

QIHOU BIANHUA

气候变化



对中国粮食生产影响的模拟研究

DUI ZHONGGUO LIANGSHI SHENGCHAN YINGXIANG DE MONI YANJIU

熊 伟 等 / 编著

 气象出版社
China Meteorological Press

气候变化对中国粮食生产 影响的模拟研究

熊 伟 等/编著



图书在版编目(CIP)数据

气候变化对中国粮食生产影响的模拟研究/熊伟等编著. —北京:
气象出版社, 2009. 2

ISBN 978-7-5029-4565-7

I. 气… II. 熊… III. 气候变化-影响-粮食-生产-研究-中国
IV. F326. 11 P468. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 107293 号

审图号:GS(2006)2019 号

Qihou Bianhua dui Zhongguo Liangshi Shengchan Yingxiang de Moni Yanjiu

气候变化对中国粮食生产影响的模拟研究

熊 伟 等/编著

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

邮政编码: 100081

总 编 室: 010-68407112

发 行 部: 010-68409198

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@263.net

责任编辑: 崔晓军

终 审: 纪乃晋

封面设计: 博雅思企划

责任技编: 吴庭芳

责任校对: 永通

印 刷: 北京京科印刷有限公司

开 本: 880 mm×1 230 mm 1/32

印 张: 5.5

插 页: 6

字 数: 164 千字

版 次: 2009 年 2 月第 1 版

印 次: 2009 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 1~1 000

定 价: 20.00 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

编 委 会

主 编：熊 伟

编 委：

熊 伟 居 辉

林而达 许吟隆

杨 婕 王贺然

前 言

气候变化是当今国际社会普遍关注的全球性问题。20世纪80年代,国际社会认识到气候变化问题的严重性并采取了相应的对策。1988年11月,世界气象组织(WMO)与联合国环境规划署(UNEP)联合成立了“政府间气候变化专门委员会(IPCC)”;之后的近20年间,IPCC针对气候变化的科学规律、社会经济影响以及适应与减缓对策发表了四次科学评估报告,这些气候变化科学评估报告为国际社会应对气候变化以及为《联合国气候变化框架公约》的谈判提供了重要的科学咨询意见,已对国际政治、外交、环境及社会经济发展等产生了重要影响。

全球气候变化不仅影响人类生存环境,而且也将影响世界经济发展和社会进步。《联合国气候变化框架公约》以及《京都议定书》的生效实施,将深刻地影响各国的经济和社会发展,甚至影响到未来发展道路的选择。

中国是一个易受气候变化影响的发展中国家,中国政府对气候变化问题高度重视,并积极采取一系列的应对措施。中国政府不仅组建了国务院领导下的国家气候变化对策协调小组,还积极组织专家参与历次IPCC科学评估报告的编写和评审活动以及有关气候变化的国际谈判,并先后签署和批准了《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》。

农业生产作为借助自然体的一种社会活动,除受到各种社会经济环境和政策因素,如市场波动、国内外农业政策、农业管理水平、农业贸易、农业技术水平和土地利用政策等的影响外,还受到各种自然因素,如气候变率、极端气候事件(台风、洪水和干旱等)等的影响。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带来了严重影响。因此,能否预报气候的异常变化以及定量评估这些变化对农业生产的影响已成为当前迫切需要解决的重大问题。

模拟研究是评价宏观尺度气候变化影响的较好方法,20多年来国内外学者在此方面开展了广泛的研究工作,并取得了丰硕的研究成果,“中国农业科学院农业与气候变化研究中心”长期以来一直承担中国气候变化影响、脆弱性和适应性方面的研究,该中心的多名研究人员为IPCC第三次和第四次评估报告第二部分(气候变化的影响、脆弱性和适应性)的主要执笔人、贡献专家及评审专家,本中心发表的多篇SCI论文已经被IPCC第三次和第四次评估报告所引用。

“八五”以来,以本中心为首,联合其他兄弟单位,如中国科学院地理科学与资源研究所、中华人民共和国水利部水利信息中心、中国环境科学研究院、中国气象科学研究院、国家海洋局等组建起一支关于气候变化影响、脆弱性和适应性的专门研究队伍,主持了多项气候变化领域的国家攻关项目和支持项目,包括国家“八五”攻关课题“全球气候变化对农业、林业、水资源和沿海海平面影响和适应对策研究”,“九五”国家攻关课题“全球气候变化信息与模型支持系统的建立与应用研究”,“十五”国家攻关课题“气候变化

对关键脆弱领域的影响阈值及综合评估研究”，以及“十一五”科技支撑项目“气候变化的关键技术与示范研究”等。同时，本中心还主持和参加了多项有关气候变化的国际合作研究，如中英气候变化合作研究“气候变化对中国农业的可能影响”，中加气候变化 C5 项目之“气候变化与中国农业的脆弱性和适应性”，中澳“小麦和大豆 FACE 试验研究”等。

编著本书的主要目的是对以往的研究工作和结果进行全面、系统、综合地总结，从中提炼出重要的科学结论和研究方法，在此基础上为今后更好地开展研究工作提供参考。

本书共分 7 章，包括全球气候变化的事实及预测、全球气候变化对作物生长影响的研究、气候变化影响评估情景的选择、CERES 作物模型的介绍及其在中国的适应性、作物模型升尺度区域应用、气候变化对中国主要粮食作物影响的模拟、适应气候变化的可能对策及气候变化农业影响评估中的不确定性和未来发展方向。

本书由中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助。全书统稿由熊伟完成，编著者包括熊伟、居辉、林而达、许吟隆、杨婕、王贺然等。

编著者

2008 年 12 月

目 录

第 1 章 全球气候变化的事实及预测	1
1.1 已观测到的全球气候变化	1
1.2 预测的未来气候变化	3
1.3 全球气候变化对农业造成的可能影响	4
第 2 章 气候变化对作物生长影响的研究	22
2.1 气候变化对作物生长影响评估方法	22
2.2 利用作物模型评估气候变化对作物生长的影响	28
第 3 章 气候变化影响评估情景的选择	41
3.1 社会经济情景	41
3.2 气候变化情景	50
3.3 IPCC SRES 中社会经济情景的选择和相应 气候变化情景描述	55
3.4 情景构建的不确定性分析	55
第 4 章 CERES 作物模型及其在中国的适用性	59
4.1 作物模型核心——CERES 作物模型介绍	60
4.2 CERES 作物模型在中国的模拟结果	75
第 5 章 作物模型升尺度区域应用	80
5.1 作物模型升尺度区域应用的理论依据	81

5.2	作物模型升尺度区域校准和验证·····	86
5.3	作物模型升尺度区域应用和效果分析·····	100
5.4	作物模型升尺度区域应用的误差·····	110
第6章	气候变化对中国主要粮食作物影响的模拟·····	112
6.1	A2 和 B2 温室气体排放情景下中国气候的 变化趋势·····	112
6.2	气候情景下产量计算方法·····	114
6.3	气候变化对中国水稻生产的影响·····	115
6.4	气候变化对中国小麦生产的影响·····	123
6.5	气候变化对中国玉米生产的影响·····	128
6.6	气候变化对中国粮食安全的影响·····	133
第7章	适应气候变化的可能对策·····	141
7.1	中国已经采取的适应措施·····	142
7.2	农业适应能力建设目标·····	142
7.3	农业部门适应气候变化的政策和措施·····	143
7.4	各区域可能的适应措施和技术·····	145
参考文献 ·····		148
附录	气候变化农业影响评估中的不确定性及未来发展方向 ·····	163

第 1 章 全球气候变化的事实及预测

1.1 已观测到的全球气候变化

全球气候变化研究从 20 世纪 80 年代开始,目前已经成为全球关注的重要问题,国际社会为此建立了广泛的观测网络。大量的观测事实表明,全球变暖已经是不争的科学事实,全球环境正经历着比过去 1 000 年快得多的变化,这些变化主要包括:大气臭氧层的损耗,大气中氧化作用的减弱,全球气候变暖,生物多样性减少,土地利用格局与环境质量的改变,以及人口的急剧增长等。

世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)于 1988 年共同组建了政府间气候变化专业委员会(IPCC),其任务之一是定期组织世界各国的科学家评估全球气候变化的科学、影响和对策问题,并向《联合国气候变化框架公约》缔约方大会提供咨询。从 1990 年起至 2007 年底 IPCC 已经进行了四次评估,给出了对气候变化、影响及对策的最新认识。

IPCC 第一工作组的报告《气候变化 2001:科学基础》中指出,自 1861 年以来,全球表面平均温度(陆地和海面近表层气温的平均值)已经增加。第三次评估报告确认,20 世纪(1901—2000 年)全球表面平均温度已经升高了 $(0.6 \pm 0.2)^\circ\text{C}$,第四次评估报告又明确指出,最近 100 年(1906—2005 年)全球表面平均温度上升了 0.74°C ($0.56 \sim 0.92^\circ\text{C}$)。在有仪器记录时期,从全球来看,20 世纪的增温可能是过去 1 000 年间所有世纪中最明显的,最近 50 年升温率几乎是过去 100 年的 2 倍;1850 年以来最暖的 12 个年份中有 11 个年份出现在近期的 1995—2006 年(除 1996 年);20 世纪 90 年代很可能是 1861

年以来仪器记录中最暖的 10 年,1998 年很可能是同期最暖的一年(IPCC 2001)。

从 1961 年以来的全球海洋温度观测结果看,全球海洋温度的增加已延伸到至少 3 000 m 深度,海洋已经并且正在吸收 80% 以上增加到气候系统的热量,这一增暖引起海水膨胀和冰川融化,并造成海平面上升,在过去的 100 年(1906—2005 年)中,全球海平面已经上升了 10~25 cm,20 世纪全球海平面上升了约 0.17 m,全球冰盖范围近 50 年来减少了约 10%。

全球气温升高的同时,也伴有降水量的增减,气候变率的改变及某些极端气候事件频率和强度的改变。2003 年百年未见的欧洲热浪、2008 年中国南方百年一遇的持续降雪等灾害的发生在很大程度上都与气候变化有关。

受气候变化的影响,全球环境也发生着前所未有的变化,如:全球的森林面积急剧减少,以热带森林最为严重;全球沙漠化的扩大;污染导致的全球环境质量下降等。这些变化又加剧了地球上动植物物种消失的速率。据研究表明,目前地球上的动植物物种消失的速率比过去 6 500 万年之中的任何时期都要快上 1 000 倍,大约每天有 100 个物种灭绝。20 世纪以来,全世界 3 800 多种哺乳动物中,已有 110 个种和亚种消失,9 000 多种鸟类中已有 139 个种和 39 个亚种消失,还有 600 多种动物和 25 000 多种植物正面临灭绝的危险。

在全球气候变化的大背景下,中国近 100 年的气候也发生了明显变化,主要表现为:近 100 年来中国气温已经增加了 0.6~0.7℃,以西北、华北和东北的冬季增温最明显,长江以南地区变暖趋势不显著;从季节分布看,中国冬季增温最明显;华北地区降水持续减少,出现暖干化趋势;极端天气事件,如旱涝灾害发生的频率和强度近 20 年来呈上升趋势(如中国 1998 年的大洪水,2008 年的南方冰冻雨雪天气等);海平面上升了 10~20 cm,冰川自小冰期结束以来面积减少了约 25%。

图 1.1 是中国华北地区年平均降水量和年平均气温变化图,由图 1.1 可见,华北地区年平均降水量从 20 世纪 60 年代的 640 mm

下降到 90 年代的 570 mm,降水变化率为每 10 年—17.8 mm,其中夏秋季减少明显。同时,年平均气温则表现出升高的趋势,通过对华北地区 71 个气象站点 40 年(1961—2000 年)年平均气温的统计,年平均气温升高幅度达到平均每 10 年 0.23°C (王群英等 1999)。

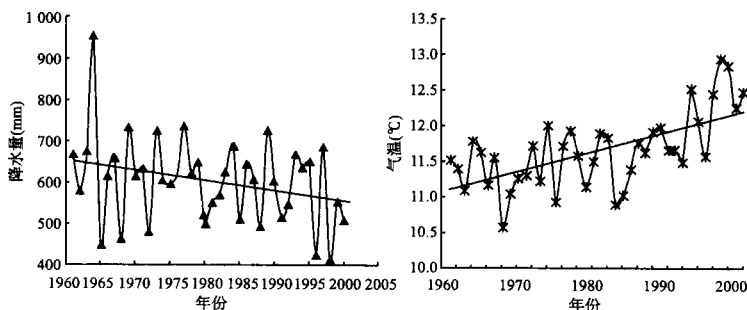


图 1.1 中国华北地区年平均降水量和年平均气温变化图(1961—2000 年)

1.2 预测的未来气候变化

IPCC 的评估报告已经肯定了气候变化的事实,并对未来社会经济发展状况进行了不同假设(如人口增长速率、经济发展速率、社会进步水平和技术进步程度等),然后采用全球 14 个模式中的 23 个全球气候系统模式进行有关气候变化成因和预估的数值试验。通过对各种复杂模式的对比预估,选择了 9 种温室气体排放情景,预测出在这些未来排放情景下,气候仍有继续增温的趋势(赵宗慈 2006)。

综合多模式多排放情景的预估结果,到 21 世纪末,全球地面平均增温 $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$,全球海平面平均上升幅度为 $0.18\sim 0.59\text{ m}$ 。在未来 20 年中,全球平均气温大约以每 10 年 0.2°C 的幅度升高,即使所有温室气体和气溶胶浓度稳定在 2000 年的水平,每 10 年也将增暖 0.1°C 。如果 21 世纪温室气体的排放速率不低于现在的水平,将导致气候的进一步变暖,某些变化会比 20 世纪更显著;如果全球

平均气温增幅超过 $1.5\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 被评估的 $20\%\sim 30\%$ 的动植物物种灭绝的风险将会增大。

气温升高的同时, 气候变率也将加大, 某些极端气候事件也将增多。21 世纪中期之前, 预计在高纬度和部分热带潮湿地区, 河流年均径流量和可用水量会增加 $10\%\sim 40\%$, 在某些中纬度和热带干燥地区, 其径流量和可用水量会减少 $10\%\sim 30\%$ 。山区冰川和积雪的储水量将会下降, 从而减少靠融水补给地区的可用水量, 影响世界上 $1/6$ 以上人口的用水。预计到 2080 年, 由于海平面上升, 将使数百万人口受灾, 人口稠密的三角洲地区尤为严重。

就中国而言, 若考虑 CO_2 和气溶胶的共同作用, 预计未来 100 年的气候也将继续变暖。到 2020—2030 年, 全国平均气温将上升 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$; 到 2050 年, 全国平均气温将上升 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 当大气中 CO_2 浓度加倍时, 全国平均气温将上升 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气候变暖的幅度由南向北增加, 到 2030 年, 西北地区气温可能上升 $1.9\sim 2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 西南地区气温可能上升 $1.6\sim 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 青藏高原气温可能上升 $2.2\sim 2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。未来 100 年中国年平均降水量将呈增加趋势, 其中西北地区增加明显, 而华北和东北南部等一些地区趋于继续变干。

1.3 全球气候变化对农业造成的可能影响

气候变化已经成为全球公认的环境问题, 全球气候变化及其对经济和社会发展的影响是当前人类面临的重要挑战, 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, 而成为关系到人类生存的热门话题, 全球各界已经对气候变化及其影响进行了广泛研究。能否预报气候的异常变化以及定量评估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(陈泮勤 1992)。

农业生产作为借助自然体的一种社会活动, 除受到各种社会经济环境和政策因素, 如市场波动、国内外农业政策、农业管理水平、农业贸易、农业技术水平和土地利用政策等的影响外, 还受到各种自然

因素,如气候变率、极端气候事件(台风、洪水和干旱等)等的影响。近年来,人们逐渐认识到,气候变化越来越变成影响农业生产的一个主要因素,它通过影响作物生长、农田管理、耕作制度、种植结构、病虫害和土地利用等方面影响着农业生产活动和农业生态环境。

1.3.1 气候变化对农业和农业生态的直接影响

1.3.1.1 温度和降水的变化对农业的影响

温度和降水的变化会影响农业的地域分布。温度和降水的变化带来的土壤含水量变化、作物生长季起始时间和长度变化会影响各地农作物的生长和种类。研究表明:如果全球平均气温增加 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,粮食生产潜力可能会增加;若超过这一升温范围,粮食生产潜力则可能下降。在中高纬度地区, $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的增温可以延长作物生长季,利于向更高纬度扩展作物种植面积,会使某些农作物的产量有所增加,因此 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围的气候变暖会有利于这些地区的农业生产;但若升温幅度超过此范围,产量也会降低。在低纬度地区,气候变暖将不利于这部分地区的农业生产,特别是对那些温度已经达到或临近作物最适生长温度的地区。而中高纬度地区由于土壤肥力缺乏,反过来会削弱生长季延长带来的好处,又由于其他因素的不确定性,如降水的变化、化肥的使用情况、灌溉水平等,因此,到目前为止,还不能准确地估计这些地区未来农业生产会在多大程度上得益于气候变化。此外,降水和温度的变化,也会影响到各个地区的灌溉用水需求,从而间接地影响农业生产。

气候变化促进了土壤有机质和氮的流失(Leirós 等 1999),加速了土壤退化、侵蚀的速度,削弱了农业生态系统抵御自然灾害的能力,干旱区土壤风蚀尤其严重,高蒸发也会造成土壤盐渍化(Yeo 1999)。在内蒙古草原区,近 20 年来冬季增温明显,春旱加剧,给畜牧业和农业带来严重损失(张桥英等 2003)。东北地区的降水变率增大,极端降水事件(旱涝灾害)的频率和强度明显增加,干旱已经使有些地区出现了土壤盐渍化和荒漠化现象,降低了农业生产环境质

量。独特的地形和气候使中国西南地区山地灾害频繁、水土流失严重,灾害导致当地土壤质量下降、土壤肥力损失较大、粮食减产严重,四川省坡耕地因为水土流失每年减少粮食产量 490 万 t,严重影响当地农业经济的发展。

气候变化引起的季节性降水改变对作物的影响也很明显,如欧洲东部由于降水量减少和温度升高,大大限制了作物种植面积的扩展(Rabbinge 等 2000),部分地区强降水增多,致使土壤含水量增加,影响了机械化作业并引起土壤板结(Soane 等 1994)。中国华北地区过去几十年由于降水量明显减少、气温升高,加剧了该地区农业用水紧张程度,旱灾一直是华北地区最严重的灾害之一。降水状况是决定很多地方,特别是干旱半干旱地区农业生产的重要因素,例如 2004 年 12 月—2005 年 11 月宁夏全区降水量在 56.8~287.2 mm 之间,比历年同期少 20%~70%,严重影响了农业生产。

1.3.1.2 气候变化对农业种植制度和生产的影响

气候变暖影响气候资源的时空分布,从而改变了原有的单一气候因素或综合气候条件与现存种植制度的相互关系。而且,未来由于各地气候变化的差异,水热时空分布的不均匀性也将直接影响各个地区的土壤含水量和灌溉用水的需求(Hitz 等 2004),从而间接地影响农业生产。温度升高不仅直接影响地域作物种类,而且会引起生育期起始时间和长度的变化,从而影响各地农作物的种植制度和管理的安排。研究表明,中高纬度地区,温度升高可以延长作物生长季、减少作物冷害,使作物向更高纬度扩展,农业种植面积扩大(Howden 等 2003)。全球变暖将使作物带向极地移动,年平均温度每增加 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。

气候变化对不同地区有不同影响。就中国而言,不同地区温度差异较大,变化趋势不同。高纬度地区,气候变化使热量资源改善,生育期延长,喜温作物界限北移,促进了作物种植结构调整。在中国东北地区,20 世纪 90 年代以来气候增暖明显,水稻种植面积得以北

扩,以前是水稻禁区的伊春、黑河如今也可种植水稻,2000年黑龙江省水稻种植面积是1980年的7倍(王媛等2005,潘华盛等2002)。同时,黑龙江全省玉米主产区发生南移,麦豆产区北移,而喜凉作物如亚麻、甜菜种植面积自20世纪90年代后有所下降(潘华盛等2004)。热量条件的改变同时使低温冷害有所减轻,晚熟作物品种面积增加。宁夏葡萄种植面积目前达8万亩^①以前由于冬季温度过低,只能是小范围的家庭种植,现在则大规模生产种植,促进了酿酒产业的发展。辽宁省苹果生产中遭遇 ≥ 4 级冻害的频率已由20世纪50年代的80%下降到2000年左右的20%,冻害程度也明显降低(李丕杰等2001)。吉林省的玉米品种熟期较以前延长了7~10天,高产晚熟玉米种植面积增长迅速(潘铁夫1998)。气候变化也使中国华东地区秋季光温条件得到改善,促进了长江三角洲水稻生产,目前一些地区已将晚稻由籼稻改成对光温条件要求更高的粳稻,提高了稻米的品质和产量(气候变化国家评估报告编写委员会2007)。

气候变化为作物种植结构调整提供了机遇,但会使原有作物发育进程加快,生育期缩短,抵御气候波动能力减弱。例如,中国华东地区的大麦、小麦和油菜多数是早熟品种,冬季气候变暖,缩短了作物越冬期,使作物提前返青拔节或抽穗,从而减弱了植株的抗寒能力,造成作物更易遭受冻害的侵袭,以致影响产量。原来中国西北部地区的热量条件是两茬不足、一茬有余,现在可以两季生产,提高了土地的生物产量。而对于中国华北地区、西北大部分地区、西南地区的作物,温度升高导致作物生长发育加快,生育期相应缩短,致使总干重和穗重减少,表现为对产量的抑制作用(刘颖杰等2007)。因此需要注意的是,热量条件改善的同时也使作物稳产的气候风险性增加,此外,热量资源的提高也会由于水资源的匮乏而无法得到充分利用,所以气候变化的适应需要一定的技术、政策、资金等的支持和投入,需要多领域的综合评估。

^① 1亩 = $\frac{1}{15}$ hm²,下同。

1.3.1.3 极端天气、气候事件与灾害天气对粮食生产和农业经济的影响

气候变化造成各地粮食产量波动较大,虽然使部分地区的粮食生产得以发展,粮食产量得以提高,但综合而言,气候变化尤其是极端气候事件对粮食生产的冲击强度加大,食物安全特别是南亚地区的食物安全问题将更加突出。

20 世纪欧洲大陆年平均气温大约升高了 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Beniston 等 1998),气候变化使欧洲西部地区的大豆产量增加 (Wolf 2000),但总体而言,粮食稳产的风险增加。如 2003 年欧洲经历了显著的夏季高温,夏季平均气温较常年升高了 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水量减少 300 mm ,导致法国的玉米产量较 2002 年减少 30% ,水果减少 25% ,小麦减少 21% ,整个欧洲粮食也是全面减产 (Ciais 等 2005)。2003 年的欧洲热浪造成欧盟农业经济收入减少了大约 130 亿欧元,法国损失最大,达到 40 亿欧元 (Sénat 2004)。

由于气候变化引起极端气候事件的增加,牧业生产也受到威胁。1995—1997 年的非洲干旱,造成埃塞俄比亚 78% 的牛、 83% 的羊死亡,给当地的牧业生产造成严重的冲击 (Ndikumana 等 2000)。美国和欧洲部分地区已经发现,目前温暖地区,夏季温度升高对牧业生产带来了负面影响,但同时也减少了冬季饲草需要,提高了牲畜的成活率 (Klinedienst 等 1993)。气候变化对禽舍的温度调控也有影响,气候变暖使冬季取暖成本降低,夏季降温成本升高。

中国是世界上自然灾害最严重的国家之一,在各类自然灾害中,洪涝、干旱等气象灾害占 70% 以上。每年因气象灾害造成的农田受灾面积达 $3\,400\text{ 万 hm}^2$,经济损失平均达到 2 000 亿元,农业直接经济损失达 1 000 多亿元,约占国民生产总值的 $3\%\sim 6\%$ (刘玲等 2003),其中影响最大的是旱灾,其次是洪涝和风雹灾害 (刘明亮等 2000)。据 1950—2001 年的旱灾资料统计,中国年均受旱面积 2 000 多万 hm^2 ,其中成灾 930 万 hm^2 ,全国每年因旱灾损失粮食 1 400 多万 t,占同期全国粮食产量的 4.7% (成福云 2002)。另外,极端气候