



# 全球变暖的科学

## THE SCIENCES OF GLOBAL WARMING

王绍武 罗 勇 赵宗慈  
闻新宇 黄建斌 编著



气象出版社  
China Meteorological Press

# 全球变暖的科学

王绍武 罗 勇 赵宗慈 闻新宇 黄建斌 编著

## 内 容 简 介

本书主要讲述了全球变暖研究中的科学问题,特别是气候科学问题。进入 21 世纪以来,这门学科的研究范围,从大气或大气-海洋扩展到地球系统,特别是加强了对过去研究较少的生物-地球化学过程的关注。气候模式也从耦合模式发展到地球系统模式。因此,近 10 余年是全球变暖研究发生本质性变化的时期。

本书除第 1 章讲述气候变暖的研究历史外,后面 5 章集中讨论了生物-地球化学过程、气候模式、气候预估、2℃ 阈值、临界点五个问题,重点介绍最新研究进展。尽管这些问题的讨论有时超出了气候学范畴,但是本书尽量从气候学角度进行分析。

本书可供气象学、气候学、大气科学、地理学、海洋学、环境科学、生态学、社会学及经济学等专业人士,以及对全球变暖问题有兴趣的研究生、大学生参考,也可供希望深入了解全球变暖的普通读者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

全球变暖的科学/王绍武等编著.

北京:气象出版社,2013.10

ISBN 978-7-5029-5755-1

I. ①全… II. ①王… III. ①全球变暖—IV. P467

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 181669 号



### 全球变暖的科学

Quanqiu Biannuan de Kexue

王绍武 等 编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇 崔晓军 王祥国

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:352 千字

版 次:2013 年 10 月第 1 版

定 价:80.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:13.75

印 次:2013 年 10 月第 1 次印刷

# 序 一

为王绍武教授等的新作《气候变暖的科学》作序,是一件高兴的事情!

2011 年秋,王老师在他的《全新世气候变化》一书问世前,把草稿给了我,邀我写了序言。之后的两年里,王教授等就“全球变暖”这一气候变化科学中的命题,发表了一系列的论文,向读者介绍在气候自然变率和人类活动排放温室气体的共同作用下,近百年来全球气候系统变暖的事实、过去 15 年全球变暖停滞(warming hiatus)、气候敏感度、地球系统模式、古气候对照、预估未来变化、2℃ 阈值、地球系统的临界成员和临界点等国际科学研究的最新进展。现在他又结合其志同道合的合作者的研究成果,汇集而成《气候变暖的科学》一书。在政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)第一工作组(WG1)报告即将发布之际,这部专著几乎同时问世,对我们深刻理解 IPCC AR5,了解最近几年国际全球气候变化科学的发展和水平,提高我们的学术水平,以及对保护气候、保护环境,实施可持续发展战略,建设生态文明等,都有裨益。我热烈祝贺王教授领衔完成的这一著作,也欣然接受他的再次邀请,为此书作序!

我通读了王教授等的大作,感到书中论及的问题都是气候变化科学最敏感、最前沿的问题,不仅有挑战性,有的还有争议。科学研究有争论很正常,展开辩论是促进科学进步、成就优秀人才的重要方式。王教授等在书中不回避有争议的问题,选择了“Singer 对变暖的否定”、“曲棍球杆”问题、电影“后天”、“NIPCC”、“气候门”和“最近 15 年全球变暖的停滞”等六个所谓争议问题,专门列章讨论。书中的陈述实事求是,科学观点鲜明,摆事实讲道理,很有说服力,值得学界同仁细读。我很乐见他的这种大度和分析、讨论问题的方式,相信读者读后都会有同感,也会有收获。

众所周知,联合国于 1992 年签署了《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》(以下简称《公约》)。应《公约》的要求,IPCC 应运而生。IPCC 是在联合国(UN)麾下,世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)联袂,根据 IPCC 的工作程序,经各国政府推荐,各工作组主席团根据学术、性别和地理平衡等原则遴选,再经 IPCC 主席团审核批准组成的科学家组织。IPCC 的决策层是 IPCC 主席团,下设第一、第二和第三(WG1, WG2 和 WG3)等三个工作组,分别负责对“气候变化的科学认知”,“气候变化的影响、适应和脆弱性”,以及“减缓气候变化的可能对策”等三部分内容进行科学评估,编写评估报告。这些报告面向决策者,是《公约》谈判时的科学依据,有极强的政策导向作用。评估报告根据全世界气候变化科学领域正式发表的成果展开工作,自 1988 年起已完成四次评估报告,每

次都对全球气候系统变化有新认识。如1990年IPCC WG1的第一次评估报告(FAR)指出,人类活动的排放正在显著增加大气圈中温室气体的浓度,推动了1992年《公约》的签署和1994年《公约》的生效;1995年第二次评估报告(SAR)指出人为气候变化是可以辨别的,气候变化的社会经济影响被确定为新主题,为系统阐述《公约》最终目标提供了坚实的依据,推动了1997年《京都议定书》的通过;2001年第三次评估报告(TAR)进一步明确了过去50年全球变暖的大部分现象(66%以上)可能归因于人类活动,促使《公约》谈判确立适应和减缓气候变化两大议题,推动了气候变化国际谈判进程;而2007年的第四次评估(AR4)报告明确指出,过去50年的气候变暖很可能(90%以上)归因于人类活动,推动了2008年“巴厘路线图”的诞生,为国际应对气候变化谈判提供了科学依据。目前,IPCC第五次评估报告WG1的报告已近尾声,WG2、WG3和综合报告(SyR)也将于2014年9月底之前逐步完成,并通过IPCC全会审查。IPCC AR5将继续对《公约》谈判起积极作用。

自2007年AR4发布以来,气候变化科学研究有许多新进展,已观测到气候系统继续变暖,但最近15年(1998—2012年)全球地表变暖停滞,在云和气溶胶、碳循环反馈作用、海平面上升和未来预估及模式发展和气候预估等许多方面,都有不少新认识。如冰冻圈加速融化,2012年夏季北极海冰面积比1979年减少了约13%,自2007年7—8月北极海冰出现快速融化以来,2012年同期融化面积远高于多年平均值。北极海冰在加速融化。1971—2009年全球山地冰川平均每年融化冰量2 260亿t,其中1993—2009年为2 750亿t,最近16年的融化量比过去40年高出22%,说明冰川退缩在加速。1901—2010年全球海平面上升速率为1.7 mm/a,1993—2010年为2~3 mm/a,说明海平面也在加速上升。1901—2012年全球地表平均温度上升了0.89℃,升温速率为0.08℃/10a,但最近15年(1998—2012年)下降到0.05℃/10a,大大低于1951—2012年的0.12℃/10a,学术界称之为“全球变暖停滞”,其原因是气候系统内部变率、辐射强迫的误差和模式响应偏差三个因素共同作用而致。1750—2011年,人类已排放5 450亿t碳,其中2 400亿t存留在大气圈,导致全球大气CO<sub>2</sub>浓度从工业化前的278 ppmv<sup>①</sup>升高到2012年的391 ppmv,2013年在夏威夷Mauna Loa、青海瓦里关等全球大气本底站(Global Atmosphere Watch, GAW),都记录到400 ppmv的CO<sub>2</sub>日最高浓度值。到2012年,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的浓度比工业化前分别增加了40%、150%和20%,这些人为总辐射强迫是正值,导致气候系统吸收能量。20世纪60年代以来大气圈内的CO<sub>2</sub>浓度不断攀升,辐射强迫也相应增加,导致全球变暖。但是,人为排放同时也产生各种气溶胶,加上云的作用,产生诸多不确定性。1750年以来,太阳总辐射量和火山喷发会使地球降温,但贡献很小,和人类活动导致的增温不是一个数量级。自AR4发布以来,气候模式继续得到改进,增加了碳循环参数的模式,可以重现实测到的20世纪后半叶区域尺度地表温度及其年代际变化趋势,对降水和

<sup>①</sup> 1 ppmv=10<sup>-6</sup>,下同。

海冰面积的模式模拟水平也有较大提高,估计观测到的1951—2010年全球平均地表温度升高的一半以上是人类对气候的影响造成的,从而导致20世纪下半叶海洋变暖、冰雪融化、全球平均海平面上升及一些极端气候事件发生变化。新的研究还指出,大气温室气体浓度继续增加会造成进一步变暖。以目前速率或更高速率排放,会引起气候系统各个要素的变化,某些变化很可能在过去几百年、上千年里都是前所未有的,预估全球所有地区都将发生变化,包括陆地、海洋、水循环、冰冻圈、海平面、某些极端事件和海洋酸化,其中很多变化将持续若干世纪,等等。新发现、新进展太多,这里不可能一一列举。这些进展王教授的书里多有涉猎,而即将问世的AR5 WG1的报告则更有精彩评述。IPCC评估报告对决策者是政治博弈的科学依据,对科学家是气候变化科学的最新读本,对青年学子是一部内容不断更新的教科书。所以我说,IPCC WG1的报告需要精读,而王教授的这本专著是精读前的入门和导读。

这次,王教授再次请我为他的著作作序,除了感到荣幸之外,我还想借此机会表达我对他的敬意和感谢。王教授是《中国气候与环境演化:2012》科学报告和《第二次气候变化国家报告》主要作者之一,是《气候变化研究进展》杂志参加全部编委会会议的编委,是IPCC第一至第四次评估报告的主要作者和审稿人,还是IPCC AR5的审稿专家。更早,他还是《中国西部环境气候科学评估报告》的作者。上述工作多数是我主持的,王老师的认真和一丝不苟,他对事业的忠诚和对科学事业的追求,除了对科学的贡献外,还是对我工作的支持,借此机会,向他表示谢意!

秦大河

于北京香山

2013年6月22日

## 序 二

全球变暖在地球气候的演变中曾多次发生,时间尺度也不相同。现代气候变化中的全球变暖是指近百年全球地表温度不断上升的趋势,它在三个方面不同于地质年代和历史时期的气候变暖:(1)温度上升的速度为  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ (1906—2005 年),虽然还不能确定这个升温率是否超过了 40 万年或 80 万年以来的自然升值率的幅度,但可以得知近百年来来的升温率是非常快的;(2)相应大气中  $\text{CO}_2$  等温室气体浓度近 200 年来增加的幅度达 120 ppmv,它至少超过了过去 65 万年来的自然变幅,并且现代气候变暖的特点是  $\text{CO}_2$  等温室气体的增加超前于温度的上升,这与古气候中的绝大多数变暖情况是不同的;(3)很难只由自然变化的强迫因子解释近百年的全球变暖。现代的气候变暖,尤其是 20 世纪 50 年代以后的变暖,是由人类活动燃烧化石燃料和土地利用变化排放的  $\text{CO}_2$  等温室气体所引起的,它是气候变暖的主要驱动因子之一。这可以由物理学中的温室效应理论和气候模式模拟得到合理的解释,也得到了气候变化监测和归因研究的证实。近百年的全球变暖是建立在大量观测研究和科学理论基础以及复杂的气候模式的模拟之上的,因而可以称之为全球变暖的科学。

王绍武先生等人的这本专著正是针对这一鲜明的主题而撰写的。气候变化科学之所以是典型的发展中学科,是因为气候系统极其复杂,目前人们的认知水平也有限,还不足以回答涉及气候变化的所有科学问题,包括人类强迫因子和自然因子对气候变化的作用与相对重要性,并且还在不断出现新的现象和变化,这是一个重大的挑战。只有继续加大气候变化科学研究的广度和深度,不断改进和提高认知水平,才能从根本上认识气候变化的规律,从复杂的现象中理解其本质。

目前国内关于全球变暖的书已出版多种,各自有其特点,从不同方面阐述了气候变暖问题。本书在下列几个方面独具特色:(1)科学性强,各种概念阐述清晰、准确,问题的表述逻辑性强。(2)内容新颖,使用的资料翔实,引用的文献是最新的,大多数皆发表于国际著名杂志上。这些新结果经过王绍武先生等的消化理解,融会贯通,经过再加工化为自己的知识以流畅的语言叙述出来,使全书读来通俗易懂,引人入胜。(3)全书内容全面、系统,但取材又十分简洁、明快和确切,使读者读来毫无冗长、繁杂和乏味的感觉,而且能很快获得必要的知识与结论。(4)对有争议的问题和观点皆以事实和科学的理解做了释疑和回答,内容和说理十分具有针对性。(5)只要有可能,作者对问题的阐述多采用古今对比的方式,以更长更多的资料和证据阐明问题。这也是目前地球科学

和全球变化研究的一个新的途径。

由上可见,本书不但是—本阐述全球变暖科学的基础性专著,适合于高等院校师生及研究人员阅读,而且也是—本可以为广大读者读懂的、比较通俗的读物。有兴趣的读者—定会从中受益。

最近气象出版社出版了英国 Houghton 教授撰写的《全球变暖》(第四版)—书。该书是作者在过去版本的基础上利用政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告得到的新结果重新补充改写的,内容更加丰富,阐述更加全面、系统;而王绍武先生等撰写的这本《全球变暖的科学》主要依据了 2000 年之后,尤其是 2011—2013 年在国际著名杂志上发表的论文撰写,内容更新颖,科学观点更明确,结果的共识性更高。两书各具特长,相互补充。如果读者能把两本书结合在一起阅读,相互印证,将会备加受益。

丁一记

于中国气象局

2013 年 5 月 24 日



## 前言

《全球变暖的科学》有三个特点：从全球角度看变暖问题；变暖不只是大气问题；主要关注科学上的创新。本书的酝酿可以分为三个阶段：(1)从2004年到2012年对国际上5次“全球变暖”的争议做出回应；(2)从2011年末开始，为迎接政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(IPCC AR5)发布，特别关注对“全球变暖”问题研究的最新进展；(3)从2012年6月开始，在《气候变化研究进展》的“科学知识：全球变暖”栏目下，发表了一系列短文。

2004年英国《观察家》报透露出美国国防部的“秘密报告”，指出2010—2020年可能发生令人恐怖的气候突变。罗勇等组织了“香山会议”，并于2004年7月在《科技导报》上发表了专题讨论文章。2001年，IPCC报告引用了Mann等的千年温度变化曲线，在国际上引起“曲棍球杆”之争。2005年，王绍武、罗勇、赵宗慈等先后发表论文，指出“曲棍球杆”的确存在问题，但是支持了IPCC“现代气候变暖主要是人类活动造成的”这一观点。2008年，国际上出现了“非政府间气候变化专门委员会”(NIPCC)，与IPCC相对立。王绍武、罗勇、赵宗慈等发表论文，分析了NIPCC观点存在的问题，维护了全球变暖的观点。2009年关于全球变暖“停滞”的争议。罗勇首先提出了这个问题，与大家广泛交换意见，这时国际上也对此展开了讨论，随后王绍武、罗勇等发表论文指出，当前气候仍然处于暖期。2012年1月《华尔街日报》刊登了16位科学家的文章，呼吁不要压制气候变暖怀疑论者。唐国利、罗勇等发表论文，再次指出近10年仍是有观测记录以来最暖的10年。

2013—2014年IPCC即将发布第五次评估报告(IPCC AR5)，为了编写这份报告，一大批世界上的著名气候学家及研究与全球变暖相关问题的单位，近年来十分活跃，新的研究成果层出不穷，除了*Science*(《科学》)和*Nature*(《自然》)外，*Nature*的子刊物*Nature Geoscience*(《自然地球科学》)及*Nature Climate Change*(《自然气候变化》)分别于2008年和2011年创刊。*Nature Geoscience*更多关注“全球变暖”的物理问题，*Nature Climate Change*多发表与环境、社会和经济有关的“全球变暖”研究论文。为了抓住这个科学发展的势头，本书作者及时发表论文，介绍“全球变暖”研究的最新进展。王绍武、罗勇、赵宗慈曾先后担任IPCC评估报告的主要撰稿人，2009—2010年闻新宇和黄建斌先后从博士后工作站出站，分别在北京大学及清华大学任教。因此，五个人就形成了一个研究小组，经常对“全球变暖”的基本问题进行讨论、分析。

2012年8月，一次偶然的机会，一位不相识的读者鼓励我们把这些“科学知识”汇集成

一本书。后来在闲谈中,丁一汇院士也建议把这些材料整理成书。该想法一提出来,就得到其他四位作者的热烈响应,大家一起积极讨论编写大纲、分析观点、收集整理文献、修改图表、校对文字,终于在不到一年的时间内完成了初稿。当然,如果没有前面大约 10 年的基础,这也是不可能做到的。所以从这个意义上讲,也可以认为本书的编写从酝酿到完成已经有 10 年了。

从一开始我们的目的就不是写一本介绍气候变暖基本知识的书籍,因为这样的出版物已经有不少了。我们想突出讨论这门学科发展中的一些生长点,也就是新观测、新思想和新方法,并把这个思想贯穿始终。第 1 章概括讲述这门学科的发展简史,重点为气候变暖及其成因的认知过程以及国际范围为此而进行的奋斗。对于目前已经得到较为广泛承认的气候变暖的事实,就不再进行详细的讨论了。同样,第 2 章介绍与温室气体变化有密切关系的生物-地球化学过程,也不再讲述温室效应的原理以及温室气体排放的基本情况。这些生物-地球化学过程大多是近年来才提上议事日程,但是却对未来大气中温室气体的变化有巨大的潜在影响。第 3 章及第 4 章分别介绍气候变暖的模拟与预估,但是我们并未深入到模式本身去分析,那是一本书甚至两本书才能说明白的内容。这里只是从宏观角度介绍进行气候变暖的模拟与预估的基本知识及有关的问题。 $2^{\circ}\text{C}$  阈值本来只是第 4 章的一节,但是在 2012—2013 年冬季,欧洲科学家发表了不少有分量的论文来阐述这个问题。何况  $2^{\circ}\text{C}$  阈值已被联合国气候变化框架公约缔约国接受,成为全球减缓行动的基石,所以我们就把这个问题扩展为一章——第 5 章。第 6 章讲述临界成员与临界点问题。这也是一个对未来意义重大的问题。地球系统或地球系统的一部分有没有可能发生不可逆转的变化,显然对全人类来讲都是至关重要的问题。可惜现在国际上并没有对每个可能发生转变的成员都进行系统的研究,因此我们只能讨论其中几个重要的成员。

本来我们希望尽量把讨论限制在气候范围内,因为本书的作者都是“气象”出身。但是,后来发现如果了解“全球变暖”研究的最新动态,只限于研究气候问题是不可能的。例如“生物-地球化学过程”“ $2^{\circ}\text{C}$  阈值”“临界点”,都是目前国际上的热门问题,如果不讲述这些问题,那还有什么意义!所以,后来把这三个问题各写为一章。当然,这对我们是一个极大的挑战。为了弥补我们知识的不足,请了几位专家,帮我们审阅初稿。审稿人:第 1 章 高云,第 2 章 陈立奇、周力平,第 3 章和第 4 章 姜大膀、徐影,第 5 章 姜克隽、高云,第 6 章 周力平、陈立奇。他们的宝贵意见对我们是极大的鼓励。例如,第 6 章初稿于 3 月 2 日中午发给陈立奇,3 月 3 日上午 9 时就收到加了密密麻麻批注的修改稿。他是用了一夜时间看完的,这真的让我们感动。这时的心情已经是不能简单地用感谢两个字所能表达的。正是接受了他的意见,把“tipping points”译为临界点。在这些专家的帮助下,这本书才能顺利完成。尽管如此,我们相信本书还是会有这样那样的问题。因此,特别欢迎读者能指出我们的错误,无论将来本书是否再版,这对我们都是非常有益的。请把意见发至我的信箱,我们再次预先表示深深的谢意。

丁一汇院士曾任 IPCC TAR 第一工作组共同主席。秦大河院士连续两届任 IPCC AR4 及 IPCC AR5 的第一工作组共同主席,同时又任《气候变化研究进展》的主编或名誉主编。上述短文及历次有关气候变暖争议的论文,大多是在这个刊物上发表的。所以,除了对秦大河院士一贯支持我们的工作表示感谢外,还请他们二位各写一篇序。能得到两位三届 IPCC 第一工作组共同主席写序,也是难得的机遇,这是我们的幸运。此外,还要感谢《气候变化研究进展》编辑部主任苗秋菊及编辑部全体工作人员对我们的支持。北京大学陈振华老师承担了本书的录入工作,也在此表示深深的感谢!气象出版社李太宇编审为本书的出版做了大量的工作,崔晓军副编审对全文进行了认真的编辑加工,在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了以下项目的支持:自然科学基金重点项目(项目编号:41130105),自然科学基金面上项目(项目编号:41175066),中国科学院战略先导项目(项目编号:XDA05090104),自然科学基金青年项目(项目编号:41005035)。

**王绍武**

于北京大学

swwang@pku.edu.cn

2013 年 5 月

# 目 录

序 一  
序 二  
前 言

|            |                                             |    |
|------------|---------------------------------------------|----|
| <b>第1章</b> | 概 论.....                                    | 1  |
|            | 1.1 人类活动影响研究的历史 //1                         |    |
|            | 1.2 气候变暖的认知 //5                             |    |
|            | 1.3 人类活动影响的证据 //9                           |    |
|            | 1.4 气候变暖的争议 //14                            |    |
|            | 1.5 为减缓变暖而奋斗 //21                           |    |
| <b>第2章</b> | 生物、地球化学过程.....                              | 27 |
|            | 2.1 碳循环动力学 //28                             |    |
|            | 2.2 海洋生物碳泵 //30                             |    |
|            | 2.3 海洋酸化 //33                               |    |
|            | 2.4 甲烷水合物 //36                              |    |
|            | 2.5 生态系统服务 //39                             |    |
|            | 2.6 气溶胶 //42                                |    |
|            | 2.7 陆面生态变化 //44                             |    |
|            | 2.8 野火 //46                                 |    |
|            | 2.9 人类排放的碳与大气中 CO <sub>2</sub> 浓度变化的分歧 //49 |    |
| <b>第3章</b> | 气候变暖的模拟 .....                               | 53 |
|            | 3.1 气候变暖的归因研究 //53                          |    |
|            | 3.2 气候敏感度 //57                              |    |
|            | 3.3 气候模式 //59                               |    |
|            | 3.4 古气候模式 //64                              |    |
|            | 3.5 近百年变暖的模拟 //69                           |    |
|            | 3.6 近千年温度变化的模拟 //74                         |    |
|            | 3.7 PAGES 2k //79                           |    |

## 第4章

## 气候变暖的预估 ..... 84

- 4.1 新一代温室气体排放方案 //84
- 4.2 新旧排放方案的比较 //87
- 4.3 CCSM4 的气候变化预估 //90
- 4.4 CMIP5 与 CMIP3 的比较 //93
- 4.5 全球变暖预估的不确定性 //96
- 4.6 气候变化承诺 //99
- 4.7 2100 年全球平均温度将超过过去 1 万年 //101

## 第5章

## 2℃ 阈值 ..... 105

- 5.1 2℃ 阈值的提出 //105
- 5.2 工业化前 //107
- 5.3 2℃ 阈值的意义 //110
- 5.4 达到 2℃ 阈值的排放路径 //114
- 5.5 2℃ 阈值的成本 //116
- 5.6 2℃ 阈值下 2020 年的排放 //120
- 5.7 气候政策的影响 //124
- 5.8 碳捕获及储藏(CCS) //126

## 第6章

## 地球系统的临界点 ..... 131

- 6.1 临界成员 //131
- 6.2 北极海冰 //135
- 6.3 大陆冰盖 //140
- 6.4 海平面 //144
- 6.5 大西洋经向翻转环流 //146
- 6.6 厄尔尼诺-南方涛动(ENSO) //148
- 6.7 台风与热带气旋 //152
- 6.8 全球季风 //155
- 6.9 海洋变化 //157
- 6.10 亚马孙雨林 //161
- 6.11 快速行动 //164
- 6.12 发出求救信号 //166

## 参考文献 ..... 169

## 缩略语 ..... 200

## 关键词索引 ..... 202

## 后 记 ..... 204

# 第 1 章 概 论

本章

扼要介绍气候变暖研究的几个关键问题。1.1 节从理论上说明人类活动造成的温室效应加剧可能造成全球变暖。1.2 节着重指出近百年来的观测事实,证明全球气候确实是变暖了。但是,这并不意味着全球气候的变暖就是人类活动造成的。这个问题需要严格的论证。1.3 节介绍一项最新研究结果,扼要说明有足够的证据证明:人类活动造成的温室效应加剧,确实是 20 世纪以来全球气候变暖的主要原因。1.4 节指出,至今仍有不少怀疑论的支持者,怀疑气候变暖是否是人类活动造成的。1.5 节简要介绍为减缓气候变暖所进行的艰苦的国际行动,这些行动受到了全世界的广泛关注。

## 1.1 人类活动影响研究的历史

全球变暖已经是不争的事实。全球平均温度序列证明,1910—2009 年的升温趋势为  $0.70 \sim 0.75\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$  (唐国利等,2011)。粗略地讲,目前已经升高了  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果把气候变化的值限制为  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (EU Climate Change Expert Group,2008),则今后只有  $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  的上升空间,这就是我们面临的严峻形势(《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会,2011)。根据全球气候系统的概念,全球变暖不仅仅是地面温度升高,还包含了冰冻圈的融化、海平面的上升、永冻土的解冻以及全球植被的变化等。这些变化已经、正在或将来可能影响到人类生活的方方面面。所以不难理解,为什么各国政府、科学家、公众及媒体都这样关心全球变暖的问题。全球变暖现在已经发展成一门科学,建立了自己的科学体系。这个体系不仅包括了气象学、海洋学、环境科学等自然科学分支,也同经济学、社会学的发展有密切的联系,并对国家的发展与国计民生有重要的意义。但是,为了使线索更为清晰,本节主要讨论全球变暖中的气候学问题。

全球变暖作为一个科学问题,已经有将近 200 a 的研究历史 (Mitchell,2002; Cullen,2010)。Archer 等(2011)汇编了有关全球变暖的历史文献,并附上简要的评论,为研究全球变暖科学的发展提供了方便。为了对这个问题有一个系统的认识,我们从中选出 6 篇有里程碑意义的论文,再加上第一次世界气候大会(The First World Climate Conference,FWCC)及政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,

IPCC)的4个评估报告,总共11个关键点,指出每个关键点在全球变暖科学发展中的地位。

**温室效应** 法国物理学家 Fourier(1824)提出温室效应的概念,指出:太阳辐射是地球能量的主要来源,但是,地球的温度并没有持续上升,因此地球必然也把同等量的能量发射回宇宙空间,这样才能保持“行星能量平衡”;但是,直接计算返回宇宙空间的能量时,发现这样得到的地球温度要在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,而不是现在观测到的  $14^{\circ}\text{C}$ ,因此,设想是大气保存了地球的热量。他把这个作用称为“温室效应”,因为大气像玻璃一样地阻止了红外辐射的外逸。

**温室气体** 爱尔兰科学家 Tyndall(1861)证实二氧化碳( $\text{CO}_2$ )有温室效应。他制造了分光光度计,用来测量各种气体对辐射的吸收。他的实验表明:氧气( $\text{O}_2$ )、氮气( $\text{N}_2$ )、氢气( $\text{H}_2$ )等气体对太阳光线和红外辐射没有吸收作用,但是  $\text{CO}_2$ 、甲烷( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )和水汽( $\text{H}_2\text{O}$ )则对红外辐射有强大的吸收作用。是这些气体造成了“温室效应”,所以,现在人们把这些气体称为“温室气体”。

**$\text{CO}_2$ 浓度加倍的气候影响** 瑞典科学家 Arrhenius(1896)提出,燃烧化石燃料以及其他燃烧过程中排放的  $\text{CO}_2$  可能导致全球变暖,而且估算出  $\text{CO}_2$  浓度加倍的情景下气温可能上升  $8^{\circ}\text{F}$ (约  $4.5^{\circ}\text{C}$ )。后来人们经常称这个数值为平衡气候敏感度(equilibrium climate sensitivity, ECS)。虽然他按当时的排放速度估计这个时刻也许要过 3 000 a 才能到来。但是,对平衡气候敏感度则做了相当准确的估计,尽管当时用的不过是简单的 1 层模式。下面我们就会看到,这个估计接近历次 IPCC 评估报告平衡气候敏感度的上限。

**确认温室效应的影响** Callendar(1938)第一次确认人类活动造成的  $\text{CO}_2$  增加,已经对气候产生了影响。在没有  $\text{CO}_2$  系统观测的情况下,比较了 1900 年和 1935 年的  $\text{CO}_2$  记录,指出大气中  $\text{CO}_2$  浓度增加了。并且用 147 个站的温度观测,证明 20 世纪 30 年代的温度比 19 世纪末到 20 世纪初,有了明显的上升。

**$\text{CO}_2$ 的系统观测** 这个问题十分简单,但是也十分重要。美国科学家 Keeling(1960)在夏威夷 Mauna Loa 建立了大气  $\text{CO}_2$  浓度观测。这是全球最早的监测大气温室气体的观测站,至今提供了最长、最完整的  $\text{CO}_2$  观测资料。这份观测资料证实,大气中  $\text{CO}_2$  在不断地增加,成为温室效应造成全球变暖的最有力证据。

**气候模式** 一方面人类活动导致温室气体增加,温室效应加剧,另一方面全球气候变暖。但是,如何证明这个变暖就是温室效应加剧的结果呢?气候模式起着关键的作用。Manabe 等(1975)做了开创性的工作。虽然他们当时应用的是一个只有理想海陆分布作下垫面的 3 维大气环流模式,不考虑海洋热输送,采用固定云量。但是,他们得到  $\text{CO}_2$  浓度加倍时地面温度上升  $2.93^{\circ}\text{C}$  的结果。这个结果对第一次世界气候大会及第一次 IPCC 评估报告采用  $\text{CO}_2$  浓度加倍时温度上升  $(3 \pm 1.5)^{\circ}\text{C}$  ( $1.5 \sim 4.5^{\circ}\text{C}$ ) 的评价,起了关键性的作用。下面将会看到经过 4 次 IPCC 评估报告,仍然与最初的评估没有本质的变化。从采用海气耦合模式进展到地球系统模式,从单一模式到用 23 个模式集合,也没有完全偏离这个最早的、十分简化的模式所做的评价。

**第一次世界气候大会(FWCC)** 1979 年在日内瓦召开了第一次世界气候大会。这绝对是气候学发展史上的一个里程碑。共 400 余人参加的为期两周的大会,揭开了全球气候变暖研究的序幕。会议对人类活动可能造成气候变暖向全人类发出了警告。从科学上讲,FWCC 的一个重要贡献,就是第一次正式指出当大气中  $\text{CO}_2$  浓度加倍时,全球平均温度可能上升  $1.5 \sim$

4.5 °C。但是,FWCC 的更重要的作用在于推动了气候学研究。在会议的倡导下建立了世界气候计划(World Climate Programme, WCP),包括 4 个子计划:世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)、世界气候应用计划(World Climate Applications Programme, WCAP)、世界气候影响研究计划(World Climate Influence Programme, WCIP)及世界气候资料计划(World Climate Data Programme, WCDP)。WCRP 是最活跃的一个分支,世界气象组织(World Meteorological Organisation, WMO)与其他有关国际机构联合组织了热带海洋和全球大气计划(TOGA),并成功地实施了“十年(1985—1994 年)计划”。气候变率和可预报性研究计划(CLIVAR)等一系列计划也成为近 30 年气候学研究国际合作的大本营。但是参加 WCRP 等组织的科学家发现,自己经常面对一种十分尴尬的局面:一方面科学上证明人类活动造成的温室效应的加剧继续使气候变暖,由于全球气候变暖,冰、雪融化导致海平面升高,生物的多样性受到威胁,全球气候的格局也可能发生改变;另一方面参加这些科学计划的科学家都只能代表本人,无权对温室气体的减排、能源结构的变化做出任何承诺。在这样的背景下,1988 年由世界气象组织和联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)联合建立了“政府间气候变化专门委员会”(IPCC)。并在 1990,1996,2001 及 2007 年发布了 4 份评估报告,1992 年发表了补充报告。

**IPCC 第一次评估报告(FAR)(IPCC, 1990)** 由于这是第一次发布评估报告,所以对温室气体及温室效应的原理多有论述,指出由于人类活动导致大气中温室气体浓度增加,温室气体继续增加必然进一步导致气候变暖,变暖的幅度有可能超过过去几百万年的自然变化,而将来的回落则是缓慢的。观测表明过去百年来全球平均温度已经上升了 0.5 °C,这与大部分模式的模拟结果一致。

**IPCC 第二次评估报告(SAR)(IPCC, 1996)** 这个报告同时综合了 1992 年补充报告(IPCC, 1992)的结果,确认大气中温室气体的浓度进一步升高,为了稳定大气中温室气体的浓度,需要大力减少温室气体的排放。观测表明温度已上升到 1860 年以来的最高水平。用于进行预估的气候模式能力有所提高,特别是考虑了硫化物气溶胶和平流层臭氧(O<sub>3</sub>)。一个重要的结论就是“人类活动对气候的影响是可以识别的”,虽然信号尚隐没在大量自然变率的噪声之中。

**IPCC 第三次评估报告(TAR)(IPCC, 2001)** 这个报告发表后,对全球变暖的评估成为一个争论的焦点。报告认为 20 世纪 90 年代(1990—1999 年)是 1861 年有观测记录以来最暖的 10 a,1998 年是最暖的 1 a。争议最大的是:报告提出,20 世纪北半球的变暖可能是近千年最强的。其根据主要是 Mann 等(1998,1999)的曲线,这条曲线后来被称为“曲棍球杆”,因为作者主张近千年温度持续下降、近百年才突然上升,温度变化的形状像一个横置的曲棍球杆。大量的研究对这个结论提出了质疑(王绍武 等,2005a,2005b)。后来 Mann 等(2009)也承认近千年仍有气候波动,即可以看出中世纪暖期及小冰期,并且也不再提 20 世纪 90 年代及 1998 年是不是近千年中最暖的问题。但是保留了“20 世纪后 50 a 的变暖是过去 1 000 a 来最强的”这一论点。

报告的另一个贡献是对未来气候变化的预估采用 6 种温室气体排放方案(SRES),即 A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2。A 的 4 个情景属于高排放, B 的 2 个情景为低排放,又根据化石

能源的应用及人口发展分为 1 和 2。A1FI 及 A2 为排放最高的情景, B1 为最低的情景。并根据 6 种情景, 通过不同模式集合, 做出 2100 年相对于 1990 年温度变化的预估(表 1.1)。第三次评估报告的另一个重要观点是人类活动造成的温室气体增加所造成的辐射强迫比气溶胶及太阳活动等因素要大一个数量级。因此, 在做气候变化预估时, 可以主要考虑人类活动的影响。一直到第四次评估报告, IPCC 仍然坚持这个观点, 对各种因素造成的辐射强迫的估计值也很少变化, 例如对太阳活动造成的辐射强迫大小的估计还有所降低。

表 1.1 2100 年温度变化的预估(相对于 1990 年)(IPCC, 2001, 2007)

| 情景   | TAR(℃)  | AR4(℃)  |
|------|---------|---------|
| A1FI | 3.3~5.6 | 2.4~6.4 |
| A2   | 2.8~4.8 | 2.0~5.4 |
| A1B  | 2.1~3.9 | 1.7~4.4 |
| B2   | 1.9~3.5 | 1.4~3.8 |
| A1T  | 1.8~3.3 | 1.4~3.8 |
| B1   | 1.4~2.6 | 1.1~2.9 |

**IPCC 第四次评估报告(AR4)(IPCC, 2007)** 这个报告不再强调 20 世纪及 20 世纪 90 年代、1998 年在过去千年中的地位。但是却提高了对最近 50 年变暖是人类活动影响可能性的评价。第三次评估报告认为是可能、第四次评估报告认为非常可能, 是人类活动造成的温室效应加剧的结果。根据 IPCC 的定义, 可能为  $>66\%$ , 而非常可能为  $>90\%$ 。另一个贡献是, 报告第一次综合了大量学者的研究, 缩小了对平衡气候敏感度的估计, 确定为  $2.0\sim 4.5\text{℃}$ 。但是, 对 2100 年气候变化的预估则与第三次评估报告没有多大变化(表 1.1), 甚至不少情景的预估范围比过去还有所扩大, 而不是缩小。表 1.2 给出 4 次 IPCC 评估报告及 1 次补充报告对  $\text{CO}_2$  浓度加倍或到 2100 年全球变暖的估计。下限变化不大, 但是上限曾一度有所下降, 这主要是第二次评估报告考虑了硫化物气溶胶的降温作用。但是, 后来根据气候模式的模拟及变暖的加速调高了上限。客观地讲, IPCC 的预估还是基本上与 1990 年以来这 20 年气候变暖实况接近的。图 1.1 形象地给出了前 3 次评估报告自 1990 年开始的全球变暖的预估及观测值, 以及第四次评估报告 4 种情景的预估值(SRES)。

表 1.2 历次 IPCC 评估报告对  $\text{CO}_2$  浓度加倍(FAR, SAR)或 2100 年(TAR, AR4)全球变暖值的预估(赵宗慈等, 2007)

| IPCC 评估报告        | 最佳预估值(℃) | 可能变化范围(℃) |
|------------------|----------|-----------|
| FAR(IPCC, 1990)  | 3.7      | 1.9~5.2   |
| 补充报告(IPCC, 1992) | 1.9~3.8  | 0.3~5.3   |
| SAR(IPCC, 1996)  | 2.0~3.2  | 1.0~4.6   |
| TAR(IPCC, 2001)  | 2.2~3.0  | 0.9~5.8   |
| AR4(IPCC, 2007)  | 1.8~4.0  | 1.1~6.4   |