

气候变化对农业影响研究综述^{*}

赵俊芳¹, 郭建平¹, 张艳红², 徐精文³

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 四川农业大学资源环境学院, 雅安 625014)

摘要: 简要综述了近几十年来中国学者在气候变化对农业影响方面的研究成果, 主要分气候变化对农业影响的研究方法和气候变化对农作物生长发育和产量、品质、种植布局、农业成本的影响几个方面。并通过分析现状, 指出了存在的问题、有待改进的方面和研究发展的方向。

关键词: 气候变化; 研究方法; 农作物生长发育; 产量; 品质; 种植布局; 农业成本

Advances in Research of Impacts of Climate Change on Agriculture

ZHAO Jun-fang¹, GUO Jian-ping¹, ZHANG Yan-hong², XU Jing-wen³

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. National Meteorological Center, Beijing 100081; 3. College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014)

Abstract: In this paper we summarized a series of scientific achievements about the impacts of climate change on agriculture in recent decades, mainly about the impacts of climate change on crop growth, yield, quality, planting distribution, agriculture cost, and so on. Finally, based on the current researches, we pointed out the insufficiency which existed at present studies and some areas to be improved, and then put forward prospects in the future.

Key words: Climate change; Research methods; Crop growth; Yield; Quality; Planting distribution; Agriculture cost.

气候作为自然资源和自然环境的重要组成部分, 是人类生存、经济发展和社会进步的基本条件之一。气候的任何变化都将对自然生态系统、社会经济部门产生重大影响。全球气候变化是指由于人类活动向大气排放了过量的二氧化碳等温室气体, 导致大气中的温室气体浓度过高, 从而在全球平均气温基础上产生了以增温为主要特征的全球范围的气候变化现象。全球气候变化是人类迄今面临的最重大也是最为严重的全球环境问题, 是 21 世纪人类面临的最复杂的挑战之一, 引起了世界各国政府和公众的广泛关注^[1]。

IPCC(政府间气候变化专门委员会)第二工作组第四次评估报告^[2]指出, 全球气候变暖, 对自然生态和人类生存环境产生显著影响, 并将对未来自然生态和经济社会的发展产生长期的影响, 其中对农牧业、生态系统、水资源及沿海岸带社会经济的影响最为严重。而农业则是受气候和天气制约最大的领域。中

国是农业大国, 农业是国民经济的基础, 因此气候变化将直接影响到粮食安全和可持续发展。近几十年来, 中国科学界在气候变化对农业的影响方面, 特别是气候变化对农作物生长发育、产量、品质、种植布局、农业成本等方面开展了大量的科学研究工作, 取得了一系列科学成果。本文拟从这些方面对研究成果进行综述, 以期为准评价气候变化对中国农业生产的影响、制订相应对策、采取适应措施等提供理论依据。

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实验方法; 二是历史相似或类比法, 即在历史上寻求气候在时间或空间上的相似年作为未来的佐证; 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^[3]。

就农业而言, 目前气候变化的研究主要集中在观

^{*} 收稿日期: 2009-07-15

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD04B02); 中国气象局气候变化专项(CCSF-09-12); 公益性行业(农业)科研专项(GYHY200803028)

作者简介: 赵俊芳(1977-), 内蒙凉城人, 博士, 助研, 主要从事气候变化、农业气象、陆地生态系统碳循环等相关研究。

E-mail: zhaojf@cams.cma.gov.cn

测实验和模型模拟影响两方面^[4]。观测试验多采用田间试验和环境控制实验两种方法,其中环境控制实验室在野外设立封闭或顶部开放温室,通过人为控制CO₂浓度来研究对作物的影响,通过各种实验模拟装置和技术,可再现气候变化情景下的作物生长环境。直接实验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,但鉴于时空尺度和问题的复杂性,该方法有很大的局限性^[5]。而利用计算机进行数值模拟和预测研究,是目前量化研究气候变化及其影响的较科学和理想的方法。模型模拟可以分为统计分析(回归模型)和动态数值模拟(气候模式和农业评价模式相嵌套)两种方法。统计学方法是根据生物量与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。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)和作物模式相联接成为评价气候变化对农业影响的最基本方法。

目前大多数作物模型是基于站点的小尺度机理模型,而大气环流模型一般仅提供大范围(200km以上)的平均气候信息,当用大气环流模型的结果进行农业生产评价时,不可避免地存在空间和时间尺度差异问题。目前一般有两种解决方法,即大气环流模型的降尺度和作物模型的升尺度连接。在农业影响评价中常采用降尺度方法的有3种:一是动力学模型降尺度,该方法可以利用复杂的动力学方程(如区域气候模型),把GCM模型的模拟结果降尺度到更小的网格(20~50km)和时间尺度(1d)上;二是统计降尺度,该方法是利用多年的实测资料,建立大尺度气候状况和区域气候要素之间的统计关系,并用独立的观测资料检验这种关系,最后再把这种关系应用于GCM输出的气候信息中,来预估未来局地的气候变化情景;三是统计-动力降尺度相结合方法,该方法兼顾统计和动力两种降尺度方法的优点,是未来气候情景降尺度的发展方向,但目前研究尚少^[6]。目前作物模型的升尺度主要从3个方面展开:一是输入取样,通过输入变量的归并来解决环境信息的空间变异问题;二是模拟参数的区域校正,用实测的区域信息对模拟参数进行校正,使其反映出地区环境因子的平均状态;三是模型本身的区域化处理或对模拟结果的处理^[6]。

2 气候变化对农业的影响

2.1 气候变化对农作物生长发育和产量的影响

研究表明:当年平均温度增加1℃时,全国≥10℃

积温的持续日数平均可延长约15d^[7]。气候变暖使宁夏各地无霜期平均延长6.8d^[8]。气候变暖对冬小麦生产影响较显著,普遍表现为全生育期与越冬期缩短,返青期与成熟期提前^[9-13]。段金省等对历史实测资料分析认为^[14],气候变化使陇东塬区玉米生育期缩短,玉米主要发育期(出苗、拔节、开花、乳熟、成熟)较历年均提前,提前幅度最大的是乳熟和成熟期。可见,气候变暖背景下中国的年平均气温上升、活动积温增加,从而使得霜期缩短、作物的主要发育期提前、生育期缩短。

从气候变化影响的结果看,气候变化对农业的影响最终会表现在农作物产量的变化上。气候变化对农作物产量的影响,在一些地区是正效应,在另一些地区是负效应,且气候变化导致作物产量波动幅度很大。对产量的影响可能主要来自于极端气候事件频率的变化,而不是平均气候状况的变化^[2]。研究结果表明,过去20多年的气候变暖对东北地区粮食总产增加有明显的促进作用,但是对华北、西北和西南地区的粮食总产增加有一定抑制作用,而对华东和中南地区的粮食产量的影响不明显^[15]。虽然近50a的全国平均降水量没有表现出显著的变化趋势,但是存在着显著的区域差异^[16]。由于中国粮食产量的2/3以上来自灌溉,而灌溉的作物主要是水稻、小麦。据估算,水分减少1%,灌溉面积将减少1%以上,粮食产量减少75亿kg,对于旱地作物而言,降水减少造成的产量损失将更大^[16]。来自野外环境控制试验和模型模拟的研究结果均表明,随着CO₂浓度增加,作物产量呈增加趋势,但CO₂浓度增加对不同类型作物产量的影响有明显差异,C3类作物增长率明显大于C4类作物,在CO₂浓度增加50μmol·mol⁻¹时,C3和C4类作物的产量将分别增加10%~20%和0~10%^[17],这可能是由于C3和C4类作物对CO₂的同化途径和CO₂浓度饱和点不同决定的^[18]。

未来气候变化情景下,研究作物产量变化是一个相当复杂的问题。直接采用现有研究成果,利用各种作物产量统计式来分析气候变化对农业产量的影响,可信度较低,原因是未来的气候变化有可能超出气候自然振动的范围^[19]。因此,大多数学者都采用数值模式来估算气候变化后的农作物产量。王馥棠等^[20]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,并指出大气中CO₂浓度倍增时,温度升高、作物发育速度加快和生育期缩短是作物产量下降的主要原因。林而达等^[21]通过区域气候模式预测,在CO₂浓度加倍条件

下,气候变化对国内作物产量有较大的影响,其中,小麦、玉米和水稻最高产量变化幅度在 $-21\% \sim 55\%$,大豆在 $-44\% \sim 80\%$,棉花在 $13\% \sim 93\%$,其变化幅度随不同的气候情景和地点而不同;如果不采取任何适应措施,到2030年,国内种植业产量在总体上因全球变暖可能会减少 $5\% \sim 10\%$,其中小麦、水稻和玉米三大作物均以减产为主;2050年后受到的冲击会更大。熊伟等^[22]利用最新温室气体和 SO_2 排放方案,即政府间气候变化委员会(IPCC)排放情景特别报告(SRES)的A2和B2方案,通过区域气候模式和区域作物模型,模拟了未来2080s(2071–2100年)中国小麦产量变化,结果表明,两种温室气体排放方案下,到2080s雨养小麦均表现出显著的减产趋势,灌溉可缓解小麦减产趋势,但不能阻止产量下降。张建平^[23-24]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,分别模拟分析了未来气候变化情景下(2011–2070年,2001–2050年)东北地区玉米产量、重庆地区冬小麦变化情况,结果显示,2011–2070年,东北玉米产量整体呈下降趋势,中熟玉米平均减产 3.3% ,晚熟玉米平均减产 2.7% ;2001–2050年,重庆大部分地区冬小麦处于减产状况,减产幅度在 $2.0\% \sim 5.0\%$,平均减产 3.0% 。这也说明未来的50~100a内,气候变化将严重影响粮食产量。

2.2 气候变化对作物品质的影响

近年来气候变化对作物品质的影响备受关注。作物品质的形成是品种遗传特性和环境条件综合作用的结果,在一定遗传基础上,环境作用至关重要。水稻、小麦、玉米等作物一般从籽粒灌浆到蜡熟期,环境因子的差异(包括 CO_2 浓度、温度、水分等)对籽粒品质影响最大^[25]。目前环境因素与作物品质关系的研究多集中在温度、光照、水分和肥力等因子上,并取得了相应的进展。高素华、王春乙等^[26-27]通过OTC-1型开顶式气室试验研究,结果均表明,在 CO_2 浓度加倍条件下,大豆、冬小麦和玉米的氨基酸和粗蛋白含量均呈下降趋势。王春乙等^[28]利用同化箱与开顶式气室分别对中麦3号和京东6号小麦从拔节到抽穗期进行处理,发现 CO_2 浓度增加使小麦籽粒的蛋白质、赖氨酸、脂肪含量增高,淀粉含量下降,品质得到提高; CO_2 浓度为 $700\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时小麦籽粒粗蛋白、赖氨酸、粗脂肪、粗淀粉比 $350\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时分别增加了 3.0% 、 3.0% 、 8.5% 和 -2.3% , $500\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时比 $300\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时分别增加了 4.4% 、 9.1% 、 11.3% 和 -1.7% 。郭建平^[29]采用人工气

候室加日光灯照射的方法,研究了高温、高 CO_2 浓度和水分胁迫等气象条件变化对农作物籽粒品质的影响,结果表明,在相同的水分条件下,高温和高浓度使籽粒中粗蛋白的含量减少,在水分适宜情况下,小麦粗蛋白含量减少 4.82% ,玉米减少 4.22% ;在水分胁迫情况下,高温、高浓度使小麦的粗蛋白含量减少 8.49% ;而在相同的温度和浓度情况下,水分胁迫使小麦籽粒的粗蛋白含量增加。表明高 CO_2 浓度不利于提高作物品质,而水分胁迫可以提高作物籽粒的粗蛋白含量,有利于提高籽粒品质,但高 CO_2 浓度限制了水分胁迫提高籽粒蛋白质含量的作用。郭建平^[29]同时也指出,高温和高 CO_2 浓度不利于小麦氨基酸含量的提高,而水分胁迫能提高氨基酸含量,并且与 CO_2 浓度相比,水分胁迫作用占主导地位。原因可能在于 CO_2 浓度升高导致小麦呼吸速率降低,减缓了其营养吸收,随之光合作用下调,同化作用相应调节以满足库需,引起小麦叶片氮素减少^[30]。白莉萍等人^[31]的研究显示, CO_2 浓度升高对品质影响亦因作物品种而异,如水稻籽粒直链淀粉含量(决定蒸煮品质的一个主要因素)将随 CO_2 浓度升高而增加,对人体营养很重要的Fe和Zn元素则会下降;温度和 CO_2 浓度均增加的环境中水稻籽粒蛋白含量降低; CO_2 浓度倍增环境下,大豆籽粒粗脂肪增加 1.22% ,饱和与不饱和脂肪酸分别增加 0.34% 和 2.02% ,而粗蛋白含量下降 0.83% ;玉米籽粒氨基酸、直链淀粉、粗蛋白、粗纤维以及总糖含量均呈下降趋势;冬小麦籽粒粗淀粉含量增加 2.2% ,而蛋白质和赖氨酸含量却分别下降 12.8% 和 4% 。杨连新等^[32]通过分析近10a中国水稻FACE(Free Air CO_2 Enrichment,开放式空气中 CO_2 浓度增高)系统的试验结果发现,高 CO_2 浓度使稻米的恶白粒率、恶白度极显著提高,稻米的糊化温度和最高粘度显著提高,整精米率极显著降低,蛋白质和氨基酸含量明显下降,而对稻米直链淀粉含量、胶稠度和碱消值影响较小。氮磷肥可以改变稻米品质对高 CO_2 浓度的响应^[33-34]。

2.3 气候变化对农业种植结构布局的影响

气候变化对农业生产布局与结构调整的影响主要表现在种植制度的变化上。种植制度指一个地区作物种类选择和相互搭配组合的总体安排^[35]。一个地区多年所形成的种植制度是当地的气候、土壤等自然条件和经济文化、种植习惯等一系列社会经济条件综合平衡的结果,其中气候条件的影响最为明显,而气候条件中又以温度影响最为显著。温度升高对种植业的影响主要表现在春季土壤解冻期提前,冻结期

推迟,作物生长季热量增加,从而使得复种面积扩大,复种指数提高,多熟制向北、向高海拔推进,中晚熟品种种植面积不断扩大。研究表明:气候变暖使中国年平均气温上升、积温增加、生长期延长,从而导致种植区成片北移,冬小麦的安全种植北界将由目前的长城一线北移到沈阳-张家口-包头-乌鲁木齐一线^[7]。水稻的种植北界从20世纪80年代前期的小兴安岭地区中部偏南,约为48°N的位置,北移到20世纪90年代中后期大兴安岭地区的漠河和塔河,较之20世纪80年代初显著北移大约4°,且随着温度的升高,许多作物的种植界线总体表现为向高纬度和高海拔移动的趋势^[36]。在气候变化与技术进步的共同作用下,1986-1995年的10a内,全国耕地复种指数增加了9.7%,增加复播面积 $850 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[37]。在品种和生产水平不变的前提下,气候变化后全国一熟制种植面积由当前的63%下降为34%,二熟制种植面积由24.2%变为24.9%,三熟制种植面积由当前的13.5%提高到35.19%^[38]。预计到2050年,气候变暖将使农作物三熟制的北界从长江流域移至黄河流域,两熟制地区将北移至目前一熟制地区的中部,三熟制的面积可能扩大1.5倍,一熟制的面积将减少23%^[39]。

气候变化背景下,除了作物复种指数和种植制度发生改变外,主要作物品种的布局也将发生变化。王长燕等^[40]的研究结果显示:华北目前推广的冬小麦品种(强冬性),因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,将不得被其它类型的冬小麦品种(如半冬性)所取代;比较耐高温的水稻品种将在南方占主导地位,而且还将逐渐向北方稻区发展;东北地区玉米的早熟品种逐渐被中、晚熟品种取代。

2.4 气候变化对农业生产成本的影响

在气候变化的大背景下,异常气候出现的概率将大大增加,尤其是极端天气现象的增多,区域气候灾害、荒漠化、沙尘暴的加剧,势必导致世界粮食生产的不稳定,从而提高农业成本。气候变化尤其是气温升高后,土壤有机质的微生物分解将加快,化肥释放周期缩短,在高CO₂浓度下,虽然光合作用的增强能够促进根生物量增加,在一定程度上补偿了土壤有机质的减少,但土壤一旦受旱,根生物量的积累和分解都将受到限制^[41]。这意味着需要施用更多的肥料以满足作物的需要,而施肥量的增加不仅使农民投入增加,而且挥发、分解、淋溶流失的增加对土壤和环境也十分有害。

气候变暖后,农药的施用量将增大。随着气候变暖,作物生长季延长,昆虫在春、夏、秋三季繁衍的代数将增加,而冬温较高也有利于幼虫安全越冬,温度高还为各种杂草的生长提供了优越的条件,因此,气候变暖将会加剧病虫害的流行和杂草蔓延^[42]。另外,气候变暖后各种病虫出现的范围也可能扩大并向高纬地区延伸,目前局限在热带的病原和寄生组织将会蔓延到亚热带甚至温带地区^[43]。所有这些都意味着,气候变暖后将不得不增加施用农药和除草剂,而这将增大农业生产成本。

此外,气候变暖还影响了整个水循环过程,使蒸发相应加大,改变了降水分布格局和降水量,加剧了水资源的不稳定性和供需矛盾,使农业灌溉成本提高,进行土壤改良和水土保持的费用增大^[44]。据预测,未来气候变化情景下几大玉米种植区将会加大对肥水的投入^[44]。

3 存在问题与研究展望

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)气候变化对农业影响评价的不确定性主要来自评估模型的不确定性和气候变化情景的不确定性。全球气候模式本身分辨率较低,且模式本身存在诸多不确定性。绝大部分气候变化影响、适应性和脆弱性评估模型是以定量的气候和非气候情景包括社会经济和环境情景作为输入参数,因而,气候变化影响评估最主要的不确定性来源之一,就是各种情景假设的不确定性。气候变化情景的不确定性主要来源于气候模式的不完善和未来温室气体排放情景的不确定。后者主要来源于不能准确地描述未来几十、上百年社会经济、环境变化、土地利用变化和技术进步等非气候情景。这些都将使最后评价结果有较大的不确定性,因此,尚需进一步加强和改进相关的研究工作。相信随着科学技术水平的发展以及人们对温室效应原理的进一步认识,这些不确定性能有效解决。

(2)目前作物生长模型还存在诸多不足,有待进一步深入研究。作物生长模型现在或今后都将成为农业研究和资源研究的有效工具,但是,目前所研制的作物模型存在诸多不足。主要表现在:1)作物模型研究的总趋势是朝向基于过程的动态机理模型,而已

有的作物模型即使是机理模型,模型中作物生长或环境动态的某些过程(如 LAI 的发展动态、叶片衰老过程、干物质分配等)仍然是建立在经验关系之上的^[45]。2)作物模型本身大部分是单点模型,还没有完全普遍适用的用于大尺度模拟的作物模型。3)与实际生产密切相关的部分模块考虑的不够全面,如病虫害模块、经济人文因素模块、土壤的生理生化过程模块等。因此,从以往作物模型研究开发的经验看,今后的作物生长模型无论是从研究还是开发应用角度都有要注意和加强的地方,使作物生长模型能更好地应用于大田生产实践。对于中国这样一个发展中国家而言,开发相对简单而应用目标明确,市场需要广泛的作物生长模型可以成为模型研究的催化剂和先导^[45]。

(3)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,这些极端天气事件将对农业的生产和可持续发展产生重要影响,尤其是极端天气事件的增多,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此方面相关问题的研究将是未来农业科学家研究的重要课题之一。

(4)FACE 实验尚需进一步推广。FACE (Free Air CO₂ Enrichment) 系统是一个模拟未来 CO₂ 浓度增加的微域生态环境。根据冠层 CO₂ 浓度测定的结果,由控制系统实时调节 FACE 圈内的 CO₂ 浓度,使之保持在高于对照的设定浓度值。由于 FACE 圈没有任何隔离设施,气体可以自由流通,因此十分接近自然生态环境。在这一微域生态环境条件下进行 CO₂ 增加的模拟试验,获得的数据更接近于真实情况。另一方面由于 FACE 研究所提供的水稻材料数远多于室内实验,可同步进行生理、生态和生化等多学科的研究,有利于揭示水稻对 FACE 响应和适应的深层机理。因此,国际上普遍认为 FACE 是研究大气 CO₂ 浓度增加后陆地生态系统响应的最佳方法。目前,开展水稻 FACE 研究的国家主要是日本和中国,日本于 1996 年开始在岩手县建立世界上第 1 个水稻 FACE 系统,并于 1998 年正式开始运行;中国于 2001 年在江苏无锡建立了世界上第 2 个水稻 FACE 系统(亦是世界上第 1 个稻麦轮作 FACE 研究平台),并于当年启动了对水稻的研究。通过近 10a 的试验研究,已经取得了一系列科学成果,并将在大气 CO₂ 浓度增加对农田生态系统结构和功能影响研究方面获得一系列有自主知识产权的创新认识和科学成果。因此,很有

必要进一步推广,这将为研究气候变化对农业的影响及其机理方面起到积极作用。

参考文献:

- [1] 叶笃正. 中国的全球变化预测研究[M]. 北京:气象出版社,1992.
- [2] IPCC. Impacts, adaptation and vulnerability. working group II contribution to the intergovernmental panel on climate change fourth assessment report[R]. Brussels:IPCC,2007.
- [3] 李克让,陈育峰. 中国全球气候变化影响研究方法的进展[J]. 地理研究,1999,18(2):214-219.
- [4] 孙白妮,门艳忠,姚凤梅. 气候变化对农业影响评价方法研究进展[J]. 环境科学与管理,2007,32(6):165-168.
- [5] 陈鹏狮,米娜,张玉书,等. 气候变化对作物产量影响的研究进展[J]. 作物杂志,2009,(2):5-9.
- [6] 熊伟,杨婕. 作物模型与气候模型的连接研究进展[J]. 中国生态农业学报,2008,16(2):511-514.
- [7] 杨尚英. 气候变化对我国农业影响的研究进展[J]. 安徽农业科学,2006,34(2):303-304.
- [8] 张智,林莉,梁培. 宁夏气候变化及其对农业生产的影响[J]. 中国农业气象,2008,29(4):402-405.
- [9] 余卫东,赵国强,陈怀亮. 气候变化对河南省主要农作物生育期的影响[J]. 中国农业气象,2007,28(1):9-12.
- [10] 王位泰,黄斌,张天锋. 陇东黄土高原冬小麦生长对气候变暖的响应特征[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(1):153-158.
- [11] 车少静,智利辉,冯立辉. 气候变暖对石家庄冬小麦主要生育期的影响及对策[J]. 中国农业气象,2005,26(3):180-183.
- [12] 黄峰,施新民,郑鹏徽. 气候变化对宁夏春小麦发育历期影响模拟[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(9):118-122.
- [13] 万信,王润元. 气候变化对陇东冬小麦生态影响特征研究[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(4):80-84.
- [14] 段金省,牛国强. 气候变化对陇东塬区玉米播种期的影响[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(2):235-238.
- [15] 刘颖杰,林而达. 气候变化对中国不同地区农业的影响[J]. 气候变化研究进展,2007,3(4):229-233.
- [16] 郑斯中. 全球变暖对我国粮食产量影响估计中的乐观倾向[J]. 中国农业气象,1993,14(5):44-47.
- [17] Tubiello F N, Soussana J, Howden S M. Crop and pasture response to climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2007,104(50):19686-19690.
- [18] 王春乙,潘亚茹,白月明,等. CO₂ 浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究[J]. 气象学报,1997,55(1):86-94.
- [19] 郑有飞,牛鲁燕. 气候变暖对我国农业的影响及对策[J]. 安徽农业科学,2008,36(10):4193-4195,4215.
- [20] 王馥堂. CO₂ 浓度增加对植物生长和农业生产的影响[J]. 气象,1993,19(7):8-13.

- [21] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51-56.
- [22] 熊伟, 居辉, 许吟隆, 等. 气候变化下我国小麦产量变化区域模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 164-167.
- [23] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化情景下东北地区玉米产量变化模拟[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1448-1452.
- [24] 张建平, 李永华, 高阳华, 等. 未来气候变化对重庆地区冬小麦产量的影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 268-270.
- [25] Wu D X, Wang G X, Bai Y F, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 104: 493-507.
- [26] 高素华, 王春乙. CO₂浓度升高对冬小麦、大豆籽粒成分的影响[J]. 环境科学, 1994, 15(5): 24-30.
- [27] 王春乙, 高素华, 郭建平. 模拟大气中 CO₂浓度对大豆影响的实验[J]. 生态学报, 1995, 15(2): 34-40.
- [28] 王春乙, 郭建平, 王修兰, 等. CO₂浓度增加对 C3、C4 作物生理特性影响的实验研究[J]. 作物学报, 2000, 26(6): 931-936.
- [29] 郭建平, 高素华, 刘玲. 气象条件对作物品质和产量影响的试验研究[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 361-367.
- [30] 谢立勇, 林而达. 二氧化碳浓度增高对稻、麦品质影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 659-664.
- [31] 白莉萍, 林而达. CO₂浓度升高与气候变化对农业的影响研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 132-134.
- [32] 杨连新, 王余龙, 黄建晔. 开放式空气 CO₂浓度增高对水稻生长发育影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1331-1337.
- [33] 董桂春, 王余龙, 黄建晔, 等. 稻米品质形状对开放式空气二氧化碳浓度增高的响应[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1217-1222.
- [34] Yang I X, Huang J Y, Yang H J, et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on nitrogen uptake and utilization of rice at three levels of nitrogen fertilization[J]. Field Crops Research, 2007, 100: 189-199.
- [35] 韩茂莉. 近 300 年来玉米种植制度的形成与地域差异[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1083-1095.
- [36] 云雅如, 方修琦, 王丽岩, 等. 我国作物种植界线对气候变暖的适应性响应[J]. 作物杂志, 2007, (3): 20-23.
- [37] 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. 耕地复种指数研究的国内外进展[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 553-560.
- [38] 张厚煌. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题 I: 气候变化对我国种植制度的影响[J]. 中国农业气象, 2000, 21(1): 9-13.
- [39] 何群华, 乐向晖. 全球变暖对农作物影响及对策的研究进展[J]. 陕西农业科学, 2008, (5): 121-124.
- [40] 王长燕, 赵景波, 李小燕. 华北地区气候暖干化的农业适应性对策研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 646-653.
- [41] 杜华明. 气候变化对农业的影响研究进展[J]. 四川气象, 2005, 25(4): 18-20.
- [42] 叶彩玲, 霍治国. 气候变暖对我国农作物病虫害发生趋势的影响[J]. 农药快讯, 2002, (1): 23-34.
- [43] 亢艳莉. 气候变化对宁夏农业的影响[J]. 农业科技通报, 2007, (6): 125-128.
- [44] 熊伟, 杨婕, 林而达, 等. 未来不同气候变化情景下我国玉米产量的初步预测[J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1092-1101.
- [45] 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 750-758.