

周广胜 郭建平 霍治国 周莉 · 著

中国农业应对气候变化

Zhongguo Nongye Yingdui Qihou Bianhua

中国农业应对气候变化

周广胜 郭建平 霍治国 周 莉 著

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书采用要素—过程—结果—评估的逻辑思路,从全国、主要农区及主要粮食作物(水稻、玉米、小麦)三个层次,较系统地分析了中国农业气候资源变化、农业气象灾害变化、农业病虫害变化、农业种植制度变化及种植面积变化、作物生长发育与产量变化,探讨了当前及未来气候变化情景下中国主要粮食作物的气候生产潜力以及中国主要粮食作物产量的提升潜力。同时,针对当前农业气候资源下中国主要粮食作物增产面临的问题,从主要粮食作物的种植面积、复种指数、品种布局和生产管理方式等方面探讨了中国农业适应气候变化的对策措施。

本书可供从事农学、农业气象学、气象学、生态学、生物学和全球变化等专业的科研业务、教学人员及大学生、研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国农业应对气候变化/周广胜等著. —北京:气象出版社,2014.6

ISBN 978-7-5029-5806-0

I. ①中… II. ①周… III. ①农业气象—气候变化—研究—中国

IV. ①S42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 128982 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

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.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:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:358 千字

版 次:2014 年 7 月第 1 版

定 价:80.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

印 张:13.75

印 次:2014 年 7 月第 1 次印刷

前言

以气候变暖为标志的全球环境变化已经发生,并将继续到可预见的将来。伴随着气候变暖和降水变异的加剧,极端天气气候事件出现的频次在增加,强度也在加大。如此剧烈的气候变化单独或和社会经济因素结合在一起,已经并将继续影响农业生产,甚至危及粮食安全。

中国是一个具有悠久农耕历史的农业大国,与同纬度国家相比,农业是在气候条件不稳、土壤质地瘠薄的自然条件下发展起来的,受气候变化及气象灾害的影响巨大。同时,中国还是人口大国,人多地少,既要保证足够的粮食供应,又要保证人民生活水平的日益提高。因此,农业如何应对气候变化不仅关系到中国的粮食安全,而且直接影响到中国的社会稳定、经济发展乃至国家安全。正因为如此,中国政府与相关部门高度关注农业生产与粮食安全问题。

为确保气候变化背景下农业增产、农民增收,2005年中央1号文件《中共中央国务院关于进一步加强农村工作提高农业综合生产能力若干政策的意见》(中发〔2005〕1号)明确指出,应该加强“农业灾害的监测、预报、防治和处置,农业资源、农业生态环境和农业投入品使用监测,水资源管理和防汛抗旱等职能”。2008年中央发布了《中共中央国务院关于切实加强农业基础设施建设进一步促进农业发展农民增收的若干意见》(中发〔2008〕1号)和《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020年)》(以下简称《纲要》)。依据《纲要》,2009年国务院颁布了《全国新增1000亿斤粮食生产能力规划(2009—2020年)》,明确提出至2020年中国需要新增粮食1000亿斤以上。《中国气象事业发展战略》也明确提出,“气象部门以国家粮食安全和生态安全气象保障服务为重点,积极拓展农业生态系统监测和信息服务领域,为中国农业防灾减灾,农业高产、高效和优质提供气象保障服务,为农业生态系统保护和建设提供科学支持。”

气候变化对中国农业生产的影响已经显现,并将随着气候变化程度的加剧,对农业生产的影响将持续增大。为确保未来气候变化情景下中国的粮食安全,趋利避害,规避极端天气气候灾害风险,减缓气候变化的不利影响,增强农业防灾减灾能力,及时为各级政府决策提供服务,迫切需要明晰已经发生的气候变化对中国农业的影响事实以及未来气候变化可能对中国农业的影响趋势,探讨未来气候变化下中国农业生产潜力变化,建立可持续发展的粮食安全生产与农民增收模式,从而适应和减缓气候变化的影响。

为此,自2011年起中国气象局专门针对“中国农业应对气候变化的措施”进行持续资助,开展了多部门、多学科的综合协作研究。本书是关于中国农业应对气候变化措施研究成果的系统总结,采用“要素—过程—结果—评估—对策措施”的研究思路,从全国、主要农区及主要粮食作物(水稻、玉米、小麦)三个层次,分析了中国农业气候资源变化、农业气象灾害变化、农业病虫害变化、农业种植制度变化及其对粮食生产的影响,从主要粮食作物的种植面积、复种指数、品种布局和生产管理方式等方面探讨了中国农业适应气候变化的对策措施,研究成果可供相关部门和领域交流与相互借鉴。希望本书的出版能为进一步深入开展气候变化对农业的影响及应对措施研究提供理论基础。

全书由周广胜研究员主持编写并统稿,其中第一章由周广胜、周莉、房世波、麻雪艳、王秋

玲等执笔,周广胜统稿;第二章由周广胜、陈超等执笔;第三章由周莉、宋艳玲、申双和等执笔;第四章由宋艳玲执笔;第五章由毛留喜、郭安红等执笔;第六章由霍治国、张蕾、于彩霞、王丽、黄大鹏、吴立执笔,霍治国统稿;第七章由杨晓光、赵锦执笔;第八章和第九章由居辉、徐建文、姜帅、李翔翔执笔;第十章至第十二章由郭建平、赵俊芳、邬定荣、俄有浩、徐延红、穆佳等执笔,郭建平统稿;第十三章由唐华俊、周广胜、杨鹏、吴文斌、李正国等执笔。

本书由中国气象局项目“中国农业应对气候变化的措施”与科技部全球变化研究国家重大科学研究计划(973 计划)项目“全球变化影响下中国主要陆地生态系统的脆弱性与适应性研究”(2010CB951300)共同资助。特别值得指出的是,我们在承担和完成各项任务以及撰写和出版过程中,得到中国气象局矫梅燕副局长、中国气象局应急减灾与公共服务司陈振林司长、中国气象局应急减灾与公共服务司农业气象处李朝生副处长和潘亚茹高级工程师等的大力支持与指导。在此,谨对他们表示诚挚的谢意。

由于研究的阶段性及水平限制,关于中国农业应对气候变化的认识尚有待不断深入。本书疏漏之处和缺点错误难免,敬请广大读者批评指正。

著 者

2014 年 6 月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 中国气候变化概况	(1)
第二节 气候变化对中国农业的影响事实	(2)
第三节 气候变化对中国农业的影响预估	(7)
第四节 中国农业对气候变化的适应技术	(10)
第五节 中国农业应对气候变化的研究资料与方法	(10)
第二章 农业气候资源变化	(18)
第一节 气候资源变化	(18)
第二节 主要农区气候资源变化	(19)
第三节 主要粮食作物农业气候资源变化	(22)
第四节 农业气候资源变化对粮食生产的影响	(32)
第三章 农业气象灾害变化	(38)
第一节 旱涝灾害	(38)
第二节 低温灾害	(43)
第三节 高温热害与干热风	(50)
第四章 未来农业气象灾害演变趋势	(54)
第一节 未来气候情景数据订正	(54)
第二节 未来农业气象灾害演变趋势	(57)
第五章 农业气象灾害变化对粮食生产的影响	(62)
第一节 农业干旱	(62)
第二节 洪涝	(65)
第三节 低温冷害	(66)
第四节 霜冻	(67)
第五节 寒害	(68)
第六节 高温热害	(68)
第七节 干热风	(69)
第六章 农业病虫害变化	(70)
第一节 气候变化对农业病虫害影响事实	(70)
第二节 气象条件对农业病虫害发生的影响	(76)
第三节 气象条件对主要粮食作物病虫害发生的影响	(79)
第四节 农业病虫害对粮食作物生产的影响	(91)
第五节 未来农业病虫害演变趋势	(96)

第七章 主要粮食作物种植制度变化	(97)
第一节 种植制度区域分异	(97)
第二节 作物种植北界变化及其产量效应	(98)
第三节 主要农区粮食作物种植面积变化	(106)
第四节 未来作物种植北界变化	(115)
第八章 主要粮食作物生长发育变化	(119)
第一节 水稻生长发育变化	(119)
第二节 小麦生长发育变化	(123)
第三节 玉米生长发育变化	(131)
第九章 主要粮食作物生产变化	(137)
第一节 水稻生产变化	(137)
第二节 小麦生产变化	(141)
第三节 玉米生产变化	(144)
第十章 主要粮食作物气候生产潜力	(148)
第一节 水稻气候生产潜力	(148)
第二节 冬小麦气候生产潜力	(153)
第三节 玉米气候生产潜力	(155)
第十一章 未来气候情景下主要粮食作物气候生产潜力	(160)
第一节 水稻气候生产潜力	(160)
第二节 冬小麦气候生产潜力	(168)
第三节 玉米气候生产潜力	(171)
第十二章 未来主要粮食作物产量提升潜力	(178)
第一节 水稻产量提升潜力	(178)
第二节 冬小麦产量提升潜力	(180)
第三节 玉米产量提升潜力	(181)
第十三章 主要粮食作物适应气候变化的对策措施	(183)
第一节 主要粮食作物种植面积调整	(183)
第二节 主要粮食作物复种指数调整	(188)
第三节 主要粮食作物品种布局调整	(190)
第四节 主要粮食作物生产管理方式调整	(194)
第五节 保障措施	(197)
参考文献	(200)

第一章 绪 论

国以民为本,民以食为天。粮食是关系经济发展、社会稳定和国家自立的基础,保障国家粮食安全始终是治国安邦的头等大事。

中国是一个具有悠久农耕历史的农业大国,地处季风气候区,天气、气候条件年际变化很大,气象灾害发生频繁,农业受气候变化与气象灾害影响剧烈;同时,中国农业生产基础设施薄弱,抗御自然灾害能力较差,使得中国成为世界上受气象灾害影响最为严重的国家之一。据统计,中国每年因气象灾害造成的损失占整个自然灾害损失的70%左右,造成的直接经济损失占国民生产总值的3%~6%(翟盘茂等,2009a)。

中国仅有世界7%的耕地,要养活世界20%的人口,并且还要保证人民生活水平不断提高。随着全球气候持续变暖与极端天气气候事件的频繁发生,破坏程度越来越强,影响越来越复杂,应对难度越来越大,从而将加大未来中国农业受灾风险和粮食安全的不确定性。经济平稳发展与社会和谐稳定对农业稳产高产的客观要求与气候变化影响的严峻形势之间的矛盾越来越突出。正因为如此,农业生产与粮食安全问题受到政府与科学家的高度关注。

为确保气候变化背景下中国的粮食安全,提高农业防灾减灾能力,及时为各级政府决策提供信息服务,迫切需要弄清已经发生的气候变化对中国农业的影响以及未来气候变化可能对中国农业的影响,并基于可持续发展理论建立安全的粮食生产与农民增收模式以适应和减缓气候变化的影响。

第一节 中国气候变化概况

中国气候条件复杂,大部分地区的气温季节变化幅度较同纬度其他地区剧烈,很多地方冬冷夏热,夏季普遍高温;降水时间分布极不均匀,多集中在汛期,而且降水的区域分布也不均衡,年降水量从东南沿海向西北内陆递减。气候变化极大地改变了中国农业的气候资源。农业生产活动只有与之相适应,才能更加充分合理地利用气候资源,变不利为有利,实现农业生产的可持续性。

中国气候变化趋势与全球气候变化的总趋势基本一致(秦大河等,2005)。近百年来,中国地表年均气温升高约0.5~0.8℃;最近50年升高1.1℃,增温速率达0.22℃/10a,明显高于全球或北半球同期平均增温(0.74℃,0.13℃/10a)(丁一汇等,2006)。2010年中国气象局《气候变化对中国农业影响公报》指出,1961—2009年中国大部地区气温呈上升趋势,其中北方地区增温明显,增幅在0.3~0.6℃/10a之间,增温最显著的区域主要分布在东北地区的东北部、内蒙古中部和新疆的东部,升温幅度达到0.6~0.9℃/10a。黄河以南大部地区升温幅度普遍较小,一般在0.3℃/10a以下。

温度增加使得中国热量资源呈总体增加、时空分布极其不均的显著变化特点:北方地区增加幅度大于南方地区,且冬季和夜间增温较大;北方地区的气候变暖主要来自最低气温升高的贡献,其升温速率为最高温度升温速率的2倍左右(王菱等,2004);而南方地区的增温趋势不明显(Tao et al., 2006)。黑龙江省1961—2003年的平均气温、平均最高气温、平均最低气温均呈显著上升趋势,其中平均最低气温增加幅度最大,达 0.69°C (白鸣祺等,2008);1961—2004年华东地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温和持续日数分别增加了 $5.18\sim 9.53^{\circ}\text{C}\cdot\text{d/a}$ 和 $0.22\sim 0.60\text{d/a}$ (李军等,2009)。

2010年中国气象局《气候变化对中国农业影响公报》指出,气候变化也使中国降水及其分布格局发生明显变化。1961—2009年中国平均降水量没有明显的趋势性变化,仅略增加了12.86 mm,然而近10余年来降水量呈下降趋势。中国降水变化则呈现较大的区域特征。东北东部、华北中南部的黄淮海平原和山东半岛、四川盆地以及青藏高原部分地区的降水出现不同程度的下降趋势;在中国的其余地区,包括西部地区的大部分、东北北部、西南西部、长江下游和东南丘陵地区,年降水量均呈现不同程度的增加(《气候变化国家评估报告》编写委员会,2007)。

分析表明,20世纪80年代初至21世纪初的近20年间,东北和华北大部地区的土壤含水量呈减少趋势,黄河上游和江淮流域一般为增加,而长江中下游增加较为明显(任国玉,2007)。西北干旱半干旱过渡区近50年的年降水量呈明显下降趋势,且近10年来降水出现剧烈下降,随着温度的进一步上升,土壤蒸发(散)的增加,未来干旱化将进一步加剧(高蓉等,2009);而华北地区1961—2000年的小麦和玉米种植每年需水分别亏缺 $90\sim 435\text{mm}$ 和 $0\sim 257\text{mm}$,特别是位于冬小麦种植的南北分界线 36°N 以北地区呈干旱化加剧趋势,而以南地区则呈干旱程度减弱趋势(Wang et al., 2008)。

第二节 气候变化对中国农业的影响事实

一、农业生产潜力变化

降水与温度的时空变化必将影响中国农业的生产潜力。气候变暖使得中国大陆(除西南地区外)的光温生产潜力呈显著增加趋势,其中北方增幅大于南方(章基嘉等,1992)。1991—2000年黄淮海平原耕地的生产潜力与气温呈显著正相关,温热水平每提高10%,耕地的生产潜力将提高3.2%(姜群鸥等,2007)。但是,不同地区限制作物生长的气象因子不同,使得气候变化对不同地区不同作物生产潜力的影响也不相同。温度是东北地区作物生长的主要限制因子,温度增加对东北地区不同作物气候生产潜力的促进作用不同:水稻最大,玉米次之,而大豆对温度变化的敏感性最小(周光明,2009)。与1951—2000年的平均值相比,松嫩平原90年代的玉米气候生产潜力增加了 1057kg/hm^2 ,水稻气候生产潜力增加了 787kg/hm^2 (周光明,2009)。由于气候资源时空分布的不均匀性,气候变暖也使得一些地区的光温生产潜力呈减小趋势。水分是西部干旱区作物生长的主要限制因子,90年代以来的降水量减少导致关中平原作物气候生产潜力减少(刘引鸽,2005)。

气候变暖引起的热量资源增加,使农作物春季物候期提前,生长期延长,生长期内热量充足,作物生产潜力增加,在一定程度上促进了作物的稳产高产。但是,不同地区气候变暖的程

度和趋势不同,各地区降水的时空格局变化也不相同。一些地区由于水分的制约,特别是温度增加、降水频次和强度的变异幅度加大以及气候变化的不确定性增加将进一步加大农业自然灾害发生的频次和强度,危及作物生产潜力的发挥(林而达等,2005)。因此,气候变化对中国各地农业生产的影响也不尽相同:一些地区是正效应,而另一些地区则是负效应。

气候变暖有利于东北地区的粮食生产。东北地区的作物生长主要受冷湿气候的影响,气候变暖使得该地区的温度升高,明显减轻了作物生长成熟的低温冷害,并使得作物生长期延长,有利于引进晚熟高产玉米、大豆品种和选种冬小麦、水稻等高产作物(刘颖杰等,2007; Tao et al., 2008)。据估算,20世纪90年代东北地区的粮食总产量较80年代初以前约增加了1倍(《气候变化国家评估报告》编写委员会,2007);相对于80年代,90年代的气候变暖对黑龙江省水稻单产增产的贡献率约23.2%~28.8%(方修奇等,2004),对松嫩平原玉米增产的贡献率约26.78%(王宗明等,2007)。

气候变暖对华东和中南地区的粮食产量影响并不明显。这在一定程度上是因为该地区社会经济发展较快,城市化引起的土地利用变化超过了气候对粮食总产的影响。

气候变暖不利于华北、西北和西南地区的粮食生产。这是因为这些地区大多处于干旱半干旱地区,温度升高使作物(越冬作物如冬小麦)生长发育加快、生长期缩短,作物可利用的有效水资源相对减少,致使作物的总干重和穗重减少,从而对粮食生产产生负面影响。

二、作物种植制度变化

一个地区作物的种植制度应该根据现实生产和资源条件,兼顾经济发展和基于生态管理的资源保护的最佳化,最终达到预期的年度生产目标(Hanson et al., 2007)。随着温度的升高,世界范围内作物的种植范围向更高纬度的区域发展,导致区域种植结构发生变化,已经形成共识(Rosenzweig et al., 1998; Easterling et al., 2007)。因此,气候资源等内在和外界条件的变化,决定了需要一个动态的种植制度与之相适应,以保证农业生产目标的实现(Hanson et al., 2007)。

作物种植界线显著北移高扩。20世纪90年代中后期,东北地区的水稻种植北界已达52°N左右的呼玛地区,较80年代初北移了约4个纬度。中国冬小麦种植北界(长城沿线)与50年代所确定的冬小麦种植北界(长城沿线)相比,已经从大连(38°54'N)推移到了42.5°的抚顺—法库—彰武一线(郝志新等,2001),北移了近4个纬度,可种植最高海拔也由海拔1800~1900 m上升到了2200 m(邓振镛等,2007);特别是,黑龙江省冬小麦的种植北界已达克东和萝北等北部地区,较50年代所确定的冬小麦种植北界(长城沿线)北移了近10个纬度(祖世亨等,2001;云雅如等,2007)。黑龙江省的玉米种植北界已扩展至大兴安岭和伊春地区,向北推移了约4个纬度;同时,玉米种植区域也向高海拔地区扩展。在西藏地区,80年代以后,玉米种植地区由传统意义上的海拔1700~3200 m扩展到海拔3840 m(禹代林等,1999;任国玉,2007)。过去20年来,吉林省的玉米带种植重心由西向东移动,自1950年至2000年重心向东偏移了18.3 km,除政策支持和经济收益的作用外,近年来的气温升高,尤其是冬、春两季增温起到重要的推动作用(王宗明等,2006)。温度升高也使得中国夏播大豆的种植北界越过了原有的北方温和、中长光照春夏播大豆区,到达东起辽东半岛南缘,经渤海沿长城西行,接岷山—大雪山一线的位置,约向北推进了3~5个纬度(高永刚,2005)。

多熟种植界线明显北移高扩。双季稻种植北缘由原先的28°N推进到31°~32°N,稻麦二

熟由原先的长江流域推进到华北平原的北缘(40°N)(章秀福等,2003);华北地区两年三熟制已改为冬小麦—玉米一年两作(江爱良,1993)。

作物品种布局发生明显改变。气候变暖引起的热量增加使得中国南方的水稻品种逐渐向北方扩展,冬小麦种植北界北移西扩,喜温作物播种面积比例增加。在中国,冬小麦品种按其冬春性特点分为强冬性、冬性、半冬性和春性4种类型。目前,气候变暖已导致中国华北地区一直以来广泛种植的强冬性冬小麦品种因冬季无法经历足够的寒冷期以满足春化作用对低温的要求不得不被半冬性甚至弱春性小麦品种所取代,导致遭受冷害冻害风险加大(周新保,2005;云雅如等,2007)。近50年来,河南省冬小麦品种由冬性为主演变到半冬性、弱春性占绝对优势,且其成熟期也明显提早(周新保,2005)。在南方,比较耐高温的水稻品种将占主导地位,并逐渐向北方发展;东北地区乃至中国大部分地区水稻种植区均表现出由早熟被高产晚熟品种所替代的趋势(高亮之等,1994;周广胜等,2005;云雅如等,2007)。近50年来,辽宁省 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温界限开始的日期明显提前,大部分地区提前6天左右;吉林省玉米品种成熟期较以前延长了7~10 d,玉米杂交种北移现象突出,使得生育期长、成熟期晚的高产晚熟玉米品种得到推广(贾建英等,2009)。气候变暖对作物品种布局的改变深刻地影响了品种在粮食生产中的作用和地位。

作物复种指数大幅度提高。中国是世界上复种面积最多的国家,有着较大的土地产出率。气候变暖已经显著地影响了中国的复种指数:中国的作物复种指数明显上升,由1985年的143%增加到2001年的163.8%,其中青藏高原、西北、西南、华东和华南地区丘陵山地的复种指数增加幅度较大(张强等,2008)。中国作物复种指数的增加,有效地促进了粮食增产。

种植结构发生明显变化。由于不同地区气候变暖的程度和趋势不同,气候变化对农业种植结构的影响也不尽相同。1984年前黑龙江省的水稻播种面积仅占3种主要粮食作物(水稻、玉米与小麦)总播种面积的6%,2000年达到39%,使得黑龙江省的粮食作物种植结构从主要以小麦和玉米为主转变为以玉米和水稻为主的结构(云雅如等,2005,2007)。在甘肃省,喜热作物棉花、玉米和谷子的种植面积也迅速扩大(刘德祥等,2007;邓振镛等,2008a),棉花主产区河西走廊的种植面积较20世纪80年代扩大了7倍(周震等,2006)。

气候变暖改变了热量的时空分布格局,深刻地影响了作物种植制度,主要体现在种植界限的北移和复种指数的提高,为有效促进农业增产与农民增收带来了机遇。但由于中国气候变化的时空变异较大,北方干暖化趋势明显,南方洪涝灾害频发,使得现有农业生产面临着调整不及时、应对措施不当等带来的巨大挑战。缺乏科学论证的引种已经给中国的粮食生产带来严重危害。例如,发生在东北地区的“水玉米”事件就是由于种植玉米品种的生育期超过当地无霜期所致(蒋相梅,2001;史桂荣,2001)。而发生在中国黄淮、长江中下游与西南地区冬麦区的冻害及由此引起的群众集体上访事件就是由于盲目推广春性较强的小麦品种所致,特别是2004年小麦良种补贴项目实施的利益驱使进一步加剧了这一现象(林而达,2008)。1993年冬季江汉平原发生的一次大范围低温冻害过程导致天门蜜橘一夜之间几乎全部冻死,造成了普遍性经济损失,这都是预先没有从气候学角度进行科学论证而盲目引种导致的结果(赵建平,2002)。

三、农业气象灾害与病虫害变化

尽管气候变暖在改善和增加区域热量条件的同时,也增加了一些区域的水分条件,在一定

意义上增加了粮食的生产潜力。但是,气候变化的不确定性使气象灾害加剧,导致高温、干旱、强降水等极端天气气候事件与病虫害频发,而且来势早、强度大,并有加剧的趋势(Easterling et al., 2007; Tubiello et al., 2007; Battisti et al., 2009),导致农业生产的脆弱性增加(Easterling et al., 2007),粮食生产面临的风险增加,甚至给农业生产带来巨大的损失。

伴随着气候变暖和降水变异的加剧,自 1950 年以来,中国的旱灾、洪涝、热浪和低温冷害冻害等极端天气气候事件加剧(林而达等, 2005),近年来冰雪灾也时有发生,导致中国作物的受灾和成灾面积日益扩大,农业粮食产量与经济损失呈指数增长。据统计,1950—2002 年中国农业自然灾害作物受灾面积平均每年为 3854.8 万 hm^2 ,受灾率为 26%。在灾害造成的总损失中,水旱受灾 3211.4 万 hm^2 ,占播种作物总受灾面积的 83.3%(翟盘茂等, 2009b)。特别是 20 世纪 90 年代以来,气候变率增大,致使中国重大农业气象灾害频发,损失巨大,仅 1990—2006 年期间的年均经济损失就达 1004 亿元,而 2008 年初的低温雨雪冰冻灾害使得 20 个省(区、市)的直接经济损失达 1111 亿元,其中作物受灾面积达 1.77 亿亩(谷洪波等, 2009)。

干旱。是中国农业面临的最主要灾害。近半个世纪以来,中国干旱地区和干旱强度都呈现增加趋势。中国北方主要农业区的干旱面积一直上升,夏秋两季干旱日益严重,华北、华东北部干旱面积扩大尤其迅速,形势尤其严峻(秦大河, 2009)。20 世纪 50 年代以来,中国农业干旱受灾、成灾面积逐年增加,每年因旱灾损失粮食 250 亿~300 亿 kg,占自然灾害损失总量的 60%。

2009 年云南省遭遇了 60 年一遇的特大旱灾。据当地气象部门分析,2009 年 9 月中下旬以来,云南省大部分地区降水量异常偏少,而气温明显偏高,蒸发量增加进一步加剧了旱情,造成了特大旱灾。截至 2010 年 1 月 30 日,云南全省作物受旱面积达 1755 万亩,其中重旱 667 万亩、干枯 207 万亩,致使部分地区颗粒无收,如云南玉溪就有 34.1 万亩小春作物绝收。

洪涝。20 世纪以来,中国暴雨极端事件出现频率上升、强度增大,尤以华南和江南地区最为明显(刘九夫等, 2008),其中 90 年代为近 50 年来洪涝高发的 10 年。近 50 年来,中国洪涝灾害成灾面积呈逐年增加趋势。目前,中国的洪涝灾害主要集中发生在长江、淮河流域以及东南沿海等地区,中国 40% 的人口、35% 的耕地和 60% 的工农业产值长期受到洪水威胁(冷传明等, 2004)。洪涝灾害对粮食生产的危害仅次于旱灾,每年因洪涝灾害造成的粮食平均损失占总量的 25%。

高温热浪。全球气候变暖引发夏季持续高温和热浪频发,成为中国农业面临的主要气象灾害之一。1956—2006 年,中国平均气温线性增加,中国 50 年日最高气温除青藏高原地区外均高于 35°C ,其中 50 年日最高气温极大值高于 40°C 的地区主要分布在塔里木盆地、吐鲁番盆地、华北东部、黄淮地区和长江中游地区;中国大部分地区,即除青藏高原、西南西部和东部大部以及内蒙古中东部等地的其他地区,平均高温日数大于 2 d,新疆吐鲁番盆地甚至高达 94.4 d,江南大部分地区也在 20 d 以上(高荣等, 2008)。热害在江苏、浙江、湖北、湖南、江西和四川等省时有发生,导致稻谷减产达 10%~18%。

近 50 年来,华北地区和华东地区的春末高温、干热风发生频率和强度呈增加趋势(邓振镛等, 2009);江南地区和华南地区的高温使得水稻灌浆不足导致减产(熊伟, 2009);西北地区显著的暖干化增加了干热风发生次数,给农业带来巨大危害(邓振镛等, 2009)。

低温冷害冻害。寒潮和强冷空气是中国秋冬春三季易发生的灾害性天气,常常带来剧烈降温和大风天气,有时还伴有雨雪和冻雨,形成冻害。1951—2004 年中国和区域性寒潮(统称为总寒潮次数)共发生 371 次,平均每年 7 次,其中中国性寒潮 104 次,平均每年发生约 2 次

(王遵娅等,2006)。中国每年因冷害损失稻谷约 30 亿~50 亿 kg。低温冷害时间变化趋势分析表明:东北三省 20 世纪 60 年代末至 70 年代中期发生较为频繁,灾害程度较重;80 年代后气温明显升高,低温冷害出现频次明显减少。气候变暖背景下,东北和华北地区的霜冻害和冻害也时有发生,如 90 年代发生在吉林省中部较严重的初霜冻和松辽平原的初霜冻造成大田作物受害致死。

同时,气候变暖引起的中国持续的冬前和冬季偏暖使得越冬作物春季冻害风险加大。1998 年河南省发生大范围的越冬冻害,造成的损失占全部农业灾害损失的 20%。2004 年黄淮海地区从播种至 12 月 20 日温度持续偏高 2~6℃,导致麦苗生长过旺,但 12 月 20 日出现的大范围降温、降雪天气使得气温骤降 5~10℃,麦苗无法适应气温突变,导致黄淮麦区冬小麦受冻面积达 333 万 hm²,其中严重冻害超过 33.3 万 hm²(李茂松等,2005a)。实地调查表明,冻害较重的小麦地上部分 90% 干枯,分蘖节基本上冻死枯萎,减产 50% 以上,大部分地块绝收,占受冻害麦田的 10% 左右。气候变化还导致中国华南寒害发生的频率增加。20 世纪 90 年代以来,华南地区严重冬季寒害发生了 5 次,占 50 年代以来严重寒害次数的 62.5%。

可见,中国是一个遭受农业气象灾害严重的国家,气候变暖将加剧中国的农业气象灾害及其影响。特别是,近几十年来中国夏季高温热浪增多,局部地区特别是华北地区干旱加剧,南方地区强降水增多,西部地区雪灾发生的几率增加、面积扩大;干旱、洪涝、冻害、雪灾和风灾等主要农业气象灾害的时空分布、发生规律、年代际变化特征等发生了较大变化,总体上朝着不利的方向发展;每年气象灾害造成的经济损失约占各种自然灾害总损失的 57%。总体而言,气候变化对农业生产的影响利弊并存,但以负面影响为主(林而达等,2005)。

气候变暖不仅加剧了农业气象灾害及其影响,也加剧了农业病虫害的频发,而且来势早、强度大。据联合国粮农组织(FAO)统计,全世界农业生产中每年因虫害、病害和杂草危害造成的损失占总产值的 37%,其中虫害占 14%、病害占 12%、杂草占 11%。中国农业病虫害具有种类多、影响大、时常暴发成灾的特点,其发生范围和严重程度对国民经济、特别是农业生产产生直接的重大影响。例如,中国重要农作物的病虫草鼠害达 1400 多种,其中重大流行性、迁飞性病虫害就有 20 多种。几乎所有大范围流行性、暴发性、毁灭性的农作物重大病虫害的发生、发展、流行都和气象条件密切相关,或与气象灾害相伴发生。目前,中国农业因病、虫、草害造成的损失约占农业总产值的 20%~25%(熊伟,2009)。

农业有害生物种类剧增且灾害加重。20 世纪 50—70 年代,中国每年发生面积 333.3 万 hm² 以上的农业有害生物种类只有 10 余种,80 年代为 14 种,90 年代为 18 种,2000—2004 年平均每年 30 多种。据统计,1949—2006 年中国重大农业生物灾害发生面积由 0.12 亿公顷次上升到 4.60 亿公顷次,近 5 年年均发生面积超过 4.2 亿 hm²。无论是水稻、小麦、玉米、大豆等主要粮食作物,还是蔬菜、果树等园艺作物的生物灾害都呈加重态势(夏敬源,2008)。

农作物病虫害的发生、发展和流行加剧。就农作物病害而言,病害的潜育期一般在发病温度范围内随温度升高而缩短,如西瓜蔓枯病潜育期在 15℃ 时,需要 10~11 d,而 28℃ 时只需 3.5 d。高温有利于大白菜炭疽病的流行,通常在适宜温度范围内大多数害虫的各虫态发育速率与温度呈正相关,温度升高使得害虫各生育期缩短;反之,则延长。温度升高,害虫就会提前发育,一年中的繁殖代数增加,数量呈指数增加,造成农田多次受害的几率增大。同时,病虫越冬状况受温度影响将更加明显,冬季变暖,有利于多种病虫越冬,可造成主要农作物病虫越冬基数增加、越冬死亡率降低、次年病虫发生期提前、危害加重,而作物害虫迁入期提前、危害期

延长,可能导致农药施用量增加 20% 以上,甚至加倍。

研究表明,严重危害中国农作物的稻瘟病、水稻白叶枯病,水稻纹枯病、胡麻叶斑病、恶苗病、鞘腐病、绵腐病、黄萎病、普通矮缩病、黑条病、赤枯病等 11 种与气象条件密切的病害随着气候变化,其发生发展、危害范围、侵染途径等均发生了不同程度的变化(夏敬源,2008)。气候变暖,尤其是冬季温度增高,有利于条锈菌越冬,使菌源基数增大,春季气候条件适宜,将促使小麦条锈病的发生、流行加重。中国北方小麦条锈病已经连续 5 年(2001—2005 年)大流行,最高年份发病面积 560 万 hm^2 (夏敬源,2008)。低温和寒露风对穗颈稻瘟病的流行十分有利,双季稻种植区北移后,易造成稻瘟病北上,有利于稻瘟病的发生和加重等。中国南方的稻瘟病也已经连续 4 年(2004—2007 年)大流行,最高年发病面积 580 万 hm^2 (夏敬源,2008)。

气候变化也使得危害各种农作物的蝗虫、水稻螟虫、黏虫、稻飞虱、稻纵卷叶螟、小麦吸浆虫、蚜虫、红蜘蛛类、草地螟、棉铃虫等的发生频率和强度发生变化(李一平,2004)。中国北方农区的飞蝗 1995—2004 年连续 10 年暴发,草地螟 1998—2004 年连续 7 年大发生,年最高发生 3800 万亩次(王爱娥,2006)。2005—2007 年,当中国北方农区的飞蝗、草地螟暴发态势有所趋缓时,南方的稻飞虱、稻纵卷叶螟连续大发生,年均发生面积分别达到 2666.7 万公顷次和 2000 万公顷次(夏敬源,2008)。

第三节 气候变化对中国农业的影响预估

研究表明,以气候变暖为标志的全球气候变化将继续到可预见的将来。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告指出:21 世纪末,全球平均地表温度可能将升高 1.1~6.4℃(6 种 SRES 情景,与 1980—1999 年相比)(IPCC,2007),从而使中国粮食生产面临的风险增加。

一、未来气候变化将显著影响农业生产潜力

未来气候变化,特别是热量的增加,将对农业生产潜力产生显著影响(Lobell et al., 2003; 林而达等,2005)。高纬度地区,热量的增加将提高作物的生产力,而在低纬度地区则相反,将降低作物的生产力,特别是未来高温、旱涝灾害天气频发,强度加大,将使农业生产潜力变数增加,变得更加难以预测(Easterling et al., 2007; Battisti et al., 2009)。在 HadCM2 GX 方案条件下,未来气候变暖将显著影响中国气候资源的时空分布,将使东北地区的土地生产潜力明显增加,东北地区在 21 世纪 20 年代、50 年代和 80 年代的土地生产潜力分别较现在增加 16.0%、24.9% 和 36.8%;而雨养条件下则将分别增加 12.1%、10.1% 和 35.3%;但气候变化却明显减少华南和西藏地区的土地生产潜力(唐国平等,2000)。

同时,未来气候变化将可能加剧农用水资源的不稳定性与供需矛盾。据研究,气温每升高 1℃,因需水量增加,农业灌溉用水量将增加 6%~10%(《气候变化国家评估报告》编写委员会,2007)。温度升高使作物需水量加大,土壤水分的蒸发量也将增大,作物可利用水资源量将减少。因此,热量资源增加的潜在有利因素可能会由于水资源的匮乏而无法得到充分利用。

研究表明,1981—2000 年水稻生长季节温度每升高 1℃将使安徽合肥的水稻产量下降 3.7%,甘肃天水地区的小麦产量下降 10.2%,但却使黑龙江哈尔滨地区的玉米产量大幅度增

加,呈现出“北增南减”的趋势(Tao et al., 2006),反映出未来气候变暖引起的蒸发(散)增加对干旱程度的加剧,直接导致作物产量的降低(Chaves et al., 2003; Turner, 2004; Mavromatis, 2007; Wang et al., 2008)。Battisti et al. (2009) 基于实验和模型分析结果指出,主要粮食作物在生长季节每升高 1℃ 直接造成减产 2.5%~16%,虽然存在区域差异,但总的趋势是减产。Lobell et al. (2003) 指出,在美国生长季节温度每增加 1℃,玉米和大豆的产量将下降约 17%,而 Brown et al. (1997) 则指出每增加 1℃,美国中部地区的玉米、小麦、高粱和大豆等主要粮食作物将减产 5.3%。亚洲地区,在 CO₂ 浓度不变条件下,水稻生长季节每升高 1℃,产量将下降 7%(Matthews et al., 1997)。菲律宾国际水稻研究所的历史统计资料表明,夜间温度每升高 1℃,产量约降低 10%,而与日间的最大温度无关(Peng et al., 2004)。美国 Texas 的实验表明,夜间温度从田间观测的实际温度 27℃ 加热处理升高 5℃ 时,水稻产量降低 95%(Mohammed et al., 2009)。

在现有种植制度、种植品种和生产水平条件下,2030 年由于气候变暖和 CO₂ 浓度加倍,中国主要作物总产量将平均减少 5%~10%,其中小麦、玉米和水稻三大粮食作物均以下降为主(《气候变化国家评估报告》编写委员会, 2007)。模拟研究还表明,在未来气候变化情景下,中国作物产量的年际变率将高于基准气候情景,低产概率和产量波动风险上升(熊伟等, 2008)。最新研究表明,温度对作物产量的影响呈非线性变化,当温度高于关键温度后,作物产量将迅速下降(谭凯炎等, 2009)。

二、未来气候变暖将使作物种植面积扩大、作物布局发生变化

未来温度升高将使得中、高纬度地区的作物生长季延长、冷害减少,并使作物向更高纬度扩展,农业种植面积扩大。研究表明,年均温度每增加 1℃,北半球中纬度的作物带将在水平方向北移 150~200 km,垂直方向上移 150~200 m(Howden, 2003)。

气候变暖将进一步增加热量资源,从而引起中国长期形成的农业生产格局和种植模式发生变化,为中高纬度和高原区发展多熟种植制度带来了可能(邓可洪等, 2006)。未来气候变暖将使中国长江以北地区,特别是中纬度和高原地区生长季开始的日期提早、终止的日期延后,潜在的生长季延长;使多熟种植的北界向北推移,有利于多熟种植和复种指数的提高(杨恒山等, 2000)。到 2050 年,中国几乎所有地区的农业种植制度将发生较大变化(王馥棠, 2002)。在品种和生产水平不变的条件下,温度上升 1.4℃,降水增加 4.2%,将使中国多熟种制的面积发生变化:一熟种制面积可由当前的 62.3% 下降为 39.2%,二熟种制由 24.2% 变为 24.9%,三熟种制由 13.5% 提高到 35.9%。两熟制北移到目前一熟制地区的中部,目前大部分的两熟制地区将被不同组合的三熟制取代,三熟制地区的北界由长江流域北移到黄河流域(张厚瑄, 2000a, b)。21 世纪末期,全球平均气温上升 4℃ 左右时,中国单季稻面积还可以向北扩展 50 万 hm²,双季稻面积最大可扩展 620 万 hm²(Xiong et al., 2009)。值得注意的是,以上关于多熟种制范围变化的分析仅仅基于热量条件,没有考虑气候变化对水分条件及极端天气气候异常变化可能带来的不利影响。

未来气候变暖还将进一步影响作物布局和品种熟制。华北地区目前推广的冬小麦品种(冬性品种)可能将由于冬季无法经历足够的寒冷期而不能满足春化作用对低温的要求,从而将不得不被其他类型的冬小麦品种(半冬性和春性品种)所取代;较耐高温的水稻品种将在南方地区占主导地位,而且还将逐渐向北方稻区发展;东北地区玉米早熟品种逐渐被中、晚熟品

种取代(《气候变化国家评估报告》编写委员会,2007)。

三、未来气候变化将进一步加剧农业气象灾害及病虫害的影响

未来在温室效应影响下,高温、热浪、极度干旱和强降水事件发生的频率和强度可能将会增加(IPCC,2007)。未来气候变化将在全球范围内,特别是热带和亚热带地区,导致季节性热害发生更加频繁,世界粮食安全面临更大的危机(Battisti et al.,2009)。

研究表明,未来中国气候变暖趋势将进一步加剧,从而导致农业生产高温灾害加剧、低温灾害的发生频率在不同区域将有增有减,但强度均将增大,导致农业损失显著增加;区域性干旱灾害可能加剧;洪涝灾害存在加重的可能,作为中国重要的粮食主产区的长江流域和淮河流域,洪涝发生频率和危害程度均呈加剧态势。全球变暖背景下,发生100年一遇和20年一遇洪水的可能性增大。

未来气候变暖还将进一步增加一些农业病虫害基数、降低越冬死亡率,部分虫害首次出现期、迁飞期及种群高发期提前;一些病虫害的生长季节延长,繁殖代数增加,一年中危害时间延长,作物受害进一步加重。气候变暖也将加剧病虫害的流行和杂草蔓延,使得病虫害发生的地理范围扩大,造成病虫害越界限北移。目前,在中国北方地区出现一些以前没有或是较少的病虫害,尤其是春、秋发生的病虫害种类、数量、面积较过去增加。由于温度直接影响病虫害的生长发育及其危害能力,温度的变化及其分布也直接影响病虫害的发生流行及其地域分布(Drake,1994)。受热量限制的病虫害将向高纬度地区扩散,而中纬度地区则病虫害加重,病虫害暴发频率将逐年提高。据统计,气候变暖可使黏虫越冬北界北移约3个纬度、稻飞虱越冬北界北移2.5~3.5个纬度,黏虫、草地螟、稻飞虱繁殖代数增加(李淑华,1993)。无论是小麦、水稻、玉米、大豆等粮食作物,还是蔬菜、果树等园艺作物,其病虫害都呈加重态势,种植结构单一则将进一步加大病虫害的发生。气候变化引起的降水异常也有利于作物病虫害区域灾变,从而将进一步加剧农业病虫害的发生。

不仅如此,未来大气CO₂浓度的进一步升高将导致植物的含氮量下降,使得害虫采食量增大,以满足其对蛋白质的生理需求。农作物的改变和复种指数的增加可能更有利于害虫和病原物的传播,从而加剧病虫害的危害(吴志祥等,2004)。同时,气温升高将显著影响农作物害虫的繁殖、越冬和迁飞等习性,改变昆虫、寄主植物和天敌之间原有的物候同步性,打破原有生态平衡,使病虫害的治理难度加重,从而增加了农药、除草剂的施用量和资金投入,农业生产的损失进一步加重。

四、未来气候变化将增加农业适应成本

气温升高可能导致农业病虫害增加,害虫繁殖代数增加,作物受害程度加重,并向高纬度地区扩散,从而使得农药用量增加;同时,气候变暖使得土壤氮的释放量增加,有机质分解速率提高,加速土壤贫瘠。研究表明,15~28℃条件下,气温每升高1℃,可被作物直接利用的速效氮释放量增加4%。因此,要想保持原有肥效,每次的施肥量要增加4%左右。如果气温增加2℃或4℃,氮肥用量需要增加8%或16%(《气候变化国家评估报告》编写委员会,2007)。由于土壤有机质分解速率随温度升高而加强,未来气候变暖将导致土壤中的碳损失加速(Sundquist,1993;Kevenbolden,1993;McKane et al.,1997)。Kirschbaum(1995)认为,温度每升高1℃,土壤有机碳将损失10%,甚至更高。因此,气候变暖将使得化肥与农药的需求量

增加,农业生产成本因此将大幅度增加,而农药和除草剂挥发和淋溶流失的增加将加剧对土壤和环境的危害。

第四节 中国农业对气候变化的适应技术

气候变化已经极大地改变了中国气候资源的时空分布特点,出现了新情况新问题,对中国农业生产,特别是种植制度提出了变化的要求。面对气候变化,完善农业种植制度,调整作物结构,优化品质布局,取其利避其害,切实保障中国的中长期粮食安全,实现农业的可持续发展,是中国农业生产面临的紧迫任务之一。

目前,国内外关于适应气候变化的农业技术主要还停留在农民基于传统经验的自发试验阶段,即使有相关的研究,也多是基于站点尺度,难以在更大区域甚至全球推广,还缺乏系统的理论研究与应用示范。20世纪80年代,欧洲中部地区根据气候条件对土地利用进行了优化,冬小麦、玉米、蔬菜种植面积增加,春麦、大麦和马铃薯种植面积减少(Parry et al., 1988)。厄瓜多尔通过建造传统的“U”形滞留地,以在湿润年份收集降水,用于干旱年份(Rachel et al., 2006)。

中国农民也根据区域气候变化特点,自觉调整作物种植比例以适应气候变化。地跨湖南和湖北的两湖平原由于洪涝灾害的影响,当地农民发展了错开洪涝高峰期的早熟早稻品种与迟熟晚稻组合搭配的种植格局,部分实现了农业避洪减灾(王德仁等, 2000; 陶建平等, 2002); 甘肃省农民针对干旱灾害频发和小麦产量低而不稳的特点,自觉调整作物种植比例,减少了小麦的播种面积,扩大了耐旱作物如玉米、糜、谷、马铃薯、胡麻、豆类等的种植面积(姚小英等, 2004; 邓振镛等, 2006),实现了粮食增产和农民增收(杨小利等, 2009); 河南南阳农民选择生育期较长的小麦品种,减少了气候变暖的限制作用,有效地保持了小麦生产的稳定(Liu et al., 2009); 作为玉米高产中心的东北松嫩平原南部,由于气候变暖、生长期提前,夏季积温增加,当地农民通过种植一些晚熟高产品种,大幅度提高了玉米单产(王宗明等, 2006)。不仅如此,一些地区的农民还根据温度变化的特点调整传统的耕作方式,使农业生产适于气候变化。例如,由于冬前积温的增加,促使华北和黄淮海平原的小麦播期推迟,以避免生长过旺而遭受冻害。为此,鲁西北桓台县将1986年“冬前80%的保证积温选择”的适宜播期9月23日—10月3日调整为目的的10月2—10日,较传统播期推迟了7~9 d(荣云鹏等, 2007); 山西省晋城地区将以往的最佳播期9月24日—10月2日延至目前的9月28日—10月6日,即推迟了4 d,并获得最佳的产量结果(程海霞等, 2009)。

第五节 中国农业应对气候变化的研究资料与方法

气候变化已经极大地改变了中国气候资源的时空分布特点,出现了新情况新问题,对中国农业生产,特别是种植制度提出了变化的要求。面对中国已经发生的气候变化以及作物品种的变化,中国农业如何应对全球气候变化,趋利避害,规避极端天气气候灾害风险,减缓气候变化的不利影响,切实保障中国的中长期粮食安全,实现农业的可持续发展,是中国农业生产面