

杨佩国,靳京,赵东升,等.基于历史暴雨洪涝灾情数据的城市脆弱性定量研究——以北京市为例[J].地理科学,2016,36(5):733-741.[Yang Peiguo, Jin Jing, Zhao Dongsheng et al. An Urban Vulnerability Study Based on Historical Flood Data: A Case Study of Beijing. Scientia Geographica Sinica,2016,36(5):733-741.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.05.011

基于历史暴雨洪涝灾情数据的城市脆弱性定量研究 ——以北京市为例

杨佩国¹,靳京²,赵东升³,李静⁴

(1.民政部国家减灾中心,北京 100124; 2.中国科学院中国现代化研究中心,北京 100190; 3.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; 4.环境保护部卫星环境应用中心,北京 100029)

摘要:基于历史暴雨洪涝灾情数据构建脆弱性曲线,定量研究北京市在不同降雨量下的宏观脆弱性。分析显示,在现有的抗灾能力下,相同降雨量所导致的农作物受灾率值最高,死亡失踪率值最低;随着最大2 d降雨量增大,承灾体的损失率增加明显,当最大2 d降雨量重现周期达到百年一遇时,在现有的社会经济暴露状况下,受灾人口数将达到147.4万人,死亡失踪人数也将有可能达到50人左右,农作物受灾面积有可能达到7万hm²,倒塌和损坏房屋将可能达到60万间,直接经济损失可能超过400亿元。北京市的洪涝灾害风险管理力度还有待加强。

关键词:暴雨洪涝;脆弱性曲线;北京市

中图分类号:S422 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2016)05-0733-09

引言

随着全球气候变化和城市化进程的加快,城市发生各种自然灾害的频率和强度日益加剧,城市自然灾害风险研究受到国内外学者的普遍关注。在众多自然灾害中,洪涝灾害是中国城市最常见的自然灾害类型之一^[1],城市发展所带来的土地覆盖变化也使中国洪涝灾害的时空格局发生明显变化^[2]。近年来,诸多大中城市频繁遭受暴雨洪涝灾害,不仅影响了城市正常运转和居民生产生活秩序,还造成了严重的生命财产损失^[3]。2010年,住建部曾在全国范围内对351个城市进行调研,发现在2008~2010年3 a间,全国有62%的城市都曾发生过内涝事件,内涝发生3次以上的城市有137个^[4]。在全球气候变化的影响下,区域水汽循环速度明显加快,城市遭受暴雨等极端天气事件的频率呈上升趋势,“逢暴雨必涝”成为了许多城市的真实写照。

北京地处华北地区,作为中国首都,其人口、财富、生命线工程和各类基础设施高度密集,一旦

发生自然灾害,影响尤为重大。而受全球气候变化和城市化快速发展的影响,北京的城市“热岛”和“雨岛”效应明显,降雨强度经常超过70 mm/h的极端天气标准。北京市城区洪涝灾害主要有永定河洪水、西山洪水及城区暴雨内涝3个来源。前两者经过多年的治理,防范大洪水的能力已经逐渐加强,而城区随着城市现代化进程加快,对暴雨内涝的反应越来越敏感^[5]。2004年以来,北京共发生极端天气气候事件43次,具有暴雨来势凶猛、历时短、洪涝灾情出现快、应对难度大等特点。2012年7月21日发生的特大暴雨洪涝灾害更是导致了77人死亡,直接经济损失140多亿元^[6,7]。基于历史暴雨洪涝灾情数据,对北京市的宏观脆弱性进行研究,对于丰富和完善城市灾害风险评估体系,制定城市洪涝灾害应急预案等具有重要的理论和现实意义。

自然灾害是社会和自然综合作用的产物,灾害作用于人类社会产生灾难,灾情的大小由致灾因子、孕灾环境和承灾体脆弱性共同决定^[8,9]。其中,脆弱性是联系致灾因子和承灾体的重要桥梁。脆弱性量化研究是自然灾害风险评估的重

收稿日期:2015-09-01;**修订日期:**2015-12-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41440011)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China(41440011).]

作者简介:杨佩国(1977-),男,山东费县人,副研究员,主要从事自然灾害风险评估、城市减灾研究。E-mail: 38966816@qq.com

通讯作者:靳京。E-mail: jinj@mail.las.ac.cn

要环节,也是近年的研究热点^[10]。脆弱性量化评估方法大致包括基于指标体系的方法和基于历史灾情的方法。基于指标体系的方法更加强调人类自身抵御灾害的社会经济属性,例如由国立哥伦比亚大学与美洲开发银行合作的美洲计划^[11],构建了普适脆弱性指数(PVI),该指数包括暴露度和敏感度、社会-经济脆弱性、恢复力3个次级指标。Cutter在系统分析社会脆弱性影响因素的基础上,构建了社会脆弱性评价指数(SoVI)^[12,13],并分析了美国纳卡罗来纳州等地区的自然灾害社会脆弱性。国内学者也开展了许多相关研究,例如史培军^[8,14,15]在初步构建脆弱性理论体系基础上,对区域水灾脆弱性进行了量化评估研究;石勇^[16]以上海市为例开展了洪涝等灾害情景下城市脆弱性的量化评估研究。在脆弱性机制和原理不完全明了的情况下,基于指标体系的方法是脆弱性评估较为常用的方法。但这类方法在不同空间尺度应用时,由于数据有效性的差异,评估结果的可比性会受到影响,同时,脆弱性评估结果的有效性检验也是这类研究中的难点^[17]。

基于历史灾情的脆弱性量化研究,则更加侧重于承灾体对破坏和伤害的敏感性,常用损失量或损失率来表示。这类方法根据历史数据进行死亡率、经济损失率等的计算,进而综合体现宏观区域的脆弱性。全球尺度的灾害风险指标计划(DRI)和多发区指标计划(HOTSPOTS)是其中较具代表性的工作^[1]。基于历史灾情的脆弱性量化研究方法数据获取较为方便,并具有较好的区域可比性。

在基于历史灾情的脆弱性量化研究中,脆弱性曲线的拟合是重要研究内容。脆弱性曲线可以用来表示不同灾种的强度与其相应损失(率)之间的关系,该曲线的建立有利于将致灾因子与承灾体相联系,从人地相互作用的角度认识灾难本质,它不仅是自然灾害损失估算的重要途径,而且也是风险量化评估的基础性工作。欧美、澳大利亚及日本等国由于有长达上百年甚至上千年的详细程度高的洪水灾害数据资料,因此,形成了详细的用于估算不同空间尺度洪水灾害损失标准的损失曲线(Stage-Damage Curves)或损失函数(Loss Functions)^[18,19]。中国在这方面的的工作仍处于起步阶段,城市洪灾方面的脆弱性曲线研究尚不多见,这些研究的多数又以上海、浙江等南部城市为例构建脆弱性曲线^[20-24],而对于地处华北地区

的北京市,相关研究尚不多见。

本研究拟采用基于历史灾情的脆弱性量化研究方法,通过构建脆弱性曲线,量化研究北京市在暴雨洪涝灾害中的宏观脆弱性,并基于脆弱性曲线对不同降雨量情景下的可能损失进行估算,为城市暴雨洪涝灾害风险评估以及制定应急预案提供参考。这里的脆弱性主要是指承灾体在受到破坏时的损失,包括人员伤亡、农作物受灾面积、房屋损毁、直接经济损失等^[25]。

1 数据与方法

自然灾害是多种因素综合作用的结果,其在很大程度上存在着不确定性^[26]。然而,在众多的因素中,有一些是主要的基本因素,它们决定着灾害的本质及其规律,有一些是次要的、伴随的因素,使灾害现象表现为个别性或偶然性。从统计学的角度来分析自然灾害的风险,有利于削弱或抵消次要或偶然的因素,强化主要的因素,进而形成自然灾害的规律性。本研究基于以上原理,以北京市为例,利用历史暴雨洪涝灾情数据,通过构建脆弱性曲线,对承灾体在不同暴雨强度下的脆弱性进行定量分析。

1.1 数据来源

参与脆弱性曲线拟合的历史灾情数据可以来自历史文献资料、灾害数据库或者实地调查等。其中,历史文献资料和一些灾害损失数据库是构建脆弱性曲线的主要数据源。也有基于问卷和访谈等方式获取实地调查数据,但是由于这种方式适用范围较小,具有一定局限性。也有研究基于自然灾害保险的历史赔付清单,从保险赔付的数据来推演经济或人员损失,确定脆弱性曲线。这种方法在美国、日本、澳大利亚等保险体系较为完善的国家和地区有广泛应用^[27-30],但中国现有的保险数据尚不能满足构建脆弱性曲线的要求。

因此,本研究的洪涝灾害损失数据主要来源于历史文献资料,其中包括国家减灾委员会办公室编制的《自然灾害年报》以及《中国气象灾害大典:北京卷》等^[31],由于更长时段的历史灾情多为定性资料,很难进行量化处理,同时考虑到脆弱性曲线分析的时效性,本研究最终选取北京1990~2012年的历史灾情数据进行脆弱性曲线拟合。具体灾情指标包括洪涝灾害中的受灾人口、死亡失踪人口、农作物受灾面积、农作物绝收面积、倒塌

房屋间数、损坏房屋间数、直接经济损失、紧急转移安置人口等。逐日降雨量数据来源于中国气象局国家气候中心,涉及北京市两个气象站点(全国气象站点编号:54511,54416)。社会经济数据主要包括总人口数、耕地面积、国内生产总值等,来源于中国社会与经济发展统计数据库(<http://tongji.cnki.net/>)。

1.2 研究方法

借鉴已有研究^[32],洪涝灾害的脆弱性评估模型可以表示为:

$$V = E \times D \tag{1}$$

式中, V 为承灾体脆弱性, E 为承灾体暴露量, D 为损失标准或损失率。基于历史暴雨洪涝灾情数据分析北京市宏观脆弱性主要包括以下步骤:

1) 对北京市暴雨洪涝灾情与降雨量间的关系进行相关性分析。分别计算暴雨洪涝灾害发生期间的最大1~7 d降雨量以及6~8月总降雨量,将洪涝灾害损失率数据与降雨量进行相关性分析。

2) 根据相关性分析结果,选取与灾情相关性较高的致灾因子变量,构建致灾因子与承灾体损失率间的关系曲线,即脆弱性曲线。

3) 基于Pearson III分布(以下简称P-III分布)曲线法计算致灾因子变量的重现周期,并在不同重现周期的降雨量下,估算各承灾体的可能损失。

P-III型概率分布曲线具有广泛的适用性,在气象上常用来拟合年、月的最大风速和最大日降水量等极值分布^[33],也有研究证实,该曲线能较好拟合暴雨频数分布^[34]。P-III概率密度函数和保证率分布函数分别为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} \tag{2}$$

$$\alpha > 0, x \geq x_0$$

$$P(x \geq x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} dx \tag{3}$$

其中, $f(x)$ 为概率密度函数, $P(x \geq x_p)$ 为保证率分布函数;参数 x_0 为随机变量 x 所能取的最小值, α 为形状参数, β 为尺度参数, $\Gamma(\alpha)$ 是 α 的伽玛函数。

2 脆弱性曲线拟合

北京市属于季风气候,冬春少雨、夏秋多雨,从1951~2014年月平均降雨量可知,全年降雨主要集中在6~8月,这3个月的降雨量占全年总降雨量的67%(图1)。因此,本研究首先分别统计1990~

2012年每次洪涝灾害发生期间北京市两个气象站点1~7 d最大平均降雨量以及6~8月总平均降雨量,进而分析承灾体损失率与降雨量间的相关性。损失率数据由损失的绝对量与社会经济总量数据相除得到。例如,受灾人口除以灾害发生时北京市总人口数,得到人口受灾率;农作物受灾面积除以当年北京市耕地总面积得到灾害发生时的农作物受灾率;倒塌(或损坏)房屋间数除以灾害发生时的总房屋间数得到房屋倒塌(或损坏)率;直接经济损失除以灾害发生当年的国内生产总值,得到直接经济损失率。

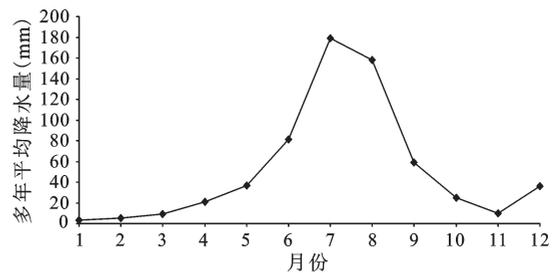


图1 北京市月平均降水量变化特征

Fig.1 The change of average monthly rainfall in Beijing

将计算得到的损失率数据与不同日数的降雨量数据进行Pearson相关性分析。结果表明(表1),与最大2 d降雨量存在相关性的损失率指标最多,有6个。其中,在0.01显著性水平下相关的指标包括人口受灾率、农作物受灾率、房屋倒塌率、人口紧急转移安置率;在0.05显著性水平下相关的指标包括房屋损坏率和直接经济损失率。因此,最终选取最大2 d降雨量作为致灾因子变量,损失率因变量包括人口受灾率、农作物受灾率、房屋倒塌率、人口紧急转移安置率、房屋损坏率和直接经济损失率6个。

将最大2 d降雨量与损失率数据进行回归拟合,图2显示了人口受灾率、死亡失踪率、农作物受灾率、房屋倒塌率和损毁率、直接经济损失率6个指标与最大2 d降雨量的拟合结果,其中,横坐标为最大2 d降雨量(0.1 mm),纵坐标为损失率(%),所拟合的函数曲线为各承灾体的脆弱性曲线,可分别用于估算人口受灾率、死亡失踪率、农作物受灾率、房屋倒塌率、房屋损坏率和直接经济损失率。

表2为各脆弱性曲线的拟合度和拟合方程。最大2 d降雨量与6个损失率变量拟合的显著性均小于

表1 降雨量与损失率的相关性分析(Pearson相关)

Table 1 The correlation of the rainfall and the loss rate(Pearson correlation)

损失率	最大1 d 降雨量	最大2 d 降雨量	最大3 d 降雨量	最大4 d 降雨量	最大5 d 降雨量	最大6 d 降雨量	最大7 d 降雨量	6~8月 降雨总量
人口受灾率	0.857**	0.902**	0.898**	0.872**	0.821*	0.719*	0.641	0.603
死亡失踪率	0.580	0.598	0.582	0.535	0.503	0.330	0.144	0.190
农作物受灾率	0.667**	0.906**	0.861**	0.880**	0.849**	0.895**	0.894**	0.772**
农作物绝收率	0.484	0.553	0.502	0.517	0.470	0.515	0.436	0.382
房屋倒塌率	0.856*	0.916**	0.943**	0.941**	0.946**	0.836**	0.801*	0.707*
房屋损坏率	0.921**	0.858*	0.868*	0.817*	0.820*	0.651	0.541	0.542
直接经济损失率	0.525	0.600*	0.552	0.518	0.465	0.334	0.226	0.184
人口紧急转移安置率	0.929**	0.878**	0.867**	0.832**	0.819**	0.669*	0.580	0.577

注:**表示在0.01的显著性水平下相关;*表示在0.05的显著性水平下相关。

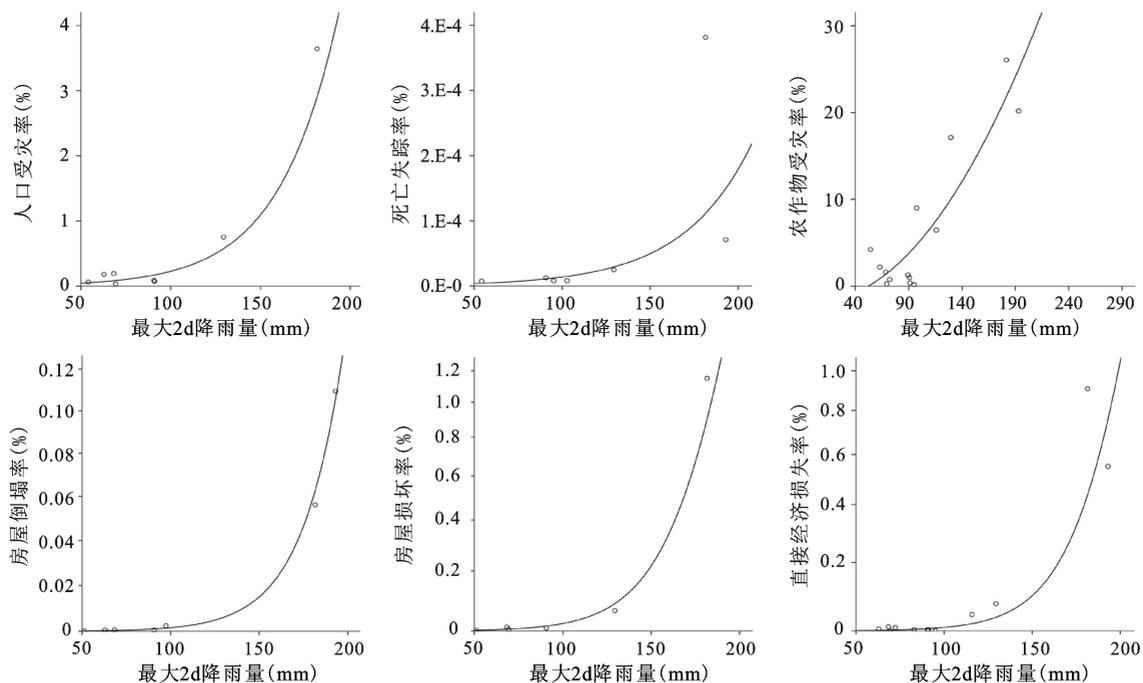


图2 北京市暴雨洪涝灾害中不同承灾体脆弱性曲线

Fig.2 The vulnerability curves of different hazard bearing body for Beijing in flood disasters

0.01,其中,用于估算房屋倒塌率和损坏率的曲线拟合度最高, $R^2>0.9$,人口受灾率和死亡失踪率、直接经济损失率的拟合度相对较低,仍然是 $R^2>0.7$ 。因此,本研究认为所拟合的脆弱性曲线具有较好拟合度,可以用于不同降雨强度下损失率的估算。

3 不同重现期下的脆弱性分析

利用脆弱性曲线进行洪涝灾害的损失率估算,如果降雨量变幅较小,结果的差异性不大。本研究基于P-III分布曲线法计算最大2 d降雨量的

重现周期,并分析5、10、20、50 a和100 a重现周期下,降雨量可能导致的损失率,并结合2012年北京市社会经济指标,利用公式(1)对不同重现期下北京市主要承灾体的脆弱性进行分析。

3.1 计算最大2 d降雨量重现周期

参与P-III拟合的最大2 d降雨量数据为1989~2014年北京市两个气象站点(全国气象站点编号:54511,54416)数据的平均值,对这26 a的最大2 d降雨量按照从大到小的顺序排列: $x_1 \geq \dots \geq x_m \geq \dots \geq x_{26}$,并计算经验频率 $P(x_m)$,计算公式为:

表2 脆弱性曲线拟合度与拟合方程

Table 2 The fitting degree and equation of vulnerability curves

自变量(X)	因变量(Y)	R ²	显著性	脆弱性曲线拟合方程
最大2 d降雨量	人口受灾率	0.774	0.004	$Y=1/(0.01+102.662 \ 0 \times 0.996 \ 9^x)$
	死亡失踪率	0.773	0.009	$Y=1/(0.01+949 \ 913.103 \ 3 \times 0.997 \ 4^x)$
	农作物受灾率	0.813	0.000	$Y=-1.624 \ 3-8.144 \ 0 \times 10^{-4}x+7.565 \ 7 \times 10^{-6}x^2$
	房屋倒塌率	0.961	0.000	$Y=1/(0.01+61 \ 328.418 \ 2 \times 0.995 \ 5^x)$
	房屋损坏率	0.960	0.001	$Y=1/(0.01+3 \ 939.654 \ 6 \times 0.995 \ 5^x)$
	直接经济损失率	0.709	0.001	$Y=1/(0.01+13 \ 121.874 \ 0 \times 0.995 \ 2^x)$

$$P(x_m)=m/(n+1) \quad (4)$$

式中, $P(x_m)$ 为最大2d降雨量 x_m 出现的经验频率, m 为最大2 d降雨量在 n 中的排序, 在本研究中, $n=26$ 。

将发生频率 $P(x_m)$ 与最大2 d降雨量 x_m 进行P-III拟合, 并将结果绘制在概率格纸上, 拟合曲线结果如图3所示。最大2 d降雨量发生频率的倒数即为该降雨量的重现周期。

根据P-III拟合曲线的计算结果, 北京市5年一遇的最大2 d降雨量为110.5 mm, 10年一遇的为134.8 mm, 20年一遇的为159.0 mm, 50年一遇的为190.8 mm, 100年一遇的为214.8 mm。

3.2 不同重现期下的损失率

这里选取重现周期分别为5、10、20、50和100 a时的最大2 d降雨量作为自变量, 利用脆弱性曲线计算损失率(表3)。

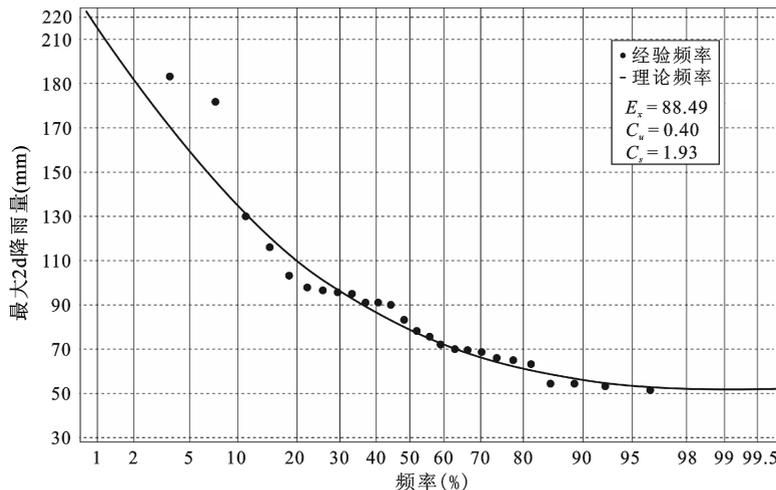
随着降雨量的增大, 承灾体损失率指标呈明显上升趋势。在相同最大2 d降雨量下, 农作物受灾率值最高, 其次分别为人口受灾率, 房屋损坏

率, 直接经济损失和房屋倒塌率, 死亡失踪率值最低(图4)。

3.3 不同重现期下的脆弱性定量分析

承灾体脆弱性是由承灾体本身的物理特性决定的, 即受一定强度降雨量影响, 不同承灾体的损失机理与程度有所不同。根据公式(1), 脆弱性可以定量表示为损失率或损失标准与承灾体暴露量的乘积。

城市在洪涝灾害中的承灾体可以包括人口、建筑、农作物等。对于洪涝灾害这种突发性、持续时间较短的自然灾害, 人的脆弱性主要表现为人员的失踪、伤亡以及受影响的人数等, 这些指标的大小主要取决于人们在灾害中的应急和自救能力。建筑物的脆弱性主要表现为倒塌和损坏等, 与建筑物的抗倒塌、冲刷损毁的能力有关, 建筑物质量标准越高, 承灾能力就越强。农作物是洪涝灾害中损失率较高的承灾体, 雨涝会危害农作物生长, 造成作物减产或绝收, 农作物脆弱性的大小



E_x 为样本均值; C_u 为变差系数; C_s 为偏态系数

图3 最大2 d降雨量P-III概率曲线拟合

Fig.3 The P-III curves for maximum 2-day rainfall

表3 不同重现期下的最大2 d降雨量及其可能损失率

Table 3 Possible loss rates in different return period of maximum 2-day rainfall

最大2 d降雨量 (mm)	人口受灾率 (%)	死亡失踪率 (%)	农作物受灾率 (%)	房屋倒塌率 (%)	房屋损坏率 (%)	直接经济损失率 (%)
110.5	3.00×10^{-1}	1.87×10^{-5}	7.52	2.38×10^{-3}	3.70×10^{-2}	1.55×10^{-2}
134.8	6.36×10^{-1}	3.52×10^{-5}	1.20×10	7.12×10^{-3}	1.11×10^{-1}	5.00×10^{-2}
159.0	1.34	6.61×10^{-5}	1.74×10	2.12×10^{-2}	3.29×10^{-1}	1.60×10^{-1}
190.8	3.51	1.51×10^{-4}	2.58×10	8.90×10^{-2}	1.37	7.34×10^{-1}
214.8	7.13	2.82×10^{-4}	3.31×10	2.62×10^{-1}	3.93	2.29

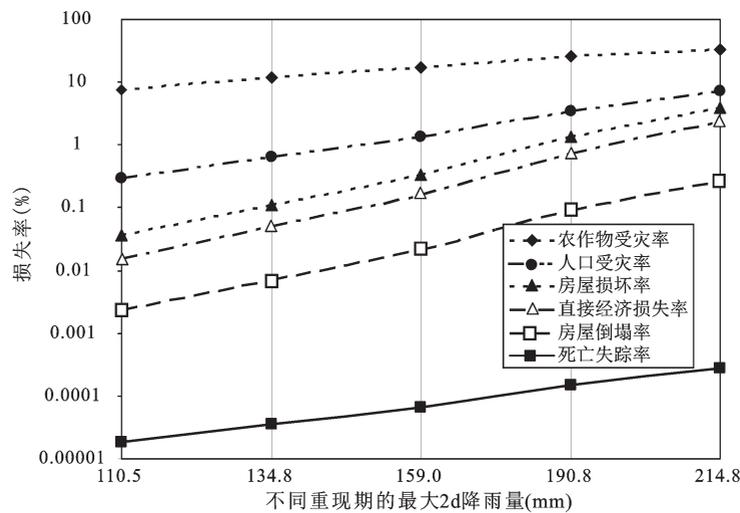


图4 不同最大2 d降雨量下的损失率

Fig.4 Possible loss rates in different maximum 2-day rainfall

与农田水利、应急措施、灾后补救等有重要关系。本部分主要选取人口、建筑物和农作物3类承灾体进行分析。其中人口的脆弱性用总受灾人口和死亡失踪人口数表示,农作物的脆弱性用农作物受灾面积表示,房屋的脆弱性用倒塌和损坏房屋间数表示。由于直接经济损失包含了农林牧渔业、建筑物、交通供水基础设施以及通讯系统等诸多

承灾体,因此,这里仅基于不同降雨量下的损失率对直接经济损失的可能量级进行估算。暴露量数据主要为2012年北京市社会经济统计数据。

表4显示了最大2 d降雨量分别为110.5、134.8、159.0、190.8、214.8 mm时,北京市不同承灾体的脆弱性状况。当2 d最大降雨量为110 mm左右时,受灾人口约6.2万人,死亡失踪人数约4人,

表4 不同最大2 d降雨量下各承灾体的脆弱性

Table 4 Possible vulnerability of different hazard bearing body in different maximum 2-day rainfall

最大2 d降雨量 (mm)	受灾人口数 (万人)	死亡失踪人数 (人)	农作物受灾面积 (万 hm^2)	房屋倒塌间数 (万间)	房屋损坏间数 (万间)	直接经济损失 (亿元)
110.5	6.2	4	0.2	0.03	0.5	3
134.8	13.2	7	2.7	0.1	1.6	9
159.0	27.7	14	3.8	0.3	4.7	29
190.8	72.7	31	5.7	1.2	19.5	131
214.8	147.4	58	7.3	3.7	56.0	410

农作物受灾面积约为0.2万 hm^2 ,倒塌和损坏房屋约为0.35万间,直接经济损失约为3亿元。当2d最大降雨量达到214.8mm左右时,受灾人口数将达到147.4万人,死亡失踪人数也将有可能达到50人左右,农作物受灾面积有可能达到7万 hm^2 ,倒塌和损坏房屋将可能达到60万间,直接经济损失将可能超过400亿元。在现有的抗灾能力下,随着降雨量的增加,北京市不同承灾体的损失增长明显。

因此,对北京市的洪涝灾害问题仍须给予高度重视,加大城市暴雨洪涝灾害风险管理力度,进而科学应对与缓解可能加剧的城市暴雨洪涝灾害问题,不断提高城市对于暴雨洪涝灾害的调控和应急能力以及各承灾体的抵御和适应能力。

4 总结与讨论

本研究以北京市为例,基于历史暴雨洪涝灾情数据,通过构建脆弱性曲线,量化研究城市在暴雨洪涝灾害中的宏观脆弱性,并对承灾体在不同降雨量情景下的脆弱性进行定量分析。总结如下:

1) 最大2d降雨量与承灾体损失率间存在较强的相关性,可以作为致灾因子变量,应用于北京市暴雨洪涝灾害风险以及承灾体脆弱性的定量分析。

2) 根据P-III拟合曲线的计算结果,北京市5年一遇的最大2d降雨量为110.5mm,10年一遇的为134.8mm,20年一遇的为159.0mm,50年一遇的为190.8mm,100年一遇的为214.8mm。对于相同降雨量,农作物受灾率最高,其次分别为人口受灾率,房屋损坏率,直接经济损失和房屋倒塌率,死亡失踪率值最低。

3) 本研究对人口、农作物、房屋等承灾体在最大2d降雨量分别为110.5、134.8、159.0、190.8、214.8mm情景下,可能的脆弱性状况进行了分析。在现有的抗灾能力下,随着降雨量的增加,北京市不同承灾体的损失增加明显,北京市的洪涝灾害问题仍须给予高度重视,城市暴雨洪涝灾害风险管理力度还有待加强。

本研究利用北京市暴雨洪涝的社会经济历史灾情数据构建脆弱性曲线,进行脆弱性量化研究,有利于将致灾因子与承灾体相联系,并增强不同区域、不同灾种之间的可比性。需要指出的,由

于脆弱性是特定社会经济背景下的产物,它随着社会经济水平以及城市抵御暴雨洪涝灾害能力的变化而变化,因此,在今后的研究中,需要不断引入最新灾情数据,对脆弱性曲线的形态进行修正,进而提高其对脆弱性评估的可靠性。同时由于灾情指标的限制,本研究只进行了大尺度宏观层面的评价。在今后的研究中,可以结合指标体系或实地调查等方法在更精细尺度上进行分析,进一步确定脆弱性较高的重点区域和重点承灾体等,这将对本研究的有益补充。

参考文献(References):

- [1] 刘家福,张柏.暴雨洪灾风险评估研究进展[J].地理科学,2015,35(3):346-351.[Liu Jiafu,Zhang Bai. Progress of rainstorm flood risk assessment. Scientia Geographica Sinica, 2015,35(3): 346-351.]
- [2] 史培军,孔锋,方佳毅.中国年代际暴雨时空变化格局[J].地理科学,2014,34(11):1281-1290.[Shi Peijun,Kong Feng,Fang Jiayi. Spatio-temporal patterns of China decadal storm rainfall. Scientia Geographica Sinica, 2014,34(11):1281-1290.]
- [3] 吴玉成.我国城市内涝灾害频发原因分析[J].中国防汛抗旱,2011,21(6):7-8.[Wu Yucheng. The cause of the frequent urban waterlogging disasters in China.China Flood and Drought Management,2011,21(6):7-8.]
- [4] 朱思诚,任希岩.关于城市内涝问题的思考[J].行政管理改革,2011,(11):62-66.[Zhu Sicheng,Ren Xiyan. Thinking about urban waterlogging problems.Administraion Reform, 2011,(11): 62-66.]
- [5] 王毅.北京城市洪涝灾害的主因和对策建议[J].中国防汛抗旱,2011,21(6):27-28.[Wang Yi. The cause and countermeasures of Beijing urban flood disasters. China Flood and Drought Management, 2011,21(6):27-28.]
- [6] 姜付仁,姜斌.北京“7.21”特大暴雨影响及其对策分析[J].中国水利,2012,(15):19-22.[Jiang Furen,Jiang Bin. Impact of super thunderstorm on 21 July in Beijing and countermeasures.China Water Resources, 2012,(15):19-22.]
- [7] 杨进怀,丁跃元,刘大根.北京“7.21”特大暴雨自然灾害的启示与对策思考[J].中国水利,2012,(17):29-31.[Yang Jinhuai,Ding Yueyuan,Liu Dagen.Revelation and strategy of natural disasters such as Beijing “7.21” severe rainstorm. China Water Resources, 2012,(17):29-31.]
- [8] 史培军.再论灾害研究的理论与实践[J].自然灾害学报,1996,5(4):6-14.[Shi Phijun .Theory and practice of disaster study.Journal of Natural Disasters,1996,5(4):6-14.]
- [9] 陈晓红,万鲁河.城市化与生态环境耦合的脆弱性与协调性作用机制研究[J].地理科学,2013,33(12):1450-1457.[Chen Xiaohong,Wan Luhe. The interactive mechanisms for the coordination and vulnerability between regional urban and eco-environment. Scientia Geographica Sinica, 2013,33(12):1450-1457.]

- [10] 高庆华.中国自然灾害的分布与分区减灾对策[J].地学前缘, 2003,10(特刊):258-264.[Gao Qinghua.The distributions of natural disasters and the divisional disaster-countermeasures for China.Earth Science Frontiers, 2003,10(Special Issue):258-264.]
- [11] 黄惠,温家洪,司瑞洁,等.自然灾害风险评估国际计划述评 II——指标体系[J].灾害学,2008,23(2):112-116.[Huang Hui, Wen Jiahong,Si Ruijie et al. International natural disaster risk assessment program:overview I—indicator systems. Journal of Catastrophology, 2008,23(2):112-116.]
- [12] Cutter S L.The science of vulnerability and the vulnerability of science[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2003,93(1):1-12.
- [13] Cutter S L,Finch G.Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J].Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008,105(7):2301-2306.
- [14] 史培军.灾害研究的理论与实践[J].南京大学学报(自然科学版),1991,(11):37-42.[Shi Peijun.On the theory of disaster research and its practice. Journal of Nanjing University(Nat Sci Ed) ,1991,(11):37-42.]
- [15] 史培军.四论灾害系统研究的理论与实践[J].自然灾害学报, 2005,14(6):1-7.[Shi Peijun.Theory and practice on disaster system research in a fourth time.Journal of Natural Disasters,2005, 14(6):1-7.]
- [16] 石勇.灾害情景下城市脆弱性评估研究——以上海市为例[D].上海:华东师范大学,2010.[Shi Yong.Research on Vulnerability Assessment of Cities on the Disaster Scenario—A Case study of shanghai City. Shanghai:East China Normal University.2010]
- [17] 周扬.中国县域自然灾害社会脆弱性时空格局演变研究[D].北京:北京师范大学,2014.[Zhou Yang.Study on the temporal and spatial changes in social vulnerability to natural disasters at the county level.Beijing: Beijing Normal University,2014]
- [18] Penning E C, Chatterton J B.The benefits of flood alleviation:a manual of assessment techniques[M]. Aldershot:Gower Publishing Company Limited,1977.
- [19] Smith D I.Flood damage estimation-a review of urban stage-damage curves and loss functions[J].Water S A, 1994 ,20 (3):231-238.
- [20] 王艳艳,陆吉康,郑晓阳,等.上海市洪涝灾害损失评估系统的开发 [J]. 灾 害 学,2001,16(2):7-13.[Wang Yanyan,Lu Jikang, Zheng Xiaoyang et al. Development of flood damage assessment system of Shanghai.Journal of Catastrophology, 2001,16 (2):7-13.]
- [21] 李纪人,丁志雄,黄诗峰,等.基于空间展布式社会数据库的洪涝灾害损失评估模型研究[J].中国水利水电科学研究院学报, 2003,1(2):104-110.[Li Jiren,Ding Zhixiong,Huang Shifeng et al. Research of flood and waterlogging loss assessment model based on spatial distribution social-economic database.Journal of China I Institute of Water Resources and Hydropower Research,2003,1(2):104-110.]
- [22] 程涛,吕娟,张立忠,等.区域洪灾直接经济损失即时评估模型实现[J].水利发展研究,2002,2(12):34-40.[Cheng Tao,Lyu Juan, Zhang Lizhong et al.Realization of immediate model for evaluation of regional direct economic loss in flood.Water Resources Development Research, 2002,2(12):34-40.]
- [23] 殷杰,尹占娥,于大鹏,等.风暴洪水主要承灾体脆弱性分析——黄浦江案例[J].地理科学,2012,32(9):1155-1160.[Yin Jie, Yin Zhane,Yu Dapeng et al. Vulnerability analysis for storm induced flood: a case study of huangpu river basin. Scientia Geographica Sinica, 2012,32(9):1155-1160.]
- [24] 权瑞松.基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝脆弱性分析.地理科学,2014,34(11):1399-1403.[Quan Ruisong. Vulnerability Analysis of Rainstorm Waterlogging on Buildings in Central Urban Area of Shanghai Based on Scenario Simulation. Scientia Geographica Sinica, 2014,34(11):1399-1403.]
- [25] 谭丽荣,陈珂,王军,等.近20年来沿海地区风暴潮灾害脆弱性评价[J].地理科学,2011,31(9):1111-1117.[Tan Lirong,Chen Ke, Wang Jun et al. Assessment on storm surge vulnerability of coastal regions during the past twenty years.Scientia Geographica Sinica,2011,31(9):1111-1117.]
- [26] 魏一鸣.自然灾害复杂性研究[J].地理科学,1998,18(1):25-31. [Wei Yiming.A research on the complexity of natural disasters. Scientia Geographica Sinica,1998,18(1):25-31.]
- [27] 石勇,许世远,石纯,等.洪水灾害脆弱性研究进展[J].地理科学进展,2009,28(1): 41-46.[Shi Yong,Xu Shiyuan,Shi Chun et al. A review on development of vulnerability assessment of floods. Progress in Geography, 2009,28(1): 41-46.]
- [28] Dutta D,Herath S,Musiak K. A mathematical model for flood loss estimation[J].Journal of Hydrology,2003,277(1/2):24-49.
- [29] Hohl R,Schiesser H,Aller D.Hailfall: The relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings [J].Atmospheric Research, 2002a,63(1/2):177-207.
- [30] Hohl R,Schiesser H,Knepper I.The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: An exploratory study in Switzerland[J].Atmospheric Research,2002b,61(3):215-238.
- [31] 温克刚.中国气象灾害大典(北京卷)[M].北京:气象出版社, 2005.[Wen Kegang.China's weather disasters(Beijing volum). Beijing: China Meteorological Press,2005.]
- [32] 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[J].地理研究,2011,32(2): 195-208.[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, 2011,32(2):195-208.]
- [33] 高绍凤,陈万隆,朱超群,等.应用气候学[M].北京:气象出版社, 2001.[Gao Shaofeng,Chen Wanlong,Zhu Caoqun et al. Applied climatology.Beijing: China Meteorological Press,2001.]
- [34] 马开玉.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社, 1993.[Ma Kaiyu. Climate statistics principle and method.Beijing: China Meteorological Press,1993.]

An Urban Vulnerability Study Based on Historical Flood Data: A Case Study of Beijing

Yang Peiguo¹, Jin Jing², Zhao Dongsheng³, Li Jing⁴

(1. *National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100124, China*; 2. *China Centre for Modernization Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*; 3. *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 4. *Environment Satellite Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China*)

Abstract: Based on the historical loss data, the study builds vulnerability curves and carries out qualitative research on the general vulnerability of Beijing to rainstorms and floods under different rainfall scenarios. The results show that: 1) There is a high correlation between the maximum 2-day rainfall and the loss rates, the established vulnerability curves can express the relation and be used for loss estimation; 2) According to the P-III fitting curves, the once-in-5-year maximum 2-day rainfall in Beijing is 110.5 mm, and the figures for once-in-10-year, once-in-20-year, once-in-50-year and once-in-100-year occasions are 134.8 mm, 159.0 mm, 190.8 mm and 214.8 mm, respectively; 3) With the current ability to resist disasters, under the same rainfall scenario, the crops loss rate is the highest, followed by population affected rate, buildings damaged rate, direct economic loss rate and buildings collapse rate, death or missing rate is the lowest; 4) The loss rate rises dramatically with the increase of maximum 2-day rainfalls. With current social and economic exposure, when the maximum 2-day rainfall recurrence period reached once-in-5-year, population affected may be 6.2×10^4 and the number of death or missing may be 4 people, the area of crops affected may be 2×10^3 hm², the number of buildings damaged or collapse may be 3.5×10^3 , and direct economic loss may be 3×10^8 . When the maximum 2-day rainfall recurrence period reached once-in-100-year, population affected may reach 1.474×10^6 and the number of death or missing may reach about 50 people, the area of crops affected may reach 7×10^4 hm², the number of buildings damaged or collapse may reach 6×10^5 , and direct economic loss may exceed 4×10^{10} yuan(RMB). So Beijing still needs to give high importance to flood problems and strengthen its flood risk management in this regard.

Key words: rainstorms and floods; vulnerability curve; Beijing