


<http://www.phei.com.cn>



全球变化系列丛书

地球释放CO₂ 及其遥感研究进展

● 承继成 赵英俊 主编

 电子工业出版社

全球变化系列丛书

地球释放 CO₂ 及其遥感研究进展

主 编 承继成 赵英俊
副主编 方宗义 崔伟宏 伊丕源 秦 凯
顾 问 杜乐天

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

大气中的 CO₂主要来自地球系统本身,还是主要来源于人类活动的大量排放?这是当前大家关注的“全球气候变化”的核心问题。本书系统介绍了地球系统释放 CO₂(及 CO、CH₄等)的理论、事实、卫星遥感、影像分析及其应用,其内容包括:地球系统碳循环与碳平衡原理;地球系统释放 CO₂的事实;对 CO₂等气体的卫星观测数据及其分析结果;分析结论。本书重点论证了 CO₂卫星遥感的科学性,运用大量数据分析了 CO₂时空分布的自然特征,并对征收“碳消费税”的科学依据和合理性提出了质疑。

本书读者对象:遥感、地理信息系统、气象、环境科学及相关领域的科研人员、管理人员和政府决策者。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

地球释放 CO₂ 及其遥感研究进展 / 承继成, 赵英俊主编. —北京: 电子工业出版社, 2011. 12

(全球变化系列丛书)

ISBN 978-7-121-15288-7

I. ①地… II. ①承… ②赵… III. ①卫星遥感; 环境遥感—应用—二氧化碳—排气—研究 IV. ①X511②X87

中国版本图书馆 CIP 数据核(2011)第 242748 号

责任编辑: 张来盛(zhangls@phei.com.cn)

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 17.25 字数: 440 千字

印 次: 2011 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1 000 册 定价: 68.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

序

全球气候变化是当前大家关注的热点问题之一,尤其是二氧化碳(CO₂)的影响及其来源成为争论的焦点。

承继成、赵英俊等编写的《地球释放 CO₂ 及其遥感研究进展》一书,从地球系统的碳元素、碳循环、碳释放(碳源)和碳吸收(碳汇)的复杂性理论,到地球系统 6 亿年来 CO₂ 释放的演化过程,从地震、火山、林火、冻土、沼泽释放 CO₂ 的事实,再到 NASA、ESA 及 JAXA 等权威机构发布的与 CO₂ 探测有关的遥感卫星影像数据,以及卫星影像的碳释放(碳源)与碳吸收(碳汇),都给予了详尽的介绍和系统的分析,并得出了自己的看法;这在国内还是第一次,在国外也很少见。

该书运用 6 颗在轨卫星的遥感数据对 CO₂ 的时空分布特征进行了系统的分析,并提出了 CO₂ 的“碳汇”与“碳源”的分析方法,值得引起重视。目前,6 颗在轨的 CO₂ 遥感卫星已积累大量的数据,而且 NASA 等单位还将继续发射 CO₂ 遥感卫星;我国自己发射的风云三号气象卫星也载有专门用于探测 CO₂ 的传感器,并已正式立项要发射自己的测碳(CO₂)卫星,还设立了“碳专项”等,可见国家对 CO₂ 研究的重视程度。但对于已经积累的大量的 CO₂ 卫星遥感数据,尚未有人对其进行系统的分析和应用,该书正好填补了这方面的空白。从另一角度来看,该书作为我国发射测碳卫星的预研工作还是很合适的,人们可以从中了解到一些非常有用的知识,所以希望该书能尽快正式出版,以满足社会的需求。

国家卫星气象中心
中国工程院院士

評他己

2011 年 6 月

前 言

当前关于气候变化问题争论的焦点有三：全球气候是否在变暖？全球变暖是否是由于二氧化碳(CO₂)造成的？CO₂浓度的不断增加是否是由于人类活动大量排放的结果？本书只限于讨论CO₂的来源问题，因为它是当前气候变化讨论的核心，也是直接影响到各国的经济社会发展的焦点问题之一，所以引起了大家的极大关注。

本书的目的是介绍关于大气中CO₂和CO、CH₄等的来源及有关地球系统自然释放CO₂的事实和监测结果分析。大家都承认，大气中的CO₂来源，是地球自然释放与人为排放共同造成的。有人认为，地球自然排放是存在的，但地球系统既有释放CO₂，又有吸收CO₂的作用，两者现在已处于平衡状态，目前出现的大气中CO₂浓度不断增加，主要是人为的大量排放的结果。但是，也有人认为，不论从理论上，还是从现实上，所谓“平衡”是相对的、暂时的、动态的和个别现象，而不平衡是绝对的、普遍的。他们认为地球系统是一个远离平衡的系统，正是由于其不平衡性，才有变化和发展；地球系统一旦达到了“平衡”状态，系统就不再发展，系统生命就停止。植物的变化，动物的进化，河流、湖泊中水的流动，地形地貌的演化，都是不平衡的表现。大气中的CO₂浓度也处在不断变化之中，从6 000 ppm(1 ppm=1×10⁻⁶)到100 ppm，再到现在的380 ppm，都经历了不断的变化。

地球系统中的CO₂气体既是碳源(释放)又是碳汇(吸收)。地球系统的四个子系统(固体、液体、气体和生物)及其各要素，都在不断地吸收CO₂，又释放CO₂，有时以吸收为主，有时以释放为主。地震、火山的活动以及石油、天然气、煤层气的渗漏，都在不断释放CO₂气体；海洋湖泊、森林草地既释放CO₂，又吸收CO₂气体；沼泽、冻土、土壤、荒漠等也是既释放CO₂，又吸收CO₂；地球系统永远处于不平衡状态，变化、发展是永恒的主题。

在地球历史上，大气中的CO₂浓度既受植物的影响，也受“冰期”的影响，而且“冰期”的影响更大。在第四纪冰期时，大气中的CO₂浓度只有100 ppm；随着进入“间冰期”或“冰后期”，气温逐渐上升，CO₂浓度随之增加，这是自然过程，是由于地球系统自然释放得到加强的结果。就如同冻土地带随着气候变暖，造成了CH₄大量释放，这也是自然过程。

NASA、ESA和JAXA等国际权威机构，运用卫星搭载的专门测碳的传感器技术系统，获得了丰富的科学实测数据。我们在这些科学数据的基础上，进行了系统的综合分析，包括对全球的CO、CH₄、CO₂、O₃、NO₂、NH₃等气体的浓度分别进行时空分布特征分析，获得了以下几点有特色的结论：

(1) CO、CH₄、CO₂、O₃、NO₂、NH₃等气体浓度的时空分布特征，具有明显的地带性特征。

(2) 对流层CO₂浓度，构成了两个纬向条带状分布特征；位于N 30°~60°上空的CO₂条带具有规模大、浓度高、连续性好的特征。而这完全是由大气环流决定的。

(3) CO₂等气体的浓度与气温之间，具有线性关系与非线性关系，以及并存和不确定特征。当CO₂浓度超过一定阈值时，CO₂浓度与气温间成非线性关系，呈现出先由气温上升，后由CO₂浓度增加的“反因果”关系。

不难发现，存在一些与当前主流观点完全相反的现象。例如，北太平洋与北大西洋海域，

位于赤道附近的热带雨林地区,以及高纬冻土和沼泽湿地地带,其 CO 、 CH_4 浓度最高,明显高于北美;而欧洲以及亚洲东部和南部地区,似乎 CO 、 CH_4 浓度与化石燃料关系不大,自然的影响要大于人为影响。

本书系统地介绍地球系统释放 CO_2 (及 CO 、 CH_4) 的理论、事实、卫星遥感、影像分析及其应用,由以下四部分组成:

(1) 理论部分:包括地球系统的碳元素与碳库,碳循环与碳平衡,碳汇与碳源的复杂性与不平衡性。

(2) 事实部分:包括 6 亿年来大气中 CO_2 变化,板块构造与地壳破裂释放 CO_2 的事实,地震与断层活动释放 CO_2 的事实,火山与温泉释放 CO_2 的事实,烃类物质(石油、天然气、煤炭)渗漏释放 CO_2 的事实,枯枝落叶腐烂释放 CH_4 与林火、草地火灾释放 CO_2 的事实,冻土与湿地释放 CH_4 的事实,岩石风化、成土过程及荒漠化释放 CO_2 的事实,海洋、湖泊等水体释放 CO_2 的事实等。

(3) 技术部分:主要介绍在轨的 6 颗探测 CO_2 等气体的卫星遥感技术及影像分析技术等,并论证了它们的科学性。

(4) 分析结论:包括 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 NO_2 及 O_3 等的时空分布特征分析, CO_2 等的地带性特征分析,南、北半球分布的不对称特性分析, CO_2 影像的碳汇与碳源分析及应用分析等。

本书所引用的原始资料、图表、卫星影像数据,都是来源于互联网、图书馆、资料室,都是人家的(或许更有说服力);由于资料很多,在整合编辑中没有一一标注引用资料的出处,如有疏忽或工作差错,请原作者谅解和批评指正。我们对上述多种资料作了一些综合分析工作,并得出自己的看法,算是集成创新。由于这是一项全新的工作,难免会出错误,欢迎批评指正。如能将信息反馈给我们,将不胜感激。

编者
2011 年 5 月

目 录

绪论	(1)
0.1 地球释放 CO ₂ 的国内外研究现状	(1)
0.2 地球释放气体的卫星遥感研究	(2)
第 1 章 地球系统中的碳元素及其存在形式	(5)
第 2 章 地球系统的碳循环与碳平衡	(17)
2.1 概述	(17)
2.2 地球系统的碳循环与碳平衡原理	(18)
2.3 地球系统的碳循环概念模型	(20)
2.4 地球系统的碳循环特征	(21)
第 3 章 地球系统的碳汇与碳源的复杂性与不确定性	(25)
3.1 碳汇与碳源特征综述	(25)
3.2 岩石圈中的碳汇与碳源的不确定性	(27)
3.3 海洋碳汇与碳源的不确定性	(28)
3.4 陆地生态系统中的碳汇与碳源的不确定性	(30)
3.5 土壤碳汇与碳源的不确定性	(31)
3.6 大气中的碳汇与碳源的不确定性	(32)
3.7 地球系统碳循环的平衡与不平衡的关系问题	(34)
第 4 章 地球系统释放 CO ₂ 气体发展过程	(35)
4.1 地球历史上大气中的 CO ₂	(35)
4.2 大气中 CO ₂ 浓度的变化与气温变化	(37)
4.3 地球历史时期全球 CO ₂ 浓度与植被的关系	(37)
4.4 地球大气中 CO ₂ 浓度的变化与气温变化	(39)
第 5 章 板块构造活动与释放 CO ₂ 气体的事实	(41)
5.1 地球释放 CO ₂ 气体	(41)
5.2 板块活动简介	(41)
5.3 基于板块构造的全球地震、火山活动带	(44)
第 6 章 地震活动释放 CO ₂ 等气体的事实	(45)
6.1 地震对全球 CO ₂ 气体变化的影响	(45)
6.2 地震活动释放 CO ₂ 等气体	(51)
第 7 章 火山活动与温泉释放 CO ₂ 气体的事实	(54)
7.1 火山活动释放 CO ₂ 等气体的形式	(55)
7.2 世界火山分布	(58)
7.3 全球火山喷发对大气环境影响的被动式空基遥感监测	(63)

第 8 章 地壳烃类物质释放 CO₂ 气体的事实	(66)
8.1 泥火山排气	(66)
8.2 煤层气排放	(72)
8.3 天然气与海洋中可燃冰的 CO ₂ 渗漏	(75)
第 9 章 林地枯枝落叶腐烂与林火释放 CO₂ 的事实	(80)
第 10 章 草地释放 CH₄ 与草地火灾释放 CO₂ 的事实	(94)
10.1 草地	(94)
10.2 农田	(95)
第 11 章 湿地、冻土释放 CO₂、CH₄ 的事实	(98)
11.1 湿地	(98)
11.2 冻土	(102)
第 12 章 岩石风化剥蚀与荒漠地带释放 CO₂ 等气体的事实	(106)
12.1 岩石风化过程释放和吸收 CO ₂ 气体的事实	(106)
12.2 荒漠地带释放 CO ₂ 的事实	(107)
12.3 结论	(112)
第 13 章 海洋、湖泊及河流等水体释放 CO₂ 的事实	(113)
13.1 海洋释放 CO ₂ 的事实	(113)
13.2 湖泊、水库释放 CO ₂ 的事实	(114)
13.3 河流等水体释放 CO ₂ 的事实	(115)
第 14 章 人类社会活动排放 CO₂ 的事实	(117)
14.1 人类工业化过程中的 CO ₂ 排放	(117)
14.2 农业活动 CO ₂ 、CH ₄ 及 N ₂ O 的排放	(119)
14.3 畜牧业的排放	(119)
14.4 城镇化过程中的 CO ₂ 排放	(120)
第 15 章 地球排气的自然与人为因素的评估	(122)
15.1 地球排气的测不准和不确定性	(122)
15.2 人为排气的测不准与不确定性	(123)
15.3 地球排气的卫星遥感探测所得的结论	(124)
15.4 CO ₂ 浓度在大气总量中占 0.03% 的比例是如何测得的及其意义	(124)
15.5 地球排气的自然与人为因素影响大小的比较	(124)
第 16 章 CO₂ 等气体的基本特征与遥感原理	(126)
16.1 CO ₂ 等气体的基本特征	(126)
16.2 CO ₂ 等气体的遥感原理	(127)
16.3 CO ₂ 等气体的遥感平台综述	(128)
16.4 遥感数据的科学性论证	(133)
第 17 章 CO₂ 等气体的卫星遥感监测技术系统	(137)
17.1 国外 CO ₂ 卫星遥感技术的现状	(137)
17.2 技术系统简介	(138)
第 18 章 CO₂ 等气体总柱浓度卫星影像的时空分布特征	(157)
18.1 CO 总柱浓度卫星影像的时空分布特征分析	(157)

18.2	CO ₂ 总柱浓度卫星影像的时空分布特征分析	(168)
18.3	CH ₄ 总柱浓度卫星影像的时空分布特征	(173)
18.4	NH ₃ 与NO ₂ 总柱浓度卫星影像的时空分布特征分析	(175)
第19章	CO₂柱状浓度卫星遥感影像的碳汇与碳源分析的探讨	(184)
19.1	SCIAMACHY 2003 影像的 CO 气体的碳汇与碳源分析	(185)
19.2	SCIAMACHY 2005 年 CO ₂ 的碳汇与碳源分析	(186)
19.3	SCIAMACHY 2003 年 CH ₄ 的碳汇与碳源分析	(187)
19.4	全球综合碳汇与碳源的空间分布及复杂性特征	(189)
第20章	CO₂碳源、碳汇随季节变化而更替的特征及地形对其卫星影像的影响	(191)
20.1	碳源、碳汇随季节变化而更替的特征分析	(191)
20.2	大气中 CO ₂ 总柱浓度随地形高度而变化的状况及全球分布特征	(196)
第21章	地球释放 CO₂等气体总柱浓度分布的地带性特征	(200)
第22章	中对流层 CO₂的卫星影像分析	(207)
22.1	CO ₂ 高、低浓度纬向带影像特征分析	(207)
22.2	中对流层 CO ₂ 柱的浓度分布的时间特征	(209)
第23章	CO₂气体柱状浓度时空分布的波动性、节律性、不对称性与不确定性	(218)
附录 A	2000 年 3 月—2004 年 10 月 CO 浓度全球分布系列图	(220)
第24章	CO₂人为排放的卫星遥感及环境分析	(235)
第25章	CO₂等气体分布与地震带之间的关系	(243)
小结		(254)
参考文献		(255)

绪 论

0.1 地球释放 CO₂的国内外研究现状

1. 国外研究现状

对地球释放 CO₂等气体研究最早和最多的国家首先要推前苏联,即现在的俄罗斯,其次是美国。前苏联早在 20 世纪 60 年代就着手启动地壳、地幔的存储气体的“排气”(gassing)过程研究,并提出了天然气的“非生物形成”的假说;同时对火山、泥火山释放 CO₂、CH₄等气体的过程进行了系统、深入的研究。主要代表人物有:克鲁巴金(1980)、卡可洛夫(1966,1971)、库特略卓夫(1982)、库里柯娃(1972)、列特尼科夫(2002)、乌拉库舍夫(2002)、巴尔非洛叶夫(1980)、维诺克拉托夫(1959)、托里科(1985)、索洛金(1984)、克拉尤希金(1994)、巴依托夫(2002)、古鲁巴夫(2002)、科切马索夫(2002)、阿秀洛娃(1985,2002)、丘马可夫(2002)、巴甫林柯娃(2002)、索科洛夫(1971)和列特尼科夫(2002)等。

研究地球释放 CO₂、CH₄等气体的西方知名人物及其文献还有:

Marco Beltrando, et al. 2010. Earth's CO₂ degassing in Italy.

Chioclini G, et al. 2010. Non-Volcanic CO₂ Earth degassing: Case of Mefite, d'Ansant, Italy.

Chioclin G, et al. 2004. CO₂ Earth degassing and seismogenesis in Central and southern Italy.

Chioclini G, et al. 2000. Rate of diffuse CO₂ Earth degassing estimated from Carbon balance of regional, Gquifers, Italy.

V. V. Adushkin, et al. 2006. Hydrogen degassing of the Earth and Ozone anomalies.

Albert Jambon. 1994. Earth degassing and Large Acale geochemical Cycling of Volatile elements.

Vollmer. 1983. Earth degassing niantle metasomaticm. and isotopic of the mantle.

Giuseppe Etiope, et al. 2009. Earth degassing: A missing etheme and propane.

Gold T. 1982, 1984, 1990, 1992. Google. com; Infrared remote sensing of Earth degassing, Methane emission from Earth's degassing.

从以上西方文献和互联网上查询可知,地球排气在西方的研究很少,除 Gold 外(在西方,Gold 对地球排气研究的实力最强),只有意大利学者做了些工作。

2. 国内研究现状

我国最早从事地壳、地幔存储与释放 CO₂等气体的学者,首先要推核工业地质研究院的杜天乐教授,他从 20 世纪 90 年代就开始介绍前苏联和美国学者在这一领域的研究成果,同时在国内积极地开展这一领域的研究工作,并首先提出了地球系统的“五个气圈”的理论和地球排气机理的研究。同时,他还根据地球排气后引发的森林火灾、极端天气的子系统研究,提出了

自己的创新观点。另外,国家地震局地震地质研究所的高建国、强祖基等研究员,对地震的排气过程、红外辐射现象等进行了研究,尤其对 2004、2005 年发生在印度尼西亚的苏门答腊地震与海啸过程中的排气现象进行了系统、深入的研究,取得了较好的成果。

相关的重要研究工作,有陈泮勤的著作《地球系统碳循环》(科学出版社,2004),康德梦的《中国环境中碳、氮元素变化与大气温室效应的系统分析》(地震出版社,1992)等。

0.2 地球释放气体的卫星遥感研究

1. 国外研究现状

近 30 年来,国外的一些科学家越来越认识到研究大气中 CO₂ 的来源问题,仅靠已有方法是不够的,需要运用最新科技(如卫星遥感技术)进行探测,并与传统方法结合,才能获得较好的效果。为此,国外一些本领域的权威部门,如 NASA、NOAA、ESA 和 JAXA 等,发射了一系列探测大气中 CO₂ 浓度的卫星,并开展了系统研究,现简介于下。

1) CO₂ 等气体的卫星遥感技术的研究现状

1978 年,Nimbus7 卫星首先搭载 TOMS 传感器监测 O₃ 的变化。

1979 年,在 NOAA 卫星系列搭载了 O₃ 廓线(SBV)传感器。

1995 年,ESA 发射的“欧洲遥感卫星”ERS-2 上搭载了“全球 O₃ 监测仪(GOME),主要监测 O₃ 在对流层和平流层中的 NO₂、BRO 和 SO₂ 等痕量气体的全球分布。

1999 年,NASA 对地观测系统(EOS)卫星系列的第一颗卫星 EOS/AM-1 对地球的大气成分进行全方位、长期观测。

1999 年 12 月,NASA 和加拿大空间局(CSA)发射了 TERRA 卫星,搭载了对流层污染测量仪(MOPITT),目的是测量大气柱的发射和反射红外波谱,用于 CO 和 CH₄ 的廓线监测。

2002 年,ESA 发射的 ENVISAT-1 卫星上搭载了多台大气成分测量传感器,对大气的发射光谱,恒星光谱进行探测,重点是 O₃、气溶胶浓度的测量,和对大气痕量气体包括 O₃、H₂O、CH₄、NO₂、CFC 等变化的研究。其中大气制图扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)专门用于监测对流层的 NO₂、O₃、CO、CO₂ 和 CH₄ 等的痕量气体的浓度和分布变化。

2002 年,JAXA/NASD 发射的高级地球观测系统 ADEOS-1 搭载了多种大气成分传感器,主要有:

- O₃ 总量测绘仪(TOMS),用于 O₃ 和 SO₂ 的浓度监测及分布变化;
- 温室效应气体干涉监测仪(IMG),用于 CH₄、CH₂、N₂O 的浓度及分布变化监测;
- 改进型临边大气分光计(ILAS),用于高纬度地区的临边大气痕量 O₃、H₂O、CO₂、CH₄、NO₂ 等的测量。

2004 年,NASA 发射了 Aura 地球观测系统(EOS 系列)卫星,搭载了 4 个大气成分传感器:

- O₃ 监测仪(OMI);
- 微波分支探测仪(MLS);
- 高分辨力分支探测仪(HIRDLS);
- 对流层发射分光仪(TES)。

其中 OMI 可获得每天的对流层低层 O₃ 和其他气体如 CO、N₂O 等的浓度。

2005年,NASA EOS系列的 Aqua 卫星,搭载了:

- “超高光谱红外探测仪”(AIRS),光谱为 $40\sim 140\text{ cm}^{-1}$,几何为 $22\times 22\text{ km}$,主要用于探测 CO 和 CH_4 的浓度、全球分布及变化;

- 另一个遥感器和超高光谱大气探测仪 FTIR 光谱仪 (IASI),光谱为 $0.35\sim 0.5\text{ cm}^{-1}$,几何为 $50\times 50\text{ km}$,主要探测 CO 和 CH_4 的浓度、全球分布及变化。

2009年,JAXA 的 GOSAT 卫星,搭载了热红外近红外遥感器(TANSO),光谱为 $0.2\sim 0.65\text{ cm}^{-1}$,主要探测 CO_2 和 CH_4 的浓度、全球分布及变化。

2008年,NOAA-15.18 和 TIROS-N 搭载了高分辨红外探测仪(HIRS),几何分辨率为 $22\times 22\text{ km}$,主要用于探测 CO 和 CH_4 的浓度、全球分布及变化。

2009年,NASA 发射了“轨道碳观测”(OCO)卫星,又叫“嗅碳卫星”,与 EOS 的 Aqua、Aura、Cloudsat、Calipso、Parasol 等卫星协助工作,轨道高度为 705 km ,与太阳同步极地轨道,回归周期为 16 天。遥感器为温室气体监测仪(GMS),具有 3 个波段, $1.61\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.06\text{ }\mu\text{m}$ 用于探测 CO_2 , $0.76\text{ }\mu\text{m}$ 用于探测 O_3 ,但可惜没有成功。

美国航天局(NASA)又一颗用于研究全球变暖的卫星“辉煌”号落入海底。这已经是两年来第 2 次发生此类事故。“辉煌”号卫星原定升入距离地球 438 海里(约 811 km)的轨道运行,加入 NASA 之前送入太空的“A-Train(午后列车)”地球观测卫星编队之中,成为这个编队的第 6 颗卫星。

澳大利亚也在进行相关的研究和卫星仪器研制工作,Greenhouse Gas Monitor(GGM)将工作在 705 km 太阳同步轨道,计划装载一台采用干涉光谱技术的短波红外光谱仪,拥有两个光波段, $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.2\text{ }\mu\text{m}$,光谱分辨率为 0.1 cm^{-1} ,分别探测 CO_2 和 O_3 ,目前正在进行航空载荷的研制。

2) 国外 CO_2 卫星遥感应用现状

国外用卫星数据对大气痕量气体的研究已经做了很多工作。许多学者在对流层 O_3 的反演方面做了工作,对反演得到的对流层 O_3 数据的应用也有很多研究,例如:全球及部分区域对流层 O_3 的时空分布及变化研究;对流层 O_3 与厄尔尼诺、北大西洋涛动等气候因子的相关分析;大陆间污染物输送的研究等。

从卫星观测柱总量计算大气对流层 NO_2 柱总量的数据研究国外也有很多。例如,Martin、Richter 等利用 GOME 卫星反演对流层 NO_2 的方法研究;Boersma 等对对流层 NO_2 反演的误差研究;一些科研组织对 SCIAMACHY 对流层 NO_2 的反演结果的校验以及对反演所得的对流层 NO_2 数据的应用等。如 Velders 等利用 GOME 资料和三维模式研究了全球对流层 NO_2 柱总量分布的情况;Jagele 等应用 GOME 卫星资料研究了由于生物质燃烧产生的 NO_x 的时空分布和季节变化;Boersma 等利用 GOME 资料和模式模拟比较、研究了闪电在对流层产生的 NO_2 的时空分布;Andreas Richter 等利用 1996—2004 年的 GOME 和 SCIAMACHY 的对流层 NO_2 资料研究了全球的 NO_2 变化趋势,结果表明,中国东部地区以及香港地区有显著的增长;Vander 等利用 1996—2005 年的资料也发现中国东部一些工业发达地区的 NO_2 浓度有明显增加。

国家气象局卫星气象中心方宗义、白文广等运用国外 NASA、ESA 卫星的 CO_2 、 CH_4 、 O_3 的探测数据,在中国进行了验证,表明了卫星遥感是科学的。

2. 我国 CO₂ 卫星技术与应用研究进展

随着我国环境保护工作力度的不断加大,环境保护对遥感技术的需求也越来越多。目前,我国已发射的对地观测卫星有 FY-1、FY-2、资源一号卫星(ZY-1)、资源二号卫星(ZY-2)、海洋一号卫星(HY-1)。到目前为止,我国在轨运行的各类卫星还没有能力得到大气成分的资料和数据,但卫星观测大气成分的研究则已经起步。2004年,国家卫星气象中心作为中国国家科技部与欧洲航天局(ESR)合作开展“龙计划”项目的中方首席研究单位,在国内进一步开展关于卫星监测大气成分领域的合作研究,开展了相关卫星数据的反算法和软件开发,几年来累积了大量的资料,得到不少成果。中国科学院大气物理研究所、北京大学等一些科研小组也在这个领域开展研究工作,利用地基 DONS 观测反演的 NO₂ 柱总量与 SCIAMACHY 卫星 NO₂ 数据的比较及 NO₂ 时空分布进行了相关的研究,中国气象科学研究院的学者也着手这一领域,并利用 GOME 卫星资料对北京大气中的 NO₂ 做了初步的分析。

我国当前的环境污染物排放总量不断增加,污染范围继续扩大,必须密切监测大气污染物的变化,掌握大气质量现状及未来的变化趋势,因此建立我国环境卫星监测与预报系统,与地面监测网络共同监测大气成分的变化、大气污染与污染来源势在必行。2008年5月我国发射的 FY-3 气象卫星首次搭载臭氧探测仪,有望得到臭氧的全球分布和垂直廓线以及气溶胶的光学厚度等大气成分信息。同时,2008年9月成功发射环境一号卫星,将得到近地面层的系列大气成分分布和污染来源信息。

第 1 章 地球系统中的碳元素及其存在形式

碳(C)是地球系统组成的重要元素之一。地球是一个巨大的碳库,据 Rubey(1951)研究,地球系统的碳元素总量为 2.5×10^{16} t, Galimov(1975)研究为 7.4×10^{16} t。Fanale(1971)的研究支持 Rubey 的观点。

Rubey(1951)指出,地球系统中的碳元素主要储存在地幔与地壳之中,并以烃类的原始形式存在,经释放后变为甲烷(CH_4),在大气中再分解成为氢(H)和二氧化碳(CO_2)形式存在。 CH_4 在大气中存在的寿命只有 4~7 年。地壳每年释放的 CH_4 量为 $(1\sim 3) \times 10^{10}$ m^3 。

T·戈尔德(1978)指出,地球系统中的碳元素来源:一为地壳,如从碳酸岩类(CaCO_3 ,一种海洋沉积物)、陆地、生态系统、海洋系统中来;二为大气。

碳元素的基本特征:碳原子有别于其他元素,它具有形成成长的共价链和环的能力,从而成为有机化学和生物化学的基础。自然界中最常见的单质碳,包括非晶质碳、石墨和金刚石。碳原子的氧化价态是从+4到-4,+4碳最常见的是 CO_2 和碳酸盐(海洋中的溶解碳和岩石中的碳酸盐)。碳的 7 种同位素: ^{10}C 、 ^{11}C 、 ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C 、 ^{15}C 、 ^{16}C ,稳定同位素为 ^{12}C 、 ^{13}C ,其余是放射性的。 ^{12}C 、 ^{13}C 和 ^{14}C 同位素测定在碳循环研究中十分重要。在上述同位素中,丰度最高的为 ^{12}C ,它占自然界中C总量的约 99%, ^{13}C 约占约 1%,而不同的碳汇中各种碳同位素的相对丰度是有很大差别的,可以用来估计不同碳汇之间的交换量,是碳循环的基础。

地球系统中的碳存在两种基本形式,即无机碳(指与生物作用无关的碳)和有机碳(指与生物作用有关的碳),这两种形式的碳都在地球化学中起到十分重要的作用。很多地球系统过程,在不同程度上,都是这两种碳的参加下完成的。

地球系统碳元素的基本特征包括:

(1) 碳不仅是地球系统组成的基本元素之一,而且在宇宙的其他星体中也普遍存在;

(2) 地球系统的碳元素存在的两种基本形式是无机态碳(即与生物无关的)和有机态碳(与生物有关的),并且前者占相对多数。

(3) 无论是有机碳还是无机碳,都在地球化学元素循环中起到了十分重要的作用。许多地球系统过程都是在碳元素的参与下完成的。

在无生命和有生命的不同的地质时期,地球大气成分的演变及各成分的百分比如图 1-1 所示。

1. 全球碳库

陈泮勤(2004)对地球系统中的碳库作了如表 1.1 所示的综合。

表 1.1 地球系统中的碳库

	IPCC (1990)	Schlesinger (1991)	Balino et al (2001)	Lal (1999)	Watson and Noble (2001)
大气圈	750	755	750	760	750
陆地生物圈	550	550	610	620	500

(续表)

	IPCC (1990)	Schlesinger (1991)	Balino et al (2001)	Lal (1999)	Watson and Noble (2001)
土壤	1200	1200	1500	2500	2000
海洋	39000	35500	38933	38000	38400
合计	41800	38005	41793	41880	41650

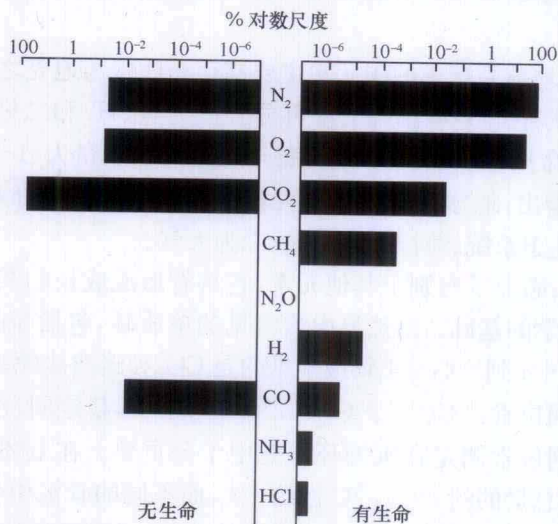


图 1.1 有生命与无生命影响的不同的地质时期,地球大气成分的演变及各成分的百分比

在不考虑岩石圈的情况下,地球系统中碳的总量约为 38 005~41 880 Pg(1 Pg=10¹⁵ g)。

地球系统中碳的赋存方式千变万化。在大气中主要为含碳气体和气溶胶粒子;在海洋和淡水中主要为碳酸盐离子,如溶解无机碳(DIC)、溶解有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)及生物有机碳(BOC);在岩石圈中主要为碳酸盐岩石和油母岩;在陆地生物圈中主要以有机碳和无机碳的形式存在。地球系统中的碳主要以上述方式存在于地球系统的各个子系统中。

表 1.2 所示为 Falkowski 对地球各圈层的碳含量进行细分的结果。表 1.3 所示为地球不同圈层各种气体的数量。

表 1.2 地球各主要碳库(Falkowski,2000)

碳 库		大小/Gt	碳 库		大小/Gt
大气圈		720	陆地	总量	约 2 000
海洋	总量	38 400		生物圈 (总)	活生物量
	总的无机碳	37 400	死生物量		1 200
	表层无机碳	670	水生生物圈		1~2
	深层无机碳	36 730	化石 燃料	总量	4130
	总的有机碳	1 000		煤	3510
岩石圈	总量	—		石油	230
	沉积碳酸盐	>60 000 000		天然气	140
	油母原质	15 000 000	其他(泥炭)	250	

表 1.3 地球不同圈层各种气体的数量(万亿吨)(Соколов, 1971)

圈层	气体的总量	CO ₂	CH ₄	N ₂	O ₂	H ₂	H ₂ S SO ₂	HCL HF	He	Ar
大气圈	5270	2.4		4000	1200				0.0036	70
水圈(各大洋、大海)	100	60.0		32.0	8				} 28	} 600
沉积岩	214	60.0	97	56		0.2	0.8			
岩浆岩										
上带	1000	838	~2	110		30	20			
下带	1800	1300	~2	180		36	80	200		
上地幔	435000	210000		13000		8800	120,000	83,000		

注:表中的空格线气体的总量比 10¹²t 少 1 个或几个数量级,甲烷的含量中还包括气态重烃。

2. 大气碳库

大气中含碳气体主要有 CO₂、CH₄ 和 CO,通过测定这些气体在大气中的含量即可推算出大气碳库的大小。因此,相对于海洋和陆地生态系统来说,大气中的碳量是最容易计算的,而且也是最准确的。由于在这些气体中 CO₂ 含量最大,最为重要,因此大气中的 CO₂ 浓度往往可以看做大气中碳含量的一个重要指标。对冰芯记录的分析表明,在距今 420 000 年至工业革命前这一时间段内,大气中的 CO₂ 浓度大致在 180~280 ppm 间波动。但从工业革命初期到目前的短短 250 多年内却增长了近 30%,近 10 年内平均每年增长 1~3 ppm。

大气中约有 750~760 Pg C,约占大气质量的万分之三。不同学者有不同的估计,但差别不明显,通常小于 2%,是所有子系统中估计最为准确的。

表 1.4 给出了大气的主要化学组成。显然,大气中的碳主要以气态形式存在,主要有 CO₂、CO、CH₄ 以及人类排放的其他含碳气体。

表 1.4 大气的化学组成(陈泮勤,2004)

大气成分	体积混合比	寿命/a	来源与说明
N ₂	78.088%	10 ⁶	生物
O ₂	20.949%	5000	生物
Ar	0.93%	10 ⁷	惰性气体
Ne	18.18 ppm	10 ⁷	惰性气体
He	5.24 ppm	10 ⁷	惰性气体
Kr	1.1 ppm	10 ⁷	惰性气体
Xe	0.1 ppm	10 ⁷	惰性气体
H ₂	0.55 ppm	6~8	生物、人为
CO ₂	360 ppm	50~200	燃烧、海洋、生物
CH ₄	1.7 ppm	10	生物、人为
N ₂ O	0.31 ppm	150	生物、人为
CO	50~200 ppb	0.2~0.5	光化学、人为
Halocarbons	3.8 ppb		人为

(续表)

大气成分	体积混合比	寿命/a	来源与说明
SO ₂	10~1 ppb	2 天	光化学、火山、人为
O ₃ (对流层)	10~500 ppb	2	光化学
OH	0.1~10 ppt		光化学
CH ₂ O	0.1~1 ppb		光化学

注:1 ppm=10⁻⁶,1 ppb=10⁻⁹,1 ppt=10⁻¹²。

陈洋勤(2004)指出,应该说大气中由于自然原因赋存的碳是比较稳定的。近百年来大气碳库有所增加主要是由于人类活动造成的。

3. 海洋碳库

海洋具有储存和吸收大气中 CO₂ 的能力,其中无机碳(DIC)含量约为 37 400 Gt(见表 1.3),是大气中含碳量的 50 多倍,在全球碳循环中的作用十分重要。从千年尺度上看,海洋决定着大气中的 CO₂ 浓度。大气中的 CO₂ 不断与海洋表层进行着交换,这一交换量在各个方向上可以达到 90 Pg/a,从而使得大气与海洋表层间迅速达到平衡。由于人类活动导致的碳排放有 30%~50% 将被海洋吸收,但海洋缓冲大气中 CO₂ 浓度变化的能力不是无限的,这种能力的大小取决于岩石侵蚀所能形成的阳离子数量。由于人类活动导致的碳排放的速率比阳离子的形成速率大了几个数量级,因此,在千年尺度上,随着大气中 CO₂ 浓度的不断上升,海洋吸收 CO₂ 的能力将不可避免地逐渐降低。一般来讲,海洋碳的周转时间往往要几百年甚至上千年,可以说海洋碳库基本上不依赖于人类的活动,而且由于量测手段等原因,相对陆地碳库来说,对海洋碳库的估算还是比较准确的。

海洋中溶解无机碳是大气的 50 倍,是地球系统中除岩石圈外最大的碳库,为 38 400~39 973 Pg。海洋中的碳有三种赋存形式:溶解无机碳(DIC),如 CO₂ 和带 CO₃²⁻、HCO₃⁻ 的碳酸盐;溶解有机碳(DOC),如溶解有机碳分子;生物有机碳(BOC),如海洋生物活体和残体。海洋碳库中绝大部分是 DIC,为 34 000~38 000 Pg;DOC 约为 1 000 Pg;只有少量的 BOC,约为 3 Pg。

海洋碳库大体分为表层、中层和深层海洋。表层海洋的储碳能力取决于海水表层的温度,温度越低,储碳能力越强(陈洋勤,2004)。

4. 陆地生态系统碳库

据估算,陆地生态系统蓄积的碳量为 2 000 Gt 左右(见表 1.2)。其中,土壤有机碳库蓄积的碳量约是植被碳库的 2 倍左右(从热带森林的 1B1 到北部森林的 5B1),表 1.1 列出了不同研究者对植被碳库和土壤有机碳库的估算值,从中可以看出,无论是对植被碳库还是土壤碳库,各估算值之间都有很大的差异,这主要是由于不同估算方法之间的差异(假设条件、各类参数取值、测定的土壤深度、调查的土壤类型、植被类型全面性)以及估算中的各种不确定性造成的。从全球不同植被类型的碳蓄积情况来看,陆地生态系统碳蓄积主要发生在森林地区,森林生态系统在地圈、生物圈的生物地球化学过程中起着重要的缓冲作用,约 80% 的地上碳蓄积和约 40% 的地下碳蓄积发生在森林生态系统,余下的部分主要储存在耕地、湿地、冻原、草原及沙漠半沙漠中;从不同气候带来看,碳蓄积主要发生在热带地区,全球 50% 以上的植被碳和近 1/4 的土壤有机碳储存在于热带森林和热带草原生态系统,另外约 15% 的植被碳和近 18%