

暴雨洪水灾害人口损失评估方法研究进展

尹卫霞^{1,2}, 余瀚^{1,2}, 崔淑娟^{1,2}, 王静爱^{1,2,3*}

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学区域地理研究实验室, 北京 100875;
3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:在气候变化与城市化背景下,暴雨洪水灾害损失风险加剧,给人口生命安全带来极大威胁,评估暴雨洪水灾害的人口损失成为灾害风险研究关注的焦点问题。本文基于灾害系统理论,归纳了基于“致灾因子(H)—承灾体(V)—孕灾环境(E)—人口损失(D)”的暴雨洪水灾害人口损失评估的概念框架;基于现有国内外典型研究,梳理了相应的指标体系和研究方法,以“影响指标—损失指标—分析方法”多维图显示,认为“综合影响因素—人口损失”关系分析是评估暴雨洪水灾害人口损失的核心。目前人口损失的评估方法依据其考虑的要素可划分为:基于“H-D”关系的脆弱性曲线法、基于“H-V-E-D”关系的多要素综合法和刻画过程的灾害系统模拟法等。着重从数据可获取性和方法有效性两方面进行综述,认为单一方法不能满足人口损失风险评估的需求,因此从灾害系统角度出发,从单一要素向多要素综合发展、从指标统计分析向过程动态模拟发展、从单一方法向系统集成方法发展是人口损失及风险定量评估的发展趋势。

关键词:暴雨洪水;人口损失评估;自然灾害系统;脆弱性曲线

1 引言

当前,气候变化所引起的灾害风险增加已成为影响全球安全与发展的重大挑战(UNISDR, 2009)。其中,暴雨洪水灾害是全球发生最频繁、影响最严重的自然灾害之一。仅在2000-2012年,全球发生特大规模洪水灾害2200次,平均每年影响人口数量达1亿左右(EM-DATA, 2014)。联合国政府间气候变化专门委员会的第五次评估报告预计,今后强降水等极端气候事件的出现将更加频繁(IPCC, 2013)。在全球变化背景下,未来暴雨洪水灾害风险将进一步增大。

灾害的人口损失历来是社会和公众关注的焦点,特别是由暴雨洪水造成的人口损失。人类“依水而居”的特性使其成为暴雨洪水灾害最敏感、最脆弱的承灾体,洪水灾害影响人口占有所有自然灾害影响总人口的52%(Jonkman, 2005)。随着城市化进

程加快,人口密度不断增加、人口和财富高度集中,使得人口受暴雨洪水灾害影响与日俱增、风险加剧(Hanson et al, 2011; Peduzzi et al, 2012)。有研究指出,过去40年世界人口增长了87%,而洪水易发区中的人口增长了114%(Velasquez et al, 2012)。暴雨洪水灾害人口损失评估已成为综合风险评估与防范研究亟待解决的重要议题。

暴雨洪水灾害对人口损失的影响机制复杂,它受区域经济、社会、文化等多因素综合影响,人口的主观能动性也使得灾害应对过程呈现高度的动态性和不确定性。如何定量评估暴雨洪水灾害人口损失是本文探讨的核心问题。本文基于灾害系统理论,梳理暴雨洪水灾害人口损失评估方法体系;重点对基于多要素综合、基于脆弱性曲线构建和基于灾害系统模拟的人口损失评估法进行综述,以期暴雨洪水灾害人口损失及风险定量评估提供科学方法支撑。

收稿日期:2015-07;修订日期:2016-01。

基金项目:教育部—国家外国专家局高等学校创新引智计划项目(B08008) [Foundation: Expertise-Introduction Project for Disciplinary Innovation of Universities, No.B08008]。

作者简介:尹卫霞(1989-),女,山西忻州人,博士生,从事自然灾害人口脆弱性及风险评价研究, E-mail: yinwx@mail.bnu.edu.cn。

通讯作者:王静爱(1955-),女,河北定州人,硕士,教授,从事自然灾害风险评价和区域地理研究, E-mail: jwang@bnu.edu.cn。

引用格式:尹卫霞,余瀚,崔淑娟,等. 2016. 暴雨洪水灾害人口损失评估方法研究进展[J]. 地理科学进展, 35(2): 148-158. [Yin W X, Yu H, Cui S J, et al. 2016. Review on methods for estimating the loss of life induced by heavy rain and floods[J]. Progress in Geography, 35(2): 148-158.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.02.002

2 基于灾害系统的暴雨洪水灾害人口损失评估方法体系

在评估暴雨洪水灾害人口损失时,对于指标的分类,研究者们尚未达成一致的观点。Brazdova等(2014)将影响人口损失的指标分为致灾因子指标、暴露性指标、脆弱性指标三类;Penning-Rowell等(2005)分为洪水强度指标、人口脆弱性指标、区域脆弱性指标;Jonkman(2007)则分为洪水指标和系统指标两类,系统指标具体包括建筑质量、撤离计划、人口响应行为等。不同的研究,虽然在指标的分类体系方面有较大差异,但在具体指标的选择方面有较高一致性。本文尝试从灾害系统的角度对这些指标进行分类。

基于灾害系统理论,人口损失(D)是致灾因子(H)、承灾体脆弱性(V)、孕灾环境不稳定性(E)综合作用的结果。其中,脆弱性指的是暴露承灾体的脆弱性(史培军, 1991, 2005)。图1是基于灾害系统的暴雨洪水灾害人口损失评估概念框架。暴雨洪水灾害系统的致灾因子通常涉及暴雨特征和洪水特征;孕灾环境包括地形、地表覆盖等自然环境和基础设施、房屋、交通等人文环境,它会对暴雨洪水强度产生放大或缩小作用,同时也会对人口承灾体的脆弱性产生影响。需特别指出的是,虽然暴雨洪水灾害的承灾体包括人口、房屋、交通、基础设施、自然资源等,但本文仅研究人口灾情,故人口为

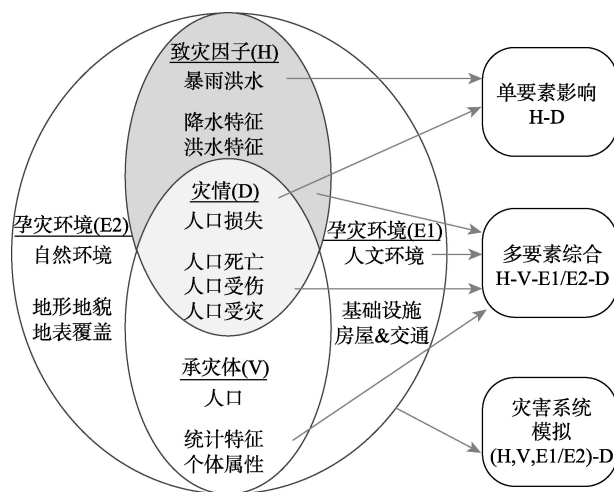


图1 基于灾害系统的暴雨洪水灾害人口损失评估概念框架

Fig.1 Framework for estimating the loss of life induced by heavy rain and floods based on the natural disaster system theory

承灾体,交通、房屋、基础设施等视为人口损失的人文孕灾环境。人口灾情是指人口损失,包括人口死亡、人口受伤、人口受灾等。评估“综合影响因素—人口损失”的关系是暴雨洪水灾害人口损失评估的关键,其定量评估由简单到复杂可分为:“致灾因子(H)—人口损失(D)”评估、“致灾因子(H)—承灾体(V)—孕灾环境(E)—人口损失(D)”评估、灾害系统模拟评估3方面。

在大量文献阅读的基础上,本文选择31篇代表性文献,构建了“影响指标—损失指标—分析方法”多维图(图2)。其中包括6个致灾因子指标、6个孕灾环境指标、5个承灾体指标和6个人口损失指标(表1),这些指标的数据形式包括数值和文字。“影响指标—人口损失”关系评估方法包括情景查找、经验统计、多元回归、概率网络、脆弱性曲线以及灾害系统模拟等。

由图2可以看出:①致灾因子指标以水深为主(73%的文献使用),其次为流速,它们是影响人口在洪水中稳定性的最重要因素,是表征洪水严重程度的关键指标(Reiter, 2001; Jonkman, 2007; Escuder-Bueno et al, 2012)。②孕灾环境指标多样。其中,人文孕灾环境(如房屋、交通等)的不稳定都会导致人口损失(Jonkman, 2007),形成“洪水→房屋倒塌/交通工具摧毁→人口砸伤/人口被困”灾害链。特定孕灾环境下的灾害链对灾情的放大作用在人口损失准确评估中需予以高度关注。③承灾体指标强调人口的动态性和主观能动性,如预警时间指标使用最多,占40%,通过人口的撤离、避难等行为影响人口损失(Graham, 1999; Boyd, 2010);又如,洪水发生时间,晚上或凌晨人口的状态会降低人口接受预警的可能性及应急响应能力,增加人口脆弱性,从而放大灾情。④灾情指标较为统一,以人口死亡率为,占73%;人口损失率能直接体现区域受影响的程度(石勇等, 2009)。

3 暴雨洪水灾害人口损失评估方法

3.1 基于多要素综合的人口损失评估方法

基于多要素综合的人口损失评估法是分析“H-V-E-D”之间的关系,研究方法主要有情景查找、经验统计、多元回归和概率网络等方法。

(1) 情景查找方法

基于专家经验及案例,构建H、V、E的等级组合

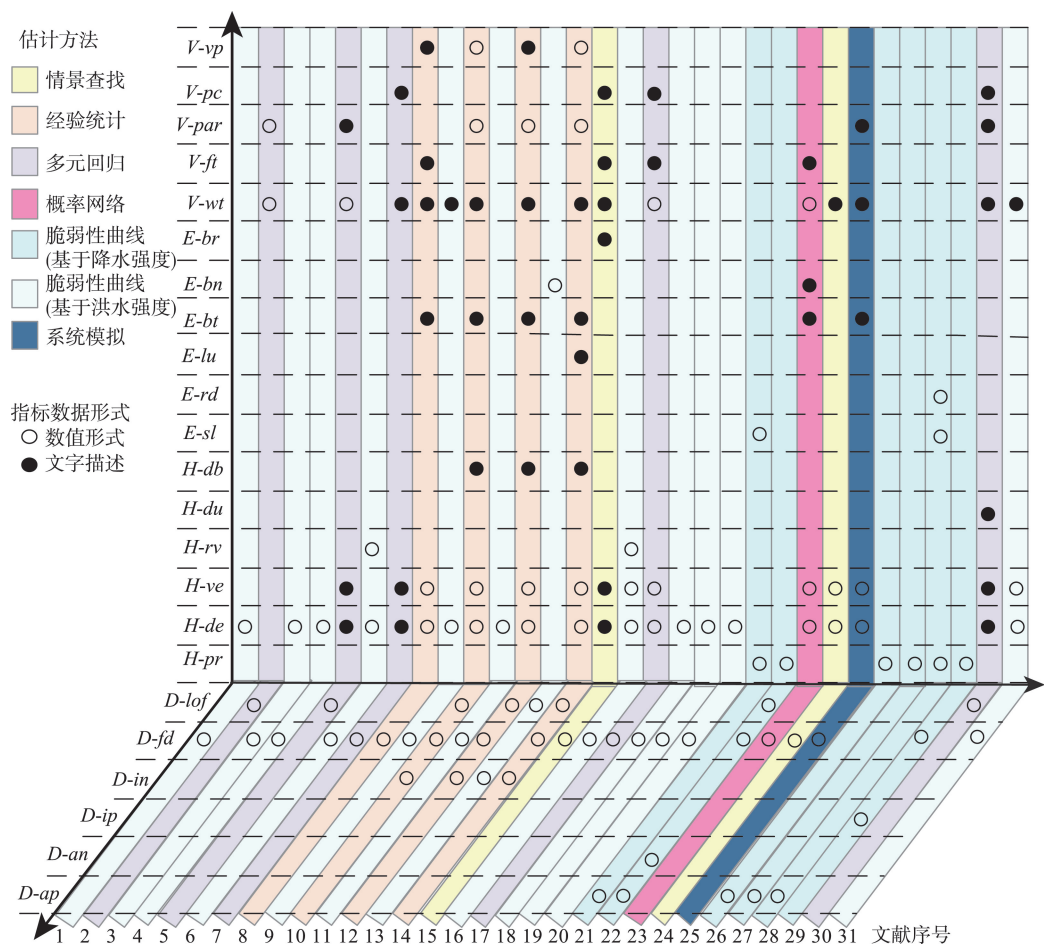


图2 暴雨洪水灾害人口损失评估的“影响指标—损失指标—分析方法”多维图^①
Fig.2 "Impact indicator—loss indicator—analytical method" multidimensional diagram
based on references for estimating loss of life in flood disasters

表1 暴雨洪水灾害人口损失评估的指标代码解释

Tab.1 Codes of indicators used in estimating loss of life from heavy rain and floods

指标代码	指标名称及含义	指标代码	指标名称及含义
<i>V-vp</i>	脆弱性人口(如老年人、儿童、残疾/长期生病的人)占总人口的比例	<i>H-du</i>	洪水的持续时间
<i>V-pc</i>	洪水感知,如人口对洪水严重程度的理解	<i>H-rv</i>	洪水水面的上升速度
<i>V-par</i>	风险区人口数量	<i>H-ve</i>	洪水的流速
<i>V-ft</i>	洪水发生时间,包括假日凌晨、工作日凌晨、假日夜间、工作日夜间、白天	<i>H-de</i>	洪水影响区的水深
<i>V-wt</i>	预警时间,从预警发布到洪水到达前的时间	<i>H-pr</i>	降水量,如日降水量、3日降水量
<i>E-br</i>	建筑物抗洪能力	<i>D-lof</i>	人口死亡数量
<i>E-bn</i>	受淹房屋数量	<i>D-fd</i>	人口死亡率
<i>E-bt</i>	房屋类型,如可移动房屋、平房、一层以上楼房等	<i>D-in</i>	人口受伤数量
<i>E-lu</i>	土地利用类型,包括城市用地、农村用地、商业用地等	<i>D-ip</i>	人口受伤率
<i>E-rd</i>	到最近河流的距离	<i>D-an</i>	人口受灾数量
<i>E-sl</i>	地形条件,如坡度、坡降	<i>D-ap</i>	人口受灾率
<i>H-db</i>	洪水是否诱发泥石流次生灾害		

①对应文献为:1. 引自 Jonkman, 2008; 2. Brown et al, 1988; 3. Duiser, 1989; 4. Waarts, 1992; 5. DeKay et al, 1993; 6. Vrouwenvelder et al, 1997; 7. Graham, 1999; 8. Reiter, 2001; 9. Jonkman, 2001; 10. Ramsbottom et al, 2003; 11. 引自 Jonkman, 2007; 12. Penning-Rowse et al, 2005; 13. Zhai et al, 2006; 14. Priest et al, 2007; 15. 周克发等, 2007; 16. Jonkman et al, 2008; 17. 王志军等, 2008; 18. Jonkman et al, 2009; 19. Koshimura et al, 2009; 20. Boyd et al, 2010; 21. 史培军, 2011; 22. Li et al, 2012; 23. Peng et al, 2012; 24. Escuder-Bueno et al, 2012; 25. Johnston, 2012; 26. 黄崇福等, 2013; 27. Pang, 2013; 28. 杨帅等, 2014; 29. 扈海波等, 2014; 30. Brazdova et al, 2014; 31. U.S. Department of the Interior, 2014.

情景与人口损失率的关系表格,通过查找并与该表格内对应情景匹配得到现有或未来事件的人口损失,该方法可称为情景查找法。

Graham(1999)基于美国1960-1998年40个溃坝洪水案例,选取洪水严重程度(FS)、预警时间(WT)、人口对洪水严重性的理解程度(PC)3项指标,分别分等级依次设置情景(表2)。

首先,基于FS的低、中、高等级,形成3个FS情景;然后,针对FS的中、低2个情景,再根据WT分为:没有或几乎没有预警时间(<15 min)、少量预警时间(15~60 min)和足够预警时间(>60 min)等级,形成6个“FS-WT”情景;最后,只针对WT≥15 min的4个“FS-WT”情景,每个情景都分为模糊理解和准确理解,形成8个“FS-WT-PC”情景。最终形成1个FS、2个“FS-WT”、8个“FS-WT-PC”,共11个情景。为了建立各情景下的人口死亡率的估计值和阈值,将40个洪水灾害案例归类为上述的11个情景。针对每个情景下的案例死亡率,计算平均值作为“人口死亡率估计值”,识别最小值与最大值的阈值作为“人口死亡率估计范围”。此方法在国内也有应用(周克发等,2007)。

情景查找方法不仅可以考虑H、V、E多要素对人口损失率的综合影响,而且为损失率估计提供了简单、快捷的查找途径,但情景的设定依赖于专家经验与先验知识,主观性较大,且案例数据的不完备性会使估计的人口损失率有一定的不确定性。该方法适用于暴雨洪水灾害人口损失的快速评估。

(2) 经验统计方法

以经验为基础构建H、V、E与D的关系式,以区

域统计数据为基础计算人口损失的方法可归类为经验统计法。

英国水力研究院针对欧洲洪水开发的洪水人口风险法(Flood risks to people' methodology)(Reiter, 2001; Ramsbottom et al, 2003; Penning-Rowsell et al, 2005),认为人口损失是洪水特征、位置特征、人口特征综合作用的结果,可用式(1)的概念模型表示:

$$E=f(F, L, P)$$
(1)

式中: E 为人口损失; F 为洪水指标(水深、流速等), L 为位置特征(在建筑内或外;房屋特征等); P 为人口属性(年龄、健康等)。基于该概念模型,结合专家经验,提出人口受伤数量和死亡数量的计算方法:

$$N(I)=2N(Z)\times\frac{HR\times AV}{100}\times PV$$
(2)

$$N(D)=2N(I)\times\frac{HR}{100}$$
(3)

$$HR=d\times(v+0.5)+DF$$
(4)

$$AV=ONSET+AREA+FW$$
(5)

$$PV=pi+pa$$
(6)

式中, $N(I)$ 为受伤人口数量; $N(Z)$ 为风险区域人口数量; HR 为洪水特征函数; AV 为位置特征函数; PV 为人口特征函数; $N(D)$ 为死亡人口数量; $N(I)$ 为受伤人口数量; d 为洪水水深(m); v 为洪水流速(m/s); DF 为洪水诱发泥石流的可能性赋分(由小到大,依此赋值0、0.5、1); $ONSET$ 为洪水上升速度赋值(1—非常缓慢/多个小时;2—缓慢/1小时左右;3—快速/小于1小时); $AREA$ 为区域特征赋值(1—多层建筑;2—两层建筑;3—平房、移动房、拥挤道路、停车场、露营地等); FW 为洪水预警赋值(1—具有有效的洪水预警和应急计划;2—仅有有

表2 美国溃坝洪水人口死亡率查找表(引自:Graham, 1999)

Tab.2 Fatality rates of dam failure in the United States under different scenarios (From: Graham, 1999)

洪水强度(FS)	预警时间 (WT) /min	人口对洪水严重程度理解(PC)	人口死亡率(可能死亡人口占风险中人口的比例)	
			估计值	估计范围
高	—	—	0.7600	0.300~1.0000
中	没有或几乎没有预警时间	—	0.1500	0.030~0.3500
		模糊理解	0.0400	0.010~0.0800
	足够预警时间	准确理解	0.0200	0.005~0.0400
		模糊理解	0.0300	0.005~0.0600
		准确理解	0.0100	0.002~0.0200
		—	0.0100	0.000~0.0200
低	没有或几乎没有预警时间	—	0.0100	0.000~0.0200
		模糊理解	0.0070	0.000~0.0150
	足够预警时间	准确理解	0.0020	0.000~0.0040
		模糊理解	0.0003	0.000~0.0006
		准确理解	0.0002	0.000~0.0004
		—	0.0002	0.000~0.0004

限的洪水预警系统;3—没有洪水预警系统); p_i 为区域内长期生病人口比例; p_a 为区域内 75 岁及以上人口比例。基于式(2)-(6)的经验关系,结合洪水灾害事件数据及区域统计数据,可直接计算人口损失数量。

经验统计方法不仅以确定的公式表达 H、V、E 等多要素与 D 的关系,且基础数据较易获取。但“H-V-E-D”关系式的构建是基于专家经验,在不同区域的适用性和推广性尚需进一步验证。该方法适用于案例数据缺少、调查数据较易获取区域的暴雨洪水灾害人口损失评估。

(3) 多元回归方法

基于洪水灾害案例和社会经济等数据,拟合 D 与 H、V、E 之间关系函数的方法可归类为多元回归法。

全球尺度上,UNDP(Peduzzi et al, 2009)在对人口死亡风险进行评价时,构建了洪水死亡人口数量与洪水频次、暴露人口数量及多脆弱性指标的多元回归模型(式(7)):

$$K = C \cdot (PhExp)^a \cdot V_1^{\alpha_1} \cdot V_2^{\alpha_2} \cdots V_p^{\alpha_p} \quad (7)$$

式中: K 为洪水灾害导致的死亡人数; C 为常数; $PhExp$ 为物理暴露,即生活在暴露区的人口数量乘以致灾因子发生频率; V_i 为社会经济参数,包括经济、环境、人口、健康、卫生条件、预警能力、教育、发展 8 个方面的 25 个变量; α_i 为 V_i 的指数。基于各国 1980-2000 年的相关数据对式(7)的参数进行拟合,得到全球尺度洪水灾害人口损失估计函数。

在大洲尺度上,有研究者针对中欧地区的洪水灾害,构建了式(8)的人口死亡数量多元回归模型(Brazdova et al, 2014):

$$LOL = 10^a \cdot (D)^b \cdot (P+2)^c \cdot (W+2)^d \quad (8)$$

式中, LOL 为人口死亡数量; D 为物质损失(\$),间接表征洪水危险性; P 为洪水管理因素,包括对洪水危险性的认知、洪水经验、洪水管理相关文件、对水文预报的反应、对洪水预警的反应、撤离/应急行动等 8 个指标,各指标分别赋值后求平均得 P 值; W 为洪水预警因素,包括水文预报条件、洪水到达速度、预警条件、洪水上升速度等 4 个指标,各指标分别赋值后求平均得 W 值; a 、 b 、 c 、 d 是系数。各参数的拟合是基于 19 个中欧洪水案例数据得到,分别为: $10^a = 0.075$; $b = 0.384$; $c = -3.207$; $d = -1.017$ 。

在国家尺度上,有学者根据中国溃坝案例数据,基于支持向量机方法,构建了人口损失率同溃坝洪水严重程度、救援能力、警报时间、溃坝发生时间以及风险人口对溃坝洪水严重性的理解程度 5 个变量的回归模型(王志军等, 2008)。

多元回归分析方法以连续函数形式表达 H、V、E 等多要素与 D 的关系,且模型的参数可直接、客观地反映不同要素对人口损失形成的贡献。该方法适用于暴雨洪水灾害人口损失的驱动因素分析。

(4) 概率网络方法

通过构建指标的网络关系,基于概率估计,推算人口死亡率的方法,可归为概率网络法。应用概率网络法的一般模式是以节点代表随机变量,节点之间的有向边代表节点间的互相关系(由父节点指向其子节点),用条件概率表达关系强度,没有父节点的用先验概率进行信息表达。

Peng 等(2012)提出了基于贝叶斯网络评估人口损失的方法,其选取 15 个影响指标作为基本节点(8 个)和中间节点(6 个),生命损失指标作为端节点(1 个),给出了 16 个节点所有可能的状态以及各节点之间的关系(图 3)。图中数字表示节点的状态类别

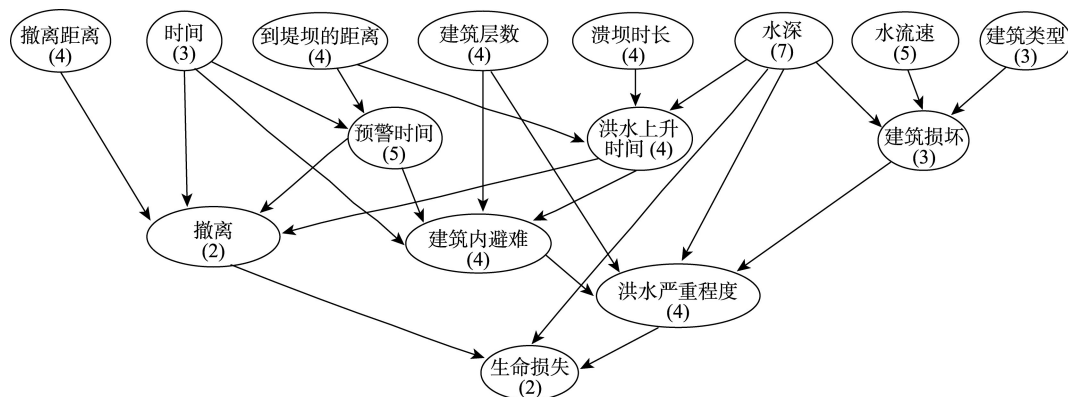


图3 评估人口损失的贝叶斯网络(修改自: Peng et al, 2012)

Fig.3 Bayesian network for estimating loss of life (Modified from: Peng et al, 2012)

的个数:“撤离距离”有4个状态,分别为0~100 m、100~500 m、500~2000 m、>2000 m;“时间”有3个状态,分别为8:00-17:00、17:00-22:00、22:00-8:00;“到堤坝的距离”有4个状态,分别为0~4.8 km、4.8~12 km、12~36 km、>36 km;“建筑层数”有4个状态,分别为1层、2层、3层、3层以上;“溃坝时长”有4个状态,分别为0~1 h、1~3 h、3~9 h、>9 h;“水深”有7个状态,分别为0~1.5 m、1.5~3 m、3 m~4.5 m、4.5~6 m、6~7.5 m、7.5~9 m、>9 m;“水流速”有5个状态,分别为0~1 m/s、1~2 m/s、2~4 m/s、4~6 m/s、>6 m/s;“建筑类型”有3个状态,分别为非固定木制结构、固定木制结构、砌体/混凝土/砖造结构;“预警时间”有5个状态,分别为0~0.25 h、0.25~1 h、1~3 h、3~6 h、>6 h;“洪水上升时间”有4个状态,分别为0~0.25 h、0.25~1 h、1~3 h、>3 h;“建筑损坏”有3个状态,分别为轻微损坏、部分损坏、大部分损坏;“撤离”有2个状态,分别为撤离、没有撤离;“建筑内避难”有4个状态,分别为没有建筑可避难、最高第二层可躲避、最高第三层可躲避、第三层以上可躲避;“洪水严重程度”有4个状态,分别为安全、低严重、中严重、严重;生命损失有2个状态,分别为存活、死亡。

首先,基于案例数据、专家经验推算得到各基本节点的不同状态的先验概率,如“时间”状态为“8:00-17:00”的先验概率,等于发生在8:00-17:00之间的洪水案例数量占总案例数量的比例(0.38)。然后,结合现有文献中的理论模型、物理模型及专家经验等定量各指标的不同状态间的条件概率,例如,基于Graham(1999)给出的预警启动时间和基于对洪水流速的估计,利用蒙特卡洛模拟,得到预警时间各状态的条件概率;当“到堤坝的距离”的状态为“0~4.8 km”、“时间”的状态为“8:00-17:00”时,“预警时间”状态为“0~0.25 h”、“0.25~1 h”、“1~3 h”“3~6 h”“>6 h”的条件概率分别为0.0772、0.5009、0.4219、0和0。最后,基于以上计算得到的先验概率和条件概率,推算得到各中间节点、端节点不同状态的先验概率,端节点处于“死亡”状态的先验概率即为人口死亡率。

概率网络方法定量表达了H、V、E、D之间复杂的关系,可以揭示各影响因素对人口损失的作用机制。但这种指标间的相互影响关系只是逻辑上的关联,仅是对可能性的表达。该方法适用于区域暴雨洪水灾害人口损失风险评价。

3.2 基于脆弱性曲线构建的人口损失评估方法

表达H与D之间的函数关系的曲线,称为脆弱性

曲线,是定量评估人口损失和风险的主要方法之一。

暴雨洪水灾害人口脆弱性曲线的函数拟合形式包括指数(图4a、4d)、对数(图4b)、“S”型(图4e)、三维曲面(图4f)等。当灾害案例样本较少时(Pang, 2013; 黄崇福等, 2013),也可能使用折线形式表达(图4c)。

依据致灾因子指标类型,将暴雨洪水灾害人口脆弱性曲线分为两类:一是基于降雨强度的脆弱性曲线(图4a-4c)(Li et al, 2012; 黄崇福等, 2013; 杨帅等, 2014),二是基于洪水强度的脆弱性曲线(图4d-4f)(Jonkman et al, 2002, 2007)。

基于降水强度的人口脆弱性曲线研究中,大多采用降水量指标,如日最大降水量(李晓萌等, 2013)、3日最大降水量(Li et al, 2012; 邢颖, 2014)等指标。Li等(2012)在分析人口损失数量与洪水影响中心区1-7日最大降水量的相关性的基础上,提出3日最大降水量对洪水损失的影响最大;进而选取3日最大降水量作为测量洪水强度的指标,构建人口脆弱性曲线。也有学者使用地形(史培军, 2011; 杨帅等, 2014)、地表覆盖(杨帅等, 2014)等因素对降水量进行修正,以区分相同降水量情况下,不同区域因地形条件、河网特征等孕灾环境不同而形成的洪水强度差异。由于降水量指标可直接应用气象观测数据,因此在数据的可获取性等方面具有明显优势(Wheater et al, 2005)。

基于洪水强度的人口脆弱性曲线研究中,大多采用水深、流速和水面上升速度等指标。水深是影响静态洪水人口损失的重要因素,常作为曲线函数关系式的自变量。流速和水面上升速度是表征动态洪水危险性的重要参数(Middelmann-Fernandes, 2010),但因数据获取有一定难度,仅作为分区构建脆弱性曲线的依据(Papathoma-Köhle et al, 2011)。如Jonkman(2007)认为对于同一场洪水灾害,不同区域洪水强度差异大,对应的“H—D”关系也有所差异,因此基于洪水流速、水面上升速度划分出不同的灾害区,分别构建“水深—人口死亡率”曲线,如式(9)-(11)。

防洪堤断裂区:

$$F_D = 1 \quad \text{当 } hv \geq 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ 且 } v \geq 2 \text{ m/s} \quad (9)$$

洪水快速上升区:

$$F_D(h) = \Phi_N \left(\frac{\ln(h) - 7.6}{2.75} \right) \quad \text{当 } (h \geq 2.1 \text{ m 且 } w \geq 0.5 \text{ m/hr}) \text{ 或 } (hv < 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ 或 } v < 2 \text{ m/s}) \quad (10)$$

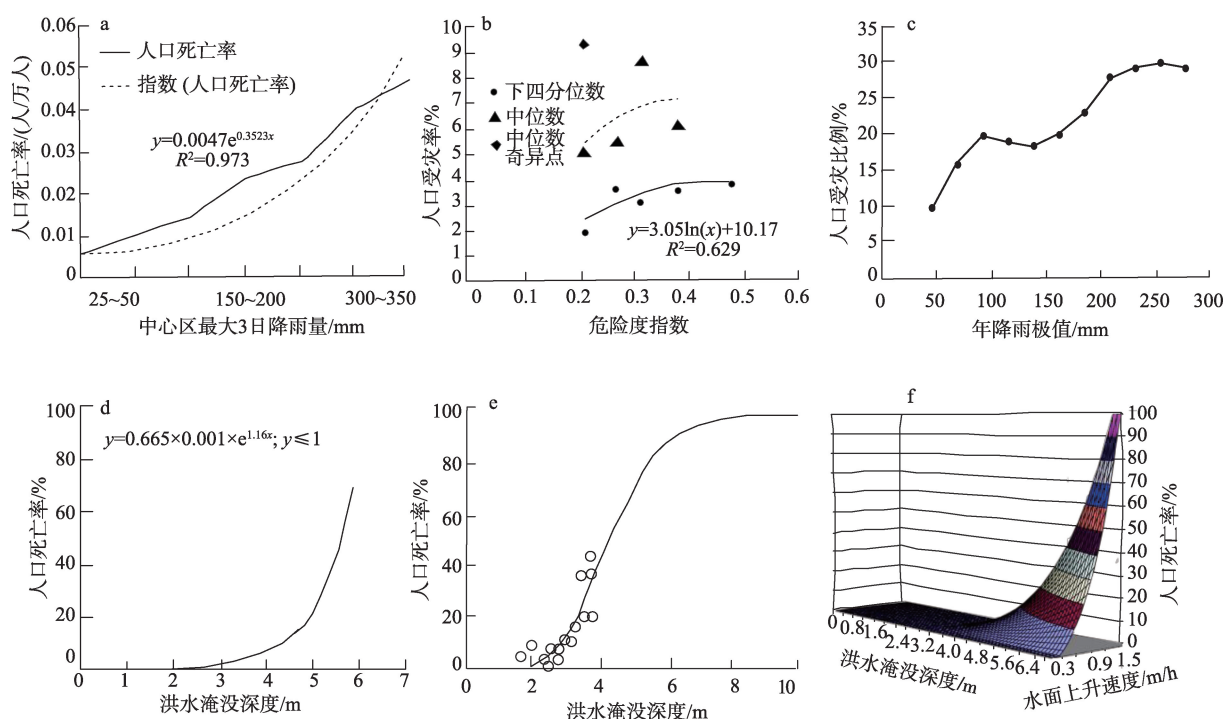


图4 暴雨洪水灾害人口脆弱性曲线

Fig.4 Examples of population vulnerability curve based on heavy rain and flood intensities

其他受影响区:

$$F_D(h) = \Phi_N \left(\frac{\ln(h) - 1.46}{0.28} \right) \text{ 当 } (w < 0.5 \text{ m/hr 或 } (h < 2.1 \text{ m 且 } w \geq 0.5 \text{ m/hr}) \text{ 且 } (hv < 7 \text{ m}^2/\text{s 或 } v < 2 \text{ m/s})) \quad (11)$$

式中, F_D 为人口死亡率; h 为水深; v 为流速; w 为水面上升速度。

Vrouwenvelder(1997)构建了人口死亡率 F_D 与淹没水深 $h(\text{m})$ 、水面上升速度 $v(\text{m/h})$ 的关系,用三维空间曲面来表达“D—H”关系(图4f),该方法综合考虑了两个致灾因子指标对人口损失的影响,为分析多要素与人口损失的定量关系提供了重要思路。

洪水强度可通过文献记录整合方法,获取粗略的淹没范围或水深数据(Jonkman, 2007);也可通过洪水淹没模拟,获取淹没范围、水深、流速等数据。如 Jonkman(2007)通过 SOBEK-1D2D 模型,模拟了新奥尔良地区一场洪水灾害的水深、流速、水深×流速、上升速度、洪水到达时间等指标(250 m 网格),并结合人口死亡率分布数据,分析了这些指标同人口死亡率的关系。洪水淹没模拟法是弥补观测数据不足的重要途径。

3.3 基于灾害系统模拟的人口损失评估方法

灾害系统模拟是指设计一个实际或理论的物

理系统模型,运用计算机模拟技术来分析灾害的动态演化过程。该方法是分析暴雨洪水灾害演化过程中 H、V、E 之间的动态关系的重要途径。

人口的移动性、主观能动性、智能性等特征,使其成为区域灾害系统中较为特殊的一类承灾体。上述损失评估方法不能完全表达人口承灾体的这些特征,而当前较为热点的解决方法是引入智能体建模的方法体系。多智能体建模作为一种复杂系统模拟和仿真方法,侧重于从组成系统的微观主体出发,通过对不同类型主体的判断、学习、控制、反应等个性机制的设计,使系统中所有主体产生互动,从而表现出系统的宏观复杂性。相比各种传统的从整体上把握系统宏观特性的方法,这种自上而下的建模方式能更直观、现实地表达系统的复杂性,因而被广泛用于多种复杂系统的仿真模拟(王飞等, 2009)。人口在面对暴雨洪水时,作为具有独立智能的个体,其行为活动是最适合用智能体来进行描述与刻画的。已有相关研究试图用多智能体来模拟暴雨洪水灾害系统内,人口作为承灾体与致灾因子、孕灾环境之间的相互作用(令狐彬, 2014)。目前,洪水人口灾害系统模拟模型有 HAZUS 模型(Federal Emergency Management Agency, 2015)、生命模拟模型(LIFESim)(Aboelata et al, 2008)、生命安

全模型(The Life Safety Model, LSM) (Johnston, 2012)等。其中,LSM就是一个基于多智能体方法的微观模型。

LSM通过模拟承灾体(包括人口、建筑、车辆等)之间及其与洪水的动态作用来评估人口损失数量。图5是该模型的组成及概念框架:首先,以二维洪水模型的模拟结果为输入数据(H的情景);然后,对自然环境、社会—经济环境等条件(V/E情景)进行设置,并结合输入数据,形成各种可能的“H-V/E”情景;最后,利用生命安全模拟器模拟各种情景下的洪水灾害动态演化过程。模拟过程中,承灾体之间及其与洪水的相互作用是基于基础物理学模型和逻辑来判断。模型最终输出各种情景下洪水灾害的可视化过程及人口损失数量。

基于案例数据构建暴雨洪水灾害“H-D”或“H-V-E-D”关系时,相关数据的缺乏导致关系构建中遇到许多困难,尤其是严重灾害情景数据,以及和人类活动、预警系统相关的数据。灾害系统模拟中不同的情景设置条件为尝试解决该问题提供了重要方法。

4 结论与展望

本文基于灾害系统理论,归纳了基于“H-V-E-D”的暴雨洪水灾害人口损失评估概念框架,并梳理了相应的指标体系。重点强调“综合影响因素—人口损失”关系分析是评估暴雨洪水灾害人口损失的核心。人口损失评估方法主要涉及3类:分析“H-D”关系的脆弱性曲线法,分析“H-V-E-D”关系的多要素综合法和考虑整个系统演化过程的灾害系统

模拟法。暴雨洪水灾害人口损失评估研究的进展及进一步发展方向有以下三方面。

(1) 从单一要素向多要素综合发展。暴雨洪水灾害损失受自然、社会、经济等多要素综合影响。受灾害形成机理的复杂性和数据的可获取性限制,前期研究多关注单一指标或单类指标。如脆弱性曲线构建多针对“水深”这一指标。随着对成灾机理认识的深入和影响因素测量的精细化,单指标已不能满足风险评估的需求,人口损失评估逐渐向多要素综合发展。目前研究不仅关注水深、流速、水面上升速度等多个致灾因子指标,且更加关注致灾强度、人口承灾体脆弱性、自然/人文孕灾环境特征等多类指标。暴雨洪水灾害是一个复杂的过程,灾害系统理论可为有效分析多因素与人口损失的关系提供理论支撑。目前研究中对致灾因子指标的探讨更多、更完善,深入考虑“致灾因子—孕灾环境—承灾体”多要素综合作用对人口损失的影响,是未来暴雨洪水灾害人口损失研究的重点和难点问题。

(2) 从指标统计分析向过程动态模拟发展。暴雨洪水灾害人口损失评估的研究中,多基于指标的统计数据评估人口损失。指标的统计分析反映的是人口属性和暴雨洪水致灾因子危险性的平均状态,未揭示灾害过程中人口承灾体和暴雨洪水的相互作用。随着对人口主观能动性的深入理解和高度关注,以及复杂系统模拟技术的发展,基于属性指标的统计方法已不能适应对人类活动复杂过程的刻画,面向风险的人口损失评估逐渐向过程动态模拟发展,不仅可有效反映人口个体的移动性、主观能动性、智能性等特征在灾情形成过程中发挥的重要作用,而且可以对未来不同情景下的人口损失进行预测。灾害系统模拟为暴雨洪水灾害过程的动态模拟提供了有效方法。同时,人员的转移安置过程也会大大降低人口损失。在中国“举国体制”背景下,转移安置的减灾效果尤为明显:2013年,中国全年因自然灾害紧急转移安置人口达1215万人次(中华人民共和国民政部, 2014)。量化转移安置动态过程对人口损失的影响,是未来暴雨洪水灾害人口损失评估需解决的关键问题。

(3) 从单一方法向综合集成方法发展。多要素、多过程及多尺度的综合集成研究是揭示区域人地相互作用机制、寻求全球可持续发展途径的基础(Future Earth, 2013)。暴雨洪水灾害人口损失的评

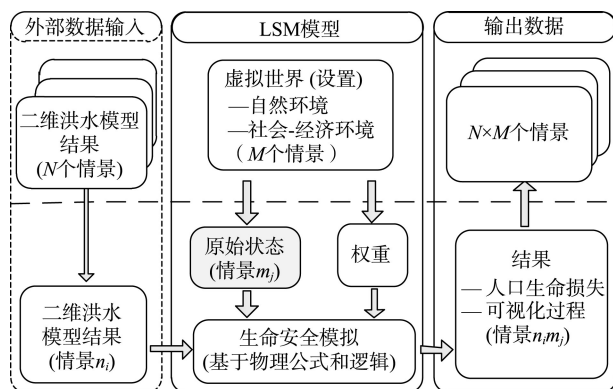


图5 LSM模型组成及概念框架(修改自:Johnston, 2012)

Fig.5 Conceptual framework and components of the Life Safety Model (LSM) (Modified from: Johnston, 2012)

估涉及:H、E、V等多类要素,暴雨诱发洪水、洪水淹没/冲毁承灾体、人口避灾等多个复杂过程,全球、大洲、国家、地方等多个尺度。现有的评估方法对要素、过程的刻画各有侧重:多要素综合方法对多类别、多数量的要素分析具有优势;脆弱性曲线是风险定量评价的重要方法;灾害系统模拟方法是剖析暴雨洪水灾害复杂过程的重要工具。不同方法适用于不同的时空尺度研究。基于对多要素、多过程、多尺度的综合考虑,发展综合集成方法,是暴雨洪水灾害人口损失风险评估发展的必然趋势。

参考文献(References)

- 扈海波, 张艳莉. 2014. 暴雨灾害人员损失风险快速预评估模型[J]. 灾害学, 29(1): 30-36. [Hu H B, Zhang Y L. 2014. Quick assessing model on casualty loss in Rainstorms[J]. Journal of Catastrophology, 29(1): 30-36.]
- 黄崇福, 郭君, 艾福利, 等. 2013. 洪涝灾害风险分析的基本范式及其应用[J]. 自然灾害学报, 22(4): 11-23. [Huang C F, Guo J, Ai F L, et al. Basic paradigm of risk analysis in flood disaster and its application[J]. Journal of Natural Disasters, 22(4): 11-23.]
- 李晓萌, 马玥, 孙永华, 等. 2013. 基于格网的洪水灾害危险性评价分析: 以巴基斯坦为例[J]. 地球信息科学学报, 15(2): 314-320. [Li X M, Ma Y, Sun Y H, et al. 2013. Flood hazard assessment in Pakistan at grid scale[J]. Journal of Geo-Information Science, 15(2): 314-320.]
- 令狐彬. 2014. 基于多agent的洪涝灾害风险仿真研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学. [Linghu B. 2014. Simulation of flood disaster risk based on multi-agent[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China.]
- 史培军. 1991. 灾害研究的理论与实践[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 27(11): 37-42. [Shi P J. 1991. Zaihai yanjiu de lilun yu shijian[J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 27(11): 37-42.]
- 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.]
- 史培军. 2011. 中国自然灾害风险地图集[M]. 北京: 科学出版社. [Shi P J. 2011. Atlas of natural disaster risk of China[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 石勇, 许世远, 石纯, 等. 2009. 洪水灾害脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展, 28(1): 41-46. [Shi Y, Xu S Y, Shi C, et al. 2009. A review on development of vulnerability assessment of floods[J]. Progress in Geography, 28(1): 41-46.]
- 王飞, 尹占娥, 温家洪, 等. 2009. 基于多智能体的自然灾害动态风险评估模型[J]. 地理与地理信息科学, 25(2): 85-88. [Wang F, Yin Z E, Wen J H, et al. 2009. Assessing model for dynamic risk of natural disasters based on multi-agent system[J]. Geography and Geo-Information Science, 25(2): 85-88.]
- 王志军, 顾冲时, 姜一青. 2008. 基于支持向量机的溃坝生命损失评估模型及应用[J]. 水力发电, 34(1): 67-70. [Wang Z J, Gu C S, Lou Y Q. 2008. Model for evaluation of loss-of-life caused by dam breach based on support vector machine[J]. Water Power, 34(1): 67-70.]
- 邢颖. 2014. 气候变化情景(B2)下中国洪水灾害风险的定量研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京). [Xing Y. 2014. China under climate change scenarios (B2) quantitative study of flood disaster risk[D]. Beijing, China: China University of Geosciences (Beijing).]
- 杨帅, 苏筠. 2014. 县域暴雨洪涝灾害损失快速评估方法探讨: 以湖南省为例[J]. 自然灾害学报, 23(5): 156-163. [Yang S, Su Y. 2014. Exploration of rapid evaluation method for rainstorm flood losses at county level: A case study of Hunan Province[J]. Journal of Natural Disasters, 23(5): 156-163.]
- 中华人民共和国民政部. 2014. 中国民政统计年鉴2014(中国社会服务统计资料)[M]. 北京: 中国统计出版社. [Ministry of civil affairs of the People's Republic of China 2014. China civil affairs' statistical yearbook (statistics of China social services)[M]. Beijing, China: China Statistics Press.]
- 周克发, 李雷, 盛金保. 2007. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究[J]. 安全与环境学报, 7(3): 145-149. [Zhou K F, Li L, Sheng J B. 2007. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China[J]. Journal of Safety and Environment, 7(3): 145-149.]
- Aboelata M A, Bowles D S. 2008. LIFESim: A tool for estimating and reducing life-loss resulting from dam and levee failures[C]//Proceedings of the association of state dam safety officials "Dam Safety 2008" conference. Indian Wells, CA: Association of State Dam Safety Officials, 533-547.
- Boyd E C. 2010. Estimating and mapping the direct flood fatality rate for flooding in Greater New Orleans due to Hurricane Katrina[J]. Risk, Hazards & Crisis in Public Policy, 1(3): 91-114.
- Brazdova M, Riha J. 2014. A simple model for the estimation of the number of fatalities due to floods in Central Europe [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 14(7): 1663-1676.
- Brown C A, Graham W J. 1988. Assessing the threat to life from dam failure[J]. Journal of the American Water Re-

- sources Association, 24(6): 1303-1309.
- DeKay M L, McClelland G H. 1993. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood[J]. *Risk Analysis*, 13 (2): 193-205.
- Duiser J A. 1989. Een verkennend onderzoek naar methoden ter bepaling van inundatieschade bij doorbraak, TNO report ref. 82-0644. TNO: Delft, Netherlands.
- EM-DATA. 2014. Natural disasters trends[EB/OL]. 2014-01-01[2016-01-21]. http://www.emdat.be/disaster_trends/index.html. -
- Escuder-Bueno I, Castillo-Rodríguez J T, Zechner S, et al. 2012. A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(9): 2843-2863.
- Federal Emergency Management Agency. 2015. Hazus-MH flood manuals: Flood model technical manual[M]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- Future Earth. 2013. Future Earth initial design report[R/OL]. [2015-07-13]. <http://www.futureearth.org/media/future-earth-initial-design-report>.
- Graham W J. 1999. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[R]. Denver, CO: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office.
- Hanson S, Nicholls R, Ranger N, et al. 2011. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes[J]. *Climatic Change*, 104(1): 89-111.
- IPCC. 2013. Intergovernmental panel on climate change climate change 2013 Fifth assessment report (AR5) [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jonkman S N. 2001. Overstromingsrisico's: een onderzoek naar de toepasbaarheid van risicomaten. MSc. Thesis, TU Delft, Netherlands.
- Jonkman S N. 2005. Global perspectives on loss of human life caused by floods[J]. *Natural Hazards*, 34(2): 151-175.
- Jonkman S N. 2007. Loss of life estimation in flood risk assessment: Theory and applications[D]. Delft, CN, Netherlands: Delft University of Technology.
- Jonkman S N, Maaskant B, Boyd E, et al. 2009. Loss of life caused by the flooding of New Orleans after Hurricane Katrina: Analysis of the relationship between flood characteristics and mortality[J]. *Risk Analysis*, 29(5): 676-698.
- Jonkman S N, Van Gelder P H A J M, Vrijling J K. 2002. Loss of life models for sea and river floods[M]//Wu B S, Wang Z Y, Wang G Q, et al. Flood defence. Beijing, China: Science Press: 196-206.
- Jonkman S N, Vrijling J K, Vrouwenvelder A C W M. 2008. Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method[J]. *Natural Hazards*, 46(3): 353-389.
- Johnston W M. 2012. Life safety modelling framework and performance measures to assess community protection systems: Application to tsunami emergency preparedness and dam safety management[D]. Kelowna, BC Canada: The University of British Columbia.
- Koshimura S, Oie T, Yanagisawa H, et al. 2009. Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia[J]. *Coastal Engineering Journal*, 51(3): 243-273.
- Li K Z, Wu S H, Dai E F, et al. 2012. Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China[J]. *Natural Hazards*, 63(2): 737-760.
- Middelmann-Fernandes M H. 2010. Flood damage estimation beyond stage-damage functions: An Australian example [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 3(1): 88-96.
- Pang X L. 2013. Dynamic vulnerability analysis of population for flood disaster in urban area[J]. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 3(4): 166-174.
- Papathoma-Köhle M, Kappes M, Keiler M, et al. 2011. Physical vulnerability assessment for alpine hazards: State of the art and future needs[J]. *Natural Hazards*, 58(2): 645-680.
- Peduzzi P, Chatenoux B, Dao H, et al. 2012. Global trends in tropical cyclone risk[J]. *Nature Climate Change*, 2(4): 289-294.
- Peduzzi P, Dao H, Herold C, et al. 2009. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The disaster risk index[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4): 1149-1159.
- Peng M, Zhang L M. 2012. Analysis of human risks due to dam-break floods—part 1: A new model based on Bayesian networks[J]. *Natural Hazards*, 64(1): 903-933.
- Penning-Rowsell E, Floyd P, Ramsbottom D, et al. 2005. Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework[J]. *Natural Hazards*, 36(1-2): 43-64.
- Priest S J, Wilson T, Tapsell S, et al. 2007. Building a model to estimate risk to life for European flood events[R]. London: Floodsite, Flood Hazard Research Centre.
- Ramsbottom D, Floyd P, Penning-Rowsell E. 2003. Flood risks to people: Phase 1[R]. London, SW: Defra, Flood Management Division.
- Reiter P. 2001. RESCDAM loss of life caused by dam failure, the RESCDAM LOL method and its application to

- Kyrkösjärvi dam in Seinäjoki[R]. Helsinki, Finland: PR Water Consulting Ltd.
- U.S. Department of the Interior. 2014. RCEM-reclamation consequence estimating methodology: Guidelines for estimating life loss for dam safety risk analysis[R]. Denver, Colorado: Bureau of Reclamation.
- UNISDR. 2009. Global assessment report on disaster risk reduction (2009)[R]. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR).
- Velasquez J, Sirimanne S, Bonapace T, et al. 2012. Reducing vulnerability and exposure to disasters: Asia-Pacific disaster report 2012[R]. Bangkok, Thailand: ESCAP and UNISDR.
- Vrouwenvelde A C W M, Steenhuis C M. 1997. Tweede wa-
terkeringen Hoeksche Waard, berekening van het aantal slachtoffers bij verschillende inundatiescenario's[R]. Report TNO 97-CON-R0332. TNO: Delft, Netherlands.
- Waarts P H. 1992. Methode voor de bepaling van het aantal doden als gevolg van inundatie[R]. Report TNO B-91-1099. TNO: Delft, Netherlands.
- Wheater H S, Chandler R E, Onof C J, et al. 2005. Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 19 (6): 403-416.
- Zhai G F, Fukuzono T, Ikeda S. 2006. An empirical model of fatalities and injuries due to floods in Japan[J]. Journal of the American Water Resources Association, 42(4): 863-875.

Review on methods for estimating the loss of life induced by heavy rain and floods

YIN Weixia^{1,2}, YU Han^{1,2}, CUI Shujuan^{1,2}, WANG Jing'ai^{1,2,3*}

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Laboratory of Regional Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Under the background of global climate change and urbanization, the risk of heavy rain and floods increases rapidly, which poses great threats on the safety of the global population. It has become a focus in the field of natural disaster risk research to estimate the loss of life induced by heavy rain and floods. Based on the natural disaster system theory, this article first introduces a conceptual framework for estimating the loss of life induced by heavy rain and floods, which includes hazard (H)—exposure units (V)—disaster formative environment (E)—life losses (D). This framework indicates that life loss is a result of the interaction between these multiple elements. Based on existing research in China and internationally, the corresponding indicators and methods are summarized, which are presented in a multidimensional diagram of “impact indicator—loss indicator—analytical method.” This review article considers that the analysis of the multiple impacting factors—life losses relationship is at the core of the estimation of life loss from heavy rain and floods. Three types of methods for estimating the loss of life induced by heavy rain and floods are reviewed, including the vulnerability curve method that focuses on the relationship of H-D, integrated multi-factor analysis method that analyzes the relationship of H-V-E-D, and disaster system simulation method that considers the process of system evolution. Considering the availability of data and effectiveness of methods, no single method can meet the needs of risk assessment of life losses. From the perspective of natural disaster system, quantitative assessment of life loss and risk induced by heavy rain and floods should develop from including single factor to multiple factors; from using statistical analysis of indicators to dynamic simulation of processes; and from employing single method to the integration of multiple methods.

Key words: heavy rain and flood; loss of life; natural disaster system; vulnerability curve