

我国农业的气候脆弱性研究及其评价

郑有飞¹, 李海涛², 吴荣军², 王连喜², 冯 妍²

(1.南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 2.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044)

摘 要:未来 100 年气候变暖的速度将会逐渐加快,势必会引起农业生态环境、生产布局和结构的变化,进而影响国家的粮食生产及粮食安全,因此开展气候变化背景下农业的气候脆弱性研究是气候变化脆弱性研究的重要课题和内容。在阐明农业气候脆弱性概念的基础上,综述了近年来国内外气候变化对农业的影响及其脆弱性研究评价的现状、方法,归纳和介绍了脆弱性研究和评价的 4 种主要方法,即统计分析法、指标体系法、模型模拟法和综合评估法,从研究方法、研究内容、研究工具、研究对象和研究过程等 5 方面进行了展望,指出了该领域研究的不足以及今后的发展方向。

关键词:农业;气候变化;脆弱性

中图分类号:X16 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2445-08

An Overview of Assessment of Agriculture Vulnerability to Climate Change in China

ZHENG You-fei¹, LI Hai-tao², WU Rong-jun², WANG Lian-xi², FENG Yan²

(1.Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: As global warming becoming more and more fast, which will inevitably result to the change of agro-ecological environment and allocation and structure of production. Further more, country's food production and food safety will also be impacted greatly. Assessment of agriculture vulnerability to climate change is imperative as the rate of global climate change is increasing substantially. The agriculture's climate vulnerability assessment is to identify how agriculture systems respond to climate change, which agriculture systems are most at risk, and above which climate threshold agriculture systems degradation will occur. Because of the complexities of climate and agriculture systems processes and uncertainties in climate change, it is difficult to quantitatively describe and predict agriculture vulnerability to climate change. In this paper, we reviewed results of the major studies on agriculture vulnerability to climate change in recent decade, and found that many agriculture systems, especially natural agriculture systems, would become more vulnerable to the predicted future climate change. We also give a synthetic analysis of methodologies used in vulnerability assessment, and introduced the three major methods that are commonly used: statistical analysis technique, model simulation, index system, and comprehensive evaluation. Finally, we pointed out the deficiencies of the research and discussed the development direction of agriculture vulnerability to climate change in content, methods, technique, objects, process in the future.

Keywords: agriculture; climate change; vulnerability

以全球变暖为特征的全球气候变化问题,已经成为国际社会广泛关注的全球十大环境问题之一。据 IPCC 第三次评估报告指出,20 世纪全球地面平均温

度上升了 $(0.6 \pm 0.2)^\circ\text{C}$, 未来 100 年的增温幅度将达 $1.4 \sim 5.8^\circ\text{C}$ ^[1]。为了阻止和减缓气候变暖的趋势,各国都积极地提出了各种减少温室气体排放的对策,包括农业系统的减排措施^[2-3]。但是即使在采取减缓和适应措施的前提下,气候变暖将不可避免地会对我国的农业生产产生巨大影响,进而影响国家的粮食生产及粮食安全,因此预测和评估未来气候变化背景下农业的气候脆弱性是气候变化影响研究的重要内容之一^[4]。

收稿日期:2009-05-18

基金项目:国家软科学研究计划面上项目(2009GXS5B091)

作者简介:郑有飞(1959—),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,主要从事农业气象与气候变化方面的研究。

E-mail:zhengyf@nuist.edu.cn

目前国内外已经就这方面开展了大量的研究,并取得了一些研究成果^[5-8]。本文就近期国内外有关气候变化与农业系统的脆弱性的相关研究情况以及主要的结论予以综述,以期推进我国气候变化脆弱性研究的进一步深入开展。

1 农业的气候脆弱性概念

脆弱性(vulnerability)一词最早用于灾害学领域,表示被伤害的程度。20 世纪 90 年代初,随着气候变暖问题逐渐受到国际社会的广泛关注,脆弱性被引入到气候学领域,并于 IPCC 第一次报告中对气候变化的脆弱性进行了初步论述^[9]。随后在 IPCC 第二次评估报告中脆弱性被定义为气候变化对系统损伤或危害的程度,并指出脆弱性不仅取决于系统对气候变化的敏感性,还与系统对新的气候条件的适应能力有关^[10]。在 IPCC 第三次评估报告中脆弱性被更为明确地进行了定义,即脆弱性是一个自然的或社会的系统容易遭受来自气候变化(包括气候变率和极端气候事件)的持续危害的范围或程度,是系统内的气候变率特征、幅度和变化速率及其敏感性和适应能力的函数^[11]。

脆弱性在不同的研究领域有着不同的认识和理解,因此出现了一些不同的有关脆弱性定义。FAO(世界粮农组织)起初将脆弱性定义为存在可能导致地方居民出现食物安全问题或营养不良的因素^[12],后来又发展为人们处于粮食不安全或营养不良的各种风险,包括影响其应对能力的各种因素。个人、家庭或人群的脆弱程度取决于其遇到的风险因素及其应付或承受压力的能力^[13]。而在自然灾害研究中脆弱性则是指个体或群体在预期、应对、抵抗自然灾害影响及其从中恢复的能力,认为脆弱性是对个体或群体受自然灾害影响程度及从事事件影响中恢复程度的度量;社会学家则认为脆弱性是由决定人们应对压力和变化能力的一系列的社会经济因素构成^[14-15]。针对脆弱性的不同理解,Downing 总结了许多有关脆弱性问题研究的成果,认为脆弱性应主要包括 3 个方面:首先是脆弱性应作为一个结果而不是一种原因来研究;其次针对其他不敏感因子而言,其影响是负面的;最后脆弱性是一个相对概念,而不是一个绝对的损害程度的度量单位^[16]。

目前,脆弱性定义以 IPCC 评估报告为准,它在气候变化研究领域中被广泛接纳和采用,IPCC 的第四次评估报告中依然采用 2001 年定义^[4]。当然,脆

弱性的内涵仍然在不断发展和完善之中^[17]。但农业的气候脆弱性概念一直没有明确定义。最初主要是定性研究粮食安全问题对气候变化的脆弱性^[18-20]。美国农业部针对局地系统把气候脆弱性定义为:对那些很难通过适应措施改变的气候变化的负面影响在一定地区可能发生的程度,并指出农业脆弱性是区域间相互比较的相对概念^[21]。侯亚红等认为,农业气候脆弱性是指某一地区农业生产过程对气候变化敏感因素的反应强弱,以及当地社会-生产-生态等环境要素对气候变化影响可能适应性的综合不稳定反应^[22]。参考 IPCC 关于脆弱性的定义,可将其定义为:农业对气候变化的脆弱性是指农业系统容易受到气候变化(包括气候变率和极端气候事件)的不利影响,且无法应对不利影响的程度,是农业系统经受的气候变异特征、程度、速率以及系统自身敏感性和适应能力的反应。总之,农业对气候变化的脆弱性是敏感性和适应能力的综合体现^[23],并随其地理位置、时间以及社会经济和环境条件而变化^[1,24]。

2 农业的气候脆弱性研究现状

农业对气候变化的脆弱性研究始于 20 世纪 80 年代末,主要研究有关粮食生产对气候变化的脆弱性,通过定性分析确定哪些地区和人群对未来气候变化引起的饥荒是脆弱的^[16]。在 IPCC 组织成立后,开始了全球气候变化的影响评估工作,可以称之为第一阶段农业的脆弱性研究,主要研究了作物产量、生长期等对温度、降水等因素变化的脆弱性^[15,25-26],但对气候变率、极端气候事件、社会经济和环境等因素的影响考虑较少。IPCC 第三次评估报告将脆弱性定义为暴露度、敏感度及适应能力的函数,脆弱系统是对外界干扰的敏感性较强且相对不稳定的系统^[1]。认为系统适应能力的增强,必将减小其脆弱性;反之,系统适应能力的减弱将增大其脆弱性,即一个对气候变化比较敏感而其适应能力较差的系统,其脆弱性比较大,易受气候变化的影响;而一个对气候变化比较敏感但其适应能力强系统不一定是脆弱的,不易遭受气候变化的影响。通常,最脆弱的系统是那些对气候最敏感和适应能力最差的系统^[27]。至此,研究人员逐渐地转向以适应能力研究为中心的第二阶段农业脆弱性研究,更加重视适应对策和能力的探索^[28,6-8]。IPCC 第四次评估报告考虑到气候变化可能超出自然和人类系统的适应能力,把适应和缓解措施纳入到发展规划中去^[4]。这样,农业气候脆弱性的评价不仅要考虑敏感性

和适应能力,还要考虑减缓能力,使农业气候脆弱性评价进入了第三研究阶段。

我国的脆弱性研究始于“八五”期间,但对农业的脆弱性研究相对较少。起初,蔡运龙等定性分析了气候变化对农业的影响及农业环境和农业系统的脆弱性,提出了农业系统应对气候变化的适应对策和建议^[29]。林而达、王京华采用定性和定量相结合的方法,在对全国降水量和蒸发量进行统计分析的基础上划分了我国农业的气候变化敏感区,选取灌溉面积和耕地面积的比率、农牧业用地和已利用土地的比率、产量和复种指数、受灾系数和农民收入 5 个非气候指标来表征农业的气候变化脆弱性,得出我国农业的气候脆弱性分布图^[30]。但是研究方法比较简单,定量研究存在困难和缺陷。

赵跃龙等通过选取多种影响敏感因子、确定不同因子的权重、计算脆弱度的方法,对我国脆弱环境和生态系统进行了定量评价分析^[31]。王馥棠、刘文泉等采用实地调查、专家评分和 AHP 层次分析相结合的方法对我国黄土高原陕甘宁区农业生产的气候变化脆弱性进行了评估^[22,32]。但是这种研究方法在指标的选取上有很强的主观性,使研究结果的客观性存在疑问^[22]。最近几年,许多学者利用作物模型与气候模型相结合的方法,依据作物产量的变化率进行气候变化的敏感性和脆弱性研究^[34-38]。利用区域气候模式(RCM)、作物模型、社会经济情景和 GIS 技术等的综合研究方法将是未来农业气候变化敏感性和脆弱性研究的主要方法。

林而达等采用英国 Hadley 中心 PRECIS 区域气候模型输出的 B₂ 气候情景,嵌套 CERES 作物模型对我国当前和未来的小麦、水稻和玉米的产量进行预测,并依据产量的变化率和 GIS 技术对我国未来作物气候变化的敏感性和脆弱性进行研究,划分了我国未来三大粮食作物的敏感区和脆弱区^[39-41]。为了评价和检验 CERES 作物模型的适用性,熊伟等将 CERES-Wheat 模型模拟出的我国小麦产量与实测产量进行比对,表明 CERES-Wheat 模型在我国小麦区的模拟效果良好,可以反映产量变化的规律^[42]。胡亚南等利用玉米生长的田间试验资料和气象台站的气象观测资料,就 CERES-Maize 模型对玉米生育期和产量的模拟能力进行了验证,表明 CERES-Maize 模型可以较好地模拟出区域内玉米生育期和产量的变化趋势^[43]。姚凤梅等利用水稻生长观测资料和气象资料,对 CERES-Rice 模型在中国主要稻区的水稻产量、开

花期和生物量等的模拟能力进行了评价和检验,认为 CERES-Rice 模型能够合理模拟水稻开花期、产量、生物量及产量构成要素^[44]。

在此基础上,熊伟等利用 HadCM2 和 ECHAM4 气候模式与 CERES-Rice 作物模式相连接,模拟了未来 4 种气候情景下我国主要水稻产区产量的变化趋势^[45]。又在 GIS 技术支持下^[46],运用精度比较高的区域气候模式 PRECIS 开展了 A₂ 和 B₂ 两种温室气体排放方案下,我国水稻产量变化的对比分析^[47]。姚凤梅等开展了 A₂ 和 B₂ 方案下中国南方稻区增温梯度敏感性的分析,表明水稻产量随温度的增加而呈下降趋势,温度增加幅度越大,产量下降幅度也越大;并且 B₂ 情景比 A₂ 情景使水稻平均产量的下降幅度大^[48]。杨勤等也开展了 A₂ 和 B₂ 排放情景下的宁夏春小麦的潜在产量的变化趋势的研究^[49]。而上述研究存在的不足就是都未考虑病虫害影响及经济投入。

在对单个农作物的脆弱性研究之后,我国学者开展了对某个地理区域的农业的脆弱性分析。最早的是刘文泉、王馥棠等对黄土高原的农业生产的脆弱性研究^[22,50],王静等利用产量和气候资料对甘肃省雨养农业区的秋粮生产的脆弱性进行了评价,认为甘肃雨养农业区的气候的暖干化演变趋势严重,减缓了粮食的增产速度^[51]。赵艳霞等以典型的农业生态脆弱区北方农牧交错带为例,在分析影响其农业生态系统脆弱性主要因素基础上,构建了农业生态系统气候脆弱性评价指标体系。采用模糊评判原理对该区域的农业生态系统的气候脆弱性进行了综合定量评价^[52]。唐为安以宁夏回族自治区为案例,通过实地调查和专家推荐,并结合气象观测数据、农业和社会经济等统计数据筛选出敏感性和适应能力指标,同时采用人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)方法确定脆弱性指标的权重,并利用 A₂ 和 B₂ 气候变化情景和由中国科学院数量与技术经济研究所提供的社会经济情景,开展了宁夏地区的农业气候变化脆弱性分析^[53]。段兴武等在分离粮食产量,构建敏感性指数和脆弱性指数的基础上,利用黑龙江省的农业生产资料和气象资料,对黑龙江省粮食生产对气候变化影响的脆弱性进行了分析,并运用 GIS 技术进行了脆弱性指数的空间表达,该研究为今后脆弱性的研究提供了一种新的方法和思路^[54]。

3 农业的气候脆弱性研究方法

传统的脆弱性评价方法可分为定性分析法和定

量分析法两种。定性分析是根据经验和历史资料,对评估系统的历史演变、当前状况进行描述性的刻画,即根据区域的自然条件、气候状况、经济水平、农业生产投入等评价区域的气候变化应对能力,划分脆弱性水平,并提出相应的适应措施^[30,55-56]。定量分析法则是对评估系统的历史变迁、脆弱性、稳定性及外部环境胁迫对系统可能造成的影响进行定量描述的一种方法^[57]。而气候变化的脆弱性评价方法与传统的生态环境脆弱性评价方法是不同的,它主要包括 5 个部分:(1)鉴定识别受气候变化影响的脆弱性区域;(2)描述该区域的脆弱性特征及其形成原因;(3)定量评价现实气候状况和社会经济水平下区域农业生产的脆弱性;(4)建立气候变化方案,模拟区域未来气候情景;(5)评估未来气候条件下,农业生产的脆弱性特征。目前多数采用定性和定量相结合的研究方法来进行评价,定量评价方法主要有:统计分析法、指标体系法、模型模拟法和综合评估法。

3.1 统计分析法

统计分析方法是农业的气候变化敏感性和脆弱性评估常用的方法。通过现存作物产量与气候变量历史记录的统计分析可以得到农业尤其是作物产量对气候变化的敏感性和脆弱性^[58],也可以通过一系列的观测指标(统计量)结合函数方式来表示。对照历史统计数据对每个脆弱性指标设定其抗衡区间,在进行脆弱性评估时,如果观测指标值介于抗衡区间内,则认为系统是稳定的或脆弱性程度比较低甚至没有脆弱性,如果高于或低于抗衡区间,结果则反之^[21]。但是常规的统计分析一次只能对一个指标进行脆弱性分析,而对运用多指标来表征农业系统的脆弱性时,就需要综合各指标间的统计关系,建立函数模型,以一个综合敏感性和适应能力的指标来表示系统的脆弱性^[51]。

3.2 指标体系法

指标体系法是综合考虑影响农业系统脆弱性的各种因素,建立合理的指标体系,并给每个因素按重要程度设定权重,最后加权求和得出农业气候变化脆弱性。该方法是目前最常用的评价方法,但是在评价指标体系的合理建立和各指标权重的科学设定上存在较大的问题。目前确定权重的方法主要有专家咨询法和层次分析法(AHP)^[50]。该方法与 GIS(Geographic Information System)技术相结合,可显示农业脆弱性的区域分布^[59-61]。

3.3 模型模拟法

模型模拟法是一种重要的定量评估方法,它通过

将作物模型,气候情景模型和经济模型相结合,以模拟出未来作物产量作为最终衡量标准来确定农业系统的气候变化脆弱性。目前主要有计量经济模型模拟、复合模型模拟、综合模型模拟等 3 种方法。

(1)计量经济模型。该模型是由一系列子模型所构成的非线性模型,通过子模型对于外界变量(如,温度、降水、辐射等)的变化来解释或预测模型的内在变量(土壤、天气、遗传特性及管理措施等)的状态改变,最终以作物产量来衡量对气候变化的脆弱程度。如运用于农业脆弱性评估中的作物环境资源综合模型^[62]。该方法能够很好地分析气候脆弱性,但不能很准确地表示一些重要的非线性特征。

(2)复合模型模拟。为了改进计量经济模型的一些不足,学者们提出了复合模型模拟。它是通过作物模型与经济决策模型相结合,以一种模型的模拟结果作为输入量输入到另一种模型中,来模拟农业对气候变化的脆弱性^[63]。此类方法可以通过两种方式模拟农业气候变化脆弱性,一种是以一定的经济决策措施作为作物模型的输入量,得出作物产量并以此作为衡量脆弱性的标准;另一种就是以作物模型在一定的气候条件下模拟的产量作为经济决策模型的输入量,来决定为适应当前气候条件所需采取的相应的适应措施。该模型综合考虑了气候脆弱性和社会经济适应能力,但不能很好地表示农业脆弱性和经济适应性的一些重要关系。

(3)综合模型模拟。为了改进计量经济模型和复合模型的不足,它将生物物理因素和经济社会因素综合到一个模型中,即将气候敏感性和适应性综合考虑到一个模型中,较为全面合理地评价农业气候变化脆弱性,因而能比较客观地反映实际情况^[63]。

3.4 综合评估法

综合评估方法是选择某一地区或国家研究多种胁迫(气候、环境等)对农业系统的影响,综合评价农业的脆弱性。目前该方法已经形成了一个综合评估的研究框架,主要包括气候情景设计、敏感性分析、脆弱性指标确定、适应对策的调查统计、适应能力测定和气候脆弱性评价 6 个部分^[29]。殷永元等进行的中国西部地区黑河流域的气候脆弱性和适应能力综合评估项目以及减小乔治盆地气候变化脆弱性的适应对策评价综合研究等项目都是脆弱性综合评价很好的例子^[27]。案例研究法是综合评价方法中的一种。国内外应用案例进行研究的例子很多,尤其是国际 AIACC(气候变化影响和适应评价)在全球进行了多个农业

脆弱性的案例研究^[64-67],综合评价多重因素影响下的农业脆弱性。

4 评价和展望

(1)就研究方法而言,目前使用最多的是指标体系法和模型模拟法。但这两种方法都有各自的缺陷,如指标体系法存在指标体系不完善,农业系统评价指标的确定不统一,指标的选取因各个专家和学者的知识结构和经验的不同而不同,运用专家打分法和层次分析法对指标权重进行赋值主观性还比较强。人工神经网络模型在理论和智能水平方面都存在欠缺。因此在使用指标体系法时,权重的确定就成为一个难点。以后应继续加强指标体系及其标准的研究,力求建立准确客观、可操作性强的评价指标体系。模型模拟法的研究结果主要取决于所使用的模型的优劣^[41],而目前的区域气候模式还存在很大的不确定性,所以在对农作物的产量变化趋势进行模拟时,需要对多种气候模式下的影响结果进行比较分析来减少模拟结果的不确定性^[68]。脆弱性的研究也应该与地理信息系统(GIS)和遥感(RS)方法相结合。另外,将数学上的一些研究方法,如模糊评判法^[52]等引入到农业生态系统脆弱性评价中,使对生态系统脆弱性的评价从定性发展为定量,也是一个值得探索的研究思路。

(2)就研究内容而言,农业系统脆弱性研究应包括敏感性和适应性两个方面。目前的研究主要集中在气候变化对农业系统的影响,而对适应能力的研究还比较少,特别是气候变化背景下农业的适应性对策量化研究。同时,目前用于脆弱性分析所采用的气候变化情景都是由IPCC发布的SRES(Special Report on Emissions Scenarios)系列的最新温室气体排放情景,即CO₂高排放情景(A₂)和CO₂低排放情景(B₂)^[48],它们与我国未来的社会经济发展情景还是有差异的,所以要加强我国未来社会经济发展情景的开发。另外,由于作物模型本身的限制,在研究中假设农作物生长水肥条件充分满足,也没有考虑病虫害等管理方面的影响,而在现实中要达到这种条件,还存在一定的困难。因此,以后的研究要考虑病虫害的影响,是未来模型应用中必须考虑的一个宏观影响因素^[49]。农业系统与气候、环境、经济等系统是相互联系的,所以要加强气候、经济、环境等多重胁迫作用下,多层次不同时间和空间尺度的农业系统脆弱性研究,特别是未来气候变化、经济变化以及二者相互作用下的农业脆弱性的研究。

(3)就研究对象而言,国内外的学者主要集中在两个方面,一是对某个区域的农业系统的脆弱性进行研究,二是对单个作物的脆弱性进行研究^[39-41]。而对单个作物的脆弱性分析,选取的指标过于简单,不能很好地反映其脆弱程度。不同作物对气候有不同的要求,它们对气候变化的脆弱性也是不同的。目前侧重于对当前或未来中、长期时间尺度的气候变化系统脆弱性研究,对于系统对短期突发性的极端气候事件的定量评价研究还相对较少,而我国今后极端事件会愈加频繁和剧烈,应加强对气候变率及极端气候事件的研究^[69]。

(4)就研究工具而言,目前所采用的作物模型、气候模型以及经济模型均存在精度不高、分辨率低、不能满足多层次研究需要等问题,因此需要不断改进各种模型的参数,提高模拟结果的精度。现阶段用作物模型进行农业生产模拟研究,是一个静态的过程,而农业生产是一个动态的过程,有必要对静态模拟过程进行动态改造^[46],加强作物模型的动态模拟研究。目前用于区域气候情景分析的气候模式多借用英国气候中心的PRECIS区域气候模式,而运用国外的气候模式对我国的气候进行模拟,不免会存在一些差异。所以,今后应在借鉴国外先进的气候模式基础上,结合中国特殊的自然条件和气候特征,开发适于中国小区域气候情景分析的气候模式。

(5)就研究过程而言,目前大多是对农业生态系统的全生育期进行研究,以产量的变化率为指标来反映气候脆弱性,而对农作物的各个生育期的气候脆弱性研究较少。作物各生育期对气候条件要求的不同、气候时间分布的差异性常导致各生育期气候脆弱性的不同,故以后应该对作物各生育期的脆弱性进行研究,然后综合评定作物全生育期的气候脆弱性。

参考文献:

- [1] James J McCarthy, Osvaldo F Canziani, Neil A Leary, et al. IPCC. Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. UK: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 王树涛, 门明新, 刘 微, 等. 农田土壤固碳作用对温室气体减排的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1775-1780.
WANG Shu-tao, MEN Ming-xin, LIU Wei, et al. Effects of carbon sequestration in farmland ecosystem on the greenhouse gas emission[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6): 1775-1780.
- [3] 李香兰, 徐 华, 蔡祖聪. 稻田CH₄和N₂O排放消长关系及其减排措施[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2123-2130.
LI Xiang-lan, XU Hua, CAI Zu-cong. Trade-off relationship and mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy

- field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008,27(6): 2123-2130.
- [4] IPCC. The fourth assessment report: Climate Change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability (Summary for policymakers of the report). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] Ritchie J T, Otter S. Description and performance of CERES-Wheat; user-oriented wheat yield model[A]//Willis, WO, ed. ARS Wheat yield project[C]. USDA-ARS. ARS-38, 1985: 159-175.
- [6] Guenther Fisher, Mahendra Shah, Harrij van Velthuizen. Climate Change and Agricultural Vulnerability. A special report, Prepared by the International Institute for Applied Systems Analysis under United Nations Institutional Contract Agreement No. III. 3 on "Climate Change and Agricultural Vulnerability" as a contribution to the World Summit on Sustainable Development. Johannesburg: 2002.
- [7] Marcela Vasquez-leon, Colin Thor West, Timothy J Finan. A comparative assessment of climate vulnerability: agriculture and ranching on both sides of the US-Mexicoboule[J]. *Global Environmental Change*, 2003, 13: 159-173.
- [8] Wehbe M B, Seiler R A, Vinocur M R, et al. Social methods for assessing agricultural producers' vulnerability to climate variability and change based on the Notion of Sustainability. AIACC Working Paper No. 19 September 2005. An electronic publication of the AIACC Project available form. <http://www.aiaccProject.org>.
- [9] McGTegart W J, Sheldon G W, Griffiths D C. IPCC. Impacts assessment of climate change-Report of Working Group II. Australia: Australian Government Publishing Service, 1990.
- [10] IPCC. Climate change 1995. Impacts, adaptation and mitigation of climate change. London: Cambridge University Press, 1996.
- [11] James J McCarthy, Osvaldo F Canziani, Neil A Leary, et al. IPCC. Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. UK: Cambridge University Press. 2001.
- [12] FAO. Rome declaration on world food security and world food summit plan of action. Rome: FAO, 1996.
- [13] Lovendal, Christian R, et al. Understanding vulnerability to food insecurity lessons from vulnerable livelihood profiling[DB/OL]. ESA Working Paper No. 04~18. ESA, FAO: 2004. <http://www.fao.org/docrep/007/ae2203/ae220e00.html>.
- [14] Santiago Olmos. Vulnerability and adaptation to climate change: Concepts, Issues, Assessment Methods, Climate Change Knowledge Network Foundation Paper, July 2001. <http://www.ckn.net>.
- [15] Robert Corell, Wolfgang Cramer, Schellnhuber H J. Methods and models of vulnerability research, analysis and assessment. <http://www.pik-potsdam.de/~dagmar/corelletal.pdf>.
- [16] Downing T E. Climate change and vulnerable places: Global food security and country studies in Zimbabwe, Kenya, Senegaland Chile. //Environmental change unit[M]. Oxford: Oxford University, 1993: 1-5.
- [17] Birkmann J. eds. Measuring vulnerability to hazards of national origin [M]. Tokyo: UNU Press, 2006.
- [18] McGtegart W J, Sheldon G W, Griffiths D C. Impacts assessment of climate change-report of working group II [M]. Australia: Australian Government Publishing Service, 1990.
- [19] Downing T E. Vulnerability to hunger in Africa [J]. *Global Environmental Change*, 1991, 1: 365-380.
- [20] Rosenzweig C Parryml. Potential impact of climate change on world food supply[J]. *Nature*, 1994, 367: 133-137.
- [21] Reilly J. Climate change, global agriculture and regional vulnerability [M]. FAO Report(CH10), 1996: 1-15.
- [22] 侯亚红, 刘文泉. 我国黄土高原地区农业生产的气候脆弱性变化预测[J]. *灾害学*, 2003, 18(3): 34-38.
- [23] 王馥棠. 气候变化对农业生态的影响[M]. 北京: 气象出版社, 2003. WANG Fu-tang. The impacts of climate change on agro-ecological[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
- [24] 孙成权, 高峰, 曲建升. 全球气候变化的新认识——IPCC 第三次气候变化评价报告概览[J]. *自然杂志*, 2002, 24(2): 114-122. Sun Cheng-quan, Gao Fen, Qu Jian-shen. Latest knowledge on global climate change[J]. *Ziran Zazhi*, 2002, 24(2): 114-122.
- [25] Iglesias A. Agricultural impacts of climate change in Spain; Developing tools for a spatial analysis[A]//Global Environment Change[C]. 2000, 10: 69-80.
- [26] Alexandrov V A, Hoogenboom G. Vulnerability and adaptation assessments of agricultural crops under climate change in the Southeastern USA[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2000, 67: 45-63.
- [27] 殷永元, 王桂新. 全球气候变化评估方法及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. YIN Yong-yuan, WANG Gui-xin. Climate change impact assessment: methods and applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [28] Ian Burton, Saleemul Huq, et al. From impacts assessment to adaptation priorities: the shaping of adaptation policy [J]. *Climate Policy*, 2002, 2: 145-159.
- [29] 蔡运龙, Barry Smit, 等. 全球气候变化下中国农业的脆弱性与应对对策[J]. *地理学报*, 1996, 51(3): 202-212. CAI Yun-long, Barry Smit, et al. Sensitivity and adaptation of Chinese agriculture under global climate change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(3): 202-212.
- [30] 林而达, 王京华. 我国农业对全球变暖的敏感性和脆弱性 [J]. *农村生态环境学报*, 1994, 10(1): 1-5. LIN Er-da, WANG Jin-hua. The sensitivity and vulnerability of China's agriculture to global warming[J]. *Journal of Rural Eco-Environment*, 1994, 10(1): 1-5.
- [31] 赵跃龙, 张玲娟. 脆弱生态环境定量评价方法的研究[J]. *地理科学*, 1998, 18(1): 73-79. ZHAO Yue-long, ZHANG Ling-juan. Study on method of quantitative assessment of fragile environment[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(1): 73-79.
- [32] 刘文泉, 雷向杰. 农业生产的气候脆弱性指标及权重的确定[J]. *陕西气象*, 2002(3): 32-35. LIU Wen-quan, LEI Xiang-jie. Determination of index and weight of climatological frangibility for agricultural production[J]. *Journal of Shanxi Meteorology*, 2002(3): 32-35.
- [33] 王馥棠, 王石立, 李玉祥, 等. 气候变化对我国东部主要农业区粮食生产影响的模拟试验[A]//中国气候变化对农业影响的试验与研究[C]. 北京: 气象出版社, 1991. WANG Fu-tang, WANG Shi-li, LI Yu-xiang, et al. Simulation of the

- impact of climate change on Chinese main grain production in east of China [A]. Test and research of impact of climate change on agriculture [C]. Beijing: China Meteorological Press, 1991.
- [34] 王馥棠. 我国气候变暖对农业影响研究的进展[J]. 气象科技, 1994, 22(4): 19–25.
- WANG Fu-tang. The study progress of impact of climate warming on agriculture[J]. *Meteorological Science and Technology*, 1994, 22(4): 19–25.
- [35] Wang Futang, Lin Erda. The impacts of potential climate change and climate variability on simulated maize production in China[J]. *Water, Air and Pollution*, 1996, 9(2): 75–85.
- [36] Wang Futang. Impacts of climate change on cropping system and its implication for China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 11(4): 407–415.
- [37] Wang Futang. Some advances in climate warming impact re-search in China since 1990[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 15(4): 498–508.
- [38] 张 宇, 王石立, 王馥棠. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(4): 264–270.
- ZHANG Yu, WANG Shi-li, WANG Fu-tang. Research on the possible effects of climate change on growth and yield of wheat in China[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000, 11(4): 264–270.
- [39] 杨 修, 孙 芳, 林而达, 等. 中国小麦对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 692–696.
- YANG Xiu, SUN Fang, LIN Er-da, et al. Study on the Sensitivity and vulnerability of wheat to climate change in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(4): 692–696.
- [40] 杨 修, 孙 芳, 林而达, 等. 我国玉米对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J]. 地域研究与开发, 2005, 24(4): 54–57.
- YANG Xiu, SUN Fang, LIN Er-da, et al. Study on the sensitivity and vulnerability of maize to climate change in China[J]. *Areal Research and Development*, 2005, 24(4): 54–57.
- [41] 杨 修, 孙 芳, 林而达, 等. 我国水稻对气候变化的敏感性和脆弱性[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(5): 85–89.
- YANG Xiu, SUN Fang, LIN Er-da, et al. Sensitivity and vulnerability of rice to climate change in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(5): 85–89.
- [42] 熊 伟. CERES-Wheat 模型在我国小麦区的应用效果及误差来源[J]. 应用气象学报, 2009, 20(1): 88–94.
- XIONG Wei. The performance of CERES-Wheat model in wheat planting areas and its uncertainties[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(1): 88–94.
- [43] 胡亚南, 柴绍忠, 许吟隆, 等. CERES-Maize 模型在中国主要玉米种植区域的适用性[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 383–386.
- HU Ya-na, CHAI Shao-zhong, XU Yin-long, et al. Validation of CERES-Maize model in main maize planting regions in China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(4): 383–386.
- [44] 姚凤梅, 许吟隆, 冯 强, 等. CERES-Rice 模型在中国主要水稻生态区的模拟及其检验[J]. 作物学报, 2005, 31(5): 545–550.
- YAO Feng-Mei, XU Yin-long, FENG Qiang, et al. Simulation and validation of CERES-Rice model in main rice ecological zones in China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5): 545–550.
- [45] 熊 伟, 陶福祿, 许吟隆. 气候变化情景下中国水稻产量变化模拟[J]. 中国农业气象, 2001(3): 1–5.
- XIONG Wei, TAO Fu-lu, XU Yin-long, et al. Simulation of rice yield under climatic changes in future in China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001(3): 1–5.
- [46] 熊 伟. 用 GIS 和作物模型对作物生产进行区域模拟方法初探[J]. 中国农业气象, 2004(2): 28–32.
- XIONG Wei. Spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004(2): 28–32.
- [47] 熊 伟, 许吟隆, 林而达. 气候变化导致的冬小麦产量波动及应对措施模拟[J]. 中国农学通报, 2005, 21(5): 380–385.
- XIONG Wei, XU Yin-long, LIN Er-da. The simulation of yield variability of winter wheat and its corresponding adaptation options under climate change[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(5): 380–385.
- [48] 姚凤梅, 张佳华, 孙白妮, 等. 气候变化对中国南方稻区水稻产量影响的模拟和分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(5): 659–666.
- YAO Feng-mei, ZHANG Jia-hua, SUN Bai-ni, et al. Simulation and analysis of effects of climate change on rice yields in Southern China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 12(5): 659–666.
- [49] 杨 勤, 许吟隆, 林而达, 等. 应用 DSSAT 模型预测宁夏春小麦产量演变趋势[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 41–48.
- YANG Qin, XU Yin-long, LIN Er-da, et al. Application of DSSAT crop model on prediction of potential yield of spring wheat in Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 41–48.
- [50] 王馥棠, 刘文泉. 黄土高原农业生产气候脆弱性的初步研究[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 91–100.
- WANG Fu-tang, LIU Wen-quan. Analysis on vulnerability of agro-production to climate change in the loess plateau[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, 8(1): 91–100.
- [51] 王 静, 韩永翔, 尉元明. 甘肃省雨养农业区气候变暖背景下秋粮生产脆弱性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 15–19.
- WANG Jing, HAN Yong-xiang, WEI Yuan-ming. Climate vulnerability of autumn grain crops in rainfed farming areas of Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(1): 15–19.
- [52] 赵艳霞, 何 磊, 刘寿东, 等. 农业生态系统脆弱性评价方法[J]. 生态学杂志, 2007, 26(5): 754–758.
- ZHAO Yan-xia, HE Lei, LIU Shou-dong, et al. Evaluation method of agro-ecosystem vulnerability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(5): 754–758.
- [53] 唐为安. 区域农业对气候变化的脆弱性评价——宁夏案例研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- TANG Wei-an. Vulnerability assessment of regional agriculture to climate change: A case study of Ningxia[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [54] 段兴武, 谢 云, 刘 刚, 等. 黑龙江省粮食生产对气候变化影响的脆弱性分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 6–11.
- DUAN Xing-wu, XIE Yun, LIU Gang, et al. Analysis of vulnerability of grain crop yields to impacts of climate change in Heilongjiang Province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 29(1): 6–11.
- [55] Downing T E. Climate change and vulnerable places: Global food secu-

- rity and country studies in Zimbabwe, Kenya, Senegal and Chile [A]. Oxford:University of Oxford, Environmental Change Unit, 1992:1-5.
- [56] Ierland E C. van, de Groot R S. Integrated assessment of vulnerability to climate change and adaptation options in the Netherlands 2001 [M/OL]. <http://www.dow.wau.nl/msa/nopimpact.htm>.
- [57] 刘燕华, 李秀彬. 脆弱生态环境与可持续发展 [M]. 商务印书馆, 2001.
- LIU Yan-hua, LI Xiu-bing. Fragile environment and sustainable development[M]. The Commercial Press, 2001.
- [58] Priceputu A M. Agriculture vulnerability to climate in Switzerland: A statistical approach[J/OL]. [2001-7-1]. <http://www.nccr-climate.unibe.ch/events/SummerScool/03/Abstract/Priceputu%2001%July.pdf>.
- [59] Iglesias A, Rosenzweig C, Pereira D. Agricultural impacts of climate change in Spain: Developing tools for a spatial analysis [J]. *Global Environmental Change*, 2000(10):69-80.
- [60] Karen O'Brien, Guro Aandahl. Coping with global change: Vulnerability and adaptation in Indian agriculture [M]. The Energy and Resources Institute, 2003.
- [61] Suruchi Bhadwal, Preety Bhandari, Akram Javed. Coping with global change vulnerability and Adaptation in Indian agriculture[M]. The Energy and Resources Institute, 2003.
- [62] 金之庆, 葛道阔, 石春林, 等. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1):24-31.
- JIN Zhi-qing, GE Dao-kuo, SHI Chun-lin, et al. Several strategies of food crop production in the northeast China plain for adaptation to global climate change—a modeling study[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 24-31.
- [63] JanF Feenstra, Ian Burton, Joel B smith, et al. Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies, UNEP/IVM Handbook, Version2. 0, The Netherlands, 1998.
- [64] Opha Pauline Dube. Impacts of climate change, vulnerability and adaptation capacity in the Limpopo basin of semi-arid land southern Africa: the case of eastern Botswana UNEPG/EF/SIART/TWAS: Assessment of Impacts of and Adaptations to Climate Change in Multiple Regions and Sectors(AIACC)Progress Report, January-June, 2003.
- [65] Jabavu C Nkomo. Capacity building in analytical tools for estimating and comparing costs and benefits of adaptation projects in Africa (A-IACCAF47)July Semi-Annual Report, 2003.
- [66] Ayman F. Assessment of impacts, adaptation, and vulnerability to climate change in North Africa: Food production and water resources ALACC AF90 Semi-Annual Progress Report, 2003.
- [67] Jabavu C Nkomo. Capacity building in analytical tools for estimating and comparing costs and benefits of adaptation projects in Africa (A-IACCAF47)July Semi-Annual Report. 2004[M/OL]. http://www.cccchina.gov.cn/source/ia/ia_2003072105.htm.
- [68] 居辉, 熊伟, 许吟隆, 等. 气候变化对我国小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(10):1340-1343.
- JU Hui, XIONG Wei, XU Yin-long, et al. Impacts of climate change on wheat yield in China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005,31(10): 1340-1343.
- [69] Kropp J P, Block A, Reusswig F, et al. Semiquantitative assessment of regional climate vulnerability: the north-rhine Westphalia study [J]. *Climate Change*, 2006, 76:265-290.

欢迎订阅 2010 年《农业环境与发展》

《农业环境与发展》创刊于 1984 年,农业部主管、农业部环境保护科研监测所与中国农业生态环境保护协会联合主办的国家级综合指导类科技期刊,为中国农业核心期刊。传播农业可持续发展新思想、新观点、新方略,倡导农业生产、农民生活、农村生态协调发展理念,多视角、多层次、多学科地反映食品安全与健康、资源开发与利用、环境污染与防治、农业清洁生产与农村循环经济等热点问题,直接面向农业、环保、食品、能源、卫生等领域的科研、教学、生产、管理、技术推广人员与大众读者。同时,《农业环境与发展》将在重要版面上宣传各地农业环境保护成就。欢迎大家踊跃投稿,欢迎刊登广告。

《农业环境与发展》为双月刊,大 16 开,96 页,逢双月 25 日出版,刊号 ISSN 1005-4944, CN 12-1233/S, 全国发行,各地邮电局(所)均可订阅,邮发代号 6-40,2010 年每册定价 12.00 元,全年 72.00 元。有漏订者可直接与编辑部联系订阅。本刊现有过刊合订本,需订购者请与本刊编辑部联系。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

邮政编码:300191

电话:022-23006206

电子信箱:caed@vip.163.com

传真:022-23006209

网址:www.aed.org.cn