气候变化对农业气候资源有效性的影响评估

郭建平 等 著

气象出版社
China Meteorological Press

气候变化对农业气候资源有效性的影响评估

郭建平 等 著

气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书系公益性行业(气象)科研专项经费项目“气候变化背景下农业气候资源的有效性评估”的研究成果。主要介绍了1951—2100年我国主要农业气候资源的空间分布特征及演变趋势,我国东北春玉米、黄淮海地区冬小麦和夏玉米、南方水稻生长季农业气候资源、气候生产力及农业气候资源利用率等的分布特征和演变趋势,并以东北地区为例,分析了农业适应气候变化措施对作物生产力和农业气候资源有效性的贡献。

本书可供农业、农业气象,特别是气候变化和农业相关领域的科研和业务人员参考,也可为政府制定农业适应气候变化措施政策提供参考依据。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化对农业气候资源有效性的影响评估/郭建平等著. —北京:气象出版社,2016.12

ISBN 978-7-5029-5779-7

Ⅰ.①气… Ⅱ.①郭… Ⅲ.①气候变化-影响-农业气象-气候资源-评估 Ⅳ.①S162.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第274827号

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　　**邮政编码**:100081
总 编 室:010-68407112　　**发 行 部**:010-68409198
网　　址:http://www.qxcbs.com　　**E-mail**:qxcbs@cma.gov.cn
责任编辑:陈　红　王小甫　　**终　　审**:袁信轩
封面设计:博雅思企划　　**责任技编**:赵相宁
印　　刷:中国电影出版社印刷厂
开　　本:787 mm×1092 mm　1/16　　**印　　张**:19
字　　数:480千字
版　　次:2016年1月第1版　　**印　　次**:2016年1月第1次印刷
定　　价:98.00元

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

粮食安全是国民经济发展的基础，是国家发展和社会稳定的根本保障。气候变化将对我国农业生产和粮食安全产生重大影响，已有的研究表明，受未来气候变化的影响，我国农业生产将面临三个突出的问题：一是农业生产的不稳定性将增加，产量波动会变大；二是农业生产布局和结构将发生变化；三是农业生产成本和投资将加大。而产生这些严重影响的根本原因是农业气候资源的变化。因此，开展气候变化背景下农业气候资源的演变趋势及有效性评估技术研究是农业应对气候变化，合理开发利用气候资源的重要前提和基础。另据预测，2020 年，我国人口总量将达到 14.6 亿；人口总量高峰将出现在 2033 年前后，达 15 亿左右。因此，中国的粮食安全问题引起全世界的高度关注。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》在面向国家重大战略需求的基础研究领域的全球变化与区域响应优先主题中明确提出“重点研究全球气候变化对中国的影响”；在环境领域的全球环境变化监测与对策优先主题中也明确提出“开展气候变化、生物多样性保护、臭氧层保护、持久性有机污染物控制等对策研究”。此外，在该领域的发展思路中也明确提出“加强全球环境公约履约对策与气候变化科学不确定性及其影响研究”。农业是受气候变化影响最为敏感和脆弱的领域之一，气候变化对农业的影响首先是农业气候资源的数量和要素配置的变化，并最终影响农业生产的可持续发展和粮食安全。

我国是一个农业大国，各地的自然状况和气候条件十分复杂，农业生产格局也各不相同。从我国第一次农业气候区划到现在已有 30 多年的时间，而在这期间正是气候变化最为显著的时期，20 世纪 80 年代初期开始气候变暖十分显著，进而导致区域农业气候资源显著变化。此外，近年来我国的农业生产结构和作物布局也发生了显著的变化。而对我国农业气候资源的现状及农业气候资源有效性缺乏系统性研究，对未来气候变化背景下农业气候资源的预测和有效性评估更是不足，从而使国家农业结构和作物布局调整依据不足，缺少必要的科技支撑。

2011 年，公益性行业(气象)科研专项经费项目批准设立了“气候变化背景下农业气候资源的有效性评估”项目，该项目以我国东北地区春玉米、黄淮海地区冬小麦和夏玉米、南方双季稻等主要粮食作物和主栽区为研究对象，依据农业气候资源的数量与匹配状况，以及农作物不同生长发育阶段对气象条件的响应规律及

需求，重点研究了：(1)主要农业气候资源的时空分布和演变规律；(2)主要农作物生长发育的气候适宜度与农业气候资源有效性的评估模型和方法；(3)利用国家气候中心发布的未来(2011—2100 年)气候变化情景(A1B)下的区域气候模式(Reg CM3)产品(0.25°×0.25°的格点产品)，评估气候变化背景下农作物气候适宜度和农业气候资源有效性的演变趋势；(4)针对气候变化对农业生产影响的敏感带(种植制度过渡带、作物品种过渡带等)，示范性地研究农业适应气候变化相关措施下农业气候资源利用效率的变化。通过本项目的研究为气候变化对农业影响评估业务提供指标体系和技术方法，并为农业适应气候变化的相关措施提供决策依据。本书全面反映了该项目的研究成果。

全书共分 7 章，第 1 章气候变化对农业生产的影响研究进展由郭建平、赵俊芳执笔；第 2 章气候变化下中国农业气候资源演变趋势由叶殿秀、王凌、王有民、王荣、李莹、吉振明、柳春、邹旭恺、赵大军、郭建茂、石英执笔；第 3 章黄淮海地区冬小麦气候资源有效性评估由吕厚荃、张艳红、吴门新、李萌、褚荣浩执笔；第 4 章南方水稻气候资源有效性评估由杨晓光、叶清、李勇、张彩霞、代姝玮、刘志娟、孙爽、刘子琪、董朝阳、谢文娟执笔；第 5 章黄淮海地区夏玉米气候资源有效性评估由吕厚荃、赵秀兰、徐玲玲、李祎君、李萌、褚荣浩执笔；第 6 章东北地区春玉米气候资源有效性评估由郭建平、赵俊芳、徐延红、袁彬、冶明珠、穆佳、初征、赵倩执笔；第 7 章农业适应气候变化措施对气候资源利用效率的影响评估由郭建平、赵俊芳、袁彬、徐延红、冶明珠执笔。全书由郭建平统稿。

气候变化对农业生产的影响评估有很多方法，不同方法评估的结果可能不一致，对农业气候资源的评估也一样，不同方法得到的结果也会有差异。另外，限于作者的水平和对问题的认知能力，书中难免存在不合理的地方，甚至是错误的地方，恳请读者批评指正！

郭建平

2015 年 4 月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　录

前言
第 1 章　气候变化对农业生产的影响研究进展 …… (1)
1.1　气候变化对农业影响的研究方法 …… (2)
1.2　大气中温室气体浓度增加对农作物的影响试验 …… (3)
1.3　气候变化对农业气候资源的影响 …… (4)
1.4　气候变化对农作物生长发育的影响 …… (5)
1.5　气候变化对农作物产量的影响 …… (6)
1.6　气候变化对种植制度的影响 …… (7)
1.7　气候变化对品种布局的影响 …… (7)
1.8　气候变化对作物生产潜力和气候资源利用率的影响 …… (8)
1.9　问题与展望 …… (9)
参考文献 …… (10)
第 2 章　气候变化下中国农业气候资源演变趋势 …… (15)
2.1　数据与方法 …… (15)
2.2　气候变化对中国农业气候资源的影响 …… (17)
第 3 章　黄淮海地区冬小麦气候资源有效性评估 …… (70)
3.1　冬小麦生长季农业气候资源特征 …… (71)
3.2　气候适宜度的空间分布特征 …… (87)
3.3　气候适宜度演变趋势 …… (100)
3.4　冬小麦气候生产潜力特征 …… (106)
3.5　农业气候资源有效性评估 …… (111)
参考文献 …… (118)
第 4 章　南方水稻气候资源有效性评估 …… (120)
4.1　南方稻区气候资源时空特征 …… (121)
4.2　南方稻区气候资源适宜度评价 …… (138)
4.3　南方水稻气候资源有效性评价 …… (158)
4.4　南方水稻生产潜力变化 …… (167)
4.5　气候资源有效性对水稻气候生产潜力的可能影响 …… (175)
参考文献 …… (177)
第 5 章　黄淮海地区夏玉米气候资源有效性评估 …… (180)
5.1　夏玉米生长季农业气候资源特征 …… (181)
5.2　气候适宜度的空间分布特征 …… (197)

5.3 气候适宜度演变趋势 …… (198)
5.4 夏玉米气候生产潜力特征 …… (206)
5.5 农业气候资源有效性评估 …… (213)
参考文献 …… (220)
第 6 章 东北地区春玉米气候资源有效性评估 …… (221)
6.1 东北地区气候变化特征 …… (222)
6.2 春玉米生长季农业气候资源特征 …… (227)
6.3 气候适宜度的空间分布特征 …… (236)
6.4 气候适宜度演变趋势 …… (247)
6.5 春玉米气候生产潜力特征 …… (250)
6.6 农业气候资源有效性评估 …… (254)
参考文献 …… (260)
第 7 章 农业适应气候变化措施对气候资源利用效率的影响评估 …… (261)
7.1 农业适应气候变化的主要措施 …… (261)
7.2 种植制度调整对气候资源利用效率的影响评估 …… (262)
7.3 抗逆新品种应用对气候资源利用效率的影响评估 …… (272)
7.4 播种期调整对气候资源利用效率的影响评估 …… (287)
参考文献 …… (294)

第 1 章

气候变化对农业生产的影响研究进展

以全球变暖为主要特征的气候变化已经成为当今世界重要的环境问题之一。最近几十年，关于气候变化的问题一直是学术界研究的热点（Alexandrov et al，2000）。在过去的 100 年里，全球平均地表气温上升了 0.74℃（IPCC，2007），而最近 50 年的升温几乎是过去 100 年的 2 倍（秦大河等，2008）。IPCC 第五次评估报告指出，气候变化比原来认识的要更加严重，在过去的 30 年里，每 10 年的地表气温要高于人类有记录以来的任何 10 年，且 2000 年以来的十几年气温是最高的（IPCC，2013）。许多区域的作物研究表明，气候变化对粮食产量的不利影响比有利影响更为显著（IPCC，2014；姜彤等，2014）。在全球变暖的情景下，近 50 年来中国增暖明显，全国年平均地表气温增加了 1.1℃，明显高于全球或北半球同期的平均增温速率（丁一汇等，2006）。尤其是 20 世纪 80 年代中期以来，升温速率显著加快，北方地区增温趋势显著（翟盘茂等，2005）。近 50 年来我国年降水变化趋势不明显，但年代际波动较大，区域间存在明显的差异。极端天气气候事件的频率和强度出现了明显的增强。霜冻日、寒潮事件减少，长江中下游流域和东南地区洪涝加重。中国东北和华北、西北东部的干旱日趋严重（丁一汇等，2006）。未来 20～100 年中国地表气温仍将继续上升，趋势明显，北方增暖大于南方，内陆大于沿海。降水量的年际变化较大，但随着温室气体浓度的持续增加，未来降水量有可能呈增加趋势（汤绪等，2011）。

全球气候变化给我们带来了一系列的问题，变化的幅度已经超出了地球本身自然变动的范围，对人类生存和社会经济构成严重的威胁。农业是受全球气候变化影响最大、最直接的行业之一，尤其是作为农业主体的作物生产与粮食安全（Adams，1989）。根据中国国家气候变化方案，农业是应对气候变化四个主要领域之一。气候变化背景下我国的粮食安全也已受到严重威胁，2020—2050 年，我国农业生产将受到气候变化的严重冲击（赵俊芳等，2010）。大气中 CO_2 浓度增加及气候变暖，通过影响作物生育进程、适宜种植区和灾害性因子等的变化，对农业生产产生了很大影响。科学预测气候变化对农业生产的影响，探讨应对气候变化的农业发展策略，已成为实施全球可持续农业与农村发展（SARD）战略需要研究解决的重大问题（刘彦随等，2010）。本章系统回顾了近几十年来气候变化对农业生产影响评估的研究进展，以期为今后该领域的研究工作有所借鉴。

1.1 气候变化对农业影响的研究方法

综合国内外文献，研究气候变化的影响通常有三类方法。一是实验室模拟或现场观测试验方法；二是历史相似或类比法；三是利用计算机进行数值模拟和预测的方法，是当前最有前途、进展最为迅速的方法（李克让等，1999）。就气候变化对农业的影响来看，目前采用的方法主要集中在观测试验和模型模拟影响两方面（赵俊芳等，2010）。观测试验多采用田间试验和环境控制试验两种方法，其中环境控制实验是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（孙白妮等，2007）。国外早期的研究多采用环境控制实验（Chaudhuri et al，1990），因为这种方法重复性好，能为研究者提供稳定的环境（Finn et al，1982）。我国有关 CO_2 浓度增加对农作物直接影响的研究起步较晚（蒋高明等，1997），20 世纪 90 年代一些学者开展了通过田间实验进行 CO_2 浓度和光合作用关系的试验研究（王春乙，1993；郭建平等，1999）。直接田间实验的方法可以获取许多重要数据，用来检验假设或评价因果关系等，是一种重要的研究方法。但此种方法耗时、耗财力，特别是对模拟未来气候变化后环境温度和降水等条件发生变化下多作物品种的长期试验非常困难，因此，该方法在使用中存在很大的局限性（陈鹏狮等，2009）。

鉴于田间试验方法的局限性，利用计算机进行数值模拟和预测研究，是目前定量化研究气候变化及其影响的较科学和理想的方法。模型模拟包括统计分析（回归模型）和动态数值模拟（气候模式与农业评价模式相嵌套）两种方法。统计学方法在大数定律和统计假设检验的基础上，根据生物量与气候因子的统计相关建立数学模型。20 世纪 80 年代以来，随着长期观测试验的进行和人们对作物生长过程认识的不断深化以及作物模式研究的不断发展和完善，大气环流模型（GCM）和作物模式相联接逐渐发展成为评价气候变化对农业影响的最基本有效的方法（陈鹏狮等，2009）。

国外学者研究气候变化与作物的关系几乎都用作物模型，结合不同的气候或天气模式，评价气候变化对作物的影响并给出建议和对策。目前，国外具有代表性的作物模型有美国农业部开发的 CERES（Crop Environment Resource Synthesis）（Jones et al，1986）系列以及荷兰的 WOFOST（World Food Studies）（Boogaard et al，1998）系列模型，国内则有 RCSODS（Rice Cultivational Simulaton，Optimization and Decision-Making System）（高亮之等，1994），Wheat Grow（曹卫星等，2000）等模型。国内外在这方面都已经有大量的研究报道，Christian 等分别把 GCM 模拟的天气数据及实测站点的天气数据输入到作物模型 SARRA-H（System for Regional Analysis of Agro-Climatic Risks-Habille）中，建立了比较合理的作物模型（Christian et al，2005）；Easterling 等（Easterling et al，1992）在 EPIC（Erosion-Productivity Impact Calculator）模型中加入 CO_2 对作物光合作用和蒸散作用的影响，对 MINK 地区气候变化对作物的影响进行了模拟研究；Carbone 等（2003）利用作物模型研究了气候变化对希腊玉米生育期和产量的潜在影响；Lobell 等（2006）用多种气候模式和作物统计模式研究了气候变化对美国加利福尼亚多年生作物的影响。

近年来，我国在应用作物模型进行气候变化对农作物影响的研究领域也取得了显著成果。王馥棠等（1993）利用三种大气环流模式预测未来气候情景下中国主要作物水稻、小麦和玉米产量的可能变化，并指出作物产量下降的主要原因是由于大气中 CO_2 浓度倍增时，温度升高、

作物发育速度加快和生育期缩短。张建平等(2008)利用 WOFOST 作物模型,结合气候模型 BCC－T63 输出的未来气候情景资料,模拟分析了未来气候变化对东北地区玉米产量的影响,结果表明,气候变化将严重影响东北粮食产量。金之庆等(1996)利用 CERES－Maize 模拟了全球气候变化对我国玉米生产的可能影响,并评价了当 CO_2 倍增时,气候变化对我国各地玉米产量和灌溉需要的可能影响。尚宗波(2000)利用玉米生长生理生态学模拟模型(MPESM),模拟评价了沈阳地区玉米生长对各种气候因子变化的敏感性和全球气候变化下沈阳地区春玉米的生长趋势以及产量变化情况。研究表明,在未来气候变化下沈阳地区玉米平均产量会有 5%～30%的降幅。冯利平等(1997)研究建立了气候变化下我国华北冬小麦生产影响评估模型,研究了气候异常对华北冬小麦的可能影响。

1.2　大气中温室气体浓度增加对农作物的影响试验

大气 CO_2 浓度的升高除了通过温室效应导致全球气候变化并对植物产生间接影响外,还直接影响植物的生长发育(Kobayashi et al,2001)。

CO_2 浓度升高对植物影响的田间实验主要手段有三种:控制环境实验(Controlled environment,CE)、开顶式测定箱(Open-top chambers,OTC)和自由 CO_2 气体施肥实验(Free-airCO_2:enrichment,FACE)(Rogers et al,1986)。国外早期的研究多采用环境控制试验(Chaudhuri et al,1990;Finn et al,1982),因为这种方法重复性好,能为研究者提供稳定的环境。缺点是光照通常减少,温度升高,昼夜温差减少,光温不能同步,温度升高,风速相对静止。最大的缺陷是大部分植物种在花盆中,植物根系生长的空间受限。另外,这种实验通常用植物幼苗为实验材料,所得结论能否应用于田间状态下的成熟植株是值得怀疑的。因此,近年来这种方法的应用逐渐减少(蒋高明等,1997)。而 OTC 实验优点是生长环境基本接近于自然状态,可自动控制 CO_2 浓度,并使之与温度的变化同步。如果利用自然植物作为实验对象,可以避免根系受限制和只能研究幼苗等不足之处,其结果还是很有说服力的。而 FACE 在自然状态下进行 CO_2 升高对植物影响的实验,其结果有很强的代表性,是另外两种方法不能比拟的。因而,这是公认的研究植物对高 CO_2 浓度响应的最理想的手段之一。

我国有关 CO_2 浓度增加对作物直接影响的研究起步较晚,20 世纪 90 年代一些学者开展了通过田间实验进行 CO_2 浓度和光合作用关系的实验研究(刘建国,1992;王春乙,1993;王修兰等,1996;林而达等,1997;郭建平等,1999)。其中王修兰等从 1992—1995 年在人工控制环境条件下分别对我国几种主要作物(小麦、玉米、大豆等)进行了不同 CO_2 浓度反应的实验研究,在作物生物量、产量、光合速率、蒸腾系数方面获得了大量系统的数据。实验结果表明,在人工控制环境条件下随着 CO_2 浓度增加,作物的生物量、产量、光合速率等增加,而作物的蒸腾系数减少。王春乙、郭建平等从 1992—1996 年利用 OTC-1 型开顶式气室研究了 CO_2 浓度增加对我国 6 种主要作物的生长发育、产量形成、光合作用、蒸腾等的影响,并研究了 CO_2 浓度增加对一些作物品质的影响。结果表明,CO_2 浓度增加,作物发育进程加快,株高增加,经济产量和生物产量增加明显,且 C3 作物的增长幅度大于 C4 作物;冬小麦、棉花品质呈良性变化,玉米品质可能有所下降,大豆品质变化不明显。

O_3 对农作物影响的研究也有了新的进展,利用 OTC-1 型开顶式气室研究了 O_3 浓度增加对冬小麦、水稻、菠菜、油菜生长发育和产量的影响,当 O_3 浓度达到 100×10^{-9} 情况下作物产

量降低 20%～30%；在此基础上进行了 CO_2 和 O_3 的复合影响试验和模型研究，从生理生态、土壤微生物及碳氮循环角度出发，探讨空气质量变化对农业生态系统功能的可能影响，为评估近地层大气 CO_2 和 O_3 浓度的变化对农业生产以及农业生态系统功能的可能影响提供科学依据（王春乙等，2000，2004）。此外，郑有飞等（1998，2002）研究了大气中气溶胶的增加对中国主要作物小麦、玉米的影响，发现气溶胶增加引起太阳辐射减少，进而影响小麦、玉米生育期和籽粒产量。

由此可见，CO_2 浓度增加导致作物光合作用增强、蒸腾速率减小是最终导致生物量和产量提高的根本原因；而 O_3 浓度增加升高引起作物伤害是导致生物量和产量下降的原因；气溶胶对作物产量的影响主要是大气气溶胶增加阻挡了太阳辐射。

1.3 气候变化对农业气候资源的影响

农业气候资源的数量及其配置状况直接影响着农业生产过程，并为农业生产提供必要的物质和能量。农业气候资源主要包括光资源、热量资源和水分资源。气候变化对农业生产的影响，首先表现为对农业气候资源的影响，由于农业气候资源在数量和配置上发生了变化，才导致了对农业生产过程的影响，并最终影响到农业种植制度、品种布局以及生长发育和产量形成。因此，系统分析气候变化背景下农业气候资源演变趋势及空间分布格局，不仅有利于合理利用农业气候资源，还将为调整农业结构和种植制度提供一定的科学依据。研究表明：近 50 年我国≥0℃和≥10℃的积温和持续时间总体呈增加趋势，但增温幅度区域间存在差异。1961—2007 年，华南地区年均气温以 0.20℃/10a 的趋势上升，温度生长期内积温的气候倾向率[≥10℃积温平均为 98(℃ · d)/10a]由北向南递增（李勇等，2010）。西南地区年均气温呈上升趋势，平均增速为 0.18℃/10a；温度生长期内≥10℃和≥15℃积温均呈增加趋势，平均增速分别为 55.3(℃ · d)/10a 和 37(℃ · d)/10a（代妹玮等，2011）。西北干旱区年均气温呈上升趋势，其气候倾向率为 0.35℃/10a；喜凉作物和喜温作物温度生长期内积温总体呈升高趋势，其气候倾向率分别为 67(℃ · d)/10a 和 50(℃ · d)/10a （徐超等，2011）。与 1961—1980 年的平均状况相比，1981—2007 年黄淮海平原喜凉作物和喜温作物温度生长期均呈延长趋势，分别延长了 7.4 d 和 6.9 d；≥0℃和≥10℃积温总体表现为增加趋势，其气候倾向率分别为 4.0～137.0(℃ · d)/10a 和 1.0～142.0(℃ · d)/10a（刘志娟等，2011）。与 1961—1980 年相比，1981—2007 年中国年均气温增加了 0.6℃，喜凉作物生长期内≥0℃积温和喜温作物生长期内≥10℃积温分别平均增加 123.3℃ · d 和 125.9℃ · d；1961—2007 年年均气温增幅最大的区域是东北地区，喜温作物生长期内≥10℃积温增幅最大的是华南地区（杨晓光等，2011）。长江中下游地区，双季稻的安全种植北界北推（李勇等，2010）；华东地区和华北平原在 1961—2005 年气温也出现明显的上升趋势（谭方颖等，2009；周伟东等，2009）；西北地区≥0℃和≥10℃积温均从 1986 年开始增加，在 1995 年后增加趋势更加明显。≥0℃积温和≥10℃积温的平均气候倾向率区域间存在差异，其中于田、库车、阿拉尔等地区积温呈现减少趋势（孙兰东等，2008）；1961—2007 年，东北三省的年均气温总体上升，气候倾向率为 0.38℃/10a，温度生长期内≥10℃的积温带北移东扩（刘志娟等，2009）。未来我国气温变化趋势较一致，大部分地区≥0℃、≥10℃的持续日数、无霜期延长，≥0℃、≥10℃的积温呈增加趋势（赵俊芳等，2010）。河套地区初霜日日期推后，终霜日日期提前，无霜期逐步延长，霜冻灾害呈逐年减少趋

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

势(仇巧玲,2013)。虽然热量资源表现出总体增加的趋势,但表现出时空分布极其不均的显著特点,一是北方地区增温幅度大于南方,二是冬季大于夏季,三是夜间大于白天,从而导致日较差减小(王菱等,2004);同时,南方地区的增温趋势不明显(Tao et al,2006)。

近 50 年中国降水量总体变化趋势不显著,但区域差异明显,长江中下游、东南地区、西部大部分地区、东北北部和内蒙古大部分地区年降水量呈增加趋势,但是华北、西北东部、东北南部年降水量呈下降趋势(丁一汇等,2006)。近 50 年黑龙江省和吉林省绝大部分区域在温度生长期内的参考作物蒸散量呈逐年增加趋势,而辽宁省绝大部分区域则有所减少(刘志娟等,2009)。长江中下游地区生长期内参考作物蒸散量呈略微减少趋势,低值区扩大,高值区减小(李勇等,2010)。中国未来降水量总的变化趋势是不断增加的,但降水量的增加中心因模拟模式的不同而有所差异。加拿大 CCCma 模式预估未来中国降水增加中心主要在青海西藏一带,华南地区在 21 世纪末降水量有所减少(莫伟强等,2007)。区域气候模式 PRECIS 预测未来气温持续增加,导致参考作物蒸散普遍增加,降水增加最多的地区分布在长江以南、海南以北的中、南亚热带地区(汤绪等,2011)。

1960 年以来我国大部分地区太阳辐射降低,出现日照时数减少的现象。近 50a 在气候变暖背景下,相对湿度和云量的增加导致西北大部分地区日照时数显著减少,全区平均减少速率为 19.92 h/10a(陈少勇等,2010;徐超等,2011)。东北三省年日照时数显著下降,且以松嫩平原东部、吉林省中西部平原、辽河平原西部的减少尤为明显,日照时数高值区西退减少(刘志娟等,2009)。长江中下游地区日照时数普遍表现为减少趋势,其中 1980 年以来比 1961—1980 年温度生长期内平均日照时数减少了 8.1%(李勇等,2010)。华南年日照时数呈现由西向东逐渐减少的特征,且东部的减少趋势较西部更显著,但空间差异较大(代姝玮等,2011),全年和温度生长期日照时数分别以 −57 h/10a 和 −38 h/10a 的速率递减(李勇等,2010)。对全国而言,与 1961—1980 年相比,1981—2007 年在全年、喜凉和喜温作物生长期内日照时数分别减少了 125.7 h、32.2 h 和 53.6 h。1961—2007 年,长江中下游地区年日照时数的减幅最多,喜凉和喜温作物生长期内日照时数减少量最大的地区分别是华北和华南地区(杨晓光等,2011)。

由此可见,气候变化背景下,我国农业气候资源总体表现为热量资源显著增加,辐射资源减少,而降水资源的变化不显著,区域差异明显。

1.4　气候变化对农作物生长发育的影响

温度是影响作物发育速度的关键因子,温度的高低决定了生育期的长短。温度升高,作物生育期普遍缩短。研究表明:平均气温升高 1℃,水稻生育期日数平均缩短 7.6 d,温度增加导致一季稻、早稻的生育期缩短(崔读昌,1995a)。但气温升高对不同熟性的水稻品种生长发育的影响不一致。近 20 年潮州水稻生育期积温增加,早稻各发育期均有不同程度的提早,晚稻的发育期持续推迟,早稻、晚稻的全生育期天数都在逐渐缩短(丁丽佳等,2009)。且影响主要表现在生育前期,1961—2008 年信阳地区水稻生长季内 4—5 月变暖趋势最为显著,使得水稻播种、移栽日期显著提前,移栽—抽穗长度显著延长(薛昌颖等,2010)。

气候变暖对冬小麦影响较大的时期主要也是在生育前期,对生育后期的影响较小,春季发育期(从返青到成熟)普遍提前(万信等,2007;车少静等,2005),拔节期提前最明显,抽穗以后各生育期提前程度较少,冬季生育期、全生育期明显缩短(余卫东等,2007)。生态学模式 SU-

CROS 模拟冬小麦生长发育状况表明，在无土壤水分亏缺的情况下，黄淮海地区秋冬季温度升高，播种到开花的日数减少，开花到成熟的日数稍有延长，播种到成熟的整个生育期的持续日数缩短（周林等，2003）。

在气候变暖的形势下，河南地区 6—9 月降水量减少，夏玉米生长减缓，各生育期有推迟的趋势，成熟期推迟程度较大，全生育期的天数显著增加（余卫东等，2007）。陇东塬区随着气候变暖，积温增加，日照时数和降水量相对减少，春玉米生长发育速度加快，生育期天数缩短，主要发育期较历年均提前，提前幅度最大的是乳熟和成熟期（段金省等，2007）。

总体而言，气候变化使作物生育期缩短，且对生育前期的影响大于对生育后期的影响。

1.5 气候变化对农作物产量的影响

气候变化对作物的影响最终表现在产量上，气候变化的正负效应全球分布不均匀。高纬度地区将从气候变暖中受益，可耕作土地面积增加，GDP（国内生产总值）随之增长；低纬度地区气候变化将减少土壤水分，降低农业和林业的生产力，商品生产受到影响，GDP 降低；而气候变化对中纬度地区的影响是混合的，随地区或气候变化情景的改变而改变（Darwin et al，1995）。目前研究方法主要是采用气候模型与作物模式相嵌套，对作物产量可能受到的影响进行分析评价（Tubiello et al，2000）。在未来气候情景下，温度升高，作物生长加快，生育期缩短，不同品种的水稻产量会有不同的下降，早稻平均减产幅度 3.7%，中稻 10.5%，晚稻 10.4%（王馥棠等，1995）。气候变暖导致了小麦的发育加快，生育期缩短，春小麦生育期天数缩短的比例大于冬小麦，相应的春小麦的减产幅度大于冬小麦，无论是冬小麦还是春小麦，雨养条件下减产幅度均略大于水分适宜下（灌溉条件下）。区域间产量变化的趋势也有所不同，未来降水量增加，华北和长江中下游的雨养冬小麦有增产的趋势，而东北、西北春小麦、西南冬小麦有减产的趋势（居辉等，2005）。气候变化将导致石羊河、大凌河流域灌溉玉米稳产风险及低产出现的概率加大，给农业生产带来一定的经济损失，其中 A2 情景对玉米产量的负面影响大于 B2 情景。CO_2 肥效作用可以一定程度上缓解这种负面影响（熊伟等，2011）。若不采取其他措施，未来 A2 和 B2 两种温室气体排放情景下，2021—2050 年河南省冬小麦产量平均减少 5%左右（成林等，2012）。但也有研究表明，2012—2050 年在 A2 和 B2 情景下，河北和河南两省冬小麦气象产量均表现出以减产为主，而山东省冬小麦气象产量以增产为主的趋势（王培娟等，2012）。但如果考虑 CO_2 的肥效作用，减产的幅度会明显减小（袁东敏等，2014）。气候变化将导致我国玉米主产区的玉米单产普遍降低，总产下降。A2 气候变化情景对我国玉米产量的负面影响要大于 B2 情景。CO_2 肥效作用可以在一定程度上缓解这种负面影响，其缓解作用对雨养玉米更明显（熊伟等，2008）。受 3 种气象因子（平均温度、日较差、辐射）变化趋势的综合影响，约有 30%的水稻产区对 1981—2007 年的气候变化趋势敏感，少部分地区表现为脆弱，但水稻主产区受到的影响不大，且在东北地区还集中表现出产量增加的趋势，为我国水稻发展提供了契机（熊伟等，2013）。综合的研究表明，气候变化将影响未来三大作物（玉米、水稻、小麦）单产，如果不考虑 CO_2 肥效作用，未来雨养作物单产将受到更大冲击；当灌溉条件保障后，水稻受到冲击更大，单产降低最多，尤其是 A2 情景。如果考虑 CO_2 肥效作用，未来玉米平均单产变化不大，小麦单产明显增加，尤其是雨养小麦，水稻单产也有所增加（熊伟等，2010）。

但是气候变化对作物产量的影响还有很大的不确定性，首先，CO_2 的肥效作用还有很大的争议；其次，在模型中也没有考虑到病虫害和水资源供应减少的可能性、臭氧层空洞等因素对作物产量的影响；再次，未来适应的可能性带来不确定性，若很好地利用农业科技可以减少气候变化的不利影响(Piao et al，2010)。

1.6　气候变化对种植制度的影响

气温升高增加了各地的农业热量资源，从而使当前多熟制的北界向北向西推移，复种指数呈波动式增长，全国复种指数由 1985 年的 143%增加到 1995 年的 165.1%后又缓慢下降为 2001 年的 163.8%(李立军，2004)。在只考虑温度的情况下，1981—2007 年与 1950—1980 年相比，一年两熟制种植北界，空间位移变化最大的区域在陕西东部、山西、河北、北京和辽宁，一年三熟制种植北界，空间位移变化最大的区域为浙江、江苏、安徽、湖北、湖南地区(杨晓光等，2010)。与 1950—1980 年相比，2011—2040 年和 2041—2050 年的一年两熟带和一年三熟带种植北界都不同程度向北移动，其中一年一熟区和一年二熟区分界线空间位移最大的省(市)为陕西省和辽宁省，且 2041—2050 年种植北界北移情况更为明显；一年两熟区和一年三熟区分界线空间位移最大的区域在云南省、贵州省、湖北省、安徽省、江苏省和浙江省境内，且 2041—2050 年种植北移情况更为明显(杨晓光等，2011)。若考虑温度和水分的综合影响，南方地区一年两熟的北界无明显的变动，一年三熟的北界向西推进了约 0.25 个经度，向北移动了 0.20 个纬度(赵锦等，2010)；北方地区东北部种植界限发生了空间位移，北移西扩显著(李克南等，2010)。对未来种植制度如何变动，学者多采用模型模拟未来气候变化情景，对种植制度可能受到的影响进行分析评价。若未来 CO_2 增加一倍，在品种和生产水平不变的前提下，仅考虑热量条件，我国一熟制面积减少而三熟制面积会明显增加。但由于水分变化可能产生的不利影响，种植制度的变化仍具有较大的不确定性(张厚瑄，2000)。在≥10℃积温指标下，1986—2009 年我国潜在的不可耕地面积平均值相对 1961—1985 年减少约 34.33%，一年一熟区面积有所减少，但仍约占 50%，一年两熟和一年三熟地区面积均呈增加趋势；综合≥10℃和≥0℃两个积温指标，我国潜在播种面积缓慢增加，与实际播种面积的变化趋势一致，其他综合因子则在总体上对潜在播种面积的增长有微弱抑制作用(付雨晴等，2014)。

几乎所有研究结果表明，气候变化有利于多熟制种植的发展，可有效扩大作物播种面积，提高复种指数，在一定程度上弥补气候变化对作物单产的不利影响。

1.7　气候变化对品种布局的影响

在气候变暖背景下，人们可能通过改变种植结构、更换相对高产的中晚熟品种等适应措施，以期获得更高生产效益。气候变暖的背景下，在不考虑 CO_2 浓度升高对作物生长发育影响的前提下，东北三省春玉米不同熟型品种种植北界不同程度向北移动，在界限敏感区域内中晚熟品种替代早熟品种，使得玉米生育期延长；干物质积累增加，可以提高东北三省春玉米产量(刘志娟等，2010)。与 1950—1980 年相比，1981—2007 年在 80%气候保证率下中国热带作物安全种植北界北移了 0.86 个纬度(李勇等，2010)。冬小麦强冬性品种种植北界在宁夏—甘肃及河北—辽宁北移趋势最明显，分别北移 200 km 和 100 km；冬性品种种植北界在山东—河

北变化明显，向北移动 310 km；弱冬性品种种植北界在安徽、江苏、河南和山东交互之处变化明显，北移 120～370 km（李克南等，2013）。东北地区不同熟性的玉米品种可种植北界明显北移东扩，小兴安岭可以种植极早熟玉米品种，长白山地带可以种植早熟玉米品种，三江平原成为中熟和中晚熟玉米品种区域，松嫩平原的南部亦可种植晚熟玉米品种（贾建英等，2009）。与 1951—1980 年相比，1981—2010 年长江中下游地区双季稻安全种植区增加了 11.5 万 km^2（李勇等，2013）。华北目前推广的强冬性冬小麦品种将被半冬性冬小麦品种所取代，比较耐高温的水稻品种将在我国南方地区占主导地位（孙智辉等，2010）。福建地区当年平均气温升高 0.5℃时，水稻各熟性品种种植高度提高 50 m，相当于北界北移 0.25 个纬度（陈惠等，1999）。气候变化背景下，河南省冬小麦品种更新特征是营养生长期缩短，生殖生长期延长，千粒重增加，从而提高了产量（孙倩等，2014）。

因此，气候变化背景下，有利于喜温和晚熟品种的种植，从而可以在一定程度上提高作物产量。

1.8 气候变化对作物生产潜力和气候资源利用率的影响

农业气候生产潜力是评价农业气候资源优劣的依据之一，农业气候生产潜力的大小取决于光、温、水三要素的数量及其相互配合协调的程度。研究表明：气候变暖对热量充足的地区表现为负效应，辽宁地区未来由于热量资源的增加超出了玉米生长发育的适宜温度，2010 年开始气候生产潜力明显下降；而吉林省和黑龙江省随晚熟品种的应用，气候生产潜力不断增加，气候生产潜力的高值区向东北方向移动（Yuan et al，2012）。目前我国小麦单产最高潜力主要分布在黄土高原南部，总产潜力主要分布在环渤海山东半岛、江淮江汉平原及黄淮平原南阳盆地（蔡承智等，2007）。气候变化背景下，光、热、水资源的不匹配是限制资源利用率的主要因素。北京房山和昌平的部分地区气候资源总量丰富，但水分的限制使得光、热、水配合程度较差，资源利用率较低（田志会等，2005）。1960—2005 年河北地区降水资源不断减少，尽管光热资源能满足作物生长需求，但冬小麦气候适宜度仍为下降趋势（魏瑞江等，2007）。宁夏春玉米温度生产潜力呈逐年增加，降水和气候生产潜力呈波动中减少的趋势。未来气候变化显著影响着春玉米气候生产潜力，其中降水量变化对春玉米气候生产潜力的影响远大于气温变化的影响，降水的多少及变率对其限制作用将更明显（赖荣生等，2014）。

目前世界上大部分地区农业气候资源利用效率不高，我国光能利用率、热量利用效率、水分利用效率以及综合利用效率在世界上均属于中等水平。其中平均光资源利用效率在 0.08%～0.22%，≥0℃期间的光能利用率为 0.18%，低于世界陆地植物的平均光能利用率 0.3%，更低于高产地区农田平均光能利用率 0.4%的水平。世界高产地区的降水利用效率比我国平均降水利用效率高 33.30%～67.60%（崔读昌，2001）。但即便是利用效率高的国家，都蕴藏巨大开发潜力，因此，提高农业气候资源利用效率成为亟待解决的重点课题（崔读昌，1995b）。前人已经结合模糊数学的概念，考虑适应性措施对气候资源利用率的影响。Yuan 等（2012）认为，调整播种期可以有效地提高资源利用率，但这种效果因地因时而异，热量丰富的地区推迟播种期可以避开生长后期的高温天气，气候资源利用率增加明显，但对于热量不足的地区调整播种期的影响不大。未来气候暖干化的背景下，增强品种的抗逆性能可有效提高作物气候生产潜力，提高气候资源利用率。玉米品种的抗逆性越强，增加的气候生产潜力值越

高。具备双重抗逆性(抗旱、耐高温)的品种在增加气候生产潜力方面的作用要优于只具备单一抗逆性(抗旱或耐高温)的玉米品种,而抗旱性的玉米品种对气候生产潜力的影响大于耐高温性的品种(Xu et al,2014)。

综合研究结果表明,气候变化对不同作物气候生产潜力的影响趋势不同,但在未来气候变化趋势下,水分可能是影响气候生产潜力的主要气候要素。农业适应气候变化的措施对提高农业气候资源利用率有一定的补偿作用,从而证实了农业适应气候变化措施的有效性。

1.9　问题与展望

气候变化对农业生产影响的研究成果,对准确评价气候变化对农业生产的可能影响及其发展趋势、制订适应与减缓气候变化不良影响的对策与措施起到了重要作用。然而,目前关于气候变化对农业影响评估方法和结果方面还存在很大的不确定性和许多亟待解决的问题,尚需进一步深入研究。

(1)气候变化情景的不确定性。2000 年 IPCC 排放情景特别报告(The Special Report on Emissions Scenario)中提出了 SRES 排放方案,在对已有排放情景进行分析的基础上设计了四种世界发展模式。主要分为 4 个情景"家族",包含 6 个温室气体排放参考情景,其中 A1 和 A2 强调经济发展,但在经济和社会收敛程度上有所不同;B1 和 B2 强调可持续发展,但在有关收敛程度上同样存在不同。2011 年发布了新一代情景称为"典型浓度目标"(Representative Concentration Pathways, RCPs)。同样给出了 4 种情景,分别称为 RCP8.5、RCP6、RCP4.5 及 RCP2.6。其中前 3 个情景大体与 2000 年方案中的 SRES A2、A1B 和 B1 相对应(王绍武等, 2012)。由此也可以看出,未来温室气体排放情景也还处于讨论和研究中,最终结论还存在不确定性。因此,如何选择适合本国的未来气候情景是准确模拟未来气候可能变化最重要的问题。

(2)气候变化模式存在不确定性。目前,全球用于开展未来气候变化模拟的全球气候模式和区域气候模式有数十个,不同的模式输出的结果相差甚远,虽然在温度的模拟方面趋势一致,但增温的幅度也相差几倍。如第四次评估报告结果为:与 1980—1999 年相比,21 世纪末全球平均地表温度可能会升高 1.1～6.4℃,最大值是最小值的接近 5 倍;第五次评估报告结果显示,尽管升温的最大幅度小于第四次评估报告,但不同模式模拟的升温最大值与最小值之间的差距反而更大。而对于降水的模拟在不同区域间差异更大,甚至出现完全相反的结果。因此,如何选择合理的气候模式是开展气候变化影响评估的重要基础和前提。

(3)评估方法存在不确定性。气候变化对农业的影响评估通常使用 3 种方法,一是实验模拟方法;二是统计模拟方法;三是数值模拟方法。首先,三种评估方法存在风险。实验模拟方法的主要问题是精度难以控制,无论是开顶式气室还是 FACE 都不能很好控制环境变量的精度,模拟结果实际上仅仅反映了影响结果的一种趋势。而统计模拟方法通常是利用历史数据建立气候要素与作物产量之间的相关关系,然后输入模拟的未来气候情景,得到气候变化下的影响。因此,统计模拟方法存在统计模式外推的风险。数值模拟方法主要是利用已有的作物生长模型输入未来气候情景来模拟对作物的影响,但事实上,现有的大部分作物模型中的许多过程仍然是建立在统计关系上的,并没有真正解决作物生长的机理过程,因此,同样也存在外推的风险。其次,现有的作物模型对极端气候事件的响应不足,难以全面反映气候变化对农业

的影响。第三，基于单点建立的作物模型如何解决空间变异性从而应用于大范围区域的问题目前尚未很好解决。因此，如何将实验方法、统计方法和数值模拟方法结合，建立能完整反映气候要素对农作物综合影响的新一代模拟模型才有可能真正解决气候变化对农作物的影响评估。

(4)极端天气气候对农业影响的研究有待进一步加强。农业是对气候变化响应最为敏感的领域之一。气候变化背景下，全球范围异常气候出现的概率将大大增加，这些极端天气气候事件将对农业生产的可持续发展产生重要影响，尤其是极端天气气候事件的增多势必导致世界粮食生产的不稳定。因此，气候变化背景下继续加强该方面相关问题的研究也将是未来农业科学家研究的重要课题之一。

(5)气候变化下农业病虫害的影响评估较少。依据历史资料分析表明，气候变暖可使大部分病虫害发育历期缩短、危害期延长，害虫种群增长力增加、繁殖世代数可比常年增加 1 个代次，发生界限北移、海拔界限高度增加，危害地理范围扩大，危害程度呈明显加重趋势。但也使一些对高温敏感的病虫害呈减弱趋势，致使小麦条锈病、蚜虫等病虫由低海拔地区向高海拔地区迁移危害(霍治国等，2012a)。一定区域、时段的降水偏少、高温干旱有利于部分害虫的繁殖加快、种群数量增长，降水、雨日偏多有利于部分病害发生程度和害虫迁入数量的明显增加，病虫危害损失加重；暴雨洪涝可使部分病害发生突增，危害显著加重；暴雨可使部分迁入成虫数量突增、田间幼虫数量锐减(霍治国等，2012b)。暖冬可使病虫进入越冬阶段推迟，延长病菌冬前侵染、冬中繁殖时间，降低害虫越冬死亡率，增加冬后菌源和虫源基数；病虫害发生期、迁入期、危害期提前；越冬北界北移、海拔上限高度升高；持续暖冬可使冬后虫源基数显著增加(霍治国等，2012c)。由于对未来气候变化预估的可靠性，特别是对降水预估的可靠性不足，因此，未来病虫害的影响程度还难以估计。因此，深入研究农业病虫害发生发展规律及其对气候变化的响应是未来十分重要的研究内容之一。

本章主要回顾了气候变化对农作物(粮食作物为主)的影响研究。但气候变化对农业的影响涉及方方面面，内容十分丰富，如气候变化对经济作物、经济林果、畜牧业、农田生态系统等的影响，以及气候变化下农业气象灾害、病虫害等极端气候事件变化都会对农业生产产生影响，还有待以后进一步完善。

参考文献

蔡承智，van Velthuizen Harrij，Fischer Guenther，等. 2007. 基于 AEZ 模型的我国农区小麦生产潜力分析. 中国生态农业学报，**15**(5)：182-184.

曹卫星，罗卫红. 2000. 作物系统模拟及智能管理. 北京：华文出版社.

车少静，智利辉，冯立辉. 2005. 气候变暖对石家庄冬小麦主要生育期的影响及对策. 中国农业气象，**26**(3)：180-183.

成林，刘荣花，王信理. 2012. 气候变化对河南省灌溉小麦的影响及对策初探. 应用气象学报，**23**(5)：571-577.

陈惠，林添忠，蔡文华. 1999. 气候变化对福建粮食种植制度的影响. 福建农业科技，(1)：6-7.

陈鹏狮，米娜，张玉书，等. 2009. 气候变化对作物产量影响的研究进展. 作物杂志，(2)：5-9.

陈少勇，张康林，邢晓宾，等. 2010. 中国西北地区近 47a 日照时数的气候变化特征. 自然资源学报，**25**(7)：1142-1152.

崔读昌. 2001. 中国粮食作物气候资源利用效率及其提高的途径. 中国农业气象，**22**(2)：25-32.

崔读昌. 1995a. 气候变暖对水稻生育期影响的情景分析. 应用气象学报，**6**(3)：361-365.

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com