

气候变化风险及其定量评估方法

吴绍洪^{1,2*}, 高江波¹, 邓浩宇^{1,2}, 刘路路^{1,2}, 潘 韬³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院, 北京 100864)

摘 要:风险评估是气候变化研究领域的核心课题之一,减缓和适应战略的理论需求推动下发展出许多定量评估方法,完成了大量的评估工作。然而,已有研究在气候变化的风险构成上从不同的角度去认识,且评估方法论在整体上缺乏对致险因子与承险体的集成分类。基于此,本文明晰气候变化风险构成,包括致险因子的危险性、承险体的暴露度与脆弱度及其相互关系,明晰了风险产生与变化逻辑。融合致险因子与承险体特征,将气候变化风险定量评估方法归纳为突发事件和渐变事件两类,并分别进行了理论阐述和案例剖析。最后,根据气候变化风险的研究现状和评估需求,从温升目标、脆弱性曲线、适应措施等方面提出未来展望。

关键词:气候变化;风险构成;定量评估;方法论;进展与展望

1 引言

在气候变化议题受到持续关注和相关研究不断深化的过程中,气候变化风险始终处于核心地位(Carpenter et al, 2008; Schuur et al, 2011; Hirabayashi et al, 2013; Urban, 2015; 吴绍洪等, 2017)。风险评估是从气候变化影响到应对的必然要求和链接桥梁,其中影响程度是风险评估的基础(Jones, 2001; Prudhomme et al, 2010),风险是应对(尤其是适应)的对象(吴绍洪等, 2011; Wilby et al, 2012; FAO, 2016)。在联合国政府间气候变化工作委会(IPCC)第五次评估报告第二工作组(WGII AR5)报告《气候变化2014:影响、适应和脆弱性》中,评估了气候变化的影响、适应和脆弱性,倡导气候变化风险的管理与可持续路径的建立(IPCC, 2014)。《巴黎协定》本着减少气候变化风险的目的,提出2℃甚至

1.5℃的全球长期温控目标(United Nations, 2015)。虽然新近研究表明,即使各国完全实现国家自主减排贡献承诺,本世纪末全球增温仍极有可能超过3℃(Höhne et al, 2017; UNEP, 2017),但1.5℃、2℃、3℃等不同增温幅度的确定,使风险评估的靶向和适应战略的制定变得有据可依,在很大程度上推进了气候变化风险的定量评估。

鉴于气候变化风险内涵的综合性特征,大多研究均从致险因子与承险体的角度出发,但由于研究目的或管理方案不尽相同,对于风险构成并未达成统一认识(吴绍洪等, 2011)。IPCC第二工作组第五次评估报告和《管理极端事件和灾害风险促进气候变化适应特别报告》(SREX)在对气候变化风险框架的理解上,认为风险是气候相关危害(极端事件和变化趋势)、承险体暴露度与脆弱性三者的相互作用结果,且存在三者间纯粹的两两相交领域

收稿日期:2018-01-09;修订日期:2018-01-17。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02);国家自然科学基金重点项目(41530749);中国清洁发展机制基金赠款项目(2014092, 2013034) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02; Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.41530749; Grants Program of China Clean Development Mechanism Fund, No.2014092, No.2013034]。

作者简介:吴绍洪(1961-),男,广东潮州人,研究员,博士生导师,主要研究方向为自然地理综合研究与全球变化, E-mail: wush@igsrr.ac.cn。

引用格式:吴绍洪, 高江波, 邓浩宇, 等. 2018. 气候变化风险及其定量评估方法[J]. 地理科学进展, 37(1): 28-35. [Wu S H, Gao J B, Deng H Y, et al. 2018. Climate change risk and methodology for its quantitative assessment[J]. Progress in Geography, 37(1): 28-35.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.004

(IPCC, 2012, 2014)。而在联合国粮农组织(FAO)的2016年报告中,采用气候的状况、变率和季节变化来表示系统受到的冲击,加上系统易损性构成风险(FAO, 2016)。尽管表达方式有所不同,但致险因子(危险性)、承险体暴露度与脆弱性无疑是气候变化风险的基本构成要素(高江波等, 2017)。

近年来,随着计算机数值模型、大数据分析方法和3S技术的迅速发展,全球及不同国家和地区的多层次、多尺度气候变化风险定量评估成果不断涌现(Castellari, 2007; HM Government, 2012; Kromp-Kolb et al, 2014; Melillo et al, 2014; 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2015)。此类研究多从致险因子或承险体单要素为主导开展评估,如气候变化背景下的干旱、洪涝、热浪等社会经济损失定量评估(D'Ippoliti et al, 2010; Aghakouchak et al, 2014; Gordon et al, 2014; Alfieri et al, 2016),面向农业与生态安全的气候变化风险评估(Scholze et al, 2006; Li et al, 2009; Rosenzweig et al, 2014)。气候变化风险区划虽在一定程度上综合考虑了气候变化的危险性及其人口、经济、粮食和生态的响应脆弱性(吴绍洪等, 2017),但总体来看,气候变化风险研究领域仍缺乏融合致险因子与承险体的集成分类及相应的方法学研究,致使风险评估结论难归一、可比性较差、应用指向性不足(Jones et al, 2011; Ploberger et al, 2016)。

针对气候变化风险内涵理解不统一、定量评估方法论研究薄弱等问题,本文将明晰风险的构成要素与组织形式、归纳定量评估方法类别,在此基础上,系统考虑温升目标、气候情景、脆弱性曲线、风险适应程度等方面的不足与需求,凝练未来研究方向,以期推动气候变化风险认识论和方法论研究。

2 气候变化风险构成

气候变化风险构成包括两个维度(即致险因子和承险体)、三个方面(即可能性、脆弱性和暴露度)(图1)。其中,在气候变化风险研究中,致险因子,即自然气候与人为气候的变化,决定着风险发生的可能性(IPCC, 2007);气候变化风险源主要包括两个方面:一是平均气候状况(气温、降水趋势),属于渐变事件;二是极端天气/气候事件(热带气旋、风暴潮、极端降水、河流洪水、热浪与寒潮、干旱),属于突发事件。承险体即为遭受负面影响的社会经济

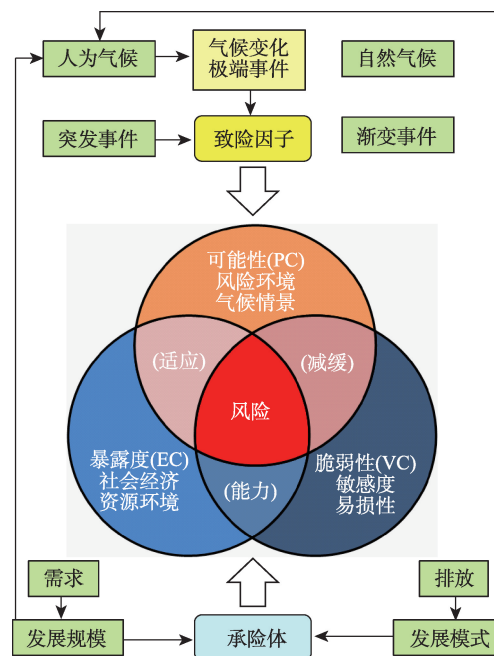


图1 气候变化风险的基本要素与构成形式

Fig.1 Basic components and formation of climate change risk

和资源环境,包括人员、生计、环境服务和各种资源、基础设施,以及经济、社会或文化资产等(Jones, 2004);暴露度和脆弱性是承险体的两个属性,前者指处在有可能受到不利影响位置的承险体数量,后者指受到不利影响的倾向或趋势,常以敏感性和易损性为表征指标(IPCC, 2012)。也就是说,单独气候变化与极端气候事件并不一定导致灾害,而必须与脆弱性和暴露程度交集之后才可能产生风险。

承险体的发展规模和模式不仅决定着暴露度和脆弱性,即承受极端事件的能力,还对人为气候的变化幅度与速率有直接作用(Cotton et al, 2007; Lamb et al, 2015; Schaller et al, 2016)。基于上述风险构成理念,从调整承险体的发展规模和模式入手,通过减缓人为气候变化来降低过高增温、降水异动和极端事件发生可能性,同时增强承险体的气候变化适应能力和恢复能力,是降低气候变化风险的有效途径(图1)。

3 气候变化风险定量评估方法

对气候变化风险进行定量评估是风险管理的基础,同时也是适应气候变化需要解决的重要科学问题(Jones, 2001; IPCC, 2012)。气候变化风险最基本的性质可归纳为未来性、不利性和不确定性,即

分别从时间的角度、后果的角度以及后果的表征上揭示自然气候变化风险的本质特征(吴绍洪等, 2011)。风险定量评估是在充分考虑影响评价不确定性的基础上,量化系统未来可能遭受的损失。

基于此,本文从两个角度系统阐释气候变化风险定量评估方法:①对于突发性事件,一旦发生即在短时间显现出危害和后果,气候变化因素相当于自然灾害中的致灾因子(此处为致险因子)——“灾害风险”;②缓发性变化表现为渐变过程,当超过某个阈值,随即发生突变,产生不利影响,并出现风险。后一类风险往往出现于生态系统中,其突出的特征是,气候变化因素既是生态系统生长的动力,同时又是致险因子,导致“生态风险”。

3.1 突发事件风险定量评估方法

3.1.1 理论内涵

自然灾害风险评估受到国内外学者的广泛关注,许多研究通过对致灾因子危险性与承灾体脆弱性分等定级,借助评估矩阵等方法对区域风险进行评估(史培军, 2005)。随着自然灾害风险向评估结果定量化、区域综合化、管理空间化发展,原有的自然灾害风险等级评估由于不能定量表现各等级之间的具体差别,因而难以满足灾害风险管理的要求。本文提出包括自然灾害的破坏力或承险体损毁标准(D),承险体的暴露度(E),灾害发生的可能性或孕灾环境(P)三个成分的自然灾害风险定量评估模型(图2)。

相应地,突发性极端天气气候事件的风险定量评估模型可表述为:

$$R = (D \times E) \times P \quad (1)$$

式中:风险=(致险因子,即气候变化)破坏力×(承险体)暴露度×发生可能性或孕灾环境。

基于对灾害风险上述三要素(D 、 E 、 P)的剖析,

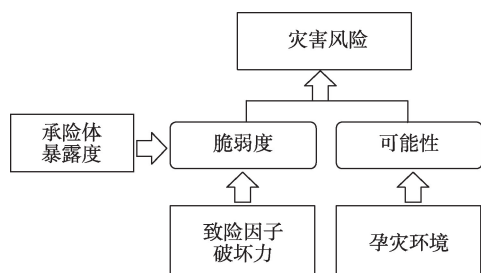


图2 自然灾害风险定量评估概念框架

Fig.2 Conceptual framework for the quantitative evaluation of natural disaster risk

可根据承险体响应特征差异,将不同灾种风险评估分为“面向类型”的灾害风险评估和“适用区域”的灾害风险评估。前者是指某一等级强度的灾种发生后,对承险体的影响程度与幅度是可控的,即对应特定灾害等级的损失标准是相对确定的;后者主要是考虑到自然地理与人文环境的区域差异性,即使是同等强度的灾害发生后,不同地区的损失程度明显不同。

3.1.2 洪水案例

根据上述理论模型的思路,按照过去灾情拟合结果,暴雨洪涝损失在3日降雨趋于最大,因而将3日最大降雨作为计算损失的关键节点。气候变化背景下洪水发生可能性的计算是基于IPCC RCPs情景中的最大3日降雨量达到30(35)~150 mm、150~250 mm和≥250 mm的次数,以此作为轻、中、重度洪水的最大发生频次,然后将其转化为发生概率(概率=频次/时间尺度×100%,若发生概率大于100%则置为1),进而,考虑到区域自然地理环境的差异性,借助高程和坡度等因子形成的下垫面环境修正参数对其进行修正(图3a),从而得到各地区的洪水的危险性(图3b);对于承险体,洪涝灾害可对经济及人口造成严重影响,其脆弱性曲线的构建由不同程度洪水破坏力构成,可根据过去洪水灾害灾情数据拟合获得;对于承险体暴露度,通过IIASAS预测的未来社会经济统计数据获得(图3c)。最终,构建气候变化下洪水风险定量评估模型(如下),并获得中国洪涝灾害经济损失风险空间格局(图3d)。

$$R = (D \times E) \times (F \times I) \quad (2)$$

式中: D 为不同程度洪水破坏力,由过去洪水灾害灾情数据拟合获得; E 为承险体暴露度,由IIASAS预测的未来社会经济统计数据获得; F 为暴雨发生的可能程度,由IPCC RCP情景数据计算所得; I 为地表修正参数,包括海拔、坡度、河网密度、平均受灾面积等。

3.2 渐变事件风险定量评估方法

3.2.1 理论内涵

将生态系统的脆弱性(功能和结构破坏的程度)作为非期望事件发生的后果程度,按照风险管理的定义,气候变化即为致灾危险性因子,生态系统为承险体,而气候情景即是气候发生变化的可能性,三者构成了气候变化的风险。由此,生态系统风险评估仍可沿用灾害风险评估的主要因素:致险因子

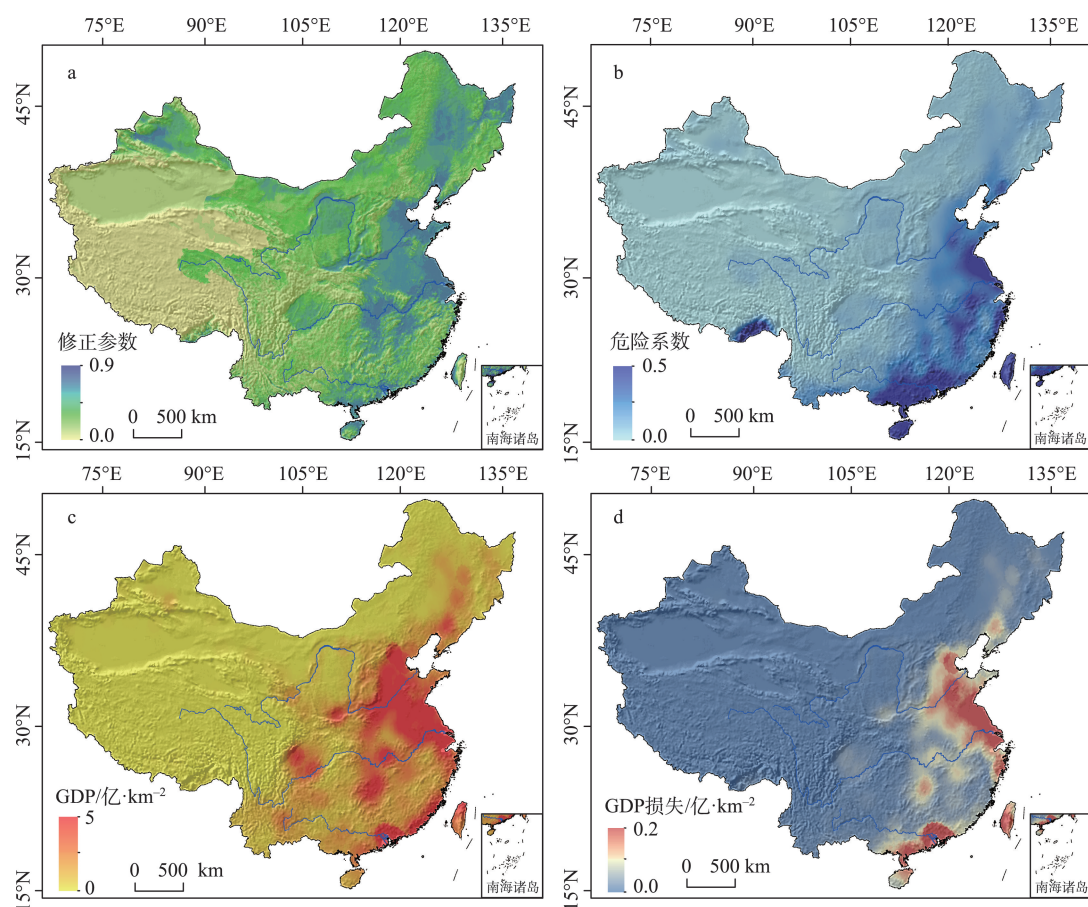


图3 RCP8.5情景下中国洪涝灾害危险性(a、b)、经济暴露度(c)、损失风险(d)空间格局

Fig.3 Spatial patterns of flood disaster probability (a, b), economic exposure (c), and loss risk in China under RCP8.5

危险性,承险体脆弱性,暴露量等。但是,由于气候因子既是生态系统生产的动力,同时又是其致险因子,以及考虑到生态系统的恢复力,因而引入阈值的概念来评估其风险。一方面,当生态系统受到环境的胁迫时,结构、功能、生境可能发生变化,其响应与胁迫的幅度和速率有关,与生态系统生物因子本身的稳定性也有关,生态系统所承受的压力与胁迫的速率与幅度成正相关关系。另一方面,生态系统自身具有抗干扰的恢复能力,对外来胁迫进行调节,经过一定过程,系统可能适应或恢复。但如果环境胁迫的速率或幅度超过生态系统的调节能力,则系统将变得脆弱,生态系统也将处于风险状态,气候变化继续加剧则甚至导致系统发生逆向演替。

3.2.2 NPP案例

根据 van Minnen 等人的思想,假设不能接受的气候变化对生态系统生产功能的影响是某种程度的NPP损失,即气候变化造成NPP的损失如果超过

了此类生态系统NPP的自然波动范围,就认为其发生风险(van Minnen et al, 2002)。根据世界气象组织对“异常”的定义(即超过平均值的 ± 2 倍标准差)(Jones et al, 1999; Hulme et al, 2008),选取两套数据对中国生态系统NPP的正常波动范围进行计算以便互相验证(一套是根据中国自然环境特点重新参数化的Lund-Potsdam-Jena模型模拟结果;另一套是大气—植被相互作用模型AVIM2模拟结果)(赵东升等, 2011; 黄玫等, 2006),它们的异常值计算结果分别为9.9%和8.5%,与 van Minnen 等人计算的欧洲NPP的自然波动范围(10%)非常接近。因此,选择相对于平均值10%的损失作为“不能接受的影响”的参考。以生态系统生产功能“不能接受的影响”为参考,确定各生态系统的风险标准,可将各生态系统分为无风险、低风险、中风险和高风险(石晓丽等, 2017)。基于此,获得未来30年中国气候变化生态风险空间格局(图4)。

4 气候变化风险研究展望

气候变化风险虽是目前研究的热点,众多学者和管理者高度关注,但尚属于研究的初期。并且,由于气候变化风险是自然因子行为机理,社会经济与资源环境的承受能力,以及政策与管理机制的交汇,因而使得气候变化风险具有高度的复杂性,并且存在着很大的不确定性,需要逐步深入研究。

(1) 不同温升目标下的气候变化风险

2015年12月达成的《巴黎协定》确立了2℃的温升目标,并提出向1.5℃内努力(United Nations, 2015),但即使完全实现各国自主承诺的目标,21世纪末全球平均增温很有可能会超过3℃(UNEP, 2017)。随着温升幅度的增加,气候变化导致的极端事件发生的频率更高,强度更大,灾害的破坏力更加严重(徐影等, 2014; Fischer et al, 2015; Roudier et al, 2016);相应地,承险体暴露度和脆弱性范围不断扩大,对人类生活、社会经济发展和生态环境均造成严重威胁(Blaikie et al, 1994)。因而,认识不同增温目标下的气候变化、评估不同增温情景下气候变化风险,不仅是气候变化风险评估的必然要求,也是制定气候变化应对方案和实施路线图的根本依据。

(2) 基于IPCC新气候情景数据的定量评估

目前耦合模式比较计划第六阶段(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)正按时间节点有序进行(Eyring et al, 2016)。CMIP6试验设计和组织的核心是生物地球化学强迫和反馈,

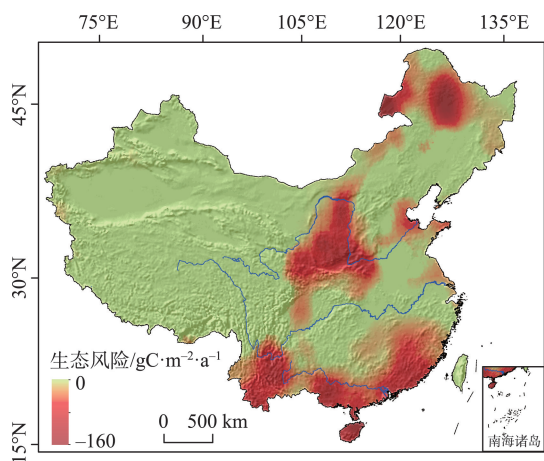


图4 RCP8.5情景下中国未来30年生态风险空间分布
Fig.4 Spatial distribution of ecological risk of China in the next 30 years under RCP8.5

拟解决以下三大问题:①地球系统如何响应强迫;②模式系统偏差的来源和后果是什么;③考虑到内部气候变率、可预测性和情景的不确定性,如何评估未来的气候变化。随着科学认识的发展,CMIP模拟中考虑的地球系统的强迫和反馈也会更加科学,在未来的气候变化风险评估中采用该计划获得的气候情景数据以及相应的社会经济情景,既可推动定量评估结果更趋客观合理,又能为未来达成新的认识和科学应对奠定基础。

(3) 降低脆弱性曲线构建的不确定性

构建脆弱性曲线是定量评估气候变化风险的核心内容。目前的构建方法主要基于历史灾情数据、已有脆弱性曲线的修正、系统调查和模式模拟等。脆弱性曲线具有一定的不确定性,随着历史文献的整理、灾害统计数据完善、问卷访谈和灾害保险工作的深入,脆弱性曲线的区域性参数化修正和针对性将有所增强;随着致险因子强度和承险体脆弱性对应关系系统调查的深入,以及基于作物生产模型、生态系统模型等的模拟水平的不断提高,脆弱性曲线的不确定性将逐渐减小。未来脆弱性曲线构建需朝着多元化、综合化方向发展。

(4) 基于定量风险的适应成效

适应是应对气候变化的主要途径之一,也是气候变化风险管理的主要目的。在应对气候变化不利影响的研究与行动中,气候变化风险的定量评估,有利于确立适应目标和开展适应行动。根据气候变化风险的定量评估结果,遵循“趋利避害”的原则,建立适应气候变化的目标,在国家 and 区域层面上建立完善的适应气候变化体系,开展适应气候变化行动;进而,加强相关行业和领域的适应技术应用后评估,即综合分析、对比适应技术应用前后的风险格局与总体态势,据此判定适应技术的成效、提出有序适应的技术和措施(图5)。

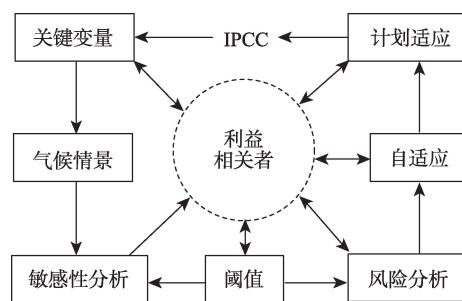


图5 气候变化风险理论评估框架(改编自 Jones, 2011)
Fig.5 Theoretical framework of climate change risk assessment (Modified after Jones, 2011)

参考文献(References)

- 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2015. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社. [Committee for the Compilation of Third National Climate Assessment. 2015. Disanci qihou bianhua guojia pinggu baogao[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪, 等. 2017. 气候变化影响与风险研究的理论范式和方法体系[J]. 生态学报, 37(7): 2169-2178. [Gao J B, Jiao K W, Wu S H, et al. 2017. Theory paradigm and a methods system for research on climate change impacts and risks[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(7): 2169-2178.]
- 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 2006. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. 生态学报, 26(12): 4156-4163. [Huang M, Ji J J, Cao M K, et al. 2006. Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 26(12): 4156-4163.]
- 石晓丽, 陈红娟, 史文娇, 等. 2017. 基于阈值识别的生态系统生产功能风险评价: 以北方农牧交错带为例[J]. 生态环境学报, 26(1): 6-12. [Shi X L, Chen H J, Shi W J, et al. 2017. Risk assessment of ecosystems production based on the thresholds identification: The case study of farming-pastoral ecotone in northern China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(1): 6-12.]
- 史培军. 2005. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 14(6): 1-7. [Shi P J. 2005. Theory and practice on disaster system research in a fourth time[J]. *Journal of Natural Disasters*, 14(6): 1-7.]
- 吴绍洪, 潘韬, 贺山峰. 2011. 气候变化风险研究的初步探讨[J]. 气候变化研究进展, 7(5): 363-368. [Wu S H, Pan T, He S F. 2011. Primary study on the theories and methods of research on climate change risk[J]. *Advances in Climate Change Research*, 7(5): 363-368.]
- 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 等. 2017. 中国综合气候变化风险区划[J]. 地理学报, 72(1): 3-17. [Wu S H, Pan T, Liu Y H, et al. 2017. Comprehensive climate change risk regionalization of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 3-17.]
- 徐影, 张冰, 周波涛, 等. 2014. 基于CMIP5模式的中国地区未来洪涝灾害风险变化预估[J]. 气候变化研究进展, 10(4): 268-275. [Xu Y, Zhang B, Zhou B T, et al. 2014. Projected risk of flooding disaster in China based on CMIP5 models[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 10(4): 268-275.]
- 赵东升, 吴绍洪, 尹云鹤. 2011. 气候变化情景下中国自然植被净初级生产力分布[J]. 应用生态学报, 22(4): 897-904. [Zhao D S, Wu S H, Yin Y H, et al. 2011. Variation trends of natural vegetation net primary productivity in China under climate change scenario[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(4): 897-904.]
- AghaKouchak A, Cheng L Y, Mazdidasni O, et al. 2014. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(24): 8847-8852.
- Alfieri L, Feyen L, Di Baldassarre G. 2016. Increasing flood risk under climate change: A pan-European assessment of the benefits of four adaptation strategies[J]. *Climatic Change*, 136(3-4): 507-521.
- Blaikie P, Cannon T, Davis I, et al. 1994. At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters[M]. London: Routledge.
- Carpenter K E, Abrar M, Aeby G, et al. 2008. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts[J]. *Science*, 321(5888): 560-563.
- Castellari S. 2007. Climate change assessment report[EB/OL]. https://meteo.boku.ac.at/klima/berichte/CLIMATE-CHANGE-ASSESSMENT-REPORT_final.pdf.
- Cotton W R, Pielke R A. 2007. Human impacts on weather and climate[M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press.
- D'Ippoliti D, Michelozzi P, Marino C, et al. 2010. The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: Results from the EuroHEAT project[J]. *Environmental Health*, 9: 37.
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. *Geoscientific Model Development*, 9(5): 1937-1958.
- FAO. 2016. Climate change and food security: Risks and responses[M]. Rome, Italy: FAO.
- Fischer E M, Knutti R. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes[J]. *Nature Climate Change*, 5(6): 560-564.
- Gordon K. 2014. The economic risks of climate change in the United States-a climate risk assessment for the United States[EB/OL]. [2018-01-15]. <http://hdl.handle.net/10590/7165>.
- Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. 2013. Global flood risk under climate change[J]. *Nature Climate*

- Change, 3(9): 816-821.
- HM Government. 2012. UK climate change risk assessment: Government report[R]. London, UK: The Stationery Office.
- Höhne N, Luna L, Fekete H, et al. 2017. Action by China and India slows emissions growth, president Trump's policies likely to cause US emissions to flatten[EB/OL]. (2017-05-15)[2018-01-15]. http://climateactiontracker.org/assets/publications/briefing_papers/CAT_2017-05-15_Briefing_India-China-USA.pdf.
- Hulme M, Dessai S. 2008. Predicting, deciding, learning: Can one evaluate the 'success' of national climate scenarios [J]. *Environmental Research Letters*, 3(4): 045013.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: Impacts, adaptations and vulnerability: Contribution of working group II to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press.
- 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[R]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects: Working group II contribution to the IPCC fifth assessment report [M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press.
- Jones R. 2004. When do POETS become dangerous[C]//Proceedings of IPCC workshop on describing scientific uncertainties in climate change to support analysis of risk and of options. Maynooth, Ireland: National University of Ireland.
- Jones R N. 2001. An environmental risk assessment/management framework for climate change impact assessments[J]. *Natural Hazards*, 23(2-3): 197-230.
- Jones R N, Hennessy K J. 1999. Climate change impacts in the Hunter Valley[J]. *CSIRO Atmospheric Research*, 47(1-2): 91-115.
- Jones R N, Preston B L. 2011. Adaptation and risk management[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(2): 296-308.
- Kromp-Kolb H, Nakicenovic N, Steininger K, et al. 2014. Austrian climate change assessment report 2014: Summary for policymakers[M]. Wien, Österreich: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Lamb W F, Rao N D. 2015. Human development in a climate-constrained world: What the past says about the future[J]. *Global Environmental Change*, 33: 14-22.
- Li Y P, Ye W, Wang M, et al. 2009. Climate change and drought: A risk assessment of crop-yield impacts[J]. *Climate Research*, 39(1): 31-46.
- Melillo J M, Yohe G W. 2014. Climate change impacts in the United States: The third national climate assessment[J]. *Evaluation & Assessment*, 61(12): 46-48.
- Ploberger C, Filho W L. 2016. Towards long-term resilience: The challenge of integrating climate change related risks into a risk analysis framework[M]//Filho W L, Musa H, Cavan G, et al. *Climate Change Adaptation, Resilience and Hazards*. Cham, Germany: Springer.
- Prudhomme C, Wilby R L, Crooks S, et al. 2010. Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk[J]. *Journal of Hydrology*, 390(3-4): 198-209.
- Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, et al. 2014. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3268-3273.
- Roudier P, Andersson J C M, Donnelly C, et al. 2016. Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming[J]. *Climatic Change*, 135(2): 341-355.
- Schaller N, Kay A L, Lamb R, et al. 2016. Human influence on climate in the 2014 southern England winter floods and their impacts[J]. *Nature Climate Change*, 6(6): 627-634.
- Scholze M, Knorr W, Arnell N W, et al. 2006. A climate-change risk analysis for world ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(35): 13116-13120.
- Schuur E A, Abbott B. 2011. Climate change: High risk of permafrost thaw[J]. *Nature*, 480(7375): 32-33.
- UNEP. 2017. The emissions gap report 2017: A UN environment synthesis report[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP).
- UNFCCC. 1992. United Nations conference on environment and development: Framework convention on climate change[J]. *International Legal Materials*, 31(4): 849-873.
- United Nations. 2015. Paris agreement[EB/OL]. (2015-12-12)[2018-01-15]. http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.
- Urban M C. 2015. Accelerating extinction risk from climate

- change[J]. *Science*, 348(6234): 571-573.
- Van Minnen J G, Onigkeit J, Alcamo J. 2002. Critical climate change as an approach to assess climate change impacts in Europe: Development and application[J]. *Environmental Science & Policy*, 5(4): 335-347.
- Wilby R L, Keenan R. 2012. Adapting to flood risk under climate change[J]. *Progress in Physical Geography*, 36(3): 348-378.

Climate change risk and methodology for its quantitative assessment

WU Shaohong^{1,2*}, GAO Jiangbo¹, DENG Haoyu^{1,2}, LIU Lulu^{1,2}, PAN Tao¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China, 3. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

Abstract: Risk assessment is a core area of climate change research. Quantitative assessment methods have been developed particularly due to the needs for theory of mitigation and adaptation strategies, and have been applied to a great number of specific assessments. However, there have been different viewpoints of the risk composition of climate change, and overall, integrated classification by coupling risk causing factors and risk bearing bodies is lacking. This article illuminates the risk composition of climate change, including the danger of risk causing factors, the exposure and vulnerability of risk bearing bodies, and their interrelations. The emergence and change of risk were clarified. Based on the integrated analysis of risk causing factors and risk bearing bodies, this study divided the climate change risk quantitative assessment methods into sudden onset hazard risk and slow onset hazard risk assessment methods, then the theoretical elaboration and case analysis were conducted for the two types of risks respectively. Finally, according to the current status and needs, this article proposes the future development directions of climate change risk research, including risk assessment under different warming amplitude, vulnerability curve construction, and adaptation.

Key words: climate change; risk formation; quantitative assessment; methodology; progress and prospect