

刘星才, 汤秋鸿, 尹圆圆, 等. 气候变化下中国未来综合环境风险区划研究[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 636-644. [Liu Xingcai, Tang QiuHong, Yin Yuanyuan et al. Regionalization of Integrated Environmental Risk of China Under Future Climate Change. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 636-644.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.04.018

气候变化下中国未来综合环境风险区划研究

刘星才¹, 汤秋鸿¹, 尹圆圆¹, 徐新创²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 湖北科技学院, 湖北 咸宁 437100)

摘要: 综合环境风险区划是变化环境下开展综合防灾减灾工作的基础, 对于综合风险防范措施的制定具有指导意义。以农业、生态和人群3个系统为主要受灾体, 从作物产量、生态系统变迁、高温热浪对人群的影响3个方面综合评估了4种典型浓度路径(Representative Concentration Pathways)RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景下21世纪末期(2071~2099年)的中国综合环境风险, 并以RCP8.5情景为例编制了未来综合环境风险区划。结果表明, 该时期中国综合环境风险主要出现在黄淮海地区、华南部分地区和青藏高原部分地区。综合环境风险区划共分为6个一级区和43个二级区; 一级区分别为西北低风险区、东北生态较低风险区、青藏高原生态中度风险区、晋陕生态-农业中度风险区、华南农业高风险区、黄淮海农业-热浪高风险区。

关键词: 综合环境风险; 气候变化; 综合区划

中图分类号: P96

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2018)04-0636-09

综合环境风险是以自然和人类社会为主要受灾体, 综合考虑多种灾害发生概率及其危害程度, 综合评估多种灾害给受灾体带来的损失^[1]。综合环境风险区划是基于一定的区划原则和方法, 在综合环境风险评估的基础上, 对研究区进行的区域划分, 以减轻环境风险和实现区域可持续发展为目的, 对制定综合防灾减灾对策具有指导意义^[2]。综合环境风险区划, 按分类单元在空间上的连续性, 包括区域区划和类型区划。本研究提及的区划为区域区划, 即每一分类单位在地域上相连, 且空间上不可重复^[3]。中国学者先后开展了大量的自然灾害区划研究^[4]。已有自然灾害区划包括如下两类: ① 针对某一部门的自然灾害区划, 如全国农业自然灾害综合区划^[5-7], 中国城市自然灾害区划^[8,9], 中国粮食产量风险区划^[10]; ② 针对某一灾种的自然灾害区划, 如中国洪水灾害危险程度区划^[11-15]。

迄今为止, 面向未来的综合风险评估及相应的区划研究依然少见。随着社会经济的发展,

现代环境风险表现出更明显的综合性和复杂性^[16,17]。但由于不同灾害之间的相互作用和影响, 多灾害之间的转化也容易带来不可预料的风险和困难, 单一灾种的评估和区划往往难以全面反映灾害带来的环境风险^[18-20]。现代风险具有显著的影响范围广、高度不确定、综合性突出、破坏力强等特点, 且风险形成机制复杂, 不易预测^[16]。因此, 面对现代环境风险, 全球和各国都非常有必要采用综合思想、技术和管理手段进行风险防范和管理。

气候变化是近几十年来自然灾害主要诱因之一, 其带来的各种自然灾害对中国和全球社会经济均造成了巨大损失^[21-23]。未来气候变化可能进一步增加受灾体面对多种风险的暴露度, 影响灾害发生频率、危害程度和波及范围^[24]。本文在国家重点基础研究发展计划——全球变化与环境风险关系及其适应性范式研究的支持下, 通过预估未来气候变化、评估气候变化带来的环境风险对自然和人类社会的负面影响, 开展了中国未来综合

收稿日期: 2017-03-13; **修订日期:** 2017-07-20

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2012CB955403)、国家杰出青年科学基金项目(41425002)、中组部青年拔尖人才计划项目资助。[Foundation: The National Basic Research Program of China (2012CB955403), National Science Fund for Distinguished Young Scholars (41425002), the National Youth Top-notch Talent Support Program in China.]

作者简介: 刘星才(1984-), 男, 江西吉安人, 助理研究员, 主要从事陆地水循环和气候变化研究。E-mail: xingcailiu@igsrr.ac.cn

通讯作者: 汤秋鸿, 研究员。E-mail: tangqh@igsrr.ac.cn

环境风险区划研究,以期为应对和防范气候变化带来的环境风险提供基础。

1 数据和方法

本文针对农业、生态系统和社会3个重要的受灾体,分别从作物产量、生态系统变迁以及高温热浪对人群的影响3方面开展风险评估。农业风险评估主要基于中国4种主要农作物的产量变化:水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)和大豆(*Glycine max*)^[25];作物产量是反映农业生产系统状况的重要指标。生态系统变迁风险主要基于生态系统状态的稳定性^[26],采用 I 指数来描述^[27],该指标可以有效评估生态系统健康状况及其变化。高温热浪风险基于未来高温热浪事件致死可能性估计^[28];高温热浪的危害是气候变化直接影响高密度人群地区(如城市)的人类生活甚至生命的主要方面。农业、生态系统和高温热浪3种环境风险的评估均采用了4种排放情景(Representative Concentration Pathways, RCP)下5个气候模式(General Circulation Model, GCM)的气候输出数据。4种排放情景为RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5,5个GCM分别是GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM、NorESM1-M。本文所有风险评估均在0.5度空间网格上开展,评估时段为21世纪末期(2071~2099年);单种环境风险的评估已在相应文献详细说明^[25, 26, 28],此处仅简要叙述其评估方法。

1) 农业风险预估。基于5个气候模式输出结果驱动下的6个全球网格化作物模型(EPIC、GEPIC、IMAGE、LPJ-GUESS、pDSSAT和PEGASUS)的模拟结果,估算气候变化对未来中国主要农作物产量的变化,评估结果采用多模型中值^[25]。以1980~2010年为基准期,计算未来农作物产量的相对变化,根据相对变化(MR,减产或增产程度)定义农业风险:MR>0为无风险,−5%<MR≤0为较低,−10%<MR≤−5%为低,−15%<MR≤−10%为中,−20%<MR≤−15%,MR≤−20%为极高。

2) 生态风险预估。基于5个气候模式输出结果驱动下的4个全球网格化植被模型(JeDi、JULES、LPJmL和VISIT)的模拟结果,采用综合考虑碳通量、碳储量和水分通量变化的自然生态系统迁移指数^[27]为指标,评估了不同RCP情景下中国自然生态系统的气候变化风险^[26]。计算公式如公

式1。生态风险等级定义如下:0≤ I <0.1为较低风险;0.1≤ I <0.2为低风险;0.2≤ I <0.3为中风险;0.3≤ I <0.4为高风险;0.4≤ I 为极高风险。

$$I = [\Delta V + cS(c, \sigma_c) + gS(g, \sigma_g) + bS(b, \sigma_b)]/4 \quad (1)$$

式中, I 为生态风险指数(0~1), ΔV 为植被结构变化, c 为网格内生态系统变化, g 为网格相对于整个研究区的生态系统变化, b 为生态系统要素相对变化程度, $S(x, \sigma_x)$ 为 c 、 g 和 b 的年际变化。

3) 热浪风险预估。采用相对阈值与绝对阈值相结合的方法来设置热浪的临界温度值,即至少持续3 d,日最高温度不低于基准期(1980~2010年)的95百分位温度值,且不低于32℃。结合调查资料和已有研究分析夏季高温热浪期间气温与同期死亡率相对平均状态下增量之间的关系曲线,推断气候变化下人群相对热浪的脆弱性程度及其空间分布格局^[28]。

1.1 综合环境风险评估方法

综合环境风险评估是综合环境风险区划的基础,一般包括如下几个方面:灾害评估、多灾害评估、暴露度评估、脆弱性评估、多灾害风险评估。1970年以来,各国学者逐步开展多灾害风险的综合评估研究^[29, 30]。不同研究中由于服务对象或研究目标的差异,所采用的评估方法略有不同。当前综合环境风险评估通常采用综合指数法对多种灾害的影响进行定量化。例如,联合国开发计划署(United Nations Development Programme, UNDP)采用灾害风险指数(Disaster Risk Index)评估国家尺度上多种灾害带来的人群死亡风险^[31]。欧盟国家采用空间相关的多灾害风险综合指标用于欧洲地区综合风险及其空间特征评估^[32]。多灾害风险综合指标一般有以下特征:①面向多种灾害,需要考虑多领域/部门的风险;②只关注空间上存在相关性的灾害风险,但对于空间相关较大的传染病以及相对单一的交通事故等灾害风险暂时不予考虑;③只关注对集体/人群造成危害的集合风险,对于个体所承受的风险不予考虑。Shi等^[33]提出了多灾害指数和多灾害风险指数分别对全球洪水、干旱、地震、台风等12种灾害及其风险进行了综合评估。

针对气候变化影响下社会经济、自然生态和人群等不同受灾体,本文在农业^[25]、生态系统^[26]和高温热浪^[28]3种环境风险评估基础上,参考Shi等^[33]多灾害风险指数估算了气候变化下的综合环境风险:

$$IERI = \sum_{i=1}^{n=3} r_i \times w_i \quad (2)$$

式中, $IERI$ 为综合环境风险指数, r_i 是第 i 种灾害风险水平, n 为风险种类数, w_i 是第 i 种灾害风险水平的权重(本文使用等权重进行计算)。综合环境风险分为5级, ≤ 1 表示极低风险, ≥ 5 表示极高风险。

1.2 综合环境风险区划方法

本文根据综合环境风险评估结果(图1),参考Shi等^[34]区划原则和“自上而下”的方法进行综合环境风险一级区划分。具体步骤如下:①根据综合环境风险评估结果确定气候变化敏感区域,如青藏高原地区和黄淮海平原,这类区域表现出对气候变化显著的响应,而且在空间上有较好的连续性,易于识别;②明确其他综合环境风险空间不连续范围,根据空间连续性和取大去小原则,采用“自上而下”方法确定各个分区边界;③根据主导因素原则确定各个分区的主要环境风险及其程度;④结合各个分区所在的地理或行政区划位置,确定分区名称和内涵。

根据环境风险特征,采用“自下而上”的方法将每个综合环境风险一级区进一步划分为多个二级区,以便更有针对性地进行气候变化影响应对和防范。首先将网格尺度的风险评估转换成县(市)级单元评估结果(图2),通过对农业、生态和高温热浪风险评估结果叠加分析,由多个具有相似风险特征的县(市)合并得到综合环境风险二级区。将农业、生态系统和高温热浪3种主要环境风险均划分为5个等级,即极低、低、中、高、极高风险,3种风险等级相同或相似的区域即为综合风险二级区。为了防止二级区过多过于零碎,合并过程中会适当地包含周边零散的、至少两种风险等级与主要区域相同的县(市);上述条件均不满足,且面积过小不宜划分为一个二级区时,将其合并到周边主要风险等级相差一级的二级区。综合环境风险二级区以主要环境风险等级命名。

2 综合环境风险区域特征

基于前述3种^[25, 26, 28]的风险评估结果,利用综合环境风险指数(式2),评估了2071~2099年4种气候变化情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5)下的中国综合环境风险(图1)。同时,将3种风险叠加显示,以明确不同区域的主导环境风险(图2)。采用前述综合与主导相结合的原则确定

综合环境风险区域特征及风险程度。综合环境风险分为10级,其中1级最低、10级最高。总体来看,RCP2.6情景下中国综合环境风险最低,RCP8.5情景下风险最高。综合环境风险主要集中在气候变化敏感区,如黄淮海平原、青藏高原地区等。黄淮海平原地区农业生产发达、人口密集,尤其是淮河以北地区,水资源比较匮乏,农业发展面临较大的风险^[35]。青藏高原地区是中国另一个重要的气候变化敏感区,该地区的气候变暖往往早于中国甚至全球其他地区,升温幅度也大于全球平均水平^[36]。

RCP2.6情景下,综合环境风险主要集中在气候变化敏感区域,如黄淮海平原部分地区存在低风险(图1a);青藏高原地区人烟稀少,自然环境独特,其面临的主要环境风险是气候变化下生态系统变迁的风险^[26]。

RCP4.5情景下,中国西部地区的综合环境风险有一定程度增加,尤其是青藏高原地区,部分综合环境风险达到中度水平,风险范围也扩大至高原东部边缘地区(图1b);甘肃和青海部分地区、黄河上游地区也存在低度风险。西部地区人口密度相对较低,主要表现为生态系统和农业风险。由于气温上升、大气CO₂浓度上升在一定程度上对作物/植物生长有一定促进作用^[37],黄淮海地区综合环境风险在该情景下相对略有收缩,风险主要出现在华北平原,包括河北、山东与河南部分地区。华北平原地区一直以来受水资源短缺问题影响,全球变暖又增加了高温热浪风险^[38, 39]。珠江流域少部分地区也开始出现较轻度的综合环境风险,主要是南方地区高温增加导致作物生长受到较大影响。

RCP6.0情景下(图1c),中国西部、黄淮海平原以及东北地区综合环境风险均有增加。其中,青藏高原地区综合环境风险级别更高,范围向周边扩大,甚至延伸到云南、四川等地区。黄淮海平原地区也有类似变化,部分地区综合风险为中度,主要是农业和高温热浪风险。东北地区综合环境风险增加区域主要在黑龙江东部和内蒙古东部地区,主要是农业和生态系统风险。

RCP8.5情景下(图1d),综合环境风险显著增加,尤其是黄淮海平原,大部分地区处于高风险水平;与黄淮海平原相邻的长江中下游地区也出现了较明显的综合环境风险。青藏高原地区大部分地区综合环境风险依然处于低风险、部分地区达中度风险水平,但风险波及范围进一步往周边

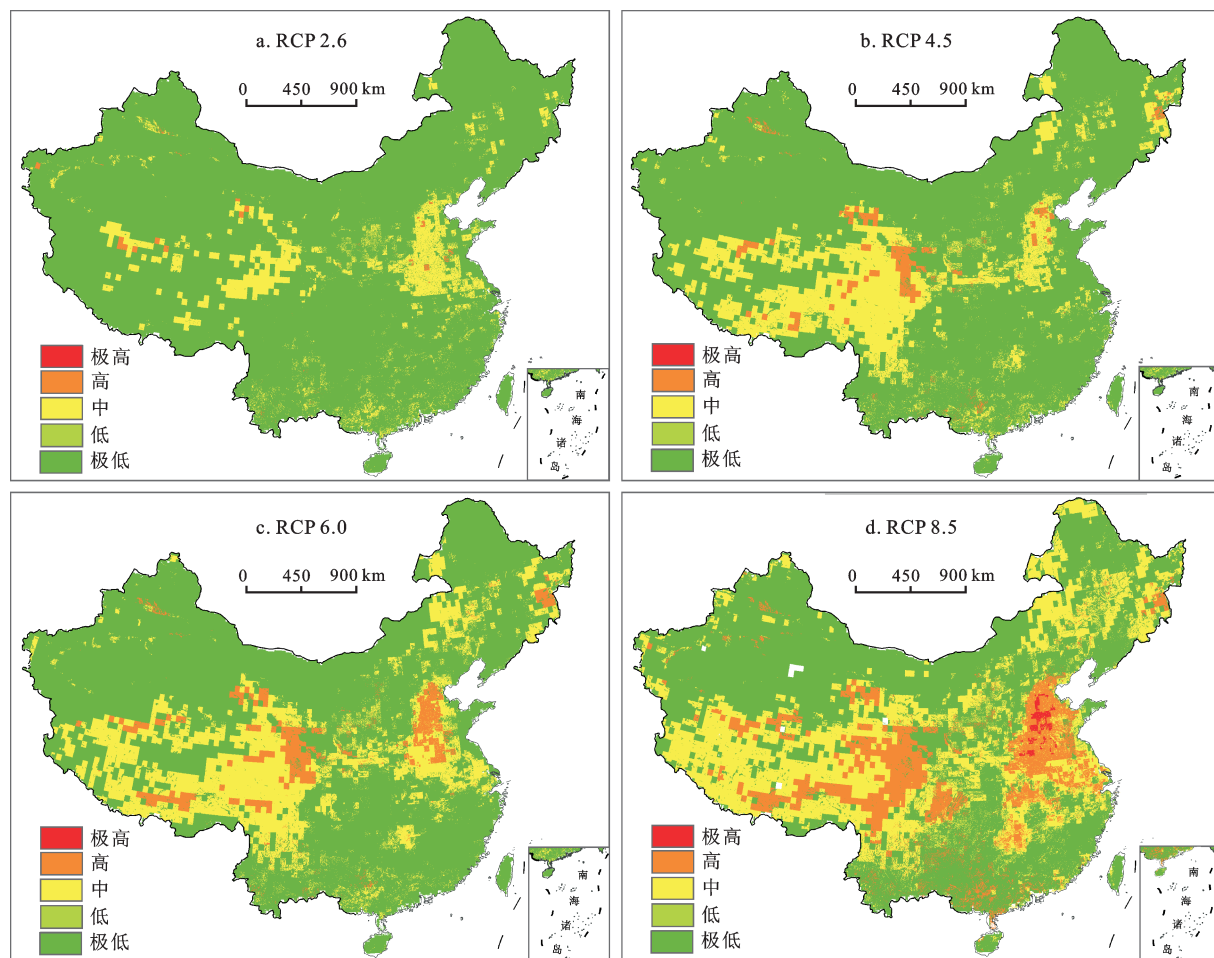


图1 21世纪末期(2071~2099年)中国大陆域综合环境风险预估结果

Fig.1 Integrated environmental risk of China in 2071-2099

扩大。东北地区综合环境风险范围略有扩大,部分地区有中度风险。值得注意的是,四川盆地和珠江流域均出现了中度的风险。此外,晋陕甘部分地区也存在一定程度的综合环境风险。RCP8.5情景气温升高明显,因此中国南部和东部大部分地区都面临较大的高温热浪和农业风险,青藏高原等高寒地区面临巨大的生态变迁压力。

图2显示了以县(市)为单元的气候变化下农业、生态系统和高温热浪风险评估结果。县(市)评估结果由网格平均得到,并将环境风险等级合并为5个,保留相似的空间分布。图2综合展示了各个地区在气候变化影响下的3种环境风险及其程度,有助于明确综合环境风险一级分区的主导环境风险以及进一步划分综合环境风险二级分区。

3 综合环境风险区划方案

依据2.2所述综合环境风险区划方法,在图1d

基础上将全国划分为6个综合环境风险一级区(表1),根据图2再划分出43个二级区(表2)。6个一级区分别命名为西北低风险区、东北生态较低风险区、青藏高原生态中度风险区、晋陕生态-农业中度风险区、华南农业高风险区、黄淮海农业-热浪高风险区(图3)。本文在综合环境风险区划过程中也考虑了各区的社会经济条件。尽管气候变化将给西北地区农作物单产带来一定负面影响,但由于该地区农业面积所占比例很小,因此本文将该地区归为气候变化低风险区。一级区命名规则采用“地名+主要风险及程度”形式并结合图1d和图2信息确定,二级区命名采用三种风险程度组合形式,便于识别区域主要环境风险特征。各一级区特征简要描述见表1;由于区域环境特征的差异,各一级区包含的二级区数量差别较大,分别含有2、6、8、7、10和10个。

表1 综合环境风险区划特征

Table 1 Characteristics of integrated environmental risk zones

综合环境风险区 ^a	特征 ^b	主要环境风险
西北低风险区(2)	气候干燥、降水很少,地表覆盖以荒漠/沙漠为主,有少量绿洲,人口密度很低,农业很少;未来气温上升约5.7℃,降水增加约15.6%	有轻度农业风险,但面积较少,总体风险低
东北生态较低风险区(6)	处于高纬度地区,气温较低,属于半湿润/半干旱地区;植被以草地和森林为主;农业较为发达,是中国主要粮食产区之一,人口密度中等;未来气温上升约5.75℃,降水增加约16%	以农业和生态风险为主,两种风险均分布不广,程度中等或偏低
青藏高原生态中度风险区(8)	自然地理环境独特,海拔高、气温低,冰雪覆盖面积较大,是中国重要河流发源地;植被以高寒草地草甸为主,生态系统相对较为脆弱;人口稀少,农业极少;未来气温上升约5.5℃,降水增加约22%	以生态风险为主,程度中等、少部分地区偏高
晋陕生态-农业中度风险区(7)	黄土高原和太行山脉山区,大部分属于半干旱地区;植被覆盖较少,部分为人工植被;农业较发达,人口密度中等;未来气温上升约4.9℃,降水增加约16.5%	以农业和生态风险为主,程度中等
华南农业高风险区(10)	南方湿润地区,覆盖了长江中下游大部、珠江流域和东南沿海地区;气温较高,水量丰沛;植被覆盖好;农业发达,是中国主要粮食产区之一;人口密度高;未来气温上升约4.6℃,降水增加约7%	以农业风险为主,主要在珠江流域,程度偏高;部分地区有较中低程度的高温热浪风险
黄淮海农业-热浪高风险区(10)	主要为黄淮海平原,覆盖黄河下游、淮河与海河大部分地区,属于半干旱/半湿润地区;农业发达,中国主要粮食产区之一,人口密度高;未来气温上升约5℃,降水增加约11%	以农业风险和高温热浪风险为主,程度都偏高

注:^a分区名称括号中为二级区数目;^b未来气候变化指RCP8.5情景下5个GCM预估的2071~2099年相对1980~2010年的变化中值。

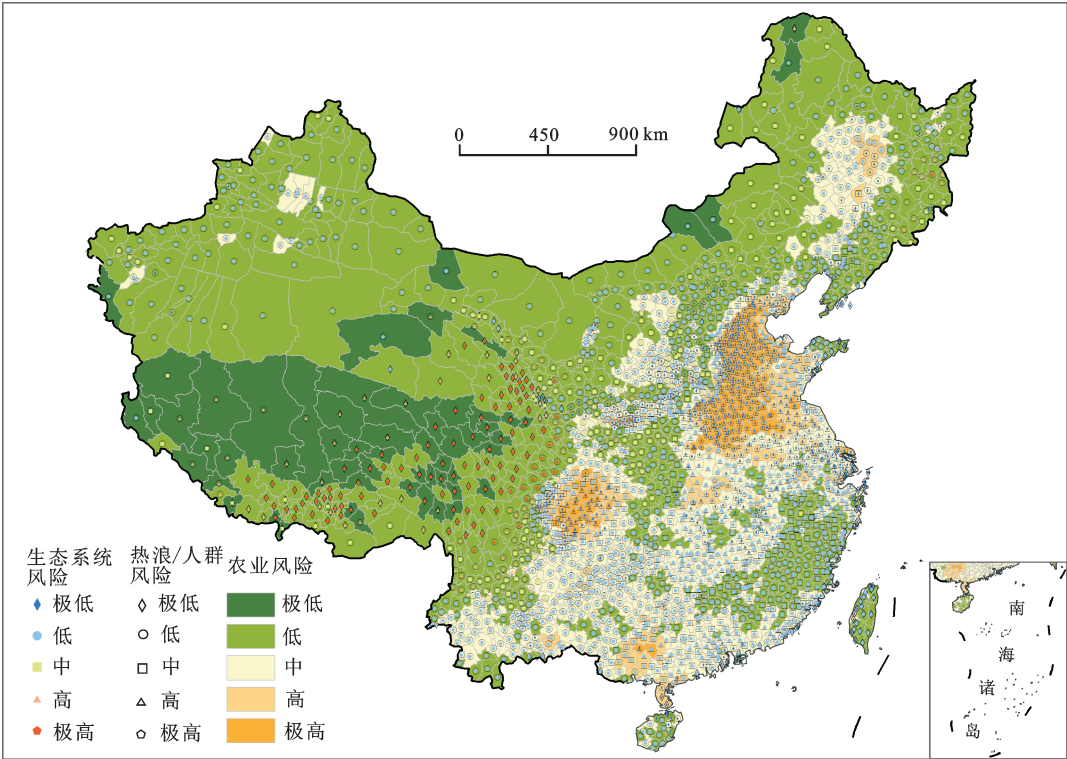


图2 RCP8.5情景下以县/市为单元的气候变化风险评估结果(2071~2099年)

Fig.2 Environmental risk for counties of China under RCP8.5 during 2071-2099

表2 综合环境风险二级区
Table 2 Subregions of Integrated Environmental Risk Zones

代码	二级区名称	代码	二级区名称
Ia	农业低风险-生态低风险-热浪低风险区	IVg	农业低风险-生态中低风险-热浪低风险区
Ib	农业中风险-生态低风险-热浪低风险区	Va	农业高风险-生态极低风险-热浪高风险区
IIa	农业低风险-生态中风险-热浪低风险区	Vb	农业中风险-生态低风险-热浪低风险区
IIb	农业低风险-生态低风险-热浪低风险区	Vc	农业极低风险-生态低风险-热浪低风险区
IIc	农业中风险-生态低风险-热浪低风险区	Vd	农业中风险-生态低风险-热浪极高风险区
IId	农业低风险-生态高风险-热浪低风险区	Ve	农业低风险-生态中低风险-热浪中低风险区
IIe	农业低风险-生态低风险-热浪中风险区	Vf	农业中风险-生态低风险-热浪高风险区
IIf	农业低风险-生态极低风险-热浪低风险区	Vg	农业高风险-生态低风险-热浪中风险区
IIIa	农业极低风险-生态高风险-热浪极低风险区	Vh	农业中风险-生态低风险-热浪中高风险区
IIIb	农业低风险-生态极高风险-热浪低风险区	Vi	农业中低风险-生态低风险-热浪低风险区
IIIc	农业低风险-生态中低风险-热浪低风险区	Vj	农业低风险-生态低风险-热浪极低风险区
IIId	农业极低风险-生态极高风险-热浪极低风险区	VIa	农业中风险-生态低风险-热浪中高风险区
IIIe	农业低风险-生态极高风险-热浪极低风险区	VIb	农业极高风险-生态极低风险-热浪极高风险区
IIIf	农业低风险-生态高风险-热浪极低风险区	VIc	农业高风险-生态极低风险-热浪中高风险区
IIIg	农业低风险-生态高风险-热浪低风险区	VId	农业高风险-生态低风险-热浪高风险区
IIIh	农业中低风险-生态中低风险-热浪低风险区	VIe	农业中风险-生态低风险-热浪中风险区
IVa	农业中风险-生态低风险-热浪低风险区	VIh	农业中风险-生态极低风险-热浪极高风险区
IVb	农业低风险-生态低风险-热浪低风险区	VIf	农业低风险-生态低风险-热浪低风险区
IVc	农业中风险-生态中风险-热浪低风险区	VIg	农业高风险-生态极低风险-热浪高风险区
IVd	农业中低风险-生态中低风险-热浪低风险区	VIh	农业中风险-生态极低风险-热浪极高风险区
IVe	农业中风险-生态极低风险-热浪中风险区	VII	农业中风险-生态低风险-热浪高风险区
IVf	农业中风险-生态低风险-热浪高风险区	VIj	农业极低风险-生态低风险-热浪中风险区

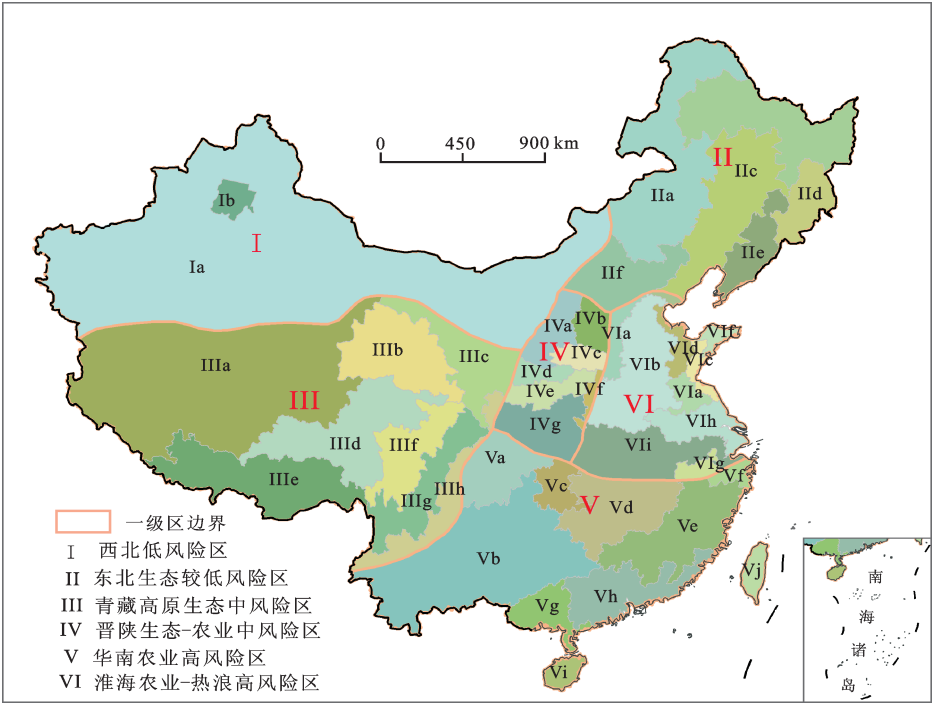


图3 2071~2099年RCP8.5情景下中国陆域综合环境风险区划
Fig.3 Regionalization of integrated environmental risk under RCP8.5 in China during 2071-2099

4 结论与讨论

本文基于多模式多情景的未来气候变化预估数据和影响评估模拟数据,对中国未来综合环境风险进行了分析。不同情景下的综合风险评估表明,21世纪末期(2071~2099),中国综合环境风险从高到低依次为RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5和RCP2.6。在RCP8.5情景下,中国综合环境高风险主要出现在黄淮海平原地区和华南部分地区;青藏高原及周边地区和晋陕甘地区也会出现中等程度的风险。本文以RCP8.5情景为例,根据综合环境风险评估结果编制了气候变化背景下中国未来综合环境风险区划,将全国分为6个一级区和43个二级区;分区尽量保持了行政边界完整性,对气候变化下的环境风险应对和防范措施制定有一定参考意义。

由于数据和评估方法的限制,本研究的风险评估和区划还存在一定的不足,主要表现在以下2个方面。

1) 风险评估和区划的不确定性。本文主要基于未来气候变化预估及其影响模拟,因此,综合环境风险评估和区划都存在较大不确定性。不确定性主要来自以下方面:① 未来气候要素变化(如气温上升幅度、降水变化)的预估不确定性较大,尤其是区域特征,不同的GCM之间有较大差异^[40];② 不同影响评估模型对农作物产量^[25]、生态系统变化^[26]以及高温热浪的影响^[28]等模拟存在显著的不确定性;③ 综合环境风险评估采用了等权重方法,这也会带来一定的不确定性。

2) 综合风险指标的局限性。本文综合环境风险区划目前只考虑了气候变化对农业、生态系统和高温热浪3个方面的影响,分别对应农业、生态系统、自然生态系统和人群,对于社会经济发展可能受到的影响没有进行评估。因此,该综合环境风险评估和区划还只是表现了气候变化给经济社会带来的部分风险。此外,本文综合风险指标计算采用了等权重方法,是否需要给不同风险赋予不同权重有待进一步探讨。未来气候变化对整个经济社会系统的影响及其带来的风险需要更加综合全面的模拟和评估^[41,42],如对气候变化—水—能源—粮食等关系链的表达和模拟^[43]。将来的研究中有必要加强气候变化对经济社会系统的影响评估,并据此制定相应的风险区划方案。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究

所吴绍洪研究员给本文提供的宝贵建议。

参考文献(References):

- [1] 吴绍洪. 综合风险防范[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Wu Shaohong. Integrated risk governance. Beijing: Science Press, 2011.]
- [2] 史培军, 袁艺. 重特大自然灾害综合评估[J]. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1145-1151. [Shi Peijun, Yuan Yi. Integrated assessment of large-scale natural disasters in China. Progress in Geography, 2014, 33(9): 1145-1151.]
- [3] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案[J]. 地理学报, 1958, 24(4): 14-31. [Huang Bingwei. A preliminary draft of China integrated natural regionalization. Acta Geographica Sinica, 1958, 24(4): 14-31.]
- [4] 马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策[M]. 北京: 科学出版社, 1994. [Ma Zongjin. Major natural disasters and countermeasures for disaster reduction in China. Beijing: Science Press, 1994.]
- [5] 王平, 史培军. 中国农业自然灾害综合区划方案[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(4): 16-23. [Wang Ping, Shi Peijun. Comprehensive regionalization of agricultural natural disaster in China. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(4): 16-23.]
- [6] 张峭, 王克. 我国农业自然灾害风险评估与区划[J]. 中国农业资源与区划, 2011, 32(3): 32-36. [Zhang Qiao, Wang Ke. Assessment and regional planning of Chinese agricultural natural disaster risks. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2011, 32(3): 32-36.]
- [7] Hao L, Zhang X, Liu S. Risk assessment to China's agricultural drought disaster in county unit[J]. Natural Hazards, 2011, 61(2): 785-801.
- [8] 王静爱, 史培军, 王瑛, 等. 中国城市自然灾害区划编制[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 42-46. [Wang Jing'ai, Shi Peijun, Wang Ying et al. Compilation of city natural disaster regionalization in China. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 42-46.]
- [9] Shi P J, Du J, Ji M et al. Urban risk assessment research of major natural disasters in China[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(2): 170-177.
- [10] 邓国, 王昂生, 周玉淑, 等. 中国省级粮食产量的风险区划研究[J]. 大气科学学报, 2002, 25(3): 373-379. [Deng Guo, Wang Angsheng, Zhou Yushu et al. China grain yield risk division at the level of province. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2002, 25(3): 373-379.]
- [11] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于GIS的洪水灾害风险区划研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 15-24. [Zhou Chenghu, Wan Qing, Huang Shifeng et al. A GIS-based approach to flood risk zonation. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(1): 15-24.]
- [12] 张行南, 罗健, 陈雷, 等. 中国洪水灾害危险程度区划[J]. 水利学报, 2000, 3: 1-7. [Zhang Xingnan, Luo Jian, Chen Lei et al. Zoning of Chinese flood hazard risk. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 3: 1-7.]
- [13] 田国珍, 刘新立, 王平, 等. 中国洪水灾害风险区划及其成因分析[J]. 灾害学, 2006, 21(2): 1-6. [Tian Guozhen, Liu Xinli, Wang Ping et al. Flood risk zoning and causal analysis in Chi-

- na. *Journal of Catastrophology*, 2006, 21(2):1-6.]
- [14] 李林涛, 徐宗学, 庞博, 等. 中国洪灾风险区划研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(1): 22-30. [Li Lintao, Xu Zongxue, Pang Bo et al. Flood risk zoning in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(1): 22-30.]
- [15] Wu S, Pan T, He S. Climate change risk research: A case study on flood disaster risk in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2012, 3(2): 92-98.
- [16] 史培军, 黄崇福, 叶涛, 等. 建立中国综合风险管理体系[J]. *中国减灾*, 2005, 1: 37-39. [Shi Peijun, Huang Chongfu, Ye Tao et al. Construction of integrated risk management system in China. *Disaster Reduction in China*, 2005, 1: 37-39.]
- [17] Briggs D J A. Framework for integrated environmental health impact assessment of systemic risks[J]. *Environmental Health*, 2008, 7(1): 1-17.
- [18] 盖程程, 翁文国, 袁宏永. 基于GIS的多灾害耦合综合风险评估[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2011, 51(5): 627-631. [Gai Chengcheng, Weng Wenguo, Yuan Hongyong. Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2011, 51(5): 627-631.]
- [19] Min S K, Zhang X, Zwiers F W et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes[J]. *Nature*, 2011, 470(7334): 378-381.
- [20] Mueller B, Seneviratne S I. Hot days induced by precipitation deficits at the global scale[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(31): 12398-12403.
- [21] 姜彤, 王润, Lorenz King. 1998年全球自然灾害评析[J]. *自然灾害学报*, 1999, 8(3): 1-6. [Jiang Tong, Wang Run, Lorenz King. Analysis of global natural catastrophes in 1998. *Journal of Natural Disasters*, 1999, 8(3): 1-6.]
- [22] 史培军. 中国自然灾害系统地图集[M]. 北京: 科学出版社, 2003. [Shi Peijun. *Atlas of natural disaster System of China*. Beijing: Science Press, 2003.]
- [23] He J, Yang X, Li Z et al. Spatiotemporal variations of meteorological droughts in China during 1961-2014: An investigation based on multi-threshold identification[J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2016, 7(1): 63-76.
- [24] 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 [M].//Field C B et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [25] Yin Y, Tang Q, Liu X. A multi-model analysis of change in potential yield of major crops in China under climate change[J]. *Earth System Dynamics*, 2015, 6(1): 45-59.
- [26] Yin Y, Tang Q, Wang L et al. Risk and contributing factors of ecosystem shifts over naturally vegetated land under climate change in China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(6):20905.
- [27] Heyder U, Schaphoff S, Gerten D, Lucht W. Risk of severe climate change impact on the terrestrial biosphere[J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(3): 034036.
- [28] Xu X, Ge Q, He S et al. Impact of high temperature on the mortality in summer of Wuhan, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7): 1-9.
- [29] Hewitt K, Burton I. The hazardousness of a place: a regional ecology of damaging events[M]. Toronto: University of Toronto Press, 1971.
- [30] Cutter S L, Solecki W D. The national pattern of airborne toxic releases[J]. *The Professional Geographer*, 1989, 41(2): 149-161.
- [31] United Nations Development Programme (UNDP), Bureau for Crisis Prevention and Recovery. Reducing disaster risk: a challenge for development[M]. New York: UNDP, Bureau for Crisis Prevention and Recovery, 2004.
- [32] Birkmann. Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies[J]. *Journal of Risk and Insurance*, 2010, 77(4):959-961.
- [33] Shi P J, Kaspersen R, World atlas of natural disaster risk[M]. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin and Beijing: Beijing Normal University Press, 2014.
- [34] Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming et al. Climate change regionalization in China (1961-2010). *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(11): 2676-2689.
- [35] Mo X, Liu S, Lin Z, et al. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 2009, 134(1-2): 67-78.
- [36] 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. *自然杂志*, 2013, 35(3): 179-186. [Yao Tandong, Qin Dahe, Shen Yongping et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3): 179-186.]
- [37] Rosenzweig C, Joshua E, Delphine D et al. 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*, 2014, 111(9): 3268-3273.
- [38] Dong W, Liu Z, Liao H et al. New climate and socio-economic scenarios for assessing global human health challenges due to heat risk[J]. *Climatic Change*, 2015, 130(4): 505-518.
- [39] Leng G, Tang Q, Huang S et al. Assessments of joint hydrological extreme risks in a warming climate in China[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(4): 1632-1642.
- [40] Schewe J, Jens H, Dieter G et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3245-3250.
- [41] Scott M J, Daly D S, Hejazi M I et al. Sensitivity of future U.S. Water shortages to socioeconomic and climate drivers: a case study in Georgia using an integrated human-earth system modeling framework[J]. *Climatic Change*, 2016, 136(2): 233-246.
- [42] 吴绍洪, 赵艳, 汤秋鸿, 等. 面向“未来地球”计划的陆地表层格局研究[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 10-17. [Wu Shao-hong, Zhao Yan, Tang Qiuhong et al. Land surface pattern

- study under the framework of Future Earth. *Progress in Geography*, 2015, 34(1): 10-17.]
- [43] 秦大河. 进入 21 世纪的气候变化科学——气候变化的事实、影响与对策[J]. *科技导报*, 2004, 7: 4-7. [Qin Dahe. Climate change

sciences into the 21st century: Facts, impact and strategies addressing climate change. *Science & Technology Review*, 2004, 7: 4-7.]

Regionalization of Integrated Environmental Risk of China Under Future Climate Change

Liu Xingcai¹, Tang Qihong¹, Yin Yuanyuan¹, Xu Xinchuang²

(1. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *Hubei University of Science and Technology, Xianning 437100, Hubei, China*)

Abstract: Environmental risks, such as crop failure, mortality and vegetation deterioration caused by warming, drought, flood, heatwave, etc., tend to be more complex and interactive with each other. Integrated Environmental Risk Regionalization becomes the fundament for multi-hazard prevention and reduction under a changing environment. Regarding potential large losses from the agricultural system, ecosystem, and human being caused by climate change, we assessed the integrated environmental risk based on the crop yield changes, ecosystem shift and mortality by heatwave in China during the late 21st century (2071-2099) under four Representative Concentration Pathways (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5). Bias-corrected projections of future climate change were derived from five generic circulation model. Four major crops (rice, wheat, maize, and soybean) were considered, and the crop yield changes were projected by four global gridded crop models. The changes of crop yield during 2071-2099 compared to the period of 1980-2010 were computed to identify the risk in agricultural system. The F metric was used to assess the risk of ecosystem shift under climate change. The F metric describes the ecosystem state and its changes based on a set of macroscopic variables derived from four global gridded vegetation models. The larger F , changes in ecosystem state variables, indicates the larger risk of ecosystem shift in future. A heatwave event was identified by three successive days of high temperature that $>35^{\circ}\text{C}$. The mortality rate caused by heatwave events was estimated by the difference of mortality rate in a period with high-temperature and that in non-high-temperature days of the year. Regression was established between heatwave events and mortality rates. It was then used for estimation of mortality rate in the 2071-2099 period. These environmental risks were combined by a multi-risk index (IERI) to illustrate the integrated environmental risk in the future. In this study, the same weights were set for all environmental risks in the IERI calculation. The IERI was calculated at a spatial resolution of 0.5° for the 2071-2099 period under the four RCPs. The results showed that high integrated environmental risks will appear in the Huang-Huai-Hai region, relatively high integrated environmental risks will appear in the South China, and moderate integrated environmental risks will occur in the Tibet region. The integrated environmental risk regions (IERR) were then delineated based on the assessment. Six IERRs were identified for China, i.e., Northwest-Low-Risk region, Northeast-Relatively-Low-Risk region, Tibet-Moderate-Risk region, Jin-Shaan-Moderate-Risk region, South-China-High-Risk region, and Huang-Huai-Hai-High-Risk region. Forty-two sub regions were further divided upon the six IERRs. Due to largely different environmental conditions of the six IERRs, they include quite different numbers of sub regions, namely 2, 6, 8, 7, 10, and 9 subregions, respectively. Though many environmental risks caused by climate change were not included in this assessment, the preliminary integrated environmental risk regionalization would be a reference for decision makers and future studies.

Key words: integrated environmental risk; climate change; integrated regionalization