

主编 王修兰

副主编 徐师华

二氧化碳 气候变化 与农业



气象出版社

ISBN 7-5029-2125-7/S · 0279

科技新书目: 395--155 定价: 18.00 元

二氧化碳、气候变化与农业

CO₂, CLIMATE CHANGE AND AGRICULTURE

王修兰 主 编

徐师华 副主编

编辑委员

王修兰 徐师华 万兆良

王春乙 崔读昌 曹仁林

气象出版社

(京)新登字 046 号

内 容 提 要

本书是气候变化对农业影响及对策的研究专著。以实验研究为基础,比较系统地探讨了CO₂浓度增加与小麦等多种作物的反应机制和规律,估算了中国和世界作物在CO₂倍增条件下的碳吸收量,分析了气候变化对农业气候带、农牧过渡带、作物生育期、种植制度、越冬与越夏、虫害发生等的影响,研究了气候变化对施肥量、农药用量、CO₂施肥、稻田有机肥甲烷排放等农业技术的影响,提出了可行的具体对策,为气候变化对农业影响提供了新的论据。

本书可供从事气候变化影响方面的研究人员及农林、气象、环境、生态等部门人员、大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

二氧化碳、气候变化与农业/王修兰主编. —北京:气象出版社, 1996. 10

ISBN 7-5029-2125-7

I. 二… II. 王… III. ①二氧化碳-影响-作物-研究②气候变化-气候影响-农业-研究 IV. S162.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 16672 号

二氧化碳、气候变化与农业

王修兰 主 编

徐师华 副主编

责任编辑:陶国庆 终审:周诗建

责任校对:席大光 责任校编:席大光 封面设计:曾金星

* * *

气象出版社 出版

(北京海淀白石桥路 46 号 邮政编码:100081)

北京怀柔王史山印刷厂印刷

新华书店总局科技发行所发行 全国各地新华书店经销

* * *

开本:787×1092 1/16 印张:11.5 字数:287 千字

1996 年 10 月第一版 1996 年 10 月第一次印刷

印数:1—1200

ISBN 7-5029-2125-7/S·0279

定价:18.00 元

前 言

农业对气候变化的反应最敏感,特别是粮食生产问题尤为突出,像我们这样人口众多的国家,粮食生产一旦出现问题就会引起强烈的社会反响。长期以来,气候不稳定性引起的粮食生产的波动,是困扰我国国民经济发展进程的重要因素,我国粮食生产的年际间平均波动达 5.1%。人口增加,人类活动的不合理性致使农业环境恶化,加剧了不稳定性。大气中 CO_2 含量增加形成的温室效应引起的全球气候变化,使农业的气候问题更加瞩目。因此,气候变化理所当然会引起农业方面的严重关注。

近年来,我国各有关方面开展了气候变化对农业影响的研究和评价,取得了一定的成果。一般性评估已经结束,能够弄清的问题已经基本弄清,弄不清的问题目前也难以弄清。主要的问题是大气环流模型模拟结果的不确定性和缺少实验、监测数据。因此当今的重点研究应该针对大气环流模型评价的不确定性,开展气候变化与农业关系必需的实验、农业温室气体排放和农业环境恶化的监测。这些方面不解决,对农业影响的评价必然也是不确定性的或没有根据的。引进国外的模型缺乏试验的农业影响评价是没有根据的。关于前者是属于气候变化本身的研究课题,是气象学家们的专业,后者是环境保护和气象部门的任务,而气候变化与农业关系的问题,是农业气象学需要通过实验来回答的问题。

本书的主要特点是研究气候变化对农业影响以实验为主或绝大部分都是依据第一手试验资料进行评价的,经得起实践检验。同时 CO_2 浓度增加对农业的直接作用在我国需要作出明确的回答,这一点本书作者也基本做到了。 CO_2 浓度实验表明,大气中 CO_2 浓度增加在一定范围内对作物生产是有利的。农业气候分析还表明,农业通过自身的调节和技术改良是可以适应气候变暖的影响的,不会像当初估计的那样严重。还应当指出, CO_2 浓度试验研究采取的方法是以人工控制条件为主,因为 CO_2 这种单因子多浓度处理、多因子组合实验模拟等只能通过人工控制才能实现,大田中 CO_2 浓度对比实验结果比较接近自然条件,但只增浓度不增温度是不能反映气候变化的情景,难以回答气候变化提出的问题。

当然我们说 CO_2 浓度增加对作物生产有利,并不是主张不减少 CO_2 的排放,从农业环境生态的角度来审视,必须减少温室气体的排放才能从根本上保护全球气候和人类赖以生存的环境,农业生产才能稳定持续地发展。

“气候变化对农业生产影响及对策”为农业部重点课题, CO_2 浓度实验中部分作物属“八五”国家攻关项目。实验研究得到农业部指导和大力支持,由中国农业科学院农业气象研究所主持,中国气象科学研究院农业气象中心、西南农业大学、农业部环境保护科研监测所等共同协作研究,从 1991 至 1995 年历时 5 年完成此项任务。

本书作者:绪论,崔读昌、王修兰、王春乙、徐师华;第一章,王修兰;第二章,王修兰、王春乙、曹仁林;第三章,王修兰、徐师华;第四章,万兆良、刘大永、喻上其;第五章,王修兰、徐师华、李佑祥;第六章,王修兰、王春乙、徐师华、高素华;第七章,王春乙、高素华、白月明、温民、郭建平;第八章,曹仁林、霍文瑞、何宗兰、郝建军、李艳丽;第九章,王修兰、徐师华;第十章,徐师华;第十一章,王修兰;第十二章,崔读昌、王继新;第十三、十四、十五、十六章,崔读昌;第十七章,王修兰、徐师华;第十八章,徐师华;第十九章,万兆良、刘大永、喻上其;第二十章,王修兰、徐师华。梁红、岳琳、何平等为本书绘图、清稿提供了帮助,本书形成过程中引用了我们以往的研究资料,对过去参加过试验的同志和作

者一并深表谢忱。

本书旨在为我国农业持续发展和为农业部门作长远发展决策时提供了解和防避气候变化影响方面可以具体参考的资料、情景和对策。书中不妥之处,恳祈读者赐教。

王修显

中国农业科学院 农业气象研究所

1995年10月28日,北京

目 录

前言

绪论	(1)
----	-----

第一篇 大气中 CO_2 浓度增加与农作物生产

第一章 全球农作物对大气中 CO_2 及其倍增的吸收量估算	(7)
§ 1.1 农作物产量与 CO_2 吸收量	(7)
§ 1.2 农作物光合作用与 CO_2 吸收量	(9)
§ 1.3 CO_2 倍增与农作物对 CO_2 的吸收	(10)
§ 1.4 结论与讨论	(11)
第二章 作物 CO_2 浓度实验的装置和方法	(13)
§ 2.1 概述	(13)
§ 2.2 实验装置和方法	(14)
§ 2.3 性能评价	(20)
§ 2.4 不同装置实验结果比较	(20)
第三章 小麦对 CO_2 浓度倍增的反应	(22)
§ 3.1 CO_2 浓度倍增对小麦生长、发育和产量形成的影响	(22)
§ 3.2 CO_2 浓度倍增对小麦生理特性的影响	(28)
第四章 水稻对 CO_2 浓度倍增的反应	(35)
§ 4.1 不同 CO_2 含量对水稻种子萌发和幼苗的生理效应	(35)
§ 4.2 不同 CO_2 含量对水稻光合作用及经济产量的影响	(37)
§ 4.3 结论	(40)
第五章 玉米对 CO_2 浓度倍增的反应	(41)
§ 5.1 CO_2 浓度倍增对玉米生育和产量的影响	(41)
§ 5.2 CO_2 浓度倍增对玉米光合和蒸腾的影响	(46)
§ 5.3 CO_2 浓度短期处理对玉米的影响	(50)
第六章 大豆对 CO_2 浓度倍增的反应	(53)
§ 6.1 实验方法	(53)
§ 6.2 CO_2 浓度增加对大豆生育和产量的影响	(54)
§ 6.3 CO_2 浓度增加对大豆生理特性的影响	(55)
§ 6.4 CO_2 浓度增加对大豆籽粒成分的影响	(58)
§ 6.5 结论	(59)
第七章 棉花对 CO_2 浓度倍增的反应	(61)
§ 7.1 实验方法	(61)
§ 7.2 CO_2 浓度对棉花生长、发育和产量的影响	(61)
§ 7.3 CO_2 浓度增加对棉花品质的影响	(64)

§ 7.4 结论	(65)
第八章 花生对 CO₂ 浓度倍增的反应	(67)
§ 8.1 材料和方法	(67)
§ 8.2 CO ₂ 浓度与花生光合、生育和产量	(67)
§ 8.3 结论	(70)
第九章 大白菜对 CO₂ 浓度倍增的反应	(71)
§ 9.1 实验材料与方法	(71)
§ 9.2 CO ₂ 浓度倍增对大白菜生长量与生理特性的影响	(71)
§ 9.3 结论	(74)
第十章 黄瓜等蔬菜对 CO₂ 浓度倍增的反应	(75)
§ 10.1 光强与光合作用	(75)
§ 10.2 CO ₂ 浓度与光合作用	(76)
§ 10.3 温度与光合作用	(78)
§ 10.4 综合环境因子对光合作用的影响	(79)
第十一章 国外 CO₂ 浓度增加对作物影响的研究进展	(86)
§ 11.1 实验装置	(86)
§ 11.2 研究材料和方法	(90)
§ 11.3 主要研究结果	(90)

第二篇 气候变化与农业

第十二章 气候变化对农业气候带和农牧过渡带的影响	(96)
§ 12.1 热量条件评估依据	(96)
§ 12.2 温度变化对农田蒸散量的评价方法	(97)
§ 12.3 气候变暖对农业气候带的影响	(99)
§ 12.4 气候变暖对农牧过渡带的影响	(103)
第十三章 气候变暖与种植制度	(106)
§ 13.1 年平均气温与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温	(106)
§ 13.2 气候变暖与种植制度变化	(109)
§ 13.3 复种指数变化	(112)
§ 13.4 多熟制界限北移	(113)
§ 13.5 问题讨论	(114)
§ 13.6 结论	(114)
第十四章 气候变暖对作物生育期的影响	(116)
§ 14.1 气候变暖对水稻生育期的影响	(116)
§ 14.2 气候变暖对小麦生育期的影响	(121)
第十五章 气候变暖对作物越冬越夏条件的影响	(129)
§ 15.1 气候变暖对作物越冬条件的影响	(129)
§ 15.2 气候变暖对作物越夏条件的影响	(132)
§ 15.3 结论	(134)

第三篇 气候变化与农业技术

第十六章 气候变化与农作物虫害发生及农药用量	(135)
§ 16.1 水稻螟虫.....	(135)
§ 16.2 麦蚜越冬率.....	(138)
§ 16.3 粘虫.....	(139)
§ 16.4 玉米螟.....	(140)
§ 16.5 棉铃虫.....	(142)
§ 16.6 结论与对策.....	(144)
第十七章 气候变暖对土壤施肥量和肥效的影响	(145)
§ 17.1 土壤速效 N 变化与温度的关系	(145)
§ 17.2 不同有机肥全 N 释放量	(149)
§ 17.3 结论与对策.....	(151)
第十八章 CO₂ 施肥效果	(153)
§ 18.1 黄瓜.....	(154)
§ 18.2 芹菜.....	(156)
§ 18.3 榨菜.....	(156)
§ 18.4 国内外关于 CO ₂ 施肥在蔬菜生产中的应用	(157)
第十九章 水稻田施肥排放甲烷量的规律	(163)
§ 19.1 材料与方法.....	(163)
§ 19.2 结果与分析.....	(163)
§ 19.3 对策.....	(164)
§ 19.4 结论.....	(165)

第四篇 结论与对策

第二十章 结论与对策	(166)
§ 20.1 结论.....	(166)
§ 20.2 对策.....	(169)

CO₂, climate change and Agriculture

Contents

Foreword	
Preface	(1)
Part I CO₂ concentration enhancement in atmosphere and agricultural production	
Chapter 1 The estimation on CO₂ absorption of crop under current and double CO₂ conditions in the world	(7)
§ 1.1 Crop production and CO ₂ absorption in China and the world	(7)
§ 1.2 Crop photosynthesis and CO ₂ absorption	(9)
§ 1.3 Double CO ₂ and CO ₂ absorption of crop	(10)
§ 1.4 Conclusions	(11)
Chapter 2 Experimental installations and methods controlling CO₂ concentration for crop growing	(13)
§ 2.1 Overviews	(13)
§ 2.2 Experimental installations and methods	(14)
§ 2.3 Feature assessment	(20)
§ 2.4 Experimental result comparison for different installations	(20)
Chapter 3 The responses of wheat to double CO₂ concentration	(22)
§ 3.1 The impacts of double CO ₂ concentration on growth and development and yield formation for wheat	(22)
§ 3.2 The impacts of double CO ₂ concentration on physiological feature for wheat	(28)
Chapter 4 The responses of rice to double CO₂ concentration	(35)
§ 4.1 Physiological effects of rice seed germination and seedling under different CO ₂ concentration	(35)
§ 4.2 The impacts of different CO ₂ concentration on photosynthesis and yield for rice	(37)
§ 4.3 Conclusions	(40)
Chapter 5 The responses of corn to double CO₂ concentration	(41)
§ 5.1 The impacts of double CO ₂ concentration on growth and development and yield for corn	(41)
§ 5.2 The impacts of double CO ₂ concentration on photosynthesis and transpiration for corn	(46)
§ 5.3 The impacts of short-term treatment under different CO ₂ concentration on corn	(50)
Chapter 6 The responses of soybean to double CO₂ concentration	(53)
§ 6.1 Experimental methods	(53)
§ 6.2 The impacts of CO ₂ concentration increase on growth and development and yield for soybean	(54)
§ 6.3 The impacts of CO ₂ concentration increase on physiological feature for soybean	

.....	(55)
§ 6.4 The impacts of CO ₂ concentration increase on kernel component for soybean	(58)
§ 6.5 Conclusions	(59)
Chapter 7 The responses of cotton to double CO₂ concentration	(61)
§ 7.1 Experimental methods	(61)
§ 7.2 The impacts of CO ₂ concentration increase on growth and development and yield for cotton	(61)
§ 7.3 The impacts of CO ₂ concentration increase on quality for cotton	(64)
§ 7.4 Conclusions	(65)
Chapter 8 The responses of peanut to double CO₂ concentration	(67)
§ 8.1 Material and methods	(67)
§ 8.2 CO ₂ concentration and photosynthesis, growth and development and yield for peanut	(67)
§ 8.3 Conclusions	(70)
Chapter 9 The responses of Chinese cabbage to double CO₂ concentration	(71)
§ 9.1 Experimental material and methods	(71)
§ 9.2 The impacts of double CO ₂ concentration on growth and physiological feature for Chinese cabbage	(71)
§ 9.3 Conclusions	(74)
Chapter 10 The responses of cucumber etc. vegetable to CO₂ concentration increase	(75)
§ 10.1 Solar radiation and photosynthesis	(75)
§ 10.2 CO ₂ concentration and photosynthesis	(76)
§ 10.3 Temperature and photosynthesis	(78)
§ 10.4 The impacts of composite environmental factors on photosynthesis	(79)
Chapter 11 The development of experimental study on the impacts of CO₂ enhancement on crop abroad	(86)
§ 11.1 Experimental installations	(86)
§ 11.2 Material and methods	(90)
§ 11.3 Main study results	(90)
Part I Climate change and agriculture	
Chapter 12 The impacts of climate change on agroclimatic zone and interlock area of farming-pastoral region	(96)
§ 12.1 Assessment basis of heat conditions	(96)
§ 12.2 Assessment method of field evapotranspiration from temperature change	(97)
§ 12.3 The impacts of climate warming on agroclimatic zone	(99)
§ 12.4 The impacts of climate warming on interlock area of farming-pastoral region	(103)
Chapter 13 Climate warming and cropping systems	(106)
§ 13.1 Average annual air temperature and accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$	(106)
§ 13.2 Climate warming and changes of cropping systems	(109)
§ 13.3 Change of multiple cropping index	(112)
§ 13.4 The northward movement of limit line of multiple cropping	(113)
§ 13.5 Problem discussion	(114)

§ 13.6	Conclusions	(114)
Chapter 14	The impacts of climate warming on growth phase of crop	(116)
§ 14.1	The impacts of climate warming on growth phase of rice	(116)
§ 14.2	The impacts of climate warming on growth phase of wheat	(121)
Chapter 15	The impacts of climate warming on over winter and over summer of crop	(129)
§ 15.1	The impacts of climate warming on over winter conditions of crop	(129)
§ 15.2	The impacts of climate warming on over summer conditions of crop	(132)
§ 15.3	Conclusions	(134)
Part III Climate change and agricultural technology		
Chapter 16	Climate warming and insect pests generation and pesticide requirment	(135)
§ 16.1	Rice borer(Asiatic rice borer,yellow rice borer)	(135)
§ 16.2	Rate of over winter aphid	(138)
§ 16.3	Army worm	(139)
§ 16.4	Corn borer	(140)
§ 16.5	Boll worn	(142)
§ 16.6	Conclusions and strategies	(144)
Chapter 17	The impacts of climate warming on fertilizer requirment and effect in soil	(145)
§ 17.1	The relationship between changes of repidly available N in soil and temperature,	(145)
§ 17.2	Total N released in soil fertilized different organic fertilized	(149)
§ 17.3	Conclusions and strategies	(151)
Chapter 18	The effects of CO₂ fertilized	(163)
§ 18.1	Cucumber	(154)
§ 18.2	Celery	(156)
§ 18.3	Stem mustard	(156)
§ 18.4	The application of CO ₂ fertilization in vegetable production in China and abroad	(157)
Chapter 19	The rule of methans emission from fertilizing paddy field	(163)
§ 19.1	Material and methods	(163)
§ 19.2	Results and analysis	(163)
§ 19.3	Strategies	(164)
§ 19.4	Conclusions	(165)
Part IV conclusions and strategies		
Chapter 20	Conclusions and strategies	(166)
§ 20.1	Strategies	(166)
§ 20.2	Conclusions	(169)

绪 论

基本的农业生产是在自然条件下进行的,受天气气候的影响。作物生长期间、年际间和长期的农业气候条件变化是经常造成农业丰歉的主要原因。温室效应引起的全球气候变化对农业会有什么影响,这是需要回答的问题。经过对 CO_2 浓度的作物反应模拟实验、农业气候分析、肥效试验和虫害分析得出温室气体、温度和降水三个主要因子的影响是不同的。 CO_2 浓度增加对农业生产是有利的。温度增高的影响一分为二,对粮食的总产有利,对单产不利;降水量变化是最不确定的因子,对农业的影响难以做出肯定的评估。

目前关于气候变化对农业影响的分析缺乏实验研究的基础,因而讨论的问题多较虚,针对这一不足,我们开展了实验并结合长期的试验工作来讨论气候变化对农业的影响。

1. 温室效应

自工业革命以来,由于人类活动,大气中的 CO_2 含量在不断增加,由 1765 年的 275×10^{-6} 增至目前的 350×10^{-6} ,据预计,到下世纪 2025 年将比 1765 年增加 1 倍,到下世纪末将比目前增加 1 倍。地面温度将增高 $1.5 \sim 4.5^\circ\text{C}$,平均每 10 年增加 0.3°C 左右,至 2025 年全球平均温度比现在增高 1°C (较工业革命前增高 2°C),下世纪末全球平均温度较现在增高 3°C (较工业革命前增高 4°C)。无论 IPCC(intergovernmental panel on climate change,联合国政府间气候变化专门小组)1990 年第一次评估报告,还是 1992 年的补充篇,都认定这一评估的范围^[1]。

关于降水量,在第一次评估中只作了北美中部、南亚、萨赫勒、南欧、澳大利亚等地区的评估,评估者认为信度不高,在补充报告中没有涉及降水量的评估,降水的不确定性使大多数农业影响评价没涉及到,这是不足之处,而从农业对气候反应的现实情景来看,很可能是降水量变化对农业的影响远远大于温度的效应。

我们关于 CO_2 、农业气候的评估和对策都是以 IPCC 的上述气候变化框架来最后评价对农业的影响^[1,2]。

2. 气候变化与农业生物过程的相互作用

气候的形成与变化和农业紧密相关。气候变化过程引起生物过程的变化,而且生物变化过程比其它物理过程更复杂。气候变化对生物过程的影响包括对光能转换、水分循环、气体循环、养分循环等过程,进而影响生物量积累过程。同时生物通过光合、呼吸、蒸腾、排放等作用对气候变化产生的反馈,在一定程度上影响气候变化过程,因此气候变化与生物过程是相互作用的。反馈的机制与过程使问题的复杂性更加深。其一个方面的表现是气候变化过程与生物过程并不同步,即便是短期季节性变化也会出现滞后现象;另一方面由于生物适应性或生物气候临界值变动,农作物的生物量不会与气候变化数量幅度等效。

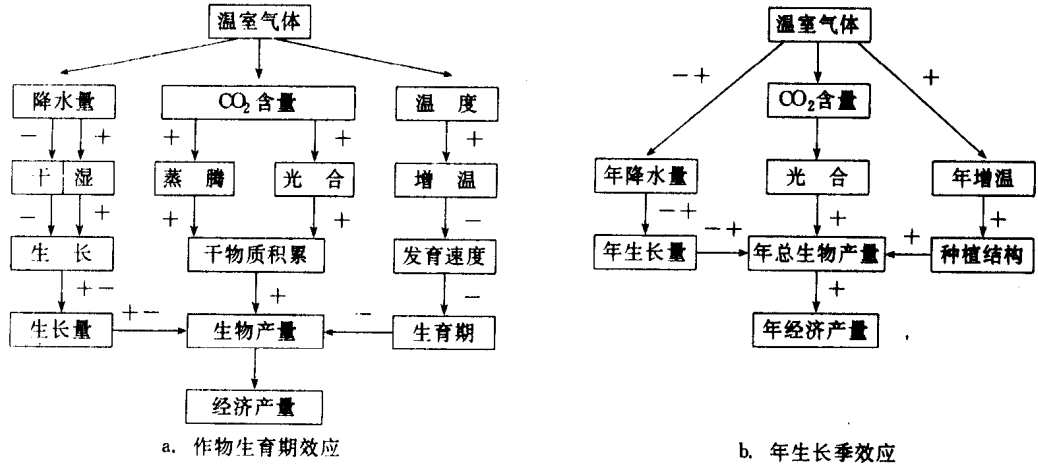
大气中 CO_2 增加引起的温室效应和对生物过程的影响,无疑是气候变化与农业关系的基本问题。 CO_2 浓度增加不仅引起气候变化,而且影响农业生物的能量转换效率和碳素循环过程。在 WMO《世界气候计划》中亦要求把大气中 CO_2 含量增加对各种作物生产的作用作为重点来描述。在我国有关气候变化中, CO_2 对作物生产的作用和对气候的影响研究还很少,这就是本书将它作为重点问题进行研究,并将其结果反映出来的出发点。

气候变化中大气-作物-土壤之间的水分循环过程在气候变化与农业生产关系中十分重

要,直接影响农作物的产量,在我国尤为突出的是 7.869 亿亩^①灌溉农田中有 4.813 亿亩稻田(1992 年农业年鉴),它对水分循环过程和气候变化过程的影响的份量并不十分清楚,稻田排放的甲烷的温室效应也是气候变化中需要研究清楚的问题。

农田植被面积指数随生长季和种植制度变化,而农田植被在总的自然植被中占有重要地位,特别是平原地区农田植被是主要的。农田植被参与气候变化过程的作用是很明显的,其生物量是自然植被的几倍或几十倍。吸收大量的大气 CO₂,利用太阳辐射的热能和大气降水量,通过叶、气温差降低近地层气温,改变贴地层乱流交换和热量、水分、动量等能量输送,对气候变化过程产生影响,同时气候变化将对农田植被的生物量产生影响。当温度增高、水分增加时,农田植被光合作用增加,也增加 C 的吸收量;而温度增高,水分减少,将增加养分和水分消耗的逆过程。

下图表示温室效应引起的两种农作效应,图 a 显示对一种作物生育期效应,大气中 CO₂ 含量增加,温度增高生育期缩短是减产,降水量减少或过多是减产,适宜是增产,影响后果是单季作物可能减产。图 b 显示作物全年生长季效应,大气中 CO₂ 含量增加是增产,温度增高、生长季延长、复种指数提高是总产量增加,降水过多或过少都是减产,适宜是增产,影响后果是多熟制作物生产可能增产。



温室效应的两种农作物效应
+ 正效应 - 负效应

3. 敏感性、脆弱性、适应性、适宜性

(1) 敏感性

敏感性是指农业对气候变化的反应动态。农业对气候变化极其敏感,主要反映在农产品首先是粮食的供应问题^[3],粮食生产受天气气候的影响和制约。像我们这样人口、土地条件的国家,粮食的敏感性表现在气候条件不同的年份有不同收成,每年都有不同数量的粮食进口,因此气候变化不仅影响我国的粮食生产,而且影响粮食世界市场贸易的数量和价格,一旦粮食出现问题会引起强烈社会反响。可见在社会各种行业中农业特别是粮食生产对气候变化最敏感。

农业对气候变化的敏感性表现在作物的反应上,极易使农作物生长、发育和产量形成受到影响,如冬小麦,在冬季严寒的年份越冬受影响,产量较低;冬暖的年份产量较高。北方水稻、玉米在秋季温度高灌浆期延长的年份收成好。东北地区生长期积温增加 100℃,粮食产量可以

^① 1 亩 = 666.6m², 下同。

增加10%左右。干旱的1972年玉米产量比1971年减产10.5%。可见作物对气候变化的反应是敏感的。

本书研究的作物生育期、越冬期、越夏期等都是针对气候变化敏感性进行的。地区不存在敏感或不敏感,地区的农业生产对象存在敏感性,气候变化的区域反应是属脆弱性的范畴。

(2) 脆弱性

脆弱性是指农业对气候变化影响的承受能力。农业对气候变化反应的脆弱性主要表现在地区上。对气候变化不利的承受能力较低的脆弱地区,主要在农业气候过渡地带、旱涝交替出现的地区、气候变率大的地区。农牧过渡地带是东亚东南季风活动的末梢,降水量300~500mm,降水量相对变率20%~30%,生长季达到40%~60%,水分保证率低,农业生产不稳定,产量不高。气候变暖温度增高,使年蒸散量增大30~80mm,加剧农业生产(种植业和牧业)的脆弱性。亚热带与暖温带交界的过渡地带是季风雨带移动易变地区,常形成梅雨期或空梅,造成旱涝灾害,气候变化使季风环流加强或减弱,都能加剧这一地区的农业气候灾害,使农业生产的脆弱性加剧。我国北方有面积降水少的雨养旱作农业区,会因气候变化使农业脆弱性增加。沙漠化边缘的农业区也是极其脆弱的。

上述可见,脆弱性具有地带性特征,具有脆弱的地区性条件。如两湖盆地、淮河流域、海河流域、辽河流域下游等低洼易涝,再加之排涝设施不完善,对洪涝承受能力低;华北平原北部气候变率大,地势低洼,灌排设施不配套,对旱涝承受力都较低。黄河流域、淮河流域有许多地区低洼易涝,同时季节性干旱严重,旱涝交替出现,这些地区是脆弱的。因此气候变化的农业脆弱性一方面存在较多的不利农业气候条件;另一方面存在承受力低的农业自然条件。

(3) 适应性

农业对气候变化具有敏感性、脆弱性,同时农业生产对象对气候变化也具有适应性。即农业生产有一定的应变能力。

农作物对温度与水分的适应性很宽,如冬小麦能适应生育期有效平均气温7~18℃的幅度,能在生育期降水量250~800mm的范围种植。通过不同的生态类型(强冬性、冬性、弱冬性、春性、强春性)来适应气候变暖。根据王修兰等(1994)研究结果,随着大气中CO₂浓度增加,作物光合作用明显增强,而呼吸作用却随CO₂浓度增加而减弱或略有增加,减少了物质消耗,减弱了增温的影响。CO₂含量增加使作物气孔开度变小,扩散阻力增大,减弱了蒸腾,提高了水分利用率。她还发现一个适应性现象,即CO₂含量增加至1倍以上时,作物承受高温胁迫的能力增强。温度增高发育速度加快,以缩短生命周期(生育期)来适应高温环境。可见,作物可以通过自身的生长发育调节机制来适应气候变化的影响。

农业对气候变化的适应力是可以调整的。气候变暖可以选种喜温耐热性作物,选用晚熟品种避免生育期缩短的影响;调整种植制度、种植比例以适应气候变暖;采用农业技术以改善适应能力;品种生态类型调整、选育抗逆性强的品种、增施肥料、节水灌溉、覆盖、用生长生理调节剂等都能有效地改善和提高对气候变化的适应能力。对此,J·W·Rosenblum也作出了对农业有益的评估^[4]。总之。可以利用农业的适应力和适应性对策来减轻气候变化的不利影响。

(4) 适宜性

气候变化对农业的影响不单是不利,同时也有利。因此在对气候变化反应的敏感性、脆弱性等评价的同时,须进行适宜性评价。

实验结果表明,大气中的CO₂含量增加有利于作物生产。J·W·Rosenblum估算,2030年大气中CO₂倍增(比工业革命前),作物生产力比1983年提高20%。中国农业科学院王修

兰、中国气象科学研究院王春乙、西南农业大学万兆良、农业部环境监测保护研究所曹仁林等研究,CO₂ 倍增对几种主要作物产量可以提高 6%~24%。实验诊断表明,CO₂ 含量增加对作物是一种有利的资源。

气候变暖近地层气温增高对农业生产的影响有两重性:不利的方面是温度增高作物生育期缩短,单季产量会受到影响;蒸发与蒸腾增加,气候变干或水分不增加的地区,农业水分供应会受到影响,而实际灌溉量需要增加,灌溉面积减少;有利的方面是增加热量资源,延长生长季,有利于作物多熟种植,高产作物和某些特产农产品的种植面积扩大。单从温度影响而言,多熟种植和高产作物、晚熟品种种植面积的增加,将弥补和超过温度增高对缩短生育期的影响。气候变暖对我国的作物全年生产是有利的。

水分的变化对农业生产是至关重要的,但降水量变化的预测是极不确定的。多个 GCM (global circulation model,全球环流模式)模型模拟结果不一致,很难作出准确评价。但从温度增高蒸发增加来评估,以彭曼公式计算蒸发量随温度变化关系得到,年平均温度增高 1°C,年蒸散量增加 27~40mm。当 CO₂ 增加一倍时,温度增高 2°C,年蒸散量的增加幅度也将提高一倍。从适宜性来看,水分问题的影响远远大于温度的影响。

对农业的适宜性不仅需进行单项要素的评价,而且应进行多要素的综合评价,最后才能做出对农业影响的正确判断。应当指出,降水模型的可信度将成为农业适宜性评价准确性的关键^[5]。

4. 本研究取得的进展

(1) CO₂ 倍增与作物关系研究的进展

我国关于温室气体对农业直接影响的研究起步较晚。在 70 年代末,施定基、徐师华等人开展了设施农业的 CO₂ 施肥效果的研究,80 年代初徐师华等研究 CO₂ 不同浓度对温室黄瓜产量的影响。90 年代开始从气候变化的角度出发研究 CO₂ 浓度增加对作物的影响,而且从蔬菜转向研究大田作物。通过 4 年的实验,研究不同 CO₂ 浓度的作物反应,在作物生长量、干物重、产量、光合速率、蒸腾系数等方面获得了大量系统的数据,揭示了随 CO₂ 浓度增加作物生长量、产量、光合速率等增加和蒸腾系数减少的规律。填补了我国这方面研究的空白,丰富了我国气候变化影响农业研究的内容。

在不同 CO₂ 浓度下对作物生育期各阶段影响的研究的系统性方面有些进展。近 10 年来国内外有关全生育期的各生育阶段对 CO₂ 浓度反应的报导很少,而以苗期、花期的实验资料居多(1984 年 Hugo 等、1985 年 Roger 等、1985 年 Pierce 等、1986 年 King 等、1991 年 Katsu、1988 年 Cure 等),而且多以对干物质累积量和 CO₂ 同化速率居多(1994 年 Keith 根据 342 篇论文综述)。本书的结果是通过小麦、玉米、大豆、水稻、棉花、花生、大白菜等作物各生育阶段对 CO₂ 浓度反应的研究,系统地探讨了作物各生育阶段多项生物量和生理反应。

在作物群体光合速率测定方面,国内外关于 CO₂ 浓度实验中大多只作了单叶的光合速率的测定,王修兰等人则测定了试验群体光合速率,使实验结果更接近作物实际情况。

在光合反应的日变化方面,过去国内外未涉及到小麦、玉米、大豆、大白菜等作物光合速率日变化的测定。王修兰等在光合作用日变化测定中发现自然条件下和 CO₂ 浓度 350×10^{-6} 实验条件下光补偿点比 700×10^{-6} 浓度下明显下降,CO₂ 浓度增加,延长了光合时间,增强了同化能力,而且因温度升高而出现的光合“午休”现象也随 CO₂ 浓度增加有所缓解。日变化的研究结果,为 CO₂ 浓度增加促使作物增产提供了实验证据和理论依据。

王春乙等对大豆、棉花等作物脂肪、蛋白质、纤维强度等进行了测定,找出不同 CO₂ 浓度

下品质的不同。国内外就不同 CO_2 浓度下的作物品质的测定研究较少。

高温($30\sim 40^\circ\text{C}$)条件下 CO_2 浓度增加提高了作物抗高温的能力,表现在 700×10^{-6} 、 600×10^{-6} 、 500×10^{-6} 浓度下都比 350×10^{-6} 的光合产物高,其它性状也表现出优势,这些新发现说明 CO_2 浓度倍增有减弱温度增高引起的不利影响。

(2) 作物吸碳(C)量的估算

根据世界和中国作物产量与作物固定 CO_2 量的关系及作物光合速率实验数据,估算世界农作物(小麦、玉米、水稻、大豆、棉花、高粱、谷子、薯类等) CO_2 吸收量,并根据作物对 CO_2 倍增反应的实验诊断及产量进而估算出,在 CO_2 浓度倍增条件下,按第一种构想(550×10^{-6}) CO_2 吸收量将增加 12.0%,中国由 5.5 亿 tC 增至 6.2 亿 tC,世界由 28.9 亿 tC 增至 32.4 亿 tC;按第二种构想(700×10^{-6})将增加 21%~26% 吸收量,中国增至 6.6~6.9 亿 tC,世界增至 34.1~36.2 亿 tC。

(3) 施肥与虫害研究的进展

通过土壤施用化肥氮(N)素释放量试验,得出温度每增高 1°C ,土壤中速效 N 的释放量增加 4%, CO_2 浓度达到 550×10^{-6} ;温度增高 2°C ,N 的释放量增加 8%,至下世纪末 CO_2 浓度达 700×10^{-6} ,温度增高 4°C ,N 的释放量需增加 16%,这是在日平均气温 $17\sim 27^\circ\text{C}$ 的试验结果。根据有的文献资料,在温度 $10\sim 30^\circ\text{C}$ 范围内,温度提高 1°C ,N 素损失 5%^[6]。下世纪我国 N 素损失估计达 10%~20%。

通过对几种作物害虫随温室效应增强其发生代数 and 农药用量增加的量推算, CO_2 倍增时我国水稻二化螟、粘虫、麦蚜、玉米螟、棉铃虫等的农药用量需增加 20%~100%;到下世纪末,农药用量需增加 40%~200%。

(4) 农业气候研究的进展

CO_2 倍增时温度增高 2°C ,热带北界北移 1.5~2 个纬度,约 150~200km;亚热带北界北移 2 个纬度,约 200km;农牧过渡带向南移 0.2~1.6 个纬度,约 20~180km。

CO_2 倍增时温度增高 2°C ,三熟制北界北移 2~4 个纬度,约 200~400km,二熟制北界北移 0.3~5 个纬度,约 30~500km。

通过农业气候分析,气候变暖,我国作物将出现越冬越夏问题。冬暖带来冬作物暖害,夏季高温增加热害,而且越夏问题比越冬问题更为严重。

我国作物生育期因气候变暖而缩短,对暖温带、亚热带作物单产有一定的不利影响。

(5) 提出对策

根据 CO_2 浓度增加和温度增高提出了作物布局的调整,包括地区和季节安排的调整。

根据 C_3 和 C_4 作物对 CO_2 的反应不同,提出增加扩大 C_3 作物生产,在 C_4 作物优势地区扩大 C_4 作物生产。

根据 CO_2 浓度实验结果,为目前设施农业 CO_2 施肥提供施肥时期、剂量等指标。

根据全年气候变暖,提出种植制度的调整,包括熟制调整、茬口安排、品种搭配等。

根据气候变暖土壤化肥分解加快,提出化肥深施(10cm 以下)和几种有机肥混施的措施。

根据害虫繁殖代数增加,农药用量增加,提出需研制新的防治技术的建议。

5. 面临任务

温室效应引起的气候变化对农业影响的趋势性评估已基本完成。如把这种评估拖延到 CO_2 倍增时就没有什么意义了。我们在研究温室效应引起的气候变化对农业影响的评估中发现,涉及的基本问题仍是气候与农业的关系,因此需要回到这一基础性研究上来,只要气候与