

农业气象灾害风险评估研究进展与展望^{* 1}

王春乙¹ 张继权² 霍治国¹ 蔡菁菁¹ 刘兴朋² 张琪²

WANG Chunyi¹ ZHANG Jiquan² HUO Zhiguo¹ CAI Jingjing¹ LIU Xingpeng² ZHANG Qi²

1. 中国气象科学研究院,北京,100081

2. 东北师范大学环境学院/自然灾害研究所,长春,130024

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *School of Environment/Natural Disaster Research Institute, Northeast Normal University, Changchun 130024, China*

2014-05-12 收稿,2014-12-10 改回.

王春乙,张继权,霍治国,蔡菁菁,刘兴朋,张琪. 2015. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望. 气象学报, 73(1): 1-19

Wang Chunyi, Zhang Jiquan, Huo Zhiguo, Cai Jingjing, Liu Xingpeng, Zhang Qi. 2015. Prospects and progresses in the research of risk assessment of agro-meteorological disasters. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(1): 1-19

Abstract The research on the agro-meteorological disaster risk is a hotspot of Catastrophology, as well as a practical task of urgent needs by the government. Though the assessment methods and theory of agro-meteorological disaster risk advances rapidly, a systematically review still remains vacant in this area. In order to have a thorough grasp of the current research status of the agro-meteorological disaster risk assessment, we have summarized and reviewed the present research achievements based on the relevant literatures of the recent 30 years, through which, we pointed out some existing shortcomings and put forward several research prospects of the agro-meteorological disaster risk assessment in the future. At the beginning, we reviewed the research history of the agro-meteorological disaster risk assessment, and then we elaborated the main content of the agro-meteorological disaster risk assessment, including the hazard risk assessment, vulnerability assessment, disaster damage assessment and comprehensive assessment, which could overall be summed up into three methods: the evaluation based on indexes, evaluation based on sample data, and the scenario simulation assessment method. In the end, we discussed shortcomings existing in the present research and the possible future research fields in the agro-meteorological disaster risk. This study would provide a reference for future agro-meteorological disaster risk assessment and promote its progress.

Key words Agro-meteorological disasters, Risk assessment, Research progresse, Research prospect

摘要 农业气象灾害风险研究既是灾害学和农业气象学领域中研究的热点,又是当前政府相关管理部门和农业生产部门亟需的应用性较强的课题。农业气象灾害风险评估的理论和方法进展很快,但尚没有文献对相关研究做出较为系统的论述。为全面了解农业气象灾害风险评估的研究现状,在综合分析近30年来相关文献的基础上,对农业气象灾害风险评估方面所取得的研究成果进行了总结和评述,指出了当前研究的一些不足,并对今后农业气象灾害风险评估研究的趋势进行了展望。首先对农业气象灾害风险评估研究的历史进行了回顾;重点阐述了农业气象灾害风险评估的主要内容,包括致灾因子的危险性评估,承灾体脆弱或易损性评估,灾情期望损失评估和灾害风险综合评估;归纳出农业气象灾害风险评估研究中采用的3类主要方法——基于指标的综合评估方法、基于数据的概率评估方法以及基于情景模拟的评估方法;最后对农业气象灾害风险评估目前存在的问题和未来可能的研究方向进行了探讨。

关键词 农业气象灾害, 风险评估, 研究进展, 研究展望

* 资助课题:“十二五”农村领域国家科技支撑计划(2011BAD32B004)、“十二五”国家科技支撑计划(2013BAK05B01)、国家自然科学基金项目(41371495)。

作者简介:王春乙,主要从事农业气象灾害风险评估、气候变化对农作物的影响研究。E-mail:wcy@cms1924.org

通讯作者:张继权,主要从事自然灾害风险评价与综合风险管理研究。E-mail:zhangjq022@nenu.edu.cn

中图法分类号 P49

1 引言

灾害作为重要的可能损害之源,历来是各类风险管理研究的重要对象,引起了中外防灾减灾领域的普遍关注。特别是20世纪90年代以来,灾害风险管理工作在防灾、减灾中的作用和地位日益凸现。1999年,国际减灾10年(IDNDR)科学与技术委员会,在其“减灾年”活动的总结报告中(UN/ISDR, 2004),列举了21世纪国际减灾界面临的5个挑战性领域,其中3个领域与灾害风险问题密切相关,其一是综合风险管理与整体脆弱性降低;其二为资源与环境脆弱性;其三是发展中国家的防灾能力。2011年11月18日,政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布了《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》(SREX)决策者摘要,并于2012年3月发布了特别报告全文(IPCC, 2012),该报告包含了当今学术界在管理极端气候事件和灾害风险方面的最新进展,体现了当今世界在管理极端事件和灾害风险、推进气候变化适应问题上的认知水平。这表明,灾害风险及其相关问题的研究仍是当前国际减灾领域的重要研究前沿。

农业是气候影响最敏感的领域之一。频率高、强度大的农业气象灾害给中国农业带来巨大的经济损失,已成为各地气象部门重点关注和研究对象。同时,农业又是风险性产业,农业气象灾害是危害农业生产最主要的风险源。气象灾害风险的加剧,直接影响着农业生产,对农业的不利影响使粮食安全再次受到国际社会的普遍关注。农业气象灾害作为自然灾害的重要部分,在未来气候变化的情况下,风险也将越来越大,其风险评价和预测研究越来越引起各国政策制定者和学者的关注。因此,当前农业气象灾害风险研究既是灾害学领域中研究的热点,又是政府当前急需应用性较强的课题。因此受到中外学者的重视。如何准确、定量地评估气象灾害对农业生产风险的影响,对国家目前农业结构调整,特别是农业可持续发展、农业防灾减灾对策和措施的制定意义重大。

农业气象灾害是中国最主要的农业自然灾害,约占全部农业自然灾害的70%。农业气象灾害风险是一种潜在的灾害或者是未来灾害损失的可能

性,而灾害则是风险变成现实的结果。农业气象灾害系统由孕灾环境、承灾体、致灾因子、灾情4个子系统组成,其中灾情是孕灾环境、承灾体、致灾因子相互作用的最终结果(李世奎等,1999;霍治国等,2003),农业气象灾害风险评估是评估农业气象灾害事件发生的可能性及其导致农业产量损失、品质降低以及最终的经济损失的可能性大小的过程,是一种专业性的气象灾害风险评估(王春乙等,2010)。国际上农业气象灾害的风险评估研究约始于20世纪80年代后期,主要集中在建立评估方法体系方面,研究对象多为果树等经济作物;中国的农业气象灾害风险研究起步于20世纪90年代,大致可分为3个阶段:第1阶段,以农业气象灾害风险分析技术、方法的探索为主的研究起步阶段;第2阶段,以灾害影响评估的风险化,数量化技术、方法为主的研究发展阶段;第3阶段,以认识农业气象灾害风险的形成机制、风险评价技术向综合化、量化、动态化和标准化方向发展的研究快速发展阶段。目前农业气象灾害风险评估的理论和方法进展很快,为全面了解中外农业气象灾害风险评估的研究现状,通过对近30年来相关文献的综合分析和系统梳理,对已取得的研究成果做归纳和总结,评述了研究中存在的问题,并对今后研究的发展趋势进行了展望。以期为中国农业气象灾害风险评估的进一步研究与发展提供借鉴和参考。

2 农业气象灾害风险评估研究发展概况

20世纪80年代初,灾害学家开始关注灾害及其风险形成机制与评价理论,从系统论和风险管理的角度探讨了形成灾害与灾害风险的要素及其相互作用和数学表达式。目前关于灾害形成机制的理论主要有“致灾因子论”、“孕灾环境论”、“承灾体论”及“区域灾害系统理论”(Burton, et al, 1993; Blaikie, et al, 1994)。在国际减灾10年活动中,灾害风险管理学者就灾害风险的形成基本上达成共识。目前关于灾害风险形成机制的理论主要有“二因子说”、“三因子说”和“四因子说”(张继权等, 2006, 2007, 2012a, 2012b, 2013)。

纵观灾害风险研究可知:(1)针对灾害风险评估的研究,大多针对单一灾种评估为主,而对多灾种复

合的灾害综合风险评估研究较少,在时效和精度上远不能满足实际评估的需要;(2)国际学者过多侧重于地质灾害、海洋灾害、城市灾害、地震灾害、水文气象灾害等灾害类型的风险评价,在农业气象灾害风险方面研究成果并不多,而中国在农业气象灾害及其风险评价方面,尤其是最近十多年来在风险评价方法、技术等研究领域诸多研究成果陆续出现;(3)就单灾种的风险评价而言,评价指标、模型及方法上的研究成果颇多,但并未达成完全的共识;(4)当前,对于自然灾害风险评估方法可归纳为3大类:风险概率的建模与评估法,利用数理统计方法,对以往的灾害数据进行分析提炼,找出灾害发展演化的规律,以达到预测评估未来灾害风险的目的;指标体系的风险建模与评估,以指标为核心的风险评估体系,在方法上侧重于灾害风险指标的选取优化以及权重的计算;情景模拟的动态风险建模与评估方法,通过与遥感/地理信息(RS/GIS)和数值模式等复杂系统仿真建模手段相结合,模拟人类活动干扰下未来可能发生的灾害过程,形成对灾害风险的可视化表达,实现灾害风险的动态评估。

农业气象灾害风险既具有自然属性,也具社会属性,无论气象因子异常或人类活动都可能导致气象灾害发生。因此,农业气象灾害风险是普遍存在的,同时气象灾害风险又具有不确定性,其不确定性一方面与气象因子自身变化的不确定性有关,另一方面也与认识与评估农业气象灾害的方法不精确、评价的结果不确切以及为减轻气象风险采取的措施有关。农业气象灾害风险评估的理论基础是自然灾害风险分析与风险评估原理,与自然灾害风险评价相比,农业气象灾害风险评估研究起步相对较晚。国际上的研究约始于20世纪80年代后期,主要集中在建立评估方法体系方面,研究对象多为果树等经济作物。如 Nullet 等(1988)提出了一种应用于农业发展计划的季节性农业干旱风险分析方法; Snyder 等(2005)对霜冻发生的可能性给出了计算方法,并进行了产量损失风险的定量计算; Cittadini 等(2006)构建了一个定量评价樱桃霜冻风险的综合方法,主要用于估计霜冻防控系统在减灾方面的潜在影响; White 等(2009)通过研究蓝桉树生理指标与气象干旱指数、土壤水分的关系,构建了评价蓝桉树气候生产力和干旱风险的定量方法; Nivolianitou 等(2004)提出了基于风速等主要气象观测数据

的风险评价方法,用于定量评价气象因素对防灾设施的潜在影响。近年来,针对农作物的农业气象灾害风险评估研究成果不断出现,尤以农业干旱灾害风险评估居多。如 Wilhite 等(2000)最早在干旱研究中引入了风险概念,提出了干旱风险管理的概念,用以表征干旱严重情况和潜在损失; Keating 等(1998)和 Agnew(2000)选取降水、蒸发等气候指标和作物模拟模型,进行了相应的干旱风险评估研究; Wu 等(2004a, 2004b)构建了针对玉米和大豆作物的旱灾风险评估模型,可实时评估干旱造成的作物产量的潜在损失情况; Richter 等(2005)利用作物模拟模型提出了一种可用于评估与预测气候变化对冬小麦产量和干旱风险影响的数学方法; Schindler 等(2007)提出了旱田农业干旱风险评估方法; Todisco 等(2009)选取土壤缺水指数、作物减产率、脆弱性等指标构建了农业干旱经济风险评估(ADERA)模型,用于评估农业干旱脆弱性和风险程度。20世纪80年代以来,人们对灾害形成中致灾因子与承灾体的脆弱性的相互作用予以关注,尤其是脆弱性研究逐步受到重视。脆弱性主要用来描述相关系统及其组成要素易于受到影响和破坏,并缺乏抗拒干扰、恢复的能力(Birkman, 2006)。脆弱性衡量承灾体遭受损害的程度,是灾损估算和风险评价的重要环节。脆弱性分析被认为是把灾害与风险研究紧密联系起来的重要桥梁(UN/ISDR, 2004)。因此,脆弱性分析与评价成为目前灾害风险评估研究的热点。随着农业干旱风险研究的推进,脆弱性研究的逐渐增多,并从不同的角度和方法,建立了农业干旱脆弱性评价指标和模型,推动了农业干旱灾害风险评价进程。

中国的农业气象灾害风险研究起步于20世纪90年代,以农业气象灾害风险分析技术、方法的探索研究为主。进入21世纪以来,随着中国农业防灾、减灾的迫切需求,自然灾害风险分析理论和技术全面引入农业领域,农业气象灾害风险评估技术向量化、动态化方向发展,认识农业气象灾害风险的形成机制,建立农业气象灾害风险评价体系框架,构建风险评价理论模型。中国的农业气象灾害风险评估研究大致可以2001年为界分为2个阶段:(1)以灾害风险分析技术方法探索研究为主的起步阶段,主要成果包括:在农业生态地区法的基础上建立了华南果树生长风险分析模型(杜鹏等,1995, 1997),这是中国较早将风险分析方法应用于农业气象灾害

研究;李世奎等(1999)以风险分析技术为核心,探讨了农业气象灾害风险分析的理论、概念、方法和模型。(2)以灾害影响评估的风险化、数量化技术方法为主的研究发展阶段,丰富和拓展了灾害风险的内涵,包括概念的提出、定义的论述、辨识机理的揭示、函数关系的构建;实现和量化了灾害风险的评估,包括评估体系框架的构建、估算技术方法的研制、理论模型的构建及其应用量化;构建了灾害风险分析、跟踪评估、灾后评估、应变对策的技术体系。特别是“十五”中国国家科技攻关计划项目所属课题“农业气象灾害影响评估技术研究”的开展,促进了中国农业气象灾害风险评估研究的快速发展。主要研究成果包括:基于地面、遥感两种信息源,建立了主要农业气象灾害风险评估技术体系,实现了区域灾害致灾强度、灾损、抗灾能力风险的量化评估与业务应用;其中在灾害致灾信息提取及其风险量化表征、风险估算、风险评估模型构建及其参数的区域化等方面取得了重要进展(霍治国等,2003;杜尧东等,2003;刘锦鑫等,2003;马树庆等,2003;王素艳等,2003,2005;薛昌颖等,2003a,2003b,2005;袭祝香等,2003;植石群等,2003;李世奎等,2004;王春乙等,2005)。其后,自然灾害风险分析理论和技术全面引入农业领域,农业气象灾害风险评估技术向定量化、动态化方向发展,认识农业气象灾害风险的形成机制,建立农业气象灾害风险评估体系框架,构建风险评估理论模型;灾害风险研究关注的灾害和作物类型不断增多,而且已表现出从单灾种向多灾种综合研究发展的趋势,对多灾种农业气象灾害的风险进行综合评估;研究方法上,基于多源信息获取和融合技术,借助作物模拟模型,并且考虑作物生理因素,进行针对不同作物生长全过程的农业气象灾害动态风险评估研究开始出现。在“十一五”、“十二五”中国国家科技支撑计划项目所属课题“重大农业气象灾害对农业的影响研究”、“重大农业气象灾害风险评价与管理关键技术研究”等的支持下,基于作物模型的农业气象灾害动态风险评价(王春乙,2007;王春乙等,2010;Zhang J Q, et al, 2011;Liu, et al, 2013;Zhang Q, et al, 2013)、基于多灾种的农业气象灾害风险综合评价取得重要进展(蔡菁菁等,2013)。

IPCC 第 5 次评估报告 (AR5) 第 2 工作组 (WGII) 报告《气候变化 2014: 影响适应和脆弱性》

(IPCC, 2014) 认为, 受全球气候变暖影响, 未来全球极端气象灾害可能出现多发、频发、重发趋势, 全球和中国农业生产都将出现大幅度波动, 粮食供给的不稳定性会增大, 将会给全球和区域粮食安全带来极大风险。观测及模拟的影响表明, 气候变化已经对全球许多区域主要作物包括小麦和玉米总产量产生不利影响, 负面影响的结果比正面影响更为普遍; 少量研究表明正面影响多见于高纬度地区。气候变化可能带来 8 大风险, 其中, 与农业紧密相关的风险有 4 个: 与升温、干旱、洪水、降水变率、极端事件等相关的食品安全和粮食系统崩溃的风险; 由于饮用水和灌溉用水不足以及农业生产力下降对农村生计和收入带来损失的风险; 提供沿海生计生态产品功能和服务损失的风险; 陆地和内陆水生态系统、生物多样性, 及其供给生计的生态系统产品、功能和服务损失的风险。因此, 应对气候变化背景下农业气象灾害风险的变化已成为灾害风险管理的新特征和新挑战, 揭示气候变化背景下农业气象灾害风险的时空新变化及其规律性, 开展灾害风险变化评估研究将成为未来的热点。

3 农业气象灾害风险评估的主要内容

3.1 致灾因子危险性评估

致灾因子危险性分析是农业气象灾害风险研究的一个方向, 危险性是指致灾因子的自然变异程度, 主要是由灾变活动规模(强度)和活动频次(概率)决定的。一般灾变强度越大, 频次越高, 灾害所造成的破坏损失就越严重, 灾害的风险也越大。致灾因子危险性评估内容主要包括不同孕灾环境中的致灾因子引发的灾害种类, 致灾因子时空分布、强度、频率、作用周期、持续时间, 致灾因子等级及其出现概率等。致灾因子风险估算是致灾因子危险性分析的重要环节, 风险估算模型以概率模型最为普遍, 基于概率评估的危险性评价模型将农业气象灾害风险看成是一种随机过程, 假设风险概率符合特定的随机概率分布, 运用特定的风险概率函数来拟合风险, 以灾害发生的频率、强度、变异系数等指标构建概率分布函数估算不同程度灾害发生的超越概率。Nullet 等(1988)利用蒸发散指标, 构建了季节性农业干旱风险概率评估模型。杜鹏等(1995, 1997, 1998)根据灾害风险概率分析原理, 建立了一个 3 层逐级放大的农业气象灾害风险分析实用模型。霍治国等(2003)

采用灾害致灾的气象指标序列与实际灾情序列的对应匹配技术,通过灾害的致灾因子、致灾等级、致灾指标、减产率实现综合分离,采用6种概率分布模型进行序列的风险概率估算及其优选,分别研发了北方地区冬小麦干旱、东北地区玉米和水稻冷害、江淮地区冬小麦和油菜涝渍、华南地区香蕉和荔枝寒害风险评估技术;Cheng等(2013)利用冷害的年均频率和强度,构建了湖南省双季稻冷害风险评价方法;Hao等(2012)利用多时间尺度指数(SPI),把干旱频率、强度作为危险性指标分析其变化规律,利用信息扩散技术对中国583个农业气象站的干旱损失进行评估;Daneshvar等(2013)采用标准化降水指数对干旱对小麦的影响进行了评价。这种从对作物影响较大的农业气象灾害风险要素和风险源出发,辨识致灾因子,通过一系列参数或方法描述致灾风险信息,从而建立风险评估模型,对灾害风险进行评估的方法,得到不少学者的青睐(马树庆等,2003;裘祝香等,2003;杜尧东等,2003,2008;王素艳等,2003;薛昌颖等,2003b;陈怀亮等,2006;钟秀丽等,2007;刘荣花等,2007;李娜等,2010;侯双双等,2010;高静等,2010;徐新创等,2011;朱红蕊等,2012;许凯等,2013)。

3.2 承灾体脆弱性评估

脆弱性是指给定危险地区的承灾体面对某一强度的致灾因子危险性可能遭受的伤害或损失程度。根据给定的致灾因子强度推算承灾体的伤害或损失程度称为承灾体脆弱性评估。承灾体脆弱性评估主要包括风险区确定,风险区特性评估,防灾、减灾能力分析等。一般承灾体的脆弱性越大,抗灾能力越弱,灾害损失越大,灾害风险也越大,反之亦然。目前的研究主要集中在以下几个方面:

(1)基于综合影响因素分析的评估指标构建。一般根据区域自然、环境、经济社会特点选取评估指标,构建多目标评估指标体系,比较分析区域脆弱性的差异。商彦蕊(2000)认为农业旱灾脆弱性是指农业生产系统易于遭受干旱威胁并造成损失的性质,是干旱致灾成灾的前提,与农业生产系统结构和功能有密切关系。Wilhelmi等(2002)认为决定农业旱灾脆弱性的是气候、土壤、土地利用及灌溉条件等自然因素和社会因素,建立了农业旱灾脆弱性框架体系,对美国内布拉斯加州的农业干旱脆弱性进行了分析和评价;Shahid等(2008)从社会经济和自然

两个角度选取人口密度、农业人口比例、农作物产量等7个指标,对孟加拉西部干旱承灾体进行了脆弱性评价;Antwi-Agyei等(2012)利用降水、产量和社会经济数据构建了面向国家和区域的多尺度、多指标的作物干旱脆弱性评价与区划方法;Zarafshani等(2012)采用问卷调查法,选择经济、社会文化、心理、技术、基础设施等因子构建了小麦干旱脆弱性评价方法。刘兰芳等(2002)从生态环境、社会的角度,选择了降水量、蒸发量、水利化程度等9个指标评估了湖南省农业干旱脆弱性。杨春燕等(2005)从灾害发生、发展过程的易损性和适应性两方面选择指标,构建了农业旱灾脆弱性综合评估模型。倪深海等(2005)从水资源承载能力、抗旱能力、农业旱灾系统三个方面,选择人均水资源量、灌溉率等7个指标对中国农业干旱脆弱性进行了评估。王静爱等(2005)从旱灾形成的系统性和过程性两个角度出发,考虑承灾体灾前、灾中和灾后的影响和特点设置指标,从承灾体的易损性、适应性、生产压力、生活压力等四个方面构建了农业旱灾承灾体脆弱性评估体系。盛绍学等(2010)从自然地理条件、农业生产水平、社会经济系统等方面分析了涝渍灾害脆弱性的成因,建立了脆弱性定量评估模型。Xu等(2012)综合作物对干旱的敏感性、暴露性和适应能力,构建了作物干旱脆弱性定量评估模型,并对加拿大亚伯达南部作物干旱脆弱性时空变化进行了分析。阎莉等(2012)基于IPCC报告中对脆弱性的定义,从暴露程度、敏感性和适应性的角度,选取作物自身、自然气象因子、作物生理因子以及社会经济因子等方面的17项指标,建立了辽西北玉米干旱脆弱性评估模型。

(2)耦合防灾、减灾能力等社会经济因素的评估指标、模型构建。农业是一个系统产业,受多种因素的影响,一些社会人文因子在农业脆弱性影响中往往起关键作用。Wilhite(2000)认为区域经济条件是农业旱灾脆弱性形成的关键因素。Wilhelmi(2002)选取气候、土壤、土地利用和灌溉率4个因子,定量评估了那布拉斯州不同区域的农业脆弱性空间分布状况,指出土壤持水能力和灌溉保证程度是影响该区域脆弱性的最重要因素。苏筠等(2005)选择旱地比重指数、耕地平坦指数、耕地生产力指数,构建了进行轻旱年型下的承灾体脆弱性评估指标。Simelton(2009)、Fraser等(2008)认为,技术、

资金等社会经济因素是中国东部主要粮食作物(小麦、玉米、水稻)干旱脆弱性影响的主要因子。陈香(2008)采用福建省水灾数据库和社会经济指标数据库资料,编制了福建省农业水灾脆弱性分布图。杜晓燕等(2010)根据影响旱灾脆弱性的自然、社会经济因素,选取8项指标,对天津地区旱灾脆弱性进行了综合评估和分区。Wu等(2011)选取作物季节水分短缺、土壤有效持水能力和灌溉能力3个指标,构建了农业干旱脆弱性评估模型。上述研究虽已考虑到一些社会、人文因子对农业气象灾害脆弱性的影响,但由于社会、经济、人文因子对农业承灾体的影响反馈过程极其复杂,过程很难量化刻画,同时这些因子的统计数据较难获得,且质量不高。因此,总体上精细化程度不足。

(3)不同灾害类型的作物脆弱性曲线构建。通常可用致灾因子与承灾体自身性质之间的关系曲线或方程式表示,称为脆弱性曲线或灾损(率)曲线(函数)。它主要用来衡量不同灾种的致灾强度与其相应的损失(率)的关系,主要用曲线、表格或者曲面的形式来表现(史培军,2011)。White 1964年首次提出了脆弱性曲线方法应用于水灾脆弱性评估(Smith,1994)。近年来该方法逐渐被推广应用到农业气象灾害、水灾、旱灾、地震、台风、泥石流、滑坡、雪崩和海啸等灾害的研究中,并且得到了比较广泛的应用(周瑶等,2012)。农业气象灾害脆弱性曲线构建方法有基于灾情数据的脆弱性曲线构建,研究者利用收集到的农业灾情数据中致灾与成灾一一对应的关系,采用曲线拟合、神经网络等数学方法发掘它们的脆弱性规律(薛昌颖等,2003a);基于模型模拟的脆弱性曲线,在旱灾研究中,有学者利用作物生长模型模拟不同灾害致灾强度情景,并计算出相应的产量损失率,分别构建了小麦、玉米和水稻旱灾脆弱性曲线(王志强等,2012;贾慧聪等,2011;Wang, et al,2013);基于试验模拟的脆弱性曲线构建,在人为模拟的灾损环境下,研究致灾因子强度对作物的影响,然后用统计方法拟合实验数据得到作物脆弱性曲线(余学知等,2001)。

3.3 灾情期望损失评估

利用概率或超越概率方法分析灾情不同损失程度的概率风险或者利用灾害指标识别灾害事件在某一区域发生的概率及产生的后果,是农业气象灾害风险评估的主要内容之一。评估风险区内一定时段

可能发生的一系列不同强度的农业气象灾害给承灾体造成的可能后果称为灾情期望损失评估。灾情损失评估指标可采用绝对、相对和综合指标表示。绝对指标包括成灾面积、绝收面积、产量损失数量、直接或间接经济损失等;相对指标包括成灾面积、绝收面积百分率、减产率等;综合指标:包括灾损度或灾害等级等。一般可采用历史灾情反演的的方法,分析灾害事件强度及其风险概率与灾情损失的相互关系,建立灾损函数或曲线,预估未来可能的灾情损失(灾情期望损失)。

一般是将作物产量进行去趋势化,分离出气象产量,以历(灾)年平均产量减产率、历(灾)年减产率的变异系数、基于正态拟合函数构建的减产率风险概率、产量灾损风险指数、抗灾指数等为指标进行产量灾损评估(李世奎等,1999;邓国等,2001;霍治国等,2003;张琪等,2010)。中国很多学者利用农业气象灾害历史灾情资料,并借助解析概率密度曲线法、减产率变异系数及相关减产率统计指标对农业气象灾害损失进行风险估算。薛昌颖等(2003a)选取历年减产率的变异系数、历年平均减产率和减产率风险概率作为评估指标,估算了在干旱气候条件下河北及京津地区历年冬小麦产量灾害损失的风险水平。刘荣花等(2006)构建了华北平原冬小麦干旱产量灾损风险评估模型,并对华北平原冬小麦进行了实际灾损风险区划。吴利红等(2007,2012)利用台风、暴雨洪涝、干旱、秋季低温等造成的晚稻产量平均减产率、变异系数构建了农业气象灾害综合风险指数。马树庆等(2008)建立了由冷害气候风险指标和玉米产量、面积比例等农业生产结构因素构成的玉米低温冷害的气候-灾损综合风险评估模式。陈家金等(2009)用歉年平均减产率、歉年减产率变异系数及相对气象产量低于-5%的保证率等3个风险指标表征粮食产量气象灾害风险程度。盛绍学等(2009)采用逐年的相对气象产量值,构建基于减产率的冬小麦渍害风险评估方法。谢佰承等(2009)采用受灾率、成灾率、降水变率、脆弱度、灾害损失率等指标,评估了湖南省洪涝灾害农业风险度。Xu等(2010,2011)根据极值理论,利用农业气象灾害受灾率、成灾率和绝收率,构建了农业灾害风险评估概率模型。张峭等(2011)根据农作物灾害风险的概率密度和累积分布函数,对全国及31个省份的农业自然灾害风险进行了评估。成林等(2012)采用拉格朗

日插值法,通过期望产量提取了花期连阴雨灾损率序列,最终形成了花期连阴雨灾害风险区划指数,对河南省夏玉米花期连阴雨进行了风险区划。李丽纯等(2013)选取歉年平均减产率、歉年减产率变异系数和减产率发生概率作为风险评估指标,采用等权重加权法构建了综合风险指数,对福建省马铃薯气候减产的风险进行了评估和区划。

3.4 灾害风险综合评估

仅对致灾因子或承灾体的单一评估不能反映农业气象灾害风险产生机制。因此,从灾害风险系统角度出发,以能够定量表达灾害风险形成过程中各要素之间相互作用的动力学机制为目的的农业气象灾害风险评估十分必要。在中国,根据农业气象灾害风险形成机理,利用合成法对影响灾害风险的各因子进行组合,建立灾害风险指数,对农业气象灾害风险进行综合评估成为目前农业气象灾害风险评估的主要趋势和发展方向,并取得了系列成果。多名学者(霍治国等,2003;马树庆等,2003;王素艳等,2003,2005;薛昌颖等,2003,2005;袁祝香等,2003;刘锦鑫等,2003;植石群等,2003;李世奎等,2004;王春乙等,2005;刘荣花等,2006)基于区域农业气象灾害的致灾强度、灾损、抗灾能力风险指数构建综合风险指数,进行区域主要农业气象灾害综合风险评估。Zhang(2004)用人类生存环境风险评估法,选取干旱灾害的时间、范围、强度频率、持续强度和受灾区域区域经济发展水平等指标,构建了玉米旱灾风险综合评估模型,评估了中国松辽平原玉米的旱灾风险;张继权等(2006,2007,2012a,2013)在总结相关研究成果的基础上,完善了灾害风险概念和形成机制,提出了基于形成机理的综合灾害风险形成理论,认为灾害风险是危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力4个因素相互综合作用的产物,并对农业干旱灾害风险进行了综合评估。陈红等(2010)、罗伯良等(2011)也采用同样方法,分别开展了玉米和小麦旱灾风险评估研究。何斌等(2010)、龙鑫等(2012)、单琨等(2012)、朱红蕊等(2013)、周寅康等(2012)考虑致灾因子危险性和承灾体脆弱性,分别构建了农业旱灾、水稻初霜冻害风险、农业生产自然灾害风险综合评估模型。王远皓等(2008)基于风险分析的原理,选择热量指数变异系数、不同强度冷害年出现的概率、减产率风险指数和抗灾性能4个风险评估指标,构建了综合风险评估指数。梁书民(2011)对中

国雨养农业区的旱灾发生程度和旱灾抗御潜力进行了综合评估。朱琳等(2002)从灾损率、易灾性、抗灾能力三方面构建了陕西省冬小麦干旱风险评价模型。吴东丽等(2011)综合考虑了影响灾害风险大小的自然属性和社会属性,基于冬小麦干旱指数的干旱频率、基于灾损的干旱频率、灾年减产率变异系数、区域农业经济发展水平、抗灾性能指数等6个风险评估指标,构建了华北地区冬小麦干旱风险综合评价模型。王明田等(2012)从干旱的孕灾、致灾、灾损角度出发,建立了玉米干旱的气候风险、致灾风险和灾损风险3个单项风险指数模型,并与社会抗灾能力相结合,建立了玉米干旱综合风险评估指数模型。陈家金等(2011,2012)考虑致灾因子危险性、承灾体脆弱性及抗灾、减灾能力分别构建了农业气象干旱灾害、极端气候条件下橄榄产量风险评估模型。顾万龙等(2012)综合考虑霜冻害日数和冬小麦实际种植面积比例因素,构建了冬小麦晚霜冻害风险评估指数。吴荣军等(2013)从致灾因子危险性、承灾体脆弱性及抗灾能力等方面构建了干旱灾害多指标综合风险评估模型。赵俊晔等(2013)构建了由致灾因子、孕灾环境因子和承灾体因子构成的作物自然灾害风险评估指标体系,计算了省级单元不同因子自然灾害影响指数和灾害风险综合评价指数,识别了玉米自然灾害风险区域。莫建飞等(2012)、唐为安等(2012)从致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性、防灾减灾能力4个方面分别构建了农业暴雨洪涝灾害、低温冷害风险综合评估模型。目前,农业气象灾害风险综合评估实例研究众多,在指标、方法等方面均有一定拓展(王远皓等,2008;任义方等,2011;高晓蓉,2012a,2012b,2012c;蔡菁菁等,2013;李帅等,2013a,2013b;刘玉英等,2013;赵俊晔等,2013)。

4 农业气象灾害风险评估的主要方法

4.1 基于指标的综合评估方法

以致灾因子危险性、承灾体脆弱性、灾情损失以及防灾、减灾能力等为评价对象,相应的构成要素为评估因子,分别构建研究区域的灾害风险评估指标体系,利用数学模型计算指标的权重后结合指标值计算研究区域的风险等级。基于指标的评估方法主要侧重于灾害风险指标的选取、优化以及权重的计算,典型的分析方法包括层次分析法、模糊综合评判

法、主成分分析法、专家打分法、历史比对法和德尔菲法等。如在干旱研究方面,陈晓艺等(2008)采用累积湿润指数作为干旱指标,从干旱强度和干旱频率两个方面对安徽省冬小麦主要发育期及全生育期的干旱危险性进行了评估。袭祝香等(2008, 2013)利用东北地区逐日平均气温、降水量资料构建了夏季干旱综合风险指数。高晓蓉等(2012a)利用作物系数法,计算了玉米不同生育阶段的需水量,以作物水分盈亏指数为评估指标,分析了近50年东北玉米不同生育阶段的旱涝分布及演变。在低温冷害研究方面,陆魁东等(2011)采用当量冷积温、低温持续天数及过程日照时数等低温强度要素,建立了低温和寒露风综合气象风险指数。Cheng等(2013)利用冷害的年均频率和强度,构建了湖南省双季稻冷害风险评估方法。薛晓萍等(2013)基于人工气候箱和大田试验观测结果,探讨了日光温室黄瓜生产低温冷害风险评估方法。李红英等(2013)对宁夏霜冻发生范围、频率、强度及致灾因子危险性特征进行了分析。高晓蓉等(2012b, 2012c)构建了基于热量指数的玉米生育阶段冷害指数,系统分析了近50年东北玉米不同生育阶段低温冷害时空分布及周期特征。在综合灾害研究方面,蔡冰等(2011)结合设施农业气象灾害指标对江苏省设施农业气象3种主要气象灾害(寡照灾害、低温灾害、高温灾害)进行风险等级区划。陆魁东等(2013)采用相关分析方法,建立了基于气象因子的湖南省油菜气象灾害综合风险指数。

4.2 基于数据的概率评估方法

以研究区域的历史灾害和灾损样本数据为基础,利用数学模型对样本数据进行统计分析获得灾害危险性与损失的统计规律,进而进行灾害的风险评估。典型的分析方法包括回归模型、时序模型、聚类分析、概率密度函数参数估计法或非参数估计法、信息扩散理论法等。其中风险概率评估法是最常用的方法。

选择灾害风险概率评估方法时,需要考虑所占有的资料序列,依据资料样本的多少可以把灾害风险概率评估方法分为资料完备型和资料不完备型两种。当拥有资料年代序列较长可以采用资料完备型风险评估方法,否则采用资料不完备型风险评估方法。

(1) 资料完备型的灾害风险概率评估法

对于具有长时间序列农业气象灾害事件和损失数据,可采用概率统计方法推求农业气象灾害致灾因子、损失的概率分布曲线,进行灾害风险定量估算,通常称为概率风险。Petak等(1982)曾依据美国各类自然灾害的统计分析,得到以概率形式表示的灾害风险。文中致灾因子危险性评估、灾情损失评估两部分内容中的研究个例多属于此类。

(2) 资料不完备型的灾害风险概率评估法

通常的概率风险分析方法需要样本足够多,当可获得的信息较少时,统计样本得到的估计参数和总体参数之间的误差会很大,因而无法反映总体的信息,分析结果将极不稳定,甚至与实际情况相差甚远,这就要求考虑采用其他手段来对小样本进行客观风险分析。黄崇福将模糊数学引入风险估算,并提出了可能性风险的定义。由于不完备信息是一类模糊信息,根据信息扩散原理,一定存在着一个适当的扩散函数,可以将传统的观测样本点集值化,以部分弥补资料不足的缺陷,达到提高风险估计精度的目的(Huang, et al, 2002)。由于自然灾害系统是由孕灾环境、致灾因子和承灾体共同构成的复杂系统,存在着大量的不确定性和模糊性。应用模糊信息优化处理技术,黄崇福(2005, 2012)、黄崇福等(2010)全面研究了孕灾环境、致灾因子、承灾体及历史灾情中不完备信息的种类、特点和模糊特性,提出了自然灾害模糊风险的概念,对其特性和计算方法进行了初步的研究,进一步完善了信息扩散原理,在其基础上建立了不完备信息条件下进行自然灾害风险评估的理论体系,并分别以城市地震灾害风险、湖南省农业自然灾害风险评估为例,对复杂的自然灾害风险系统和简单历史灾情统计风险系统进行了研究,给出了不完备信息条件下进行风险评估的计算方法。目前,在模糊信息处理中最常用模型是基于正态扩散函数的正态扩散模型(Huang, et al, 2002)。信息扩散理论已被广泛用于农业气象灾害风险评估中(姜伟平等, 2009; 于飞等, 2009; 张丽娟等, 2009; 张星等, 2009; 刘亚彬等, 2010; 王军等, 2011; Zhao, et al, 2012),如基于信息扩散的农业干旱灾害风险评估(龚宇等, 2008; 常文娟等, 2009; 陈家金等, 2010; 曹永强等, 2011; Chen, et al, 2011; Zhang D, et al, 2011; Hao, et al, 2012; 张竟竟, 2012; 秦越等, 2013; Wu, et al, 2013)、基于信息扩散的农业洪涝灾害风险评估(Jiang, et al, 2009,

Chen, et al,2010;庞西磊等,2012;王加义等,2012; Zou, et al,2013)、基于信息扩散的农业低温冷害和霜冻风险评估(李文亮等,2009;林晶等,2011;蔡大鑫等,2013)以及基于信息扩散的农业高温热害风险评估等。

4.3 基于情景模拟的评估方法

农业气象灾害风险情景模拟评估法,也称为农业气象灾害风险动态评估法。通过与RS/GIS和数值模式等复杂系统仿真建模手段相结合,模拟人类活动干扰下未来可能发生的灾害过程,形成对灾害风险的可视化表达,实现灾害风险的动态评估,是当前农业气象灾害风险评估研究的主流方向。在情景模拟方法方面,一类研究是通过描述作物的动态生长过程,从而建立起灾害风险情景下作物的生长模型,对气象灾害风险进行动态评估。如马树庆等(2003)应用改进后的玉米生长发育和干物质积累动态模型,采用新的玉米低温冷害指标和参数,建立了玉米低温冷害风险评估模型。王翠玲等(2011)、Zhang J Q等(2011)选取影响玉米不同生长阶段的干旱灾害风险指标,建立了基于玉米不同生长阶段的干旱灾害动态风险评估体系和模型。Wu等(2004a,2004b)借助多变量分析技术,采用SPI和CSDI指标,建立了玉米和大豆不同生长阶段的干旱风险实时、动态评估方法。张琪等(2011)采用SPI指数、判别式分析法和滑动直线平均法,建立了一种动态评估与预测玉米不同生育阶段干旱灾害风险的新方法。高晓蓉等(2012a,2012b,2012c)利用自然灾害风险指数法构建东北玉米发育阶段及整个生育期主要气象灾害风险动态评估模型。蔡菁菁等(2013)以玉米出苗—抽雄、抽雄—成熟两个生长阶段里发生的干旱及冷害为研究对象,对东北地区玉米干旱、冷害风险进行了动态评估。Liu等(2012)建立了基于多维干旱指标的不同生长阶段的春小麦干旱风险评估模型。林晓梅等(2009)根据作物生长发育的阶段原理,统计得到冬小麦各个生育阶段不同灾害等级的年霜冻日数,并计算出冬小麦全生育期内不同等级霜冻的发生概率,基于以上两项指标对冬小麦霜冻致灾因子危险度做出了评估。杨再强等(2013)构建了基于实数编码的加速遗传算法和投影寻踪的日光温室气象灾害风险评估模型,并对北方地区日光温室主要生产月气象灾害风险进行了逐月评估。陈晓艺等(2008)以累积湿润指数为干旱

指标,利用干旱强度和频率评估安徽省冬小麦主要发育期及整个生育期的干旱危险性。贺楠(2009)建立了基于旬尺度旱涝对最终产量灾损的贡献系数,构建了农业旱涝风险动态评估模型,初步实现了小麦、玉米旱涝风险的动态评估。

另一类研究是利用作物模型,对作物的生长过程进行模拟,通过作物模型参数的设定,从而评估农业气象灾害风险。如孙宁等(2005)利用APSIM-Wheat模型的模拟结果评估了北京地区干旱造成的冬小麦产量风险。王春乙等(2010)、张雪芬等(2012)则通过引入WOFOST模型,对东北地区玉米低温冷害,以及黄淮区域晚霜冻进行风险评估。基于物理过程的侵蚀-生产力影响评估模型(EPIC)也被一些学者用于模拟典型作物的生长过程,如贾慧聪等(2011)引入采用作物模型模拟和数字制图等技术,分别从全生育期和分生育期角度,对黄淮海地区夏播玉米区玉米旱灾风险的时空分布进行了定量评估,王志强等(2012)模拟了1966—2005年中国典型小麦生长过程,构建了基于水分胁迫的小麦干旱致灾强度指数,对中国小麦干旱致灾强度和风险的时空分布规律进行了定量评估分析。潘卫华等(2012)提出了基于遥感的农作物地表低温风险评估法。

5 存在的问题与展望

5.1 存在的问题

目前农业气象灾害风险评估的基础理论和应用方法研究仍相当薄弱。在农业气象灾害风险评估标准的规范性、风险评估模型的实用性和可操作性、基于全生育期的单灾种风险、多灾种综合风险动态评估技术方法等研究有待进一步突破。在农业气象灾害风险评估的概念内涵、针对性、过程分析方面有待进一步加强。在承灾体、灾种数量方面还有待进一步拓展。

(1)农业气象灾害风险评估的基础理论和应用方法研究仍相当薄弱。农业生产是自然再生产和经济再生产交织的过程,农业气象灾害风险具有自然属性和社会经济属性,其中自然属性居于主导地位,社会经济属性对灾害风险有增减作用,不同种类的农业气象灾害风险的自然属性、社会经济属性存在一定的差异。目前,在基础理论研究方面,针对不同农业气象灾害风险的自然属性、社会经济属性的构

成要素厘定、要素之间的内部联系、演变过程、不同要素的变异程度及对评估对象风险作用程度等有关灾害风险形成机制、成险机理等的基础理论问题,仍缺乏统一认知和深入研究。表现为关注农业气象灾害风险自然属性的研究较多,社会属性的研究较少;风险识别研究较多,风险形成机制研究甚少。在应用方法研究方面,不同灾害风险评估指标的选择及其代表性,尤其是有关社会经济属性指标,不同评估指标影响权重的确定等,仍缺乏科学与量化的方法,人为因素明显。表现为对同一农业气象灾害,不同学者选择的指标、确定的指标影响权重等不同,评估结果难以进行比较。

(2)农业气象灾害风险评估标准缺乏规范统一。随着农业气象灾害风险评估研究与应用的快速发展,气象、农业、水利等涉农部门根据各自的需要,分别开展了灾害风险评估的指标体系和技术方法研究,但由于不同研究者对灾害风险的自然属性和社会经济属性的理解及侧重点不同,在不同属性因子、指标因子选择及其权重分配、评估模型构建以及等级划分等方面差异性明显。迄今,在农业气象灾害评估指标体系、评估方法、风险表征等方面尚未形成具有可比性的规范标准。

(3)基于全生育期的单灾种风险、多灾种综合风险动态评估技术方法等研究有待进一步突破。目前,农业气象灾害风险评估大多以单一灾种对单一承灾体的影响为研究对象,多数研究为静态的、灾后的评估,仅少数研究针对作物全生育期或关键期,利用数理统计、作物模拟模型等方法,开展了单灾种风险、多灾种综合风险动态评估。其中基于全生育期的单灾种、多灾种灾害的致灾因子危险性及其可能损失的时空量化难度大,数理统计方法解释性较差、评估效果不稳定,作物模拟模型方法在由单点和田间尺度升至区域尺度评估应用时误差较大等问题;是制约基于全生育期的单灾种风险、多灾种综合风险动态评估的主要技术瓶颈,有待于进一步发展和突破。

(4)农业气象灾害风险评估的概念内涵、针对性、过程分析有待加强。目前,一些研究中存在着灾害风险评估的概念内涵不清、针对性不足、过程分析缺乏等问题。①评估的概念内涵不清。如将气象灾害风险评估等同为农业气象灾害风险评估,缺乏具体评估的农业承灾体;将灾害实际发生频率等同为

风险概率,而实际发生频率随着资料序列的延长将会随时间变化,无法真正反映灾害的真实风险状况。

②评估因子选择针对性不足。在致灾因子选择方面。将气象灾害致灾因子和指标等同于农业气象灾害致灾因子和指标,如采用表征气象干旱、洪涝因子指标进行农业干旱、洪涝风险评估。在脆弱性或易损性因子选择方面,所选因子针对性不足问题凸出,如采用机耕面积比、绿化覆盖率等评估农业旱灾的脆弱性。在防灾、减灾能力因子选择方面,所选因子针对性不足问题更为凸出,部分所选因子与防灾、减灾能力缺乏实质性关联,如农村人口受教育程度、适龄儿童入学率等,实际上农村受教育程度高的人群外出务工比例很高,无法真正为提升农业气象防灾、减灾能力提供帮助。③评估过程分析缺乏。一些研究,尤其是综合风险研究缺乏灾害风险形成的过程分析,仅给出致灾因子、承灾体脆弱性或易损性、防灾减灾能力等因子的罗列和计算公式,最后给出一个评估结果或结果图,缺乏实际情况的验证检验,难以评估结果的可信性。

5.2 研究展望

农业气象灾害风险评估作为农业气象灾害学的一个新兴分支学科,是全面认识和科学评价农业自然灾害风险与社会经济发展相互作用的必然产物。未来随着农业可持续发展、农业防灾减灾的迫切需求,农业气象灾害风险评估的基础理论和技术方法、灾害风险动态评估技术、多灾种综合风险评估技术、气候变化背景下灾害风险变化评估研究等将会得到加强,农业气象灾害风险评估技术将向精细化、动态化方向发展。基于3S技术的农业气象灾害风险动态评估、多灾种综合风险评估技术将成为未来研究发展及其业务应用的重点。

(1)农业气象灾害风险评估的基础理论和技术方法研究

未来随着自然灾害风险分析、风险评估基础理论与技术方法的发展和深化,相关的基础理论与技术方法将不断被引入到农业气象灾害风险评估研究中;同时,农业气象灾害风险评估研究也将在持续吸收农业气象灾害学的最新研究成果的基础上,不断得到丰富和拓展。预计农业气象灾害风险属性要素的科学构成与量化评估、成险过程因子演替及其相互作用等将成为基础研究的重点;作物模拟模型、数值模式、数学仿真技术以及数理统计新技术、新方法

等的引入、融合和创新,将成为灾害风险评估技术方法发展的重点;在灾害风险形成机制、致险机理等基础理论研究、风险量化、评估模型构建等技术方法研究方面将取得重要突破。

(2) 农业气象灾害风险动态评估技术研究

农业气象灾害风险动态评估是农业气象灾害风险研究的主要发展方向,对实时有针对性的开展防灾、减灾意义重大。研究发展重点为动态评估指标、模型构建,其中与指标、模型相关的自然属性和社会属性影响的综合集成研究将得到加强。动态评估指标研究,将在灾害风险属性要素的科学构成、要素厘定与量化评估、成险过程因子演替及其相互作用等研究基础上,向覆盖农业生产全过程的方向发展,建立基于灾种-承灾体的实时动态指标体系。动态评估模型构建研究,将向多模型多方法集成应用方向发展,其中“3S”技术与作物生长模型模拟技术的耦合应用将成为未来发展的重点。未来随着“3S”技术的发展和实验室条件的改善,基于天基、地基、实验室模拟和数值模拟等多元数据日益丰富和精细,农业气象灾害风险评价的精细化程度将会得到显著加强。

(3) 多灾种农业气象灾害综合风险评估技术研究

多灾种农业气象灾害综合风险评估是开展农业气象灾害综合风险管理的基础和综合防灾减灾的必要条件,也是当前国际社会高度关注的热点、难点问题之一。某一农业生产对象(承灾体)在其生产全过程中,往往会有一种或多种农业气象灾害发生,目前针对单灾种的农业气象灾害风险评估研究较为常见且取得了不少成果,如农业干旱、洪涝、低温灾害评估等;但针对多灾种的农业气象灾害风险评估研究成果甚少,究其原因主要是发生于不同时段的多灾种组合中的单致灾因子对多致灾因子综合危险性、综合(最终)灾害损失的影响效应与贡献系数量化及其综合集成量化等关键技术尚未得到有效解决。上述关键技术的研发与突破,将成为未来多灾种农业气象灾害综合风险评估研究的重点。

(4) 气候变化背景下农业气象灾害风险变化评估研究

以变暖为主要特征的全球气候变化已对农业气象灾害的发生与灾变规律产生了显著影响,就农业气象灾害风险而言,气候变暖不仅影响农业气象灾

害致灾因子变化以及灾害形成的各个环节,而且还影响形成农业气象灾害风险的孕灾环境、致灾因子、承灾体和防灾、减灾能力等多个因素;使农业气象灾害风险影响因素变得更加复杂多样。应对气候变化背景下农业气象灾害风险的变化已成为灾害风险管理的新特征和新挑战。因此,揭示气候变化背景下农业气象灾害风险的时空新变化及其规律性,开展灾害风险变化评估研究将成为未来的热点。

参考文献

- 蔡冰,刘寿东,费玉娟等. 2011. 江苏省设施农业气象灾害风险等级区划. 中国农学通报, 27(20): 285-291. Cai B, Liu S D, Fei Y J. 2011. The risk grading regionalization of meteorological disaster of facilities agriculture in Jiangsu province. Chinese Agricultural Sci Bull, 27(20): 285-291(in Chinese)
- 蔡大鑫,张京红,刘少军. 2013. 海南荔枝产量的寒害风险分析与区划. 中国农业气象, 34(5): 595-601. Cai D X, Zhang J H, Liu S J. 2013. Analysis and division for cold damage to litchi yield in Hainan. Chinese J Agrometeorology, 34(5): 595-601 (in Chinese)
- 蔡菁菁,王春乙,张继权. 2013. 东北地区玉米不同生长阶段干旱冷害危险性评价. 气象学报, 71(5): 976-986. Cai J J, Wang C Y, Zhang J Q. 2013. Hazard assessment of drought disaster and chilling damage of various growth stages of maize in north-east China. Acta Meteor Sinica, 71(5): 976-986(in Chinese)
- 曹永强,李香云,马静等. 2011. 基于可变模糊算法的大连市农业干旱风险评价. 资源科学, 33(5): 983-988. Cao Y Q, Li X Y, Ma J, et al. 2011. Agricultural drought risk evaluation in Dalian based on the variable fuzzy method. Resources Sci, 33(5): 983-988(in Chinese)
- 常文娟,梁忠民. 2009. 信息扩散理论在农业旱灾风险率分析中的应用. 水电能源科学, 27(6): 185-187. Chang W J, Liang Z M. 2009. Application of information diffusion theory in agricultural drought disaster risk rate analysis. Water Resources and Power, 27(6): 185-187(in Chinese)
- 陈红,张丽娟,李文亮等. 2010. 黑龙江省农业干旱灾害风险评估与区划研究. 中国农学通报, 26(3): 245-248. Chen H, Zhang W J, Li W L, et al. 2010. Study on risk assessment and zoning of agricultural arid disaster in Heilongjiang province. Chinese Agricultural Sci Bull, 26(3): 245-248 (in Chinese)
- 陈怀亮,邓伟,张雪芬等. 2006. 河南小麦生产农业气象灾害风险分析及区划. 自然灾害学报, 15(1): 135-143. Chen H L, Deng W, Zhang X F, et al. 2006. Analysis and zoning of agrometeorological risk for wheat growing in Henan province. J Natural Disasters, 15(1): 135-143(in Chinese)
- 陈家金,张春桂,王加义等. 2009. 福建省粮食产量气象灾害风险评估. 中国农学通报, 25(10): 277-281. Chen J J, Zhang C G, Wang J Y, et al. 2009. Risk evaluation of meteorological disas-

- ter on grain yield in Fujian province. *Chinese Agricultural Sci Bull*, 25(10): 277-281(in Chinese)
- 陈家金, 王加义, 林晶等. 2010. 基于信息扩散理论的东南沿海三省农业干旱风险评估. *干旱地区农业研究*, 28(6): 248-252.
- Chen J J, Wang J Y, Lin J, et al. 2010. Risk assessment of agricultural drought in three provinces of southeastern coast of China based on information diffusion theory. *Agricultural Res Arid Areas*, 28(6): 248-252(in Chinese)
- 陈家金, 王加义, 李丽纯等. 2011. 极端气候对福建省橄榄产量影响的风险评估. *中国农业气象*, 32(4): 632-637. Chen J J, Wang J Y, Li L C, et al. 2011. Risk assessment of extreme climate on olive yield in Fujian province. *Chinese J Agrometeorology*, 32(4): 632-637(in Chinese)
- 陈家金, 王加义, 李丽纯等. 2012. 影响福建省龙眼产量的多灾种综合风险评估. *应用生态学报*, 23(3): 819-826. Chen J J, Wang J Y, Li L C, et al. 2012. Integrated risk evaluation of multiple disasters affecting longyan yield in Fujian province, East China. *Chinese J Applied Ecology*, 23(3): 819-826(in Chinese)
- 陈香. 2008. 福建省农业水灾脆弱性评价及减灾对策. *中国生态农业学报*, 16(1): 206-211. Chen X. 2008. Vulnerability assessment of agricultural flood and mitigation countermeasures in Fujian Province. *Chinese J Eco-Agriculture*, 16(1): 206-211(in Chinese)
- 陈晓艺, 马晓群, 孙秀邦. 2008. 安徽省冬小麦发育期农业干旱发生风险分析. *中国农业气象*, 29(4): 472-476. Chen X Y, Ma X Q, Sun X B. 2008. Risk analysis of agricultural drought for winter wheat during growing period in Anhui province. *Chinese J Agrometeorology*, 29(4): 472-476(in Chinese)
- 成林, 刘荣花. 2012. 河南省夏玉米花期连阴雨灾害风险区划. *生态学杂志*, 31(12): 3075-3079. Cheng L, Liu R H. 2012. Disaster risk zoning of continuous rain during florescence of summer maize in Henan Province, Central China. *Chinese J Ecology*, 31(12): 3075-3079(in Chinese)
- 单琨, 刘布春, 刘园等. 2012. 基于自然灾害系统理论的辽宁省玉米干旱风险分析. *农业工程学报*, 28(8): 186-194. Shan K, Liu B C, Liu Y, et al. 2012. Analysis on drought risk of maize based on natural disaster system theory in Liaoning province. *Transactions Chinese Society Agricultural Engineering*, 28(8): 186-194(in Chinese)
- 邓国, 王昂生, 李世奎等. 2001. 风险分析理论及方法在粮食生产中的应用初探. *自然资源学报*, 16(3): 221-226. Deng G, Wang A S, Li S K, et al. 2001. Risk theory and method and its initial application in grain yield. *J Natural Resources*, 16(3): 221-226(in Chinese)
- 杜鹏, 李世奎, 温福光等. 1995. 珠江三角洲主要热带果树农业气象灾害风险分析. *应用气象学报*, 6(增刊): 27-32. Du P, Li S K, Wen F G, et al. 1995. Agro-meteorological hazard risk analysis of four fruit trees in Zhujiang Delta in South China. *J Appl Meteor Sci*, 6(Suppl): 27-32(in Chinese)
- 杜鹏, 李世奎. 1997. 农业气象灾害风险评价模型及应用. *气象学报*, 55(1): 95-102. Du P, Li S K. 1997. An agro-meteorological disaster risk analysis model and its application. *Acta Meteorologica Sinica*, 55(1): 95-102(in Chinese)
- 杜鹏, 李世奎. 1998. 农业气象灾害风险分析初探. *地理学报*, 53(3): 202-208. Du P, Li S K. 1998. A primary study on the risk analysis of agro-meteorological hazards. *Acta Geographica Sinica*, 53(3): 202-208(in Chinese)
- 杜晓燕, 黄岁樑. 2010. 天津地区农业旱灾脆弱性综合评价及区划研究. *自然灾害学报*, 19(5): 138-145. Du X Y, Huang S L. 2010. Comprehensive assessment and zoning of vulnerability to agricultural drought in Tianjin. *J Natural Disasters*, 19(5): 138-145(in Chinese)
- 杜尧东, 毛慧勤, 刘锦奎. 2003. 华南地区寒害概率分布模型研究. *自然灾害学报*, 12(2): 103-107. Du Y D, Mao H Q, Liu J L. 2003. Study on probability distribution models of cold damage in South China. *J Natural Disasters*, 12(2): 103-107(in Chinese)
- 杜尧东, 李春梅, 唐力生等. 2008. 广东地区冬季寒害风险辨识. *自然灾害学报*, 17(5): 82-86. Du Y D, Li C M, Tang L S, et al. 2008. Risk identification of winter's cold damage in Guangdong Province. *J Natural Disasters*, 17(5): 82-86(in Chinese)
- 高静, 侯双双, 姜会飞等. 2010. 湖北省棉花洪涝灾害风险分析. *中国农业大学学报*, 16(3): 60-66. Gao J, Hou S S, Jiang H F, et al. 2010. Flood risk analysis in cotton for Hubei province. *J China Agricultural University*, 16(3): 60-66(in Chinese)
- 高晓蓉, 王春乙, 张继权等. 2012a. 近 50 年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化. *农业工程学报*, 28(12): 101-109. Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q, et al. 2012a. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years. *Transactions Chinese Society Agricultural Engineering*, 28(12): 101-109(in Chinese)
- 高晓蓉, 王春乙, 张继权. 2012b. 东北玉米低温冷害时空分布与多时间尺度变化规律分析. *灾害学*, 27(4): 65-70. Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q. 2012b. Spatial-temporal distribution and multiple-temporal scale variation laws of chilling damage of maize in northeast China. *J Catastrophology*, 27(4): 65-70(in Chinese)
- 高晓蓉, 王春乙, 张继权. 2012c. 气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响. *生态学报*, 32(7): 2110-2118. Gao X R, Wang C Y, Zhang J Q. 2012c. The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 32(7): 2110-2118(in Chinese)
- 龚宇, 花家嘉, 陈昱等. 2008. 唐山地区种植业干旱灾害特征及模糊风险评估. *中国农学通报*, 24(8): 435-438. Gong Y, Hua J J, Chen Y, et al. 2008. The characteristic of planting drought disaster and assessment of risk in Tangshan area. *Chinese Agricultural Sci Bull*, 24(8): 435-438(in Chinese)
- 顾万龙, 姬兴杰, 朱业玉. 2012. 河南省冬小麦晚霜冻害风险区划.

- 灾害学, 27(3): 39-44. Gu W L, Ji X J, Zhu Y Y. 2012. Risk regionalization of winter wheat late freezing injury in Henan province. *J Catastrophology*, 27(3): 39-44(in Chinese)
- 何斌, 武建军, 吕爱锋. 2010. 农业干旱风险研究进展. *地理科学进展*, 29(5): 557-564. He B, Wu J J, Lv A F. 2010. New advances in agricultural drought risk study. *Progress Geography*, 29(5): 557-564(in Chinese)
- 贺楠. 2009. 安徽省农业旱涝灾害风险分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 81pp. He N. 2009. Risk analysis of droughts and floods disasters for agriculture in Anhui province[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 81pp (in Chinese)
- 侯双双, 姜会飞, 廖树华等. 2010. 利用风险预测方法甄选农业气象灾害指标初探. *中国农业气象*, 31(3): 462-466. Hou S S, Jiang H F, Liao S H, et al. 2010. Agro-meteorology disaster index selection based on risk prediction method. *Chinese J Agrometeorology*, 31(3): 462-466(in Chinese)
- 黄崇福. 2005. 自然灾害风险评估: 理论与实践. 北京: 科学出版社, 122-134. Huang C F. 2005. Risk Assessment of Natural Disaster: Theory & Practice. Beijing: Science Press, 122-134 (in Chinese)
- 黄崇福, 刘安林, 王野. 2010. 灾害风险基本定义的探讨. *自然灾害学报*, 19(6): 8-16. Huang C F, Liu A L, Wang Y. 2010. A discussion on basic definition of disaster risk. *J Natural Disaster*, 19(6): 8-16(in Chinese)
- 黄崇福. 2012. 自然灾害风险分析与管理. 北京: 科学出版社, 405pp. Huang C F. 2012. Risk Analysis and Management of Natural Disasters. Beijing: Science Press, 405pp (in Chinese)
- 霍治国, 李世奎, 王素艳等. 2003. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究. *自然资源学报*, 18(6): 692-703. Huo Z G, Li S K, Wang S Y, et al. 2003. Study on the risk evaluation technologies of main agrometeorological disasters and their application. *J Natural Resources*, 18(6): 692-703(in Chinese)
- 贾慧聪, 王静爱, 潘东华等. 2011. 基于 EPIC 模型的黄淮海夏玉米旱灾风险评价. *地理学报*, 66(5): 543-652. Jia H C, Wang J A, Pan D H, et al. 2011. Maize drought disaster risk assessment based on EPIC model: A case study of maize region in Northern China. *Acta Geographica Sinica*, 66(5): 543-652(in Chinese)
- 李红英, 张晓煜, 曹宁等. 2013. 宁夏霜冻致灾因子指标特征及危险性分析. *中国农业气象*, 34(4): 474-479. Li H Y, Zhang X Y, Cao N, et al. 2013. Analysis on frost index and hazard risk in Ningxia. *Chinese J Agrometeorology*, 34(4): 474-479 (in Chinese)
- 李丽纯, 陈家金, 陈惠等. 2013. 福建省马铃薯气候减产的风险分析和区划. *中国农业气象*, 34(2): 186-190. Li L C, Chen J J, Chen H, et al. 2013. Risk analysis and division for potato climatic reduction in Fujian province. *Chinese J Agrometeorology*, 34(2): 186-190(in Chinese)
- 李娜, 霍治国, 贺楠等. 2010. 华南地区香蕉、荔枝寒害的气候风险区划. *应用生态学报*, 21(5): 1244-1251. Li N, Huo Z G, He N, et al. 2010. Climatic risk zoning for banana and litchi's chilling injury in South China. *Chinese J Appl Ecology*, 21(5): 1244-1251(in Chinese)
- 李世奎, 霍治国, 王道龙等. 1999. 中国农业灾害风险评估与对策. 北京: 气象出版社, 1-221, 271-275. Li S K, Huo Z G, Wang D L, et al. 1999. Risk Assessment and Strategies of Agricultural Disaster in China. Beijing: China Meteorological Press, 1-221, 271-275(in Chinese)
- 李世奎, 霍治国, 王素艳等. 2004. 农业气象灾害风险评估体系及模型研究. *自然灾害学报*, 13(1): 77-87. Li S K, Huo Z G, Wang S Y, et al. 2004. Risk evaluation system and models of agrometeorological disasters. *J Natural Disasters*, 13(1): 77-87 (in Chinese)
- 李帅, 陈莉, 王晾晾等. 2013a. 1980 年以来黑龙江省玉米低温冷害风险变化研究. *灾害学*, 8(4): 100-103. Li S, Chen L, Wang L L, et al. 2013a. Change of risk of chilling damage to maize in Heilongjiang province since 1980. *J Catastrophology*, 8(4): 100-103(in Chinese)
- 李帅, 王晾晾, 陈莉等. 2013b. 黑龙江省玉米低温冷害风险综合评估模型研究. *自然资源学报*, 28(4): 635-645. Li S, Wang L L, Chen L, et al. 2013b. The comprehensive risk evaluation model of chilling injury to maize in Heilongjiang province. *J Natural Resources*, 28(4): 635-645(in Chinese)
- 李文亮, 张冬有, 张丽娟. 2009. 黑龙江省气象灾害风险评估与区划. *干旱区地理*, 32(5): 754-760. Li W L, Zhang D Y, Zhang L J. 2009. Risk assessment and zoning of meteorological disaster in Heilongjiang Province. *Arid Land Geography*, 32(5): 754-760(in Chinese)
- 梁书民. 2011. 中国雨养农业区旱灾风险综合评价研究. *干旱区资源与环境*, 25(7): 39-44. Liang S M. 2011. Comprehensive evaluation on the drought risk of rain-fed agriculture in China based on GIS. *J Arid Land Resources Environ*, 25(7): 39-44(in Chinese)
- 林晶, 陈家金, 王加义等. 2011. 基于信息扩散理论的福建省农作物霜冻灾害风险评估. *中国农业气象*, 32(Supp1): 188-191. Lin J, Chen J J, Wang J Y, et al. 2011. Frost disaster risk assessment of crop in Fujian province based on information diffusion theory. *Chinese J Agrometeorology*, 32(Supp1): 188-191 (in Chinese)
- 林晓梅, 岳耀杰, 苏筠. 2009. 我国冬小麦霜冻灾害致灾因子危险度评价: 基于作物生育阶段气象指标. *灾害学*, 24(4): 45-50. Lin X M, Yue Y J, Su Y. 2009. Frost hazard risk assessment of winter wheat: Based on the meteorological indicator at different growing stages. *J Catastrophology*, 24(4): 45-50(in Chinese)
- 刘锦奎, 杜尧东, 毛慧琴. 2003. 华南地区荔枝寒害风险分析与区划. *自然灾害学报*, 12(3): 126-130. Liu J L, Du Y D, Mao H Q. 2003. Risk analysis and zonation of cold damage to litchi in South China. *J Natural Disasters*, 12(3): 126-130(in Chinese)
- 刘兰芳, 刘盛和, 刘沛林等. 2002. 湖南省农业旱灾脆弱性综合分

- 析与定量评价. 自然灾害学报, 11(4): 78-83. Liu L F, Liu S H, Liu P L, et al. 2002. Synthetic analysis and quantitative estimation of the agricultural vulnerability to drought disaster in Hunan Province. *J Natural Disasters*, 11(4): 78-83 (in Chinese)
- 刘荣花, 朱自玺, 方文松等. 2006. 华北平原冬小麦干旱灾损风险区划. 生态学杂志, 25(9): 1068-1072. Liu R H, Zhu Z X, Fang W S, et al. 2006. Risk regionalization of yield loss caused by drought for winter wheat in North China plain. *Chinese J Ecology*, 25(9): 1068-1072 (in Chinese)
- 刘荣花, 王友贺, 朱自玺等. 2007. 河南省冬小麦气候干旱风险评估. 干旱地区农业研究, 25(6): 1-4. Liu R H, Wang Y H, Zhu Z X, et al. 2007. Risk assessment of climatic drought for winter wheat in Henan. *Agricultural Res Arid Areas*, 25(6): 1-4 (in Chinese)
- 刘亚彬, 刘黎明, 许迪等. 2010. 基于信息扩散理论的中国粮食主产区水旱灾害风险评估. 农业工程学报, 26(8): 1-7. Liu Y B, Liu L M, Xu D, et al. 2010. Risk assessment of flood and drought in major grain-producing areas based on information diffusion theory. *Transactions Chinese Society Agricultural Engineering*, 26(8): 1-7 (in Chinese)
- 刘玉英, 石大明, 胡铁鑫等. 2013. 吉林省农业气象干旱灾害的风险分析及区划. 生态学杂志, 32(6): 1518-1524. Liu Y Y, Shi D M, Hu Y X, et al. 2013. Risk analysis and regionalization of agrometeorological drought hazard in Jilin Province of Northeast China. *Chinese J Ecology*, 32(6): 1518-1524 (in Chinese)
- 龙鑫, 甄霖, 邸苏闯. 2012. 泾河流域农业旱灾风险综合评估研究. 资源科学, 34(11): 2197-2205. Long X, Zhen L, Di S C. 2012. Quantitative risk assessment of agricultural drought in the Jinghe watershed of Western China. *Resources Sci*, 34(11): 2197-2205 (in Chinese)
- 娄伟平, 吴利红, 邱新法等. 2009. 柑桔农业气象灾害风险评估及农业保险产品的设计. 自然资源学报, 24(6): 1030-1040. Lou W P, Wu L H, Qiu X F, et al. 2009. Risk assessment and agricultural insurance design of agrometeorological disasters risk for citrus. *J Natural Resources*, 24(6): 1030-1040 (in Chinese)
- 陆魁东, 罗伯良, 黄晚华等. 2011. 影响湖南早稻生产的五月低温的风险评估. 中国农业气象, 32(2): 283-289. Lu K D, Luo B L, Huang W H, et al. 2011. Risk evaluation of the effects of chilling in May on early rice production in Hunan province. *Chinese J Agrometeorology*, 32(2): 283-289 (in Chinese)
- 陆魁东, 彭莉莉, 黄晚华等. 2013. 气候变化背景下湖南油菜气象灾害风险评估. 中国农业气象, 34(2): 191-196. Lu K D, Peng L L, Huang W H, et al. 2013. Meteorological disaster risk assessment of oilseed rape under climate change conditions. *Chinese J Agrometeorology*, 34(2): 191-196 (in Chinese)
- 罗伯良, 黄晚华, 帅细强等. 2011. 湖南省水稻生产干旱灾害风险区划. 中国农业气象, 32(3): 461-465. Luo B L, Huang W H, Shuai X Q, et al. 2011. Risk division of drought disaster for rice production in Hunan province. *Chinese J Agrometeorology*, 32(3): 461-465 (in Chinese)
- 马树庆, 袭祝香, 王琪. 2003. 中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究. 自然灾害学报, 12(3): 137-141. Ma S Q, Xi Z X, Wang Q. 2003. Risk evaluation of cold damage to corn in Northeast China. *J Natural Disasters*, 12(3): 137-141 (in Chinese)
- 马树庆, 王琪, 王春乙等. 2008. 东北地区玉米低温冷害气候和经济损失风险分区. 地理研究, 27(5): 1169-1177. Ma S Q, Wang Q, Wang C Y, et al. 2008. The risk division on climate and economic loss of chilling damage in Northeast China. *Geographical Res*, 27(5): 1169-1177 (in Chinese)
- 莫建飞, 陆甲, 李艳兰等. 2012. 基于 GIS 的广西农业暴雨洪涝灾害风险评估. 灾害学, 27(1): 39-43. Mo J F, Lu J, Li Y L, et al. 2012. GIS-based assessment of agricultural flood and waterlogging risk in Guangxi. *J Catastrophology*, 27(1): 39-43 (in Chinese)
- 倪深海, 顾颖, 王会容. 2005. 中国农业干旱脆弱性分区研究. 水科学进展, 16(5): 705-709. Ni S H, Gu Y, Wang H R. 2005. Study on fragility zoning of agricultural drought in China. *Adv Water Sci*, 16(5): 705-709 (in Chinese)
- 潘卫华, 陈惠, 张春桂等. 2012. 基于 MODIS 数据的福建省农作物低温监测分析与风险评估. 中国农业气象, 33(2): 259-264. Pan W H, Chen H, Zhang C G, et al. 2012. Low temperature monitoring and risk assessment of crops in Fujian province based on MODIS data. *Chinese J Agrometeorology*, 33(2): 259-264 (in Chinese)
- 庞西磊, 黄崇福, 艾福利. 2012. 基于信息扩散理论的东北三省农业洪灾风险评估. 中国农学通报, 28(8): 271-275. Pang X L, Huang C F, Ai F L. 2012. Risk assessment on agricultural flood of Northeast China based on information diffusion theory. *Chinese Agricultural Sci Bull*, 28(8): 271-275 (in Chinese)
- 秦越, 徐翔宇, 许凯等. 2013. 农业干旱灾害风险模糊评价体系及其应用. 农业工程学报, 29(10): 83-91. Qin Y, Xu X Y, Xu K, et al. 2013. Fuzzy evaluation system of agriculture drought disaster risk and its application. *Transactions Chinese Society Agricultural Engineering*, 29(10): 83-91 (in Chinese)
- 任义方, 赵艳霞, 王春乙. 2011. 河南省冬小麦干旱保险风险评估与区划. 应用气象学报, 22(5): 537-548. Ren Y F, Zhao Y X, Wang C Y. 2011. Winter wheat drought disaster insurance risk assessment and regionalization in Henan province. *J Appl Meteor Sci*, 22(5): 537-548 (in Chinese)
- 商彦蕊. 2000. 干旱、农业旱灾与农户旱灾脆弱性分析——以邢台县典型农户为例. 自然灾害学报, 9(2): 55-61. Shang Y R. 2000. The analysis of drought, agricultural drought disaster and the farmhouses' vulnerability: Taking the typical farmhouses of Xingtai County as an example. *J Natural Disasters*, 9(2): 55-61 (in Chinese)
- 盛绍学, 石磊, 张玉龙. 2009. 江淮地区冬小麦渍害指标与风险评估模型研究. 中国农学通报, 25(19): 263-268. Sheng S X, Shi L, Zhang Y L. 2009. Study on waterlogging disaster index and

- risk assessment model of winter wheat in Jianghuai region. *Chinese Agricultural Sci Bull*, 25(19): 263-268(in Chinese)
- 盛绍学, 石磊. 2010. 江淮地区小麦春季涝渍灾害脆弱性成因及空间格局分析. *中国农业气象*, 2010, 31(增1): 140-143. Sheng S X, Shi L. 2010. Analysis on spatial pattern and causes of waterlogging disaster frangibility for winter wheat in spring in Jianghuai region. *Chinese J Agrometeorology*, 2010, 31(Suppl): 140-143(in Chinese)
- 史培军. 2011. 中国自然灾害风险地图集. 北京: 科学出版社, 244pp. Shi P J. 2011. Atlas of Natural Disaster Risk of China. Beijing: Science Press, 244pp(in Chinese)
- 苏筠, 吕红峰, 黄术根. 2005. 农业旱灾承灾体脆弱性评价:以湖南鼎城区为例. *灾害学*, 20(4): 1-7. Su Y, Lv H F, Huang S G. 2005. Vulnerability assessment of agricultural drought hazard in Dingcheng district of Hunan. *J Catastrophology*, 20(4): 1-7(in Chinese)
- 孙宁, 冯利平. 2005. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估. *农业工程学报*, 21(2): 106-110. Sun N, Feng L P. 2005. Assessing the climatic risk to crop yield of winter wheat using crop growth models. *Transactions Chinese Society Agricultural Engineering*, 21(2): 106-110(in Chinese)
- 唐为安, 田红, 杨元建等. 2012. 基于 GIS 的低温冷冻灾害风险区划研究:以安徽省为例. *地理科学*, 32(3): 356-361. Tang W A, Tian H, Yang Y J, et al. 2012. Risk zonation of cold disaster based on GIS: A case study of Anhui province. *Scientia Geographica Sinica*, 32(3): 356-361(in Chinese)
- 王春乙, 王石立, 霍治国等. 2005. 近 10 年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展. *气象学报*, 63(5): 659-668. Wang C Y, Wang S L, Huo Z G. 2005. Progress in research of agro-meteorological disasters in China in recent decade. *Acta Meteor Sinica*, 63(5): 659-668(in Chinese)
- 王春乙. 2007. 重大农业气象灾害研究进展. 北京: 气象出版社, 262-282. Wang C Y. 2007. Research Progress of Major Agricultural Meteorological Disasters. Beijing: China Meteorological Press, 262-282(in Chinese)
- 王春乙, 张雪芬, 赵艳霞. 2010. 农业气象灾害影响评估与风险评价. 北京: 气象出版社, 262-282. Wang C Y, Zhang X F, Zhao Y X. 2010. Impact Evaluation and Risk Assessment of Agrometeorological Disasters. Beijing: China Meteorological Press, 262-282(in Chinese)
- 王翠玲, 宁方贵, 张继权等. 2011. 辽西北玉米不同生长阶段干旱灾害风险阈值的确定. *灾害学*, 26(1): 43-47. Wang C L, Ning F G, Zhang J Q, et al. 2011. Determination of drought disaster risk threshold value of various growth stages of maize in north-western Liaoning province. *J Catastrophology*, 26(1): 43-47(in Chinese)
- 王加义, 陈家金, 林晶等. 2012. 基于信息扩散理论的福建省农业水灾风险评估. *自然资源学报*, 27(9): 1497-1506. Wang J Y, Chen J J, Lin J, et al. 2012. Flooding risk assessment of agriculture in Fujian province based on information diffusion theory. *J Natural Resources*, 27(9): 1497-1506(in Chinese)
- 王静爱, 商彦蕊, 苏筠等. 2005. 中国农业旱灾承灾体脆弱性诊断与区域可持续发展. *北京师范大学学报(社会科学版)*, (3): 130-137. Wang J A, Shang Y R, Su Y, et al. 2005. A vulnerability diagnosis of agricultural drought disasters and regional sustainable development in China. *J Beijing Normal University (Social sci)*, (3): 130-137(in Chinese)
- 王军, 王洪丽, 张雪清. 2011. 吉林省玉米生产自然灾害风险评估与气象灾害产量的影响因素研究. *玉米科学*, 19(5): 143-147. Wang J, Wang H L, Zhang X Q. 2011. Disaster risk assessment of maize production and influencing factor analysis on the damage yields. *J Maize Sci*, 19(5): 143-147(in Chinese)
- 王明田, 张玉芳, 马均等. 2012. 四川省盆地地区玉米干旱灾害风险评估及区划. *应用生态学报*, 23(10): 2803-2811. Wang M T, Zhang Y F, Ma J, et al. 2012. Risk assessment and regionalization of maize drought disasters in Sichuan Basin, Southeast China. *Chinese J Appl Ecology*, 23(10): 2803-2811(in Chinese)
- 王素艳, 霍治国, 李世奎等. 2003. 干旱对北方冬小麦产量影响的风险评估. *自然灾害学报*, 12(3): 118-125. Wang S Y, Huo Z G, Li S K, et al. 2003. Risk assessment of drought effect on yield of winter wheat in northern China. *J Natural Disasters*, 12(3): 118-125(in Chinese)
- 王素艳, 霍治国, 李世奎等. 2005. 北方冬小麦干旱灾损风险区划. *作物学报*, 31(3): 267-274. Wang S Y, Huo Z G, Li S K, et al. 2005. Risk regionalization of winter wheat loss caused by drought in North of China. *Acta Agronomica Sinica*, 31(3): 267-274(in Chinese)
- 王远皓, 王春乙, 张雪芬. 2008. 作物低温冷害指标及风险评估研究进展. *气象科技*, 36(3): 310-317. Wang Y H, Wang C Y, Zhang X F. 2008. Advance in researches on indexes and risk assessments of crop cold damage. *Meteor Sci Technol*, 36(3): 310-317(in Chinese)
- 王志强, 何飞, 栗健等. 2012. 基于 EPIC 模型的中国典型小麦干旱致灾风险评价. *干旱地区农业研究*, 30(5): 210-215. Wang Z Q, He F, Li J, et al. 2012. Assessment on drought risk of typical wheat in China based on EPIC model. *Agricultural Res Arid Areas*, 30(5): 210-215(in Chinese)
- 吴东丽, 王春乙, 薛红喜等. 2011. 华北地区冬小麦干旱风险区划. *生态学报*, 31(3): 760-769. Wu D L, Wang C Y, Xue H X, et al. 2011. The drought risk zoning of winter wheat in North China. *Acta Ecologica Sinica*, 31(3): 760-769(in Chinese)
- 吴利红, 毛裕定, 苗长明等. 2007. 浙江省晚稻生产的农业气象灾害风险分布. *中国农业气象*, 28(2): 217-220. Wu L H, Mao Y D, Miao C M, et al. 2007. A study on spatial distribution of agro-meteorological disaster risk of late rice production in Zhejiang province. *Chinese J Agrometeorology*, 28(2): 217-220(in Chinese)
- 吴利红, 苗长明, 姚益平等. 2012. 气象灾害风险管理在农业保险中的应用研究. 北京: 气象出版社, 180pp. Wu L H, Miao C

- M, Yao Y P, et al. 2012. Study on the Application of Risk Management of Meteorological Disasters in Agricultural Insurance. Beijing: China Meteorological Press, 180pp (in Chinese)
- 吴荣军, 史继清, 关福来等. 2013. 干旱综合风险指标的构建及风险区划——以河北省冬麦区为例. 自然灾害学报, 22(1): 145-151. Wu R J, Shi J Q, Guan F L, et al. 2013. Integrated index construction and zoning of drought risk: A case study of winter wheat area in Hebei Province. J Natural Disasters, 22(1): 145-151 (in Chinese)
- 袭祝香, 马树庆, 王琪. 2003. 东北区低温冷害风险评估及区划. 自然灾害学报, 12(2): 98-102. Xi Z X, Ma S Q, Wang Q. 2003. Risk evaluation and zonation of the low temperature and cold damage in Northeast China. J Natural Disasters, 12(2): 98-102 (in Chinese)
- 袭祝香, 王文跃, 时霞丽. 2008. 吉林省春旱风险评估及区划. 中国农业气象, 29(1): 119-122. Xi Z X, Wang W Y, Shi X L. 2008. Risk evaluation and division of spring drought in Jilin province. Chinese J Agrometeorology, 29(1): 119-122 (in Chinese)
- 袭祝香, 杨雪艳, 刘实等. 2013. 东北地区夏季干旱风险评估与区划. 地理科学, 33(6): 735-740. Xi Z X, Yang X Y, Liu S, et al. 2013. The risk evaluation and division of the summer drought in Northeast China. Scientia Geographica Sinica, 33(6): 735-740 (in Chinese)
- 谢佰承, 罗伯良, 帅细强等. 2009. 湖南洪涝灾害农业风险评估研究. 中国农业气象, 30(增2): 307-309. Xie B C, Luo B L, Shuai X Q, et al. 2009. An assessment on agricultural flood disaster in Hunan. Chinese J Agrometeorology, 30(S2): 307-309 (in Chinese)
- 许凯, 徐翔宇, 李爱花等. 2013. 基于概率统计方法的承德市农业旱灾风险评估. 农业工程学报, 29(14): 139-146. Xu K, Xu X Y, Li A H, et al. 2013. Assessing agricultural drought disaster risk in Chengde city using stochastic method. Transactions Chinese Society Agricultural Engineering, 29(14): 139-146 (in Chinese)
- 徐新创, 葛全胜, 郑景云等. 2011. 区域农业干旱风险评估研究——以中国西南地区为例. 地理科学进展, 30(7): 883-890. Xu X C, Ge Q S, Zheng J Y, et al. 2011. Drought risk assessment on regional agriculture: A case in Southwest China. Progress Geography, 30(7): 883-890 (in Chinese)
- 薛昌颖, 霍治国, 李世奎等. 2003a. 华北北部冬小麦干旱和产量灾损的风险评估. 自然灾害学报, 12(1): 131-139. Xue C Y, Huo Z G, Li S Q, et al. 2003a. Risk assessment of drought and yield losses of winter wheat in the North China. J Natural Disaster, 12(1): 131-139 (in Chinese)
- 薛昌颖, 霍治国, 李世奎等. 2003b. 灌溉降低华北冬小麦干旱减产的风险评估研究. 自然灾害学报, 12(3): 131-136. Xue C Y, Huo Z G, Li S Q, et al. 2003b. Action of irrigation on decreasing yield reduction due to drought: A risk assessment of winter wheat in North China plain. J Natural Disaster, 12(3): 131-136 (in Chinese)
- 薛昌颖, 霍治国, 李世奎等. 2005. 北方冬小麦产量灾损风险类型的地理分布. 应用生态学报, 16(4): 620-625. Xue C Y, Huo Z G, Li S Q, et al. 2005. Geographic distribution of winter wheat yield loss risk and its classification in North China. Chinese J Applied Ecology, 16(4): 620-625 (in Chinese)
- 薛晓萍, 李楠, 杨再强. 2013. 日光温室黄瓜低温冷害风险评估技术研究. 灾害学, 28(3): 61-65. Xue X P, Li N, Yang Z Q. 2013. Risk assessment technology of chilling injury on cucumbers in solar greenhouse. J Catastrophology, 28(3): 61-65 (in Chinese)
- 阎莉, 张继权, 王春乙等. 2012. 辽西北玉米干旱脆弱性评价模型构建与区划研究. 中国生态农业学报, 20(6): 788-794. Yan L, Zhang J Q, Wang C Y, et al. 2012. Vulnerability evaluation and regionalization of drought disaster risk of maize in Northwestern Liaoning Province. Chinese J Eco-Agriculture, 20(6): 788-794 (in Chinese)
- 杨春燕, 王静爱, 苏筠等. 2005. 农业旱灾脆弱性评价——以北方农牧交错带兴和县为例. 自然灾害学报, 14(6): 88-93. Yang C Y, Wang J A, Su Y, et al. 2005. Assessment of agricultural drought vulnerability: taking Xinghe County in farming-pastoral zone in North of China as a case. J Natural Disasters, 14(6): 88-93 (in Chinese)
- 杨再强, 张婷华, 黄海静等. 2013. 北方地区日光温室气象灾害风险评估. 中国农业气象, 34(3): 342-349. Yang Z Q, Zhang T H, Huang H J, et al. 2013. Meteorological disaster risk evaluation of solar greenhouse in North China. Chinese J Agrometeorology, 34(3): 342-349 (in Chinese)
- 于飞, 谷晓平, 罗宇翔等. 2009. 贵州农业气象灾害综合风险评估与区划. 中国农业气象, 30(2): 267-270. Yu F, Gu X P, Luo Y X, et al. 2009. Comprehensive risk assessment and demarcation of agro-meteorological disasters in Guizhou province. Chinese J Agrometeorology, 30(2): 267-270 (in Chinese)
- 余学知, 刘发挥, 吴桂初等. 2001. 水稻田间干旱模拟试验研究. 中国农业气象, 22(3): 20-23. Yu X Z, Liu F H, Wu G C, et al. 2001. Study on simulated arid test in paddy field. Chinese J Agrometeorology, 22(3): 20-23 (in Chinese)
- 张继权, 岗田宪夫, 多多纳裕一. 2006. 综合自然灾害风险管理: 全面整合的模式与中国的战略选择. 自然灾害学报, 15(1): 29-37. Zhang J Q, Okada N, Tatano H. 2006. Integrated natural disaster risk management: Comprehensive and integrated model and Chinese strategy choice. J Natural Disasters, 15(1): 29-37 (in Chinese)
- 张继权, 李宁. 2007. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用. 北京: 北京师范大学出版社, 33. Zhang J Q, Li L. 2007. Quantitative Methods and Applications of Risk Assessment and Management on Main Meteorological Disasters. Beijing: Beijing Normal University Press, 33 (in Chinese)
- 张继权, 严登华, 王春乙等. 2012a. 辽西北地区农业干旱灾害风险评估与风险区划研究. 防灾减灾工程学报, 32(3): 300-306.

- Zhang J Q, Yan D H, Wang C Y, et al. 2012a. A study on risk assessment and risk regionalization of agricultural drought disaster in northwestern regions of Liaoning province. *J Disaster Prevention Mitigation Engineering*, 32(3): 300-306 (in Chinese)
- 张继权, 刘兴朋, 严登华. 2012b. 综合灾害风险管理导论. 北京: 北京大学出版社, 262-282. Zhang J Q, Liu X P, Yan D H. 2012b. Introduction of Integrated Disaster Risk Management. Beijing: Beijing University Press, 262-282(in Chinese)
- 张继权, 刘兴朋, 刘布春. 2013. 农业灾害风险管理//郑大玮, 李茂松, 霍治国. 农业灾害与减灾对策. 北京: 中国农业大学出版社, 753-794. Zhang J Q, Liu X P, Liu B C. 2013. Agricultural disaster risk management//Zheng D W, Li M S, Huo Z G. Agricultural Disasters and Reduction. Beijing: China Agricultural University Press, 752-794(in Chinese)
- 张竟竟. 2012. 基于信息扩散理论的河南省农业旱灾风险评估. 资源科学, 34(2): 280-286. Zhang J J. 2012. Assessment of risks of agricultural drought disasters in Henan province based on the information diffusion theory. *Resources Sci*, 34(2): 280-286(in Chinese)
- 张丽娟, 李文亮, 张冬有. 2009. 基于信息扩散理论的气象灾害风险评估方法. 地理科学, 29(2): 250-254. Zhang L J, Li W L, Zhang D Y. 2009. Meteorological disaster risk assessment method based on information diffusion theory. *Scientia Geographica Sinica*, 29(2): 250-254(in Chinese)
- 张琪, 张继权, 佟志军等. 2010. 干旱对辽宁省玉米产量影响及风险区划. 灾害学, 25(2): 87-91. Zhang Q, Zhang J Q, Tong Z J, et al. 2010. Influence of drought on corn yield in Liaoning province and the risk zoning. *J Catastrophology*, 25(2): 87-91 (in Chinese)
- 张琪, 张继权, 严登华等. 2011. 朝阳市玉米不同生育阶段干旱灾害风险预测. 中国农业气象, 32(3): 451-455. Zhang Q, Zhang J Q, Yan D H, et al. 2011. Prediction on drought risk for maize in different growing stages in Chaoyang city. *Chinese J Agrometeorology*, 32(3): 451-455(in Chinese)
- 张峭, 王克. 2011. 我国农业自然灾害风险评估与区划. 中国农业资源与区划, 32(3): 32-36. Zhang Q, Wang K. 2011. Assessment and regional planning of Chinese agricultural natural disaster risks. *Chinese J Agricultural Resources and Regional Planning*, 32(3): 32-36(in Chinese)
- 张星, 张春桂, 吴菊薪等. 2009. 福建农业气象灾害的产量灾损风险评估. 自然灾害学报, 18(1): 90-94. Zhang X, Zhang C G, Wu J X, et al. 2009. Risk assessment of yield losses from agrometeorological disasters in Fujian Province. *J Natural Disasters*, 18(1): 90-94(in Chinese)
- 张雪芬, 余卫东, 王春乙. 2012. 基于作物模型灾损识别的黄淮区域冬小麦晚霜冻风险评估. 高原气象, 31(1): 277-284. Zhang X F, Yu W D, Wang C Y. 2012. Risk evaluation for spring frost disaster of winter wheat in Yellow River-Huai River regions based on crop model. *Plateau Meteor*, 31(1): 277-284(in Chinese)
- 赵俊晔, 张峭, 赵思健. 2013. 中国小麦自然灾害风险综合评价初步研究. 中国农业科学, 46(4): 705-714. Zhao J Y, Zhang Q, Zhao S J. 2013. A preliminary study of integrated assessment of wheat natural disaster risk in China. *Chinese J Agrometeorology*, 46(4): 705-714(in Chinese)
- 植石群, 刘锦鑫, 杜尧东等. 2003. 广东省香蕉寒害风险分析. 自然灾害学报, 12(2): 113-116. Zhi S Q, Liu J L, Du Y D, et al. 2003. Risk analysis of cold damage to banana in Guangdong province. *J Natural Disasters*, 12(2): 113-116(in Chinese)
- 钟秀丽, 王道龙, 李玉中等. 2007. 黄淮麦区小麦拔节后霜害的风险评估. 应用气象学报, 18(1): 102-107. Zhong X L, Wang D L, Li Y Z, et al. 2007. Risk assessment of frost damage in wheat. *J Appl Meteor Sci*, 18(1): 102-107(in Chinese)
- 周瑶, 王静爱. 2012. 自然灾害脆弱性曲线研究进展. 地球科学进展, 27(4): 435-442. Zhou Y, Wang J A. 2012. A review on development of vulnerability curve of natural disaster. *Adv Earth Sci*, 27(4): 435-442(in Chinese)
- 周寅康, 金晓斌, 王千等. 2012. 基于GIS的关中地区农业生产自然灾害风险综合评价研究. 地理科学, 32(12): 1465-1472. Zhou Y K, Jin X B, Wang Q, et al. 2012. Comprehensive assessment of natural disaster risk for agricultural production in Guanzhong region based on GIS. *Scientia Geographica Sinica*, 32(12): 1465-1472. (in Chinese)
- 朱红蕊, 于宏敏, 姚俊英等. 2012. 黑龙江省水稻初霜冻灾害致灾因子危险性分析. 灾害学, 27(2): 96-99. Zhu H R, Yu H M, Yao J Y, et al. 2012. Frost hazard risk assessment of rice in Heilongjiang province. *J Catastrophology*, 27(2): 96-99 (in Chinese)
- 朱红蕊, 刘赫男, 孙爽等. 2013. 气候变暖背景下黑龙江省水稻初霜冻灾害风险区划研究. 中国农学通报, 29(30): 29-34. Zhu H R, Liu H N, Sun S, et al. 2013. The research of risk zoning of rice frost disaster under the climate warming in Heilongjiang province. *Chinese Agricultural Sci Bull*, 29(30): 29-34(in Chinese)
- 朱琳, 叶殿秀, 陈建文等. 2002. 陕西省冬小麦干旱风险分析及区划. 应用气象学报, 13(2): 201-206. Zhu L, Ye D X, Chen J W, et al. 2002. The drought risk assessment and division of winter in Shaanxi province. *J Appl Meteor Sci*, 13(2): 201-206 (in Chinese)
- Agnew C T. 2000. Using the SPI to identify drought. *Drought Network News*, 12(1): 6-12
- Antwi-Agyei P. 2012. Vulnerability and adaptation of Ghana's food production systems and rural livelihoods to climate variability. Leeds: University of Leeds
- Birkmann J. 2007. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. *Environ Hazards*, 7: 20-31
- Blaikie P, Cannon T, Davis I, et al. 1994. At Risk: Natural Hazards, People Vulnerability, and Disasters. London and New

- York; Routledge Publishers, 141-156
- Burton I, Kates R W, White G F. 1993. *The Environment as Hazard* (Second Edition). New York; The Guilford Press, 284pp
- Chen J F, Yang Y. 2011. A fuzzy ANP-based approach to evaluate region agricultural drought risk. *Proc Eng*, 23: 822-827
- Chen Y M, Fan K S, Chen L C. 2010. Requirements and functional analysis of a multi-hazard disaster-risk analysis system. *Hum Ecol Risk Assess*, 16(2): 413-428
- Cheng Y X, Huang J F, Han Z L, et al. 2013. Cold damage risk assessment of double cropping rice in Hunan, China. *J Integr Agri*, 12(2): 352-363
- Cittadini E D, de Ridder N, Peri P L, et al. 2006. A method for assessing frost damage risk in sweet cherry orchards of South Patagonia. *Agri Forest Meteor*, 141(2-4): 235-243
- Daneshvar M R M, Bagherzadeh A, Khosravi M. 2013. Assessment of drought hazard impact on wheat cultivation using standardized precipitation index in Iran. *Arab J Geosci*, 6(11): 4463-4473
- Fraser E D G, Termansen M, Sun N, et al. 2008. Quantifying socioeconomic characteristics of drought-sensitive regions: Evidence from Chinese provincial agricultural data. *C R GEOSCI*, 340(9-10): 679-688
- Hao L, Zhang X Y, Liu S D. 2012. Risk assessment to China's agricultural drought disaster in county unit. *Nat Hazards*, 61(2): 785-801
- Huang C F, Shi Y. 2002. *Towards Efficient Fuzzy Information on Processing-Using the principle of Information on Diffusion*. Heidelberg, Germany; Springer, 325-363
- IPCC. 2012. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation// A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge; Cambridge University Press, 72-76
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability*. [2014-05-06]. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Jiang W G, Deng L, Chen L Y, et al. 2009. Risk assessment and validation of flood disaster based on fuzzy mathematics. *Prog Nat Sci*, 19(10): 1419-1425
- Keating B A, Meinke H. 1998. Assessing exceptional drought with a cropping systems simulator: A case study for grain production in Northeast Australia. *Agri Syst*, 57(3): 315-332
- Liu X J, Zhang J Q, Ma D L, et al. 2013. Dynamic risk assessment of drought disaster for maize based on integrating multi-sources data in the region of the northwest of Liaoning Province, China. *Nat Hazards*, 65(3): 1393-1409
- Liu X P, Zhang J Q, Tong Z J, et al. 2012. GIS-based multi-dimensional risk assessment of the grassland fire in northern China. *Nat Hazards*, 64(1): 381-395
- Nivolianitou Z S, Synodinou B M, Aneziris O N. 2004. Important meteorological data for use in risk assessment. *J Loss Prevent Proc Industr*, 17(6): 419-429
- Nullet D, Giambelluca T W. 1988. Risk analysis of seasonal agricultural drought on low Pacific islands. *Agri Forest Meteor*, 42(2-3): 229-239
- Petak W J, Atkisson A A. 1982. *Natural Hazard Risk Assessment and Public Policy: Anticipating the Unexpected*. New York; Springer-Verlag, 489pp
- Richter G M, Semenov M A. 2005. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: Assessing drought risks. *Agri Syst*, 2005, 84(1): 77-97
- Schindler U, Steidl J, Müller L, et al. 2007. Drought risk to agricultural land in Northeast and Central Germany. *J Plant Nutr Soil Sci*, 170(3): 357-362
- Shahid S, Behrawan H. 2008. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Nat Hazards*, 46(3): 391-413
- Simelton E, Fraser E D G, Termansen M, et al. 2009. Typologies of crop-drought vulnerability: An empirical analysis of the socio-economic factors that influence the sensitivity and resilience to drought of three major food crops in China (1961—2001). *Environ Sci Policy*, 12(4): 438-452
- Smith D I. 1994. Flood damage estimation: A review of urban stage damage curves and loss functions. *Water SA*, 20(3): 231-238
- Snyder R L, de Melo-Abreu J P. 2005. *Frost Protection: Fundamentals, practice, and economics // Environment and Natural Resources Series 10, Volume 1*. Rome; FAO
- Todisco F, Vergni L, Mannocchi F. 2009. Operative approach to agricultural drought risk management. *J Irrig Drain Eng*, 135(5): 654-664
- UN/ISDR. 2004. *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*. Geneva; United Nations Publication
- Wang Z Q, He F, Fang W H, et al. 2013. Assessment of physical vulnerability to agricultural drought in China. *Nat Hazards*, 67(2): 645-657
- White D A, Crombie D S, Kinal J, et al. 2009. Managing productivity and drought risk in Eucalyptus globulus plantations in south-western Australia. *Forest Ecol Manage*, 259(1): 33-44
- Wilhelmi O V, Wilhite D A. 2002. Assessing vulnerability to agricultural drought: A Nebraska case study. *Nat Hazards*, 25(1): 37-58
- Wilhite D A. 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions// Wilhite D A. *Drought: A Global Assessment*. London; Routledge Publishers, 3-18
- Wisner B, Blaikie P, Cannon T, et al. 1994. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. London and New York; Routledge Publishers, 141-156
- Wu D, Yan D H, Yang G Y, et al. 2013. Assessment on agricultural drought vulnerability in the Yellow River basin based on a fuzzy clustering iterative model. *Nat Hazards*, 67(2): 919-936
- Wu H, Wilhite D A. 2004a. An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA. *Nat Hazards*, 33

- (1): 1-21
- Wu H, Hubbard K G, Wilhite D A. 2004b. An agricultural drought risk assessment model for corn and soybeans. *Int J Climatol*, 24(6): 723-741
- Wu J J, He B, Lü A F, et al. 2011. Quantitative assessment and spatial characteristics analysis of agricultural drought vulnerability in China. *Nat Hazards*, 56(3): 785-801
- Xu L, Zhang Q. 2010. Modeling agricultural catastrophic risk. *Agri Sci Proc*, 1: 251-257
- Xu L, Zhang Q, Zhang X. 2011. Evaluating agricultural catastrophic risk. *China Agri Econ Rev*, 3(4): 451-461
- Xu W, Ren X M, Johnston T, et al. 2012. Spatial and temporal variation in vulnerability of crop production to drought in southern Alberta. *Can Geogr*, 56(4): 474-491
- Zarafshani K, Sharafi L, Azadi H, et al. 2012. Drought vulnerability assessment: The case of wheat farmers in Western Iran. *Glob Planet Change*, 98-99: 122-130
- Zhang D, Wang G L, Zhou H C. 2011. Assessment on agricultural drought risk based on variable fuzzy sets model. *Chinese Geogr Sci*, 21(2): 167-175
- Zhang J Q. 2004. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao plain, China. *Agriculture, Ecosystems Environ*, 102(2):133-153
- Zhang J Q, Zhang Q, Yan D H, et al. 2011. A study on dynamic risk assessment of maize drought disaster in northwestern Liaoning province, China. *Beyond Experience in Risk Analysis and Crisis*, 5: 196-206
- Zhang Q, Zhang J Q, Yan D H, et al. 2013. Dynamic risk prediction based on discriminant analysis for maize drought disaster. *Nat Hazards*, 65(3): 1275-1284
- Zhao X L, Wang D, Zhang H. 2012. Application of information fuzzy in the risk evaluation of agro-meteorological disasters. *J Inform Comp Sci*, 9: 2571-2578
- Zou Q, Zhou J Z, Zhou C, et al. 2013. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 27(2): 525-546