

何佳, 苏筠. 极端气候事件及重大灾害事件演化研究进展[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 223–228. [HE Jia and SU Yun. Progress of extreme climatic events and major disaster events evolution study[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 223–228. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.04.038.]

极端气候事件及重大灾害事件演化研究进展^{*}

何佳^{1,2}, 苏筠^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 随着全球变化的加剧, 极端气候事件及重大灾害事件的演化与发展过程成为灾害研究的热点问题之一。在梳理和分析极端气候事件演化研究相关文献的基础上, 主要从演化阶段、演化方式、演化分析方法三方面对已有的研究成果进行归纳总结, 并重点阐述了用于辨析灾害事件复杂演化结构与耦合关系的多维度研究方法——复杂网络(Complex Network)在极端气候事件演化分析中的应用。综述发现, 当前极端气候事件演化研究面临以下问题和挑战: 要重视极端气候事件演化的复杂性和整体性, 加强极端气候事件演化的定量分析, 加强极端气候事件与社会系统“转入–转出”的机理研究。

关键词: 极端气候事件; 灾害事件; 演化阶段; 演化分析方法; 复杂网络; 研究进展

中图分类号: X43; P90 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2018)04–0223–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.04.038

世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)将极端气候事件定义为: 特定时段内某类气候要素量值或统计值显著偏离其平均状态、且达到或超出该变量观测或统计值区间上下限附近某一阈值的事件^[1]。虽然这类事件在统计学上属于小概率事件, 但突发性极强。在此概念的基础上《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》(Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, SREX)将与灾害相关的极端气候事件具体划分为极端的天气和气候变量(温度、降水和风)、影响极端气候变量发生或其本身为极端气候事件(季风、厄尔尼诺、热带气旋等)以及影响自然环境的极端气候事件(干旱、洪水、极端海平面等)三类, 这三类事件彼此相互影响、相互关联^[2]。

极端气候事件对自然生态系统和社会经济系统造成的破坏严重。根据2017年发布的《全球气候风险指数报告》显示, 1997–2016年全球共计发生1.1万起极端气候事件, 共造成约52.4万多人死亡, 经济损失高达3.16万亿美元^[3]。除直接导致人类死亡外, 相关疾病的发病率也显著增加, 疾病疫情的传播范围变广、速率加快^[4–9]。同时, 农作物病虫害、冻害等发生频繁造成农作物减产进而威胁粮食安全^[10–12]。中国作为一个极端气候事件多发的国家也时刻面临着威胁和挑战, 郑景云^[13–14]等利用历史资

料通过分析中国过去2 000年的极端气候事件包括冷冬、炎夏、东北夏季低温以及极端干旱与大涝的变化, 证明中国历史上就是一个极端气候事件多发的国家。而2017年中国爆发的极端气候事件, 诸如: 风雹、低温冷冻、雪灾、洪涝等, 造成1.4亿人受灾, 直接经济损失达3 018.7亿元。

梳理过去关于极端气候事件和灾害研究发现学者们主要关注三个方面: 其一, 对致灾因子与承灾体暴露度^[15–19]、灾害脆弱性^[20–22]及对灾害感知及认知^[23–26]的考量。其二, 对极端气候事件的时空演变特征及其路径进行定性分析, 结合全球和区域气候模式对极端气候事件进行模拟与预测^[27–28], 并论证其不确定性^[29–31]。其三是对应急救援和灾后重建的研究, 主要从极端气候事件应急预案、重建方案和协同应急管理机制等方面展开探讨^[32–34]。通过梳理可以看出, 过去学者们主要聚焦于灾害事件的组成要素、属性和时空变化特征以及分布等方面的研究, 对极端气候事件演化过程与机制的研究略显不足。

在极端气候事件演化过程中, 重大气象灾害事件本身所具有的极端性一方面表现为灾害事件的突发性, 伴随着次生灾害群的演化, 灾害表现出群发性特点^[35–36], 可能衍生为巨灾。另一方面, 极端性表现为影响涉及面广或者程度深, 使得气候事件各要素与自然生态系统和社会经济系统中的各要素之间存在着相互作用的复杂关系和过程, 若极端事

^{*} 收稿日期: 2018–04–17 修回日期: 2018–06–08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771572)

第一作者简介: 何佳(1991–), 女, 陕西宝鸡人, 博士研究生, 研究方向为环境演变与自然灾害. E-mail: hejiahj2012@163.com

通讯作者: 苏筠(1974–), 女, 云南石屏人, 教授, 研究方向为自然灾害风险管理, 资源生态. E-mail: suyun@bnu.edu.cn

件发生发展过程中的某一关键环节受到扰动，可能会触发整个系统的连锁反应，打破系统原本的平衡态，放大或缩小事件的影响导致结果呈现非线性反馈，进而终止灾害进程或使系统崩溃。

根据 IPCC 第五次气候报告显示，未来随着气候变暖的加剧，全球范围内极端气候事件不论是从发生频率、强度、影响范围还是持续时间来看都呈增多、增强趋势^[37]。鉴于极端气候事件自然致灾过程的不可控特性，关注极端气候事件在社会经济系统中的演化过程与演变路径，明晰灾害事件致灾与成灾的复杂演化结构与耦合关系是调控灾害发生及灾害风险治理的基础。因此，本文将在综合前人研究的基础上系统梳理极端气候事件演化研究进展，为极端气候事件的响应策略提供参考依据。

1 极端气候事件演化研究进展

1.1 灾害事件演化阶段划分

根据灾害事件的不同种类，学者们按照灾害事件演化发展的生命周期，从不同视角出发建立灾害事件演化阶段模型，将事件演化划分为不同阶段，具体如下表 1 所示。

对比以上模型可以看出，有关灾害事件演化阶段的研究主要集中于社会灾害领域，涉及自然灾害事件演化阶段的研究较少，但其阶段划分的思路对自然灾害事件的成灾过程亦有参考价值。大部分演化模型注重对灾害事件过程的研究，对灾害事件演化机理的深入探讨偏少。

除上述灾害模型所提及的演化阶段分类外，国外 Mileti 等人在对灾害文献总结分析的基础上，将灾害事件演化归为反应、恢复、准备、减灾四个阶段^[43]；Salvatore 将灾害事件演化阶段分为征兆期、发作期、延续期和痊愈期^[44]。国内刘哲民等人在总结洪水、干旱、泥石流等自然灾害发生规律的基础

上，从灾害的共性出发，将灾害事件演化阶段归为孕育潜伏期、启动期、爆发-持续-衰落期和平静期^[45]；曹荣强则将灾害事件演化归为潜伏、诱发、发展、消亡四个阶段^[46]；赵云峰将其归为潜伏期、爆发期、衰退期三个阶段等^[47]。

综合不同灾害事件演化阶段分类可以发现，不论哪种灾害演化过程都具有相似的阶段，不同的是各阶段所持续的时间长短有所差异。不同的灾害阶段构成一个灾害周期，当某一灾害从潜伏到爆发再到趋于平静完成一个完整的灾害周期时，预示着下一个灾害周期已经开始。由此可见，灾害事件演化的实质就是由不同灾害阶段构成的特定的极端灾害过程。

1.2 灾害事件的演化方式

对于灾害事件演化方式的研究主要从灾害影响传递的角度展开。由于灾害系统的结构与功能特征相对复杂，系统中的各要素相互联系、相互影响，极端气候事件或灾害事件的影响传递通常具有雪崩效应或连锁效应^[48]。尤其是当极端气候事件以“打断”的方式“转入”社会系统导致系统内部出现震荡并以紧急或者危机的非常态模式运行，此时社会、人口、经济等各子系统会采取相应的响应、适应措施以应对极端气候事件对社会系统的冲击，系统随之可能会朝两种路径发展，可能导致灾害影响传递使灾害结果呈现非线性叠加或反馈；也有可能在这个环节或系统终止了灾害影响的传递，此时紧急或者危机结束，极端气候事件“转出”，社会系统逐渐恢复常态或进入新常态^[49]。

国外 Carpignano 等学者曾提出利用灾害损失链、多米诺效应、连锁效应、诱发效应等概念来描述这种由一种灾害引发另一种或几种灾害过程的方式^[50-51]。在国内，郭增建于 1987 年首次提出灾害链的概念并将其分为因果链、同源链、互斥链和偶排链四大类^[52]；在此基础上，史培军根据

表 1 灾害事件演化阶段模型

| 模型名称 | 提出者 | 灾害种类 | 演化阶段类别 | 演化阶段 | 是否涉及事件演化机理 | 具体机理 |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|--------|--|------------|--------------------|
| Turner 灾害阶段模型 ^[38] | Turner | 自然灾害和社会灾害 | 7 | 开始点、孵化期、急促期、爆发期、救援和救助期、社会调整期 | 否 | |
| Ibrahim-Razi 模型 ^[39] | | 社会灾害 | 7 | 错误产生阶段、错误聚集阶段、警告阶段、纠正或改进阶段、不安全状态阶段、诱发事件产生阶段、保护防卫阶段 | 是 | 组织系统内部各因素相互作用 |
| 系统失误和文化重新调整模型 SFCRM ^[40] | Toft 和 Reynolds | 社会灾害和事故 | 3 | 孕育期和社会技术系统的运行；爆发事件（诱因事件）、灾害爆发、救援、救难；调查报告和反馈 | 是 | 内部因素变化与外部环境不适应发生冲突 |
| 紧急事件演进模型 ^[41] | Burkholder | 紧急事件 | 3 | 急性阶段、晚期阶段、后事件阶段 | 否 | |
| 危机阶段模型 ^[42] | Fink | 危机 | 4 | 潜伏期、突发期、蔓延期、解决恢复期 | 否 | |

链式特征将灾害链归类为并发性和串发性两种类型, 同时经过统计大量灾害链实例归纳出台风-暴雨-洪涝-寒潮-大风-冰雪冻害、干旱/旱灾-病虫害、地震-崩塌-滑坡/泥石流 4 种主要影响中国的灾害链类型^[53]; 文传甲从起动灾环的种类、结构形状和复杂程度三个方面将灾害链分为灾链、祸链、树状链和混合链等^[54]; 陈兴民根据灾害过程将灾害链分为灾害蕴生链、灾害发生链和灾害冲击链^[55]; 肖盛燮等从物质、能量及信息的角度提出了灾变链式理论^[56]。

这些研究综合归纳出极端气候事件演化所具有的连锁性、叠加性和放大性等特征, 这些特征使得灾害过程变得更为复杂, 灾害损失变得严重。

1.3 灾害事件的演化分析方法

经过梳理当前国内外学者关于极端气候事件演化的研究成果可以发现, 关于极端气候事件演化的研究方法, 学者们关注的聚焦点在于是否将灾害事件视为一个复杂的非线性过程, 这成为选取不同方法的前提。

在现有的研究中大多学者都做了理想假设将极端气候事件视为由单一灾种主导的线性过程, 基于此种假设对极端气候事件做变化趋势和时空分布的定性研究, 所用的统计分析方法也是当前普适的分析方法。例如: 利用线倾向性估计法分析灾害事件变化趋势^[57], 并在此基础上结合 Arc-GIS 进行空间插值分析空间分布形态^[58-59]; 利用小波分析、谱分析等方法分析灾害事件的周期^[60-61]; 利用主成分分析、相关分析等方法识别灾害事件主导因子, 并对各因子间的相关性和事件整体性进行相关分析等^[62-63]。但这种线性形态的理想假设往往忽略了灾害事件间的相互关系, 可能会过高或过低地估计实际灾害水平而造成灾害风险偏差。为此, 一些学者将极端气候事件视为非线性过程并根据观点动力学的建模范式构建动态的复杂网络, 通过分析网络中灾害事件节点及其连接边之间的性质对极端气候事件的演化进行定量剖析。目前已有的研究方法有神经网络、复杂网络等^[64-65]。相较于神经网络侧重对极端气候事件的模拟与预测, 复杂网络则更倾向于深入探讨极端气候事件间的复杂演化与耦合关系。

2 复杂网络在极端气候事件演化分析中的应用

现有的对极端气候事件演化分析方法多为定性分析, 少部分定量分析以构建相应的数学模型和物理模型为主。随着极端气候事件愈演愈烈, 极端气候事件的演化过程趋于复杂, 演化的非线性特征也更加突出。因此, 近年来学者们基于系统动力学的观点在探讨极端气候事件演化机制与演变路径时引入了新的定量研究方法—复杂网络。不同于探索极端气候事件发展演化的一般规律,

复杂网络更注重对灾害事件间的复杂演化与耦合关系的深入剖析。那么, 什么是复杂网络?

2.1 复杂网络概要

复杂网络(Complex Network)是指具有自组织、自相似、小世界、无标度中部分或全部性质的网络^[66]。复杂网络的雏形出现于 1950 年代末, 学者 Erdos 等为避免理想网络过于规则的形态首先提出了 ER 随机网络模型, 这是一种完全随机的网络模型, 网络中的节点和边都是随机连接的^[67]。随后, 复杂网络的发展又相继出现了 WS 网络模型(小世界网络)和 BA 网络模型(无标度网络), 这两个网络的本质区别在于小世界网络模型的节点度分布服从指数分布而无标度网络节点分布服从幂率分布, 这更符合大规模真实网络的节点度分布^[68-69]。除了上述两个经典的网络模型外, Barabasi 和 Francesc Comellas 通过对网络模型的改良建立了确定性无标度网络模型和确定性小世界网络模型等, 使得网络中节点的分布更加精确^[70-71]。

2.2 复杂网络的应用

国内关于复杂网络的研究起步较晚, 相关理论于 2002 年出现于我国。目前, 国内关于复杂网络的应用研究主要涉及信息传播、计算机模拟、卫生管理以及经济管理等领域^[72-74]。根据整合国内外学者的研究成果不难发现关于复杂网络的研究主要体现在三个方面: ①是对现实网络的实证研究, 主要是用统计物理学等方法对非理想状态下的网络进行统计分析, 以直观获得其统计特性^[75]; ②基于对非理想状态的网络分析, 构建相应的演化模型, 根据网络的结构特点分析相应的演化机制^[76]; ③在前两者工作的基础上, 利用社会网络分析等方法进一步分析网络的动力学特征, 如网络同步的稳定性、社区结构性质、信息的扩散能力和网络的鲁棒性等^[77-80]。

目前复杂网络在低温冰冻、暴雨、台风等灾害事件的演化中都有应用^[81-83]。学者们利用复杂网络的相关理论和方法构建灾害演化网络模型, 在具体的分析中总体来看主要集中在三个方面: ①是对灾害网络的拓扑结构与属性的研究, 例如灾害网络的密度、平均度、集聚系数、路径长度等。用以判断灾害网络的基本特性; ②是对灾害网络结点中心性和聚类程度的研究, 用以识别关键节点也就是主要致灾因子, 在调整或去除这些灾害结点可改变或切断灾害事件演化路径, 防止灾情的扩大和蔓延; 例如, 朱伟等通过构建北方城市暴雨灾害演化网络模型对此次灾害事件的演化过程进行了风险分析, 并探讨了风险等级与出入度的关系^[84]; 徐选华等人通过分析湖南洪水灾害社会稳定风险拓扑图, 将洪水造成的社会稳定风险的演变路径分为三个阶段, 并识别出房屋倒塌、农作物减产绝收、社会恐慌等风险是整个系统演化的关键节点^[82]; ③是有关灾害网络的灾害蔓延动力学和网络动态演化仿真研究, 例如, 国外 Lubos Buzna 根据复杂网络的中心性和关键节点

理论去除原本网络中的某些关键节点或者边建立了灾害蔓延的动力学模型,重塑了灾害网络的拓扑结构,并提出了灾害预防的相关措施方法^[85-86]; Min Quyang 则针对冗余系统的无标度网络对灾害动态演化进行了仿真研究^[87]。国内,翁文国等学者在对电网、交通网、通信网、供水网等主要城市供给系统网络共性分析的基础上,结合中国的实际情况建立了一个通用的灾害蔓延动力学模型,该模型针对随机网络、小世界网络和无标度网络三种主要的复杂网络形式构建了自修复因子、延迟因子和噪声强度三个重要的特征参数,并充分考虑了参数值对各个网络结点修复率和崩溃结点数影响^[115]。

3 现有研究的评述与展望

国内外学者在极端气候事件演化研究相关领域进行了大量有益探索,取得了一定进展,但纵观相关研究成果还存在以下几方面的问题。

(1) 忽略极端气候事件演化的复杂性。当前大多数研究在探讨极端气候事件演化时都存在理想假设,即将灾害视为同质、线性且相互独立的事件。但在真实的演化过程中往往更为复杂,灾害事件表现出异质、非线性并相互缠绕的形态。这种对极端气候事件线性形态的理想假设往往忽略了灾害事件间的相互关系,导致过高或过低地估计实际灾害水平而造成灾害风险偏差。未来随着极端气候事件的持续演化,需要注重灾害事件内部异质、非线性的特性,加强对灾害事件演化过程的系统研究。

(2) 忽略极端气候事件演化的整体性。目前国内外对于极端气候事件演化研究的对象仅仅针对某一原发灾害或单一灾种,对于多灾种结合的灾害事件也只着重对主要致灾因子进行分析,而对由某一重大灾害而引发的次生灾害群组成在灾害系统没有进行深入探讨。并且,研究的内容关注点多集中在灾害爆发阶段,对灾前、灾后两个阶段的研究关注较少。未来随着可持续发展与防灾减灾的迫切需要,应该加强对次生灾害群及多灾种结合的极端气候事件演化的综合研究。

(3) 缺少极端气候灾害事件演化的定量分析。从国内外学者对极端气候事件演化的研究现状来看,现有的极端气候事件演化研究方法大多集中在利用统计等方法对灾害事件时空演化特征的定性描述,不能对灾害事件演化机理做深入剖析。在仅有少数的定量化分析中也只是通过建立数学模型或物理模型对灾害事件演化过程进行仿真模拟,缺少有效的定量分析工具深度挖掘极端气候事件的演化发展过程。未来随着灾害系统相关理论和技术方法的不断发展和深化,应扩充对极端气候事件演化过程和演变路径的定量分析,使灾害事件结构、复杂演化过程及耦合关系更为清晰,

为防灾减灾提供更可靠的决策意见和实施方案。

(4) 缺少极端气候事件与社会系统“转入-转出”的机理研究。极端气候事件发生导致社会系统以非常态运行,经过响应和适应,社会系统会逐渐恢复常态或进入新常态运行,通过“转入-转出”过程会使灾害事件最初的影响被抑制或放大。因此,未来在探讨极端气候事件演化过程中,需要注重灾害事件影响及其后果在社会-生态系统中的传递,明确极端气候事件与社会系统“转入-转出”的机理。同时,兼顾考虑极端气候事件的各要素与自然生态系统和社会-生态系统中的各要素之间相互作用的复杂关系,注重极端气候事件对人类社会多方面、多层次的影响。

参考文献:

- [1] World Meteorological Organization[EB/OL]. (2018-02-20) [2018-02-21]. <https://public.wmo.int/en>.
- [2] 罗亚丽. 极端天气和气候事件的变化[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 90-98.
- [3] Sönke, Eckstein, David, et al. Global climate risk index 2017: Who suffers most from extreme weather events? Weather-related loss events in 2015 and 1996 to 2015[EB/OL]. (2018-02-20) [2018-02-22]. <https://www.preventionweb.net/publications/view/51138>.
- [4] S M De, K Katsouyanni and P Michelozzi. Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe[J]. European Respiratory Journal, 2013, 42(3): 826-843.
- [5] DING N, H Berry and L O'Brien. The effect of extreme heat on mental health - evidence from Australia[J]. International Journal of Epidemiology, 2015, 44(S1): 164.
- [6] P R Epstein. West Nile virus and the climate[J]. Journal of Urban Health - bulletin of the New York Academy of Medicine, 2001, 78(2): 367-371.
- [7] D Roiz, P Boussès, F Simard, et al. Autochthonous Chikungunya Transmission and Extreme Climate Events in Southern France[J]. Plos Neglected Tropical Diseases, 2015, 9(6): 1-8.
- [8] A J Woodward, J M Samet. Climate Change, Hurricanes, and Health[J]. American Journal of Public Health, 2018, 108(1): 33.
- [9] 秦娟, 张金良. 中国极端天气气候事件对传染性疾病的影响[J]. 卫生研究, 2009, 38(6): 762-764.
- [10] Schmidhuber J, Tubiello F N. Global food security under climate change[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2007, 104(50): 19703-19708.
- [11] C Rosenzweig, A Iglesias, X B Yang, et al. Climate Change and Extreme Weather Events; Implications for Food Production, Plant Diseases, and Pests[J]. Global Change & Human Health, 2001, 2(2): 90-104.
- [12] 霍治国, 李茂松, 王丽, 等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1926-1934.
- [13] ZHENG J, HAO Z, FANG X, et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China[J]. Progress in Geography, 2014, 33(1): 3-12.
- [14] GE Q, ZHENG J, HAO Z, et al. Recent advances on reconstruction of climate and extreme events in China for the past 2000 years[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 827-854.
- [15] 王艳君, 高超, 王安乾, 等. 中国暴雨洪涝灾害的暴露度与脆弱性时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(6): 391-398.

- [16] A Garlati. Climate Change and Extreme Weather Events in Latin America; An Exposure Index[J]. Research Department Publications[EB/OL]. (2018-02-21) [2018-02-22]. <http://www.iadb.org>.
- [17] Y Kwak and Y Iwami. Rapid global exposure assessment for extreme river flood risk under climate change[J]. Journal of Disaster Research, 2016, 11(6): 1128-1136.
- [18] LIAO C G, QIN N X and HU Baoqing. Risk Exposure Assessment of Drought Disaster in 2015 Based on GIS and Weighted Composite Index Model[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(8): 69-73.
- [19] 王安乾, 苏布达, 王艳君, 等. 全球升温 1.5℃ 与 2.0℃ 情景下中国极端低温事件变化与耕地暴露度研究[J]. 气象学报, 2017, 75(3): 415-428.
- [20] 郭兵, 姜琳, 罗巍, 等. 极端气候胁迫下西南喀斯特山区生态系统脆弱性遥感评价[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7219-7231.
- [21] J Luh, E C Christenson, A Toregozhina, et al. Vulnerability assessment for loss of access to drinking water due to extreme weather events[J]. Climatic Change, 2015, 133(4): 665-679.
- [22] T Thomas, R K Jaiswal, R Galkate, et al. Drought indicators - based integrated assessment of drought vulnerability: a case study of Bundelkhand droughts in central India[J]. Natural Hazards, 2016, 81(3): 1627-1652.
- [23] 李景宜, 周旗, 严瑞. 国民灾害感知能力测评指标体系研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 129-134.
- [24] 周旗, 郁耀闯. 山区乡村居民的自然灾害感知研究——以陕西省太白县咀头镇上白云村为例[J]. 山地学报, 2008, 26(5): 63-68.
- [25] 尹衍雨, 苏筠, 叶琳. 公众灾害风险可接受性与避灾意愿的初探——以川渝地区旱灾风险为例[J]. 灾害学, 2009, 24(4): 118-124.
- [26] 苏筠, 张美华, 高立龙, 等. 防洪工程信任对公众水灾风险认知的影响初探——基于长江流域部分地区问卷调查的分析[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 75-80.
- [27] 梁驹, 梁骏, 雍阳阳. 广西极端降水事件气候态及其对 ENSO 的潜在响应[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(2): 117-127.
- [28] E Monier and GAO X. Climate change impacts on extreme events in the United States: An uncertainty analysis[J]. Climatic Change, 2015, 131(1): 67-81.
- [29] YIN J, XU Z, YAN D, et al. Simulation and projection of extreme climate events in China under RCP4. 5 scenario[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(2): 89-94.
- [30] E Buchignani, A L Zollo, L Cattaneo, et al. Extreme weather events over China: assessment of COSMO - CLM simulations and future scenarios[J]. International Journal of Climatology, 2016, 37: 1578-1594.
- [31] P D Jones and P A Reid. Assessing future changes in extreme precipitation over Britain using regional climate model integrations[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(11): 1337-1356.
- [32] 曾显坪. 冰雪灾害连锁演化机理及协同应急管理机制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [33] 沈航, 李梦雅, 王军. 风暴洪水灾害应急疏散方法研究——以浙江省玉环县为例[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(1): 122-126.
- [34] 孙超, 钟少波, 邓羽. 基于暴雨内涝灾害情景推演的北京市应急救援方案评估与决策优化[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 804-816.
- [35] M K van Aalst. The impacts of climate change on the risk of natural disasters[J]. Disasters, 2006, 30(1): 5-18.
- [36] 郑远长. 全球自然灾害概述[J]. 中国减灾, 2000(1): 14-19.
- [37] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [38] B A Turner. The organizational and interorganizational development of disasters[J]. Administrative Science Quarterly, 1976, 21(3): 378-397.
- [39] I M Shaluf, F R Ahmadun, A M Said, et al. Technological man-made disaster precondition phase model for major accidents[J]. Disaster Prevention & Management, 2002, 11(5): 380-388.
- [40] Toft B, Reynolds S. Learning from Disasters[D]. Butterworth - Heinemann: Oxford, 2003.
- [41] B T. Burkholder and M J Toole. Evolution of complex disasters: The Lancet[J]. Lancet, 1995, 346(8981): 1012-1015.
- [42] C Keown - McMullan. Crisis: when does a molehill become a mountain? [J]. Disaster Prevention & Management, 1997, 6(1): 4-10.
- [43] Mileti D S. Natural Hazard Warning Systems in the United States: A Research Assessment[M]. University of Colorado, Institute of Behavioral Science press, 1975.
- [44] S Belardo and H Pazer. A framework for analyzing the information monitoring and decision support system investment tradeoff dilemma: an application to crisis management[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 1995, 42(4): 352-359.
- [45] 刘哲民. 灾害演化探析[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 64-66.
- [46] 曹荣强. 群体性突发事件演化机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [47] 赵云峰. 非常规突发事件的应急管理研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [48] M L Giulio. volcanic crisis management and mitigation strategies: a multi-risk framework case study[J]. Earthzine, 2011, 4: 402-405.
- [49] 史培军, 卡罗, 叶谦. 综合风险防范——IHDP 综合风险防范核心科学计划与综合巨灾风险防范研究[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2012.
- [50] A Carpignano, E Golia, C D Mauro, et al. A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application[J]. Journal of Risk Research, 2009, 12(4): 513-534.
- [51] W R Dombrowsky. Again and again: Is a disaster what we call a "disaster"? [J]. International Journal of Mass Emergencies & Disasters, 1995, 13(3): 241-254.
- [52] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987(2): 30-38.
- [53] 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.
- [54] 文传甲. 论大气灾害链[J]. 灾害学, 1994, 9(3): 1-6.
- [55] 陈兴民. 自然灾害链式特征探论[J]. 西南大学学报(社会科学版), 1998(2): 122-125.
- [56] 肖盛燮, 冯玉涛, 王肇慧, 等. 灾变链式阶段的演化形态特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2629-2633.
- [57] 王安乾, 苏布达, 王艳君, 等. 中国极端低温事件特征及其耕地暴露度研究[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 954-963.
- [58] ZHAO J, XU J, LI X, et al. Characteristics analysis of spatial and temporal variation on extreme weather events in Anhui Province for recent 50 years[J]. Natural Hazards, 2017, 89(2): 817-842.
- [59] WU C H, HUANG G R, YU H J, et al. Spatial and temporal distributions of trends in climate extremes of the Feilaixia catchment in the upstream area of the Beijiang River Basin, South China[J]. International Journal of Climatology, 2015, 34(11): 3161-3178.
- [60] CHEN J Y and ZHAO J B. Trends of Extreme Weather Events in Inner Mongolia during the Period of 1960-2014[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 997-1009.
- [61] SUN W, MU X, SONG X, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960-2013 under global warming[J]. Atmospheric Research, 2016,

- 168(22): 33–48.
- [62] M Darand, A Masoodian, H Nazaripour, et al. Spatial and temporal trend analysis of temperature extremes based on Iranian climatic database (1962 – 2004) [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(10): 8469–8480.
- [63] A Busuioc, A Dobrinescu, M V Birsan, et al. Spatial and temporal variability of climate extremes in Romania and associated large - scale mechanisms [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1278–1300.
- [64] L Bodri and V Čermák. Prediction of extreme precipitation using a neural network; application to summer flood occurrence in Moravia [J]. *Advances in Engineering Software*, 2000, 31(5): 311–321.
- [65] 周璞, 江志红. 自组织映射神经网络(SOM)降尺度方法对江淮流域逐日降水量的模拟评估[J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(5): 512–524.
- [66] M E J Newman. The structure and function of complex networks [J]. *Siam Review*, 2003, 45(2): 167–256.
- [67] Albert R, Barabási A L. Statistical Mechanics of Complex networks [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2001, 74(1): 47–97.
- [68] Watts D J, Strogatz S H. Collectivedynamics of “small – world” networks [J]. *Nature*, 1998: 440–442.
- [69] A L Barabási and R Albert. Emergence of scaling in random networks [J]. *Science*, 1999, 286: 559–564.
- [70] A L Barabási, E Ravasz and T Vicsek. Deterministic scale – free networks [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2001, 299(3): 559–564.
- [71] F Comellas and M Sampels. Deterministic small – world networks [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2001, 309(1): 231–235.
- [72] 高自友, 赵小梅, 黄海军, 等. 复杂网络理论与城市交通系统复杂性问题的相关研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2006, 6(3): 41–47.
- [73] 刘涤尘, 冀星沛, 陈果, 等. 基于复杂网络理论的电力通信网加边保护策略 [J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(10): 121–126.
- [74] 岳希坚, 袁永博, 张明媛, 等. 基于复杂网络理论识别油库关键安全风险因素 [J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(5): 146–151.
- [75] 霍朝光, 霍帆帆. 社交舆情传播影响因素研究述评——基于复杂网络视角 [J]. *现代情报*, 2016, 36(7): 171–176.
- [76] 李敏, 陈建二, 王建新. 基于复杂网络理论的 PPI 网络拓扑分析 [J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(8): 20–22.
- [77] 张峥, 朱炫颖. 复杂网络同步控制的研究进展 [J]. *信息与控制*, 2017, 46(1): 103–112.
- [78] F Jia, S O Mathematic and C N University. Group synchronization of complex network with community structure [J]. *Journal of Hebei Normal University*, 2017, 41(4): 298–302.
- [79] S Saha and S P Ghreera. Nearest neighbor search in the metric space of a complex network for community detection [J]. *Information*, 2016, 7(1): 1–26.
- [80] O Lordan, J M Sallan and P Simo. Study of the topology and robustness of airline route networks from the complex network approach: a survey and research agenda [J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 37: 112–120.
- [81] 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.
- [82] XU X H, WANG C H, CAI C G, et al. Evolution and coping research for flood disaster social stability risk based on the complex network [J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(3): 1491–1500.
- [83] CHEN C and JI D. Risk Analysis and Control for the Evolution Disaster System of Typhoon Based on Complex Network [J]. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(1): 1–4.
- [84] 朱伟, 陈长坤, 纪道溪, 等. 我国北方城市暴雨灾害演化过程及风险分析 [J]. *灾害学*, 2011, 26(3): 88–91.
- [85] L Buzna, K Peters and D Helbing. Optimized response to cascading failures in complex networks [C]//Risk, Reliability and Societal Safety, Stavanger: European Safety and Reliability Conference, 2007: 865–872.
- [86] L Buzna, K Peters and D Helbing. Modelling the dynamics of disaster spreading in networks [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2006, 363(1): 132–140.
- [87] OUYANG M, YU M H, HUANG X Z, et al. Emergency response to disaster – struck scale – free network with redundant systems [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2008, 387(18): 4683–4691.
- [88] 翁文国, 倪顺江, 申世飞, 等. 复杂网络上灾害蔓延动力学研究 [J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 1938–1943.

Research Progress on Extreme Climate Events and Evolution of Major Disasters

HE Jia¹ and SU Yun^{1, 2}

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With the intensification of global change, the evolution and development of extreme climate events and major disasters have become one of the hot issues in disaster research. On the basis of sorting out and analyzing the related literatures on the evolution of extreme climate events, the existing research results are summarized from three aspects: evolution stage, evolution mode and evolution analysis method, and the multi-dimensional research method, complexity, which is used to distinguish the complex evolution structure and coupling relationship of disaster events, is emphasized. The application of Complex (Network) in the analysis of extreme climate events. It is found that the current research on the evolution of extreme climate events is facing the following problems and challenges: we should pay attention to the complexity and integrity of the evolution of extreme climate events, strengthen the quantitative analysis of the evolution of extreme climate events, and strengthen the study on the mechanism of extreme climate events and the turn-out of the social system.

Key words: extreme climate events; disaster events; evolutionary stages; evolutionary analysis methods; complex networks; research progress