

2008年雨雪冰冻，缅甸海啸……灾难性气候事件频发……

下个世纪，地球生灵居住何方……面对气候变化挑战，我们何去何从……

绿色煤电丛书

# 挑战全球气候变化

—— 二氧化碳捕集与封存

绿色煤电有限公司 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

绿色煤电丛书

# 挑战全球气候变化

## —— 二氧化碳捕集与封存

绿色煤电有限公司 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

### 图书在版编目 (CIP) 数据

挑战全球气候变化：二氧化碳捕集与封存/绿色煤电  
有限公司编著. —北京：中国水利水电出版社，2008  
(绿色煤电丛书)

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5689 - 8

I. 挑… II. 绿… III. 二氧化碳—排气—研究 IV. X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 094522 号

书 名	绿色煤电丛书 <b>挑战全球气候变化——二氧化碳捕集与封存</b>
作 者	绿色煤电有限公司 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a>
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	170mm × 240mm 16 开本 20 印张 338 千字
版 次	2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	<b>38.00 元</b>

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

## 编 委 会

- |       |     |                             |
|-------|-----|-----------------------------|
| 名誉主任  | 乌若思 | 中国华能集团公司副总经理<br>绿色煤电有限公司董事长 |
| 主 任   | 苏文斌 | 绿色煤电有限公司总经理                 |
| 副 主 任 | 郑 松 | 绿色煤电有限公司党组书记                |
|       | 齐春松 | 绿色煤电有限公司副总经理                |
|       | 陈 刚 | 绿色煤电有限公司副总经理                |
|       | 许世森 | 绿色煤电有限公司总工程师                |
|       | 陈 波 | 绿色煤电有限公司纪检书记                |
| 成 员   | 曹 江 | 绿色煤电有限公司研发工程师               |
|       | 朱声宝 | 绿色煤电有限公司研发工程师               |
|       | 刘 宇 | 绿色煤电有限公司研发工程师               |

# 序

---

近年来，低温雨雪冰冻、暴风雪、海啸、飓风等灾害性气候事件在世界范围内频频出现，北极地区冰川消融速度不断加快，北半球冻土地带面积持续缩减……气候变暖已是不争的事实。全球性的气候变化已经对地球生态系统和人类社会造成了影响，如不加以控制，对未来的影响和后果将难以估量。科学界普遍认为，人类活动排放的温室气体不断增加是引起全球气候变暖的最主要原因。因此如何减缓二氧化碳等温室气体的排放，是人类经济社会可持续发展所面临的重大挑战。

胡锦涛总书记在党的十七大报告中做出了“加强应对气候变化能力建设，为保护全球气候做出新贡献”的庄严承诺。我国是一个负责任的发展中大国，已经制定了应对气候变化的国家方案，采取了一系列政策措施，相关工作取得了明显成效。妥善应对气候变化，事关我国经济社会发展全局和人民群众切身利益。我们应该充分认识到应对气候变化的重要性和紧迫性，本着对中华民族和全人类长远发展高度负责的精神，采取更加有力的措施，全面加强应对气候变化能力的建设。火力发电行业作为主要的二氧化碳排放源，更应该及早做好技术储备，挑战全球气候变化。

中国华能集团公司是我国最大的发电企业，始终坚持企业发展和社会责任的统一，引领我国电力行业向清洁、高效、可持续方向发展。鉴于我国能源消费结构以煤为基础的国情，尤其是电力供应80%源于燃煤发电的现实，华能集团特别注重建设和运营清洁、高效的燃煤电

站。从未来经济社会发展对燃煤发电在效率和环保方面的更高要求出发，华能集团于2004年率先提出了“绿色煤电”计划，旨在研究开发、示范推广以煤气化制氢、氢气轮机联合循环发电和燃料电池发电为主，并对二氧化碳进行捕集和封存（CCS）的煤基能源系统，以大幅度提高煤炭发电效率，达到污染物和二氧化碳的近零排放，为应对气候变化做好技术储备，实现煤炭发电的可持续发展。

“绿色煤电”计划得到了国家有关部委的支持和兄弟单位的认可。2005年底中国华能集团公司联合中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司、中国电力投资集团公司、神华集团有限责任公司、国家开发投资公司、中国中煤能源集团公司等发电、煤炭和投资企业发起成立了绿色煤电有限公司，共同实施“绿色煤电”计划。“绿色煤电”计划还得到了国际金融机构和能源企业的高度关注，2007年底美国最大的煤炭企业博地能源公司（Peabody Energy）签署了参股绿色煤电有限公司的协议，与中国企业共同推进“绿色煤电”计划。

绿色煤电有限公司作为“绿色煤电”计划的实施单位，大力发挥科技进步和创新的作用，以建设二氧化碳和污染物近零排放的示范电站为目标，加快二氧化碳捕集与封存相关技术的研发和示范，加强应对气候变化基础研究，密切跟踪国内外相关技术的发展，积极参与气候变化领域的国际科技合作。通过示范工程的建设，与国内研究、设计、制造单位紧密合作，掌握其核心技术、支撑技术和系统集成技术，形成自主知识产权并创造知名品牌，努力增强企业的核心竞争力，为挑战全球气候变化做出新贡献。

有关的技术资料和研究成果将以丛书的形式陆续出版。我希望本书的出版，对我国应对全球气候变化能力建设，对火力发电行业未来控制二氧化碳的排放，有一定的参考价值。

**乌若思**

2008年6月

# 前言

全球极端气候事件频发，全球气候变暖日益显著，已成为各国政府和公众关注的焦点问题。减少二氧化碳等温室气体的排放，对于应对全球气候变化十分必要、非常迫切。火力发电行业是我国二氧化碳的主要排放源，也将是未来减排二氧化碳的主要对象。

一般来说，减少排放到大气层的二氧化碳有三种方式：①推动节能减排，更高效地利用能源以减少碳基燃料的使用量；②调整能源结构，增加低碳燃料和无碳燃料的比例，如大力发展核能、太阳能、风能、水电以及生物质能；③做好技术储备，发展安全可靠的二氧化碳捕集与封存（CCS）技术。为了应对全球气候变化，各国都在积极发展各种低碳技术，以提高能源利用效率、调整能源结构、推广低碳燃料，并取得了巨大进步。但是越来越多的研究表明，在保障能源安全和应对全球气候变化的双重要求下，发展<sup>4</sup>CCS技术是一种可行的途径。为此，欧美等发达国家都在积极发展CCS技术，一方面为应对全球气候变化进行技术储备，另一方面也在能源领域扩大其技术领先优势。

在人类活动排放的二氧化碳中，火电厂是最大的集中排放源。在美国，火电厂排放的二氧化碳占总排放量的1/3；在中国，火电厂排放的二氧化碳

接近总排放量的 1/2。所以，控制火电厂二氧化碳的排放是人类减少二氧化碳进入大气层最有效的措施。近年来，我国的电力工业发展迅猛，截至 2007 年底，装机容量已突破 7 亿 kW，其中燃煤电厂约占 3/4。鉴于燃煤发电在我国目前和未来电力工业中的重要地位，从现在开始将 CCS 技术作为一项战略技术储备，对于我国电力工业的可持续发展具有重大意义。

绿色煤电有限公司成立以来，一直致力于发展具有自主知识产权的 CCS 技术和建设“绿色煤电”近零排放示范电站。在扎实做好当前项目前期准备工作的同时，为了宣传保护全球气候的理念，并让更多人了解 CCS 技术在电力行业的应用，我们组织编写了本书。在编写过程中，我们力求兼顾不同读者的需求，使其既可以作为关心气候变化读者的科普读物，也可以作为电力、环保、化工等行业读者研究 CCS 技术的参考书。

总体来说，本书首先对气候变化的相关背景进行了综述，旨在引起读者对于该问题的重视，接下来对 CCS 技术进行了全面介绍，最后对我国的二氧化碳减排前景和国内外的减排计划进行了概述。第 1、第 2 章主要介绍全球变暖的原因和影响；第 3 章介绍全球为应对气候变化所采取的措施，特别介绍了全球化背景下国际温室气体减排的政策框架；第 4、第 5、第 6 章分别从二氧化碳的捕集、运输和封存三方面详细介绍了 CCS 技术的技术和经济特性；第 7 章从宏观角度分析了我国减排二氧化碳和发展 CCS 技术的潜力；第 8 章介绍了我国“绿色煤电”计划和国际上正在进行的 CCS 项目。针对读者所关心的问题，本书在正文后增设了附件，涵盖了气候变化领域的政策文件和 CCS 技术相关的基础数据，供读者参考。

本书的编写集中了绿色煤电有限公司的集体力量。编委会名誉主任乌若思同志指导了本书的编写工作，编委会负责人苏文斌、郑松、齐春松、陈刚、许世森、陈波等同志负责全书的组织和审校工作，具体由曹江（第 1、第 3、第 4、第 5 章）、朱声宝（第 2、第 7、第 8 章）和刘宇博士（第 6 章）主笔，黄斌博士参与了第 4 章的部分



编写工作。编写过程中，相关资料和信息的核实得到了英国帝国理工学院 Jon Gibbins 博士、清华大学费维扬院士、武汉大学胡基才教授等国内外专家的帮助，在此表示衷心的感谢。

气候变化和 CCS 技术均为跨行业的前沿科学，涉及的知识领域非常广阔。由于本书编写人员专业和水平有限，对诸多问题的理解难免不尽准确，如有不妥之处，恳请各位领导、专家、学者指正。编者希望通过本书抛砖引玉，引起更多国内同仁的讨论，充分认识应对气候变化的重要性和紧迫性，为我国和全球可持续发展事业进行不懈努力。

**苏文斌**

2008 年 6 月

# 目 录

序

前言

<b>第1章 气候变化与温室气体</b> .....	1
1.1 全球气候变化 .....	1
1.2 温室效应与温室气体 .....	11
1.3 CO <sub>2</sub> 及其减排 .....	16
参考文献 .....	22
<b>第2章 气候变化对世界经济和社会的影响</b> .....	23
2.1 气候变化对发展中国家经济和社会的影响 .....	23
2.2 气候变化对发达国家经济的影响 .....	32
参考文献 .....	43
<b>第3章 温室气体减排行动</b> .....	44
3.1 控制气候变化的国际法律与政策框架 .....	44
3.2 各国温室气体减排概况 .....	50
3.3 我国应对气候变化的努力 .....	55
参考文献 .....	64
<b>第4章 CO<sub>2</sub> 的分离与捕集</b> .....	65
4.1 CO <sub>2</sub> 捕集系统概述 .....	65
4.2 CO <sub>2</sub> 分离技术 .....	68
4.3 燃烧后 CO <sub>2</sub> 捕集系统 .....	74
4.4 燃烧前 CO <sub>2</sub> 捕集系统 .....	85
4.5 富氧燃烧 CO <sub>2</sub> 捕集系统 .....	99
4.6 不同捕集系统的技术经济比较 .....	109
参考文献 .....	121

<b>第5章 CO<sub>2</sub> 的运输</b>	124
5.1 CO <sub>2</sub> 的运输方式	124
5.2 其他相关问题	131
5.3 总结与展望	134
参考文献	135
<b>第6章 CO<sub>2</sub> 的利用和封存</b>	136
6.1 CO <sub>2</sub> 的利用和封存技术概述	136
6.2 CO <sub>2</sub> 的矿石碳化和综合利用	138
6.3 地质埋存与深海封存	148
6.4 陆地固碳	168
6.5 CO <sub>2</sub> 利用和封存的前景展望	176
参考文献	187
<b>第7章 中国 CO<sub>2</sub> 排放状况与减排前景分析</b>	192
7.1 中国 CO <sub>2</sub> 的排放状况	192
7.2 中国电力行业 CO <sub>2</sub> 的减排前景	200
7.3 中国其他行业 CO <sub>2</sub> 的减排前景	203
7.4 中国 CO <sub>2</sub> 的利用与埋存前景	208
参考文献	215
<b>第8章 中国“绿色煤电”计划和世界各国的碳减排计划</b>	216
8.1 中国“绿色煤电”(GreenGen)计划	216
8.2 世界各国 CO <sub>2</sub> 减排与埋存计划	224
8.3 其他相关的国际合作项目	238
参考文献	242
<b>相关术语中英文对照</b>	243
<b>附录1 联合国气候变化框架公约 (UNFCCC)</b>	244
<b>附录2 京都议定书 (Kyoto Protocol)</b>	262
<b>附录3 不同 CO<sub>2</sub> 捕集系统的经济性比较</b>	283
<b>附录4 当前世界上主要的 CO<sub>2</sub> 封存项目</b>	300
<b>附录5 我国 CO<sub>2</sub> 驱油与地质封存潜力估算</b>	302

# 第 1 章

## 气候变化与温室气体

### 1.1 全球气候变化

#### 1.1.1 炎热的地球

2006 年的冬天又是一个暖冬。过去的几年中，人们感觉气温显著上升。西欧烈日炎炎的夏日，日本樱花盛开的暖冬，印度空前的热浪，都在向人们表明，我们的地球正在不断地变得炎热（图 1.1）。与此同时，世界范围内极端气候事件又在不断发生。中国华南地区严重的洪涝灾害，重庆地区百年一遇的旱灾，北方降水减少、雷电天气剧增等，使得 2007 年成为中国气候灾害事件严重的一年<sup>①</sup>。2008 年新年伊始，中国南方地区就遭受了百年不遇的雨雪冰冻灾害，土耳其、希腊等国也遭受了罕见的雪灾，缅甸则遭受了强热带风暴的袭击，10 万人丧生。隔洋相望的美国，屡次遭受山林大火、冰雹<sup>②</sup>、飓风<sup>③</sup>的袭击。频发的灾害性事件，使得人们对未来气候的不确定性更加担忧。

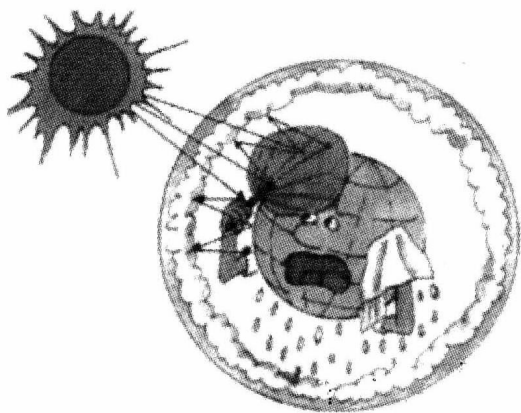


图 1.1 炎热的地球

地球在变热，这一直观的感受得到了测量数据和科学观测的支撑。2007

① 中央电视台. [焦点访谈] 解读极端天气. 2007 年 7 月 28 日. <http://www.cctv.com>

② 东方卫视. 美国灾害性天气侵袭各地

③ CCTV 新闻频道. 美国“卡特利娜”飓风事件. <http://www.cctv.com/news/special/C14676/index.shtml>

年政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次评估报告 (AR4) 表明, 1995 ~ 2006 年是自从采用仪器记录地表温度以来 (1850 年以来) 最炎热的 12 年。地表温度上升的速度在不断加快, 1901 ~ 2000 年的 100 年中, 地表温度上升了 0.6℃; 而 1906 ~ 2005 年, 地表温度的上升幅度增加为 0.74℃。

采用卫星和气球在对流层测量所得的数据同地表观测结果一致。测量表

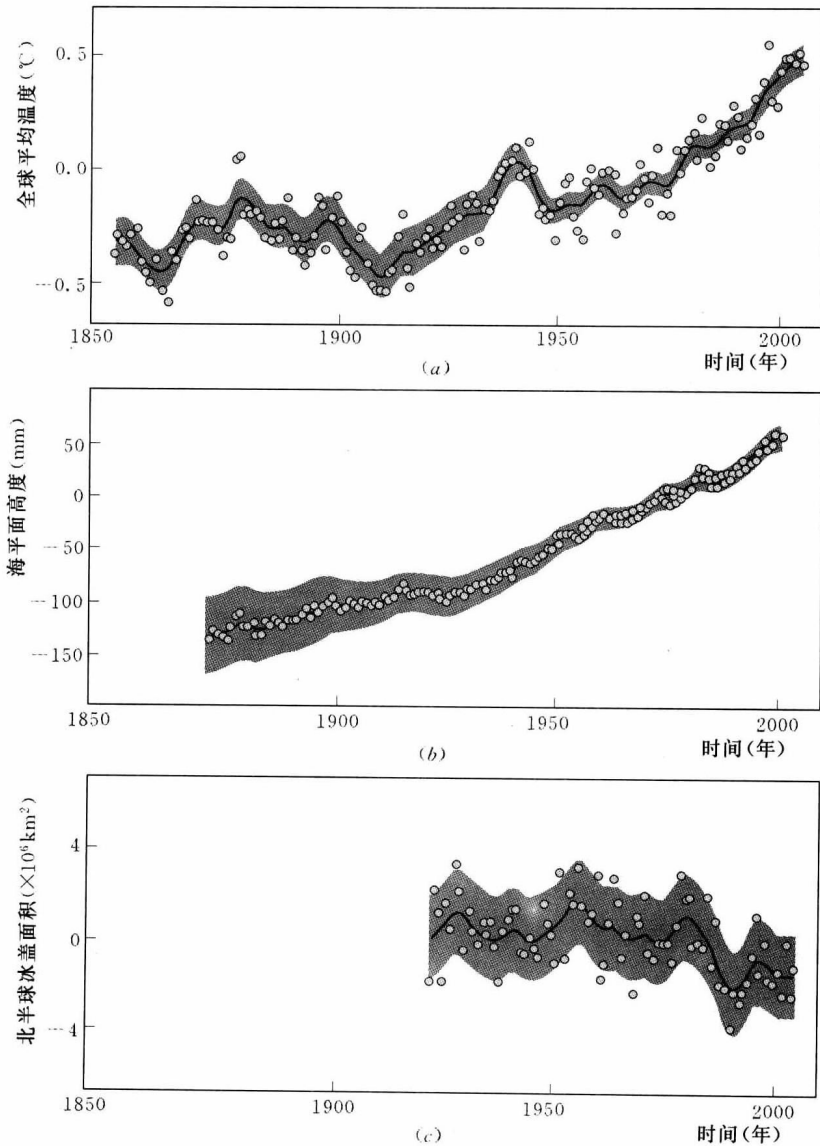


图 1.2 全球平均温度、海平面高度和北半球冰盖面积的变化  
(相对 1960 ~ 1990 年 30 年的平均值)

(a) 全球平均气温; (b) 全球平均海平面; (c) 北半球冰盖面积

明,自1980年以来,对流层中的水蒸气含量上升,其上升量同空气变热所能容纳的水蒸气的量是一致的。

1961~2005年对海洋温度的观测表明,海水的温度正在升高,这主要是因为其吸收了大气系统80%的热量。温度升高,导致海水受热膨胀,引起海平面上升;此外,由于气温升高,雪山和冰盖融化加快,也引起了海平面上升。由于以上因素,海平面在过去的40多年里,平均每年上升1.8mm左右,而且上升速度在不断加快。1993~2003年,海平面平均每年上升3.1mm,而整个20世纪海平面上升了0.17m,即平均每年上升1.7mm(图1.2)。

整个地球都在变热,这在北极地区尤为明显,从而使得其冰川融化的速度不断加速。在过去的100年中,北极地区的气温上升幅度相当于全球平均水平的2倍。预计这一状况还会继续,很有可能导致北极地区冰盖的消失和北极熊的灭绝。1978年以来的卫星观测表明,北冰洋的冰盖正以每年2.7%的速度缩减,而夏季的冰盖面积缩减则更快,达到每年7.4‰(图1.3)。1980年以来,北极圈内的永久冻土的表层温度上升了近3℃;1900年以来,北半球季节性冻土地带缩减了7%,在春季更是缩小了15%。

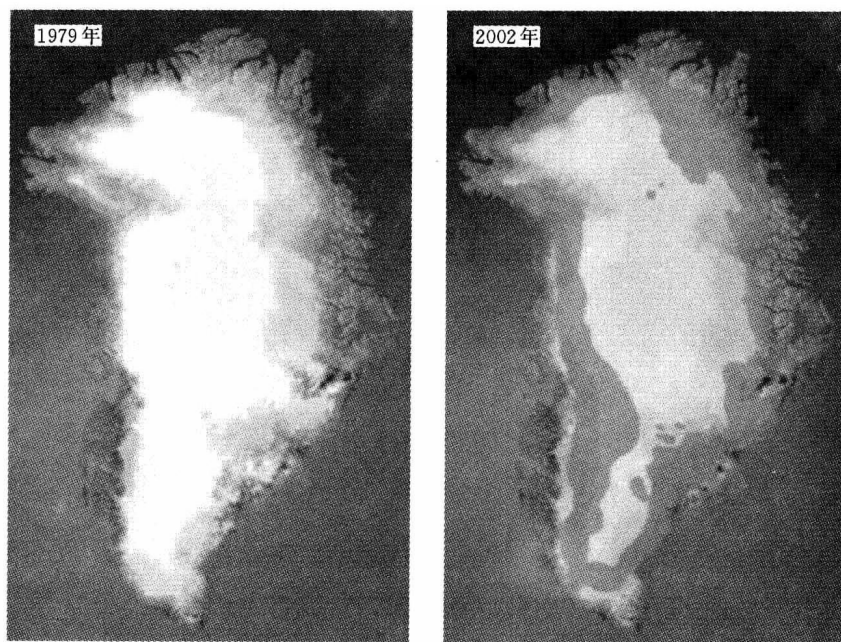


图 1.3 北极地区的格陵兰岛冰盖不断缩小❶

❶ <http://www.net.lorg/warming/stills.html>

气候变化还表现在降水量的变化上。1900 ~ 2005 年的长期观察发现,降雨量的分布发生了很大变化。美洲东部、北欧和中亚北部,降水量显著增加;而西非、地中海、非洲南部和亚洲南部部分地区则受到干旱的侵袭。海洋中降水和蒸发的变化,表现为中高纬度海域盐度下降,而低纬度地区海水盐度上升。1960 年以来,全球中纬度地区的西风强度增加。1970 年以来,炎热和干旱不断加剧,受害面积也不断增加,尤其是在热带和亚热带地区更为明显。干旱源于炎热,而降水减少更加剧了干旱。海洋表面温度上升、风的变化、雪场和雪盖的减少同样加剧了干旱。

由于全球变暖,大气中水蒸气增加,使得多数地区的暴雨发生频率也有所增加。过去的 50 年中极端气温的出现也发生了变化,极端低温天气和暴风雪减少,而极端高温天气和热浪发生频率不断增加。由于热带海洋温度升高,1970 年以来,北大西洋地区的热带飓风显著增多。需要特别指出的是,从人类和地球生态历史来看,20 世纪下半叶的 50 年内全球变暖的速度是十分异常的,北半球地区的平均气温比以往 1300 年中的任何 50 年都高。

由于气温升高,许多自然系统都发生了变化,包括:冰湖的解冻和湖面面积扩大;永久冻土带的不稳定性增加、山区雪崩事件频发(图 1.4);南

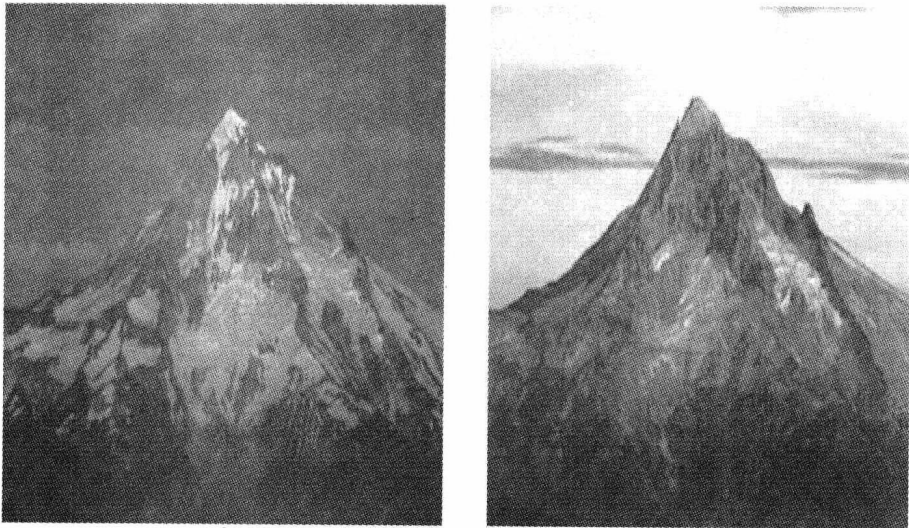


图 1.4 美国俄勒冈州胡德峰的积雪消融殆尽<sup>①</sup>  
(左图拍摄于 1984 年 8 月,右图拍摄于 2002 年夏末)

① <http://www.amap.no/acia/index.html>

极和北极地区的生态系统遭到破坏；许多河流的春季洪峰提前到达，峰值流量增大；诸多地区河流和湖泊升温从而影响到其热力结构和水质；春季提前来临，动植物的生理周期紊乱，例如动物换毛、鸟类迁徙和下蛋时间都在提前。

卫星观测发现，由于气候变暖，大地变绿的时间提前到来，并且持续时间也更长。此外，海洋地区的观测表明，随着气候变暖，海洋生态圈也发生了变化：高纬度海洋的藻类、浮游生物和鱼类更丰富；鱼类洄游的时间提前、范围延长。

面对不断上升的地球温度，日益增多的灾害性事件，急剧变化的气候系统，使得人类处于巨大的不确定性所带来的不安当中，人类正面临前所未有的挑战。

### 1.1.2 全球变暖谁之过

对于全球气候变暖这一事实，即使是普通的地球居民也能直接感受到，学术界也没有太多争论。但是，对于过去半个世纪全球气候变化的原因，则有多种不同的理解和争论。有科学家认为全球变暖是地球气候循环的正常表现，与人类活动无关，同二氧化碳（CO<sub>2</sub>）的排放没有直接关系<sup>①</sup>；也有科学家认为是太阳耀斑等自然原因造成的<sup>②</sup>。但是绝大多数科学家认为全球气候变暖和人类活动密不可分，尤其是和人类活动造成的温室气体浓度升高有很大的相关性。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）的评估报告汇集了全球 3000 多名相关科学家的智慧，反映了绝大多数科学家对气候变化的认识。2007 年，IPCC 公布了基于最新数据的气候变化第四次评估报告（AR4），对于气候变化的事实、原因、后果进行了更加深入和客观的评估。这一次的评估报告，相对于 2001 年的第三次评估，更加确定了人类活动对于气候变化影响的决定性因素。该评估报告认为，从 20 世纪中期以来观察到的全球平均气温升高，几乎可以确信主要是由于人类活动导致的温室气体浓度升高所引起的。过去 50 年中已经观测到的大气和海洋温度上升、冰盖融化加速等现象，如果不考虑人类的活动是无法解释的，自然因素决不可能引起如此大幅度的温

① 全球气候变暖有新说，气候变化与二氧化碳无关。人民网，2002 年 3 月 8 日。http://www.people.com.cn/GB/huanbao/57/20020308/682445.html

② 美国科学家称全球变暖与人类无关，纯属自然现象。中国新闻网，2007 年 12 月 16 日。http://news.vnet.cn/info/26/326945.html



室上升和异常现象。对全球气候变暖进行建模分析结果也表明，仅仅考虑自然因素，当前全球气温升高很难解释。而同时考虑自然因素和人类活动，则能够很好地解释当前全球变暖现象。

目前，人类活动导致的温室气体浓度升高正在进一步引发其他气候变化，例如海洋升温、地表升温、极端高温和风向变化。如果没有火山爆发和人类活动产生的气溶胶<sup>①</sup>的制冷作用，温室气体浓度的增加所引发的全球变暖及其他气候事故可能会比目前观察到的更加显著。

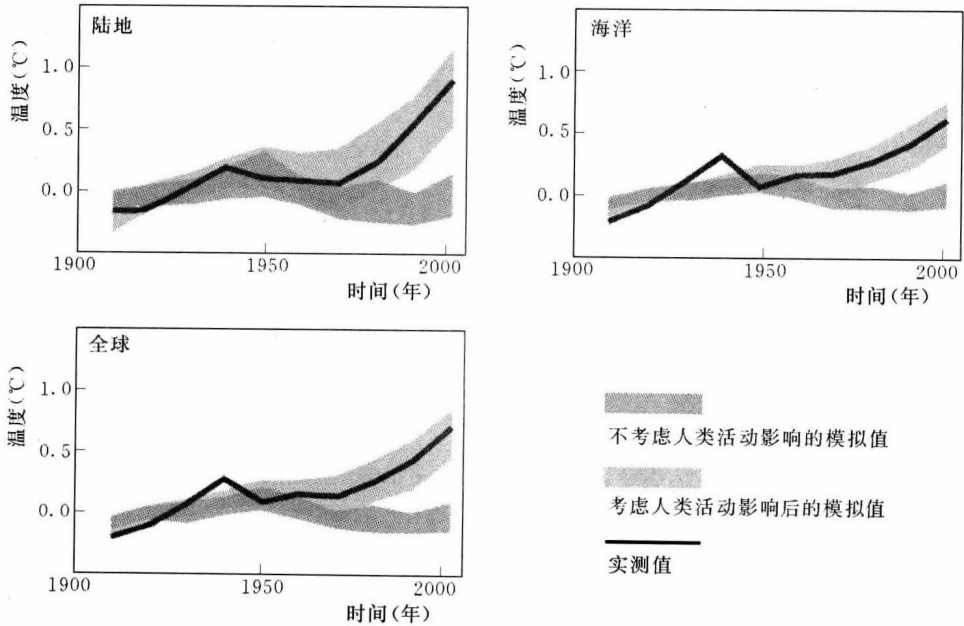


图 1.5 人类活动对全球气候变暖的影响<sup>②</sup>

至于人类活动是如何对大气变暖产生影响的，科学家的解释也不尽一致。不过，绝大多数科学家都认为，人类活动主要在两方面造成气候变暖：一是因人类活动排放温室气体造成的其在大气中的浓度上升；二是大地植被被改变所引起的地球大气能量失衡。尤其是人类大量利用化石能源所排放的CO<sub>2</sub>等温室气体及其所引发的温室效应加剧，是导致气温升高的最主要原因（图 1.5）。

① 气溶胶：固体或液体小颗粒悬浮在气体介质中形成的胶体物  
 ② IPCC AR4