秦岭一淮河南北干旱热浪耦合

风险区识别及其影响因素

张玉凤 李双双 延军平1

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

【摘 要】:综合考虑干旱热浪耦合危险性、暴露性和脆弱性,构建干旱热浪耦合风险评价框架,对秦岭—淮河 南北干旱热浪耦合风险区进行识别,探讨不同指标要素与风险空间格局的响应关系。结果表明:(1)1960~2018 年 秦岭—淮河南北干旱热浪具有群聚群发性。其中,耦合频发期为:20世纪70年代末~80年代初,空间集聚中心主 要分布在淮河平原、长江中下游东部、川东丘陵以及巫山山区,而20世纪90年代后干旱热浪耦合逐渐减弱;(2) 秦岭—淮河南北干旱热浪耦合风险具有空间分异特征,排名前30位高风险区,有70%的城市位于长江中下游、淮河 平原,30%位于四川盆地东部,上述城市人口密集,干旱热浪耦合暴露性强,使得区域面临干旱热浪耦合风险较高; (3)路径分析验证干旱热浪耦合风险因素关系表明:秦岭—淮河南北危险性、暴露性与风险呈反向关系,说明区域 干旱热浪高暴露、高致灾危险区,因社会应对灾害能力较强,可在一定程度缓解系统的受灾风险。

【关键词】: 干旱热浪耦合 时空分析 秦岭—淮河南北

【中图分类号】:P426.616【文献标识码】:A【文章编号】:1004-8227(2021)03-0758-12

全球变暖背景下,国家和区域防灾减灾能力建设面临重大挑战,综合风险防范需关注多灾种耦合对灾情累积放大效应^[1~4]。 如何实现"单灾种"向"多灾种"研究转变,明晰多灾种致灾机制,是当前地理学人地关系研究的重点问题^[5~7]。多灾种研究方 法上,既有传统的灾害矩阵法、事故树分析法和综合制图法,又有新兴学科发展的复杂网络方法;既有定性描述多灾种致灾过 程的方法,又有定量分析多灾种网络特征和评估灾情的方法^[8~10]。其中,多灾种时空耦合网络,以致灾因子为网络节点,以灾害 触发关系为连边,以灾害损失或灾害强度为节点度值或连边权重,为多灾种提供了有效研究视角^[5]。当前面临的问题是:多灾种 时空耦合规律,能否与区域风险评价相结合?这些问题是多灾种时空耦合方法,由认识规律转为服务减灾的关键,也是多灾种综 合应用工作的有益尝试。

多灾种时空耦合研究中,干旱和热浪发生具有时空一致性,两种灾害耦合发生对灾情具有累积放大作用,易对社会一生态 系统造成严重的损失,例如 2003 年欧洲极端干旱热浪事件、2010 年俄罗斯夏季干旱热浪事件、2012 年美国干旱灾害等均造成 了大量的人员伤亡和经济损失^[11~14]。同时,无论是中国,还是全球范围,干旱热浪耦合致灾强度、耦合时段和空间范围增强, 干旱热浪耦合共发已成为学界研究前沿话题,也是政府重大自然灾害综合风险管理的重要战略方向^[15~18]。在此,选取气候变化 敏感区域,以干旱热浪耦合致灾为切入,识别耦合高风险区,进而对有限资源进行合理配置,减少脆弱性和暴露性,对提高区 域应对极端灾害的恢复力具有重要的现实意义^[19~22]。

^{&#}x27;作者简介: 张玉凤(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为全球变化与区域灾害防治.E-mail:zhangyf_1117@163.com 李双双,E-mail:1ss40609010@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41701592;41877519)

秦岭一淮河南北是中国重要的地理生态分界线,受东亚季风强弱影响,气温和降水异常变化,不但具有年际变化特征,而 且呈现明显的空间分异,是研究干旱热浪耦合致灾的理想区域^[22~25]。基于此,以秦岭一淮河南北为研究区域,构建干旱热浪时 空耦合网络,分析区域干旱热浪时空耦合规律;进而以"危险性一暴露性一脆弱性"风险评价框架为基础,识别干旱热浪耦合 高风险区,为适应极端气候变化提供理论支持。

1研究区概况

为了比较不同地理单元干旱热浪耦合时空特征,参考已有研究^[26],并综合考虑气候、地形、城市、社会经济发展状况,将秦 岭一淮河以北分为2个子区域:关中平原(I)和黄河下游(II);将秦岭一淮河以南分为5个子区域:秦巴山区(III)、淮河平原(IV)、 四川盆地(V)、巫山山区(VI)和长江中下游(VII)(图1)。

从人口密度和变化趋势分析(表1),2012年秦岭一淮河南北平均人口密度为429人/km²,2017年上升为445人/km²。除巫山山 区、秦巴山区外,其他区域人口密度均呈现增加,尤其是长江中下游、四川盆地人口密度快速上升。可见,秦岭一淮河南北人 口高密度的格局并未改变,区域面临自然灾害的暴露性依然很大。同时,2012~2019年,秦岭一淮河南北贫困县数目由178个 下降到90个,充分显示近年来中国扶贫政策的效果,但秦巴山区、淮河平原和四川盆地依然是贫困县集中区。



图1秦岭一淮河南北地理分区与气象站点分布[26]

地区	地市单位	贫困县(个)		户籍人口(万人)		人口密度(人/km²)	
		2012	2019	2012	2017	2012	2017
关中平原	6	24	7	2734	2765	392	397
黄河下游	21	19	11	12895	13130	707	720
秦巴山区	5	41	26	1570	1573	129	129
淮河平原	19	35	20	12259	12554	532	540
四川盆地	13	35	14	9716	9757	518	567
巫山山区	3	12	7	810	801	167	165

衣 余岐

长江中下游	29	12	5	11771	12033	557	595
合计	96	178	90	51755	52613	429	445

2数据与方法

2.1 数据来源

1960~2018 年秦岭一淮河南北 197 个气象站点逐日气温、相对湿度和降水数据,来源于中国气象数据网。社会经济数据方面,2017 年脆弱性和暴露性等数据来源于各市国民经济和社会发展公报、《2018 年中国城市统计年鉴》和《2017 年中国城市建设统计年鉴》,人口结构数据主要来源于各省市 2010 年《人口普查资料》。9 个海区厄尔尼诺指数数据,来源于中国气象局国家 气候中心气候变化与预测研究室发布的 130 项气候系统指数集^[27]。

2.2 研究方法

2.2.1 干旱一热浪时空耦合网络

将秦岭一淮河南北干旱热浪耦合关系抽象为:点、边和边权组成的网络55。具体如下:

(1)节点的形成。

干旱和热浪时空网络节点有 2 部分构成: 一是干旱热浪耦合过程, 一是承灾体。具体而言, ①时间维度上, 以 11a 滑动相关为基础, 数据为 1960~2018 年秦岭一淮河南北各站点逐年标准化降水指数(SPI)和热浪天数, 计算两者滑动相关系数, 形成 49 个时间节点。其中, SPI 选取时间尺度为 12 个月, 以年末 12 月 SPI 值衡量干旱状况, 热浪指数计算方法则参照《高温热浪等级 GB/T29457-2012》国家标准; ②空间维度上,构建节点策略为:秦岭一淮河南北 197 个气象站点空间位置, 形成 197 个空间节点。

(2)干旱热浪耦合规则。

时间节点赋值规则如下,①当干旱热浪耦合活跃期,判断 SPI 和热浪天数 11a 滑动相关系数,是否通过 0.05 显著水平检验。 如果两者相关性通过显著性检验,表明该时段干旱热浪同步变化,该时间节点赋值为1;②当干旱热浪耦合低谷期,干旱热浪 11a 相关系数大幅下降,干旱热浪耦合不显著,时间节点赋值为0;③依次计算 197 个空间节点 1965~2013 年滑动相关系数,形成一 个197×49 二维时空矩阵。利用 Netdraw 软件,对干旱热浪耦合网络进行可视化,并进行网络特征计算。

2.2.2 干旱热浪耦合风险评价框架

干旱和热浪为气象灾害,参考 IPCC 气候变化风险定义和灾害功能结构体系^[28~30],综合考虑致灾因子危险性、暴露性和脆弱性,构建秦岭一淮河南北干旱热浪耦合风险评价指标体系,具体指标如表 2 所示。其中,人口暴露包括总人口和用水人口,反映受到干旱热浪综合影响的人口状况;自然暴露综合反映农业生产、城市发展受干旱热浪耦合影响的范围;危险性以耦合网络识别,其节点度越高,表明干旱热浪同步越好,两种灾害共发可能性越大。

根据第 5 次 IPCC 报告, 脆弱性为干旱热浪耦合致灾的倾向或趋势, 主要由敏感性与应对能力衡量^[28], 在此, 综合考虑干旱

热浪耦合灾害特征,从人口、社会、环境本底、科技教育、基础设施、社会经济保障和水资源保障等方面选取指标,构建适应 性和敏感性指标,评价脆弱性空间特征,计算公式如下:

$$VI = 0.5 \times (SI + (1 - AI))$$
 (1)

式中: VI 为脆弱性指数; SI 为敏感性指数; AI 为适应性指数。

干旱热浪耦合风险,通过干旱热浪耦合危险性、脆弱性以及暴露性综合衡量,表征干旱热浪共发威胁下,对居民生产生活 造成的可能损失或影响。计算公式如下:

$$R = 0.3 \times DHI + 0.4 \times VI + 0.3 \times PEI$$
 (2)

式中: R 为干旱热浪风险指数; DHI 为干旱热浪耦合危险性; VI 为脆弱性指数; PEI 为暴露性指数。

参考已有研究,以等权重计算暴露性和脆弱性^[31]。所有因素被综合计算,耦合风险越高的地区,面临干旱热浪灾害打击时, 遭受损失越大。为统一脆弱性指标量纲,所有指标均经过标准化处理。

2.2.3 脆弱性路径分析模型

路径分析是一种探索因果关系的统计方法,可分析变量之间是否存在因果关系,进而表明变量之间直接因果关系与通过中 介变量的间接因果关系的大小,已被广泛应用于社会、文化地理等学科研究中^[32]。依据灾害风险理论体系,结合研究目标,提 出秦岭一淮河南北干旱热浪耦合灾害评价的假设,探讨不同时间节点,危险性、暴露性、以及综合敏感性和适应性反映的脆弱 性与风险之间的关系。具体假设如下:

假设1:敏感性与适应性构成脆弱性。敏感性越高,适应性越低,导致脆弱性越高,敏感性与适应性存在负相关关系。

隐变量	显变量	统计指标		
致灾因子 A1 B1 干旱热浪耦合	11 7 日地 泊拥人	C1 干旱指数 (+)		
	C2 热浪指数(+)			
暴露性 A2	pg 卢姆县雪姆(力北山村主)	C3 农业层面一耕地面积比重(+)		
	B2 日	C4 城市层面一建成区面积(+)		
	四人口县亚州	C5 总用水层面一总人口(+)		
	D3 八口泰路性	C6 自来水层面一用水人口(+)		
敏感性 A3	B4 人口结构	C7 儿童层面一15 岁以下人口比重(+)	%	

表2秦岭一淮河南北干旱热浪耦合风险评价指标体系

		C8 老人层面一65 岁以上人口比重(+)	%			
		C9人口变动一人口自然增长率(-)	‰			
		C10性别结构一性别比(-)				
		C11 从业结构一第一产业、建筑业从业人口比重(+)				
		C12 用水结构一生活用水比重(+)				
		C13 消费结构一城镇居民恩格尔系数(+)				
		C14 就业结构一失业率(+)				
	B5 社会结构	C15 城乡结构一城市化水平(-)	%			
		C16家庭结构——户家庭规模比重(+)				
		C17 教育结构—15 岁以上文盲人口比重(+)	%			
		C18 婚姻结构一离婚、丧偶人口比重(+)	%			
		C19 城市绿地一绿化覆盖率(+)	%			
	B6 环境结构	C20资源本底一供水总量(-)				
		C21 气候本底一年降水量(-)				
		C22 研发人才—R&D 人员数(+)	个			
	D7 刮甘對宮	C23 研发投入一R&D 内部经费支出(+)				
	D1 科汉教育	C24师资力量一万人拥有教师数量(+)	个			
		C25 教育支出一财政支出中教育支出金额(+)	万元			
		C26 医疗保障一万人医院、卫生院个数(+)				
		C27(公共)交通保障一万人拥有公共交通数量(+)				
适应性 44	B8 基础设施	C28 物资输送一人均道路面积(+)				
這 <u>心</u> 性 A4		C29 信息保障一移动电话数(+)				
		C30 灌溉设施一有效灌溉面积(+)				
		C31 社会参保一城镇基本医疗保险参保比重(+)				
		C32 失业保障一失业保险参保人口比重(+)				
	B9 社会经济保障	C33 养老保障一城镇职工养老保险人口比重(+)				
		C34 经济支出一人均可支配收入(+)				
		C35 经济水平—人均 GDP (+)				

-	1						
		C36 供水层面一供水管道长度(+)					
		C37 本底层面一水资源总量(+)	亿 m³				
	B10水资源保障	C38 净水层面一污水处理率(+)					
		C39 节水层面一节约用水量(+)	万 m³				
		C40 循环水层面一水资源重复利用率(+)	%				

假设 2:危险性、暴露性与脆弱性之间相互作用,从不同角度影响干旱热浪耦合风险。其中,危险性越强的区域,暴露性越 大,脆弱性越高,导致面临干旱热浪耦合致灾风险越高。

假设 3:以自然暴露性和人口暴露性为显变量,以暴露性为潜在变量;从敏感性、适应性两方面反映灾害脆弱性。结合秦岭 一淮河南北城市水平和人口分布特征,提出暴露性、脆弱性与风险呈正相关。也就是说,人口、经济高暴露区、脆弱性高值区, 往往也是风险较高地区。

3 结果分析

3.1 秦岭一淮河南北干旱热浪耦合致灾因子的群聚群发效应

在时间维度上,1960~2018年,秦岭一淮河南北干旱热浪耦合具有阶段性,不同时段干旱热浪耦合影响范围存在差异。变化过程可分为4个阶段:(1)20世纪60~70年代中期,时间节点度值范围为:25~57,属于干旱热浪耦合低发时期,且空间影响范围相对较小;(2)20世纪70年代末~80年代初,时间节点度值范围为:73~103,明显高于其他时期,属于干旱热浪耦合高发期;(3)20世纪80年代中期~21世纪初,干旱热浪耦合事件节点度降低,但是仍形成1992~1993年和1997~1998年2个峰值,分别对应持续14个月(1991-05~1992-06)中等强度和持续13个月(1997-04~1998-04)超强强度、东部型厄尔尼诺事件;(4)2003年之后,干旱热浪耦合时间节点度大幅下降,基本维持在10~38范围波动,说明干旱热浪耦合影响逐渐减少;同时,2008~2010年形成一个峰值,与持续13个月(2009-04~2010-04)中等强度、中部型厄尔尼诺事件也具有很好对应关系(图2)。

在驱动机制上,为了分析区域干旱热浪耦合时间群发特征与厄尔尼诺的关系,对 9 个厄尔尼诺指数与干旱热浪耦合度相关 性进行分析(图 3)。结果表明:NINOW 区海温异常与秦岭一淮河南北干旱热浪响应显著相关,相关系数为-0.41,通过 0.01 显著 水平检验,说明赤道东太平洋 NINOW 区海温越低,区域干旱热浪耦合强度越明显。这佐证了李双双等研究秦岭一淮河南北热浪 与厄尔尼诺的响应关系,即 NINO1+2 是秦岭一淮河以南地区热浪爆发的关键海区^[33]。同时,ENSO 事件具有明显的年代变化,20 世纪 70~90 年代末,ENSO 强度逐渐增加,海温异常区偏向西太平洋;2000 年后,ENSO 强度波动下降,但是中西部海温依然是 ENSO 主导形态。当赤道太平洋西部海温异常偏高时,伴随 NINO1+2 区海温偏低,导致秦岭一淮河南北干旱热浪耦合呈现下降趋势。

可见,秦岭一淮河南北干旱热浪耦合事件具有群发特征,其与京津冀地区干旱热浪群发时段 20 世纪 60~80 年代初和 21 世 纪初,平静期 20 世纪 80 年代中期~90 年代末的规律略有差异^[5]。可能原因是,秦岭一淮河在中国南北过渡带,京津冀地区在 华北平原北部,两者分别位于中国东部季风区"南涝北旱"降雨分布格局的中部和北部,副热带高压异常"西伸北跳",导致雨 带南北移动,2 个区域干旱热浪并发呈现相反规律。



图 2 秦岭一淮河南北干旱热浪耦合阶段特征



图 3 不同海区厄尔尼诺指数与秦岭一淮河南北干旱热浪耦合相关性

注:图 a 海温异常底图来源于 NOAA 气候预测中心.

空间上,对应干旱热浪耦合时间群发特征,统计 1965~1976、1977~1983、1984~2002 和 2003~2013 年 4 个时段区域各站点空间维度节点度,绘制区域致灾因子强度分布图,识别秦岭一淮河南北干旱热浪耦合空间集聚区(图 4)。结果表明:1956~1976 年,耦合区主要分布在四川盆地南部和长江中下游东部;1977~1983 年,耦合区范围扩展到巫山山区和淮河平原,耦合致灾强度增强;20 世纪 80 年代中期开始,干旱热浪耦合强度明显减弱,以 2002 年为分界点,前期淮河平原、长江中下游东部和豫西地区出现相对较高的耦合分布区,后期高耦合区仅有四川盆地,其他地区干旱热浪耦合发生的频次相对较低。说明秦岭一淮河南北干旱热浪耦合显著区不同时段具有不同空间中心。

3.2 秦岭一淮河南北干旱热浪耦合风险分析

在干旱热浪耦合风险评价框架基础上,将暴露性、脆弱性等指数分为5个等级,绘制风险等级空间分布图(图5)。其中,危 险性以1965~2013年研究区各站点空间度值衡量,反映干旱热浪耦合致灾因子空间集聚特征。

(1)危险性和暴露性。

秦岭一淮河南北干旱热浪耦合有 2 个强的危险区,主要分布在淮河平原和长江中下游东部,四川盆地南部;关中平原、黄

河下游、南阳盆地和江汉平原是耦合低危险区。上述低危险区是干旱或热浪单独致灾高值区,但是干旱热浪耦合致灾强度相对 较低(图 5a)。



图4秦岭一淮河南北干旱热浪耦合空间集聚特征

对暴露性规律而言,秦岭一淮河南北高值区主要分布在省会城市(成都、武汉、南京、合肥、杭州、郑州、西安等)、直辖市地区(上海),以及长三角地区的部分城市(宁波、苏州);暴露性低值区连片分布于关中平原西部和秦巴山区,这些区域多为城市发展水平较低,加之受地形影响,土地平整度较差,农业耕地资源低于黄河下游和淮河平原,使得区域农业和城市暴露性相对于其他地区偏低(图 5b)。

(2)敏感性和适应性。

敏感性和适应性2个指标呈现"连片集中与零散分布并存"的空间格局特征(图 5c~d)。具体表现为:敏感性高值区集中分 布在豫东、豫南、大别山湖北段一带,零散分布在杭州、川东丘陵的部分城市,低值区则分布在长三角城市群,以及零散分布 在部分省会城市;适应性与敏感性空间格局相反,典型表现在经济设施高度集中的省会和直辖市,说明敏感性高值区,往往是 适应性低值区,并且在秦巴山区、川东丘陵、大别山区和江汉平原等连片分布。

(3) 脆弱性。

综合适应性和敏感性特征,计算秦岭一淮河南北脆弱性指数,发现脆弱性低值区主要有2个(图5e),一是以长三角城市群为 主体的连片分布区,一是以武汉、合肥、西安、郑州、成都、重庆为中心分布区,说明长三角地区社会经济体系相对完善,应 对灾害水平高于其他地区,而其他地区社会资本、经济资本多集中于省会城市。

脆弱性高值区则呈现连片分布,主要分布在秦巴山区西部高海拔山区、大别山区、鄂豫皖地区、川东丘陵区,占整个地级 市的44%。相对于国家中心城市和长三角城市群,无论医疗设施,教育投入还是社会保障,均相对较低,区域应对自然灾害能力 较弱。

(4)干旱热浪耦合风险。

综合危险性、暴露性和脆弱性空间信息,干旱热浪耦合风险空间一致性更加突出(图5f),高值区集中分布在长江中下游、淮

河平原东部、川东丘陵地区,低值区连片分布在关中平原西部、秦巴山区以及零散分布在江汉平原地区。其中,2017年干旱热 浪耦合风险最高的 30 个地级市也反映了上述集聚特征(表 3),70%高风险地区位于淮河平原、长江中下游,而 30%处于四川盆地。 其中,淮河平原的阜阳、宿州、滁州位列风险前 5 位,这些高耦合风险地区多为平原、盆地和大江大河附近,强暴露性使得区 域面临干旱热浪耦合风险较高。



图 5 秦岭一淮河南北干旱热浪耦合风险空间等级

3.3 秦岭一淮河南北干旱热浪耦合风险路径分析

路径分析模型适用于 2 种类型:无明确理论假设,完全依赖设计的探索性研究,研究目的只是形成符合事实的统计模型; 以已有理论为基础,检验和修订模型,从而验证模型隐含的理论基础^[34]。本文干旱热浪耦合风险路径分析,是风险理论在中国 南北过渡带实践,属于路径模型的验证和完善,重在理清危险性、暴露性、脆弱性和灾害风险的关系,挖掘变量之间潜在规律(图 6)。

表3秦岭一淮河南北干旱热浪耦合风险最高的30个地市

排名 地市	所处分区	排名	地市	所处分区
-------	------	----	----	------

1	阜阳	淮河平原	16	泰州	淮河平原
2	广安	四川盆地	17	宣城	长江中下游
3	宿州	淮河平原	18	镇江	长江中下游
4	南京	长江中下游	19	扬州	淮河平原
5	滁州	淮河平原	20	安庆	长江中下游
6	合肥	淮河平原	21	达州	四川盆地
7	资阳	四川盆地	22	常州	长江中下游
8	南充	四川盆地	23	盐城	淮河平原
9	内江	四川盆地	24	苏州	长江中下游
10	遂宁	四川盆地	25	无锡	长江中下游
11	六安	淮河平原	26	上海	长江中下游
12	亳州	淮河平原	27	重庆	四川盆地
13	自贡	四川盆地	28	嘉兴	长江中下游
14	南通	淮河平原	29	宁波	长江中下游
15	杭州	长江中下游	30	成都	四川盆地

结果表明: (1)路径模型验证敏感性与适应性是反向关系,两者路径系数为-0.549,表明秦岭一淮河南北敏感性越高的地区, 适应性越弱,且两者的特性也传递给脆弱性。上述空间格局数据揭示规律,符合前文假设1提出敏感性、适应性与脆弱性的关 系; (2)在暴露性与脆弱性空间关系上,暴露性与脆弱性呈反向关系,两者路径系数为-0.485,表明暴露性与脆弱性存在空间不 匹配,即面临干旱热浪耦合致灾,暴露性较大的区域,脆弱性较低。造成这种现象的原因是,秦岭一淮河南北暴露性高值区, 社会、经济资本集中,基础设施完善、科技和教育投入水平高,使得灾害适应能力较强,降低了干旱热浪耦合脆弱性。上述结 果不符合前文假设2提出的暴露性越强,脆弱性越高,说明秦岭一淮河南北风险结构体系具有特殊性; (3)干旱热浪耦合风险路 径分析揭示致灾因子危险性、暴露性、脆弱性与风险关系。其中,脆弱性与灾害风险为正向关系,路径系数为0.826,而致灾因 子、暴露性与耦合风险呈现空间反相关,两者路径系数为:-0.168和-0.757,暴露性的反相关关系要强于致灾因子,上述结果与 前文假设3提出的暴露性与耦合风险正向关系不符,说明高暴露地区,由于社会应对灾害的适应能力较强,一定程度上可减缓 干旱热浪耦合风险损失,这也是秦岭一淮河南北致灾热点区、暴露性高值区、脆弱性高值区没有形成重叠空间格局的原因。



图6秦岭一淮河南北干旱热浪耦合风险路径分析

4 结论与展望

基于 197 个气象站点观测资料,本文分析了 1960~2018 年秦岭一淮河南北干旱热浪群聚群发特征,并构建干旱热浪耦合灾 害风险评价指标体系,从危险性、暴露性和脆弱性等 3 个层面,综合分析干旱热浪耦合风险的空间响应关系。得到结论如下:

(1)干旱热浪群聚群发。

1960~2018 年秦岭一淮河南北干旱热浪具有群聚群发特征,其中,耦合频发期为:20世纪70年代末~80年代初,空间集 聚中心主要分布在淮河平原、长江中下游的江浙沪地区、川东丘陵的重庆地区、以及巫山山区,而20世纪90年代后两者耦合 特征逐渐减弱,2003~2013年空间集聚中心仅为川东丘陵地区。

(2) 耦合风险存在空间分异。

干旱热浪耦合风险空间高值区主要集中在:长三角地区、淮河平原东部、川东丘陵地区,上述区域多为平原、盆地和大江 大河附近,城市经济水平高、人口密集,干旱热浪灾害暴露性强;而低值区则连片分布在关中平原西部,秦巴山区以及零散分 布在江汉平原地区,这些区域虽然脆弱性相对较高,但因致灾危险性、暴露性低,干旱热浪耦合并发风险相对较低。

(3)耦合风险的影响因素。

秦岭一淮河南北干旱热浪耦合风险路径分析表明,敏感性与适应性是反向关系,说明敏感性越高、适应性越低,导致脆弱 性较高:危险性、暴露性与风险也是反向关系,表明高暴露、高危险区,由于社会应对灾害能力较强,缓解了灾害发生时城市 系统的受灾风险程度。

关于干旱热浪耦合灾害风险研究,以及多灾种时空耦合网络应用,未来还有许多工作值得探索。(1)实地调查研究。本文选 取的干旱热浪耦合灾害风险指标来自统计年鉴,对于居民对灾害感知评价相对较少。在风险评价中,需要关注干旱热浪耦合高 发区,关注更小空间单元,如城市中的社区,社区中的家庭,有针对性的评价当地居民特有的适应性特征,如社区信任、减灾 措施、邻里互助等对灾害风险的影响,验证宏观指标评价结论;(2)完善风险指标体系。受研究数据可获得性限制,需要采取两 种策略完善干旱热浪耦合风险评价指标。一是"自上而下",将研究尺度上升为中国省域,增加干旱或热浪适应措施的针对性; 一是"自下而上",将研究尺度变为中国县域,选择干旱热浪耦合典型区,制定适合县域评价指标,如孟晖等关注县域尺度,以 县域单元为承灾体,进行京津冀县域地质灾害风险评估^[35],为精细风险评价提供案例;(3)丰富多灾种时空耦合风险案例。中国 造成损失比较严重的灾害是:地震、台风和干旱。未来需要挖掘新灾害耦合方法,特别是地质灾害引发的灾害链,如"地震一 滑坡一泥石流一洪水",以及地质灾害与气象灾害的耦合,探索多灾种风险时空变化规律,为构建综合风险防范体系提供理论支 持。

参考文献:

[1]AITSI-SELMI A, EGAWA S, SASAKI H, et al. The Sendai framework for disaster risk reduction:Renewing the global commitment to people' s resilience, health, and well-being[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2015, 6 (2):164-176.

[2]KELMAN I.Climate change and the Sendai framework for disaster risk reduction[J].International Journal of Disaster Risk Science, 2015, 6(2):117-127.

[3]KAPPES M S, KEILER M, VON ELVERFELDT K, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review[J]. Natural Hazards, 2012, 64 (2): 1925-1958.

[4]ZSCHEISCHLER J, SENEVIRATNE S I. Dependence of drivers affects risks associated with compound events[J]. Science Advances, 2017, 3 (6):1700263-1700273.

[5]李双双,杨赛霓,刘宪锋.面向非过程的多灾种时空网络建模——以京津冀地区干旱热浪耦合为例[J].地理研究,2017,36(8):1415-1427.

[6]李双双,杨赛霓,刘宪锋,等.2008年中国南方低温雨雪冰冻灾害网络建模及演化机制研究[J].地理研究,2015,34(10): 1887-1896.

[7] 史培军,吕丽莉,汪明,等.灾害系统:灾害群,灾害链,灾害遭遇[J].自然灾害学报,2014,23(6):1-12.

[8] 王然,连芳,余瀚,等.基于孕灾环境的全球台风灾害链分类与区域特征分析[J].地理研究,2016,35(5):836-850.

[9]哈斯,张继权,郭恩亮,等.基于贝叶斯网络的草原干旱雪灾灾害链推理模型研究[J].自然灾害学报,2016,25(4):20-29..

[10]李明,胡炜霞,王贵文,等.基于 Copula 函数的中国东部季风区干旱风险研究[J].地理科学,2019,39(3):506-515.

[11]FENG S F, HAO Z C, ZHANG X, et al. Probabilistic evaluation of the impact of compound dry-hot events on global maize yields[J]. Science of the Total Environment, 2019, 689:1228-1234.

[12]MAZDIYASNI O, AGHAKOUCHAK A. Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112 (37):11484-11489.

[13] STOTT P A, STONE D A, ALLEN M R. Human contribution to the European heat wave of 2003[J]. Nature, 2004, 432(7017): 610-614.

[14]ZHANG Y Q, YOU Q L, MAO G X, et al. Short-term concurrent drought and heatwave frequency with 1.5 and 2.0 C global warming in humid subtropical basins: a case study in the Gan River Basin, China[J]. Climate Dynamics, 2019, 52 (7-8):4621-4641.

[15]WANG X R, QIU B, LI W K, et al. Impacts of drought and heatwave on the terrestrial ecosystem in China as revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693:133627-133638.

[16] RODRIGUES R R, TASCHETTO A S, GUPTA A S, et al. Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(8):620-626.

[17] YE L, SHI K, XIN Z H, et al. Compound droughts and heat waves in China[J]. Sustainability, 2019, 11 (12): 3270-3284.

[18]BEETGE L, KRÜGER K. Drought and heat waves associated with climate change affect performance of the potato aphid Macrosiphum euphorbiae[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):3645-3654.

[19]张奇谋,陈思,陈松生,等.不同 RCP 情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究[J].长江流域资源与环境, 2019,28(6):1470-1480.

[20]郑菲,孙诚,李建平.从气候变化的新视角理解灾害风险,暴露度,脆弱性和恢复力[J].气候变化研究进展, 2012,8(2):79-83.

[21]李琪,苏欢,史雨涵,等.1961~2010 年江浙沪地区夏季高温热浪时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2016, 25(3):506-513.

[22]柯杭, 王小军, 尹义星, 等. 衡水市 1961~2015 年极端降水和干旱的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (4):971-980.

[23]陆福志, 鹿化煜. 秦岭一大巴山高分辨率气温和降水格点数据集的建立及其对区域气候的指示[J]. 地理学报, 2019, 74(5):875-888.

[24]李双双,延军平,万佳.全球气候变化下秦岭南北气温变化特征[J].地理科学,2012,32(7):853-858.

[25] 晏德莉, 延军平, 李双双, 等. 秦岭-淮河南北高温高湿天气时空演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9):2197-2206.

[26]李双双,延军平,武亚群,等.秦岭一淮河南北供暖格局变化及其影响因素[J].地理学报,2019,74(9):1866-1877.

[27]李双双,孔锋,韩鹭,等.陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J].地理研究,2020,39(1):140-151.

[28] IPCC. Climate change impacts: Impacts, adaptation, and vulnerbility. Part A:Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014. [29]史培军. 灾害风险科学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2016.

[30] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5):1-9.

[31]CUTTER S L, FINCH C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(7):2301-2306.

[32]吴蓉,黄旭,刘晔,等.广州城市居民地方依恋测度与机理[J].地理学报,2019,74(2):379-393.

[33]李双双, 延军平, 杨赛霓, 等.1960-2016 年秦岭一淮河地区热浪时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2018, 37(4):504-514.

[34] 唐启义, 唐睿. DPS 数据处理系统(第四版) [M]. 北京: 科学出版社, 2017:711-713.

[35] 孟晖,李春燕,张若琳,等.京津冀地区县域单元地质灾害风险评估[J].地理科学进展,2017,36(3):327-334.