 研究计划，兼顾生态科学与社会发展问题的亚马孙流域大尺度生物圈—大气圈实验（LBA）等。随着人类所面临的气候变化问题日渐增多和恶化，气候变化科学研究所面临的挑战也将不断升级，集成自然科学、技术科学和社会科学的多学科的研究思路和组织框架也必将进一步发展。

1.3.2 全时空研究覆盖

气候变化科学研究是一门面向气候系统的复杂科学，在其研究体系的发展过程中，最为突出的特点是发展了从单一问题到复杂问题、从局地到全球、从现在到历史和未来的四维的研究网络。气候变化研究计划对全时空尺度的覆盖，使解决具有复杂驱动机制和全球效应、持续影响的气候变化问题成为可能。

从空间角度看，气候变化科学研究建立了由国际组织、国家政府、民间组织积极参与，包含全球、区域、局地和点的多空间尺度研究布局。众多的研究行动也在不同尺度上既相互独立又互有联系地开展，尤其近几年不同空间尺度的比较和集成研究成为研究的重要环节。以全球碳循环研究为例，在全球范围内已经建立了规模庞大、联系紧密的碳循环观测和研究网络，各节点的观测和研究既是其他区域研究的重要比较和检验对象，也是全球碳循环集成研究的重要组成部分。

从时间角度看，以过去全球变化研究计划（PAGES）为主的研究行动将气候变化研究对象回溯到过去数十万甚至数千万年以前的气候和环境变化。PAGES从大洋沉积的分析，可以获知上千万年以来的古气候和古环境的状况，从黄土可取得过去数百万年的古气候和古环境信息，从冰盖可以了解数万年以来古气候和古环境的状况，从树木年轮和孢粉中则可以知道近千年来的气候和环境状况，考古和历史文献中也记录了过去数千年中的气候和环境变化信息。面向未来气候变化趋势及其影响的预测和预估研究，则为人类了解未来气候变化情景，应对即将到来的挑战提供了重要的信息。分布在全球不同国家和机构的模拟和评估系统是未来气候变化研究的重要支撑。

1.3.3 关注气候与人类活动之间的复杂联系

已经获得的科学认识表明，气候变化的产生源于自然与人类活动的综合作用，并最终对自然环境和人类社会产生共同但有差别的影响。在气候变化研究计划的组织过程中，也经历了从自然科学向交叉科学的发展，从最初仅关注自然系统的变化到目前关注自然和社会系统的共同驱动作用和复杂响应机制。

气候变化科学研究的组织也围绕科学和社会发展的需求而进行设计和部署，当前的气候变化研究框架既包括基础性的气候科学研究，也包括以服务社会需求为主的应用科学研究，但由于气候变化科学的复杂性，多数的研究计划均综合了科学和社会的多重研究需求。正是由于气候变化科学研究面向社会需求的灵活性，使面向社会公众的科学知识和应对策略发展迅速，国际性的气候变化行动已经成为气候变化科学研究计划的重要延伸（图3）。

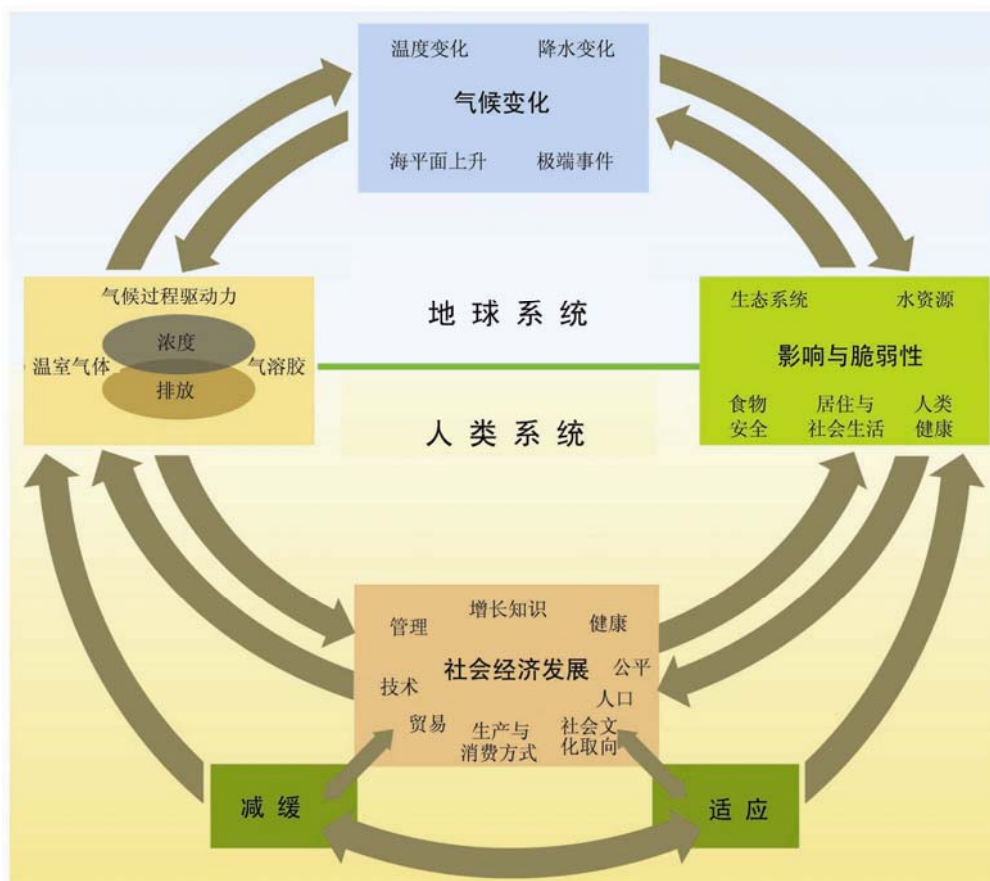


图3 气候变化科学研究所关注的、复杂的自然和社会驱动与响应机制

2 气候变化科学研究进展分析

2.1 气候变化事实的新认识

2.1.1 现代气候变化的事实

IPCC发布的第四次评估报告，再一次全面综合、回顾了全球气候变化的事实。IPCC第四次评估报告（IPCC, 2007a; IPCC, 2007b; IPCC, 2007c; 秦大河等, 2007）综合评述了大气圈、水圈和冰冻圈的变化，并深入讨论了大气环流形态变化等相关的现象，指出全球气候变化是气候系统的变化，气候系统正在变暖是毋庸置疑的事实。

过去100年(1906—2005年)全球平均地表温度上升了0.74(0.56~0.92)℃（图4），这一观测结果更

新了2001年IPCC第三次评估报告给出的过去100年(1901—2000年)上升了0.6(0.4~0.8)℃的研究结果。自1850年以来最暖的12个年份中有11个出现在1995—2006年间(1996年除外),过去50年的地表升温率几乎是过去100年的2倍。1961年以来的观测结果表明,全球海洋温度的增加已延伸到海面以下至少3000 m的深度,海洋已经并且正在吸收80%以上增加到气候系统的热量,这一增暖引起海水膨胀,并造成海平面上升,在20世纪,全球海平面已上升约0.17m。

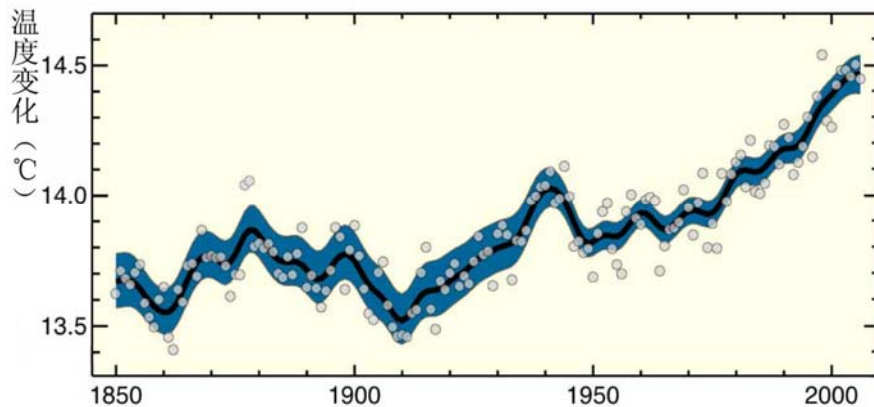


图4 工业化革命以来全球地表温度变化

注: 引自 IPCC 第四次评估报告第一工作组报告

在大陆、区域和海盆尺度上已观测到气候系统的长期变化,包括北极温度与冰的变化,降水量、海水盐度、风场以及干旱、强降水、热浪和热带气旋强度等极端天气方面的变化。近100年来北极平均温度几乎以2倍于全球平均速率的速度升高;1978年以来北极海冰面积以每10年2.7%的平均速率退缩;20世纪80年代以来北极多年冻土层顶部温度上升了3℃;北半球1900年以来季节冻土覆盖的最大面积已减少了约7%。许多地区观测到降水量在1901—2005年间存在变化趋势,北美和南美东部、欧洲北部、亚洲北部和中部降水量显著增加,而萨赫勒、地中海、非洲南部、亚洲南部部分地区降水量减少。20世纪60年代以来,南、北半球中纬度西风在加强;20世纪70年代以来在更大范围内,尤其是在热带和亚热带,观测到了强度更强、持续时间更长的干旱;近50年来强降水事件的发生频率有所上升,陆地上大部分地区强降水发生频率在增加,中国强降水事件也在增加。近50年来已观测到了极端温度的大范围变化,冷昼、冷夜和霜冻已变得较为少见,而热昼、热夜和热浪则更为频繁。热带气旋(台风和飓风)每年发生的次数没有明显变化趋势,但从20世纪70年代以来全球呈现出热带气旋强度增大的趋势,强台风发生的比例增加,其中在北太平洋、印度洋与西南太平洋增加最为显著。强台风出现的频率,由20世纪70年代初的不到20%,增加到21世纪初的35%以上。

通过以上观测事实,得到了一些新的重要结果:

(1) 太阳辐射变化对当代气候变暖的影响不是最重要的因素。对过去28年太阳总辐射的连续监测发现,11年太阳变化周期的极大和极小活动之间的辐射变化为0.08%,1750年以来由于太阳活动变化引起的直接辐射强迫仅为 0.12 W/m^2 ,而温室气体变化引起的辐射强迫为 2.30 W/m^2 。古气候资料也表明,过去几千年来北半球夏季太阳辐射呈现减少趋势。

(2) 过去对全球气候变暖是否引起了大气中水汽含量增加的推测没有确证,现在的结果显示,至少从20世纪80年代以来,无论在陆地和海洋上空,还是在对流层上层,平均大气水汽含量都有所增加;近50年来强降水事件的发生频率有所上升,这与增暖事实和观测到的大气水汽含量增加相一致。

(3) 更新的研究结果证明当前观测到的全球变暖与城市热岛效应关系不大。新的评估显示,城市热岛效应的影响是局部的,对全球平均气温的影响可被忽略(对陆地升温的贡献小于 $0.006^\circ\text{C}/10\text{a}$,海洋上为零)。

(4) 全球变暖引起的海洋膨胀和冰盖、冰川融化使海平面上升。新的观测结果发现, 1961—2003年全球平均海平面平均上升速率为1.8 mm/a, 1993—2003年期间卫星观测的速率约为3.1mm/a。

(5) 过去认为夜间温度的升高速率是白天的两倍, 温度日较差趋于减小。最新结果表明, 1979—2004年温度日较差未发生变化, 因为白天和夜间温度均以大致相同的速率升高。

(6) 过去对极端事件变化的认识十分有限, IPCC第四次评估报告基于比较完整的全球陆地资料, 指出冷昼、冷夜和霜冻的发生频率减小, 而热昼、热夜和热浪的发生频率增加。

2.1.2 古气候变化研究的新成果

IPCC第四次评估报告综合了多项古气候研究代用指标的研究结果后指出, 20世纪后半叶北半球平均温度很可能比过去500年中任何一个50年时段更高, 也可能至少在最近1300年中是最高的, 即最近1000多年的北半球平均温度曲线呈现所谓的“曲棍球杆”变化的观点(National Research Council of the National Academies, 2006)。这些结论得到了包括树轮、冰芯和珊瑚等气候代用资料的支持, 由于资料的扩充、测点的大量增加和分析方法的改进, 古气候研究的不确定性已大为减少。不过古气候资料与1850年以后的器测记录相比, 在时间和空间上均显得不足。因此, 主要使用统计方法建立的这一时期北半球平均温度序列也会存在一些不确定性。

在距今1000~5000年间, 由于地球轨道参数的变化, 北半球山地冰川发生了一次显著的退缩事件, 但当时冰川退缩的规模比20世纪末要小得多。目前全球性的山地冰川退缩似乎并不是由这样的原因引起的, 因为北半球过去几千年夏季太阳辐射在减少, 这应当有利于冰川增长。

距今约12.5万年的末次间冰期期间, 由于格陵兰冰盖和北极冰原融化等原因导致全球平均海平面可能比20世纪高4~6 m, 其中, 格陵兰冰盖和北极冰原融化所造成的海平面上升可能不超过4 m, 南极对海平面上升或许也有所贡献。冰芯资料显示, 当时北极平均温度比现在高3~5℃, 这是由地球轨道参数变化造成的。另外, 一些研究工作也证明末次冰期冰盛期(LGM, 距今约2.1万年)和全新世大暖期(距今约0.6万年)与当前的气候变暖不同, 前者主要与地球轨道参数的变化有关, 后者主要是由全球辐射强迫变化造成的。

古气候资料也提供了许多区域气候变化的证据。过去的ENSO事件的强度和频率亦存在变化; 许多古气候突变很可能与大西洋经向翻转环流(meridional overturning circulation, MOC)的变化有关, 影响到了北半球的广大地区; 亚洲季风的强度及季风降水量也会发生突变。非洲北部和东部及北美等地古气候记录表明, 过去2000年中在各地发生的持续几十年或更长期的干旱具有准周期性气候特征, 所以目前在北美和非洲北部出现的干旱并非前所未见。

2.2 气候变化原因的新解释

从地球系统变化的历史而言, 气候变化是长期存在的事实, 总体而言, 气候变化来自内部和外部的多方面驱动力, 如:

外力因素: 太阳辐射直接驱动了发生在地球表面的各种过程。太阳辐射的变化改变了到达大气顶层的能量, 并通过影响物理气候系统的能量收支平衡导致气候变化, 进而引起全球变化。此外还有受其他天体的引力作用产生的地球运动轨道参数的改变。

地球内力因素: 地球海陆分布变化、山地和高原隆起、火山活动等, 可以改变地球洋流、大气环流、大气化学成分、陆面过程等的改变, 进而影响环境的变化。

自人类诞生以来, 人类就成为地球系统中的组成部分, 而且随着人类活动在土地覆盖变化、污染物排放、对自然生态系统的破坏、对自然资源的攫取等方面影响的扩大, 人类改变地球系统功能的作用逐渐增强, 尤其在工业化革命以后, 人类已经成为地球系统中具有重要影响的子系统。

但在气候变化是否真实存在、气候变化的驱动因素及其作用、气候变化减缓措施的效用等方面一度存在激烈的科学分歧。随着研究的不断深入, 有关气候变化问题是否存在的争论在20世纪后期

结束，气候变化是不可否认的事实已经得到科学界的普遍认同。对气候变化原因的解释，长期存在着“自然因素说”和“人为因素说”的争论。坚持自然因素是驱动当前气候变化主导因素的研究人员认为，在地质历史时期，比当前波动更为强烈的气候变化就曾存在，而且，当前气候变化中的突变问题只能以自然因素来解释。坚持气候变化“人为因素说”的研究人员更是以大量翔实的对比研究和模拟结果证明了人类活动与气候变化的密切联系，并预测了如果不加遏制气候变化将成为人类梦魇的情景。“人为因素说”的研究结论更多获得了社会公众、民间组织和政治家的认同，有关气候变化的原因的共识也逐步形成。但需要注意的是，以上两种观点都没有否认气候变化中自然和人为因素的综合影响，争论的要点更多是孰轻孰重的问题。

通过 IPCC 先后四次评估报告中的不同阐述，可以看出科学界对气候变化原因的科学发展。1990 年的第一份评估报告指出，观测到的温度升高可能是自然活动或人类活动或两者共同造成的；1995 年的第二份报告指出，有明显的证据可以检测出人类活动对气候的影响；2001 年的第三次评估报告第一次提出，新的、更有力的证据表明，过去 50 年观测到的全球大部分增暖可能由人类活动产生的温室气体浓度的增加引起；2007 年第四次评估报告中进一步提高了最近 50 年气候变化主要是由人类活动引起的可信度（由原来的 66% 的最低限提高到了目前的 90%），指出人为导致的温室气体浓度增加“很可能”（90% 以上的可信度）是导致气候变暖的主要原因（IPCC, 1990; IPCC, 1995; IPCC, 2001; IPCC, 2007a; IPCC, 2007b; IPCC, 2007c; 秦大河等, 2007）。

温室气体浓度的大幅升高，使全球温室效应明显增强。综合美国橡树岭国家实验室 CO₂ 信息分析中心（CDIAC）、世界资源研究所（WRI）和美国能源部能源信息管理局（EIA）的数据，自 1751 年第一次工业化革命以来，全球累计排放了 1.16 万亿吨 CO₂（截止 2004 年）（图 5）。与人类活动排放的温室气体量骤增相对应，自 1750 年以来，全球大气二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)浓度也显著增加，目前总浓度已远远超出了根据冰芯记录得到的工业革命前几千年内的浓度值。CO₂ 是最重要的人为温室气体，全球大气 CO₂ 浓度已从工业革命前约 280 mL/m³ (ppm)，增加到了 2005 年的 379 mL/m³，到 2006 年其浓度更是达到了 381.2 mL/m³，远远超过了过去 65 万年来自然因素引起的变化范围。全球 CH₄ 浓度也从工业革命前的 715 μL/m³ (ppb) 增加到了 20 世纪 90 年代的 1732 μL/m³，2006 年更是达到了 1782 μL/m³。全球 N₂O 浓度在工业革命前为 270 μL/m³，到 2006 年也升高到了 320.1 μL/m³（World Meteorological Organization, 2007）。

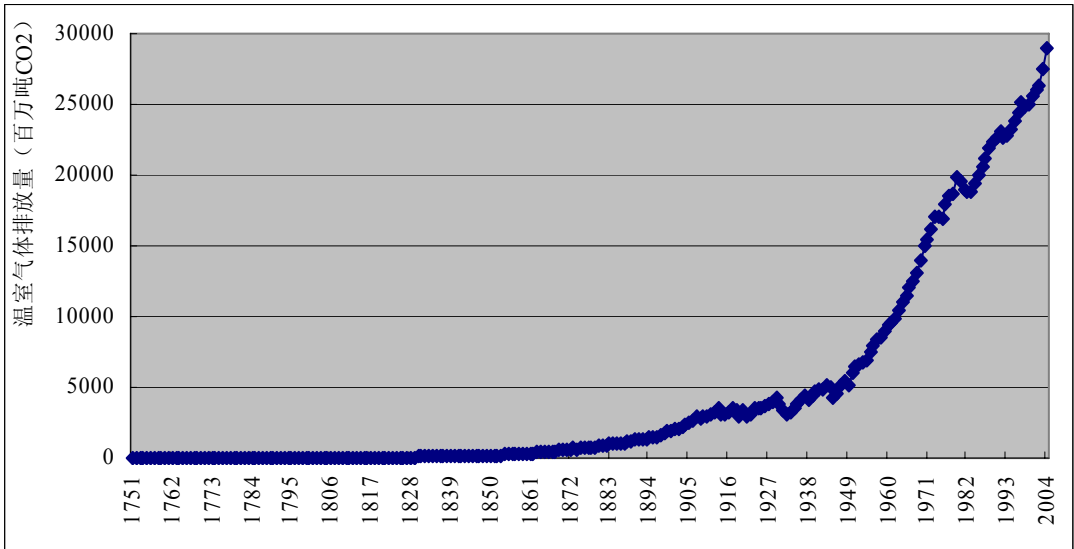


图 5 工业化革命（1751 年）以来全球温室气体排放量变化趋势
（数据来源：CDIAC、WRI 和 EIA）

2.3 气候变化预测的新结论

IPCC第四次评估运用全球14个模式中心的23个全球气候系统模式进行了有关气候变化成因和预测的数值模拟。这一高度集成的预测工作包括了9种温室气体排放情景,以及温度、降水、海平面气压场、大气环流场、海平面高度、冰雪变化等常规因素,也给出了云和日变化的预估,而且对一些重要现象(如北极涛动、南极涛动、北大西洋涛动、经向翻转环流、季风、ENSO)和一些极端天气和气候事件(如极端最高、最低温度,酷暑期长度,霜冻期长度,洪涝与干旱强度,热带与温带气旋,飓风与台风频数和强度变化等)进行了预估(赵宗慈,2006)。

综合多模式多排放情景的预估结果表明,到21世纪末,全球地表平均增温 $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$,全球平均海平面上升幅度为 $0.18\sim 0.59\text{m}$ 。在未来20年中,气温大约以每10年上升 0.2°C 的速度升高,即使所有温室气体和气溶胶浓度稳定在2000年的水平,全球地表温度每10年也将增暖 0.1°C 。若温室气体浓度以目前的趋势继续增加,将引起进一步气候系统变暖问题,从而导致21世纪全球气候系统的更多变化,这些变化可能要比20世纪观测到的大得多。

第四次评估报告对变暖的分布和其他区域尺度特征的预估结果较第三次评估报告更为可信,包括风场、降水、以及极端事件和冰的变化。预计陆地上和北半球高纬地区的增暖最为显著,而南大洋和北大西洋的变暖最弱;积雪会缩减,大部分多年冻土区的融化深度会普遍增加,北极和南极的海冰会退缩。极热事件、热浪和强降水事件的发生频率很可能将会持续上升;热带气旋(台风和飓风)的强度可能会更强并伴随着更大的风速和更强的降水;热带以外的风暴路径会向极地方向移动,引起热带外地区风、降水和温度场的变化;高纬地区的降水量很可能增多,而多数亚热带大陆地区的降水量可能减少。

即使温室气体浓度保持不变,由于与气候过程和反馈相关的时间尺度的存在,人类活动引起的变暖和海平面上升将会持续数个世纪。海洋和陆地生物圈对 CO_2 吸收的自然过程可以清除 $50\%\sim 60\%$ 的人为 CO_2 排放量,但海洋对人为 CO_2 的吸收,会导致表层海水酸化程度的不断增加。预计21世纪全球平均大洋表面的pH值将会降低 $0.14\sim 0.35$ 个单位。

美国《国家科学院院刊》(PNAS)在2008年2月份发表的一份评估报告(Timothy *et al*, 2008)对影响未来气候系统发生变化的、具有多米诺牌效应的关键临界因素进行了分析(表2),并提出了未来更为严峻的气候变化挑战。这份由来自英国、德国和美国等52个国家或地区的气候专家联合发布的研究成果认为这些因素的变化一旦突破“临界点”,将引发更为严峻的气候系统变化,并带来不可逆转的影响。这份报告提出,北极夏季海冰消融很快会达到临界点,进而加速融化直至完全消失;格陵兰岛冰盖可能在300年后完全消融,但其消融的速度将在50年后达到“临界点”并进入快速消融阶段;大洋环流停止的概率虽然非常低,但从科学上是存在可能性的,而且其潜在威胁非常之大;西伯利亚地区和加拿大一些由耐寒植物组成的针叶林可能逐渐消失;亚马孙热带雨林也将因全球气温升高和不断遭到砍伐而最终从地球上消失。

2.4 气候变化影响的新认识

来自所有大陆和多数海洋的观测证据表明(林而达等,2007),区域气候变化特别是温度升高已经对许多自然系统产生了影响。例如,在许多主要由冰川和积雪融水补给的河流中,径流量增大,春季洪峰提前(Boon *et al*, 2003);春季的一些物候现象(如树木发芽、鸟类迁徙和产蛋等)出现时间提前;高纬海洋中藻类、浮游生物和鱼类的地理分布发生迁移,数量发生变化等。

IPCC第四次评估报告综合了75项研究结果(其中约70项是IPCC第三次评估报告之后的新成果)进行评估显示,过去30年的人为增暖可能已对许多自然系统(包括冰雪和冻土、水文、海岸带过程)和生物系统(包括陆地、海洋、淡水生物系统)产生了可辨别的影响。尽管由于适应以及非气候因子的作用,许多影响很难辨别,但区域气候变化对自然和人类环境造成的其他影响正在出现。例如,在北半球高纬地区对农业和林业管理的影响包括农作物的春季播种提前,以及由于林火和虫害所造成的森林干扰体系的变更等;山区的人居环境遭受冰川消融引起的冰湖溃决洪水的风险加大;海平面上升和人类活动都给海岸带湿地和红树林的消失带来影响,并使海岸带洪水造成的损害加大。

表2 气候系统发生变化的临界因素

不断变化的临界因素	控制参数	临界值	全球变暖幅度*	预测发生时间	主要影响
北极夏季海冰面积减少	当地大气温度变化、海洋热量传输	未确定	升高 0.5~2℃	大约 10 年	加剧变暖、生态系统变化
格陵兰冰盖冰量减少	当地大气温度变化	大约增加 3℃	升高 1~2℃	大于 300 年	海平面升高 2~7m
南极西部冰原冰量减少	当地大气温度或者海温变化	大约增加 5~8℃	升高 3~5℃	大于 300 年	海平面升高 5m
大西洋温盐环流翻转	淡水输入北大西洋	淡水生产率增加 0.1~0.5×10 ⁶ m ³ /s	升高 3~5℃	大约 100 年	区域变冷、海平面上升、热带辐合带转换
厄尔尼诺—南方涛动振幅增强	温跃层深度、在赤道东太平洋地区发生的程度	未确定	升高 3~6℃	大约 100 年	东南亚及其他地区干旱
印度夏季季风区降雨减少	印度地区的行星反照率	0.5	未提供	大约 1 年	干旱、承载力降低
撒哈拉/萨赫勒地区与西非季风区植被斑块增多	降水	100mm/a	升高 3~5℃	大约 10 年	承载力增强
亚马孙雨林破碎化	降水、旱季长度	1100mm/a	升高 3~4℃	大约 50 年	生物多样性丧失、降雨减少
北方针叶林破碎化	当地大气温度变化	升高大约 7℃	升高 3~5℃	大约 50 年	生物群落转变
南极底层水形成减缓	降水—蒸发	增加 100mm/a	不清楚	大约 100 年	海洋环流、碳储存
冻土苔原区树木斑块增加	可生长天数	未获得	--	大约 100 年	加剧变暖、生物群落转变
永久冻土体积减少	冻土温度变化	未获得	--	小于 100 年	CH ₄ 和CO ₂ 排放
海洋天然气水合物体积减少	海底沉积层温度变化	未确认	不清楚	1000 ~ 10 万年	增强全球变暖趋势
海洋缺氧情况增强	磷向海洋的排放量	大约增加 20%	不清楚	大约 1 万年	海洋生物大量消亡
北极臭氧减少	极地平流层云的形成	195 K	不清楚	小于 1 年	UV 辐射增强

2.4.1 未来气候变化对自然和社会系统的影响

随着气候变化问题的日益加剧、极端天气和气候事件（及其引发的相关事件，如海平面上升）发生概率的增加，自然系统和社会生活的各个方面将面临更大的威胁和挑战，其中的一些影响可能会带来不可恢复的或毁灭性的灾难。

(1) 对淡水资源及其管理系统的影响。预计21世纪中叶前，在高纬度和部分热带湿润地区，年

* 全球变暖幅度是相对于 1980-1999 年的温度而言。

平均河流径流量和可用水量会增加10%~40%，而在某些中纬度和热带干旱地区(其中某些地区目前正在遭受严重的水短缺问题)，其径流量和可用水量会减少10%~30%。21世纪冰川和积雪中储藏的水量预计会下降，从而减少了靠冰雪融水供给地区的可用水量，而这些地区居住着当今世界上1/6以上的人口。

(2) 对生态系统的影响。在21世纪中叶前陆地生态系统的碳净吸收可能达到高峰，随后减弱甚至逆转，从而导致气候变化的加剧。如果全球平均温度增幅超过1.5~2.5℃，目前所评估的20%~30%的动植物物种所面临的灭绝风险将会增大，但这个结果只有中等可信度(准确率约为50%)。

(3) 对粮食、纤维和林业产品的影响。在中高纬地区，如果局地平均温度增加1~3℃，粮食产量预计会有少量增加；若升温超过这一范围，某些地区农作物产量则会降低。而在低纬地区，特别是干季热带地区，即使局地温度有少量增加(1~2℃)，也会导致农作物产量降低。从全球角度看，若局地平均温度增加范围在1~3℃，粮食生产潜力预计会随温度升高而增加，若超过这一范围，则会降低。这一结果也为中等可信度。

(4) 对海岸带系统和低洼地区的影响。随着温度的升高，珊瑚礁生态系统将更为脆弱，适应能力降低；若海表温度升高约1~3℃，预计会导致更为频繁和更大面积的珊瑚白化事件。到21世纪80年代，由于海平面上升，预计每年会有数百万以上的人口遭受洪涝之害；受影响的人口数量在亚洲和非洲的大三角洲地区最多，而小岛屿地区尤其脆弱。

(5) 对工业、人居环境和社会的影响。海岸带和易发江河洪涝的地区、极端天气事件易发地区，特别是城市化发展快速的地区在面对气候变化时是最脆弱的；那些位于高风险区域的贫穷社区更为脆弱，因为他们的适应能力有限，对敏感的气候资源的依赖性较强。

(6) 对健康的影响。气候变化会影响全球数百万低适应能力人口的健康。但在温带地区进行的研究显示，气候变化也会带来某些益处，如由严寒造成的死亡会减少等。但总体上看，这些好处将会被增暖带来的负面影响所抵消，特别是在不发达国家。

2.4.2 未来气候变化对不同区域的影响

由于地域的不同和自然生态系统的差别，地球不同区域所面对的气候变化问题可能存在类型、范围和程度上的差异，而且由于社会生产和生活体系的差异，不同区域在面对气候变化问题时也表现出了不同的脆弱性，这两个因素使地球不同区域的气候变化影响及其表现存在一定程度的差别。

(1) 非洲。非洲是对气候变化最为脆弱的大陆之一。到2020年，预计有0.75~2.5亿非洲人口的用水问题会因为气候变化而加剧，这不仅会直接影响到当地人口的生活，而且会使与水有关的其他问题(如地区安全)进一步恶化。

(2) 亚洲。预测未来20~30年，喜马拉雅地区的冰川融化会使洪水和岩崩概率增加；随着冰川后退，江河径流量将逐步减少。由于海水入侵以及在某些大三角洲地区来自河流的洪水增加，沿海地区特别是南亚、东亚和东南亚人口稠密的大三角洲地区将会面临极大的风险。到21世纪中叶，东亚和东南亚地区的农作物增产预计可达20%，而中亚和南亚将减产30%。考虑到人口的快速增长和城市化的影响，总体上看，在几个发展中国家，饥荒的风险水平很高。

(3) 澳大利亚和新西兰。预计到2020年，在某些生态资源丰富的地区，包括大堡礁和昆士兰湿热带，生物多样性会显著减少。其他地区，如卡卡都湿地、澳大利亚西南部地区、亚南极洲岛屿和两国的高山地区，也面临这种风险。到2030年，由于干旱和火灾增多，在澳大利亚南部和东部大部分地区以及新西兰东部的部分地区，农业和林业产量预计会下降。

(4) 欧洲。预计肆虐的热浪将导致健康风险的增大。几乎所有欧洲地区都会受到未来气候变化的不利影响，包括内陆突发洪水的风险增加，海岸带洪水更加频繁，侵蚀加重，许多经济部门将面临挑战。绝大多数生物群落和生态系统将难以适应气候的变化。高山地区将面临冰川退缩，导致积雪和冬季旅游减少、大范围的物种损失(在高排放情景下，到2080年，某些地区物种损失将高达60%)。气候变化会增大欧洲在自然资源与物质财富上的地区差异。

(5) 拉丁美洲。到21世纪中叶，温度升高及相应的土壤水分降低，会使亚马孙东部地区热带雨林逐渐被热带稀树草原所取代，半干旱植被将趋向于被干旱地区植被所取代。在热带拉丁美洲的许多地区，物种灭绝使生物多样性显著减少。

(6) 北美洲。21世纪最初几十年，适度的气候变化会使雨养农业生产总量增长5%~20%，但地区间存在显著差异。对于农作物，预估的主要挑战为温度升高是否接近其适宜范围的上限，或者所依赖的水资源能否高效利用。目前遭遇热浪的城市，预计在21世纪会遭受更多、更强、持续时间更长的热浪袭击，对健康造成不利影响。

(7) 极地地区。预计气候变化对极地的主要影响为冰川、冰盖的厚度和面积的减少，北极地区还包括海冰和多年冻土面积减少，海岸带侵蚀加重，多年冻土季节融化深度增加。随着海冰融化，北冰洋通航潜力增大，北极地区可能出现更多的利益角逐和冲突。由于气候对物种入侵的屏障降低，两极地区特殊的生态系统和生境可能面临更多的风险。

(8) 小岛屿。海平面上升会加剧洪水、风暴潮、侵蚀以及其他海岸带灾害，进而危及那些支撑小岛屿社区生计的重要基础设施、人居环境和设施。

3 气候变化科学热点及其发展态势

气候变化科学研究经历了关注气候变化的事实、寻找气候变化的原因与驱动机制、评估气候变化的影响、预测未来气候变化情景等多个阶段，在这个过程中，认识和科学上的不确定性不断减少。人们已经认识到气候变化是一种不可逃避的事实，唯有采取积极措施应对才是正确的选择。一方面，针对气候系统变化规律与趋势、气候系统变化影响评估的研究依旧在如火如荼地实施中；另一方面，寻找人类社会应对气候变化挑战的科学选择的研究成为近年来气候变化科学的热点内容。前者将为正确的气候变化应对方案提供科学基础，而后进者的进展将关乎人类在气候变化挑战中的生存与发展能力。虽然在应对气候变化挑战的立场和具体举措上仍然存在一些不同的观点，但更多的力量正在不断集中到以温室气体减排为核心的气候变化减缓行动和以提高人类社会适应和恢复能力为核心的气候变化适应行动上来。本文将主要分析气候变化适应和减缓这两大热点及其发展态势。

气候变化的减缓与适应是人类社会应对气候变化挑战的两个方面：减缓气候变化是“主动出击”的应对战略，主要指人类通过削减温室气体的排放源或增加温室气体的吸收汇而对气候系统实施的干预措施；适应气候变化是“积极防御”的应对战略，主要指增强人工生态系统和人类社会抵御气候变化冲击的适应和恢复能力。减缓与适应是气候变化研究的重点领域，随着国际社会对气候变化问题认识的逐步统一，有关减缓和适应的研究和行动已经与人类可持续的未来紧密相连。

3.1 气候变化减缓研究和行动的发展

3.1.1 气候变化减缓行动的科学基础

减缓气候变化的科学基础是：以温室气体排放为主的人类活动改变了气候系统格局，并引发了全球变暖等气候变化问题，通过了解人类活动对气候变化的驱动机制，采取各种措施主动降低人类活动对气候变化的驱动力，可以在未来一定时期内减缓气候变化的强度、趋势和速率。对气候变化减缓行动的选择和效果目前仍然存在一定的争议，但更多的科学家和政治家正在说服更多的国家和组织加入到气候变化减缓行动的行列中来。目前的减缓行动正在与构建有利于可持续性的发展模式结合起来，以降低气候变化的相关风险。

为了减缓气候变化，人类社会可以选取相应的手段或措施实现温室气体的减排，从而减少大气温室气体浓度，如减少高排放产品和服务的需求、增加既能节省开支又能减少排放的高效产品、增强碳汇、推行低碳技术、进行碳捕获与封存等。但是，任何减缓气候变化的行动都必然有一定的经济含义。

IPCC (IPCC, 2007b) 认为，未来20~30年的减缓措施，会在很大程度上关系到能否将温室气体浓度稳定在较低水平。如果把温室气体浓度稳定在 490 mL/m^3 (535 mL/m^3 、 590 mL/m^3 、 710 mL/m^3 、

855 mL/m³或1130 mL/m³二氧化碳当量以下，对应全球平均温度相对工业革命前升高2.0~2.4℃（2.4~2.8℃、2.8~3.2℃、3.2~4.0℃、4.0~4.9℃或4.9~6.1℃），那么年排放量需在2015年（2020年、2030年、2060年、2080年或2090年）之前下降相应的幅度（表3），这意味着需要在技术的发展、获取、应用和推广等方面建立适当和有效的激励机制，同时扫除有关障碍。

表3 不同气候变化情景下温室气体长期减缓目标估算

CO ₂ 浓度/ (mL/m ³)	CO ₂ 当量浓度 (mL/m ³)	比工业革命前全球平均升温的最佳估算/°C	CO ₂ 排放峰值 年度	2050年全球CO ₂ 排放变化量 (相对于2000年排放)(%)
350~400	445~490	2.0~2.4	2000 - 2015年	- 85~- 50
400~440	490~535	2.4~2.8	2000 - 2020年	- 60~- 30
440~485	535~590	2.8~3.2	2010 - 2030年	- 30~+5
485~570	590~710	3.2~4.0	2020 - 2060年	+10~+60
570~660	710~855	4.0~4.9	2050 - 2080年	+25~+85
660~790	855~1130	4.9~6.1	2060 - 2090年	+90~+140

英国斯特恩报告分析了将减排目标设定在450~550 mL/m³（ppm）二氧化碳当量基础上的经济成本（任小波等，2007）。该报告指出，要使全球温室气体浓度稳定在或是低于550 mL/m³，就要求全球排放在未来10~20年达到最高峰，并且在此之后应以每年1%~3%的速率下降，到2050年，全球排放量应达到当前水平的25%之下。这种减排目标必需实现，而且是在那时世界经济为目前的3~4倍水平的情况下，即在2050年，每单位GDP的减排量将达到目前的4倍。如果要使温室气体浓度稳定在450 mL/m³的水平，全球排放量将在今后10年内达到最高峰，而且在这之后需要再以每年高于5%的速率减排，并最终达到现在排放水平的70%。实现巨额减排是需要成本的。报告提出，要在2050年前，把温室气体排放量在目前水平上减少25%的成本大概是GDP的1%左右（-1%~3.5%）。这是个有重要意义的水平，也是个易于管理的水平，但一旦减排工作拖延下来，那么成本将会更高。

基于对温室气体减排行动经济成本、参与度和科学不确定性的考虑，温室气体减排行动推行“无悔措施”的原则（潘家华，2003）。所谓“无悔措施”，是指在没有减缓气候变化政策措施的情况下，企业和政府出于节省能源成本或减少污染等目的减少温室气体排放，因而不仅没有直接的减排成本，而且还会有相应的降低能源开支或社会损失的收益。例如照明用的白炽灯比节能灯要消耗数倍的电能，如用节能灯，则可节省大量的电费，对于消费者来说，应该是一种净收益。与此同时，节省了电力，也就减少了发电燃烧的化石能源，温室气体的排放也就在没有政策干预的情况下得到了减排。同样，减少化石能源的燃烧，对人体健康有害的大气污染物排放也会相应地减少，从而带来防治污染的社会效益。如果没有气候变化，人们也会采取相应行动，不会感到后悔。“无悔措施”多基于技术层面的分析。从供给方看，生产者有经济激励降低能源消耗和能源损失，从而降低成本获取更多利润。例如采用大功率发电机组比小功率发电机组的能源转换效率高。对于这种技术至上的乐观主义分析，许多经济学家持有异议，认为任何“无悔措施”的采用，均涉及交易成本。基于“无悔”原则的减排行动并未在更多领域得到自愿实施即说明了可能存在一定的障碍，如信息的可获得性、采用新技术的风险因素等。

气候变化减缓技术在改善环境的同时也可能会给环境带来其他的影响。以CO₂封存技术来讲，根据对目前CO₂封存地点、自然系统、工程系统和模式的观测和分析,经过适当选择和管理,历经百年或千年保留在储层中的CO₂有可能超过99%。但也可能发生渗漏,渗漏的潜在后果目前还很难确定。就已有CO₂管道而言,绝大多数是在低人口密度地区,而且管道意外事故的发生概率非常低,但不排除将来管道通过人口居住区和CO₂大量释放的可能性,而一旦事故发生地表空气中CO₂浓度超过7%~

10%，就会对人类生命和健康产生直接威胁。另外，还有其他的可能影响，如海洋封存导致海洋“死亡区”、CO₂加注引发小地震等。

3.1.2 国际气候变化减缓行动的主要框架

自 20 世纪 80 年代开始，随着国际社会对气候变化问题的日益关注，更多的国际组织和国家认识到必需采取积极的措施应对气候变化的挑战。截至目前，已经形成了以《联合国气候变化框架公约》为主体，以区域性减缓行动和国家减缓行动为补充和支撑的国际气候变化减缓行动框架。《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 及其《京都议定书》(Kyoto Protocol) 是最重要的气候变化减缓和温室气体减排的国际条约。另外，国际上还建立了一些区域性的或专门化的温室气体减排合作框架，如 2006 年 1 月在澳大利亚悉尼正式启动的“亚太清洁发展与气候新伙伴计划”(AP6)、2005 年 1 月正式启动的“欧盟排放贸易框架”(EU ETS) 等、2004 年 11 月启动的“甲烷市场化合作计划”。这些政府间的减排合作有些已经取得了阶段性的减排成果，有些已经确定了明确的技术合作计划。自愿减排计划也是一些地区、部门或组织极力推行的一种减排模式，但由于缺乏足够的约束力，目前自愿减排行动的减排规模还较小，减排效益也不明显，总体上仍停留在理念普及层面。

(1) 《联合国气候变化框架公约》与《京都议定书》

在 1992 年里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上，以气候变化和温室气体减排合作为主要内容的联合国框架下第一个政府间气候协议——《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 获得通过。为了明确各国减排义务，切实推进温室气体减排运动，在 1997 年 12 月于京都召开的 UNFCCC 第三次缔约方大会上 149 个国家的代表通过了以量化减排目标限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖的《京都议定书》，《京都议定书》于 2005 年 2 月生效。根据温室气体对全球变暖的贡献、来源、稳定性、易监测程度、并考虑到其他公约的约束等情况，《京都议定书》将强制减排的温室气体种类限定为 CO₂、CH₄、N₂O、HFC_s、PFC_s 和 SF₆ 等 6 种气体，这 6 种温室气体按照各自升温潜力指数，统一以二氧化碳当量 (CO₂e) 计算。

《京都议定书》规定，在 2008—2012 年间，缔约的发达国家排放量要在 1990 年的水平上减少 5.2%。具体地说，各发达国家从 2008 年到 2012 年必须完成的削减目标是，与 1990 年相比，欧盟削减 8%，美国削减 7%，日本削减 6%，加拿大削减 6%，东欧各国削减 5%~8%，新西兰、俄罗斯、乌克兰等国可将排放量稳定在 1990 的水平上。《京都议定书》同时允许冰岛、澳大利亚和挪威的排放量比 1990 的水平分别增加 10%、8%、1%。

按照“共同但有差别”的原则，发展中国家不承担量化的减排义务。为了保证全球减排目标的实现，《京都议定书》确立了多种灵活减排机制，如联合履约机制 (JI)、清洁发展机制 (CDM) 和排放贸易机制 (ET)。其中，清洁发展机制 (CDM) 是发达国家提供资金或技术援助，在发展中国家实施温室气体减排的一种灵活机制，这是目前已经成功实施、并取得一定成果的一项减排行动。

自 2005 年 2 月《京都议定书》生效以来，国际温室气体减排行动进入了一个有章可循的快速发展时期。尤其是清洁发展机制，由于其较低的成本，吸引了各缔约方的积极参与，初步的减排成果已经显现。截至 2008 年 2 月 2 日，全球已注册 CDM 项目 909 项，年减排量约 1.9 亿吨 CO₂ 当量 (CO₂e)，其中中国的年减排量占 48.22% (图 6)。到 2012 年 (《京都议定书》第一履约期结束)，这些已注册的项目预期减排量将超过 11.5 亿吨 CO₂e，而根据预测，到 2012 年，CDM 项目最终将可能产生超过 26 亿吨 CO₂e 的减排量。

《京都议定书》其他的减排机制中，联合履约机制 (JI) 发展规模较小，排放贸易机制 (ET) 正在进行全面启动的准备中。

为了促进温室气体减排的信息和技术在国家政府、企业和公众间的交流和转移，《联合国气候变化框架公约》还设立了开放的气候变化信息网络 (CC:iNet) 和技术信息交换中心 (TT:Clear)。

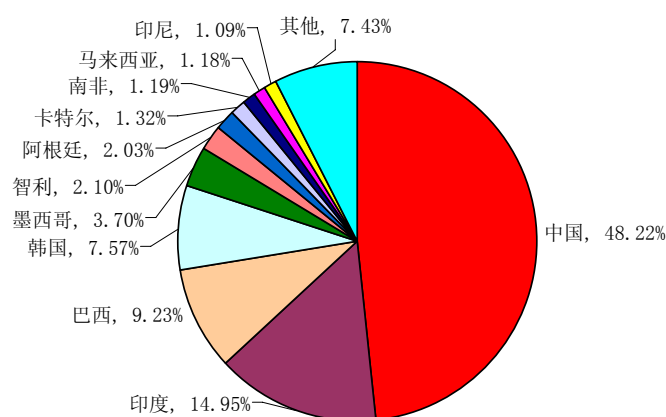


图 6 全球已注册 CDM 项目年均减排量的国家分布

数据来源：UNFCCC

(2) 亚太清洁发展与气候新伙伴计划

“亚太清洁发展与气候新伙伴计划”（Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate, AP6）由澳大利亚、中国、印度、日本、韩国和美国于 2005 年 7 月发起，并于 2006 年 1 月 12 日在澳大利亚悉尼正式启动。这 6 个国家拥有世界上近 50%的人口和近 50%的国内生产总值，其能源消耗和温室气体排放总量占全球的比例也接近 50%，因此 AP6 的实施对全球温室气体减排行动具有重要的意义。AP6 的目标是建立一个自愿、无法律约束力的国际合作框架，通过合作促进高效益、更清洁、更有效的新技术在伙伴国之间的转让。

在 2006 年 1 月的第一次部长级会议上，AP6 成立了 8 个专门工作小组，这 8 个小组将分别针对化石能源（煤、石油、天然气等）、可再生能源和分布式供能、钢铁、铝、水泥、煤矿、发电和输电、建筑和家用电器的开发利用等 8 个领域开展技术合作与转让，并通过项目层面的合作来实现温室气体的减排。二氧化碳的收集和存储、煤炭净化处理、煤层气开发等技术的研发和应用以及私营企业在解决气候变化问题中的作用都在 AP6 的关注范围内。“亚太清洁发展与气候新伙伴计划”着眼于通过技术合作和转让，以及项目层面的合作来实现温室气体的减排，是对《京都议定书》的补充，为全球气候变化领域的合作开辟了一条新的途径。

(3) 欧盟排放贸易框架

“欧盟排放贸易框架”（EU Emissions Trading Scheme, EU ETS）于 2005 年 1 月开始启动，是目前最大的跨国家、多部门参与的温室气体排放贸易体系，覆盖了欧盟现有 25 个成员国的近 1.15 万个工业排放实体，占欧盟二氧化碳排放总量的 45%。ETS 的目标是在降低履行《京都议定书》减排义务成本的同时，为 2008 年后参与全球碳排放贸易积累经验。ETS 分两个阶段执行，2005—2007 年为第一阶段，主要是就能源工业、有色金属的生产和加工、建材和造纸等能源密集型行业生产过程中的 CO₂ 减排量进行交易；2008 年后执行第二阶段，交易领域将逐步扩大。欧盟确信，通过建立欧盟排放贸易框架可以使欧洲实现《京都议定书》目标的成本从 68 亿欧元降低到 29~37 亿欧元之间（European Communities, 2005）。

为了适应后京都时代温室气体减排交易的挑战与需求，欧盟又制定了 ETS 改革的新方案并于 2008 年 1 月 23 日发布。ETS 新方案的执行期限为 2013—2020 年，其主要内容包括：

1) 2020 年整个欧盟工业排在 2005 年基础上降低 21%。为实现欧盟这一统一的目标，自 2012 年底开始，流通的排放配额将每年削减 1.74%。

2) 将扩大排放权交易的范围,以包含一些之前未包含的新部门,如航空、石化、氨水和铝部门,并且新增两类气体,即 N_2O 和全氟化碳(PFCs)。道路交通和海运仍然排除在外,但海运有可能以后加入进来。农业和森林业也因为排放的监测困难而排除在该法令的范围之外。

3) ETS不包含的部门到2020年平均减排10%,比如交通,建筑,农业和废弃物,欧盟委员会根据各国GDP设定了各个国家的目标。富裕国家需要承担更大的减排义务,而相对贫困的国家有权增加温室气体排放。

4) 如果存在替代减排措施,排放在每年1万吨 CO_2 以下的小型装置将被允许排除在ETS之外。

5) 通过碳捕获和封存技术防止工业温室气体排放到大气中可以被认定为未排放。

6) 拍卖:现在90%的排放配额是免费分配。然而,新方案预见在2013年拍卖的方式会大大增加。免费配额的分配方式将在以后由欧盟委员会专家组确定。分配原则将奖励那些已经采取行动减少温室气体的企业,将更好的反映“污染者付费原则”,并采取激励措施减少排放。

7) 成员国可以继续通过在欧盟之外的国家资助减排项目来完成它们的减排指标,但这种信用额的使用将被限制在2005年成员国排放总量的3%以内。

(4) 甲烷市场化合作计划

甲烷占有所有由人类活动产生的温室气体的16%。甲烷不但是强效的温室气体,与 CO_2 相比其寿命也很短,如果其排放量可被显著减少的话,将对气候变暖产生快速的影响。

甲烷市场化合作计划(Methane to Markets Partnership)是一项多边合作计划,于2004年11月发起,目前由中、美、印、日、澳等20个成员国组成,并包括一些积极参与的私营部门。该计划的目的在于减少全球甲烷排放,从而促进经济增长、强化能源安全、改善空气质量以及减少温室气体排放。预期到2015年,通过该计划所减排的甲烷量每年将超过1.8亿吨 CO_2e 。该计划的实施还将增进矿山安全、减少废物以及改善地方空气质量。甲烷市场化合作计划现阶段重点关注来自动物排泄物、煤矿、垃圾填埋场以及天然气和石油系统的甲烷的回收利用。

甲烷市场化合作计划的核心任务是:

- 1) 针对甲烷回收利用发掘并促进双边、多边以及与私营部门的合作领域。
- 2) 开发完善的排放量评估方法、鉴别大型的相关排放源,以推动项目开发。
- 3) 发掘高成本效益的甲烷排放回收机会以便生产能源,以及发掘潜在的项目融资机制,鼓励投资。
- 4) 鉴别并应对项目发展所面临的障碍,完善法律、监管、财政、制度、技术及其他必要条件,为甲烷回收利用项目吸引投资。
- 5) 为应对甲烷回收所面临的特定挑战,发掘并实施相关合作项目。
- 6) 与私营部门、研究机构、发展银行以及其他相关政府和非政府组织培养合作关系。
- 7) 针对甲烷回收利用,支持最佳管理规范的发掘和部署。

3.1.3 气候变化减缓技术的新发展

技术在减缓气候变化行动中发挥着越来越重要的作用,先进的气候变化减缓技术将是既有助于实现气候变化目标,又不对经济发展造成过大损害的最佳选择。一些国际组织、国家政府相继制订气候变化减缓技术发展规划,有步骤地实施技术研发与普及工作。目前,全球气候变化减缓技术的研发和示范工作方兴未艾。

气候变化减缓技术是指为了减缓全球气候变化而采取的技术,包括已有和新开发的技术。基于当前对气候变化的认识,在全球范围内减少温室气体的排放量,从而降低全球的温室效应,是目前气候变化减缓行动中最重要的工作。因此,致力于降低全球大气温室气体含量的相关技术是气候变化减缓行动的关键技术。

美国普林斯顿大学的Pacala 与Socolow提出了“稳定楔”理论(Pacala *et al.*, 2004),该理论提出,可以利用15种气候变化技术,把50年后的全球大气 CO_2 浓度稳定在 $500 mL/m^3$ 的水平上(即在未来50年内全球每年 CO_2 的排放量平均为70亿t)。这15种技术的应用将像楔子一样,在稳定全球大气

CO₂浓度中发挥重要作用。根据“稳定楔”模型的模拟，每种技术的利用可使CO₂排放量每年减少1亿吨，如果全球排放浓度在2050年前要达到目前的水平，则需要将其中7种技术综合应用以实现减排目标。Pacala与Socolow将这15种“稳定楔”技术分为以下五类：

- (1) 提高能源效率及管理。包括：
 - 1) 提升燃料的使用效能；
 - 2) 减少车辆的使用；
 - 3) 高效能的建筑物；
 - 4) 提高发电厂效能。
- (2) 燃料使用的转换与CO₂的捕集及储存。包括：
 - 5) 以天然气取代煤作为燃料；
 - 6) 储存来自发电厂捕获的CO₂；
 - 7) 储存来自氢气电厂捕集的CO₂；
 - 8) 储存来自综合燃料发电厂捕集的CO₂。
- (3) 核能发电。包括：
 - 9) 用核能替代燃煤发电的技术。
- (4) 可再生能源及燃料。包括：
 - 10) 风能发电；
 - 11) 太阳能发电；
 - 12) 可再生燃料——氢；
 - 13) 生物质能。
- (5) 森林和耕地对CO₂的吸收作用。包括：
 - 14) 森林管理；
 - 15) 耕地的管理。

Pacala与Socolow较为全面地归纳了主要的气候变化减缓技术，其他一些组织或研究计划也概括了一些气候变化减缓技术。如世界自然基金会(WWF)提出的气候变化减缓技术主要包括6种(WWF, 2007)：提高能源利用效率、停止森林的破坏、加快低排放技术发展、开发替代燃料、用低碳排放的天然气的代替高碳排放的煤、在使用化石燃料的工厂装配碳捕获和封存设施。美国全球能源技术战略计划(GTSP)(GTSP, 2007)认为主要的气候变化减缓技术包括CO₂的收集与储存、生物技术、氢气、核能、生物能与风能、以及能源末端效率的提高等6种。美国气候变化技术计划(CCTP)(CCTP, 2006)指出重要的气候变化减缓技术包括：氢能源、生物提炼、清洁煤、碳储存、核分裂和聚变能等。国际能源署(IEA)在其《能源技术展望：2050年的情景与战略》研究报告中(IEA, 2006)阐述了在发电、建筑、工业和交通领域的关键能源技术的现状和前景，并对其潜力进行评估，指出能源效率、CO₂的捕获与封存、可再生能源、核电可能是有助于实现全球减排目标的战略因素。

根据当前气候变化减缓技术的总体水平、关注程度和应用潜力情况，相对成熟的关键气候变化减缓技术包括：能源利用效率提高技术、CO₂捕获与封存技术、低碳排放技术、生物燃料与氢燃料技术等。

3.1.3.1 能源利用效率提高技术

在IEA的新技术发展情景中，到2050年，建筑业、工业和交通运输业能效要比常规商业情景(BAU)的能效高17%~33%。依据快速发展的新技术情景，相对于常规商业情景，在2050年节能贡献中，来自技术的贡献将占总CO₂减排量的45%~53%。WWF的报告指出，能源效率问题是需要优先考虑的，特别是在发展中国家尤其重要。根据预测，至2020~2025年，在初级能源生产净需求稳定的情况下，能源效率的提高就可以满足能源服务的增长需求，到2050年，可以达到每年减少9.4Gt CO₂的水平。

3.1.3.2 CO₂的捕获与封存技术

在IEA的快速发展的新技术情景中，利用CO₂捕获与碳封存（CCS）技术减少的CO₂排放量占总CO₂减排量的20%~28%。洁净煤技术和CCS技术为拥有大量煤矿资源的经济快速发展国家如中国和印度提供了非常重要的机遇。在限制CO₂排放的全球活动中，CCS技术在提供低成本电力方面可以起到不可或缺的作用。

WWF的报告建议，应在使用化石燃料的工厂装配碳捕获和封存设施。WWF预测表明，为了使CO₂排放保持在一定的范围内，化石燃料发电厂要尽可能在2050年前装配碳捕获和封存设施。新电厂的规划与选址对CCS项目的实施有着重要意义，因为CO₂的远距离传输和封存代价昂贵。总体而言，碳捕获和封存能解决26%的燃料问题，每年能减少的温室气体量为3.8Gt。

美国全球能源技术战略（GTSP）中也将CCS技术列为其6大技术之一。美国气候变化技术计划（CCTP）报告中指出，CCS技术已经成为CCTP框架下的研发项目组合的高优先级焦点问题，原因是它具有减少点源排放的CO₂和大气CO₂的潜力，并能使人们在未来继续使用煤和其他化石燃料。CCTP近期优先的研发工作包括：优化的碳固定和管理技术；强化采油技术；加速CO₂捕获技术和地质储存技术的发展。长期的研发工作重点包括：未来其他类型的地质储存和隔离技术的发展；海洋在碳储藏中的地位及其可能影响（IPCC，2005）。

3.1.3.3 低碳技术

IEA与WWF均将天然气的利用列为主要技术之一。IEA指出，在所有快速发展的新技术情景中，天然气在发电中所占的比重仍保持相当强劲势头，到2050年其所占比重将达到28%。全球充足的天然气储备可满足发电需求，但是很多因素将影响其实际有效性和价格。天然气在发电时所排放的CO₂只是煤炭发电所排放CO₂的一半。提高天然气发电厂的效率是现代发电技术的范例之一，新型的联合循环天然气电厂可节能60%左右。该技术更大范围的推广使用可极大地降低CO₂排放量。为达到更高的效率，需要高度耐高温的新材料。

WWF及GTSP认为，风能、太阳能、水能、光伏、热能与生物能等低碳技术的开发利用迫在眉睫。WWF特别指出，到2050年，在能源效率技术广泛应用后，低排放技术能满足其余70%的能源需求并每年减少10.2Gt的CO₂。

IEA预测，2050年核能将占世界发电的16%~19%，而核电的增长将比常规商业情景减少6%~10%的排放量。在对核能持消极态度的预测情景中，核电在发电中所占的比重降至6.7%，同常规商业情景处于同一水平。在对核能持乐观态度的情景方案中，核能在2050年将占全球发电比重的22.2%。

3.1.3.4 生物燃料与氢燃料技术

很多国际组织将发展氢能系统作为降低排放的最重要技术之一。IEA预测，生物燃料在交通运输部门的使用可降低大约6%的CO₂排放；到2050年，氢的消费将超过300万吨油当量，可以减少约8亿吨的CO₂排放量，由于燃料效率的提高又可以减少约7亿吨的CO₂排放量。IEA估计，到2050年，氢和生物燃料将占交通运输部门总的终端能源需求的35%。根据这一情景预测，在2050年全球对原油的需求可以回落到当今的水平。

WWF的模型表明，如果没有其他大量的新能源（如风能和太阳能资源），并且以容易储存与运输的方式来满足工业生产的需求，化石燃料使用量的大幅消减是不可能的，而新的燃料，如氢气，要满足这些要求将需要新的生产和输送的重大基础设施。

3.1.3.5 其他技术

WWF认为停止森林的破坏是减少排放的主要途径之一，停止对森林特别是热带雨林的破坏，可为实现总体的减排目标贡献100~150 Gt的CO₂减排量。如果没有阻止土地利用变化的有效措施，气候应对方案成功的可能性将会从90%降至35%。

IEA的技术情景预测,到2050年前,可再生能源如水能、风能、太阳能以及生物质能等可再生能源的增长,可以降低发电行业9%~16%的CO₂排放量。可再生能源在电源结构中所占的比重将从现在的18%提高至2050年的34%。

GTSP与CCTP认为,能源末端利用也是减排的核心技术之一。CCTP指出,通过能源末端利用和基础设施等先进技术的推动,温室气体特别是CO₂的减排效率将快速提高。在美国,针对CO₂排放的主要末端利用领域包括:建筑物中电和燃料的使用;交通运输燃料;工业上电和燃料的使用;少数与燃烧无关的工业生产(European Communities, 2007)。

另外,减少非CO₂温室气体的排放技术也值得注意。CCTP指出,非CO₂温室气体的减排成本较低而减排效果显著。到21世纪中期,非CO₂温室气体减排技术可以减少或避免大约150 Gt碳的排放,相当于过去100年间的水平。这几乎达到所有减排、捕获、封存温室气体总量的25%,而其减排成本也将降低1/3。

3.2 气候变化适应性研究与实践的新发展

3.2.1 适应全球气候变化的科学基础

气候变化已成事实,并不可避免。在未来几十年内,即使做出最激进的减缓努力,也不能避免气候变化的影响,这使得适应成为主要的措施,特别是在应对近期的气候变化影响时。从长远看,如果不采取减缓措施,气候变化可能会超出自然、管理和人类系统的适应能力,使人类抵御气候变化的能力大幅削弱。因此,在应对气候变化挑战的战略选择中,要兼顾适应与减缓的相互促进和相互补充,制定一揽子计划,将减缓、适应、技术发展(以提高适应和减缓能力)与科学研究充分结合,把政策与激励手段,以及从公民个体到国家政府和国际机构所采取的行动联系在一起。

通过提高适应能力并增强恢复能力,可以提高人类社会的可持续发展能力,降低人类社会应对气候变化的脆弱性,而且对于某些气候变化影响来说,适应可能是唯一可行和适当的应对措施。人类社会可选用的适应措施非常多,从纯技术(如海岸带防护)到行为(如改变食物和娱乐选择),到管理(如改变耕作习惯),再到政策(如计划调整)。目前,提高适应能力的有效途径之一就是要把气候变化影响纳入到发展规划中,如把适应措施包含在土地利用规划和基础设施设计中、把降低脆弱性的措施包含在现有的降低灾害风险策略中。

社会系统在应对气候变化时具有不同程度和不同表现的脆弱性,这直接影响到适应行为的选择和适应的效果。但脆弱性不仅仅取决于气候变化,还与人类社会的发展方式有着密切关系。《IPCC排放情景(SRES)特别报告》指出,由于发展途径不同,所预计的气候变化影响也会迥然不同。例如,在不同情景下,地区之间在人口、收入和技术发展上可能存在巨大的非气候变化的差异,而这些因素通常对气候变化的脆弱程度和适应性选择起很大的决定性作用。各国和各利益团体为满足自身需求所进行的资源竞争将加剧非气候的危机,这将增强气候变化的脆弱性,也会降低适应能力。脆弱地区面临多重危机,例如,当前的气候灾害、贫穷和资源获取上的不公平、无法保障的粮食安全、经济的全球化趋势、冲突、以及诸如艾滋病的各种疾病发生。适应措施需要与其他措施相结合,如水资源管理、海岸带防护以及防灾规划,而不是仅仅针对气候变化的单一措施。

3.2.2 气候变化适应性研究的新认识

方修琦等(方修琦等, 2007)对气候变化适应性研究的历史与发展现状进行了综述分析,认为适应作为人类应对气候变化的最主要措施之一,仍处于不断的发展和完善中。适应一词源于生态学,用于定义对一定范围的环境偶发事件,能够通过适当改变,适应新情况以保证种群生存和延续的一种能力。一个物种、种群或个体可以通过改善自身状况来更好地适应变化,并通过遗传保留下相应的适应特征。这种能力与人类系统很相似,人类可以通过学习能力(吸取经验教训)和技术进步不断适应,它包括社会和经济活动的活力以及人类生活的质量等(Gallopin *et al*, 1989)。生物系统对于干扰的反应仅仅是一种被动的反应,而人类系统则存在被动的和主动的两种反应方式(Smithers *et al*, 1997)。

对气候变化适应的概念解释还存在一定的差异。2001年IPCC定义的适应能力是系统调整自身以适应气候变化和极端事件和趋利避害的能力。适应被定义为“为了应对实际发生的或预计到的气候变化及其各种影响(不利或者有利的),而在自然和人类系统内进行调整”。而Kasperson等(Kasperson *et al*, 2005)则认为,调整与适应是不同的。调整是系统在不改变自身的前提下,应对干扰和压力时而进行的短期的和相对的系统微调。适应是系统应对干扰和压力时,能够有效地调整自身,有时甚至是将系统状态转换到一种新的状态下的表现。Smit等(Smit *et al*, 2006)赋予适应更广泛的含义,他们认为适应是不同尺度系统中(家庭、社区、群体、区域、国家)的一个过程、一种行动或者结果,当面对气候变化、压力、灾害以及风险或者机遇时,系统能更好地应对、管理或调整。适应具有预见性,这种预见性取决于人们的目标和计划(Smit *et al*, 2000; Fankhauser *et al*, 1999)。

对适应能力(adaptive capacity)和响应能力(capacity of response)是否是一个概念以及它们之间的关系还存在争议,有的研究者(Adger, 2006)认为这些概念是相似的,系统的应对能力或者响应能力都可以称为适应能力,也有研究者(Turner *et al*, 2003)认为应对能力和响应能力与适应能力区别对待,认为它们都是系统弹性的组成部分,把适应看作是系统响应之后的结构重组过程。Gallopín(Gallopín, 2006)认为响应能力是系统的一种固有属性,它是系统应对干扰,达到趋利避害目的的一种调整能力,以及面对系统发生转型时的应对能力。响应能力很显然是先于干扰而存在的一种系统属性。一些作者将应对能力理解为仅仅为了生存而采取的短期性行为,适应能力则用于长期的或者更为持续的调整能力(Vogel, 1998)。

目前,越来越多的学者强调转型能力在提高社会—生态系统适应能力、实施适应性协调管理方面的重要性。转型能力是指当生态、政治、社会和经济条件变化导致现有系统无法维持现状时,人们重新构建新系统的一种能力(Walker *et al*, 2004; Waterloo, 2004)。适应不仅仅是对当前条件和短期阶段的一种反应,而且还应包括如何将人类社会—生态系统的发展转换到更为可持续的发展道路上(Folke, 2006)。

虽然通过适应措施可以有效遏制许多气候变化的早期影响,但随着气候的不断变化,可选的有效适应措施会减少,相关的成本会增大。而且,一些措施未必能有效地降低风险,特别是在变暖影响更甚的情况下。在一些地区和一定时段内,适应措施的执行在环境、经济、信息、社会、态度和行为等方面也可能存在着相当大的障碍。对发展中国家而言,资源的有效利用以及适应能力建设尤为重要。因此,不能指望仅靠适应就能应对气候变化所带来的全部预期影响,特别是不可能应对长期的影响,因为大多数影响会随时间发生量级上的增长。

3.2.3 气候变化适应性实践的新发展

人类社会应对环境挑战具有长期的经验积累,从远古根据水源和食物的变化的迁徙,到近代为抵御飓风而建设的海防堤坝,无不是人类对环境变化所采取的适应举措。在日益严峻的气候变化挑战面前,人类社会面临更多的和具有更大影响的潜在威胁。人类社会已经认识到需要尽早开始适应能力的建设和发展工作,因为越早开始,风险越低、投入越少。目前,在社会生活的各个方面国际社会正在采取分散的或统一的行动,以提高人类社会抵御气候变化的能力。在采取适应行动方面已经达成的共识包括:

(1) 开展预测与预警工作,为迎接气候变化做准备。通过改善和加强季节性气候预报、保险、粮食保障、淡水供应、救灾应急等工作,可以避免在遭受气候变化影响时,出现混乱和较大的损失。

(2) 采取适应行动,可以降低经济损失。如不努力适应,气温每升高 2.5°C 就可能会使各国的国内生产总值平均下降 $0.5\%\sim 2\%$ 。但采取适应措施,也将增加一些社会成本,如为了增强建设项目对气候影响的适应力,会增加 $5\%\sim 20\%$ 不等的额外成本。

(3) 发展中国家面临更大挑战,但援助有限。适应气候变化对所有国家都重要,对发展中国家来说更是如此,一方面这些国家的经济严重依赖农业等易受气候影响的行业,具有更高的脆弱性,另一方面,发展中国家的财力难以支持其对未来的风险及早做出反应。以塞拉利昂为例,如对其所有易受影响的海岸采取全面防范措施需花费11亿美元,这将占到该国国内生产总值的17%。但目前

很少有官方发展援助愿意把未来气候风险纳入援助规划中。

(4) 拖延意味着更大风险。如不及时采取适应措施，包括拖延对发展中国家提高适应能力的资助，那么未来气候变化所带来的危害将更严重，重建成本或继续适应的成本将更高。气候重大变化，如旱灾、季风降雨不足或冰川融水流失等，如不及早适应，都可能触发大规模的人口迁徙，以及因争夺水、粮食和能源等珍贵资源而引起的区域冲突。

IPCC 综合报告中指出 (IPCC, 2007d)，可以在不同部门执行不同的气候适应性对策选择 (表 4)，以实现协同作用并避免与可持续发展的其它方面发生冲突。有关宏观经济和其他非气候政策的决策可以显著影响排放、适应能力和脆弱性。

表4 不同部门可采取的适应性对策

部门	适应对策	基础政策框架	适应性对策的限制和机遇	
			限制	机遇
水	增加雨水收集；水储存技术；水的再利用；海水淡化；水利利用和灌溉效率	国家水资源政策和综合水资源管理；水灾害管理	财政、人力资源和自然障碍	综合水资源管理；与其他部门的协调
农业	种植制度和作物品种的调整；适宜作物的布局；改进土地管理，例如，通过植树造林实现水土保持	研发政策；机构改革；土地利用和国土整治；培训；能力建设；农业保险；财政激励政策，例如，补偿和财税信用	技术和财政限制；新品种推广；市场	高纬度生长期延长；“新”作物品种的收益
基础设施/居民点(包括海岸带)	移民；防波堤和风暴潮防护设施；固沙；为防治海平面上升和海岸带洪涝而规划建设缓冲地带，如沼泽和湿地；保护现有的自然屏障	综合考虑气候变化的设计标准和规范；土地政策；建筑物标准；保险	财政和技术限制；移民的土地可行性	综合政策和管理；与可持续发展目标的协调
人类健康	高温一健康行动计划；应急医疗服务；改进对气候敏感疾病的监控；改善安全的饮用水供应和卫生条件	考虑气候风险的公共卫生政策；加强医疗服务；区域和国际合作	人类承受能力的限制（脆弱人群）；认识限制；财政能力	提高医疗服务；改进生活质量
旅游	旅游热点和收益的多样化；高海拔地区滑雪运动受限与人工造雪	综合规划（如承载能力；与其他部门的联系）；财政激励政策，如补偿和财税信用	新旅游热点的开发和宣传；财政和旅游条件的限制；对其他部门的潜在影响（如人工造雪可能增加能源消耗）	“新”旅游景点的收益；更多的利益相关者
交通	交通布局调整；考虑增温和泄洪需修改公路、铁路及其他设施建设标准和规划；	综合考虑气候变化对全国交通政策进行调整；特殊环境的研发投资，如多年冻土地区	财政和技术障碍；对气候变化脆弱性较小路线的可行性	提高技术及与其他部门的协调（如能源）
能源	加固架空电缆和输电设施；地下电缆的使用；能源效率；可再生资源开发利用；降低对单一能源的依赖	国家能源政策、法规和财政金融激励，鼓励使用替代能源；在设计标准中考虑气候变化	不同替代能源的获取；财政和技术限制；新技术的采用	采用新技术的激励；当地资源的使用

国家是组织实施气候变化适应行动的最重要的主体。通过推行、实施行之有效的适应策略，如加强决策过程的科学依据、开发评估适应的方法与工具、加强对社会公众尤其是青少年进行气候变化适应教育、个人与机构适应能力的发展、气候变化适应技术的开发与转移、推动制定地方应对策略等。此外，最初开展的适应活动可包括建立适当的立法和法规框架，在规划行动中首先推广有利于气候变化适应的措施。目前，在全球范围内，一些对气候变化敏感的国家正在实施气候变化适应

能力的建设项目 (UNEP,2007)。如:

(1) 尼泊尔对朔罗尔帕冰湖采取部分排水措施,以预防冰川融水增多,导致冰湖溃决;在不丹,联合国发展规划署正在实施全球环境基金的一个项目。这个项目是通过加强灾难管理能力、人工降低索托米湖的水位和安装预警系统等措施来强化普纳卡一旺地和查姆卡流域的适应能力。

(2) 欧洲、澳大利亚和北美的滑雪业因为暖冬无雪而增加人工造雪。

(3) 加拿大联邦大桥的设计和荷兰对沿海地区的管理已经考虑到海平面升高的情况;

(4) 在哥伦比亚,国家适应综合项目正在安第斯山脉中部的拉斯何莫萨马斯夫推行各种适应措施,包括实施用水管制以保证水利发电,加强对这一重要山区生态系统服务功能的维持工作等。

(5) 基里巴斯是世界上最脆弱的国家之一,其国土散布于太平洋地区中西部的 33 个低平环礁。一项适应计划正在为一脆弱地区提供相关信息和增强适应能力的方法,包括改善对生物多样性的管理、维护、恢复和可持续利用,改善对红树林和珊瑚礁的管理、以及加强政府能力,把适应充分纳入经济规划中。

(6) 联合国环境开发署和世界银行正在推出全球环境基金的系列项目,协助非洲社区评估风险和针对干旱、沿海洪水和健康风险可能采取的各种对策。在莫桑比克,全球环境基金的一个项目正在将气候因素纳入可持续土地管理实践,以减少极端气候对人口和生态系统的影响。

由于海平面上升的威胁不断加剧,小岛屿国家处于对抗气候变化的前线地位,是世界上所有国家中受气候变化不利影响最大、处境最为危险、备受国际社会关注的一个群体(张庆阳,2005)。为了适应气候变化,防御、减轻气候变化等引起的海平面升高所带来的危害,在大量的国际援助和研究成果的支持下,小岛屿国家根据各自具体情况采取了多种积极举措适应气候变化,如后退措施、顺应措施和防护措施等。

(1) 后退措施。后退措施是对可能因海平面升高而造成灾害的灾区,放弃容易受海水淹没的土地、盐田和基础设施等海岸带,使灾区居民迁移到安全地带定居。选择后退措施的理由是采取保护措施的经济代价或环境代价过大。图瓦卢请求举国移民澳大利亚、新西兰就属于后退战略措施。

(2) 顺应措施。顺应措施虽然不采取任何尝试来保护处境危险海岸带的土地、基础设施等财产,但采取措施使这个地区在海平面升高一定范围内,仍然继续适于居住。具体措施不是建设防止海水淹没的设施,而是制定并实施防灾、减灾计划、用木桩将房屋架高、改进排水系统、将农田改作水产养殖场、改种耐涝耐海水的农作物等。顺应措施与海岸带管理、防灾减灾方案、土地利用计划和可持续发展战略有机结合实施,将更加有效。

(3) 防护措施。防护措施的选择因地制宜。具体措施主要包括建设处境危险海岸防潮海堤;在沿海公路、港口和海岸工程设计中,将海平面升高因素纳入发展规划;利用沙丘、植被等有效措施,保护沿岸湿地、河口和洪积平原,减缓海岸侵蚀,让处境危险的土地、基础设施等可继续使用。

以上 3 种措施无论选择哪一种措施都会对环境、经济、社会、文化、法律和技术等方面产生不同程度的影响,应根据各小岛屿国家的实际情况进行选择。一般情况下,沿海地区大多是属于人口密集、经济发达的地区,选择防护措施较为适宜,但其费用较高。在今后 100 年内,如果海平面升高 1m,在海岸修建防护设施,全世界总共需要费用 5000 亿美元。此外,选择防护措施还有可能对各小岛屿国家的渔业、野生动物等产生负面影响。对一些经济不发达的小岛屿国家,暂时选择顺应措施较为适宜,但采用顺应措施可能会引起财产贬值,需要支付改建基础设施等方面的费用。选择后退措施要慎重,因居民搬迁会产生重大的财政和社会影响。

4 气候变化研究的文献计量分析: 2003-2007

为了解国际气候变化研究的发展态势,本报告利用文献计量方法,对过去 5 年中(2003-2007 年)国际气候变化研究的发展趋势、学科分布、研究力量分布、中外研究热点的差异等进行了分析。本项分析工作以“气候变化”(climat* chang*)为主题词(即这些词组在论文的标题、关键词、摘要中出现),在 ISI Web of Knowledge 平台 SCIE 和 SSCI 网络数据库中进行论文检索,在经过去重、甄别、

筛选后,选取了 2003—2007 年发表的 15146 篇*国际气候变化研究相关论文作为分析对象,利用TDA (汤姆森数据分析器)进行了各项分析。分析结果如下。

4.1 气候变化研究领域论文发表的总体情况

2003—2007 年间, SCIE/SSCI 数据库共收录了 15146 篇气候变化研究相关论文,全球年均发表论文 3029 篇,发表论文数量表现出明显的增长趋势,年均增长率 16.72% (图 7),这表明国际气候变化科学研究目前仍处于一个持续的发展阶段,还是一门年轻的学科。

2003—2007 年, SCIE/SSCI 数据库收录的我国研究人员发表的论文共 922 篇,年均发表论文数 144 篇,年均增长率 19.15% (图 8)。我国发表文章数量的年均增长率高于国际发文数量的增长率,表明过去 5 年我国的气候变化研究受到了更多的关注,发展更为迅速。

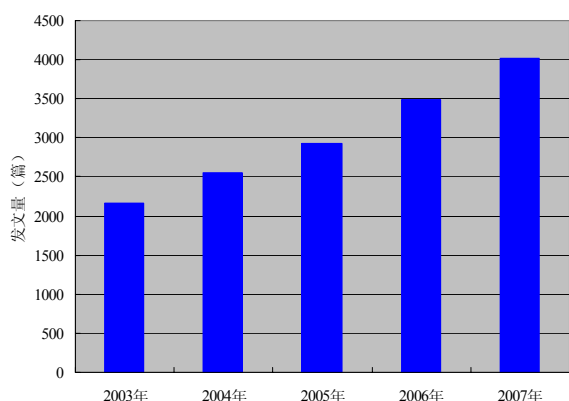


图 7 国际气候变化研究论文增长趋势

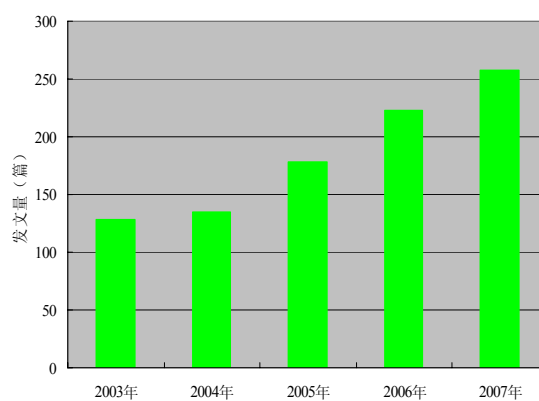


图 8 中国气候变化研究论文增长趋势

4.2 气候变化研究的学科分布

根据ISI数据库对期刊的学科分类*来看,2003—2007 年 SCIE/SSCI 收录的国际气候变化研究论文较多分布在地球科学多学科 (Geosciences, Multidisciplinary)、生态学、气象学与大气科学、自然地理、水资源、多学科科学 (Multidisciplinary Sciences)、生物多样性保护、古生物学和海洋学等学科领域 (图 9)。在林学、能源、生物学、社会学等其他学科领域,也均有气候变化研究文献分布,突出显示了气候变化研究以地球科学为核心,跨自然科学和社会科学的多学科研究特点。

中国气候变化研究的主要学科分布总体上与国际特点保持一致,但也具有自己的研究特色。中国居于前 10 位的学科是地球科学多学科、环境科学、气象学与大气科学、自然地理、多学科科学、生态学、水资源、植物科学、古生物学和地球化学与地球物理学。与国际前 10 位学科相比,中国增加了植物科学和地球化学与地球物理学,取代了国际前 10 位学科中的生物多样性保护和海洋学。中国在地球科学多学科、气象学与大气科学、自然地理、多学科科学、地球化学与地球物理学领域的发文率相对国际机构较高,而在环境科学、生态学、海洋学领域的发文率相对国际机构较低 (图 10)。在一些气候变化边缘领域学科,中国与国际的研究特点也存在一定差异,中国在海洋与淡水生物学、地质学、环境工程、进化生物学等学科介入气候变化研究的程度要弱于国际总体水平。

国际气候变化研究的论文较多发表在 Geophysical Research Letters、Global Change Biology、Climatic Change、Journal of Climate 等期刊上,发表在前 20 位期刊 (附件 1) 上的文章数量占有所有发文数量的 27.4%。

*数据库更新日期为 2008 年 2 月 1 日,2007 年发表的论文收录存在滞后情况。

*注:少数期刊分属多个学科领域。

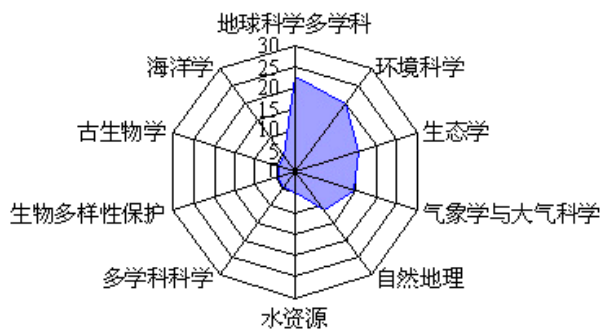


图9 国际气候变化研究主要学科分布（单位：%）

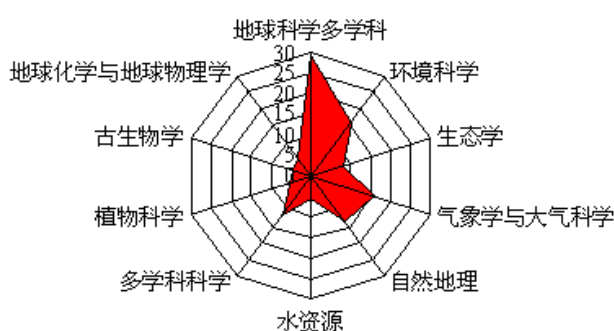


图10 中国气候变化研究的主要学科分布（单位：%）

4.3 气候变化研究的热点主题领域分析

通过分析 2003—2007 年出现频次较高的作者关键词（表 5），发现近年来气候变化研究的科学热点（高频次关键词）包括气候及气候变化、温度、全球变暖、古气候、CO₂、降水、适应、干旱、孢粉、生物气候学、生物多样性、硅藻属等。研究的区域热点集中在北极、中国、南极、加拿大、澳大利亚、欧洲、非洲等地，其中美国、加拿大和丹麦发表的有关北极地区的气候变化研究论文较多，美国和中国研究关于中国的文章较多，美国、英国、法国和意大利发表的有关南极地区气候变化的论文较多，加拿大和美国发表了较多的与加拿大有关的论文，澳大利亚和美国研究澳大利亚的文章较多，英国、德国、荷兰对欧洲的研究论文较多，美国对非洲也比较关注。时间上主要关注全新世、更新世、第四纪。地理信息系统、遥感监测、建模等研究方法在气候变化研究中应用较为普遍。从国际气候变化科学领域高被引频次的文章来看，受到高度关注的研究领域主要是人类社会与气候系统的相互作用、气候变化事实与未来预测等（附件 2）。

中国的文章较多涉及气候变化、降水、温度、孢粉、人类影响、古气候、东亚季风、湖泊沉积物等；研究区域主要集中在中国、青藏高原和南中国海等；时间上集中在全新世和第四纪；研究方法上应用同位素、地理信息系统和建模方法较多。

表 5 2003—2007 年国际文献中出现频次较高的关键词

作者关键词	出现次数	作者关键词	出现次数	作者关键词	出现次数
climate change	3318	drought	169	human impact	98
holocene	371	pollen	154	vulnerability	95
climate	312	phenology	143	biogeography	94
temperature	298	biodiversity	139	carbon cycle	94
global warming	287	modeling	133	ENSO	93
global change	267	diatoms	117	arctic	92
paleoclimate	261	carbon sequestration	112	GIS	92
carbon dioxide	200	uncertainty	109	fire	91
precipitation	177	stable isotopes	106	China	90
adaptation	174	climate variability	100	conservation	87

4.4 气候变化研究的国家和机构比较

4.4.1 气候变化研究论文的国别分布

按发文国家统计全部作者 2003—2007 年研究论文总数，发文数量由高到底排在前 20 位的国家

依次为：美国、英国、德国、加拿大、法国、中国、澳大利亚、荷兰、瑞士、西班牙、意大利、瑞典、日本、挪威、俄罗斯、丹麦、芬兰、南非、新西兰、比利时。美国在气候变化研究的发文数量位居第 1 位，以 5738 篇文章遥遥领先其他国家，中国论文数量居第 6 位（表 6）。

在发文量总数居前十位的国家中，美国、英国、瑞士、荷兰、德国、澳大利亚等论文篇均被引频次较高。虽然中国的发文量总数处于第 6 位，但是从论文的总被引次数、篇均被引频次、被引论文所占比例等数据来看，中国均低于其余 9 个国家。

表 6 2003—2007 年发表全球气候变化研究论文前 10 位国家论文被引情况

国家	发文量（篇）	总被引次数（次）	篇均被引频次（次/篇）	尚未被引论文（篇）	被引论文所占比例（%）
美国	5738	42007	7.32	1498	73.89
英国	2514	19216	7.64	687	72.67
德国	1505	10207	6.78	441	70.70
加拿大	1454	7720	5.31	425	70.77
法国	1027	6527	6.36	328	68.06
中国	922	2999	3.25	357	61.28
澳大利亚	880	5996	6.81	285	67.61
荷兰	676	4672	6.91	198	70.71
瑞士	592	4601	7.77	156	73.65
西班牙	529	2886	5.46	173	67.30

4.4.2 气候变化研究论文的机构分布

2003—2007 年发文总数居于前 10 位的科研机构依次为中国科学院（CAS）、美国科罗拉多大学（Univ Colorado）、美国地质调查局（USGS）、俄罗斯科学院（RAS）、美国国家海洋与大气管理局（NOAA）、美国国家大气研究中心（NCAR）、美国哥伦比亚大学（Columbia Univ）、法国国家科学研究中心（CNRS）、英国气象局（Met Off）、华盛顿大学（Univ Washington）（图 11）。2003-2007 年间，中国科学院的历年发文数量和发文总量在国际同类研究机构中均排在第 1 位，中国科学院在过去 5 年中发文总量占中国发文总量的 58.4%。

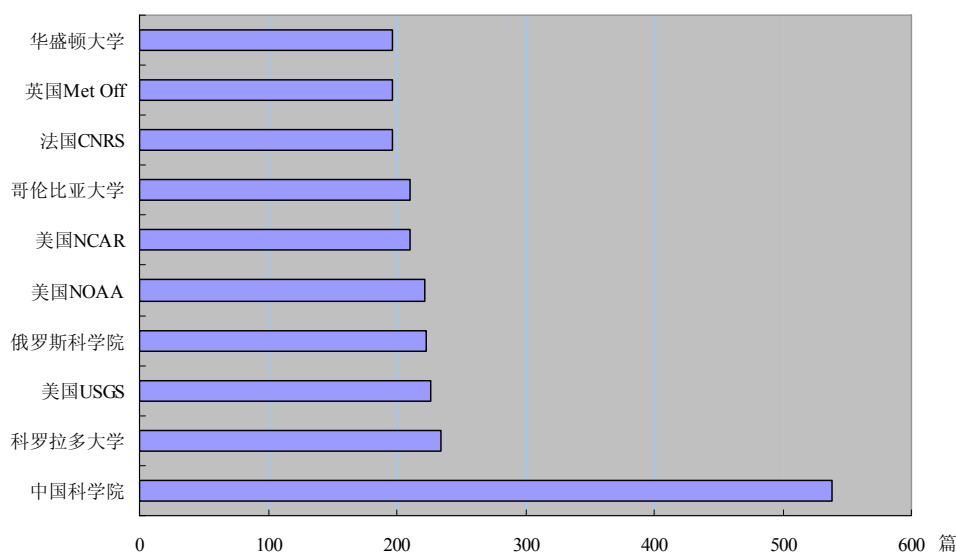


图 11 2003-2007 年发表气候变化研究论文较多的科研机构及其发文情况

从表 7 可以看出, 美国 NCAR、哥伦比亚大学、英国 Met Off、华盛顿大学等机构的论文片篇均被引频次较高, 都在 10 次/篇。中国科学院的发文总量虽然居于这些科研机构的首位, 但是从总被引频次看, 中国科学院排在第 7 位, 从篇均被引频次看, 中国科学院排在第 10 位, 从被引论文数占发文量的比例看, 中国科学院排在第 9 位。

表 7 2003—2007 年发表全球气候变化研究论文较多的科研机构及其被引情况

科研机构	发文量 (篇)	总被引次数 (次)	篇均被引 频次(次/篇)	尚未被引 论文(篇)	被引论文 所占比例(%)
中国科学院	538	1715	3.19	206	61.71%
科罗拉多大学	234	1914	8.18	53	77.35%
美国 USGS	226	1824	8.07	55	75.66%
俄罗斯科学院	223	1013	4.54	104	53.66%
美国 NOAA	222	1925	8.67	46	79.28%
美国 NCAR	210	3349	15.95	26	87.62%
哥伦比亚大学	210	2427	11.56	44	79.05%
法国 CNRS	197	1675	8.50	54	72.59%
英国 Met Off	197	2606	13.23	32	83.76%
华盛顿大学	196	2264	11.55	40	79.59%

5 气候变化科学研究的发展趋向和关键问题

目前, 气候变化研究已经形成了完备的学科体系和国际研究框架以及一定规模的研究队伍, 困扰人类社会的重大气候变化问题的科学认识已经初步形成, 气候变化的科学分歧正在逐步消除, 这些科学发展为目前的气候变化抵御、减缓和适应行动提供了重要的科学基础。气候变化挑战作为当今国际社会的最重大问题之一, 将在未来百年甚至更长的时段内与人类社会相伴随, 目前所取得的科学认识、所采取的气候变化应对措施仍然是初步的, 气候变化科学研究任重而道远。

5.1 气候变化科学研究的关键问题

(1) 气候变化科学中的关键性的基础科学研究。气候变化并不是简单的变暖或变冷, 而是体现为振荡性的、复杂的气候系统的变化, 要围绕驱动、影响气候变化发生与发展的重要机制开展持续、深入的科学研究, 如加强对大尺度的大洋环流、大气环流和生物地球化学循环的监测和研究; 也要加强新发现气候变化事实的规律研究, 认识其产生背景及其与其他气候变化事实的关联, 如棕色云的产生和动力学机制及其对全球和局地气候的影响。气候变化科学基础研究是获得有关气候变化认识重大突破和确定科学对策的最重要支撑。

(2) 气候变化中的不确定性研究。减少气候变化研究中的不确定性仍然是未来研究的重点, 虽然目前的研究工作已经在很大程度上减少了气候变化研究中的不确定性, 但气候变化研究的空白领域和灰色领域仍然存在, 在一定范围内还存在对气候变化事实和原因的怀疑, 这直接影响到国际气候变化行动的有效性。目前的研究成果在解释违背气候变化一般规律的气候事件以及模拟预测气候突变事件等方面仍嫌不足, 而这些事件往往带来更大的社会经济和心理冲击。气候变化研究工作仍需要长期关注气候变化发生、演化和突变机制, 并降低其科学认识、评估和预测中的不确定性。

(3) 气候变化影响、反馈机制与预测研究。了解气候变化影响及其反馈的复杂机制将有助于采取科学的气候变化行动。气候变化行动强烈依赖于对目前和将来气候变化影响及其反馈机制的评估和预测研究。但目前气候变化在很大程度上仅被看作一个科学问题, 未纳入常规的业务评估和预报工作中。针对构建气候变化影响的评估、预测和预警体系的研究将成为气候变化科学研究的重要内

容之一。

(4) 气候变化的社会学方面研究。气候变化与人类社会方方面面的关系愈来愈密切，气候变化科学研究需要更多地关注社会各部门在气候变化影响中的脆弱性、风险及其抗风险能力和适应能力，如农业、保险业等。气候变化科学研究将在气候变化影响评估的基础上，更多地利用社会学的研究方法来回答气候变化科学问题。

(5) 针对提高气候变化适应与减缓能力的开发研究。在当前应对气候变化总体方向基本确定的情况下，适应和减缓气候变化的工作成为气候变化科学研究的主要服务方向。气候变化科学研究需要根据气候变化评估和预测的事实和特征，设计、确定气候变化适应与减缓的对策与方案，并对已经实施的措施进行效果评估，筛选确定切实有效的气候变化应对方案。也要加强气候变化减缓与适应技术的开发与应用研究。CO₂捕获与封存等有利于减缓气候变化的技术正在得到实践和推广，但仍需要在更广的范围内发现、开发和引进有利于气候变化减缓与适应的技术措施，并逐步发展相应的产业、产品和行业的标准与规范。

(6) 发展有利于实现气候变化目标的国际合作框架。气候变化减缓行动的科学性、公平性和有效性仍是未来国际合作的焦点，气候变化科学研究需要在协调复杂的政治、经济、文化、环境等多方利益冲突的工作中寻找有利于减缓气候变化和提高人类社会应对气候变化能力的国际合作框架。

5.2 气候变化科学研究的发展趋向

(1) 发展跨越历史、现在和未来的气候变化评估、预测和预警研究将成为气候变化科学研究的重要方向(叶笃正等, 2005)。目前的气候变化科学研究, 总体上仍然处于发展科学认识的阶段, 集成历史气候(古气候)、现代气候变化和未来气候预测研究成果的工作尚未全面启动, 而这对人类社会应对当代和未来气候变化挑战具有重要意义。建立基于历史记录、当代气候变化事实和未来气候变化预测的, 服务于气候变化预测与预警的新的研究体系, 将有助于实现气候变化科学的终极目标。

(2) 社会科学将更多地介入气候变化科学研究并成为气候变化科学研究的重要特征之一。自然科学在认识气候变化问题方面做出了重要的贡献, 并将继续发挥其重要作用。但社会科学目前正在以更快的速率加入到气候变化科学研究的行列中来, 这将成为气候变化作为一门交叉科学研究的重要特征。社会科学将推动气候变化科学研究更好地解决气候变化的影响、响应和适应研究, 并可能成为人类在气候变化挑战面前逐步强大而不失败的重要科学支持。

(3) 适应和减缓相得益彰, 并将成为气候变化科学研究的重要内容。有关是适应气候变化还是减缓气候变化的争论将逐步平息, 适应和减缓将成为人类应对气候变化的两大主要选择, 有关适应和减缓气候变化的科学基础、可选方案及其可行性的研究成为气候变化可选研究最重要和最现实的内容。

(4) 气候变化科学研究将推动构建新型的世界观和价值观体系并为之提供必需的科学基础。在化石能源日趋匮乏、气候变化问题日益严峻的事实中, 人类沿袭数千年的主流世界观和价值观将受到挑战, 以物质、利益驱动和竞争为基础的社会运行规则亦将受到怀疑。气候变化科学研究成果已经并将继续证明对自然资源的奢侈消费是人类所面临环境挑战的重要根源, 构建人类和环境和谐共处的生存和发展格局将成为气候变化科学工作者及其同行所努力的方向。

6 关于我国加强气候变化科学研究的建议

我国长期以来积极组织 and 参与气候变化相关科学研究, 并在主要国际组织、计划和研究活动中扮演着重要的角色, 我国在青藏高原、黄土地区、海洋、极地和海岸带等区域开展的有关古气候、东亚季风、碳氮循环、大气化学等气候变化相关研究为国际气候变化科学进展做出了重要贡献。在IPCC第四次气候变化评估之后和新一轮气候变化行动启动之前, 我国气候变化科学事业仍然面临着巨大的挑战。本报告认为, 我国需要继续加强气候变化科学研究的组织工作, 这将是我国推动国际气候变化科学研究事业发展、支持我国积极参与国际气候变化问题谈判以及确定未来气候变化减缓行动战略的重要基础。

(1) 加强对气候变化科学问题的基础性研究。科学界关于气候系统变化的科学认识目前仍存在着相当大的不确定性和争议性，气候变化科学仍是一门年轻的学科。人类有效应对气候变化的不利影响及其挑战，有赖于对气候变化科学问题的科学认识。我国及周边地区广阔、独特的研究区域是开展气候变化科学研究的良好实验场，这是我国在气候变化领域为国际气候变化科学事业做出贡献的重要优势。大力支持气候变化科学基础研究，提高我国科学界对气候系统变化的科学认识，是减轻气候变化背景下极端天气事件的不利影响和挑战、保持我国社会经济持续健康发展的需要。

(2) 加强对气候模式的开发研究，提高对气候变化的预测水平。气候模式在气候变化科学研究中占据重要地位，是开展气候变化评估和预测的关键工具。我国气候模式的发展水平滞后，预测能力不足，是制约对气候变化的影响和对极端天气事件预测预警的瓶颈。对我国现有气候模式进行改进，并继续发展新的气候模式是提高我国气候变化科学研究能力的迫切需要。

(3) 开展区域气候变化与适应的集成研究。我国自然生态系统和社会系统对各种风险的承受能力较低，对气候变化背景下的极端天气事件和气象灾害表现出尤为突出的脆弱性，2008年1—2月份我国有气象记录以来遭受的大面积持续性雨雪灾害对经济生产和人们生活秩序的巨大危害就是明证。但目前针对区域气候变化与适应集成研究比较缺乏，针对区域、行业、部门在气候变化方面的敏感性、脆弱性和适应能力的研究比较缺乏，而研究的缺乏使我们在应对气候变化的影响面前效率低下、损失巨大。

(4) 加强气候变化减缓技术的引进和开发工作。气候变化减缓技术涉及能效提高、产业升级等企业核心技术，目前在国际气候变化合作框架中实施难度较大，但这是发展中国家参与国际气候变化减缓行动的有效举措之一。我国在继续争取气候变化减缓技术转移的同时，要加强气候变化减缓技术的自主研发工作，尤其要把降低企业能耗成本、提高企业清洁生产能力和气候变化减缓技术的开发紧密结合。

(5) 加强气候变化预报、预警和预案的研究和实施工作。建立气候变化的常规评估和预测体系，发展国家和区域多尺度的气候变化评估、预报和预警能力。针对专门部门和区域的气候变化风险开展应急预案的研究和制定工作，提高各行业、部门和地区应对气候变化事件的应急和恢复重建能力。

(6) 开展减缓和适应气候变化的可持续发展机制研究。气候变化是人类传统发展模式的必然后果，国际社会已经开始思考在基于竞争和利益驱动的发展模式之外，是否还存在更安全和更可持续的发展途径。我国目前仍处于工业化发展的初级阶段，面临着提高社会经济总体水平与环境保护的巨大矛盾，需要从改变消费理念、完善税收机制和财政补偿机制等角度出发，研究构建低排放的、有利于减缓和适应气候变化的可持续发展的新型发展模式，从而降低我国和区域发展过程中资源和环境的成本。

致谢：承蒙王会军、王东海、黄建平、罗云峰、延晓东、孙效功、沈永平、林海、方修琦等专家学者审阅报告初稿并提出宝贵的修改意见，谨致谢忱！

主要参考文献:

- Adger W N. Vulnerability. *Global Environmental Change*,2006,16:268~281.
- Arrhenius E, Waltz T W. *The Greenhouse Effect: Implications for Economic Development*. The World Bank, Washington D C.1990.
- Ausubel J, Biswas A K, eds. *Climate Constraints and Human activities*. Pergamon Press, Oxford. 1980.
- Berry E W. *Tree Ancestors: a Glimpse into the Past*. Illus, Baltimore. 1923.
- Boon S, Sharp M, Nienow P. Impact of an extreme melt event on the runoff and hydrology of a high Arctic glacier. *Hydrological Processes*,2003,17: 1051-1072.
- Brooks C E P. *Climate through the Age: a Study of the Climatic Factors and their Variations*. Illus, London. 1926.
- CCTP. U.S. Climate Change Technology Program Strategic Plan. DOE/PI-0005,2006.
- Dachnowski A P. The correlation of time units and climatic changes in peat deposits of the United States and Europe. *Natl. Acad. Sci. Proc.*,1922,8(7):225-231.
- Department of Agriculture, United States. *Climate and Man, Yearbook of Agriculture*. Washington D C: United States Government Printing Office. 1941.
- European Communities. *EU Action against Climate Change: EU emissions trading—an open scheme promoting global innovation*. 2005.
- European Communities. *Towards a European Strategic Energy Technology Plan*, COM(2006) 847 final. 2007.
- Fankhauser S, Smith J B, Tol, R S J. Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions. *Ecological Economics*,1999,30:67~78.
- Firor J. *The Changing Atmosphere: A Global Challenge*. Yale University Press, New Haven & London. 1990.
- Fleming J R. *Historical Perspectives on Climate Change*. Oxford University Press, US: 1998.)
- Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*,2006,16:253~267.
- Gallopin G C, Gutman P, Maletta H. Global impoverishment, sustainable development and the environment. A conceptual approach. *International Social Science Journal*,1989,121:375~397.
- Gallopin G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*,2006,16:293~303.
- GTSP. *Global Energy Technology Strategy: addressing climate change*, <http://www.pnl.gov/gtsp/>
- Huntington E. *The Pulse of Asia*. Boston, 1907
- IEA. *Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050*. OECD/IEA,2006
- IPCC. *Climate Change 2001: Summary for Policymakers*. Cambridge University Press. 2001.
- IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. <http://www.ipcc.ch>. 2007a.
- IPCC. *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers*. <http://www.ipcc.ch>. 2007b.
- IPCC. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability . Summary for Policymakers*. <http://www.ipcc.ch>. 2007c.
- IPCC. *Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007d.
- IPCC. *Climate Change: Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. 1995.
- IPCC. *Climate change: the IPCC scientific assessment*. Cambridge: Cambridge University Press. 1990.
- IPCC. *IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*. <http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/>.2005.
- Kasperson J X, Kasperson R E. *The Social Contours of Risk, vol.1*. London: Earthscan, 2005.
- Korec R J, ed. *Atmospheric Quality and Climate Change*. Papers of the Second Carolina Geographical Symposium. 1975.
- Lamb H H. *Climate, History and the Modern World*. 2nd edition. Routledge, London and New York. 1995.
- Lamb H H. *The Changing Climate*. Methuen Co Ltd. 1966.

- Lawrence Livermore National Laboratory. Energy and Climate Change. Lewis Publishers. 1990.
- Mendonca B G, ed. Geophysical Monitoring for Climate Change No.7, Ummary Report 1978. NOAA. 1979.
- National Research Council of the National Academies. Surface Temperature Reconstructions for the Last 2000 years. Washington,DC:The National Academies Press.2006.1-141.
- Pacala S, Socolow R. Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies, Science ,2004,VOL 305: 968-972.
- Penck A. The shifting of the climate belts. Scot. Geog. Mag.(Illus), 1914, 30: 281-293.
- Smit B J,Wandel.Adaptation,adaptive capacity and vulnerability.Global Environmental Change,2006,16:282~292.
- Smit B,Burton I,Klein R,Wandel J.An anatomy of adaptation to climate change and variability.Climatic Change,2000,45:223~251.
- Smithers J,Smit B.Human adaptation to climatic variability and change.Global Environmental Change,1997,7(2),129-146.
- Timothy M. Lenton, Hermann Held, Elmar Kriegler, *et al.* Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of National Academy of Sciences, 2008,105(6): 1786-1793.
- Trenberth K E,ed. Climate System Modeling. Cambridge University Press.1989.
- Turner II,B L,Kasperson R E,Matson P A,*et al.*A framework for vulnerability analysis in sustainability science.Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.2003,100(14):8074~8079.
- UNEP. 适应气候变化. <http://www.un.org/chinese/climatechange/background/living.shtml>. 2007.
- Vogel C.Vulnerability and global environmental change.LUCC Newsletter,1998,3:15~19.
- Walker B, Holling C S,Carpenter S R, *et al.*Resilience,adaptability and transformability in social-ecological systems.Ecology and Society,2004, 9(2):5.
- Waterloo.Canada:Resilience Alliance Publications, <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>. 2004-9-16.
- WCRP. The WCRP strategic framework 2005-2015: Coordinated Observation and Prediction of the Earth System. <http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/>.2005.
- WMO-ICSU Joint Orgnizing Committee. GARP Publication Series, No.16.1975.
- World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletin 2006. 2007
- WWF.Climate Solutions: The WWF Vision for 2050, <http://www.wwf.fr/>.2007.
- Zwerver S, van Rompaey R S A R, Kok M T J, *et al* eds. Climate Change Research Evaluation and Policy Implications. Elsevier. 1995.
- 方修琦, 殷培红.弹性、脆弱性和适应——IHDP三个核心概念综述. 地理科学进展, 2007,26(5):11-22.
- 符淙斌, 曲建升, 艾丽坤. 地球系统科学区域集成研究: 概况与特点. 见: 黄鼎成, 林海, 张志强主编.地球系统科学发展战略研究.气象出版社, 2005, p171-177.
- 葛全胜, 张丕远, 纽春燕. 关于气候变化影响的研究. 地球科学进展, 1989,(3): 41-46.
- 林而达, 吴绍洪, 戴晓苏等.气候变化影响的最新认知.气候变化研究进展, 2007,3(3):125-131. IPCC 影响与适应报告
- 潘家华. 减缓气候变化的经济与政治影响及其地区差异. 世界经济与政治,2003,(6):66-71.
- 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等.气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 2007, 3 (2):63-73.
- 曲建升, 高峰.21 世纪初大气科学国际研究计划概览.科学新闻, 2005, (12): 22, 23.
- 任小波, 曲建升, 张志强. 气候变化影响及其适应的经济学评估.地球科学进展,2007,22(7):754-759.
- 叶笃正, 季劲钧. 迎接大气科学发展即将到来的新飞跃.地球科学进展,2005,20(10):1047-1052.
- 张庆阳.小岛屿国家适应气候变化战略对策.气象科技合作动态, 2005,(5):26-28.
- 赵宗慈.全球气候变化预估最新研究进展.气候变化研究进展, 2006,2(2):68-70.

附件 1 国际上发表气候变化研究论文最多的期刊

期刊名称	发文数（篇）	出版国	2006 年期刊 影响因子
Geophysical Research Letters	496	美国	2.602
Global Change Biology	385	英国	4.339
Climatic Change	364	荷兰	2.459
Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology	279	荷兰	1.822
Journal of Climate	272	美国	3.419
Journal of Geophysical Research-Atmospheres	260	美国	2.800
Quaternary Science Reviews	249	英国	4.113
Holocene	178	英国	2.000
Climate Dynamics	171	德国	3.344
Global and Planetary Change	162	荷兰	2.060
Energy Policy	156	英国	1.362
International Journal of Climatology	153	英国	2.332
Proceedings of the National Academy of Sciences of the Unites States of America	152	美国	9.643
Earth and Planetary Science Letters	142	荷兰	3.887
Quaternary Research	135	美国	2.319
Journal of Hydrology	127	荷兰	2.117
Ecological Modelling	120	荷兰	1.888
Nature	116	英国	26.681
Journal of Biogeography	115	英国	2.878
Science	113	美国	30.028

注：根据 2003-2007 年所发表的气候变化论文数量排序。

附件 2 2003-2007 年气候变化领域的高被引频次文章（被引次数高于 100 次）

- [1] 被引用616次, Parmesan, C, Yohe, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421: 37-42.
- [2] 被引用472次, Root, TL, Price, JT, Hall, KR, *et al.* Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421: 57-68.
- [3] 被引用460次, Thomas, CD, Cameron, A, Green, RE, *et al.* Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427: 145-148.
- [4] 被引用393次, Rayner, NA, Parker, DE, Horton, EB, *et al.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, 108(D14): doi:10.1029/2002JD002670.
- [5] 被引用256次, Hughes, TP, Baird, AH, Bellwood, DR, *et al.* Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 2003, 301: 929-933.
- [6] 被引用212次, Nemani, RR, Keeling, CD, Hashimoto, H, *et al.* Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300: 1560-1563.
- [7] 被引用194次, Luterbacher, J, Dietrich, D, Xoplaki, E, *et al.* European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 2004, 303: 1499-1503.
- [8] 被引用182次, Sitch, S, Smith, B, Prentice, IC, *et al.* Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [9] 被引用176次, Webster, PJ, Holland, GJ, Curry, JA, *et al.* Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 2005, 309: 1844-1846.
- [10] 被引用173次, Pearson, RG, Dawson, TP. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global ecology and Biogeography*, 2003, 12(5): 361-371.
- [11] 被引用159次, Guisan, A, Thuiller, W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 2005, 8(9): 993-1009.
- [12] 被引用156次, Platnick, S, King, MD, Ackerman, SA, *et al.* The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 459-473.
- [13] 被引用146次, Anderson, RP, Lew, D, Peterson, AT. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 2003, 162(3): 211-232.
- [14] 被引用145次, Siddall, M, Rohling, EJ, Almogi-Labin, A, *et al.* Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. *Nature*, 2003, 423: 853-858.
- [15] 被引用143次, Dietz, T, Ostrom, E, Stern, PC. The struggle to govern the commons. *Science*, 2003, 302: 1907-1912.
- [16] 被引用141次, Lohmann, U, Feichter, J. Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5: 715-737.
- [17] 被引用138次, Murphy, JM, Sexton, DMH, Barnett, DN, *et al.* Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*, 2004, 430: 768-772.
- [18] 被引用136次, Moberg, A, Sonechkin, DM, Holmgren, K, *et al.* Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low-and high-resolution proxy data. *Nature*, 2005, 433: 613-617.
- [19] 被引用136次, Stainforth, DA, Aina, T, Christensen, C, *et al.* Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature*, 2005, 433: 403-406.
- [20] 被引用128次, McManus, JF, Francois, R, Gherardi, JM, *et al.* Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature*, 2004, 428: 834-837.
- [21] 被引用125次, Alley, RB, Marotzke, J, Nordhaus, WD, *et al.* Abrupt climate change. *Science*, 2003, 299: 2005-2010.
- [22] 被引用122次, Claeys, M, Graham, B, Vas, G, *et al.* Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of

isoprene. *Science*, 2004, 303: 1173-1176.

- [23] 被引用120次, Johns, TC, Gregory, JM, Ingram, WJ, *et al.* Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios. *Climate Dynamics*, 2003, 20(6): 583-612.
- [24] 被引用117次, Hetherington, AM, Woodward, FI. The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*, 2003, 424: 901-908.
- [25] 被引用111次, Pounds, JA, Bustamante, MR, Coloma, LA, *et al.* Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 2006, 439: 161-167.
- [26] 被引用110次, Lal, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [27] 被引用107次, Gupta, AK, Anderson, DM, Overpeck, JT. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 2003, 421: 354-357.
- [28] 被引用106次, Houghton, RA. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55(2): 378-390.
- [29] 被引用105次, Knorr, W, Prentice, IC, House, JI, *et al.* Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433: 298-301.
- [30] 被引用104次, Trenberth, KE, Dai, AG, Rasmussen, RM, *et al.* The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(9): 1205-1218.
- [31] 被引用102次, Edwards, M, Richardson, AJ. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 2004, 403: 881-884.
- [32] 被引用101次, Collins, JP, Storer, A. Global amphibian declines: sorting the hypotheses. *Diversity and Distributions*, 2003, 9(2): 89-98.
- [33] 被引用101次, Visser, K, Thunell, R, Stott, L. Magnitude and timing of temperature change in the Indo-Pacific warm pool during deglaciation. *Nature*, 2003, 421: 152-155.
- [34] 被引用100次, Cobb, KM, Charles, CD, Cheng, H, *et al.* El Nino/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature*, 2003, 424: 271-276.