



昆虫对大气CO₂浓度 升高的响应

戈 峰 陈法军 吴 刚 孙玉诚 著



科学出版社
www.sciencep.com

昆虫对大气 CO₂ 浓度升高的响应

戈 峰 陈法军 吴 刚 孙玉诚 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书结合国际研究的前沿,在阐明昆虫对大气 CO₂ 浓度升高响应的基本原理与方法的基础上,重点论述了作物、害虫、天敌对大气 CO₂ 浓度升高的响应特征,揭示了“作物-害虫-天敌”系统对大气 CO₂ 浓度升高响应的生态过程,提出了未来昆虫对大气 CO₂ 浓度升高响应的研究方向。

本书可供生物学、生态学、昆虫学、环境科学、植物保护学和气象学等专业的本科生、研究生及教师和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

昆虫对大气 CO₂ 浓度升高的响应/戈峰等著. —北京:科学出版社, 2010
ISBN 978-7-03-027194-5

I. ①昆… II. ①戈… III. ①二氧化碳-影响-昆虫学:动物生态学
IV. ①Q968.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 062750 号

责任编辑:王海光/责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

装 订 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 4 月第一次印刷 印张:13 1/2 插页:8

印数:1—1 500 字数:267 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



戈 峰 1963 年 11 月出生，博士，中国科学院动物研究所研究员，博士研究生导师，农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室常务副主任。1993 年在中国科学院动物研究所获博士学位，1995 年和 1999 年赴美国俄亥俄州立大学（Ohio State University）合作研究，2003 年和 2009 年赴美国得克萨斯州农工大学（Texas A&M University）合作研究。

主要从事生态学、昆虫生态学和害虫生态管理研究。近期重点研究大气 CO_2 浓度和 O_3 浓度升高条件下“作物-害虫-天敌”的相互作用关系，分析不同类型昆虫对 CO_2 浓度升高的响应机制；探讨景观农田生态系统中“作物-害虫-天敌”食物网关系；解析地上与地下生物互作、群落结构与功能关系和生物多样性控害能力。现主持“973”计划项目、国家自然科学基金重点项目和中国科学院知识创新工程重要方向项目等。至今在国内外刊物上发表论文 150 余篇，其中在 SCI 刊物发表论文 50 多篇。主编《现代生态学》和《昆虫生态学原理与方法》两部著作；荣获了中国科学院科技进步二等奖和湖南省科技进步二等奖。担任中国生态学会常务理事、中国昆虫学会常务理事兼副秘书长、中国昆虫学会昆虫生态专业委员会主任，兼任《昆虫知识》副主编，及 *Insect Science*、《生态学报》、《生态学杂志》、《生物多样性》等期刊的编辑委员会委员。



陈法军 1974 年 5 月出生，博士，南京农业大学植物保护学院副教授，硕士研究生导师。1998 年 7 月毕业于山东省莱阳农学院植物保护专业，获农学学士；2001 年 7 月毕业于南京农业大学农业昆虫与害虫防治专业，获农学硕士；2004 年 7 月毕业于中国科学院动物研究所生态学专业，获理学博士；2004 年 8 月～2006 年 9 月在浙江大学、浙江省农业科学院从事博士后研究。2006 年至今，在南京农业大学植物保护学院从事教学和科研工作，主讲昆虫生态学、恢复生态学、种群生态学和群落生态

学等课程。

研究方向为环境昆虫学、昆虫生态学和全球气候变化生物学。目前，主要从事转基因作物的生态风险评估和全球气候变化对农业害虫发生发展规律的影响等研究，并对环境胁迫下转 Bt 基因植物 Bt 毒素表达及其害虫适应机制等进行了深入分析。先后主持国家自然科学基金、教育部博士点基金、瑞典国际科学基金、中国博士后科学基金等项目，并参与“973”计划、国家公益性行业（农业）科研专项基金、国家转基因生物新品种培育重大专项等课题。至今在国内外刊物上发表论文 40 余篇，其中在 SCI 刊物发表论文近 20 篇。参编《昆虫生态学原理与方法》一书。现为中国植物保护学会会员、中国昆虫学会会员，美国农学会、农作物科学协会和土壤科学协会会员，兼任 *Journal of Applied Entomology*、*Insect Science*、*Entomologica Fennica*、《昆虫知识》、《生态学杂志》和《中国科技论文在线》的审稿人。



吴 刚 1976 年 2 月出生，博士，华中农业大学植物科技学院副教授。1996 年毕业于华中农业大学植物保护系获学士学位；1996 年 9 月～2000 年 7 月于武汉市农业局工作；2000 年 9 月～2003 年 7 月于华中农业大学植物科技学院植物保护系攻读理学硕士学位；2003 年 9 月～2006 年 7 月于中国科学院动物研究所攻读理学博士学位；2006 年 7 月～

2007 年 9 月于武汉理工大学生物系工作；2007 年 9 月～2009 年 9 月于中国农业科学院植物保护研究所从事博士后研究；2009 年 9 月至今，于华中农业大学植物科技学院工作。

自 2003 年以来，一直从事“气候变化-植物-昆虫”系统的研究，主要研究了大气 CO_2 浓度升高对棉铃虫生长发育和繁殖的直接影响；分析了高 CO_2 浓度和害虫为害交互因子对常规棉花和转 Bt 基因棉花产量的影响；探讨了不同 CO_2 通气时间对转 Bt 基因棉花叶片次生物质的作用；明确了靶标害虫——棉铃虫体内酶活性对转 Bt 基因棉花不同时间的响应；首次提出并建立了害虫潜在种群增长指数和种群危害能力的计算公式。目前，已主持国际科学基金（International Foundation for Science）（编号：C/4559-1）、国家自然科学基金（编号：30800724）、中国博士后科学基金一等资助项目（编号：20080430054）、中国博士后科学基金特别资助项目（编号：200801132）和中国科学院农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室开放基金（编号：Chinese-IPM-0803）等项目；并在 *Field Crops Research*、*Agronomy Journal*、*Agricultural and Forest Entomolo-*

gy、*Entomologia Experimentalis et Applicata*、*Journal of Plant Research*、*Journal of Applied Entomology*、*International Journal of Pest Management*、《生态学报》和《昆虫学报》等期刊发表论文 30 余篇。



孙玉诚 1982 年 7 月出生，博士，中国科学院动物研究所助理研究员。1999 年 9 月~2003 年 6 月于南昌大学生物系学习，获学士学位。2004 年 9 月~2009 年 6 月于中国科学院动物研究所学习，获博士学位。研究方向为蚜虫、根结线虫及其寄主植物对大气 CO₂ 浓度升高的响应。

博士在读期间，系统研究了大气 CO₂ 浓度升高条件下“作物-蚜虫-蚜茧蜂”的相互作用关系，探讨了不同种蚜虫对大气 CO₂ 浓度升高的响应特征；解析了蚜虫的种间竞争、种间信息素（报警激素）与其内共生菌 *Buchnera* 对大气 CO₂ 浓度升高响应的生态过程，明确了“作物-蚜虫-蚜茧蜂”相互作用关系在高 CO₂ 浓度环境中的变化特征。至今已在 *Plant Cell & Environment*、*Agriculture Ecosystems & Environment*、*Environmental Entomology* 等 SCI 刊物发表论文 11 篇，其中 6 篇为第一作者。

前 言

全球气候变化引起国内外的极大关注。其中,大气 CO₂ 浓度增加被认为是导致全球变暖的罪魁祸首。据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) (2007) 报道,工业革命之前大气 CO₂ 浓度为 280 μ L/L, 2005 年达到了 379 μ L/L, 预计到 2100 年将达到 540 ~ 970 μ L/L。因此,2009 年在哥本哈根举行的联合国气候变化大会的主题就是“大幅度减少全球 CO₂ 排放,将全球气温升幅控制在 2 摄氏度以下”。

大气 CO₂ 浓度升高强烈地影响到农林生态系统。它不但直接影响植物的生长发育,还通过改变植物体内化学成分的组成与含量,及显微组织结构等间接地影响到植食性昆虫,并通过食物链影响到以之为食的天敌昆虫。昆虫作为生态系统的重要成员,在生态系统结构与功能中起着非常重要的作用。而且,昆虫具有生活史短、体形小、易饲养等特点,其中的害虫又是影响农业生产的重要因子,与可持续农业密切相关,因而,国际上非常重视大气 CO₂ 浓度升高对昆虫影响的研究。

我们科研小组自 2002 年以来,在国家“973”计划项目(编号:2006CB102002)、国家自然科学基金委“创新群体”项目(编号:30621003)和中国科学院知识创新工程项目(编号:KSCX2-YW-N-006)等支持下,自行设计、组装了一系列密闭式动态 CO₂ 气室和开顶式 CO₂ 浓度控制箱,以作物(棉花、小麦)、害虫(棉铃虫、棉蚜、麦蚜、烟粉虱等)、天敌(异色瓢虫、龟纹瓢虫、蚜茧蜂等)之间的相互关系为主线,以全球气候变化中 CO₂ 浓度增加为作用因子,开展了多系统下不同类型昆虫对 CO₂ 浓度升高的响应特征研究。已在 *Plant Cell & Environment*、*Agriculture Ecosystems & Environment*、*Environmental Entomology* 等 SCI 刊物发表论文 22 篇,国内核心期刊发表论文 13 篇,使我国这一领域的研究走向国际前沿。

本书就是对我们研究小组 8 年来研究工作的系统总结。本书在阐明昆虫对大气 CO₂ 浓度升高响应的基本原理与方法基础上,重点论述了作物、害虫、天敌对大气 CO₂ 浓度升高的响应特征,揭示了“作物-害虫-天敌”系统对大气 CO₂ 浓度升高响应的生态过程,提出了未来环境下昆虫对大气 CO₂ 浓度升高响应的研究方向。

本书由戈峰负责组织编著,并撰写第一章和第八章,陈法军博士撰写第二章、第三章和第六章,吴刚博士撰写第四章、第七章和第五章的第一和第二节,

孙玉诚博士撰写第五章的第三节。此外，高峰博士、尹金博士、朱三荣硕士、冯利硕士、王学霞硕士、姚艳红硕士、张广珠硕士参加了本书中的部分研究工作。项目组的其他人员，苏建伟博士、刘向辉工程师、杜丽博士、潘卫东博士、门兴元博士、王小平博士、苏丽博士、肖能文博士、韩瑞东博士、宋宪军博士、曾菊平博士、付雪博士、王永模博士、齐丽萍硕士、刘兴平硕士、王燕硕士、宋琰硕士、黄丽莉硕士等及在读的各位研究生或直接参加了本书的编写，或提供资料，或帮助文字输入。在美国撰写和统稿期间，得到了我太太张玉娇女士、女儿 Kathleen M. Ge 和 Marvin Harris 教授的热情帮助与支持。在此，谨向他们表示衷心的感谢！

尽管我们就昆虫对 CO₂ 浓度升高的响应特征做了大量的研究工作，但对于一个复杂的“作物-害虫-天敌”系统来说，目前仍然是一些特征的观察。展望未来，我们制定了两个 8 年（16 年）的中期研究规划：以我国重要农林害虫为对象，以全球气候变化下的大气 CO₂、O₃ 浓度和温度升高为胁迫因子，以“作物-害虫-天敌”互作关系为主线，通过种群动态与响应机理结合、模式昆虫与重大害虫结合，应用分子生物学手段和宏观分析方法，着重于揭示昆虫对大气 CO₂ 浓度升高的响应机制，提出未来全球变化背景下我国主要害虫、天敌发生发展的趋势与防治对策。所以本书的出版只是一个开端，将来还会有一系列相关著作出版。

本书撰写仓促，加之水平有限，错漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

戈 峰

2010 年 2 月 18 日

目 录

前言

第一章 基本原理	1
第一节 全球大气 CO ₂ 浓度上升态势	1
第二节 大气 CO ₂ 浓度升高对植物的影响	5
第三节 昆虫对 CO ₂ 浓度升高响应的类型	11
第四节 CO ₂ 浓度升高对昆虫作用的基本原理	19
参考文献	22
第二章 基本方法	27
第一节 密闭式动态 CO ₂ 气室	28
第二节 开顶式气室	31
第三节 开放式 CO ₂ 浓度增高试验	40
第四节 模拟方法	45
参考文献	47
第三章 作物对大气 CO₂ 浓度升高的响应	51
第一节 棉花对大气 CO ₂ 浓度升高的响应	53
第二节 小麦对大气 CO ₂ 浓度升高的响应	63
第三节 水稻对大气 CO ₂ 浓度升高的响应	69
参考文献	76
第四章 咀嚼式昆虫对大气 CO₂ 浓度升高的响应	81
第一节 大气 CO ₂ 浓度升高对棉铃虫生长发育和繁殖的直接影响	81
第二节 大气 CO ₂ 浓度升高对棉铃虫生长发育和繁殖的间接影响	86
参考文献	92
第五章 大气 CO₂ 浓度升高对刺吸式昆虫的影响	95
第一节 棉蚜对大气 CO ₂ 浓度升高的响应	95
第二节 大气 CO ₂ 浓度升高下不同棉酚棉花品种对棉蚜的影响	99
第三节 麦长管蚜对大气 CO ₂ 浓度升高的响应	106
第四节 烟粉虱对大气 CO ₂ 浓度升高的响应	124
参考文献	130

第六章 大气 CO₂ 浓度升高对天敌的影响	135
第一节 捕食性天敌.....	136
第二节 寄生性天敌.....	147
参考文献.....	154
第七章 作物-害虫-天敌互作关系对大气 CO₂ 浓度升高响应的特征	157
第一节 大气 CO ₂ 浓度升高对棉花补偿能力的影响	157
第二节 大气 CO ₂ 浓度升高下作物的诱导抗性	164
第三节 大气 CO ₂ 浓度升高条件下害虫的危害作用	172
第四节 大气 CO ₂ 浓度升高条件下天敌的控害作用	181
参考文献.....	184
第八章 展望	189
第一节 进展概述.....	189
第二节 昆虫对大气 CO ₂ 浓度升高响应的研究热点	195
第三节 昆虫对大气 CO ₂ 浓度升高响应的发展方向	199
参考文献.....	206
附录 2002~2010 年相关研究论文	210
图版	

第一章 基本原理

第一节 全球大气 CO₂ 浓度上升态势

一、全球大气 CO₂ 浓度的变化

构成地球表面大气的主要成分为氧气和氮气等，同时也包含极少量的二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄) 及氟利昂 (CFC) 等气体。CO₂、CH₄、CFC 等气体通过吸收地球表面反射的太阳能红外线而温暖大气，从而避免了地球表面温度的急剧变化，使地球表面的平均温度保持在 15℃ 左右以适合人类的生活。如果大气中没有 CO₂、CH₄、CFC 等微量气体，那么地表面的温度将会降低至 -18℃ 左右，这将使包括人类在内的大多数生物无法在地球上生存。因此，CO₂、CH₄、CFC 等通常被称为“温室气体”。据分析显示，大气中上述三种气体分别占温室气体总量的 64%、19% 和 10% 左右。随着人类社会经济活动范围的不断扩大，以上温室气体的排放量逐年增加，从而使大气中温室气体浓度逐年升高，最终使地球表面温度逐年上升，导致全球气候变暖。

从已有的资料记载来看，直接检测大气中 CO₂ 浓度在 1958 年才开始，在此之前，则主要根据被封埋在南极洲不同深度冰层中气泡的分析而间接估测。据报道，3500 万年前，大气 CO₂ 浓度为 1250 μL/L，当时的海平面为 73m。由于海洋生物不断进行光合作用，吸收大量的 CO₂，使大气中 CO₂ 浓度不断下降，到 3200 万年前时，大气 CO₂ 浓度下降为 450 μL/L，当时的海平面下降到 30m；直到 2100 万年前，大气 CO₂ 浓度为 185 μL/L，当时的海平面为 -130m。之后大气 CO₂ 浓度开始上升，到 300 万年前，大气 CO₂ 浓度为 280 μL/L，当时的海平面为目前沿用的标准海平面 (0m) (Alley et al., 2005)。此后直到工业革命之前 (1750 年前后) 大气中 CO₂ 的浓度仍约为 280 μL/L (图 1.1)。

人类活动对全球环境最显著的影响之一就是导致大气中 CO₂ 浓度急剧升高。1958 年首先在美国夏威夷群岛莫纳罗 (Mauna Loa) (19.32°N, 155.35°W) 建立大气 CO₂

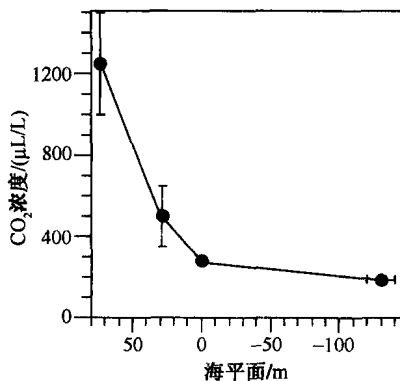


图 1.1 大气 CO₂ 浓度与海平面关系 (Alley et al., 2005)

浓度观测定位站,从而开始对大气中 CO₂ 含量进行精确的监测。据记录,1958 年测定到当时的大气 CO₂ 浓度是 315 μL/L,1980 年为 338 μL/L,1984 年为 345 μL/L,1993 年为 355 μL/L,1998 年上升到 367 μL/L。据最新资料报道,2005 年大气 CO₂ 浓度达到了 379 μL/L,且自 1995 年以来以每年 1.9 μL/L 的速度递增 (IPCC, 2007) (彩图 1.2)。

根据联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) (2007) 估计,未来 100 年,大气 CO₂ 浓度将会继续上升,到 2100 年,大气 CO₂ 浓度将达到 540~970 μL/L。在估计未来大气 CO₂ 浓度上升的模型中,根据对社会、经济状况 (人口、社会、经济和技术) 的不同假设,对温室气体浓度的预测结果也有所不同。此外,考虑到某些不确定性,特别是由于碳汇的存在,以及气候对陆地生物圈的反馈强度,导致各个模型对 2100 年 CO₂ 浓度的预测结果,大约有一 10%~+30% 的变异。因此,2100 年 CO₂ 浓度大约是在 490~1260 μL/L 之间,比工业化前 (280 μL/L) 增加 75%~350% (彩图 1.3)。

二、我国大气 CO₂ 浓度的变化

我国是当前大气 CO₂ 浓度排放总量最多的国家之一。我国一次能源消费结构以比重占 2/3 以上的煤炭燃烧为主,煤、石油、天然气等矿物燃料和木材、木炭等植物性燃料作为人类社会的主要能源,在燃烧过程中都释放大量的 CO₂,从而使我国能源消费的 CO₂ 排放强度比世界平均水平高 30% 以上。根据 2007 年我国发布的第一部《气候变化国家评估报告》指出,我国 2000 年化石燃料燃烧产生的 CO₂ 排放量估计为 8.7 亿 t-C,约占世界的 13%;但人均 CO₂ 排放量仅为 0.65 t-C,仅相当于世界平均水平的 61%,而且 GDP 的 CO₂ 排放强度从 1990 年到 2000 年下降了 45%。

不同地区、不同的季节大气 CO₂ 浓度不同。中国科学院大气物理研究所自 1993 年开始对北京城区大气 CO₂ 浓度进行了长期观测。结果表明,1993~1995 年北京大气 CO₂ 浓度上升较快,年平均增长率为 3.7%,1995 年平均浓度达到 $409.7 \pm 25.9 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (μL/L),随后缓慢下降。这种年度变化主要是由于强度基本稳定的 CO₂ 源与迅速增大的 CO₂ 汇的共同作用导致北京 1995~2000 年大气 CO₂ 浓度逐渐降低。

与日本瓦里关山站和美国夏威夷 Mauna Loa 站等全球大气 CO₂ 浓度观测站相比,北京大气 CO₂ 浓度并没有表现出逐年上升的趋势 (图 1.4)。从图 1.4 北京大气 CO₂ 浓度 8 年的连续监测结果可以看出,北京大气 CO₂ 浓度在 1993~1995 年为线性快速上升期,从 1993 年的 $374.7 \pm 23.5 \mu\text{L/L}$ 增加到 1995 年的 $409.7 \pm 25.9 \mu\text{L/L}$,平均增长率为 3.7%,1995 年达到最高峰;1996~2000 年

呈缓慢下降趋势, 平均下降率为 0.9%, 并在下降中有较大的年际波动, 但在整体浓度水平上平均要比瓦里关山和 Mauna Loa 高 9.3%。

北京地区大气 CO_2 浓度季节变化明显, 冬季出现高峰值, 月平均浓度为 421.5~441.0 $\mu\text{L/L}$, 平均值为 $(426.8 \pm 20.6) \mu\text{L/L}$; 夏季出现低谷值, 月平均浓度 367.4~371.6 $\mu\text{L/L}$, 平均值为 369.1 $\mu\text{L/L}$ 。北京大气 CO_2 浓度季节变化主要是受由人为取暖活动和植物物候的季节变化所引起的 CO_2 源汇强度改变所引起。

北京大气 CO_2 浓度日变化强烈 (图 1.5)。全年北京时间 15:00 时为全天 CO_2 浓度最低值; 最高值则出现在夜间, 但全天最高值出现的时间随季节而变化: 夏季和春季 CO_2 浓度全天最高值出现在 6:00 时, 而冬季和秋季全天最高值在 22:00 时出现, 日变化幅度为 23.2~39.0 $\mu\text{L/L}$ 。平均日较差 34.7 $\mu\text{L/L}$ 。这可能是在夏季 17:00 时以后, 植物光合作用和对流输送变弱, 也就是说大气 CO_2 汇强度逐渐减

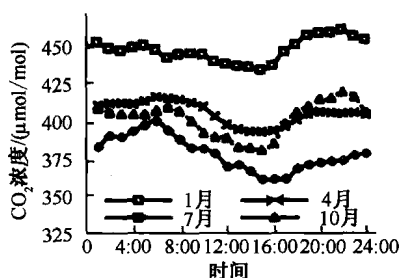


图 1.5 北京城区大气 CO_2 浓度日变化图 (王长科等, 2003)

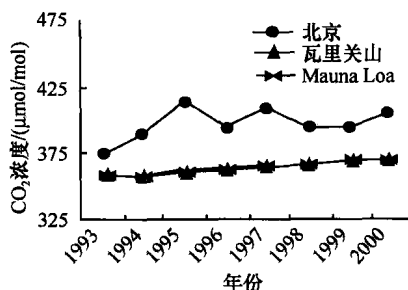


图 1.4 北京城区、日本瓦里关山站和美国夏威夷 Mauna Loa 站观测的大气 CO_2 浓度 (王长科等, 2003)

弱, 土壤和生物呼吸以及工业生产等产生的 CO_2 在近地层大气中积累, CO_2 浓度便逐渐上升, 一直到 6:00 时左右出现峰值, 在日出后才开始下降。而冬季 19:00~22:00 时, 是北京一天中的两个采暖高峰时段, 22:00 时以后采暖锅炉燃烧量降低, 公路上行驶的汽车也大量减少, 也就是说大气 CO_2 源强度减弱, 致使 CO_2 浓度开始降低。但田间的情况可能会有所不同, 详细结果见第二章。

三、大气 CO_2 浓度升高的主要原因

1. 大气 CO_2 浓度升高是引起全球气候变化的主要原因

人类活动主要通过以下三方面引起气候变化: 一是化石燃料利用排放的 CO_2 等温室气体增加大气中温室气体的浓度, 温室效应随之增强而影响气候, 这是人类活动造成气候变暖的主要驱动力; 二是农业和工业活动排放的 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 、PFC、HFC、SF 等温室气体进入大气后, 也通过温室效应增强气候变暖; 三是土地利用变化导致的温室气体“源/汇”变化和地表反照率变化进一步影响气候变化, 这包括森林砍伐、城市化、植被改变和破坏等。据估计, CO_2 气体

对全球温暖化的贡献占全部温室气体贡献率的 50%~60% (Fuwa, 1994)。可见, 大气 CO₂ 浓度升高是引起全球气候变化的主要原因。

检测 (detection) 和归因 (attribution) 方法是目前用以科学地判断人类活动引起全球气候变化影响程度的主要方法。检测是证明一种观测到的变化, 不能由自然变率解释, 并且在统计上与自然变率有显著差异的过程。归因是以某种程度的可信度确立被检测出的气候变化的因果关系的过程, 包括评估不同的假设。2007 年 IPCC 第四次评估报告通过大量的统计方法和数值模拟, 得出了两个重要的结论: 一是对于人类活动影响全球气候变化的因果关系的判断由原来的可信度 60% 提高到目前的 90%, 从而使人们以更高的可信度确信人类活动是造成近 50 年全球气候变化的主因; 二是全球气候变化的检测与归因研究在空间尺度和气候变量方面扩展到六大洲, 并且包括海洋增暖、大陆尺度的平均温度、温度极值、降水、气压场与风场。越来越强有力的科学证据表明: 最近 50 年的全球气候变化主要是由人类活动造成的。

2. 全球气候变化对我国的影响特征

科学家预测, 如不采取全球联合行动减排温室气体, 到 2100 年, 全球平均地表温度相对于 1990 年将上升 1.4~5.8℃ (IPCC 第四次评估报告将这一升温值修正为 1.1~6.4℃)。而由于海洋响应的滞后, 即使温室气体的浓度已经稳定, 地表温度仍将持续上升数百年。另外, 全球温度变化将是不均匀的, 陆地的变暖大于海洋, 中高纬地区有更多变暖的年份, 而且冬季的变暖大于夏季。

我国气候变化的主要特征表现为: ①温度变化: 近 100 年来中国年地表平均气温明显增加。升温幅度约为 0.5~0.8℃, 比同期全球平均值 ($0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$) 略强。在最近 50 年, 我国年平均地表气温增加 1.1℃, 增温速率为 $0.22^\circ\text{C}/10\text{a}$, 明显高于全球或北半球同期平均增温速率。②降水变化: 近 100 年和近 50 年中国年降水量变化趋势不显著, 但年代际波动较大。近 50 年全国年平均降水量同样没有呈现显著趋势变化, 但降水量趋势存在明显的区域差异。1956~2000 年, 长江中下游和东南地区、西部大部分地区以及东北北部和内蒙古大部分的年降水量有不同程度增加; 但是, 我国华北、西北东部、东北南部等地区年降水量出现下降趋势。③其他要素变化: 近 50 年中国的日照时间、水面蒸发量、近地面平均风速、总云量均呈显著减少趋势。风速减少最明显的地区在中国西北。④极端气候事件变化: 近 50 年, 中国全国平均炎热日数呈现先下降后增加的趋势, 近 20 多年上升较明显。1950 年以来, 全国平均霜冻日数减少了 10 天左右。中国近 50 年来寒潮事件频数显著下降。华北和东北地区干旱趋重, 长江中下游流域和东南地区洪涝加重。20 世纪 90 年代以来登陆我国的台风数量呈下降趋势, 我国北方包括沙尘暴在内的沙尘天气事件出现频率总体上呈下降趋势, 但 2006 年的

沙尘暴明显多于 2005 年，这一现象引起了科学家的关注。

未来气候变化将严重影响我国农牧业、生态系统、水资源、沿海岸带社会经济。气候变化将使农业生产的不稳定性增加，产量波动增大。我国东北森林的组成和结构将发生较大变化；半干旱地区潜在荒漠化趋势增大；气候区域干暖将导致三江平原湿地资源减少、生物多样性减少、濒危物种增加，大面积沼泽湿地演变为草甸湿地。青藏高原多年冻土将退化，对青藏铁路等重大工程产生不利影响。气候变化将使内陆湖泊加速萎缩，使北方江河径流量减少，南方径流量增加，旱涝灾害频繁出现，加剧水资源的不稳定性与供需矛盾。海平面上升将导致许多海岸区遭受洪水泛滥的机会增大，遭受风暴潮影响的程度加重，海岸滩涂湿地、红树林和珊瑚等生态群遭到破坏，沿海土地盐渍化加剧等。

但不同的地区受气候变化的影响不同。如东北地区增温会有利于农业生产，但特殊的生态系统（如湿地和冻土）将由于气候变暖和人类活动加剧而退化或消失，森林生态系统结构会发生变化。华北地区干旱化加剧，气候可能继续明显变暖，需水量大大增加，水资源更加紧缺，但冬季变暖会促进区域设施农业的发展。西北地区降水增多但仍缺水，模拟结果表明：2010~2030 年西北地区年缺水量约为 200 亿 m^3 ；2050 年后，农牧交错带边缘和绿洲边缘区沙漠化土地面积将会增加。华东地区洪涝风险加大，未来百年一遇的洪水发生的可能性增大。华中地区增温不明显，但旱涝交替频繁；未来气候变化会使华中地区双季稻尤其是晚稻产量降低。西南地区山地灾害活动强度、规模和范围将加大，发生频率增高，损失更为严重。华南地区受海平面上升影响显著，预计到 2100 年的上升范围是 60~74cm，这将可能对珠江三角洲等低洼地区带来严重影响。

第二节 大气 CO_2 浓度升高对植物的影响

一、大气 CO_2 浓度升高对植物生长发育和光合作用的影响

CO_2 是植物进行光合作用的原材料之一。因此，植物对大气 CO_2 浓度升高的反应最为敏感。对大多数作物而言，尤其是大豆、小麦、棉花、花生等 C_3 植物， CO_2 浓度增加可提高光合作用和生产力 (Dijkstra et al., 2002; Veteli et al., 2002)，但对 C_4 植物，如玉米、高粱、甘蔗等的影响不大 (吴坤君, 1993)。过去一个世纪以来，增产粮食中的 10% 是由于 CO_2 气体施肥效应带来的。据估计，全球粮食产量将随 CO_2 升高增加 10%~50% 左右。其中，棉花产量将随 CO_2 加倍提高 50%，小麦 10%。Pregitzer 等 (1995) 认为，在 CO_2 浓度倍增条件下， C_3 植物的生长量平均提高 41%， C_4 植物为 22%。但必须投入足够的化肥以满足作物对其他矿物质（如氮）的需求。

近年来,我们在北京试验基地开展了 CO₂ 浓度增加对小麦和棉花生物量和产量的影响,表 1.1 表明:OTC 试验中,CO₂ 浓度增加可显著提高春小麦的穗长和穗粒数,但却显著降低了千粒重 (Chen et al., 2004)。与对照 CO₂ 处理相比,550 μ L/L 和 750 μ L/L CO₂ 处理的穗长和穗粒数分别显著增加了 0.6% 和 12.5%,以及 3.2% 和 18%,而千粒重则分别降低了 2.2% 和 6.3%,单穗麦粒重也增加了 18.2% 和 9.1%,但增幅不显著。对冬小麦而言,750 μ L/L CO₂ 处理冬小麦的穗长、穗粒数和千粒重与对照 CO₂ 处理相比,分别显著增加了 10.0%、10.4% 和 7.6%。根据单穗麦粒数和单粒重 (由千粒重求得) 推测,与对照 CO₂ 处理相比,750 μ L/L CO₂ 处理冬小麦的单穗麦粒重将显著提高 18% (Sun et al., 2010)。

表 1.1 CO₂ 浓度增加对春小麦和冬小麦经济产量影响 (Chen et al., 2004; Sun et al., 2010)

	春小麦			冬小麦	
	CK	550 μ L/L CO ₂	750 μ L/L CO ₂	CK	750 μ L/L CO ₂
穗长/cm	10.7 $\pm$ 0.1c	10.9 $\pm$ 0.2b	11.1 $\pm$ 0.1a	8.66 $\pm$ 0.10a	9.53 $\pm$ 0.08b
单穗麦粒数	29.9 $\pm$ 2.2b	33.7 $\pm$ 3.7b	35.5 $\pm$ 2.3a	44.3 $\pm$ 0.5a	48.9 $\pm$ 0.5b
单穗麦粒重/g	1.1 $\pm$ 0.1	1.3 $\pm$ 0.3	1.2 $\pm$ 0.1		
千粒重/g	34.4 $\pm$ 0.1a	33.6 $\pm$ 0.4b	32.2 $\pm$ 0.2c	48.9 $\pm$ 0.3a	52.6 $\pm$ 0.1b

注:CK, 周围环境 CO₂ 浓度, 后同。不同字母表示不同 CO₂ 处理间经 LSD 检验差异显著 ($P < 0.05$)。

通过 OTC 试验连续测定了 2004 年和 2005 年转 Bt 基因棉花 GK-12 的皮棉及亲本棉花 Simian-3 的籽棉产量。结果 (表 1.2) 表明,与对照 CO₂ 处理相比,2004 年和 2005 年, GK-12 的皮棉产量分别显著增加了 12.7% 和 14.5%, Simian-3 的籽棉产量分别显著增加了 10.2% 和 7.4% (Wu et al., 2007a, 2007b)。

表 1.2 不同 CO₂ 处理下转 Bt 基因棉花 GK-12 的皮棉产量及亲本 Simian-3 的籽棉产量 (Wu et al., 2007a, 2007b)

	年份	GK-12			年份	Simian-3	
		CK	750 μ L/L CO ₂			CK	750 μ L/L CO ₂
皮棉	2004	15.8 $\pm$ 0.1a	17.8 $\pm$ 0.2b	籽棉	2004	30.5 $\pm$ 0.2a	33.6 $\pm$ 0.2b
	2005	15.9 $\pm$ 0.3a	18.2 $\pm$ 0.2b		2005	31.2 $\pm$ 0.2a	35.5 $\pm$ 0.2b

注:不同字母表示同一年份、同一棉花品种不同 CO₂ 处理间差异显著; LSD 检验, $P < 0.05$ 。

大气 CO₂ 浓度升高对植物生产力的提高还受其他环境因素的联合作用。Veteli 等 (2002) 研究发现,在高温和高 CO₂ 浓度的环境中,柳树 (*Salix myrsinifolia* Salisb) 叶子的生物量和整个地上部生物量都增加;与对照温度相比,高温减少了分枝数和叶子生物量,而提高了主干的生物量。Sionit 等 (1987) 发现,当 CO₂ 浓度为 675 μ L/L 时,高温促进大豆的光合作用;而 CO₂ 浓度为 1000 μ L/L 时,同样的温度却降低了大豆的光合速率。Amthor (2001)

估计了 CO_2 浓度和温度对小麦产量的影响，发现高 CO_2 浓度下小麦产量升高 1.0~1.6 倍，而高温使小麦产量下降 50%， CO_2 浓度和温度同时作用时则对小麦产量的影响不大（图 1.6）。

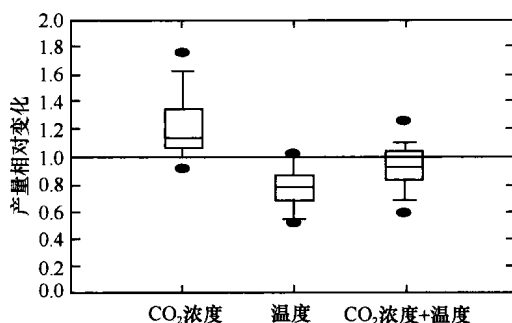


图 1.6 CO_2 浓度和温度同时升高对小麦产量的影响 (Amthor, 2001)

圆点表示最大变异值，方框表示变异的平均值

二、大气 CO_2 浓度增加对植物组织中化学成分含量和组成的影响

大气 CO_2 浓度增加将改变植物组织内营养成分的含量和组成。Stiling 和 Conelissen (2007) 对 55 例已经报道的植物在大气 CO_2 浓度增加下的初级和次生代谢物质进行了综合分析，结果表明高 CO_2 浓度可显著增加植物的碳氮比 (C/N) (+26.57%) (其中，树的 C/N 增加 31.26%，草本植物的 C/N 增加 27.51%，草的 C/N 增加 24.41%)，干重增加 27.6%，比叶面积减少 7.06%，生物量增加 38.4%，淀粉含量增加 45%，糖含量增加 14%，N 含量下降 16.4%，蛋白质含量下降 14.6%，含水量下降 2.18%，单宁含量下降 30.1% (图 1.7~图 1.9)。

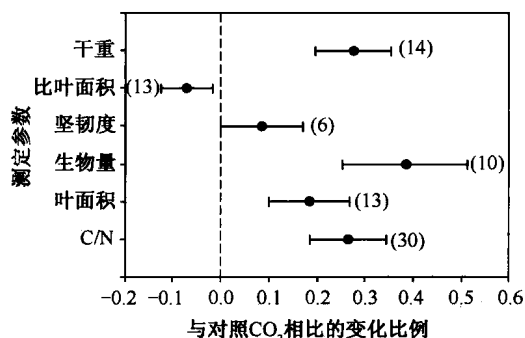


图 1.7 高浓度 CO_2 条件下植物形态和生理指标的变化 (Stiling and Conelissen, 2007)

括号中数值为测定的样本数