

中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程主干计划 资助项目
国家“九五”科技攻关计划

土地利用变化和 温室气体净排放与 陆地生态系统碳循环

李克让 主编

气象出版社

65.2665
269

中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程主干计划
国家“九五”科技攻关计划

资助项目

土地利用变化和温室气体净排放与 陆地生态系统碳循环

李克让 主编

气象出版社

00702

内容简介

本书对陆地生态系统碳循环及中国土地利用变化对主要温室气体净排放的影响研究进展和研究结果作了较系统的概括介绍。全书包括两大内容:第一部分重点介绍陆地生态系统碳循环及其对全球气候变化和土地利用变化的响应研究进展、碳循环重要模式介绍及应用、主要温室气体通量测定方法、结果和土壤 N_2O 通量模式研究等;第二部分为我国土地利用变化及其对主要温室气体净排放的影响研究成果,其中包括中国土地利用/土地覆被变化的时空分异特征、中国土壤碳储量和中国森林生态系统碳库的区域特征、中国林业活动及相关土地利用变化导致的碳收支、中国主要农作物类型和草地类型变化对温室气体净排放的影响及减源增汇的林业、农业、草地业管理对策。

本书可供从事全球变化、全球气候变化、生态、环境、农业、林业、草地业等研究人员、专业技术人员、教学人员和相关专业的研究生、大中专学生以及从事相关计划、外交和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环/李克让主编. -北京:气象出版社,2002.4

ISBN 7-5029-3356-5

I. 土… II. 李… III. ①土地利用-影响-温室-气体-大气扩散-研究-中国 ②陆地-生态系统-影响-温室-气体-大气扩散-研究-中国 IV.X 171.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 024193 号

土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环

李克让 主编

责任编辑:李太宇 终审:周诗健

封面设计:张建永 责任校对:朱梅

* * *

气象出版社 出版

(北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮编:100081)

北京市兴怀印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

* * *

开本:787×1092 1/16 印张:20.125 字数:515 千字

2002 年 5 月第一版 2002 年 5 月第一次印刷

印数:1~1000 定价:40.00 元

ISBN 7-5029-3356-5/X·0069

编辑委员会

主编:李克让

编委:(以汉语拼音为序)

曹明奎	陈冠雄	董云社	葛全胜
季劲钧	李晓兵	李银鹏	李玉娥
林而达	吕建华	邵雪梅	汪业勛
王绍强	徐 慧	袁嘉祖	赵士洞
朱志辉			

00702



序

温室效应可能使全球气候变暖,似乎认识逐渐趋同,但化石燃烧造成的 CO_2 排放究竟对陆地生态系统的碳循环影响有多大?是否不可逆转?危及人类安全?至今还有一部分科学家持不同意见,从而在京都议定书的谈判桌上,一时尚难达成共识。

于是,土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统碳循环的研究,成为地球系统科学领域的热点,将要得到国家自然科学基金委员会的关注和资助,中国科学院列为创新工程项目。作为地理科学与资源研究所的一期主干研究计划,在陆地生态系统中,将碳循环与生态作用结合起来,在卫星遥感多时相动态数据库的支持下,在生态网络台站长期观测的数据积累的基础上,集中精兵强将,组织创新基地,即将在“十五”期间,全面启动。

继往开来,推陈出新。早在 20 世纪 90 年代,对有关陆地生态系统中的碳循环的若干领域,已经开展了一些前期性的预研究工作。例如:对大气-植被耦合模式的应用与检验;植物生理、生态过程中碳循环的模拟;森林生态系统中的碳库,土壤碳储量的区域特征,土地利用变化对碳循环的影响,等等,都取得了可喜的进展。在这部专著中,回眸 20 世纪,承前启后,总结过去,展望未来,提高起点,突击顶峰,对于 21 世纪的原创性研究,无疑是具有战略意义的历史性贡献。

这部专著的研究群体,仍然是这个领域的主力,又是新一代青年突击队的人梯,将为陆地生态系统的碳循环研究,继续做出新的贡献。深化改革,扩大开放,任重而道远!例如:引进国际上的通用模型,需要大量区域参数校正,才能实现本土化;定位台站网的长期观测,设备要更新,数据要规范,才能与国际接轨;预测模型的修订或设计,需要有一段时间进行同步观测数据的校正与检验;全球性和大陆尺度的碳汇,需要充分利用卫星遥感监测的丰富信息资源。这些都是“十五”期间必需进一步解决的科学技术问题。在国家自然科学基金委的指导和支持下,院所领导正在物色引进英才,增添仪器设备,为创新基地创造条件。衷心祝愿这个研究群体,开拓视野,锲而不舍,团结协作,综合集成,求真务实,高起点,严要求,一定能在更高的层次上,继续对陆地生态系统中的碳循环的机理研究,做出原创性的、战略性的贡献;在全球性温室效应的领域内,自成一家之言,自立于世界民族之林。能在国际学术交流、国际环境公约承诺中,争取主动。为国家生态建设与环境保护,提供更加充分的科学依据。

陈述彭

(中国科学院院士、

中国科学院地理科学与资源所研究员)

2001 年 12 月 1 日

前 言

气候变化,特别是全球变暖是当今人类面临的严峻挑战,是国际社会公认的全球性环境问题。主要原因是人类活动正以空前的速度向大气排放 CO_2 等温室气体,通过增强的温室效应可使全球气候增暖,并将破坏地球气候的脆弱平衡,其后果已证明是灾难性的。人们担心,由人类活动造成的这种地球系统的扰动,将使气候发生不可逆转的变化和极端事件,从而危及人类自身的生存与安全。

陆地生态系统是一个巨大碳库,一方面通过光合作用吸收 CO_2 ,同时又通过不同时间尺度的各种呼吸或扰动将 CO_2 返回大气,从而形成大气—植被—土壤—大气的陆地生态系统碳循环。近年来发现,早年指出的“失踪的碳汇”可能被陆地生态系统吸收。有许多因素,如 CO_2 施肥效应、大气氮沉降、气候变暖、林木再生等都可造成陆地生态系统碳的吸收。生态系统的生物地球化学过程可导致 CO_2 的源或者汇,并引起 CO_2 通量的年际变化。

陆地生态系统是最复杂的碳库,受人类活动的影响很大。人类一方面通过化石燃料燃烧等直接向大气排放温室气体,另一方面通过土地利用变化影响 CO_2 源汇分布与大小。大量研究表明,土地利用变化和土地管理可直接或间接影响陆地生态系统与大气之间的温室气体交换和碳循环过程。

本书主要包括两大部分内容。第一部分为我国较早开展陆地生态系统碳循环研究的单位和科学家及其博士生或博士后论文核心内容的介绍。其中有:中国科学院大气物理研究所季劲钧研究员(现为中国科学院地理科学与资源研究所的客座研究员)、吕建华博士、李银鹏博士较系统介绍了由他们创建和发展的大气—植被耦合模式(AVIM)及应用,陆地碳循环研究中植物生理生态过程的模拟;中国科学院地理科学与资源研究所赵士洞研究员和汪业勳博士关于中国森林生态系统碳库及其区域特征的研究;中国科学院地理科学与资源研究所李克让研究员和王绍强博士关于中国土壤碳储量区域特征和土地利用变化的影响研究;美国马里兰大学地理系曹明奎博士(现为地理科学与资源研究所的客座研究员)较早开展碳氮循环的模式研究,他与李克让等分别综合介绍了陆地生态系统和气候变化相互作用的模式研究进展以及温室气体、气候变化及其影响和陆地生态系统碳循环研究的最新结果。

第二部分系由李克让和陈冠雄(中国科学院沈阳应用生态研究所)研究员共同主持完成的“九五”科技攻关专题:“土地利用的改变与主要温室气体净排放和对策研究”的部分成果。其中有中国科学院地理科学与资源研究所董云社研究员撰写的温室气体通量测定方法和结果;李克让和朱志辉研究员等完成的中国林业活动及相关土地利用变化的碳收支计算和减源增汇的林业对策;中国科学院沈阳应用生态研究所徐慧博士和陈冠雄研究员等撰写的中国主要农作物类型变化对主要温室气体净排放的计算和对策研究;中国农业科学院农业气象研究所的李玉娥和林而达研究员完成的中国主要草地类型变化对温室气体净排放的影响和对策研究;北京师范大学的李晓兵博士和李克让研究员撰写的中国土地利用及工地覆被变化的时空分异特征。

陆地生态系统碳循环及土地利用变化对温室气体净排放的影响研究已成为当今地球科学领域的热点问题,受到了我国科学家的广泛关注。目前,在地理科学与资源研究所的知识创新

工程中已经启动了研究所一期主干研究计划：“土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统碳过程”。中国科学院和国家自然科学基金委等将在更高层次上启动碳循环研究的重大项目。本书的出版只是抛砖引玉，相信我国科学工作者在不久的将来在此领域必将取得更多更大的原创性和战略性的创新成果。

在本书完成撰写与出版过程中，得到了陈述彭院士、陶诗言院士、李文华院士、章申院士和郑度院士的学术指导；得到了中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远、李秀斌、成升魁、欧阳华所长的大力支持与帮助，获得了该研究所知识创新工程主干科学计划：土地利用/土地覆被变化与陆地碳过程项目的资助；得到了地理科学与资源研究所陆地表层系统开放实验室葛全胜、吴绍洪主任的大力支持与帮助，开放实验室提供了出版经费。此外，中国科技部的吕学都处长、国家环境保护总局的禹军主任和中国科学院资源环境科学与技术局的陈泮勤局长、郭亚曦和徐飞亚处长等有关领导及中国科学院大气物理研究所的王庚臣研究员等对于“九五”科技攻关项目的成功组织和实施付出了辛勤劳动。借此出版之机，谨对所有曾给予我们支持与帮助的同志表示衷心感谢。但要指出的是，本书研究取得的一些结果和涉及的观点仅代表作者个人的意见，且仍有许多不确定性、错误和不妥之处，欢迎读者和使用者批评指正。

本书由李克让任主编，负责全书的设计、组织和审定。朱志辉研究员和陶波博士参加了部分编辑工作，各章的主要作者和单位如下：

- 1 李克让、陶波、王绍强、邵雪梅(中国科学院地理科学与资源研究所)；
- 2 董云社、齐玉春(中国科学院地理科学与资源研究所)；
- 3 曹明奎(美国马里兰大学地理系)、李克让；
- 4 王绍强(中国科学院地理科学与资源研究所)；
- 5 李银鹏、季劲钧(中国科学院大气物理研究所)；
- 6 徐慧、陈冠雄(中国科学院沈阳应用生态研究所)；
- 7 吕建华、季劲钧(中国科学院大气物理研究所)；
- 8 李晓兵(北京师范大学资源环境研究所)、李克让；
- 9 王绍强、李克让、朱志辉(中国科学院地理科学与资源研究所)；
- 10 汪业勳(国家环境保护总局)、赵士洞、牛栋、李绪勇(中国科学院地理科学与资源研究所)；
- 11 李克让、朱志辉(中国科学院地理科学与资源研究所)；
- 12 李克让、朱志辉、葛全胜(中国科学院地理科学与资源研究所)、袁嘉祖(北京林业大学)；
- 13 徐慧、张颖、张秀君、陈冠雄(中国科学院沈阳应用生态研究所)；
- 14 徐慧、陈冠雄、张颖、黄国宏(中国科学院沈阳应用生态研究所)；
- 15 徐慧、陈冠雄、张秀君(中国科学院沈阳应用生态研究所)；
- 16 李玉娥、林而达(中国农业科学院农业气象研究所)。

编著者

2002年4月

目 录

序

前言

1 温室气体、增强温室效应与陆地生态系统碳循环	(1)
1.1 温室气体、增强温室效应、气候变化及其影响	(1)
1.2 地球碳库及碳循环	(8)
1.3 陆地生态系统碳循环	(14)
1.4 去向不明的碳汇及全球碳收支的变化	(20)
1.5 土地利用变化及土地利用管理对温室气体和碳贮量的影响	(22)
1.6 陆地生态系统碳循环研究的未来展望	(26)
2 陆地生态系统温室气体通量测定方法和结果	(32)
2.1 温室气体通量测定方法	(32)
2.2 陆地生态系统主要温室气体通量测定结果	(36)
3 陆地生态系统和全球气候变化相互作用的模型研究	(56)
3.1 生态系统与气候相互作用的机制	(56)
3.2 生态系统与气候相互作用的模型	(58)
3.3 生态系统变化对气候的反馈	(61)
3.4 结论与展望	(66)
4 陆地生态系统碳循环模型研究	(73)
4.1 陆地生态系统碳循环	(73)
4.2 中国陆地生态系统碳循环模式研究进展	(79)
4.3 中国陆地生态系统碳循环模式研究结果	(80)
5 陆地生态系统碳循环研究中植物生理生态过程的模拟	(85)
5.1 光合作用模式	(85)
5.2 植物碳分配模式	(88)
5.3 植物物候模式	(92)
5.4 结论与展望	(94)
6 陆地生态系统土壤 N_2O 和 NO 通量的模型研究	(99)
6.1 经验模型	(99)
6.2 过程模型	(102)

7	大气-植被相互作用模式 AVIM 及其在碳循环研究中的应用	(117)
7.1	AVIM 模式简介	(117)
7.2	青藏高原大气-植被相互作用模拟实验	(123)
7.3	结论与讨论	(128)
8	中国土地利用及土地覆被变化的时空分异特征	(131)
8.1	遥感数据在土地利用/土地覆被变化研究中的应用	(131)
8.2	中国土地覆被变化的空间分异	(133)
8.3	中国土地覆被变化的时间分异	(137)
8.4	中国土地利用类型变化的时空分异	(141)
9	中国土壤碳储量的区域特征及土地利用变化的影响	(151)
9.1	IPCC/OECD 关于土壤碳净排放的计算	(151)
9.2	中国土壤碳储量的计算	(155)
9.3	中国陆地土壤碳储量的空间分布特征	(160)
9.4	土地利用变化对中国土壤碳库储量变化的可能影响	(173)
9.5	结论及问题和不确定性讨论	(182)
10	中国森林生态系统碳库及其区域特征	(187)
10.1	中国森林生态系统植被碳库的估算方法	(187)
10.2	中国森林植被碳存贮量的区域特征	(196)
10.3	中国森林生态系统土壤有机碳库及其区域特征	(198)
10.4	中国森林生态系统碳库的分配特征	(203)
11	中国林业活动及相关土地利用变化导致的碳收支	(209)
11.1	背景和方法	(209)
11.2	IPCC/OECD 的推荐方法	(211)
11.3	资料来源与参数	(218)
11.4	中国森林资源消耗结构及地类变化	(220)
11.5	中国林业及土地利用变化的碳收支和非 CO ₂ 微量气体排放	(226)
12	减小碳源增大碳汇及适应全球气候变化的林业对策	(234)
12.1	森林在全球碳循环中的作用	(234)
12.2	改善土地利用变化与管理措施的吸碳潜力	(239)
12.3	保护式管理	(242)
12.4	贮存式管理	(247)
12.5	替代式管理	(251)
12.6	适应未来全球气候变暖的经营管理	(255)

13	中国主要农作物类型变化引起的 CO₂ 净排放	(260)
13.1	中国主要农作物 CO ₂ 年吸收量和排放量变化	(260)
13.2	耕地面积变化引起的农田生态系统 CO ₂ 净排放	(263)
13.3	利用 DNDC 模型估算中国农田土壤 CO ₂ 净排放	(267)
14	中国水稻种植面积变化对 CH₄ 排放的影响	(273)
14.1	IPCC/OECD 稻田甲烷排放清单编制方法	(273)
14.2	中国水稻种植面积变化对 CH ₄ 排放的影响	(279)
15	中国主要农作物类型现状与变化及减源增汇对策	(286)
15.1	中国主要农作物类型的现状和变化	(286)
15.2	减源增汇及适应全球气候变化的农业对策	(289)
16	中国主要草地类型变化对温室气体净排放的影响及对策	(293)
16.1	中国主要草地概况	(293)
16.2	温室气体排放通量测定	(294)
16.3	草地利用变化及管理措施对 CO ₂ 排放的影响	(295)
16.4	草地土壤及管理措施对甲烷吸收的影响	(298)
16.5	草地利用变化对 N ₂ O 排放的影响	(303)
16.6	减源增汇的草地管理对策	(305)

1 温室气体、增强温室效应与陆地生态系统碳循环

1.1 温室气体、增强温室效应、气候变化及其影响

1.1.1 自然温室效应和增强温室效应

众所周知,地球的气候是由来自太阳持续的能量流控制和推动的。这种能量,即太阳辐射,主要是以可见光的形式到达地球。其中,大约 30% 的能量立刻散射回太空,约 70% 向下穿过大气被地表吸收,使地球表面增暖。为了平衡上述入射辐射,地球本身必须以红外辐射的形式将能量返回太空。红外辐射,不像可见光一样能直接穿过大气,相反,大气中以相当小量存在的水汽、CO₂ 和其它一些微量气体拦截了大部分直接由地面射向空间的红外辐射,从而增暖低层大气。上述温室气体,主要包括水汽、二氧化碳(CO₂)、大气臭氧(O₃)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)以及含氯氟烃气体(CFCs)等,除了 CFCs 以外的所有这些气体都是自然产生的,合计不到大气的 1%,因此又称微量气体或温室气体(Greenhouse Gases)(GHGs)。就是这些 GHGs 产生了“自然温室效应”(Natural Greenhouse Effect),使地球表面平均温度达 15℃,比任何其它无生命的星球约暖 30℃,因而才使地球有生命存在,足见微量的温室气体对地球人类的极端重要性。将它称之为“自然”是由于所有的温室气体(CFCs 除外)远在人类出现之前就已经存在了(Houghton,1998)。

大量的观测和研究表明,除了水汽以外的所有重要的 GHGs 的浓度,自从工业革命以来,由于人类活动的影响,正在以前所未有的速度增加,其中包括由燃烧煤、石油、天然气、砍伐森林、土地利用变化等导致的 CO₂ 的排放或吸收;来自农业、工业和土地利用变化造成的 CH₄ 和 N₂O 的排放;由工业和汽车排气等形成的 O₃ 和 CFCs 的排放等。大气中 GHGs 浓度的大量增加,将影响地气系统的辐射收支和能量收支,为此,气候系统必须同时进行调整,以保持全球能量收支的平衡,从而导致全球变暖和气候变化。为区别自然的温室效应,这种源自人类活动导致的温室气体增加的温室效应,称之为“增强的温室效应”(Enhanced Greenhouse Effect)。

气候系统的调整包括地球表面和低层大气的全球变暖。但这只是问题的一个方面,对气候来说,变暖只是释放额外能量最简单的一种方式,即使很小的温度上升,都将伴随着很多其它方面,比如气流、云量、降水等的变化,其中,有一些变化可使低层增暖进一步加强(正反馈),有一些变化也可能相反(负反馈)。由工业生产造成的硫酸盐气溶胶可能在局地产生降温效应。总之,由人类活动导致的增强的温室效应,特别是全球增暖、气候变化及其对生态、社会经济的综合影响被公认为是当今全球最大的环境问题,已引起了世界各国政府、科学家和公众的广泛关注。

1.1.2 主要温室气体

如上所述,温室气体就是大气中那些吸收地表红外辐射的气体。温室气体中最重要的是水

汽,但水汽是由自然决定的,不再受人类活动的影响。直接受人类活动影响的主要温室气体是二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、含氯氟烃气体(CFCs)和臭氧(O₃)等。相比较而言,大气中 CO₂ 浓度的增加对增强温室效应的贡献最大,大约占 70%,无疑是最重要的温室气体,其次是 CH₄,贡献约占 23%,N₂O 约占 7%(Houghton,1998)。表 1.1 是综合给出的全球受人类活动影响的主要温室气体的浓度变化、年增长率、大气中的寿命等的统计。

表 1.1 受人类活动影响的主要温室气体

温室气体	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-12	CFC-11	HCFC-22	CF ₄ 全氟碳
大气中的浓度单位	ppmv *	ppbv **	ppbv	pptv ***	pptv	pptv	pptv
工业革命前浓度	280	700	275	0	0	0	0
1992 年 浓 度	355	1714	311	503		105	70
1994 年 浓 度	358	1720	312		268	110	72
1998 年 浓 度	365	1745	314	533			
浓度年增加量	1.5	4	0.8	18~20	1.4	7~8	1.2
年增加百分比	0.4	0.4	0.25	4	4	7	2
大气中寿命(年)	50~200	12~17	120	102	65	13.3	50000
温室效应(相当分子数)	1	21	206	15800	12400		

注:表中数据分别取自 IPCC,1994; IPCC,1995; 不破敬一郎,1995;IPCC 2001。

1.1.2.1 CO₂

根据最新的研究结果表明(IPCC,2000),自从工业革命前以来的近 200 年内(1750~1998 年),大约有 $406 \pm 60 \text{ GtC}$ ($1 \text{ Gt} = 10^9 \text{ t} = 10 \text{ 亿 t} = 1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$),以 CO₂ 的形式被排放进入大气,其中,以化石燃料燃烧和水泥生产导致的 CO₂ 排放约为 $270 \pm 30 \text{ GtC}$,占总排放量的 67%,主要来自林区的土地利用和土地利用变化产生的 CO₂ 排放约 $136 \pm 55 \text{ GtC}$,占总排放的 33%。在此期间,大约占整个人为总排放量 43%的 CO₂ 滞留在大气中,其余则被海洋和陆地生态系统吸收。其结果是,大气中 CO₂ 浓度从最初的 $280 \pm 5 \text{ ppmv}$ 上升至现今(1998 年)的 365 ppmv ,即 200 年内上升了 85 ppmv ,约 30%。现在的浓度年增加量约 1.5 ppmv a^{-1} ,年增加率大约为 0.4%。由此造成的辐射强迫约为 1.46 W m^{-2} 。大气中以 CO₂ 的形式存在的碳元素量约为 750 GtC ,由陆地生态系统和海洋表层水吸收、释放的速度约为 190 GtCa^{-1} ,所以,大约 4 年左右交替一次。但是,被排放到大气中的 CO₂ 要取得与海洋,特别是深层海洋的平衡,则需要 50 年到 200 年,此即为表 1.1 中所示的 CO₂ 在大气中的寿命(不破敬一郎,1995)。

特别值得指出的是,工业革命以来的 200 年期间,由人类活动导致的目前 CO₂ 的浓度数值是空前的。通过格陵兰和南极洲冰芯内气泡的分析(Barnola et al., 1995; Indermuhle et al., 1999),可以了解最大的末次冰期以来大气 CO₂ 浓度的变化。末次冰期结束时,大气 CO₂

* $1 \text{ ppmv} = 10^{-6}$; ** $1 \text{ ppbv} = 10^{-9}$; *** $1 \text{ pptv} = 10^{-12}$ 。

浓度为 200 ppmv, 8000 年前逐渐升高至 250 ppmv, 在此后的 7000 年中又上升了 25 ppmv。在过去的 1000 年, 直至工业革命开始, 大气 CO_2 浓度变化在 275 ppmv 和 285 ppmv 之间, 其变化幅度仅 10 ppmv。其间, 大气 CO_2 浓度似乎在公元 1300 年上升了 10 ppmv, 而在小冰期, 大约 1600 年左右下降了 10 ppmv。所有上述在长时间尺度的变化都是逐渐的, 但近 200 年来的增长高达 85 ppmv, 其增长速率至少在过去 2 万年来是空前的, 此外, 据研究 (IPCC, 2001), 目前 CO_2 的浓度是过去 42 万年来未曾达到过, 在过去 2000 万年来也可能是空前的。

1.1.2.2 其它温室气体

CH_4 是另一种自然产生的温室气体, 由于人类活动 (包括稻田、畜牧业、天然气管道和油井泄露、生物质燃烧、矿物燃料燃烧等) 的影响, 正在高速增长。 CH_4 的浓度已由工业革命前的 700 ppbv 增长至现在 (1998 年) 的 1745 ppbv, 约增长了 1.5 倍, 目前的 CH_4 浓度在过去的 42 万年中是最大的 (IPCC, 2001)。由此造成的直接辐射强迫为 $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (IPCC, 1994)。虽然 CH_4 在大气中的浓度远小于 CO_2 (与 350 ppmv 左右的 CO_2 相比, 不到 2 ppmv), 但其温室效应却很大, 据计算, 一个 CH_4 分子的增强温室效应大约是一个 CO_2 分子的 21 倍。

CH_4 的主要清除过程是与氢氧根 (OH) 的反应和土壤的吸收, CH_4 在大气中的平均寿命取决于这一消失过程的速率, 大约是 12~17 年, 比 CO_2 的寿命短得多 (IPCC, 1994)。20 世纪 80 年代, 全球 CH_4 产生和破坏之间的不平衡导致的大气 CH_4 浓度平均增长 $13 \text{ ppbv} \cdot \text{a}^{-1}$ (0.8%), 然而, 1990 年的增长速率降至 $8 \text{ ppbv} \cdot \text{a}^{-1}$, 1996 年又进一步降至 $4 \text{ ppbv} \cdot \text{a}^{-1}$, 年增加率为 0.4% (Dlugokencky et al., 1998)。

N_2O 的浓度在工业革命前是 275 ppbv, 此后开始上升, 现在为 314 ppbv, 约增长了 39 ppbv (14%), 目前的 N_2O 浓度至少在过去的 1000 年中是最大的。现在浓度年增长量为 $0.8 \text{ ppbv} \cdot \text{a}^{-1}$, 年增长率约 0.3%。由此造成的辐射强迫为 0.15 Wm^{-2} 。 N_2O 的人为源主要来自农牧业、生物质燃烧和一系列工业过程, 它具有较长的大气寿命, 约 120 年。 N_2O 在大气中的浓度很低, 约为 0.3 ppmv, 但其温室效应非常大, 每克分子 N_2O 的增强温室效应大约是 CO_2 分子的 206 倍 (见表 1.1)。

除了上述温室气体以外, 尚有含氯、氟、溴的卤素碳, 也是一些重要的温室气体, 自工业革命以来, 因卤素碳的增加而形成的直接辐射强迫大约为 0.3 Wm^{-2} (最主要的气体是 CFC-11、CFC-12 和 CFC-113)。除了这一直接影响外, 由卤素碳造成的平流层低层臭氧的损耗是一种负的间接辐射强迫 (IPCC, 1994)。

1.1.3 全球气候变化及其影响

综上所述, 人类活动正在以空前的速度导致向大气排放温室气体, 大气中温室气体的增加通过增强的温室效应, 有可能引起全球气候变化, 而气候变化又会对自然和人类社会经济系统产生影响。近年来, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在前两次评估报告的基础上汇集了最近 5 年来气候变化科学及其影响的新成果, 完成了第三次评估报告 (IPCC, 2001; IPCC, 2001), 总结给出了如下的新进展。

1.1.3.1 气候变化科学新进展 (IPCC, 2001)

1) 由人类活动导致的温室气体和气溶胶持续改变大气状况并影响着气候

大气中温室气体浓度已如上述明显上升, 1998 年 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的浓度分别比 1750 年

增长了30%、149%和14%(见表1.1)。目前 CO_2 和 CH_4 的浓度是过去42万年中最大, N_2O 的浓度至少在过去的1000年中是最大的。这种趋势主要是由于人类活动引起,其中包括燃烧化石燃料、工业生产、土地利用变化和农业的作用。从1750年至2000年,由于温室气体浓度的增加引起的辐射强迫估计为 $2.43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中来自 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的辐射强迫分别为 $1.46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $0.48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由化石燃料和生物质燃烧等产生的气溶胶趋向于产生负的辐射强迫,即降温效应。

2)大量的观测结果指出,地球正在变暖并伴随着气候系统和极端气候事件的其它变化

自1861年以来,全球陆地和海洋表面的平均气温呈上升趋势,20世纪或近百年大约升高了 $0.4 \sim 0.8^\circ\text{C}$,平均 0.6°C 。就全球而言,20世纪90年代是自1861年以来最暖的10年,1998年则是自1861年以来最暖的一年。结合大量代用资料研究指出,20世纪的增暖可能是近1000年中增暖最大的100年,20世纪90年代和1998年则可能是近1000年中最暖的10年和最暖的一年。对中国观测资料的研究也指出,近百年中国的气温大约上升了 0.5°C ,1998年也是中国近百年以来最暖的一年(龚道溢等,2000)。

卫星数据显示,雪盖面积在减少,非极区高山冰川普遍退缩,北半球春夏海冰面积也在减少。北半球降水量出现系统变化,其中,除了副热带陆区每10年减少0.3%左右外,大部分陆地区域降水量有增加的趋势,北半球中高纬陆区的降水在20世纪每10年增加了0.5%~1%,热带陆区每10年增加了0.2%~0.3%。在区域尺度上发现一些气候异常的事件,如极端最高气温的出现频率增加,标志寒冷事件的霜冻和冰冻日数减少。自20世纪70年代以来,厄尔尼诺—南方涛动事件更频繁、持久,且强度更大。在降水量增加的地区,大雨和极端降水事件增多,降水量减少的地区,干旱威胁增加。

3)新的证据表明,观测到的过去50年来大部分变暖事实主要由人类活动引起

研究指出,单纯考虑自然强迫(如太阳辐射和火山爆发)的气候模拟无法解释20世纪后半叶的变暖问题。有明显的证据可检测出过去35~50年气候变化的人为影响。大多数的研究结果发现,过去的50年中由温室气体增加导致的增暖速率和幅度的模拟结果与观测事实可比,甚至稍高。如进一步考虑温室气体和硫酸盐气溶胶的大部分模式的模拟结果与这一时期的观测结果一致。当同时考虑人为强迫因素和自然强迫因素时,对过去140年的模拟结果与观测结果非常一致。

4)未来的气候变化情景

气候变化的情景(scenario)是指未来可能出现的气候特征与当前气候之间的差值。由于影响因素的复杂,目前多数研究仅仅把由人类活动引起的大气中温室气体和气溶胶浓度的未来变化作为输入,利用气候模式计算出未来气候变化。IPCC第三次评估报告使用若干气候模式对温室气体排放情景的特别报告(SRES)中给出的35个情景进行了模拟,结果表明,2100年全球平均气温将比1990年上升约 $1.4 \sim 5.8^\circ\text{C}$,即每10年将升温 $0.14 \sim 0.58^\circ\text{C}$ 。这一升温估计值比第二次评估报告的估计值高。这一新的升温率,大大高于20世纪中实际观测到的升温率。增温幅度将因地区和季节而异,如所有陆区都比全球平均增暖快,特别是北半球高纬度的冬季的增暖更快。如北美的阿拉斯加、加拿大、亚洲北部、青藏高原等模拟的增温值高出全球平均约40%。

全球气候增暖后,预计21世纪降水趋于增多,但也有季节变化和区域差异,总的来说,除

个别地区和个别季节,如夏季地中海地区和澳大利亚的冬季降水将减少外,其他大部分地区和季节降水普遍增加。预计平均降水增加的地区,可能出现较大的降水年际变化,一些地区将可能出现频繁的洪涝和干旱。应该指出的是,以上给出的气候变化情景中包含有相当大的不确定性,特别是降水变化情景的不确定性更大。

1.1.3.2 气候变化影响的新进展

1) 气候变化影响的研究方法

自1990年IPCC所作的第一次评估报告出来,气候变化影响的研究取得了明显进展(李克让,1996)。气候变化影响评估的主要目的是以科学的方式评估气候变化的影响,其中包括自然的、生物的、经济的、社会的、以及它们的综合影响,为政策制订者和决策者提供必要的科学信息。气候变化的影响研究通常有三类方法:实验室模拟或现场观测实验方法,历史相似或类比法,以及模式方法(李克让等,1999)。

直接实验是物理学上通用的方法,可用来检验假设或评价因果关系等,是一种重要的研究手段,近年来,各种实验模拟装置和技术得到迅速发展。野外现场观测,可以获取许多重要数据,是研究影响不可缺少的方法。我国已发展了各种野外观测技术,初步建立了覆盖全国不同自然和人工生态系统的网站,按统一的规程对重要的生态系统过程、结构和功能进行长期监测,并验证和发展生态系统模型,研究气候变化对它们的影响。

历史相似法用来研究未来气候变暖或变冷时期,在历史上寻求相似,研究其可能的影响。从历史资料出发,并与现代观测相结合是延长气候序列重建不同时间尺度气候变化史的重要手段,亦可用来判断研究气候变化对自然和人类社会经济系统的可能影响。

使用计算机进行数值模拟和预测研究,近年来得到了迅速发展,这类方法为气候变化及其影响研究的定量化提供了最科学、有效和最理想的方法。目前,研究农业、林业、牧业、水资源或自然生态系统对全球气候变化响应的模式可概括为静态(或经验)的统计模式,以及动态(或过程)的动力学机理性模式两种类型。

2) 脆弱性评价

研究气候变化对自然和人类系统的影响,最重要的就是分析研究各种系统的脆弱性。气候变化影响下自然系统和人类系统(包括农业、林业、牧业、水资源、人体健康、人居环境、能源、大型工程等)的脆弱性是指气候变化,包括气候变率和极端气候事件对该系统造成的不利影响的程度。脆弱性是系统内的气候变率特征、幅度和变化速率及其敏感性和适应能力的函数。

敏感性是指系统对气候变化因素的响应程度,或敏感程度,这种响应可能是有害的,也可能是有益的。气候变化因素包括平均气候状况、气候变率和极端气候事件的频率和强度。影响包括直接的或间接的两个方面。脆弱性与敏感性密切相关,通常,脆弱系统总是对外界气候变化影响或干扰敏感性较强,且相对不稳定的系统。

适应性是指系统的活动、过程或结构本身对气候变化适应、减轻潜在损失或对付气候变化后果的能力,适应性既包括自然界、系统本身,又包括人为的作用,特别与系统自身调节与恢复的能力以及社会经济的基础条件和人为影响、干预有关。

脆弱度依赖于系统对气候变化的敏感性和其适应能力。一个对气候变化敏感,但适应能力强的系统,造成的损失较小,反之,一个对气候变化敏感,而适应能力弱的系统,造成的损失较大。系统的适应能力,除了与系统自身调节、恢复能力有关外,还与系统本身所能承受气候变量

的阈值有关,低于这一数值,造成的损失较小,但超出这一数值,整个系统即产生连锁,甚至放大效应,从而遭受严重破坏。科学研究的目的之一,就是要寻找这一阈值,并尽可能控制,以防超出这一阈值。

鉴于脆弱性的影响因素多种多样,在评价时应突出主导因素。此外,为便于建立业务评价系统,评价指标和方法应简便、易行,所需数据容易获得。脆弱性的分析评价通常包括敏感性和适应性,以及现实的脆弱性和未来的脆弱性等内容。前者主要分析影响系统自身调节与恢复能力的各种因素及对气候变化不利影响的敏感程度,后者主要分析未来气候变化影响可能造成的脆弱性。最后,把二者综合在一起,即可得到气候变化影响下系统脆弱性的强弱和区域分布(李克让等,1996)。

IPCC 第三次评估报告(2001)指出,由于当前自然系统有限的适应能力,因此对气候变化特别脆弱,一些系统将遭受重大且不可逆的损害,受到威胁的自然系统包括冰川、冻土、珊瑚礁、红树林、北方和热带森林、极地和山区生态系统,大草原湿地、天然湿地等。研究表明,对气候变化反应敏感的人类系统主要包括水资源;农业、林业和牧业;海岸带和海洋系统(渔业);人类居住地、能源、工业和交通;保险业和其它金融服务业;人体健康。这些系统的脆弱性取决于它们对气候变化的敏感性,适应性和暴露程度,因此,脆弱性随地区、时间、社会、经济和环境状况而变化。

3)20 世纪的气候变化,特别是温度升高和极端气候事件已经影响了许多自然、生物系统和人类系统(IPCC,2001)

已经观测到的证据表明,区域气候变化,特别是温度升高,在全球的很多地区已经影响了各种自然和生物系统。业已观测到的与气候相关变化的例子有:冰川退缩、永冻土融化、河湖水面推迟冰冻、河湖冰面提早融化、中高纬度生长季延长、动植物生长区向两极和高海拔迁徙、某些植物和动物的数目减少、树木提前开花、昆虫提前出现、鸟类提前孵化等。在所有大陆上的水生、陆地和海洋环境中,区域气候的变化同自然和生物系统业已观测到的变化之间的相互联系已被记载下来。

4)极端气候事件的变化会造成重大后果

近年来由一些地区的热浪、干旱、洪涝和风暴等造成的灾害、痛苦与死亡等,说明了人类社会和自然系统对极端气候事件的脆弱性。据预测,21 世纪,随着全球平均温度的升高,上述极端事件的频率和严重程度还要增加,因此,其影响的严重程度也将增大。相反,与低温有关的极端事件及其影响将要减少。

5)气候变化影响的阈值问题

联合国气候变化框架公约在第二条目标中明确指出:“本公约以及缔约方会议可能通过的任何相关法律文书的最终目标是:根据本公约的各项有关规定,将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上。这一水平应当在足以使生态系统能够自然地适应气候变化、确保粮食生产免受威胁并使经济发展能够可持续地进行的时间范围内实现。”

上述目标向人们提出一个问题,即是否存在一个“气候变化影响的阈值”,或“气候增暖的上限”,或“全球温室气体排放总量的上限”,达到或超过这一阈值或上限,气候系统则达到了危险水平。如果阈值确实存在,寻求这一阈值并防止阈值的出现,应是各国政府和科学家研究的课题。近年来的研究表明,至今还没有找到全球温室气体排放总量与气候系统危险水平的关

系。但也有的研究认为,全球平均温度升高几度(有人认为 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$)以上,预计全球(包括发展中国家和发达国家)将在大范围内出现不利影响,会有经济的净损失。也有的研究指出,全球平均温度的升高都会对发展中国家带来经济的净损失(IPCC, 2001)。事实确实证明,资源最少,适应能力最弱的地区最为脆弱,最易受到不利的影响。

在自然界的许多领域确实存在着某种环境或气候胁迫下的阈值。比如,当胁迫超过植物自身调节能力的极限时,潜在损伤就发展成慢性病或不可逆伤害或死亡,这一极限即为阈值。如热和冷,依据其强度和持续期,损伤植物代谢活性生长和生活力,可确定某物种的分布界限,包括活性界限水平,致死界限水平或称阈值。但要指出的是,植物不同部位和器官,不同高度,其热抗性和致死界限温度很不相同。通过实验可以确定不同气候带、不同植物类群在生长季期间热损伤或冷损伤的阈值温度(Larcher, 1997)。

又如干旱引起的胁迫,对于植物个体来说,其危害程序不仅依赖于其干旱抗性,也依赖于其环境条件。萎蔫系数(或称雕萎系数)就是一个阈值,是指植物根系不能迅速吸收到能满足蒸腾需要的水分,植物开始出现永久萎蔫时的土壤含水量。其它尚有许多如辐射胁迫,冷热、盐胁迫甚至人为胁迫造成的阈值。可见,胁迫因子是非常复杂的,即有非生物的温度、水、辐射等因子,也有生物的如微生物、动物、植物因子,以及人类的影响,胁迫常常是多种因子同时起作用,且复杂交错,相互影响,互相制约(Larcher, 1997)。对于植物个体已是如此,对整个生物系统,甚至人类系统的影响就更加复杂了。

再如干旱是一种十分复杂的综合现象。即包括由降水和蒸散发收支不平衡造成的异常水分短缺现象的气象干旱;由降水和地表或地下水收支不平衡造成的异常水分短缺现象的水文干旱;由土壤供水与作物需水不平衡造成的异常水分短缺现象的农业干旱;以及由自然降水系统、地表和地下水量分配系统和人类需水排水系统不平衡造成的异常水分短缺现象的社会经济干旱。可见,干旱的影响涉及气象、水文、农业、环境以及社会经济等(李克让等, 1999)。因此,确定干旱影响的阈值涉及到气象、农业、水文、甚至社会经济等因素。此外,生物系统如植物或人类等都有着适应功能,研究指出,植物不受胁迫则不具备适当的防卫能力,中度胁迫有利于健康的功能(Larcher, 1997)。人类和自然系统都可能在一定程度上自动适应气候变化,减少不利影响。可见,气候变化对自然和人类系统影响的阈值是一类极端复杂的科学问题,不可能简单地用一个温度增暖的数值或温室气体排放总量的上限来确定。为了确定影响阈值,必须要进一步深入研究许多科学问题,如气候变化影响的机理和过程、温室气体浓度变化与气候变化影响的关系、阈值形成的因子和机理、阈值的表达等。

近年来,许多研究还发现(叶笃正, 1992),在地质时期,历史时期和近代观测时期存在着许多气候跃变(或突变)现象。由于气候突变前后两种显著不同的气候状态分别能维持较长时间,气候突变可能对某些生态脆弱区造成重大影响。生物圈作为地球系统的一个子系统,它对于外源的扰动和其它子系统作用的响应有所不同,在一定的变异度范围内,生物圈高度稳定,但当变异度超过某一阈值时,生物圈将失稳而发生突变。当代人类活动日益增强,人类扰动的强度甚至超过了地球环境系统自然调控能力,从而引起了全球变化。气候系统是否会发生突变性的响应,从而造成灾难性后果呢?由人类引起的气候变化是否具有触发地球系统大规模突变的可能,并对自然系统和人类系统产生影响?气候突变和气候变化影响阈值是否存在联系?它们的形成过程和机制是什么?这些也是值得我们关心和待研究的重要课题。