第 19卷 第 6期 2010年 12月
自 然 灾 害 学 报
JOURNAL OF NATURAL DISASTERS
Vol. 19 No. 6 Dec. 2010

文章编号: 1004-4574(2010)06-0061-06

基于泊松-对数正态复合极值模型的洪水灾害损失分析

刘家福[1,2], 吴 锦[2], 蒋卫国[3], 占文凤[2]

(1. 吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000; 2. 北京师范大学 减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 民政部/教育部 减灾与应急管理研究院(北京师范大学), 北京 100875)

摘 要: 在国际紧急灾害数据库的支持下, 得到了中国在 1980-2008年间发生的年洪水灾害发生次数、年单次洪水灾害经济损失极大值和年洪水灾害经济总损失 3个统计指标; 根据复合极值理论, 利用泊松-对数正态复合极值模型对洪水灾害经济损失进行了分析。研究结果表明: (1)洪水灾害经济损失遵从对数正态分布; (2)单次极值经济损失与年经济总损失具有高度相关性; (3)复合极值方法可有效地用于洪水极值重现期的重建; (4)与传统的经验频率计算方法相比, 该方法能克服因资料年限短、数据不足而造成的洪灾重现周期估算困难。

关键词: 复合极值模型; 泊松分布; 对数正态分布; 灾害损失

中图分类号: P426.6 文献标识码: A

Flood disaster losses analysis based on the Poisson-lognormal compound extreme model

LIU Jia-fu[1,2], WU Jin[2], JIANG Wei-guo[3], ZHAN Wen-feng[2]

(1. College of Tourism and Geographical Sciences, Jilin Normal University, Siping 136000, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs/Ministry of Education (Beijing Normal University), Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the EM-DAT (OFDA/CRED) emergency disaster database, three samples of statistical data, including the number of flood disasters, the maximum economic loss in a single flood disaster and the total economic loss in floods were obtained annually from 1980 to 2008 in China. And then, according to compound extreme distribution, Poisson-lognormal compound extreme model was utilized to analyze economic losses of flood disaster. The results indicate that (1) economic losses of flood disaster is subject to log-normal distribution; (2) a high correlation exists between single extreme economic losses and the total annual economic loss; (3) compound extreme value method is highly effective in reconstruction of return period of extreme flood. (4) compared with the traditional experience method of calculating the frequency, the method can overcome the difficulties of estimating return period due to insufficient information on data and year number.

Key words: compound extreme model; Poisson distribution; lognormal distribution; disaster loss

洪水灾害是当今世界最主要又频繁发生的灾害之一, 防治洪水灾害是世界各国普遍关注的问题[1]。根

收稿日期: 2009-08-21; 修订日期: 2010-07-26

基金项目: 国际科技合作计划专项项目(2007DFA20640); 国家科技支撑计划课题(2006BAJ05A01; 2006BAJ09B06; 2006BAJ09B03; 2008BAC44B03); 国家自然科学基金(40701172, 40771155); 国家 863计划(2009AA12Z124); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2008490611); 吉林师范大学硕博启动项目(吉师博 2010022)

作者简介: 刘家福(1975-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事遥感与 GIS在资源环境、自然灾害领域的应用研究. E-mail: liujiafu@ires.cn

据国际紧急灾害数据库(EM－DAT)资料进行统计[2],按照“死亡人口”和“经济损失”指标,对全球各类自然灾害的影响程度进行排序,洪水灾害居首,而中国是洪水灾害发生最频繁的国家之一。在尚未充分认识重大洪水灾害的发生机制之前,根据历史资料记载的灾害事实,对重大洪水灾害基本特征及其规律的研究,不仅是减灾研究的重要组成部分,而且有助于相关政府部门作好宏观决策,制定更有效的防灾、减灾对策,集中人力、物力进行抗灾、减灾,并指导区域灾害管理[3-6]。

当前利用历史灾情数据进行洪灾风险分析,主要采用洪灾损失概率分析方法[7-16];相关的研究中,徐高洪等用 P－III型曲线对洪水灾害损失概率进行了研究,取得了一些成果[14]。但是,洪水灾害损失的理论分布未必服从 P－III型分布[15],且 P－III型曲线进行计算时需要大量的数据资料。由于洪水次数与洪灾经济损失之间并无直接联系,且在资料年限的较短的情况下,利用洪水极端值来刻画经济损失,有计算误差大,与经验点匹配较好的理论频率曲线选择困难等特点。本文针对这一问题,首次将工程学中的复合极值分布理论引入到洪水风险方面的研究;并利用泊松－对数正态复合极值模型,探讨洪灾损失重现期并进行定量分析,具有一定的理论意义与现实意义。

1　研究方法

复合极值分布理论最早由马逢时于 1979年提出[17],旨在解决资料年限不足情况下,极端事件(如波浪、暴雨、风速)重现期估算不准的问题。其基本原理是利用一个离散型分布和一个连续型分布建构起“复合极值分布”模型,并利用该模型来求解各种强度极端事件的重现期。目前该方法在国内外已经得到了广泛的认可和重视,并在海洋工程、水利工程、排水等建筑工程中,得到了广泛应用[18-19]。

1.1　复合极值分布

定义:有一种离散型分布

$$\begin{bmatrix} 0, & 1, & 2, & \cdots, & k, & \cdots \\ p_0, & p_1, & p_2, & \cdots, & p_k, & \cdots \end{bmatrix}, \tag{1}$$

有一种连续型分布 $N(x)$,记

$$N_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k [N(x)]^k, \tag{2}$$

称 $N_0(x)$为这两种分布构成的复合极值分布[17]。其中,$n(n=0, 1, 2, \cdots, k, \cdots)$为极端事件出现的频次,为 $p(n=k)=p_k$, $(p_k=p_0, p_1, p_2, \cdots p_k \cdots)$该极端事件出现的概率。

在实际应用中,主要的问题是给定一个 $R(0<R<1)$求解方程

$$F(x) = R. \tag{3}$$

设 P 为设计频率[20],累积频率 $F(x)=1-P$, 则重现期 $T=\dfrac{1}{P}=\dfrac{1}{1-R}$。

1.2　泊松－正态复合极值分布

若极端事件发生次数符合泊松分布,而该极端事件的强度满足正态分布时,上述的符合极值分布可以改写为:

$$F(x) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k [N(x)]^k = e^{-\lambda[1-N(x)]}. \tag{4}$$

其中:$P_k=\dfrac{\lambda_k}{k!}e^{-\lambda}$, $k=0, 1, 2, \cdots$, $N(x)$为正态分布密度函数 $n(\mu, \sigma)$的累积概率密度函数。

1.3　拟合分布假设的统计检验

由于复合极值分布包含了两种单一的分布形式,每种分布检验都获得通过,则认为假定的复合分布假设成立[20-21]。

设 $F(x)$为总体分布函数,$F_0(x)$为已知的理论分布函数,则原假设为 H_0: $F(x)=F_0(x)$; 备选假设为 H_1: $F(X) \neq F_0(x)$。

取统计量: $\hat{D}_n = \sup\limits_{-\infty<x<\infty} |F(x)-F_0(x)|$, 如果显著水平 $\alpha=0.05$,对不同的样本容量 n,可查表得到不同的 K－S检验的临界值 $D_n(0.05)$。若 $D_n<D_n(0.05)$,则接受原假设 H_0,拒绝备选假设 H_1;否则拒绝原假设

H_0。

2 实验资料

利用全球 EM – DAT(OFDA /CRED)国际灾害数据库中的重大洪水灾害相关资料, 统计近 30 a来中国洪水灾害发生次数、年单次洪水灾害经济损失极大值和年洪水灾害经济总损失 3个统计指标 (见表 1)。从表 1中可以看出, 中国从 1980– 2008年期间共发生洪水灾害 176次, 经济总损失达到 9460多亿元。在洪水灾害随时间不断演进的过程中, 洪水灾害造成的经济损失并没有呈现明显的上升趋势, 而是起伏不定的状态, 在部分年份有大幅度的上升和下降势态, 这与在一些年份发生的极端重大洪水灾害事件有关, 并与我国洪水灾害防御响应体系不断完善、医疗卫生水平的逐步提高存在一定关系[22]。

表 1　1980– 2008年洪水灾害统计值

Table 1　Statistics of flood disaster loss from 1980 to 2008

年份	洪水灾害总次数 /次	年单次洪灾经济损失最大值 /亿元	年洪灾经济总损失 /亿元
2008	7	150. 5	163 6
2007	12	302 7	343 6
2006	20	46. 4	115 4
2005	11	147. 7	318 8
2004	9	75. 2	135 8
2003	6	539. 7	1 048 5
2002	10	212 0	323 4
2001	8	20. 5	48 6
2000	9	11. 8	21 6
1999	6	554. 0	633 0
1998	5	2 052 0	2 171 3
1997	6	85. 6	166 9
1996	4	861. 8	1293 8
1995	3	457. 6	459 6
1994	6	373. 5	515 7
1993	4	414. 6	416 4
1992	6	11. 6	34 8
1991	3	513. 0	550 2
1990	3	40. 5	54 9
1989	1	187. 8	190 8
1988	8	72 7	134 3
1987*	4	0. 0	0 0
1986	2	102 6	102 7
1985	7	23. 9	48 1
1984*	2	0. 0	0 0
1983*	1	0. 0	0 0
1982*	4	0. 0	0 0
1981	5	82 1	157 3
1980	4	8. 9	10 9

(数据来源: EM – DAT Emergency Disasters Data Base; “*　”年份国际减灾数据库中缺乏相应经济损失记录;)

3 泊松–对数正态复合极值分布及其应用

3.1 洪水灾害发生频次的泊松分布检验

洪水灾害发生频次本身也是一随机变量,具有一定的概率特征[21]。本文对中国 1980–2008年洪水发生的频次进行了统计(见表 2),并利用泊松分布函数对洪水发生的频次分布进行了估计检验;图 1给出了理论概率密度曲线和经验密度直方图。K–S检验表明:检验统计量为 0.183 4小于显著水平为 0.05时的临界值 0.259 1;因而,可采用泊松分布刻画洪水灾害发生频次分布。

表 2 洪水灾害频次及泊松分布参数估计

Table 2 Frequency of flood disasters and Poisson distribution parameters estimation

洪水次数 /(次· a^{-1})	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	总年数	总次数	λ
频数 /a	2	2	3	5	2	5	2	2	2	1			
洪水次数 /(次· a^{-1})	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	29	176	6.07
频数 /a	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1			

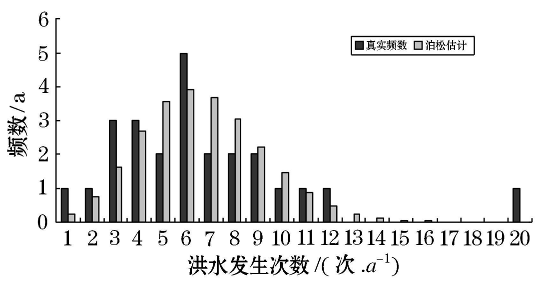

图 1 洪水发生次数的频数

Fig. 1 Flood occurrence frequency

3.2 洪水灾害经济损失的对数正态分布检验

对中国 1980–2008年间发生的 100多起洪水灾害造成的经济损失进行统计发现,该指标并不符合现有的函数分布形式(如正态分布、指数分布、均匀分布等)。对经济损失指标对数处理后,发现该指标可以很好的用正态分布来描述(见图 2)。同时 K–S检验表明:检验统计量为 0.047 3小于显著水平为 0.05时的临界值 0.128 5,因而利用对数正态分布来描述洪水灾害经济损失是合适的,其中该正态分布的期望值为 1.272 1,标准差为 0.771 7。

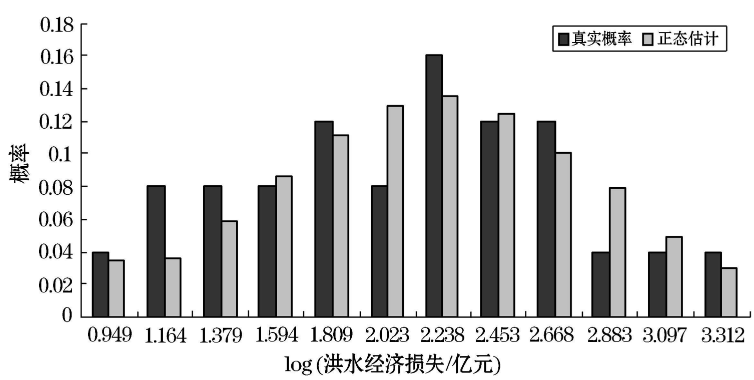

图 2 洪水经济损失对数正态分布的概率密度图

Fig. 2 Lognormal distribution probability density histogram of flood economic losses

3.3 洪水灾害经济损失的重现期估算及分析

通过对单次极值洪水灾害经济损失与年洪水灾害经济总损失的相关分析发现, 两者之间存在高度相关性 (图 3); 因而极值损失可用作年经济总损失的重要参考指标。通过极值损失就可以很好地刻画年经济损失的量, 这对于宏观调控, 防灾减灾具有重要的现实意义。

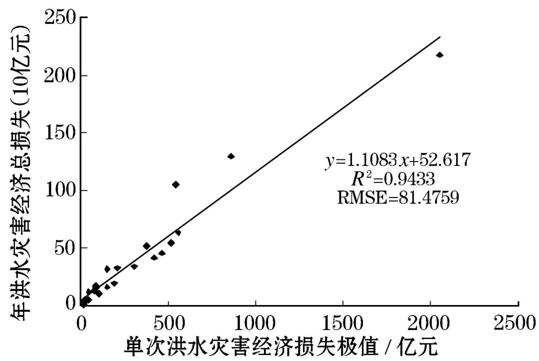

图 3　经济损失相关性分析

Fig 3　Correlation analysis of economic losses

结合 3.1和 3.2分析, 可利用复合极值模型来估算洪水灾害极值经济损失, 进而达到对年洪水灾害经济损失的预测。根据式 (3)和 (4)可以可推求重现期公式为

$$P(x) = 1 - F(x) = 1 - \exp(-\lambda[1 - N(x)]). \quad (5)$$

其中: $N(x)$为正态密度函数 $n(1.2721, 0.7717)$的累积概率密度函数; $\lambda = 6.07$。

利用上述泊松 – 对数正态复合极值分布模型, 可以推算出多年一遇的洪水灾害经济损失, 见表 3。

表 3　洪水灾害经济损失重现期

Table 3　Return period of flood economic losses

概率	0.917	0.5	0.2	0.1	0.05	0.033	0.025	0.02	0.0167	0.0125	0.01
重现期 /a	1.09	2	5	10	20	30	40	50	60	80	100
经济损失 /亿元	26.88	157.47	448.84	792.15	1 302.2	1 699.6	2 029.7	2 298.3	2 556.6	3 053.3	3 457.3

按表中数据可知: 年发生单次最大经济损失超过 26.88亿元的洪水灾害的概率为 0.917, 即平均 1a发生一次如此规模的洪水灾害; 年发生单次最大经济损失超过 157.47亿元时的洪水灾害的概率为 0.5, 即平均 2 a发生一次该规模的洪水灾害; 而年发生单次最大经济损失超过 3457.3亿元的概率为 0.01, 即如此规模大小的洪水的重现期需要 100 a。通过以上分析可以看出, 经济损失的风险水平随着灾害损失增大, 风险概率值减少。

洪水灾害是一种不以人的意志为转移的自然现象, 彻底根治洪水灾害不再发生的想法是不现实的。但人类活动可以改变洪水事件发生的频率, 扩大或减少其危害性及影响范围, 改变生命财产的受灾损失率及其抗灾性能, 防灾减灾建设显得尤为重要[1]。因此, 政府部门应采取一些措施, 协调与自然环境相互作用的关系, 提高防灾减灾能力, 使洪灾损失降到最低。

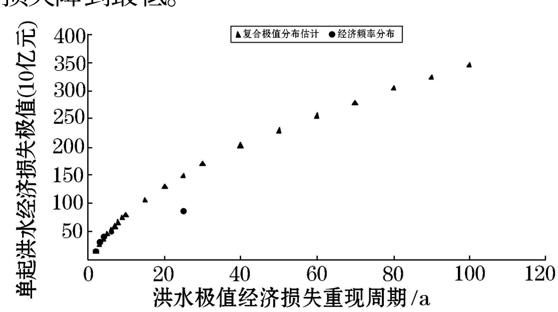

图 4　经济损失重现周期估计方法比较

Fig. 4　Comparison among estimation methods of economic losses return period

3.4 方法比较研究

将复合极值分布估计法与经验频率法[14,16]两种方法进行比较研究(见图 4),发现当极值洪水重现期较小时(低于 20 a),两种估算方法得出单次洪灾经济损失极值估计基本一致,说明了复合极值分布方法可以有效的用于洪灾经济损失重现期的重建;当重返周期较大时,复合极值分布方法能很好的预测长周期的洪灾经济损失估计,而经验频率方法得出单次洪灾经济损失极值估计要明显低于复合极值方法且无法对更长的重现期(超过所使用的数据年限)进行预测,反应了经验频率法受制于资料年限的缺陷;这也间接地反映了复合极值分布法具有克服数据资料短缺的优点并有效地估计较长重现期的极值洪水灾害造成的经济损失。

4 结论

结合国际减灾数据库,本文首先提取了中国在 1980-2008年间年洪水灾害发生次数、年单次洪水灾害经济损失极大值和年洪水灾害经济总损失 3个统计指标;根据复合极值分布理论,建立了基于泊松-对数复合极值的洪灾损失概率分布模型,并利用该模型对我国近 30a洪灾极值经济损失概率分布进行了研究。结果表明:(1)年洪水灾害发生次数遵循泊松分布而洪水灾害经济损失则遵从对数正态分布;(2)相关性分析揭示了单次极值洪灾经济损失与年洪灾经济总损失之间存在高度相关性($R^2 = 0.9433$, $P < 0.01$),因而极值损失可用作年经济总损失的重要参考指标;(3)复合极值方法能够克服资料年限短、数据不足而造成洪灾重现期估算困难的问题。将中国视为一个流域,经过拟合分布假设的统计检验,洪灾发生次数和洪灾经济损失的分布假设是合理的,通过极值经济损失能够刻画全国洪灾经济损失的重现期。尽管本文是对 29a数据的样本集进行实例分析,但对较少的样本集,本方法同样实用。由于许多自然灾害现象都面临着历史资料数据短缺的问题,首次将工程学中的复合极值分布理论引入到洪水灾害损失的研究,对自然灾害风险评价与量化研究有一定的理论意义与现实意义。

参考文献:

[1] 陈颙,史培军. 自然灾害[M]. 北京,北京师范大学出版社, 2007.

[2] EM-DAT Emergency Disasters Data Base[DB/OL]. http://www.em-dat.net

[3] 史培军.三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.

[4] 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.

[5] Tawatchai Tingsanchali, Mohammed F K. Flood hazard and risk analysis in the southwest region of Bangladesh[J]. Hydrological Process, 2005, 19: 2055-2069.

[6] Colin R R, Brenda J B, Amanda J W, et al. Comparison of flood hazard assessments on desert piedmonts and playas: A case study in Ivanpah Valley, Nevada[J]. Geomorphology, 2009, 103(4): 520-532.

[7] Dutta D, Herath S, Musiake K. A mathematical model for flood loss estimation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 277(1): 24-49.

[8] Gareth P, Sylvain N. Use of computer models of flood inundation to facilitate communication in flood risk management[J]. Enviromental Hazards, 2007, 7(2): 106-114.

[9] Neri A, Aspinall W P, Cioni R, et al. Developing an Event Tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008, 178(3): 397-415.

[10] 周成虎. 洪水灾害评估信息系统研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.

[11] 纪昌明,梅亚东. 洪灾风险分析[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.

[12] 刘新立,史培军. 空间不完备信息条件下的区域自然灾害风险评估[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 26-32.

[13] 李继清,张玉山,王丽萍,等. 洪灾综合风险结构与综合评价方法(Ⅰ)—宏观方面[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(5): 19-23.

[14] 徐高洪. 洪灾损失系列线型研究[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(1): 73-78.

[15] 段春青,邱林,陈晓楠,等. 基于混沌优化神经网络的洪灾损失概率分析[J]. 应用基础与工程科学学报(增刊), 2006, 14: 247-251.

[16] 黄诗峰. 洪水灾害风险分析的理论与方法研究[D]. 北京,中国科学院地理研究所, 1999.

[17] 马逢时,刘德辅. 复合极值分布理论及应用[J]. 应用数学学报, 1979, 2(4): 366-375.

[18] 刘德辅,王莉萍,宋艳,等. 复合极值分布理论及其工程应用[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 893-920.

[19] 王莉萍. 多维复合极值分布理论及其工程应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.

[20] 董胜,刘德辅. 不完整风暴增减水序列的统计分析[J]. 海洋通报, 1999, 18(6): 63-70.

[21] 刘德辅,谢波涛,伍远康,等. 台风诱发暴雨降水量的概率预测[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(6): 1027-1033.

[22] 司瑞洁,温家洪,尹占娥,等. 亚洲洪水统计特征[J]. 科技导报, 2007, 25(6): 60-67.