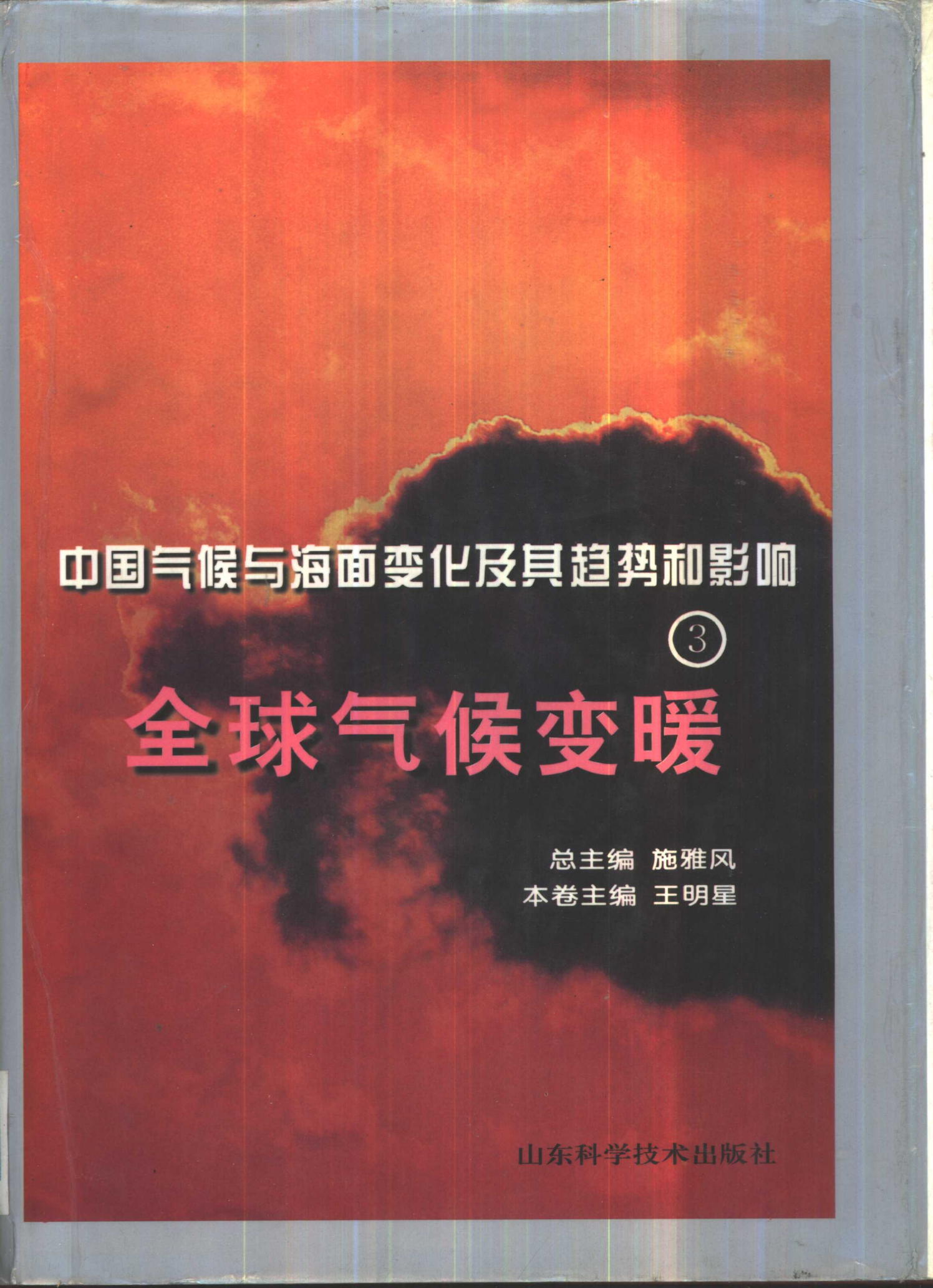




中国气候与海面变化及其趋势和影响

③

全球气候变暖

总主编 施雅风
本卷主编 王明星

山东科学技术出版社

中国气候与海面变化及其趋势和影响

③

全球气候变暖

总 主 编 施雅风

本 卷 主 编 王明星

本卷副主编 张学洪 赵高祥

赵柏林 王庚辰

山东科学技术出版社

中国气候与海面变化及其趋势和影响

③

全球气候变暖

总 主 编 施雅风
本 卷 主 编 王明星
本卷副主编 张学洪 赵高祥
赵柏林 王庚辰

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路 邮政编码 250002)

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 30.75 印张 4 插页 693 千字

1996 年 6 月第 1 版 1996 年 6 月第 1 次印刷

印数:1-1000

ISBN7-5331-1625-9

P·12 定价 58.00 元

中国气候与海面变化及其趋势和影响
编辑委员会

总 主 编 施雅风

副总主编 王明星 张丕远 赵希涛

委 员 (以姓氏笔画为序)

孔昭宸 王明星 王庚辰 朱季文

刘春蓁 陈宗镛 张学洪 张祥松

张丕远 赵希涛 赵柏林 赵高祥

施雅风 郭其蕴 龚高法

中国气候与海面变化及其趋势和影响
各卷主编副主编

中国历史气候变化①

主 编 张丕远

副主编 孔昭宸 龚高法 郭其蕴

中国海面变化②

主 编 赵希涛

副主编 陈宗镛 朱季文

全球气候变暖③

主 编 王明星

副主编 张学洪 赵高祥 赵柏林 王庚辰

气候变化对西北华北水资源的影响④

主 编 施雅风

副主编 刘春蓁 张祥松

山东省泰山科技专著出版基金会

名誉会长	赵志浩 宋木文 陆懋曾 伍 杰 卢鸣谷 董凤基 宋法棠
会 长	陈光林 石洪印
副 会 长	宋桂植 何宗贵 吕可英 车吉心 孙肇琨 王为珍(常务副会长)
秘 书 长	王为珍(兼)
副秘书长	尹兆长
理 事	(以姓氏笔画为序) 王为珍 王凤起 尹兆长 刘韶明 李道生 李德泉 张传礼 陈 刚 蒋玉凤
评审委员会	(以姓氏笔画为序) 卢良恕 吴阶平 杨 乐 何祚庥 罗沛霖 高景德 唐敖庆 蔡景峰 戴念慈

我们的希望

进行现代化建设必须依靠科学技术。作为科学技术载体的专著,正肩负着这一伟大的历史使命。科技专著面向社会,广泛传播科学技术知识,培养专业人才,推动科学技术进步,对促进我国现代化建设具有重大意义。它所产生的巨大社会效益和潜在的经济效益是难以估量的。

基于这种使命感,自1988年起,山东科学技术出版社设“泰山科技专著出版基金”,成立科技专著评审委员会,在国内广泛征求科技专著,每年补贴出版一批经评选的科技著作。这一创举已在社会上引起了很大反响。

1992年,在山东省委、省政府的支持下,在原“泰山科技专著出版基金”的基础上,由山东省出版总社、山东省科学技术委员会和山东科学技术出版社共同成立了“山东省泰山科技专著出版基金会”,并得到企业界的热情赞助,为资助学术专著的出版提供了更加可靠的保证。

但是,设基金补助科技专著出版毕竟是一件新生事物,也是出版事业的一项改革。它不仅需要在实践中不断总结经验,逐步予以完善;同时,也更需要社会上有关方面的大力扶植,以及学术界和广大读者的热情支持。

我们希望,通过这一工作,高水平的科技专著能够及早问世,充分显示它们的价值,发挥科学技术作为生产力的作用,不断推动社会主义现代化建设的发展。愿基金会支持出版的著作如泰山一样,耸立于当代学术之林。

泰山科技专著评审委员会

1992年12月

序

由竺可桢教授开创的中国气候变化研究在 80 年代出现了蓬勃发展的形势,由于大气中 CO_2 及其他微量气体增加、全球变暖并致使海面上升与其他人为作用结合所导致的水资源及其他环境变化,为越来越多的科学家、社会人士和政府领导所关注。

人们想弄清气候与有关环境变化的具体事实、原因、相互关系,以期正确预测其未来变化趋势和可能后果,及早采取措施,限制其不良方面,发展其有利因素。1985 年,世界科学联合理事会(ICSU)、世界气象组织(WMO)、联合国环境保护署(UNEP)在奥地利 Villach 举行的探讨此问题的专门会议,对我国气候变化与影响研究,起了重要的促进作用。首先由中国科学院组织部分科学家开展关于国内和国际气候与海面变化情况的预研究。随后国家自然科学基金委员会着手组织重大项目研究,经过一段时间的酝酿,“中国气候与海面变化及其趋势和影响研究”项目于 1987 年通过评议,在中国科学院立项起步,1988 年国家自然科学基金委员会正式审定批准,作为“七五”重大项目(资助金额 300 万元)而全面展开研究工作。

项目任务书中列出主要研究为“用孢粉、沉积、文献、考古等方法重建 1 万年来气候序列,研究我国气候变化规律及未来趋势;研究近万年中国海面变化的规律和原因,对下世纪上半叶海面和可能变化及影响进行试点研究;应用数值模拟方法,模拟大气中 CO_2 倍增条件下所引起的气候变化;探讨气候变化对西北、华北水资源影响并预估其未来变化”。为此设立四个二级课题与十四个三级课题分领域进行。1987 年底,经基金会组织专家评议强调重点应放在“重建全新世和历史气候序列,全新世海面变化序列, CO_2 倍增后气候变化的数值模拟和气候变化对西北、华北水资源影响等四个方面”,要求研究成果以高水平的论文和专著发表,基本达到国际先进水平。

本项目研究经过中国科学院所属的 9 个研究所、7 个大学的有关系、所及业务部门与省的有关单位共 200 多位科研人员历时 5 年多的共同努力,完成了预定计划,取得了丰硕的创造性成果。除以 300 篇论文及专辑在国内外发表外,为使认识系统化,使分散的成果密切联系在一起,便于广大读者参考引用,特撰写《中国气候与海面变化及其趋势和影响》一书,并按二级课题分为四卷,即《中国历史气候变化》(卷一)、《中国海面变化》(卷二)、《全球气候变暖》(卷三)和《气候变化对西北华北水资源的影响》(卷四)。各卷互相呼应又自成体

系,均系集体研究的成果。

本项目研究的成功和系列专著的出版,首先要感谢国家自然科学基金委员会和中国科学院、各课题承担单位和参与单位的一贯的多方面的领导和支持,感谢山东省泰山科技专著出版基金会热诚赞助出版、细心编辑与精致印刷。

施雅风

1995年3月于北京

前 言

本书是中国气候和海面变化及其趋势和影响研究项目的第三课题“二氧化碳增加及其引起的气候变化的初步研究”的研究成果。本课题的主要研究内容是叶笃正、曾庆存、黄荣辉等同志发起并由中国科学院于1985年确定为院重大项目的“气候研究”计划的一部分。曾庆存同志是本课题的设计者。在1985~1987年间,他化费了大量精力草拟研究计划,规划设计子课题设置,联系组织研究人员,直到立项工作全部完成。在整个立项阶段他是项目的主要组织者和本课题的负责人。立项以后,他辞去了项目负责人职务,并把课题任务交给了一批中青年科学家,但他始终是本课题的指导者和组织者,他还亲自参加了气候变化数值模拟的具体研究工作。

气候变化的问题从来没有像现在这样引人注目,起因就是 CO_2 。最近几年的科学观测发现大气 CO_2 正以前所未有的速率增加。现代大气辐射理论证明,大气 CO_2 增加会导致全球气候变暖。人们担心,人为活动造成的这种对地球气候系统的扰动将会使地球气候发生不能回复的变化从而危及人类自身的生存。人们迫切需要知道,人类活动造成的这种气候变化在未来几十年到100年到底有多大?准确预测这种变化的意义是无法估量的。简单地说,如果这种变化在未来几十年将超过气候系统的自然波动,其变率会超过人类生存环境所能适应的范围,那末全人类将不得不作出牺牲,采取果断措施减少化石燃料使用以稳定大气成分。如果不是这样,人类就可以继续利用大自然恩施的方便能源——化石燃料。但是,很遗憾,现代科学还不能准确地解答这个问题,人为活动造成的气候变化预测中还存在许多重大的不确定性,预测结果还很不准确。本课题正是为了减少这种不确定性而设置的。本书是第一阶段研究工作的初步总结,包括三部分,第一部分,旨在研究 CO_2 等温室气体的浓度变化趋势(第一章);第二部分是温室气体增加引起气候变化的物理基础(包括第二、三、四章),旨在研究温室气体和云的辐射特性以及太阳辐射和长波辐射传输,温室气体、气溶胶和云的辐射加热率和冷却率的计算方法;第三部分是温室气体浓度增加引起气候变化的数值模拟(第五章)。

本书作者在过去5年里得到中国科学院、国家自然科学基金委员会在各方面的大力支持,得到叶笃正、陶诗言和谢义炳等前辈的支持与指导,在此一并致谢。

著 者

1995年10月于北京

目 录

第一篇 大气温室效应增强引起气候变化的物理基础	(1)
第一章 大气温室效应气体浓度增加及其未来变化趋势	(3)
第一节 大气温室效应气体浓度增加及其原因.....	(3)
第二节 大气主要温室气体的源和汇	(13)
第三节 中国的温室气体排放量	(39)
第四节 大气化学组成的未来变化趋势	(56)
第二章 大气中温室气体的光谱特征	(62)
第一节 地球大气的气体组分	(62)
第二节 大气分子光谱的基本理论和特征	(69)
第三节 大气分子光谱特征的实验研究方法	(93)
第四节 大气分子吸收光谱的主要研究结果.....	(115)
第三章 云、辐射对气候的影响	(170)
第一节 云与辐射对气候的影响.....	(170)
第二节 国际卫星气候计划 (ISCCP)	(171)
第三节 海洋大气边界层与云的特性的观测和分析.....	(173)
第四节 海洋大气边界层与云层特性的数值模拟.....	(185)
第五节 东亚地区云与辐射平衡.....	(194)
第六节 西北太平洋云气候特点及云辐射实验资料.....	(206)
 第二篇 温室效应增强引起气候变化的数值模拟	(281)
第四章 大气辐射传输计算	(283)
第一节 辐射传输方程及其解法.....	(283)
第二节 大气吸收和散射.....	(311)
第三节 大气环流模式中的参数化辐射传输计算.....	(333)
第五章 大气物理研究所气候数值模式及增强温室效应的模拟	(391)
第一节 引论.....	(391)
第二节 大气环流模式 (IAP AGCM)	(400)
第三节 大洋环流模式 (IAP OGCM)	(416)
第四节 大气—海洋耦合的环流模式 (IAP CGCM)	(430)
第五节 IAP GCM 对增强温室效应的模拟	(447)
结 语	(461)
参考文献	(463)

第一篇

大气温室效应增强引起 气候变化的物理基础

第一章 大气温室效应气体浓度增加及其未来变化趋势

第一节 大气温室效应气体浓度增加及其原因

一、温室气体浓度增加引起的温室效应增强和气候变化

地球气候系统是非常复杂的变化着的体系。能引起地球气候变化的因子很多,如地球的主要能源太阳的变化,地球的空间物理参数和地壳内部的变化,与大气息息相关的陆地生态系统的变化,与大气不断进行能量、水分和其他物质交换的海洋的变化以及大气自身的物理化学变化,等等。尽管我们对各种空间和时间尺度的气候变化的原因还不完全清楚,但我们知道,10年到几百年时间尺度的全球气候变化与大气化学组成的变化关系十分密切。近代分子光谱学和辐射传输理论已经证明,大气中的许多微量气体和痕量气体,如 CO_2 、 H_2O 、 O_3 、 CH_4 、 CO 、 NO_x 以及CFCs等,在地—气系统的辐射收支和能量平衡中起着决定性的作用,是当今气候形成的重要因素。这些成分浓度的变化当然会对地球气候系统造成明显扰动。

这里讲的大气化学组成变化包括两方面的内容,一方面是新的大气组分的出现,例如CFCs就是大气组分中的新成员;另一方面是已有大气组分的浓度的变化。这两方面的变化都会引起气候的变化。其实,大气的化学组成是一直变化着的,只是过去未被人们认识而已。到了20世纪50年代,人们开始认识到城市人类活动和工业排放可在很大程度上改变当地和区域范围的大气化学组成;而20世纪60年代以后的大气化学的飞速发展使人们认识到,全球范围内的大气化学组成正在变化。这种变化的原因有自然的发展过程,也有人类活动的影响。这种变化有数千年甚至更长时间尺度的变化,也有几年到几十年就明显表现出来的变化。人类活动可能是造成几年到几十年时间尺度的变化的主要原因。人类活动对大气组分的冲击早就存在,但直到近百年来,由于人口急剧增长和工业飞速发展,这种冲击才在全球尺度上逐渐表现出来。

人类活动造成地球系统的全球尺度的变化的最明显的事例就是大气组成的变化。这一方面是由于大气本身的质量与固体地球和海洋的质量相比微乎其微,工业排放的气体很容易引起大气微量和痕量气体的浓度的变化;而同样质量的物质放入海洋可能就不引起明显变化。另一方面是由于大气是超级流体,工业排放的气体很容易在全球范围内输送。而且,人类活动造成的局地或区域范围的地表生态系统的变化也会改变全球大气的组成,因为大气的许多化学组分都来自地表生物源。这就是说,大气化学组成的变化是地球系统全球尺度变化中最敏感、最活跃的一环。

应当强调指出,当前举世瞩目的全球变暖问题的实质是大气温室气体浓度增加引起的大气温室效应增强。在许多文献中往往把增强二字忽略。但是我们必须记住,忽略增强二字是很不科学的。大气中本来存在着水气、 CO_2 等多种温室效应气体,大气的温室效应

是本来就存在的。用经典物理学理论很容易算出,如果没有大气,地球表面的平均温度要比现在的实际温度低 33°C 。我们现在讨论的问题只是在原有温室效应的基础上,由于温室效应气体浓度增加引起的温室效应增强对地球气候系统的一个扰动。还应当指出,温室效应增强只是引起气候变化的诸多因子中的一个,而且到目前为止还不一定是最主要因子。所以关于温室效应增强引起的气候变化的模式计算结果并不是对未来气候变化的预测,它只是对气候系统单因子扰动的敏感性实验结果(王明星,1991)。

被确凿的观测事实证明的大气化学组成的变化主要包括:氯氟烃类化合物从本来不存在到相当量级的全球平均浓度,大气 CO_2 、 CH_4 和氮氧化物浓度逐年增加以及大气 O_3 总量的减少趋势和对流层 O_3 浓度的增加。

二、大气 CO_2 浓度的变化及其原因

大气 CO_2 浓度的增加是众所周知、举世瞩目的。自 1958 年开始的在 Mauno Loa 观测站的观测和其后在南极和其他大气成分本底观测站的观测都证明,在过去 100 多年里全球平均大气 CO_2 浓度增加了差不多 70ppm,年增长率约为 0.4%(IPCC, WG1, 1990)。图 1.1-1 给出了观测的大气 CO_2 浓度的季节变化和逐年增长的趋势。根据对冰岩蕊气泡中和树木年轮中碳同位素的分析研究,大气 CO_2 浓度在工业化前的很长一段时间里大致稳定在 $280 \pm 10\text{ppm}$ (IPCC, WG1, 1990)。人们相信大气 CO_2 的增加主要是大量燃烧化石燃料和砍伐森林造成的。但是,将观测的大气 CO_2 增加与世界化石燃料燃烧排放的 CO_2 和森林砍伐对 CO_2 汇的影响相比较发现,人为活动排放的 CO_2 只有 40~50% 留在大气中(王明星等,1986)。留在大气中的 CO_2 总量与人为排放总量之比称为气留比。气留比是逐年变化的,这一变化与海面温度的年际变化有较好的相关性,表明海洋可能是另一部分人为排放 CO_2 的主要储库。大气 CO_2 增加将在表层海水的溶解无机碳体系中有所反映。

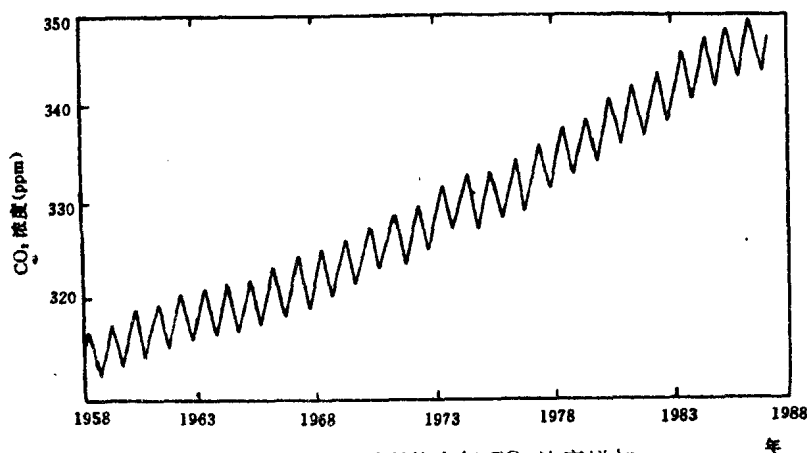


图 1.1-1 观测到的大气 CO_2 浓度增加
(转引自 IPCC, WG1, 1990)

三、大气 CH_4 浓度的变化及其原因

大气 CH_4 浓度的增加是 20 世纪 80 年代的重大发现。大气 CH_4 浓度的早期观测可追溯到 20 世纪 50 年代,那时的观测是断续地分散进行的。把所有资料集中在一起离散很

大,但仍能看出明显的逐年增加的趋势。自1983年,世界气象组织在世界各地不同纬度上设立了23个大气污染本底监测站,开始连续监测不同纬度上大气 CH_4 的浓度的变化(Steele et al, 1987)。这些监测站观测到的 CH_4 浓度季节变化和长期变化趋势非常类似。图1.1—2给出了Mould Bay(北纬 76°)观测的 CH_4 浓度随时间的变化,图中的圆圈是实际观测结果,实线是用立方齿线函数拟合观测资料所得到的平滑曲线。所有其他监测站的观测结果都可做出类似的曲线,为节省篇幅这里不一一列出。它们的共同特点是, CH_4 浓度有明显的季节波动,主要极小值出现在春季,最大值出现在秋末。除了季节变化外, CH_4 浓度还有明显的长期增加的趋势。由拟合立方齿线函数可求出每一测站的 CH_4 月平均浓度,对月平均浓度进行12个月的滑动平均可得出每年的年平均增长率,所得结果列于表1.1—1。

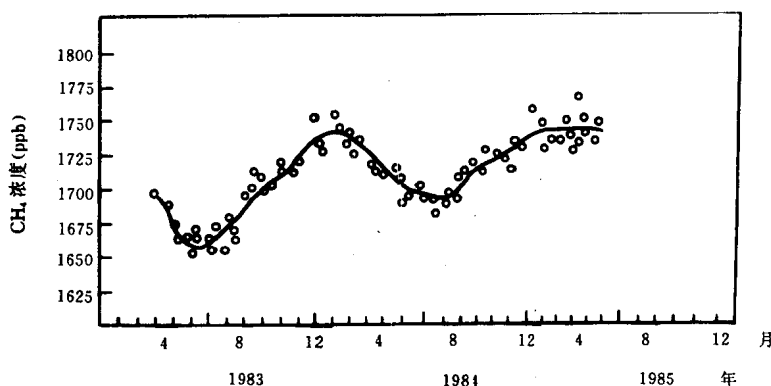


图 1.1—2 观测的 CH_4 浓度季节变化和长期变化趋势(Steele et al, 1987)

表 1.1—1 观测的大气 CH_4 浓度变化情况(Steele et al, 1987)

站名 (英文缩写)	所在纬度	年平均浓度 ppb(1984)	浓度增加 (ppb/年)	年增加率 (%/年)
PSO	90°S	1558.6	23.1	1.5
PSA	65°S	1558.8	26.0	1.7
SMO	14°S	1580.1	14.0	0.9
ASC	8°S	1578.4	14.1	0.9
GMI	13°N	1617.9	11.4	0.7
AV1	18°N	1643.4	11.7	0.7
MLO	20°N	1629.9	12.0	0.7
KUM	20°N	1652.0	7.9	0.5
AZR	39°N	1674.2	17.0	1.0
CMO	45°N	1677.4	24.8	1.5
CBA	55°N	1694.4	13.0	0.8
STM	66°N	1694.4	18.7	1.1
BRW	71°N	1710.3	15.7	0.9
MBC	76°N	1704.3	12.2	0.7

中国自 1985 年 7 月开始在甘肃民勤沙漠地点对大气 CH_4 和其他微量、痕量气体的浓度进行了连续观测,所用观测方法与世界气象组织规定的方法相同。观测的 CH_4 浓度变化示于图 1.1—3。其他微量气体也有类似的结果(王明星等,1989)。

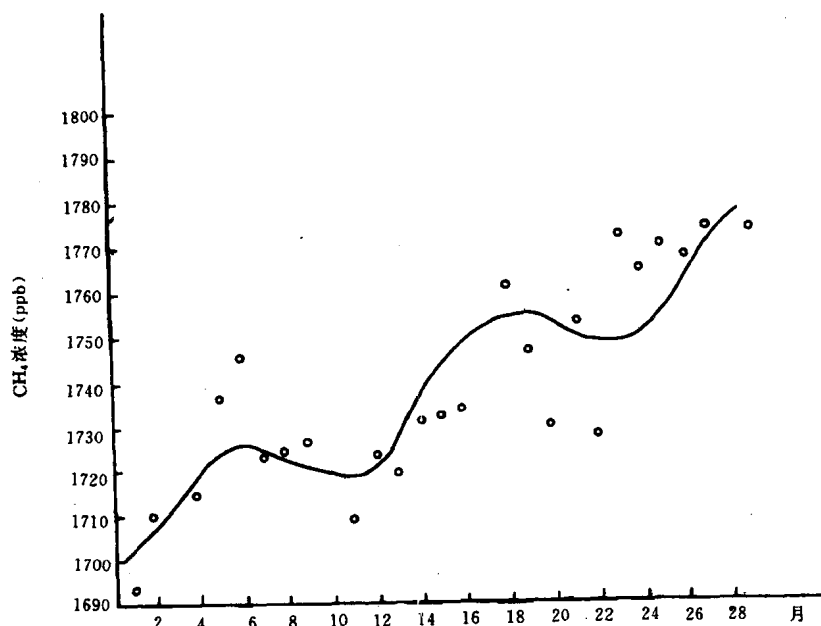


图 1.1—3 中国西北沙漠站观测的大气 CH_4 浓度变化(北纬 $38^{\circ}38'$)

考虑到 CH_4 和其他微量气体浓度都有周期性季节变化和长期变化的趋势,我们对观测的 CH_4 等微量气体的浓度进行了时间序列分析,发现这些微量气体浓度的变化有主周期为 12 个月和 6 个月的周期变化。因此我们用下式来拟合观测资料:

$$c = c_0 + \alpha t + \beta \sin \omega t + \gamma \sin(2\omega t + \varphi) \quad (1.1-1)$$

其中, c 为由观测资料求出的月平均微量气体浓度; t 为时间(以月为单位); c_0 为开始月份微量气体浓度; $\omega = 1/12$; $\alpha, \beta, \gamma, \varphi$ 为待定经验参数,用迭代拟合法求得。结果列于表 1.1—2。

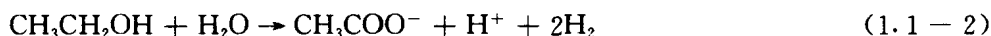
表 1.1—2 用 1.1—1 式拟合观测资料所得经验参数及各种气体浓度的年增长率

气体名称	c_0 (ppb)	α	β	γ	年增长率 (%/年)
CH_4	1.73×10^3	2.363	-0.491	-9.083	1.7
CO_2	3.44×10^5	0.088	3.152	-8.505	0.3
F-11	0.237.3	1.085	3.132	-1.315	5.0
F-12	0.412.8	0.807	3.932	1.461	2.3
F-113	0.032.78	0.292	-1.739	4.018	9.8
CO	193	-0.0052	-2.356	-2.24	-0.0
CCl_4	0.134.6	-0.093	-11.4	47.29	-0.0

由上面的观测结果可以看出, CH_4 年增长率及年平均浓度都明显地随纬度变化, 中国大陆测站观测到的 CH_4 年平均浓度比 Steele (Steele et al., 1987) 给出的同纬度海岛站观测结果略高。这可能是由于本站更接近 CH_4 源区。

最近几年的观测资料表明, 近几年大气 CH_4 浓度增加的速率开始下降 (IPCC, WG1, 1992)。

大气 CH_4 浓度增加的原因目前尚未完全弄清楚。这是因为大气 CH_4 的源和汇都还没有完整的定量资料。一般认为, 大气 CH_4 的增加主要是人为活动使大气 CH_4 的源增加造成的, 但也不能排除大气污染造成的汇减少。大气 CH_4 的主要来源是生物圈。生物活动产 CH_4 的过程非常复杂。这一过程包括厌氧微生物作用下的有机物分解、产 CH_4 细菌作用下的氢气和二氧化碳反应、乙醛的分解, 化学反应过程细节将在下节讨论, 这里简单归纳为



这类化学反应需要在无氧环境中进行, 而且对环境温度很敏感。因此, 任何使地表生态系统的局地环境缺氧或使其温度发生变化的人类活动都可能使大气 CH_4 的生物源发生变化, 造成大气 CH_4 浓度变化。与人类活动有关的大气 CH_4 的生物源主要是水稻田和食草家畜。据有限的观测资料推测, 全球家畜 CH_4 排放量为 $(6.5 \sim 10) \times 10^{10} \text{kg/a}$ 。家畜头数增加速度约为 $1.5\%/a$ (Seiler et al., 1984)。根据我国杭州和四川在 1987 ~ 1990 年 4 年的系统观测和文献记载的世界其他地区的观测资料推算, 全球稻田的 CH_4 排放率为 $(2 \sim 10) \times 10^{10} \text{kg/a}$ 。因为水利条件的改善, 在 1940 ~ 1980 年的 40 多年间, 全球水稻播种面积增加了将近 1 倍, 即从 1940 年的 $8 \times 10^7 \text{ha}$ 增加到了 $1.45 \times 10^8 \text{ha}$ (Seiler et al., 1984)。如果假定在此期间水稻田单位面积 CH_4 平均排放量未曾发生变化, 那么全球水稻田的 CH_4 排放总量从 1940 年的 $3.2 \times 10^{10} \text{kg/a}$ 增加到了 1987 年的 $6 \times 10^{10} \text{kg/a}$ 。

大气 CH_4 的非生物来源主要是生物体的各种燃烧过程和石油天然气以及煤矿的排放。随着人类活动的加剧, 这种来源的排放也在增加, 但是我们至今还没有准确的定量的资料。

大气 CH_4 的汇是其在干燥土壤的吸收和在大气中的氧化。关于土壤对大气 CH_4 的吸收及其在过去 200 年里的变化至今尚无准确的观测资料。 CH_4 在大气中的氧化过程主要是与 OH 自由基的反应:



$$K = 5.5 \times 10^{12} \exp(-1900/T) \quad (1.1-6)$$

其中, T 是气温, 反应 (1.1-5) 式对大气 CH_4 的消耗速率取决于大气中 OH 自由基的浓度和 (1.1-6) 式所表示的反应速率常数 K , K 主要与温度有关。因此, OH 自由基浓度和大气温度的任何改变都可能使大气 CH_4 的汇强度发生变化, 从而使大气浓度发生变化。取 OH 自由基浓度为 6.5×10^{11} 个分子/ cm^3 (这是近几年尚处在实验室发展阶段的一些观测仪器所观测到的大气 OH 自由基浓度, 其可靠性很有限), 则 (1.1-5) 式反应对 CH_4 的消耗速率为 $4.2 \times 10^{11} \text{kg/a}$ (王明星, 1991)。OH 自由基浓度及其分布的任何变化都会引起