

中国综合气候变化风险区划

吴绍洪¹, 潘 韜¹, 刘燕华¹, 邓浩宇^{1,2}, 焦珂伟^{1,2}, 陆 晴^{1,2},
冯爱青^{1,2}, 岳溪柳^{1,2}, 尹云鹤¹, 赵东升¹, 高江波¹

(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, 北京 100049)

摘要: 气候变化作用于自然环境与社会经济系统, 产生一系列影响。随着未来社会经济发展, 气候变化危险性与自然环境和社会经济承险体耦合形成有规律的风险时空格局。将此时空格局系统化表达即是综合气候变化风险区划, 是适应气候变化的科学基础之一。本文基于RCP 8.5下的近中期(2021-2050年)气候情景, 分析了中国未来气温和降水变化趋势与速率, 评价了干旱、高温热浪以及洪涝等极端事件危险性, 选取人口、经济、粮食生产和生态系统等承险体风险作为综合风险定量评估的指标。在系统性、主导因素以及空间连续性原则的指导下, 提出中国综合气候变化风险区划三级区域系统方案, 划分出8个气候变化敏感区、19个极端事件危险区和46个承险体综合风险区。结果发现: 2021-2050年RCP 8.5情景下中国的气候变化高风险区主要包括: 华北弱暖增雨敏感区, 华北平原热浪危险区, 人口经济粮食高风险区; 华南—西南弱暖增雨敏感区, 黔滇山地热浪危险区, 生态经济粮食人口高风险区; 华南沿海涝热危险区, 生态粮食经济人口高风险区。中国综合气候变化风险区划涵盖了气候变化情景、极端事件发生、社会经济与生态系统的可能损失信息, 可以为国家或地方应对气候变化及气候变化风险管理提供科技支撑。

关键词: 综合气候变化风险; 区划; 气候变化敏感区; 极端事件危险区; 承险体综合风险区; 中国
DOI: 10.11821/dlxb201701001

1 引言

应对气候变化是近年来全球各国政界、学界以及公众持续关注的高度热点问题^[1-3]。联合国政府间气候变化工作委员会委员(IPCC)于2013年的第五次评估报告显示, 1880-2012年, 全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势, 升高了0.85 °C^[4]。以增暖为主要特征的全球气候变化导致社会和经济发展的气候驱动变率增大, 自然灾害呈现极端事件频次增加、灾害连锁反应、多灾并发等特点, 给对气候变化尤其是极端事件有着较高敏感性的人口、经济、农业以及生态系统等带来巨大风险^[5-6]。IPCC发布的《管理极端事件和灾害风险促进气候变化适应特别报告》(SREX)^[7], 评估了可导致自然灾害的气候、环境

收稿日期: 2016-07-22; 修订日期: 2016-10-10

基金项目: 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(2013034); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC19B10); 国家自然科学基金青年项目(41301092) [Foundation: Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.41530749; Grants Program of China Clean Development Mechanism Fund, No.2013034; National Science & Technology Pillar Program during the 12th Five-year Plan Period, No.2012BAC19B10; National Natural Science Foundation of China, No.41301092]

作者简介: 吴绍洪(1961-), 男, 广东潮州人, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110000894M), 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

和人类因素之间的相互作用,为全球决策者应对极端事件、管理灾害风险、提高气候变化适应能力提供了指南^[8]。巴黎气候变化大会的召开,建立了促进所有缔约方“增强适应能力、提高恢复力和降低气候脆弱性”的全球目标^[9]。在此推动下,适应气候变化将成为下一阶段应对气候变化的重点之一^[10]。

气候变化风险是指自然和人为干扰(人类活动)所形成气候系统的变化,对自然环境系统和社会经济系统造成不利影响的可能性及其程度的结合^[11]。随着未来社会经济发展,气候变化危险性与自然环境和经济社会承险体耦合形成有规律的风险时空格局。将此时空格局系统化的表达即是综合气候变化风险区划,是开展适应气候变化工作的科学基础之一。综合气候变化风险区划工作,即是在不同系统或部门气候变化风险综合评估的基础上,根据风险分布的空间规律,按照区域自然环境及社会环境的结构、功能及特点,划分成不同来源、不同等级的地区,为适应气候变化工作的空间配置等进行指导。只有明晰不同区域气候变化风险的来源、程度及主要特征,客观认识区域内及区域之间气候变化风险分布的相似性和差异性,从综合角度揭示气候变化风险的区域分异规律,确定风险管理的优先管理顺序,才能有效地实现综合气候变化风险分区管理,特别是对于风险管理的区域分工、区域战略、区域措施的制定提供理论依据,为区域内的生产和生活活动的抉择提供充分的风险信息。

区划作为揭示陆地表层地域分异规律的重要手段,在社会经济发展中一直起着重要作用^[12]。20世纪50年代,黄秉维等^[13]以农业生产为服务目标,建立地域系统的基础理论体系,将陆地表层复杂的状况进行了系统化表征,完成了中国综合自然区划;到20世纪80年代,中国的自然地域系统研究的方法论进一步规范化,区划理论进一步具体化^[14-17];20世纪90年代,随着生态与环境问题的日益突出,以生态建设和环境保护为服务目标的地域系统研究得到发展,将宏观生态系统的概念引用到区划工作中,完成了中国生态地理区域系统、中国生态区划等^[18-21]。21世纪以来,随着地球系统科学和可持续发展研究的深入,已有的区划已不能适应新形势的需求,集自然与社会经济要素的综合区划是目前发展的主要趋势。郑度、吴绍洪、葛全胜、樊杰等先后开展了综合区划工作的探索^[22-25],然而在综合区划的理论完善和技术支撑等方面仍存在诸多问题有待于完善。近期,在全球增暖背景下,史培军等完成了中国气候变化区划^[26]。借助于日益发展的地理信息技术,针对单一气候灾害的风险区划得以迅速而广泛地展开^[27-30]。然而,综合风险区划因其高度的综合性和系统性,需要考虑多重指标和复杂的系统内部关系,开展较为困难。综合气候变化风险区划既要考虑气候变化发展导致的危险性,也要考虑社会经济系统的脆弱性与暴露度,是综合区划工作的有益尝试。

综合气候变化风险区划是气候变化风险科学理论与实践应用的纽带与桥梁,其目标是服务于社会的可持续发展,并为适应气候变化和建立风险预警机制提供决策支持。综合气候变化风险区划是区域风险管理的重要手段之一,对中国而言,完整的综合气候变化风险区划方案必不可少。联合国气候变化框架公约(UNFCCC)指出其最终目标是将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上,这一水平应当在足以使生态系统能够自然地适应气候变化、确保粮食生产免受威胁并使经济发展能够可持续地进行的时间范围内实现^[31]。UNFCCC关注的3个受气候变化影响的主要领域为生态系统、粮食生产和社会经济系统,可作为表征某区域气候变化风险程度的重要指标。

鉴于此,本文在RCP 8.5情景下对中国2021-2050年粮食生产、生态系统、社会经济系统气候变化风险分类与综合评估的基础上,提出综合气候变化风险区划的原则方法和指标体系,建立综合气候变化风险三级区划系统,构建中国综合气候变化风险区划方案。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所需的数据主要用来开展未来气候变化情景下生态系统、粮食生产以及社会经济系统风险模拟预估以及验证。其中，气候变化情景数据是从多领域间影响模型比较计划(The Inter-Sectoral Impact Model Inter-comparison Project, ISI-MIP)获取的经空间降尺度、偏差校正后的5套“典型浓度路径”(Representative Concentration Pathways, RCP)情景下的全球气候模式(Global Climate Model, GCM)模拟结果。这5个GCM均来自于第五次耦合模式比较计划(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5)。RCP是IPCC发展的新一代温室气体排放情景,主要包括4种排放情景^[32-33]。本文选用的为RCP 8.5情景。RCP 8.5情景是最高的温室气体排放情景,假定人口增长最快、技术革新水平较低、能源改善十分缓慢,导致持续过高的能源需求以及大量的温室气体排放,2100年辐射强迫高达 8.5 W/m^2 ^[34]。

过去基准时期 CO_2 浓度数据来自美国NOAA/ESRL发布的全球大气 CO_2 浓度监测数据。土壤质地数据来自联合国粮农组织提供的全球土壤质地类型图。极端事件灾害数据来源于国家减灾委员会,包括洪涝、高温热浪、干旱等灾害的起止时间、强度以及损失情况。基准时段(1981-2010年)的气候数据来源于中国气象科学数据共享服务网。人口与国内生产总值(GDP)情景数据来源于共享社会经济路径(Shared Socio-economic Pathways, SSPs),每一个具体的SSP代表了一类发展模式,包括相应的人口、GDP、技术生产率、收入增长率以及社会发展指标(如收入分配)等定量数据,也包括对社会发展的程度、速度和方向的定性描述。根据IPCC情景组提供的RCPs与SSPs之间的对应情况,RCP 8.5一般对应于SSP 3社会经济情景。SSP3是局部发展或不一致发展,面临高的气候变化挑战。因此,本文选择SSP3社会经济情景,数据源来源于日本国立环境研究所基于国际应用系统研究所(IIASA)模拟的国家人口与GDP情景降尺度资料,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

2.2 综合气候变化风险预估方法

气候变化风险可主要分为两类致险事件:突发性事件和渐变事件。突发性事件的特点是,一旦发生即在短时间显现出危害和不利后果,气候变化因素相当于自然灾害中的致灾因子,通常表现为极端气候事件^[35-36]。对于这一类来说,气候变化风险是气候致险因子、承险体脆弱性及暴露度三者的函数。渐变事件的特点是,当系统的指标超过某个阈值,随即发生突变,产生不利影响^[37]。这类事件主要发生在气候因子既是发展动力,同时又是致险动力的领域中,如自然生态系统、农业生产等领域。此类风险的预估,必须是以该领域的变化趋势结合关键阈值开展。

本文中,气候变化下干旱、高温热浪、洪涝等极端事件导致的社会经济(人口和经济)风险用突发性事件的评估方法进行评估;粮食生产、生态系统的风险用渐变事件的评估方法,即阈值进行评估。最后,对人口、经济、粮食和生态4类承险体的风险基于主导因素等方法进行综合预估。

2.3 区划方法与指标体系

2.3.1 区划原则 综合气候变化风险区划原则是开展区划研究工作的基础,对区划指标选取、等级系统确定、区划方法选择等具有关键的指导作用。本文主要考虑以下若干原则:

(1) 系统性原则

综合气候变化风险是由不同风险事件之间相互作用、相互联系而形成的整体,单个

要素的变化,可能导致其他要素改变,以至影响到整个“共生”体系的演变。气候变化风险的发生、发展和管理涉及到自然生态系统及社会经济系统的多个方面,只有从整体、系统性的角度出发,才能全面认识和理解气候变化风险的发生和发展规律。

(2) 主导因素原则

中国的自然环境与社会经济要素具有明显空间差异,不同区域气候变化风险的主导因素不同。主导因素的变化可能会引起整个系统发生明显的改变。基于主导因素法进行气候变化风险区划利于风险管理与适应的开展。

(3) 空间连续性原则

空间连续性原则,又称共轭性原则,其要求所划分的区域作为个体保证空间连续性,不可分离且不重复。依据空间连续性原则,两个风险要素和等级相对一致的地区,若存在空间彼此分离的状况,则这两个地区不可划分为同一风险(危险)类型区。空间连续性原则对于自下而上合并的区域划分具有重要意义。

(4) 与行政边界相结合的原则

综合气候变化风险区划要为风险管理和适应提供决策支持,各级行政单元是气候变化风险管理与适应的基础。在进行综合风险区划时可适当调整风险区划界线以适应某级行政区划界线,这是一种牺牲分区的客观性以换取风险管理的可行性以及适应气候变化工作合理性和有效性的举措。

(5) 相对一致性原则

相对一致性原则是指任一气候变化风险区,区内相似性尽可能大,区际差异性尽可能大。对于不同的气候变化风险区域单元来说,气候变化敏感区的一致性体现在温度与降水变化的趋势与速率上大致相同;极端事件危险区的一致性体现在大致相近的气候变化背景下,极端气候事件发生的频率与强度也大体相同,承险体风险区的主体风险程度也大体一致。

2.3.2 区划方法 综合气候变化风险区划的方法和途径是贯彻区划原则的手段,而且区划的方法是与某一个或某几个区划原则相统一的。本文采用自上而下的演绎法和自下而上的归纳法相结合,对气候变化风险进行区划。无论是自上而下的演绎法还是自下而上的归纳法,都应顺序进行,这与区划的相对一致性原则和空间连续性原则是相统一的^[38]。

(1) 自上而下的演绎法

“自上而下”演绎方法是以宏观格局为基础,根据客观的自然规律以及某些区划指标,首先进行最高级别单元的划分,然后依次将已划分出的高级别单元根据相关因素的差异再划分成低一级单元,一直划分到最低级区划单元为止,是在较大范围上进行区划时多采用的方法。该方法从气候变化及自然环境的全局着眼,保证了气候变化风险区划的真实性和合理性,可避免自下而上归纳过程可能出现的跨区合并问题;但其也存在缺点,划分的界线较模糊,继续划分下一级单元的科学性和准确性值得怀疑。

(2) 自下而上的归纳法

“自下而上”归纳方法是通过对最小单元指标的分析,合并出最低级的区划单位,然后再在低级区划单位的基础上,逐步合并出较高级别的单位,直到得出最高级别的区划单位为止,是适用于小范围尺度区划的方法。该方法是在考虑大的自然地域分异规律、气候变化及自然灾害的背景下,综合低一级的各个指标,归纳为高一级的单元。“自下而上”区划不但是“自上而下”区划的重要补充,而且为区划提供较为准确的区划界线,“自下而上”区划界线才具有确定性。

在进行综合气候变化风险评估与区划时须拓宽思路，结合自上而下和自下而上的方法，在综合指导下分析，在分析基础上综合^[39]。具体来说，首先采用自上而下的演绎法确定气候变化敏感区，并在各大区范围内依据危险性指标（干旱、高温热浪、洪涝等）划分为极端事件危险区；基于各个指标的危險性和暴露度，获取不同指标的风险基本单元，小范围内进行自下而上的区域合并为不同承险体的综合气候变化风险区。

2.3.3 等级系统与指标体系 气候变化风险由致险因子危险性、承险体脆弱性与暴露度共同组成。为了充分反映气候变化风险的要素构成，本区划采用三级区划系统，即气候变化敏感区（一级）、极端事件危险区（二级）和承险体综合风险区（三级）。在遵循上述区划原则的基础上，首先基于RCP 8.5情景下2021-2050年气候变化情景数据，根据气温、降水的变化状况进行气候变化敏感区划分；然后根据干旱、高温热浪和洪涝发生的频次与强度划分极端事件危险区；最后，根据UNFCCC关注的三大领域^[31]，选择人口、经济、粮食生产、生态系统4个承险体，对不同气候变化敏感区和极端事件危险区进行承险体综合风险区划分。具体划分指标体系如下：

（1）气候变化敏感区 以气温、降水作为基础资料，利用最小二乘法线性拟合，分别计算二者在2021-2050年期间的变化速率。以全国所有栅格单元的气温平均变化速率作为划分标准，根据气温变化速率是否高于全国平均变化速率，将全国划分强暖敏感区或弱暖敏感区；以降水变化趋势的增减状况，将全国划分为增雨或减雨敏感区。

（2）极端事件危险区 分别选择综合气象干旱指数（GB/T 20481-2006）、高温热浪指数（GB/T 29457-2012）以及洪涝指数计算干旱、高温热浪和洪涝3种极端事件轻度、中度、重度发生的频次，进而根据极端事件发生的频次与强度，基于从重原则，采取叠置分析法得到不同地区极端事件危险性高低（表1）。

表1 极端事件危险区二级区划分指标体系

Tab. 1 The index system of the danger zones of extreme events

指标名称	轻度	中度	重度
综合气象干旱指数(CI)	$-1.8 < CI \leq -1.2$	$-2.4 < CI \leq -1.8$	$CI \leq -2.4$
高温热浪指数(HI)	$2.8 \leq HI < 6.5$	$6.5 \leq HI < 10.5$	$HI \geq 10.5$
洪涝指数(FI)*	30(35)~150 mm	150~250 mm	≥ 250 mm

注：洪涝指数是基于最大3日降水量达到一定数量的次数，并通过下垫面环境修正参数进行修正获得。表内洪涝指数的不同等级是最大3日降水量的不同等级。

（3）承险体综合风险区 承险体综合风险区是进行综合气候变化风险区划的最小单元。基于气候变化趋势与极端事件对粮食生产、生态系统、人口与经济系统的综合风险评估结果，分别划分粮食、生态、人口及经济等不同承险体的不同程度风险等级，再根据风险区划的原则，划分出不同区域的承险体综合危险区。其中，气候变化粮食生产风险的阈值主要是以RCP 8.5情景下2021-2050年多年粮食平均产量和1991-2000年粮食多年平均产量的比值判定，比值大于1无风险，反之则有风险；其中，比值高于0.98的为低风险；比值低于0.95为高风险，二者之间为中风险^[40]。气候变化对生态系统风险由RCP 8.5情景下2021-2050年生态系统净初级生产力（NPP）的变化趋势和速率确定，NPP趋势为正则无风险，反之有风险；负趋势中，NPP变化速率高于 $-20.62 \text{ gC/m}^2 \text{ a}$ （均值+标准差/4）的为低风险；低于 $-38.09 \text{ gC/m}^2 \text{ a}$ （均值-标准差/4）的为高风险，二者之间为中风险。人口承险体风险是通过RCP 8.5情景下2021-2050年干旱、洪涝极端事件的人口风险评价得到。在此基础上，由全部栅格的均值和标准差进行分级，受灾人口低于

25.0万(均值-标准差/4)的为低风险,高于129.3万(均值+标准差/4)的为高风险,二者之间为中风险。经济承险体风险是通过RCP 8.5情景下2021-2050年高温、洪涝极端事件的国内生产总值(GDP)风险评价得到,由全部栅格的均值和标准差进行分级,GDP损失低于3.5亿元(均值-标准差/4)的为低风险,高于10.1亿元(均值+标准差/4)的为高风险,二者之间为中风险。

3 结果分析

基于上述数据来源、区划原则与方法、等级系统与指标体系等,将全国划分为8个气候变化敏感区、19个极端事件危险区以及46个承险体综合风险区(表2)。

3.1 气候变化敏感区一级区

气温的变化是气候变化的最基础指标,降水变化也是表征气候变化的最关键指标之一。基于RCP 8.5情景下2021-2050年气温变化趋势与速率以及降水变化趋势与速率(图1a、1b),对全国进行气候变化敏感区一级区划分。一级区划在尊重气温与降水变化趋势和速率空间格局的基础上,以中国地貌单元和地形特征为辅助参考指标,将全国划分为8个气候变化敏感区,即华北强暖增雨敏感区、华北弱暖增雨敏感区、华东—华中强暖增雨敏感区、华南—西南弱暖增雨敏感区、西北强暖增雨敏感区、西北弱暖减雨敏感区、青藏高原弱暖增雨敏感区、青藏高原强暖增雨敏感区(图2),以罗马字母I、II、III等标记。从全国格局来看,中国国土范围内2021-2050年间在RCP 8.5情景下普遍增温,尤其是东北、西北、青藏高原中西部以及华东—华中部分地区呈强增暖趋势,在其他地区呈弱增暖趋势。从降水的变化格局来看,西北天山高山盆地、华东—华中地区降水呈减少趋势,其他地区降水呈增加趋势。

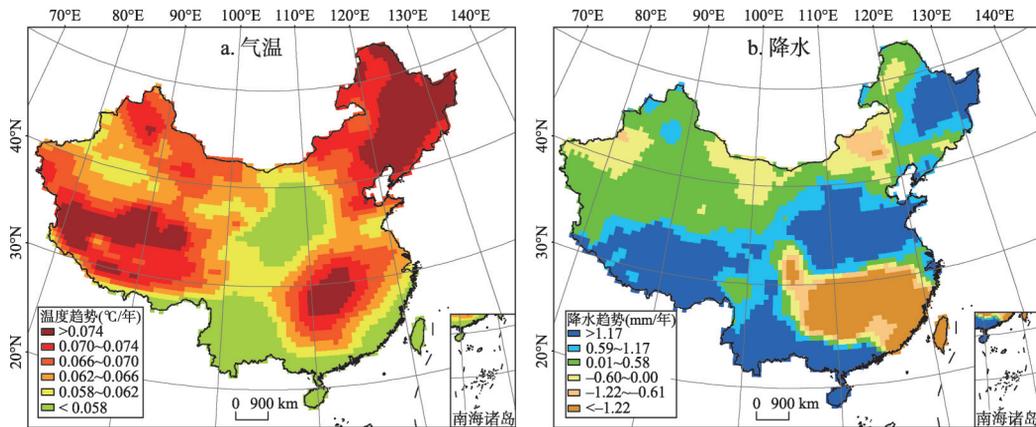


图1 中国未来气候变化趋势与速率(2021-2050, RCP 8.5)

Fig. 1 The variation trend and rate of the future climate change in China (2021-2050, RCP 8.5)

3.2 极端事件危险区二级区

基于RCP 8.5气候情景资料,分别计算了干旱、高温热浪和洪涝指数等极端事件的发生频次与强度,并在全国范围内划分了危险性等级(图3),用大写A、B、C、D、E等标记(表2)。可以发现,全国干旱高危险区主要分布在内蒙古南部、黄土高原、西南南部、西北北部、青海省及青藏高原西部等地区;干旱中危险区主要分布在内蒙古高原、华北、华南南部、新甘蒙丘陵平原、塔里木盆地南部、昆仑山脉、青藏高原中部和

表 2 中国综合气候变化风险区划系统

Tab. 2 The regionalization system of China's comprehensive climate change risk

气候变化敏感区	极端事件危险区	承险体风险区
I 东北强暖增雨敏感区	A 大小兴安岭—内蒙古高原干旱危险区	I A 1(ba) 经济人口低风险区
		I A 1(bac) 经济人口生态低风险区
	B 松辽平原—长白山山地洪涝危险区	I A 1(cab) 生态人口经济低风险区
		I A 2(cba) 生态经济人口中低风险区
		I A 3(cab) 生态人口经济中低风险区
		I B 1(ba) 经济人口低风险区
II 华北弱暖增雨敏感区	A 黄土高原干旱危险区	I B 2(ba) 经济人口中低风险区
		I B 2(bacd) 经济人口生态粮食中低风险区
	B 华东沿海洪涝危险区	II A 1(ba) 经济人口低风险区
		II A 2(badc) 经济人口粮食生态中低风险区
		II A 2(cba) 生态经济人口中低风险区
		II A 3(bacd) 人口经济生态粮食中低风险区
III 华东—华中强暖减雨敏感区	C 华北平原热浪危险区	II B 3(abc) 人口经济生态中低风险区
		II B 3(ba) 经济人口中低风险区
	D 鄂尔多斯高原旱热危险区	II B 4(abdc) 人口经济粮食生态中高风险区
		II C 3(bad) 经济人口粮食中低风险区
	E 长江中下游涝热危险区	II C 3(badc) 经济人口粮食生态中低风险区
		II C 5(abd) 人口经济粮食高风险区
IV 华南—西南弱暖增雨敏感区	B 东南沿海洪涝危险区	II D 1(bac) 经济人口生态低风险区
		II D 2(cab) 生态人口经济中低风险区
	C 四川盆地—鄂黔山地热浪危险区	III B 2(adb) 人口粮食经济中低风险区
		III B 4(dabc) 粮食人口经济生态中高风险区
		III C 2(abd) 人口经济粮食中低风险区
		III C 2(ba) 经济人口中低风险区
V 西北强暖增雨敏感区	A 滇西—滇中干旱危险区	III C 3(abc) 人口经济生态中低风险区
		III E 3(abc) 人口经济生态中低风险区
	C 黔滇山地热浪危险区	III E 4(abdc) 人口经济粮食生态中高风险区
		IV A 1(bac) 经济人口生态低风险区
	E 华南沿海涝热危险区	IV A 4(dcba) 粮食生态经济人口中高风险区
		IV C 3(bcda) 经济生态粮食人口中低风险区
VI 西北弱暖减雨敏感区	C 东塔里木盆地热浪危险区	IV C 5(cbda) 生态经济粮食人口高风险区
		IV E 3(dba) 粮食经济人口中低风险区
	D 新甘蒙—准格尔旱热危险区	IV E 5(cdab) 生态粮食经济人口高风险区
		V C 1(dba) 粮食经济人口低风险区
	A 天山高山盆地干旱危险区	V C 2(dab) 粮食人口经济中低风险区
		V D 1(abc) 人口经济生态低风险区
VII 青藏高原原弱暖增雨敏感区	C 西塔里木盆地热浪危险区	V D 1(ba) 经济人口低风险区
		V D 2(dab) 粮食人口经济中低风险区
	A 青藏高原东部干旱危险区	VI A 2(cbad) 生态经济人口粮食中低风险区
		VI C 1(d) 粮食低风险区
	B 东喜马拉雅南翼洪涝危险区	VI C 3(dba) 粮食经济人口中低风险区
		VII A 1(ba) 经济人口低风险区
VIII 青藏高原原强暖增雨敏感区	A 青藏高原中西部干旱危险区	VII A 2(dcba) 粮食生态经济人口中低风险区
		VII B 1(cab) 生态人口经济低风险区
	A 青藏高原中西部干旱危险区	VIII A 0 基本无风险区
		VIII A 1(dba) 粮食经济人口低风险区

横断山脉等地区。全国热浪高风险区主要分布在华北内陆、华东内陆、四川盆地、华南、内蒙古西部、准格尔盆地和塔里木盆地；热浪中危险区集中分布在东部沿海和黄河中游地区。全国洪涝高风险区主要分布在东部沿海、长江中下游平原和华南地区；洪涝

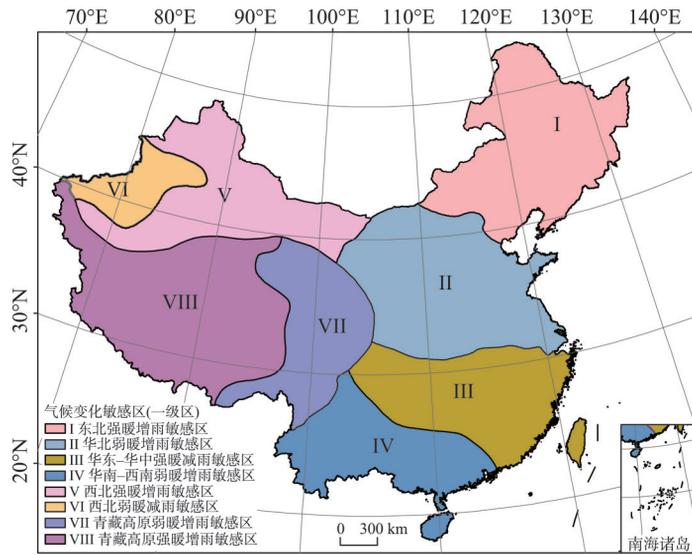


图2 中国综合气候变化风险一级区划(2021-2050, RCP 8.5)

Fig. 2 China's comprehensive climate change risk regionalization-level I (2021-2050, RCP 8.5)

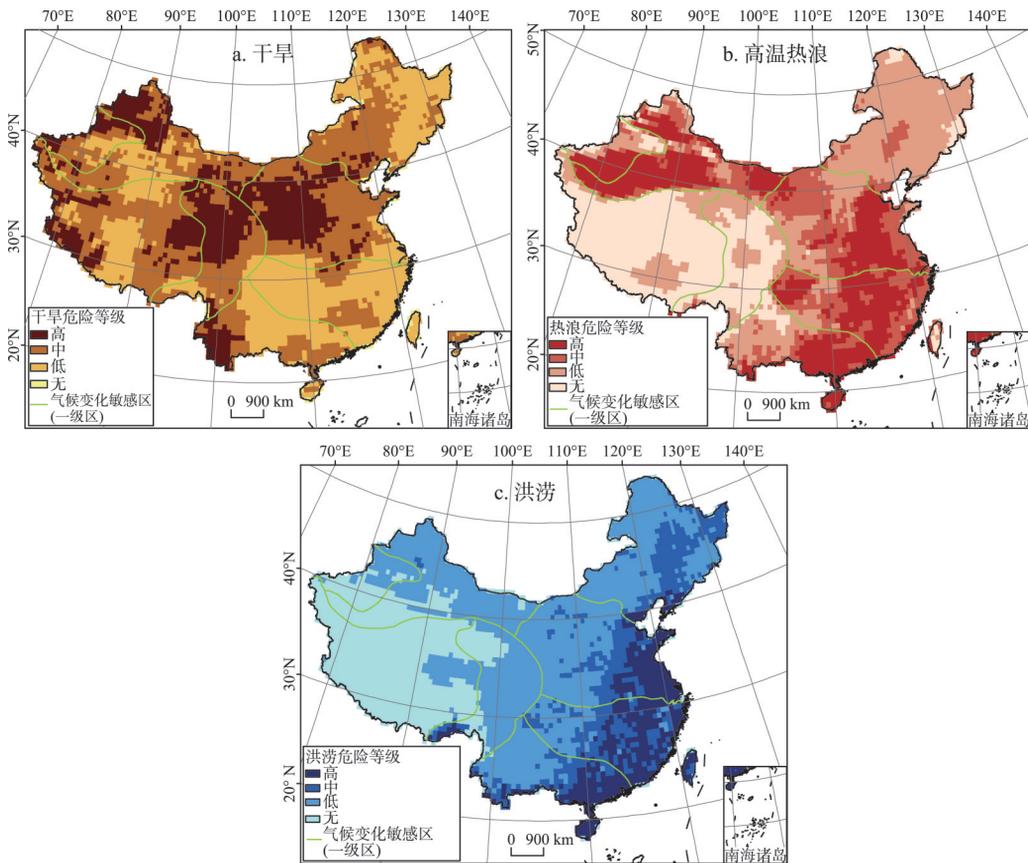


图3 中国未来极端气候事件危险性空间格局(2021-2050, RCP 8.5)

Fig. 3 The spatial pattern of the future hazard of extreme climate events in China (2021-2050, RCP 8.5)

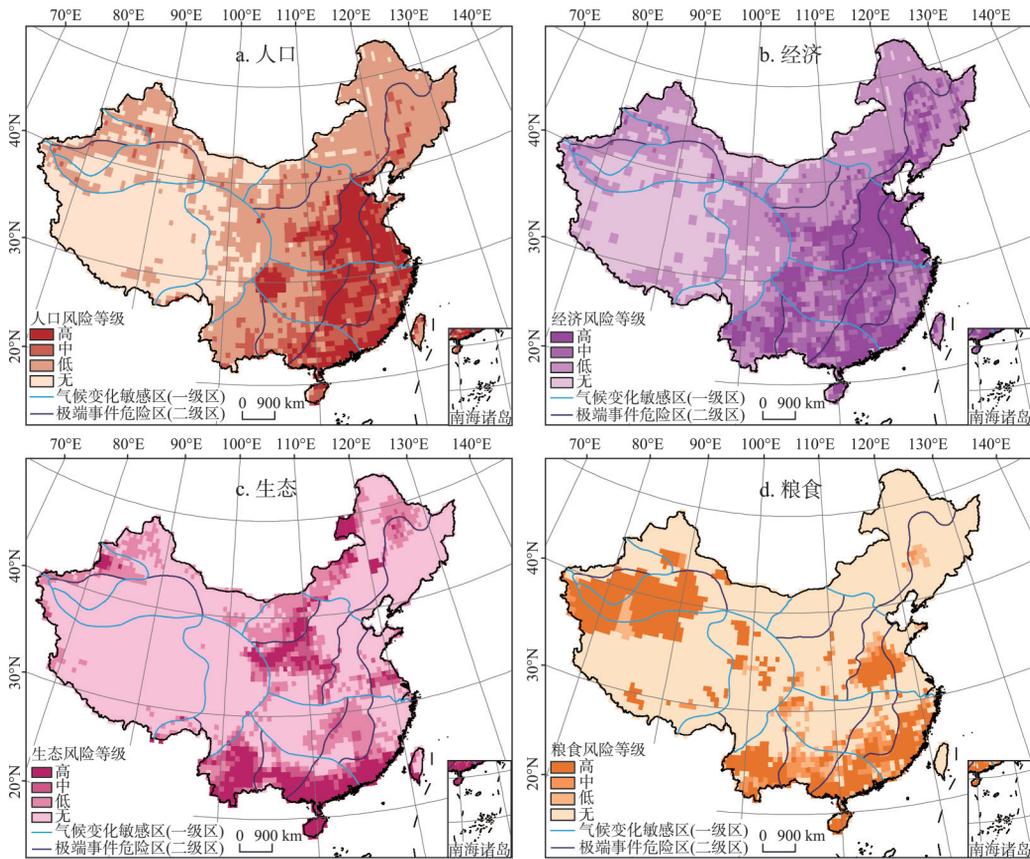


图5 中国未来不同承险体综合风险空间格局(2021-2050, RCP 8.5)

Fig. 5 The spatial pattern of the future comprehensive risk for different risk bearing bodies in China (2021-2050, RCP 8.5)

4 讨论

本文在以往综合自然区划研究方法论的基础上, 考虑气候变化风险的组成要素: 危险性、脆弱性与暴露度, 进而构建区划指标体系与等级系统。气候变化敏感区一级区, 重点在于揭示未来2021-2050年在RCP 8.5情景下, 中国国土范围内的气候变化趋势及其空间格局。需要说明的是, 这里的敏感区是指主要气候要素可能发生变化的区域。气候变化敏感区反映了气温与降水变化趋势和速率的空间格局, 是气候变化下粮食生产和生态系统风险形成的主要驱动力, 也显示气候变化风险产生的基本背景。极端事件危险区二级区, 目标在于揭示主要气象水文极端事件发生危险性的空间格局。本文选择了最为典型的、分布范围广泛的、易于受气候变化影响的三种极端事件, 定量评价了二者的频次和强度及其空间格局。实际上, 还有诸如低温冷冻、台风、风雹、雪、风暴潮等气象水文灾害可能与气候变化有关, 但其发生的区域性特征更为明显, 因而本次研究没有包括进来。极端事件是气候变化导致社会经济损失的主要途径, 一般表现为受影响人口、伤亡人口、造成GDP损失等。这里的经济损失不仅包括农业生产损失, 还包括二、三产业可能受到的经济损失。

此外, 本文中的粮食生产风险是基于作物模型模拟气候变化情景下产量的变化, 而极端事件导致GDP的损失虽然包括农业的损失, 与粮食生产风险并不重复。对于极端事

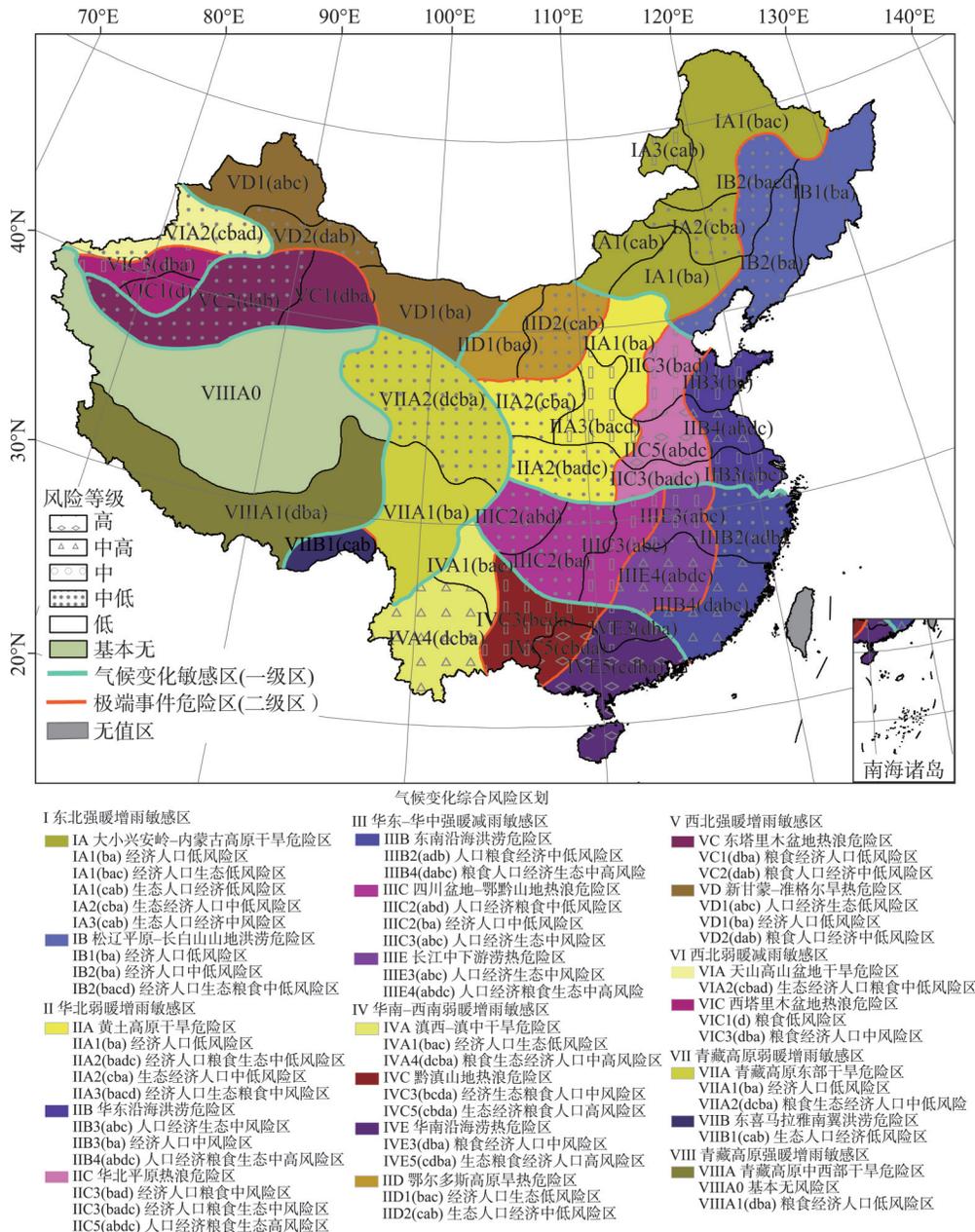


图6 中国综合气候变化风险区划(2021-2050, RCP 8.5)

Fig. 6 China's comprehensive climate change risk regionalization-Level III (2021-2050, RCP 8.5)

件风险，考虑到科技进步等因素，干旱基本不会造成人员伤亡，高温热浪也很少对经济造成直接的损失，本文主要评价了干旱对经济的风险、高温热浪对人口的风险以及洪涝对人口和经济共同风险的空间格局。在气候变化敏感区、极端事件危险区划分的框架内，在人口、经济、粮食、生态等不同承险体综合气候变化风险评估的基础上，划分了46个承险体综合风险区。承险体综合风险区是综合气候变化风险区划的最基本单元。如前所述，本区划之所以选择人口、经济、粮食和生态4个承险体作为风险评估的对象，是为了响应UNFCCC的最终目标。尽管如此，未来气候变化风险区划工作可以依据不同

的目标,不限于这4个承险体,尤其是在区域性气候变化风险区划工作的过程中,可以根据区域特点,适当增加承险体的数量,开展更有针对性的风险评估。

综合气候变化风险区划具有明显的时间尺度特征。一般认为30年是气候变化研究的最短时段,本区划选择2021-2050年的时段开展研究,IPCC在编写第三次和第四次评估报告时将1991-2020作为近期时段,2021-2050作为中期时段,2051-2080作为远期时段。但从目前看,2021-2050应该是近期时段,是整个人类社会需要马上着手应对气候变化的时段。然而,这并不意味着所有的气候变化风险区划都必须按照这样的时间尺度开展。不同时间尺度、不同时段可能存在不同的气候变化风险格局,也就需要展现不同的气候变化风险区划方案。应该根据不同区域、不同目标的需求,选择确定气候变化风险区划的时间段和尺度。

本综合气候变化风险区划是基于ISI-MIP计划的RCP 8.5下的气候情景完成的。由于当前研究水平的限制,还无法准确预测未来的气候,因此必须借助于情景分析开展研究。IPCC相继推出了增量情景、温室气体排放情景(SRES)、典型浓度路径情景(RCPs)。不同情景由于其科学假设的不同,其生产的气候情景数据也有所差异^[32, 41]。此外,气候情景数据还取决于使用的全球气候模式(GCM)及其降尺度的方法。如前所述,本文采用的是基于CMIP5的5个主流GCM的模式结果,ISI-MIP对其主要气候要素利用双线性插值方法插值为统一的水平分辨率 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,并采用基于概率分布的统计偏差订正法对插值结果进行逐一订正^[42-43]。因此,该数据的结果是基本可信的,也得到广泛的应用^[44-46]。然而,由于气候模式、排放情景都是研究全球尺度,在降尺度到中国区域过程中很可能产生了不确定性,这也在某种程度上导致了气候变化风险评估的不确定性。

此外,本文在区划的过程中,GIS等技术在区域划界起到重要的支撑作用。但多要素的综合仍然是本文遇到的一个难题。尽管采用了一些人工智能和模糊聚类方法,模拟传统陆地表层格局划分中专家对多要素的综合分析和界线划分,以降低人工区划的不确定性。然而我们发现,目前计算机辅助识别功能仍然不能完全替代人工经验知识。尤其是在划界过程中,由于其高度的综合性、概括性,对部分界线的识别和划定,仍需要将空间信息技术与专家经验知识相结合,才能得到最佳的区划方案。综合气候变化风险区划的人工智能化和自动化仍然是未来区划工作中需要突破的重要技术手段之一。

5 结论

本文以2021-2050年的RCP 8.5气候情景为基础,构建了基于气温与降水变化趋势和速率,干旱、高温热浪、洪涝发生危险性,以及人口、经济、粮食、生态风险的综合气候变化风险区划指标体系以及三级区划等级系统,辅以自然地貌单元、地形特征等,完成了中国综合气候变化风险区划(2021-2050, RCP 8.5)。

一级区划根据气温与降水变化趋势和速率将全国划分为8个气候变化敏感区;二级区划根据3种极端事件发生的频次与强度,将全国划分为19个极端事件危险区;三级区划在一级与二级区划的基础上,将全国划分为46个承险体综合风险区。该区划完整地揭示了中国2021-2050在RCP 8.5情景下的综合气候变化风险区域分异规律。

高风险区是:华北弱暖增雨敏感区,华北平原热浪危险区,人口经济粮食高风险区[II C 5(abd)];华南—西南弱暖增雨敏感区,黔滇山地热浪危险区,生态经济粮食人口高风险区[IV C 5(cbda)];华南沿海涝热危险区,生态粮食经济人口高风险区[IV E 5(cdab)]。

中高风险区是:华北弱暖增雨敏感区,华东沿海洪涝危险区,人口经济粮食生态中高风险区[II B 4(abdc)];华东—华中强暖减雨敏感区,东南沿海洪涝危险区,粮食人口经济生态中高风险区[III B 4(dabc)];长江中下游涝热危险区,人口经济粮食生态中高风险区[III E 4(abdc)];华南—西南弱暖增雨敏感区,滇西—滇中干旱危险区,粮食生态经济人口中高风险区[IV A 4(dcba)]。

参考文献(References)

- [1] Giddens A. The Politics of Climate Change. Routledge, 2009.
- [2] Pindyck R. Climate change policy: What do the models tell US? *Journal of Economic Literature*, 2013, 51(3): 860-872 (813).
- [3] Edenhofer O, Seyboth K. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Encyclopedia of Energy Natural Resource & Environmental Economics*, 2013, 26(D14): 48-56.
- [4] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [5] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 2012, 491(7424): 435-438.
- [6] Roderick M L, Sun F, Farquhar G D. Water cycle varies over land and sea. *Science*, 2012, 336(6086): 1230-1231.
- [7] IPCC. 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 and New York: Cambridge University Press, 2012.
- [8] Qin Dahe. Extreme Climate Events and Disaster Risk Management and Adaptation to the National Assessment Report of China. Beijing: Science Press, 2015. [秦大河. 中国极端气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [9] UNFCCC. The Paris Agreement (FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1) [R/OL]. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>, 2015.
- [10] Kahn M E. The climate change adaptation literature. *Review of Environmental Economics & Policy*, 2016.
- [11] Wu Shaohong. Integrated Risk Governance. Beijing: Science Press, 2011. [吴绍洪. 综合风险防范. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [12] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Fan Jie, et al. Retrospect and prospect of regionalization system of China. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1538-1545. [吴绍洪, 尹云鹤, 樊杰, 等. 地域系统研究的开拓与发展. *地理研究*, 2010, 29(9): 1538-1545.]
- [13] Huang Binwei. Draft of overall natural regionalization of China. *Chinese Science Bulletin*, 1959, 4(18): 594-602. [黄秉维. 中国综合自然区划草案. *科学通报*, 1959, 4(18): 594-602.]
- [14] Huang Binwei. Sketch of overall natural regionalization of China. *Geography*, 1989(21): 10-20. [黄秉维. 中国综合自然区划纲要. *地理集刊*, 1989(21): 10-20.]
- [15] Ren Meie, Yang Renzhang, Bao Haosheng. Sketch of Natural Regionalization of China. Beijing: The Commercial Press, 1979. [任美锷, 杨纫章, 包浩生. 中国自然区划纲要. 北京: 商务印书馆, 1979.]
- [16] Zhao Songqiao. A new scheme for overall natural regionalization of China. *Acta Geographica Sinica*, 1983, 38(1): 1-10. [赵松乔. 中国综合自然区划的一个新方案. *地理学报*, 1983, 38(1): 1-10.]
- [17] Xi Chengfan, Zhang Junmin, Qiu Baojian, et al. Sketch of Overall Natural Regionalization of China. Beijing: Science Press, 1984. [席承藩, 张俊民, 丘宝剑, 等. 中国自然区划概要. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [18] Zheng D. A study on the eco-geographic regional system of China. Cambridge, UK: FAO FRA2000 Global Ecological Zoning Workshop, 1999.
- [19] Yang Qinye, Zheng Du, Wu Shaohong. Research on eco-regionalization systems of China. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(3): 287-291. [杨勤业, 郑度, 吴绍洪. 中国的生态地域系统研究. *自然科学进展*, 2002, 12(3): 287-291.]
- [20] Fu Bojie, Liu Guohua, Chen Liding et al. Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6. [傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. *生态学报*, 2001, 21(1): 1-6.]
- [21] Zheng Du, et al. Research on Eco-geographical Region Systems of China. Beijing: The Commercial Press, 2008. [郑度, 等. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008.]

- [22] Wu Shaohong. The basic designation of integrated zonation: Case study of Chaidam Basin. *Geographical Research*, 1998, 17(4): 367-374. [吴绍洪. 综合区划的初步设想: 以柴达木盆地为例. *地理研究*, 1998, 17(4): 367-374.]
- [23] Zheng Du, Fu Xiaofeng. A preliminary study on issues of integrated geographical regionalization. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(3): 193-197. [郑度, 傅小锋. 关于综合地理区划若干问题的探讨. *地理科学*, 1999, 19(3): 193-197.]
- [24] Ge Quansheng, Zhao Mingcha, Zheng Jingyun, et al. Division of the terrestrial system in China: A case study from Huang's theory on terrestrial system science. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1): 1-6. [葛全胜, 赵名茶, 郑景云, 等. 中国陆地表层系统分区: 对黄秉维先生陆地表层系统理论的学习与实践. *地理科学*, 2003, 23(1): 1-6.]
- [25] Fan Jie. The scientific foundation of major function oriented zoning in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(4): 339-350. [樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. *地理学报*, 2007, 62(4): 339-350.]
- [26] Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming, et al. Climate Change Regionalization in China (1961-2010). *Science China: Earth Sciences*, 2014(10): 2294-2306. [史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961-2010年). *中国科学: 地球科学*, 2014(10): 2294-2306.]
- [27] Zhou Chenghu, Wan Qing, Huang Shifeng, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 15-24. [周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于GIS的洪水灾害风险区划研究. *地理学报*, 2000, 55(1): 15-24.]
- [28] Tang Chuan, Zhu Jing. A GIS based regional torrent risk zonation. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 87-94. [唐川, 朱静. 基于GIS的山洪灾害风险区划. *地理学报*, 2005, 60(1): 87-94.]
- [29] Wu Dongli, Wang Chunyi, Xue Hongxi, et al. The drought risk zoning of winter wheat in North China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 760-769. [吴东丽, 王春乙, 薛红喜, 等. 华北地区冬小麦干旱风险区划. *生态学报*, 2011, 31(3): 760-769.]
- [30] Tang Weian, Tian Hong, Yang Yuanjian, et al. Risk zonation of cold disaster based on GIS: A case study of Anhui province. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(3): 356-361. [唐为安, 田红, 杨元建, 等. 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*, 2012, 32(3): 356-361.]
- [31] United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change [R/OL]. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convchin.pdf>, 1992
- [32] Vuuren D P V, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 2011, 109(1/2): 5-31.
- [33] Edmonds J. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 2011, 109(1/2): 5-31.
- [34] Thomson A M, Calvin K V, Smith S J, et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 2011, 109(1/2): 77-94.
- [35] Li K, Wu S, Dai E, et al. Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China. *Natural Hazards*, 2012, 63(2): 737-760.
- [36] Liu Yi, Wu Shaohong, Xu Zhongchun, et al. Methodology for assessment and classification of natural disaster risk: A case study on seismic disaster in Shanxi Province. *Geographical Research*, 2011, 30(2): 195-208. [刘毅, 吴绍洪, 徐中春, 等. 自然灾害风险评估与分级方法论探研: 以山西省地震灾害风险为例. *地理研究*, 2011, 30(2): 195-208.]
- [37] Shi Xiaoli, Wu Shaohong, Dai Erfu, et al. Risk assessment of carbon sequestration for terrestrial ecosystems from climate change in China. *Geographical Research*, 2011, 30(4): 601-611. [石晓丽, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 气候变化情景下中国陆地生态系统碳吸收功能风险评价. *地理研究*, 2011, 30(4): 601-611.]
- [38] Wu Guanghe. *Physical Geography*. Beijing: Higher Education Press, 2008. [伍光和. *自然地理学*. 北京: 高等教育出版社, 2008.]
- [39] Yang Qinye. *The Integrated Studies of Geography and Land System Science*. Beijing: Science Press, 1999. [杨勤业. *地理综合研究与陆地系统科学*. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [40] Deng Guo, Wang Angsheng, Zhou Yushu. Grain Yield Risk Level Calculated by Probability Distribution. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2002, 25(4): 481-488. [邓国, 王昂生, 周玉淑. 粮食生产风险水平的概率分布计算方法. *南京气象学院学报*, 2002, 25(4): 481-488.]
- [41] Nakicenovic N, Swart R J. Special Report on Emissions Scenarios (SRES): A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Journal of Interpersonal*, 2000, 559.
- [42] Piani C, Weedon G P, Best M, et al. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 2010, 395(3/4): 199-215.
- [43] Hagemann S, Chen C, Haerter J O, et al. Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12(4): 556-578.
- [44] Davie J C S, Falloon P D, Kahana R, et al. Comparing projections of future changes in runoff and water resources from

hydrological and ecosystem models in ISI-MIP. *Earth System Dynamics Discussions*, 2013, 4(1): 279-315.

- [45] Portmann F T, Döll P, Eisner S, et al. Impact of climate change on renewable groundwater resources: Assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected CMIP5 climate projections. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 279-288.
- [46] Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3268-3273.

Comprehensive climate change risk regionalization of China

WU Shaohong¹, PAN Tao¹, LIU Yanhua¹, DENG Haoyu^{1,2}, JIAO Kewei^{1,2}, LU Qing^{1,2},
FENG Aiqing^{1,2}, YUE Xiliu^{1,2}, YIN Yunhe¹, ZHAO Dongsheng¹, GAO Jiangbo¹

(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)

Abstract: The influence of climate change on the natural environmental and socio-economic system leads to a series of adverse effects. With the development of socio-economy, climate change hazards interact with the environmental and socio-economic risk bearing body and form the spatial-temporal patterns of climate change risk. The systematic expression of the spatial-temporal patterns is the scientific foundation of climate changes adaptation. Based on the RCP8.5 climate scenario data from 2021 to 2050, we analyzed the variation trend and rate of temperature and precipitation, and assessed the hazard of extreme climate events including drought, heat wave and flood. Then, economy, population, food production and ecosystem were selected as the risk bearing bodies to assess the possible impacts of climate change as the indices qualifying the comprehensive climate change risk. Under the guidance of systematic principle, predominating factor principle, as well as the space consecution principle, we proposed a scheme of three-level regional division system for the comprehensive climate change risk regionalization in China. Finally, the Chinese mainland was divided into 8 climate change sensitive zones, 19 danger zones of extreme events and 46 comprehensive risk zones of bearing body. The result shows that the climate changes high risk zones in China under the RCP8.5 climate scenario from 2021 to 2050 include North China weak warming and precipitation increased sensitive zone, North China Plain heat wave danger zone, population-economy-food high risk zone, South China-Southwest China weak warming and precipitation increased sensitive zone, Yunnan- Guizhou mountain heat wave danger zone, ecosystem-economy-food-population high risk zone; coastal South China flood-heat wave danger zone, ecosystem-food-economy-population high risk zone. The comprehensive climate change risk regionalization of China covers the climate change scenarios, the extreme events, and the possible lost information of the socio-economy and ecosystem, which can provide scientific and technological support for national and local governments to cope with the climate change and risk management.

Keywords: comprehensive climate change risk; regionalization; climate change sensitive zones; danger areas of extreme events; comprehensive risk zones of bearing body; China