

气候变化对中国粮食产量的 影响及模拟

姚凤梅 张佳华 著



气候变化对中国粮食产量的 影响及模拟

姚凤梅 张佳华 著

气象出版社

内容简介

全球气候变暖对自然环境、水资源和粮食安全带来严重的挑战。本书主要研究气候变化对水稻影响的事实,揭示 1981—2000 年温度变化和产量气候响应关系;分析了我国主要水稻区生长季的高温、低温事件对水稻产量的影响;结合区域气候模式连接 CERES-Rice 作物模式,评价未来气候变化对我国主要水稻种植区水稻产量和生育期的影响。讨论了农作物产量对气候变化的响应机理过程和模拟,阐述了气候变化对作物影响的遥感评价模型与应用;并介绍了气候变化引起作物干旱的遥感空间分析研究方法。本书可供从事气候变化及其对农业的影响、遥感生态、防灾减灾等专业的研究人员和相关高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化对中国粮食产量的影响及模拟/姚凤梅,张佳华著.
—北京:气象出版社,2008.6
ISBN 978-7-5029-4504-6

I. 气… II. ①姚…②张… III. 气候变化-影响-水稻-
产量-研究-中国 IV. S165

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 071141 号

Qihou Bianhua Dui Zhongguo Liangshi Chanliang De Yingxiang Ji Moni

气候变化对中国粮食产量的影响及模拟

姚凤梅 张佳华 著

出版发行:气象出版社

地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总编室:010-68407112

网址:<http://cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:张 斌

封面设计:博雅思企划

印刷:北京中新伟业印刷有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

字数:196 千字

版次:2008 年 8 月第 1 版

定价:30.00 元

邮政编码:100081

发行部:010-68409198

E-mail: qxcs@263.net

终审:汪勤模

责任技编:都 平

印 张:7.75

插 页:4

印 次:2008 年 8 月第 1 次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

前言

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC,2001)的报告,自1860年以来,全球平均气温升高了 $0.6\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。气候变暖、降水的分布不均,对农业生产的影响(特别是对作物生长的影响)是全球变化研究中非常关键的问题。根据IPCC第四次评估报告,全球气候变暖是毋庸置疑的。从1850年有全球表面温度记录以来的12个最暖年份中,就包括了1995—2006年中的11个年份。过去100年(1906—2005)全球的变暖趋势为气温升高 0.74°C ,过去50年(1956—2005)全球变暖趋势为每10年升高 0.13°C ,几乎是过去100年的两倍。国内许多学者对中国温度变化进行了研究,结果表明,中国近百年的温度变化与北半球大致相似,全国平均温度正在升高,即表现为增暖的趋势。全球气候变暖对水资源、自然环境和粮食安全带来了严重的挑战,全球变暖背景对中国农业生产产生如何影响是一个亟待回答的问题。从历史和未来两个角度研究气候变化对中国农业的影响,对于国家制定相应对策具有重要的意义。揭示和评估气候变化及其影响也是气候变化研究领域的重要科学问题之一。

水稻作为我国第一大粮食作物,气候变化对其影响直接关系我国的粮食安全。本书主要分析气候变化对水稻影响的事实,利用中国主要稻区1981—2000年记录完整的78个代表性水稻测站产量、生育期的观测记录和相应气象台站的气候观测数据等,分析我国主要稻区生长季温度变化格局,给出20年来引起水稻产量变化的气候变化背景;揭示出20年温度变化和产量气候信号之间的响应关系。依据农业气象和气候变化,定性和定量分析了水稻主产区长江流域以北、长江流域以南和华南稻区中,水稻生长季的高温和低温事件变化格局及其对水稻产量的影响。采用影响气候作物影响评价模型CERES-Rice针对代表性品种在中国主要稻区进行适用性及其气候模式驱动作物模式模拟可靠性检验,并与区域气候模式(PRECIS)的模拟输出连接CERES-Rice作物模式,模拟评价未来气候变化对我国主要水稻种植区的水稻产量和生育期的影响。评价IPCC最新温室气体排放情景SRES系列的A2和B2情景下,气候变化(本文选取2071—2100年)对水稻生育期和产量的影响,同时应用水稻空秕率与温度(水稻生长关键期的高温和低温)回归方程连接CERES-Rice模型模拟A2和B2气候变化情景水稻生长季关键期极端温度对水稻空秕率的影响。之后讨论了农作物产量对气候变化的响应机理过程和模拟,分析了气候变化对作物影响的遥感评价模型与应用;并介绍了气候变化引起作物干旱的遥感空间分析研究方法。

本书前一部分研究工作承蒙导师叶笃正院士、林而达研究员、延晓冬研究员和许吟隆研究员的悉心指导,在此表示衷心的感谢!研究工作还得到曾昭美研究员、周元泽博士、田展博士、张勇博士、刘布春博士、华丽娟博士、杨复沫博士、曹倩、张景以及日本农业

环境技术研究所 Yokozawa 博士的帮助,在此表示深表感谢。后一部分工作得到侯英雨博士、延昊博士、李莉、李欣、郭文娟、郑凌云等的帮助,在此一并感谢! 本书得到“十一五”国家科技支撑计划重点项目“农业重大气象灾害监测预警与调控技术研究项目”04 课题长江中下游高温热害监测预警技术(2006BAD04B04)(Monitoring and forecasting on high temperature and heat disaster in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River)和科技部农业科技成果项目“遥感光合—水分胁迫作物估产技术在华北地区的推广应用”(2006GB24160430)、863 计划课题“基于星载—地面观测的高光谱多角度技术摄取冬小麦/夏玉米作物水分胁迫信息研究”(2006AA10Z213)的部分研究和出版资助。

由于全球气候变化对农业影响评估的研究方法和手段不同,以及人们对气候系统以及气候和作物复杂关系认识还有一定的局限性,使得气候变化对农业影响评价研究还存在许多的不确定性。本书讨论的主要不确定性来自于影响评价模式和气候模式,其中作物模式中包含了大量过程简化和模拟能力的有限性,如害虫、洪涝等灾害性天气影响;同时模型没有考虑臭氧对作物有害的影响,这也是目前大多数作物模拟模型的不足之处。由于臭氧是光化学烟雾的主要成分,它含有潜在的主要毒素,在欧洲、北美和发展中国家,臭氧已经给作物带来了大范围的减产。而且在世界许多地区臭氧在大气中的浓度正继续增长,因此在气候变化影响评价中臭氧对作物的毒害作用应该一并考虑,以减少影响评价结果的不确定性。本书影响评价结果的气候情景依靠的是 RCM 提供的区域气候信息,尽管 RCM 相对于 GCM 能够提供比较详细区域的信息(特别是下垫面地形影响),但必须强调的是,RCM 并不能代替 GCM 和其他的降尺度方法。为了考虑更多的不确定性以便比较客观地进行影响评价,应该考虑运用不同空间尺度的气候信息进行影响评价;同时不同的气候模式会产生不同区域尺度的详细信息,每一个模式在设计和方法上都有它的优点和缺点,应该用不同的气候模式(包括统计降尺度模式)获得区域气候情景,特别是我国的气候模式。根据目前的模式(气候模式和作物模式)的模拟水平,比较客观的方法应该用多个模式的模拟结果进行对比,使得影响评价结果尽可能多涵盖一切不确定性,为国家制定气候变化的适应性战略政策提供更加客观的、可供选择的科学依据。

在本书的出版过程中,得到气象出版社张斌先生的耐心帮助和支持,特此感谢!

由于时间仓促、作者水平有限,本书一定有诸多的缺点、不足甚至错误,敬请读者批评指正。

作者

2008 年 5 月于北京

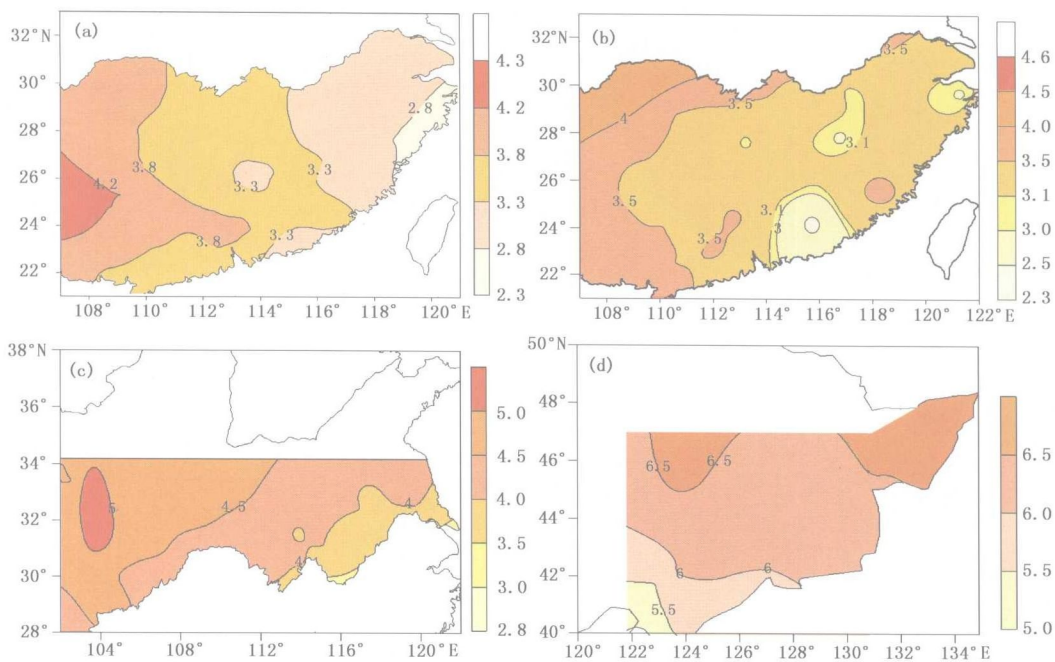


图 6.3 研究区域 A2 气候变化情景下水稻生长季的平均温度相对于基准年的变化(单位:℃)。

(a) 长江流域以南、华南双季早稻区,(b) 长江流域以南、华南双季晚稻区,

(c) 长江流域以北单季早稻区,(d) 东北单季稻区

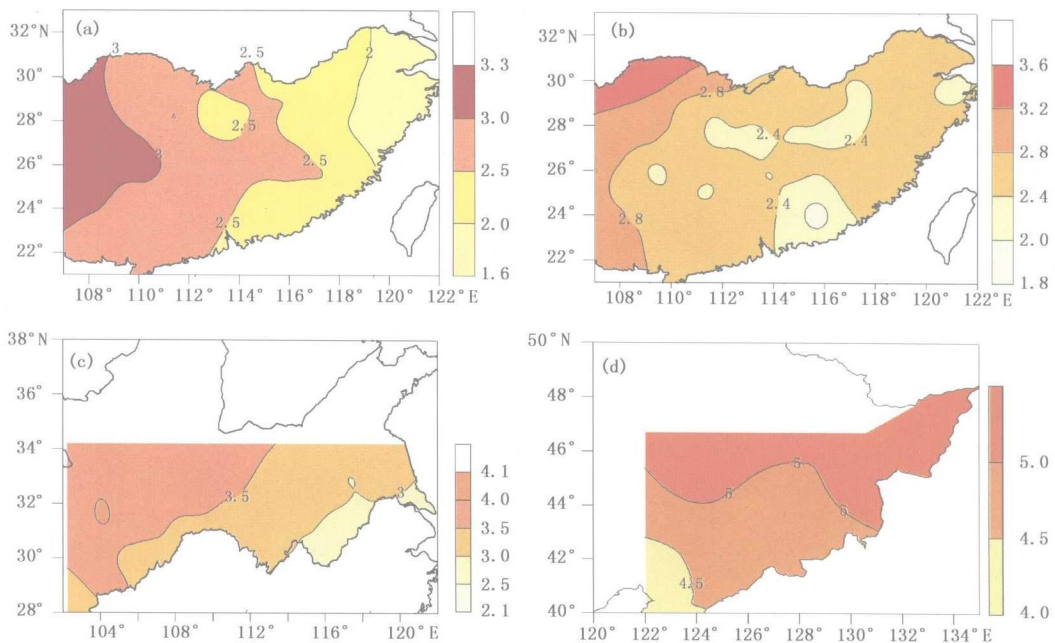


图 6.4 研究区域 B2 气候变化情景下水稻生长季的平均温度相对于基准年的变化。

说明同图 6.3

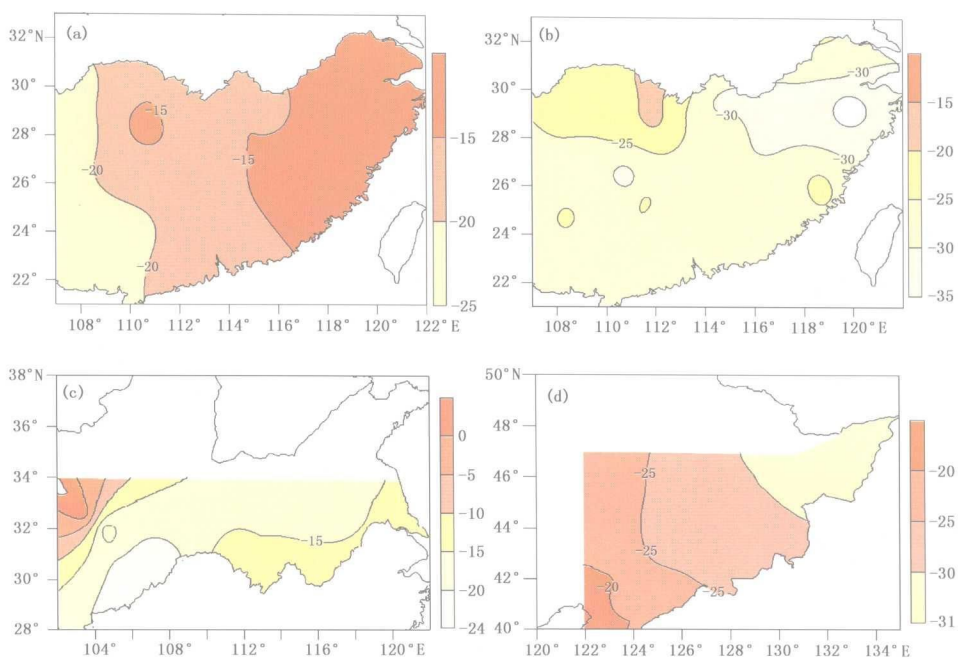


图 6.6 研究区域 A2 气候变化情景下水稻开花期相对于基准年变化(单位:天)。

(a)长江流域以南、华南双季早稻区,(b)长江流域以南、华南双季晚稻区,
(c)长江流域以北单季稻区,(d)东北单季稻区

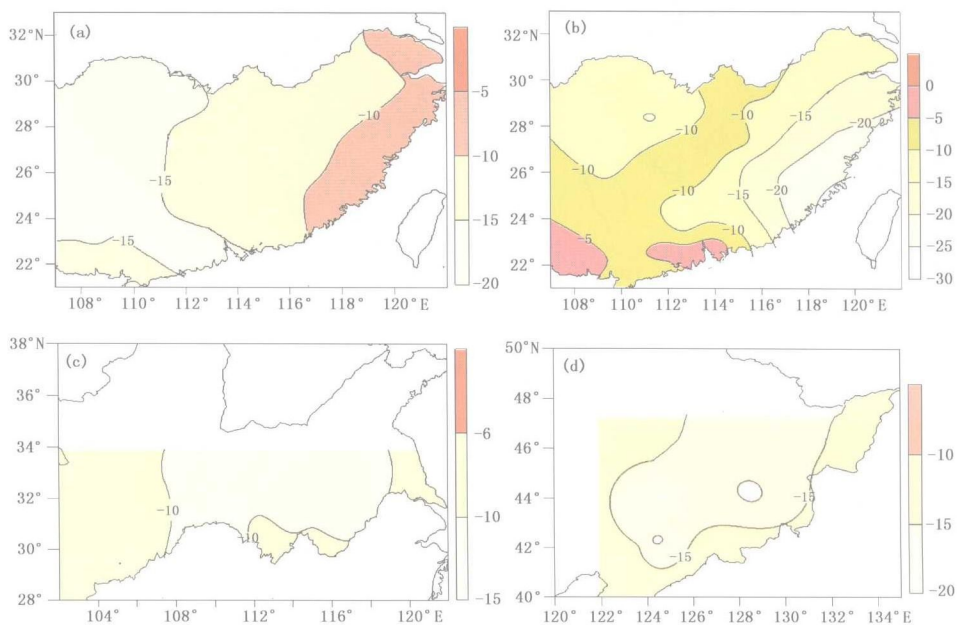


图 6.7 研究区域 B2 气候变化情景下水稻开花期相对于基准年变化(单位:天)。

说明同图 6.6

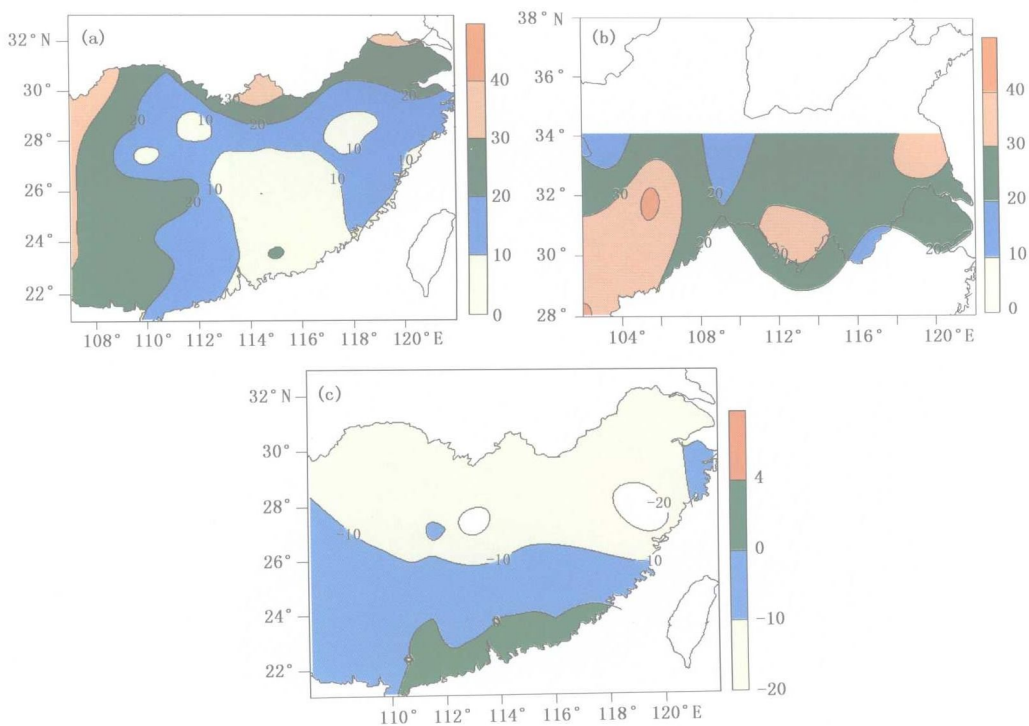


图 6.12 A2 气候变化情景下, 生长季极端温度事件导致水稻空秕率的变化(单位: %)。(a)长江流域以南、华南早稻区(极端高温);(b)长江流域以北单季稻区(极端高温);(c)长江流域以南双季晚稻区(极端低温)

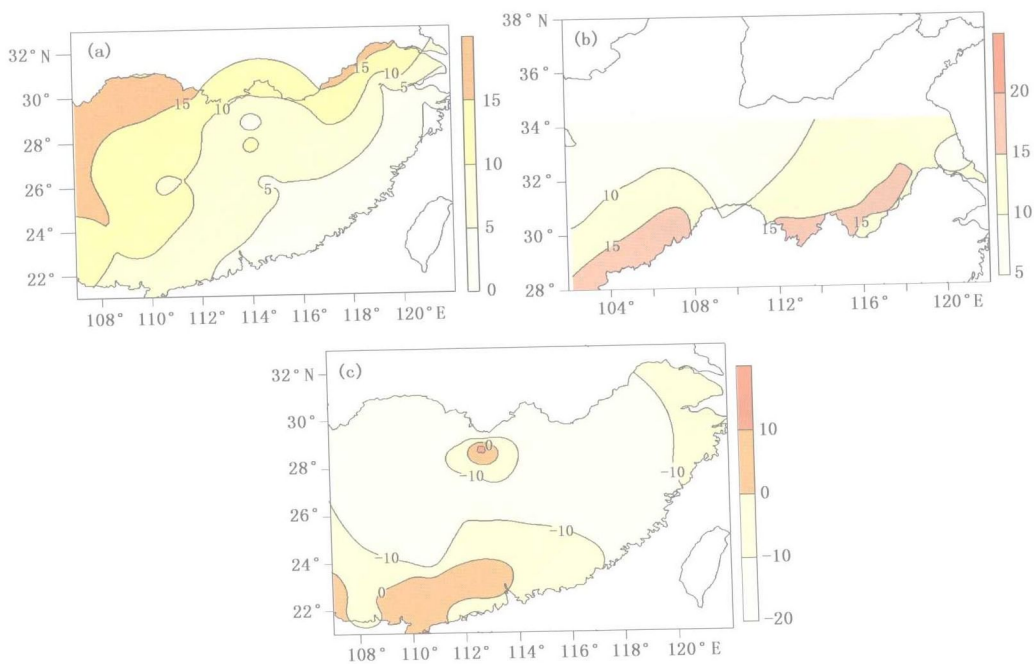


图 6.13 B2 气候变化情景下, 生长季极端温度事件导致水稻空秕率的变化(单位: %)。

说明同图 6.12

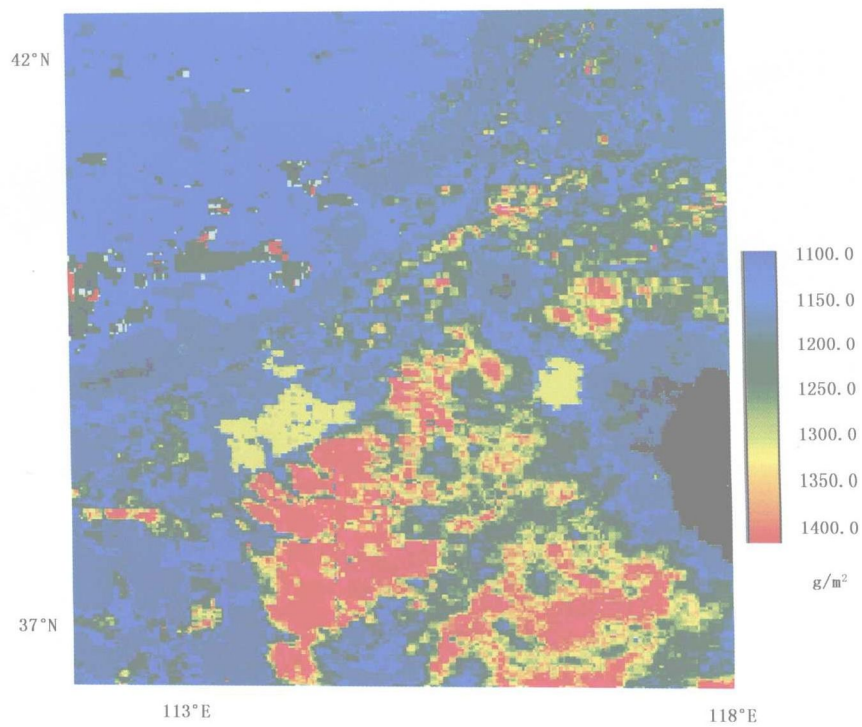


图 8.4 CO_2 倍增华北地区冬小麦产量模拟结果

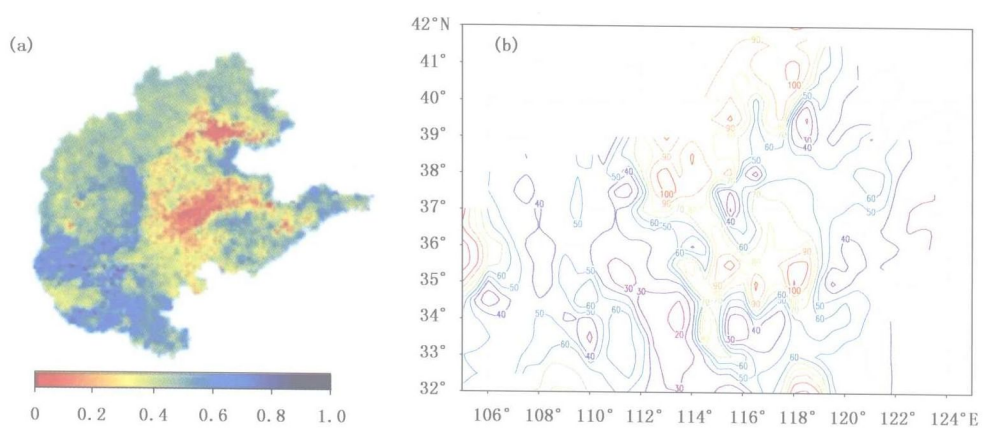


图 9.1 植被缺水指数模型(CWSI)计算的结果(a)与实际观测资料(b)的比较

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 目的和意义	(1)
1.2 国内外气候变化对农业影响的研究现状	(2)
参考文献	(8)
第 2 章 气候变化对水稻产量影响的事实	(11)
2.1 引言	(12)
2.2 数据来源	(12)
2.3 稻区水稻生长季平均温度变化空间格局	(12)
2.4 气候变化背景下水稻产量变化的格局	(15)
2.5 气候产量成分的特征量分析	(23)
2.6 小结	(24)
参考文献	(25)
第 3 章 水稻生长季高温和低温灾害影响	(26)
3.1 水稻高温热害影响研究重要性	(26)
3.2 水稻高温热害进展分析	(30)
3.3 长江中下游地区高温热害的天气分析	(36)
3.4 水稻生长季相对极端温度对水稻的影响	(37)
参考文献	(46)
第 4 章 CERES-Rice 模型在中国主要稻区的适用性检验	(50)
4.1 引言	(50)
4.2 作物模型 CERES-Rice 基本原理	(51)
4.3 作物模型检验	(54)
4.4 小结	(59)
参考文献	(59)
第 5 章 区域气候模式连接作物模式的模拟可靠性检验	(61)
5.1 引言	(61)
5.2 气候模式和作物模式	(62)
5.3 研究方法	(62)
5.4 小结	(63)
参考文献	(64)

第 6 章 未来气候变化对水稻生育期和产量影响评价	(65)
6.1 引言	(66)
6.2 IPCC SRES 系列 A2 和 B2 气候情景构建及其模拟简介	(66)
6.3 A2 和 B2 气候变化情景下中国主要稻区水稻生长季温度变化格局	(68)
6.4 A2 和 B2 气候变化情景对水稻生育期和产量的影响	(68)
6.5 A2 和 B2 气候变化背景下水稻生长季极端温度对其产量构成要素 (空秕率)影响评价	(73)
6.6 小结	(73)
参考文献	(75)
第 7 章 农作物产量对气候变化的响应机理过程和模拟	(77)
7.1 植物光合作用的基本过程	(77)
7.2 植物光合作用的模式	(78)
7.3 叶的 CO_2 途径和气孔导度	(80)
7.4 植物光合作用的基本类型	(82)
7.5 植被光合作用对气候变化的响应机理过程	(84)
7.6 小结	(88)
参考文献	(89)
第 8 章 气候变化对作物影响的遥感评价模型与应用	(90)
8.1 引言	(90)
8.2 农作物产量的相关联概念	(90)
8.3 CO_2 增加对农业的效应	(92)
8.4 CO_2 通量的空间变化规律	(95)
8.5 CO_2 倍增下遥感—光合作物产量响应模型构建	(98)
8.6 小结	(102)
参考文献	(103)
第 9 章 气候变化下作物干旱的遥感空间分析研究	(105)
9.1 前言	(105)
9.2 气候变化下遥感干旱监测研究进展	(105)
9.3 气候变化下作物缺水指数遥感信息模型应用	(108)
9.4 小结	(112)
参考文献	(112)

第1章 绪 论

1.1 目的和意义

自 20 世纪 80 年代以来,全球气候变化预测及其对环境可能造成的影响已成为人类关注的热点问题之一。气候变化已成为全球公认的环境问题,特别是近 10 多年世界范围的气候异常给许多国家的粮食生产、水资源和能源带来了严重影响。因此,能否预测气候异常变化和这些变化带来的影响已成为当前迫切需要解决的重大问题(叶笃正等,1992;陈泮勤等,1993;丁一汇,1993,1997;IPCC,2001)。

气候变化研究的科学目的之一在于研究其对生态系统影响及其响应,并寻找对策,最大限度地减少气候变化带来的不利影响,使地球向着可持续方向发展(彭少麟,1997,1998);通过预测未来气候可能变化,评估气候变化对生态系统、经济和社会的影响以及适应和减缓气候变化的政策选择(秦大河,2005)。农业直接关系到人类生存,农业产量的稳定和可持续性是关键。农作物产量除了受技术、品种因素影响外,一个重要的条件就是气候要素。它既为作物提供物质、能量基础,又是农业技术有效实施的一个限制因素。同时产量变化的总趋势也会因极端天气和气候事件加大而呈现不可持续性,甚至会带来严重的粮食短缺,这在历史上已有过教训。同时,随着中国人口的增长,对粮食的需求也相应增长。

气候变化框架公约指出:“将大气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。这一水平应当足以使生态系统能够自然适应气候变化、确保粮食生产免受威胁并使经济发展可持续进行。”极端天气气候事件是对人类社会危害最严重的自然灾害事件之一,在极端天气气候事件面前人类社会显得相当脆弱。政府间气候变化专门委员会(IPCC)关于全球气候变化的第三次评估报告就指出,如果不采取措施,未来 100 年内全球平均气温可能上升 1.4~5.8℃。全球变暖的进一步加剧,将导致极端天气气候事件更加频繁,严重威胁全球社会经济的可持续发展。对气候变化对粮食的影响问题作出定量明确回答,既是环境外交的需要,也是制定气候变化响应政策的主要依据。

不论人类科学技术如何发展进步,粮食生产受气候变化的影响仍然最为直接(张家诚,1998;Rosenzweig,1992)。中国是世界上最大的水稻生产国,水稻产量大约占到世界水稻产量的一半,稻谷产量在我国粮食生产中居于首位,因此中国水稻的产量不仅影响中国而且对世界的粮食安全具有重要的意义。

本书的一项研究是基于历史观测气候记录和相应的水稻产量记录揭示中国稻区生长季区域气候变化、产量气候成分及其极端温度的变化格局；其次是模拟评价未来不同气候变化情景对中国水稻产量影响的格局以及极端温度事件对水稻产量构成要素影响的格局。通过对历史气候、产量的分析和对未来气候变化及产量影响评价，以期为国家制定适应和减缓气候变化对策和气候谈判提供科学依据。

1.2 国内外气候变化对农业影响的研究现状

自工业革命以来，大气中的 CO_2 浓度已经从原来的 $280 \mu\text{mol/mol}$ 增加到现在的 $370 \mu\text{mol/mol}$ ，目前每年仍增加约 $1.5 \mu\text{mol/mol}$ ，如果不采取限制措施，预计到 2050 年，地球大气 CO_2 浓度将超过 $550 \mu\text{mol/mol}$ 。 CO_2 是绿色植物光合作用的原料。早在 100 多年前，人们就开始利用温室或人工气候室，采用盆栽或根箱等栽培方法研究 CO_2 浓度的增加对植物光合作用、物质生产的影响。

目前，有关全球气候变化的研究大致分为三个方面：1) 研究气候变化的动因，即研究自然因素和人类活动对气候变化所产生的影响；2) 研究气候变化对人类的生存环境及生存质量，包括经济、社会、生态等领域带来怎样的冲击；3) 为了缓和、适应气候变化，人类应该采取哪些行之有效的对策。就农业而言，目前全球气候变化的研究主要集中在观测实验和模型模拟影响两方面。在观测实验方面，研究大气成分变化对农作物生理生态、形态结构及化学组成方面的影响，可分为田间试验和温室或人工气候室实验两种方法。模型模拟可以分为统计分析(回归模型)和动态数值模拟。

1.2.1 气候变化对农作物影响的观测试验研究

大气 CO_2 浓度的升高除了通过温室效应导致的全球气候变化对植物的间接影响外，还直接影响植物的生长发育(Kobayashi et al., 2001)。

这方面的研究国外开展的较多，多采用田间试验和环境控制两种实验方法，其中环境控制试验在野外设立封闭或顶部开放温室，通过人为控制 CO_2 浓度来研究对作物的影响。人们已经利用控制温室环境(Controlled environment)或开顶室(Open-Top Chamber)对作物、草地和树木等作了许多研究。一些研究结果表明，在高 CO_2 浓度下，短期内植物特别是 C_3 植物光合速率都增加(Kimball et al., 1993; Ziska et al., 1991; Bowes, 1993; Herrick et al. 2001)，增幅为 20%~40% (Schimel, 1995)。当植物长期处于高 CO_2 浓度下时，一些植物的光合速率会逐渐下降，最终接近或低于普通大气 CO_2 浓度(Delucia et al., 1985; Tissue et al., 1993)生长的对照水平，这种现象被称为光合作用对高 CO_2 浓度的适应(Acclimation)或下调(Down-regulation)(Delucia et al., 1985; Cure et al., 1986; Moore et al., 1999)。植物长期处于高 CO_2 浓度下，使叶片气孔导度减小导致光合作用降低(Morison, 1987)。但是关于这种适应或下调的机制还不很清楚，人们的观点还不一致：一些研究者认为，植物叶片 Rubisco 酶含量及其活性降低(Yelle et al., 1989)、非结构性碳水化合物含量升高以及叶片含量和叶片面积/质量比降低，是导致光

合作用降低的重要原因;而 Delucia 等(1985)一些学者认为,过多的碳水化合物到支源库失衡而产生的反馈抑制以及叶绿体结构是光合下调的主要原因。

国内近年来也开展控制温室环境对作物进行 CO_2 浓度和光合作用关系的实验研究(刘建国,1992;林而达等,1997;蒋高明等,1997;李吉越,1997;林伟宏等,1999;李伏生等,2003),其中曹仁林等用开顶式熏气罩进行试验表明,花生、大豆叶片光合作用随 CO_2 浓度增加而提高,呈显著正相关;在温度为 $32\sim 39^\circ\text{C}$ 范围内,叶片光合作用率随温度升高而提高;在大致相同条件下,花生叶片光合强度要比大豆叶片高。

但是由于这种控制性试验中温室内的空气湿度、温度、辐射、光强和风等微气候方面与自然条件有较大差异,观测到的植物对 CO_2 浓度变化响应的结果未必与自然条件下植物对 CO_2 浓度的响应完全相同(Delucia et al., 1985; Bowes, 1993)。因此,开放式 CO_2 富集(Free-air CO_2 enrichment)FACE 方法和设施应运而生,FACE 方法是在田间状态下直接输入高浓度 CO_2 ,即在田间设置一定面积的 FACE 处理圈。关于 FACE 对于植物生长发育、物质生产与分配、产量等方面影响,以色列学者 Herbert Z. Enoch 1982 年在美国国际会议上提出 FACE 研究设想(Allen, 1992),1986 年在美国完成了第一个 FACE 装置,1987 年开始用于棉花、小麦等农作物试验。近年来,用于森林、农田和草地等 FACE 系统纷纷出现(Kim et al., 1996; 黄建晔等,2002; 罗卫红等,2003)。这种方法是在自然状态下研究作物对 CO_2 浓度的响应,与控制性试验和开顶式试验相比,被公认为是研究作物对 CO_2 浓度响应的理想手段之一,但是这种方法不能同时模拟 CO_2 引起的升温,是其不足之处。

以上是运用观测实验手段研究气候变化对作物的影响,考虑的影响因子主要是高浓度的 CO_2 、高温和水分等。大气 CO_2 浓度的增加直接影响作物(水稻)的生理活动和生化反应,光合速率加强,短期内气孔导度增加,但随着高浓度 CO_2 处理时间的延长,高浓度 CO_2 对光合速率的促进作用逐渐减小,气孔导度降低,削弱植株的蒸腾降温作用,导致水稻冠层温度和冠层空气温度升高,改变水稻冠层的温度环境,使高浓度 CO_2 下作物的发育进程加快;温度升高,作物发育速度加快,生育期缩小,作物产量下降;高浓度 CO_2 促进作物生育进程,生育期缩短,增加氮肥可以缓解高浓度 CO_2 对水稻生育期的缩短程度,能提高水稻的产量。小麦 CO_2 浓度升高、光合速率增加和蒸散量减少、冠层水分利用效率增加会减缓干旱不利影响。

1.2.2 气候变化对农作物影响的模拟研究

对于气候变化影响作物生产和产量的复杂性,经常需要同时分析处理多种因子变量和相应的数据。逐渐发展了经验统计分析和动态模拟方法,这两种方法是研究气候变化对作物影响模拟的主要方法。

统计学方法是根据生物量和气候因子的统计相关建立数学模型,其基础是大数定律和统计假设检验。研究气候变化和产量的关系,采用回归分析、周期分析、主成分分析、判别分析和方差分析中一种或多种的组合。如根据年平均气温和年平均降水量建立的 Miami 模型和改进的 Thornthwait 模型;半经验半理论模型,如 Chikugo 模型。

研究气候变化对作物生产和产量影响的动态模拟方法最基本的一点是构建土壤—

作物一大气系统动力学方程组(模型)。用动态模拟方法获得的信息丰富,涉及到作物生长发育的各种形状;气候因素定位外因变量或驱动变量,又称强迫变量。包括的子模型有:光合作用、呼吸作用、水分吸收和利用、干物质分配和转移以及发育过程等。动态模拟原则上可输入任意组合的气候要素,以观测产量构成和最终产量的变化,是对作物生理生态过程的动态描述,对研究未来气候变化的影响,无疑是一种有利的影响评价工具。

1.2.2.1 作物模型的研究现状

随着对植物生长机理过程的理解和计算机技术的发展,到 20 世纪 60 年代已经能对植物生理过程进行细致的描述,作物生长动态模拟模型研究开始起步(de Wit, 1965; Duncan et al., 1967), de Wit (1965) 发表的“叶冠层的光合作用”一文,奠定了作物生长动态模拟模型的基础。荷兰 de Wit 学派的系列模型都是以冠层光合作用为基础的,可应用于不同的作物,只需改变作物参数即可。这个模型开始是从研究角度出发的,并在作物生产系统的 4 种生产水平的假设上进行。1982 年, de Wit 和 Penning de Vries 将作物生产系统分为 4 种生产水平:(1)潜在生产(potential production):假定水分供应适宜状态,作物生长取决于天气条件;(2)肥料适宜、水分受限条件下的生产,生长主要受制于整个或部分生长阶段水分短缺的影响;(3)氮素受限条件下的生产,生长主要受制于整个或部分生长阶段氮素短缺的影响;(4)养分限制条件下的生产,生长主要受制于整个或部分生长阶段磷素或其他养分短缺的影响,其他阶段取决于水分和其他情况。随着研究领域的不断扩展, de Wit 学派的模型经历了一系列的发展(de Wit, 1965, 1970; van Kenlen, 1982; Penning de Vries et al., 1982, 1989; Hijmans et al., 1994)。详见表 1.1。

相对于 Wageningen 模型,还有美国的 DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer)系列模型,是在 IBSANT(International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer)计划的资助下开发出来的。DSSAT 模式包括 CERES 和 CROPGRO 系列模型。DSSAT 系列模型模拟作物营养生长和生殖生长发育过程,模拟了作物光合作用、呼吸作用、干物质分配等基本生理生态过程。DSSAT 包含 3 个类型的分析程序:(1)评估生长季内不同管理措施的分析程序;(2)跨年度的不同作物轮作效应的分析程序;(3)链接 GIS 以分析大田或农田间的空间变异性的空间分析程序。其中模拟谷类作物的 CERES 系列包括 CERES-Wheat、CERES-Maize、CERES-Rice、CERES-Barely 一系列模型等(Hoogenboom et al., 1999)。

CERES(Crop Environment through Resource and Environment Synthesis)系列作物模型,首先发表的是 CERES-玉米模型,1986 年正式出版。此后, CERES-小麦、CERES-高粱等模型相继问世。CERES 系列作物模型具有相似的模拟过程,包括土壤水分平衡、发育时段、作物生长等。用积温模拟发育时段,根据叶片数、叶面积增长、光的截获及其利用、干物质在各器官中的分配等模拟作物生长。这些模型已被广泛应用于不同环境条件下的作物估产、干旱评价、作物品种培育等(Hoogenboom. et al., 1999)。

和以上作物模型不同的是澳大利亚的 APSIM(Agriculture Production Systems Simulator)模型。APSIM 模拟系统的核心突出的是土壤而非植被,天气和管理措施引起的土壤特征变量的连续变化被作为模拟的中心,而作物、牧草或数目在土壤中常作为

土壤属性改变的因子,模拟耕地的连作、轮作、间作和农林混作的效应。

表 1.1 荷兰 de Wit 学派的模型系列

	主要特征
ELCROS (Elementary Crop Simulator)	不同条件下作物潜在生产水平,包含详细的机理性的冠层光合作用及呼吸作用的最初设想
BACROS (Basic Crop Growth Simulator)	详细考虑了气孔行为,对碳平衡和蒸腾的描述是机理性的,同化物分配和叶面积分配是经验性的;增加了呼吸作用部分及作物微气象的描述
ARID CROP	加入了水分平衡模型,通过潜在蒸腾和实际蒸腾的关系修正作物生长速度
SUCROS (wheat, maize, potato)	通用性强,用于几种不同种类的作物
WOFOST (wheat, maize)	过程描述是通用的,通过改变作物参数考虑不同作物;一个简单的 GIS 模块,具有面向用户特色
MACROS_ORYZA(rice) (Modules of Annual Crop Simulator)	ORYZA 是在 MACROS 和 SUCROS 基础上开发的水稻模型,ORYZA 水稻模型在 1997 年与 GCM(大气环流模式)结合评估气候变化对亚洲水稻的影响
LINTUL (Light Interception and Utilization)	作物生长速率由冠层辐射截获量和光能利用率决定;空间尺度从单点扩展到区域,模型参数化工作简化

与国外相比,我国作物模型的研究从总体上看起步晚且规模小。20 世纪 80 年代以来,我国一些研究者借鉴国外一些模式的建模思想,通过对世界上应用比较广泛的模型的对比,发展了我国的作物模型系列(高亮之,1992;金之庆,1996;Huang et al., 1996, 1998)推出了水稻钟模型,发展为 CCSODS(Crop Computer Simulation, Optimization, Decision Making System,作物计算机模拟优化决策系统)。这个系列模型的共同功能是在我国不同地区、不同气候、土壤和其他环境条件下,制定出该作物任何品种的最佳技术栽培体系,使我国作物模式化栽培提高到一个新水平。

以上几种具有代表性的作物模型特点:荷兰 de Wit 学派建立的模型强调作物光合作用,主要考虑土壤、气候等因素的作用,是一个通用性强的模型,不同作物可以改换不同的作物参数和土壤、气候数据而共用同一个模型框架。美国 DSSAT 模式(CERES 系列)每一种作物都有其独立的模块,考虑了品种的遗传特性、土壤、天气和管理措施等因素的作用以及土壤碳循环,考虑相同作物不同品种之间的特性,在气候影响评价领域应用比较广泛。国内高亮之等发展的 CCSODS 模式具有机理性和通用性,同时更注重实用性,面向基层农业管理者和农田管理者,提供作物优化栽培体系。

1.2.2.2 气候变化对农业的影响评价方法研究

近年来,国内外相继开展了将作物模型与 GCM 相耦合的方法评价气候变化对作物影响(金之庆等,1992,1996, 2002;林而达等,1997;许吟隆等,1999;张宇等,2000;熊伟

等,2001;Rosenzweig,1992,1998;Mall et al.,2002)。Parry(1999)评价在4种HadCM2模拟情景和1种HadCM3模拟情景下的2080年水稻产量变化情况。Rosenzweig和Iglesias(1998)对全球的水稻生产进行了敏感度分析,得出温度升高4℃情景下全球水稻产量将下降8%。Winter(1999)用GISS、GFDL和UKMO3个大气环流模式产生的气候情景评价非洲、亚洲和拉丁美洲水稻产量的变化情景。其中以美国的研究比较多且全面并具有持续性,涉及到农业水资源的利用和土地利用变化下对农业的影响。美国国家气候变化评价项目组(César et al.,2003)应用GCM HadCM2和农业系统模式EPIC评价2030和2095年气候变化对农业产量和农业生态环境的影响,一些结果表明:灌溉谷物产量增加,豆类在美国南、北平原地区下降,小麦产量有上升的趋势。Newman(1980)预测了美国玉米带的迁移,利用玉米生长生理初始值有效地确定出当前玉米生长的空白带,然后使用种植边界确定玉米生长积温和土壤蒸散量临界值。生长季平均增温1℃,玉米生长临界积温等值线北移,临界土壤等值线东移。Blasing等(1983)运用和Newman同样的生理初始值指标评价美国玉米带迁移,不同之处在于气候情景选择上,选用CO₂倍增情景下温度升高3℃、降水增加80 mm下大气环流模式GCM的模拟输出,结果表明:美国玉米种植带在气候变暖条件下会向东北地区迁移,迁移幅度小于Newman预测幅度。

我国从20世纪90年代初开始,利用统计模型开展气候变化对农业影响评价方面发展较快。邓根云(1993)分析了历史气候波动与作物产量之间的定量关系;高素华(1995)以1951—1987年的农作物产量和气象资料,采用多元回归模型建立了主要作物气象产量预测模型,结果表明华北冬小麦为减产趋势,而西北为增产趋势;东北、华北、西北和西南地区的玉米为增产趋势,长江中下游和华南地区为减产趋势。

应用统计学方法经常遇到的问题是统计样本量的不足和气候变量生物学意义的识别。在使用过程中,对统计推断必须小心谨慎,试验表明,两组样本数不大的伪随机数也可以统计出高的相关系数;从适用的空间范围上,这种方法得到的结论只适用于统计数据的特定环境。我国现有的气候—作物产量序列不太长,使用受到一定限制。

用Thornthwaite模型计算温度变化对我国植被生产力的影响(丁一汇、高素华,1995),假定未来不同温度变化($\pm 1^\circ\text{C}$)、降水变化($\pm 10\%$)组合下的4种气候类型对植被气候生产力的变化;一些学者运用统计模型分析了气候变化对我国黄淮海地区小麦产量的可能影响;Zhao等(1991)假设我国未来的增温幅度分别为1℃、2℃、4℃,降水量变化依次为 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$,然后借用某些积温指标或建立回归方程就气候变化对我国各区粮食产量的影响进行了评估。

国内一些学者在这方面也作了大量工作,在评价方法上,采用各地多年的逐日气候资料,对GCM模拟的月均值订正到逐日的水平进行作物产量的影响评价;王馥棠等(2001,2003)用荷兰的ORYZA水稻模式与GISS、GFDL和UKMO三个GCM模式模拟的气候情景相联接,在不考虑水分影响下研究水稻产量的变化;Jin等(1995)利用SERES-Rice和GISS、GFDL、UKMO三个GCM相连接评价气候变化对中国南方水稻产量和种植制度的影响。林而达等(1997)用IPCC推荐的GFDL、UKMOH和MPI三个平衡模式和CERES-Wheat、CERES-Maize模式以及荷兰的ORYZA水稻模式模拟CO₂