多变量洪水风险分析方法

李晓粤, 翟国静
(河北工程技术高等专科学校水利工程系, 河北 沧州 061001)

摘 要: 分析了洪水特征值的不同频率性和现行的单因素防洪风险分析方法的片面性。从组合事件的概率理论出发, 利用"完全相关"与"相互独立"两种特殊情况, 采用模糊集理论, 建立了二参数加权组合概率模型。模型中不仅考虑了洪峰和洪量对洪水风险的共同作用, 而且避免了确定条件概率分布的问题, 为在现有的洪水资料的情况下, 合理估计防洪风险及进行防洪水利计算, 提供了一种简单可操作性方法。

关键词: 多变量; 风险分析; 隶属度加权; 概率模型; 防洪计算
中图分类号: P333.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2006)01-0008-03

Method of Multi-variate Rainstorm-flood Risk Analyses

LI Xiao-yue, ZHAI Guo-jing
(*Department of Water Conservancy, Hebei Engineering and Technical College, Cangzhou* 061001, *China*)

Abstract: The nonidentity of the rainstorm-flood eigenvalues in the probability and disadvantage of currently mono-variant method of the flood risk analysis are analyzed. Based on probability theory about combined event, by dint of two special events such as "absolute correlation" and "inter-independence", the bi-variate weighted compound probability model is established by means of fuzzy set theory. In the present model, not only the complex effects for flood peak and flood total discharge to the flood risk are considered, but also the problem of researching conditional probability distribution is avoided. A practical method that reasonably estimate flood risk with limited flood information is provided.

Key words: multi-variate; flood risk analysis; fuzzy set theory; compound probability model; flood-control calculation

洪水风险分析的目的是确定防洪工程的设计标准。暴雨洪水是一个复杂的连续变化过程。由于对暴雨、洪水的形成机制的认识还不甚充分, 过程控制难以实现, 因此, 在传统的洪水计算方法中, 往往是以洪峰流量和洪量等特征值来描述洪水过程, 特别是在洪水风险分析中, 传统的方法都是假定洪峰、洪量同频率, 用某一个特征值(洪峰或洪量)的风险分析来代替洪水的风险分析。事实上, 同一场暴雨所产生的洪水的洪峰和洪量往往是不同频率的, 有的可能峰高, 有的可能量大, 洪水风险或者说洪水灾害是洪峰和洪量共同作用的结果, 因此洪水风险分析只考虑一个特征值是不全面的。例如, 如果以洪峰流量的风险作为防洪工程的设计标准, 那么, 当遇到洪峰流量并不大(未超过设计标准)但洪水总量很大的洪水时, 也会形成洪灾。因此单变量的洪水风险分析方法存在着很大的片面性。文[1]中研究了洪峰与洪量的联合随机模型, 但在求解中假定洪峰流量和洪量服从正态分布, 与目前采用的P-Ⅲ型分布不相符。文[2]中在多变量防洪风险分析方面也作了有益的尝试, 但是文中把暴雨、洪水这两个存在着因果关系的事件作为两个并列的事件来考虑, 在处理变量的关系上存在着不妥之处, 因此其结论也出现了矛盾。为此, 文中以概率论的基本原理和模糊集理论为出发点, 探讨了洪峰、洪量共同作用的多变量的洪水风险分析方法, 为在现有的水文资料的情况下合理估算洪水风险提供了一种可操作性的方法。

1 洪峰与洪量共同作用下的洪水风险

1.1 概率模型

一次暴雨所形成的洪水过程不仅与暴雨过程有关, 而且还与包括下垫面在内的产汇流条件有关, 因此, 有的洪水过程为尖瘦型, 峰高而量不大; 有的洪水过程为矮胖型, 峰不高而量很大。峰高可能造成洪水灾害, 量大也会造成洪水灾害, 当然, 峰高的同时量又大, 则更会造成洪水灾害。由此可见, 要分析洪水可能造成的灾害风险必须同时考虑洪峰和洪量两个方面。当然, 洪量可以是不同时段的洪量也可以是某一控制时段的洪量, 或者是洪水总量。当只考虑某一个时段的洪量或洪水总量时, 根据概率论可知, 洪水的风险为:

$$P(Q \cup W) = P(Q) + P(W) - P(Q \cap W) \tag{1}$$

式中: $P(Q \cup W)$ —— 洪峰、洪量共同作用下的洪水风险; $P(Q)$, $P(W)$ —— 洪峰、洪量的概率分布。

按照我国现行的防洪规范, 洪峰、洪量均采用P-Ⅲ型分布, 即:

$$P(Q) = \int_{x_p}^{\infty} \frac{\beta_x^{\alpha_x}}{\Gamma(\alpha_x)} (x - \alpha_{0x})^{\alpha_x - 1} e^{\beta_x (x - \alpha_{0x})} dx \tag{2}$$

$$P(W) = \int_{y_p}^{\infty} \frac{\beta_y^{\alpha_x}}{\Gamma(\alpha_y)} (x - \alpha_{0y})^{\alpha_y - 1} e^{\beta_y (x - \alpha_{0y})} dy \tag{3}$$

式(1)就是考虑组合事件概率的洪水风险估计模型。式(1)

---

① 收稿日期: 2005-01-23
作者简介: 李晓粤(1965-), 女, 副教授, 硕士, 研究方向: 环境保护与可持续发展。

由 3 项构成, 其中前两项可按传统的 $P-$ Ⅲ型分布通过求解式(2)和式(3)而得; 第三项 $P(Q\cap W)$ 是一个条件概率问题[2], 由于现有水文资料非常有限, 不能直接确定条件概率分布, 因此, 求解式(1)的关键是如何确定其中的第三项 $P(Q\cap W)$。

1.2　条件概率的处理

文[2]中根据中心极限定理, 并进行正态化处理, 运用数值积分的方法, 给出了条件概率的近似解, 计算量大, 且繁琐, 因此有必要寻找一种简单易行的方法。

事实上, 按照洪峰与洪量的相关关系, 式(1)可以有以下两种特殊情况:

(1) 洪峰、洪量相互独立时, 有

$$P(Q\cap W)=P(Q)+P(W)-P(Q)\cdot P(W) \tag{4}$$

(2) 洪峰、洪量完全相关时, 有

$$P(Q\cap W)=P(Q)=P(W) \tag{5}$$

式(5)正是传统的洪水风险分析方法。它假定洪峰、洪量同频率, 这样洪水的风险就等于洪峰的风险或洪量的风险, 因此可以通过单变量进行洪水风险分析。这种方法简单, 但存在很大的片面性。实际上, 如果洪峰与洪量相互独立, 就可以按式(4)计算洪水风险, 由于 $P(Q)$, $P(W)$ 都可以用传统的 $P-$ Ⅲ型分布通过求解式(2)和式(3)而得到, 则计算过程将大为简化。但是, 洪峰、洪量是一次洪水的两个不同的特征值, 它们不可能相互独立。由此可见, 洪峰与洪量即不会完全相关, 也不可能完全相互独立, 直接使用式(4)或式(5)求解洪水风险都是片面的, 实际的洪水风险应介于二者之间。

实际上, '两个变量相关'和'两个变量相互独立'都是一种模糊概念, 其相关程度可由相关系数来量度。根据模糊集理论, 对于'两个变量相关'可定义一个模糊集, 其隶属函数可采用如下形式:

$$\mu(r)=\begin{cases} 2r^2 & 0\leq r\leq 0.5 \\ 1-2(1-r^2) & 0.5\leq r\leq 1.0 \end{cases} \tag{6}$$

式中: r ——洪峰流量与洪量的相关系数。隶属函数曲线如图 1 所示。对于某一个洪峰流量系列和相应的洪量系列, 其相关系数为 r, 则隶属于'两个变量相关'的隶属度为 $\mu(r)$, 而隶属于'两个变量相互独立'的隶属度为 $1-\mu(r)$。其洪峰、洪量共同作用下的洪水风险应介于"相互独立"与"完全相关"的情况之间, 根据式(4), (5)可得到洪峰、洪量共同作用下的以隶属度 $\mu(r)$ 加权的洪水组合概率模型:

$$P(Q\cup W)=P(Q)+[1+\mu(r)]\cdot[P(W)-P(Q)\cdot P(W)] \tag{7}$$

或

$$P(Q\cup W)=P(W)+[1-\mu(r)]\cdot[P(Q)-P(Q)\cdot P(W)] \tag{8}$$

由式(7)和式(8)可知, 当洪峰与洪量完全相关时, 其相关系数 $r=1$, 则隶属度 $\mu(r)=1.0$, 式(7)和式(8)就变为式(5); 当洪峰与洪量相互独立时, 其相关系数 $r=0$, 则隶属度 $\mu(r)=0$, 式(7)和式(8)则变成了式(4); 而当 $0\leq r\leq 1.0$ 时, 洪水风险 $P(Q\cup W)$ 则介于二者之间。

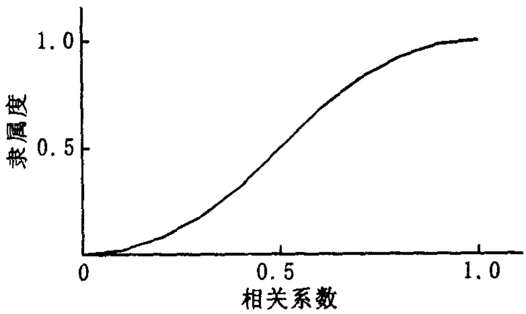

图 1　隶属函数曲线

2　应用实例

小西山站位于滦河流域、武烈河的支流兴隆河上, 属小河站。流域集水面积 200 km^2, 多年平均降雨量为 500 mm 左右。暴雨汇流速度快, 历时短。根据实测洪水资料分析, 洪峰流量与洪水总量明显不同频率。现选取洪峰流量和洪水总量作为特征值, 按本文中所给出的组合概率模型, 进行洪水风险分析。

根据实测洪水资料, 选取洪峰流量系列和洪水总量系列, 按式(2)和式(3)所示的 P− Ⅲ型分布, 计算统计参数, 并按适线法确定出洪峰流量与洪水总量的概率分布, 结果如表 1 所示。按照传统的单变量洪水风险分析方法, 则可直接由表 1 查出百年一遇的设计洪峰流量为 1 356 m^3/s, 洪水总量为 10.75×10^3 m^3。或者说洪峰流量为 1 356 m^3/s 的洪水或洪水总量为 10.75×10^3 m^3 的洪水发生的风险率为 1.0%。现根据表 1 所给出的结果, 按本文中给出的加权组合概率模型, 进行洪水风险分析。

由式(7)和式(8)知, 要确定洪峰、洪量共同作用下的洪水风险, 必须先确定洪峰流量($Q_m\geq Q_0$)与洪水总量($W\geq W_0$)同时出现的概率分布 $P(Q)\cdot P(W)$, 结果如表 2 所示。然后计算所选取的洪峰流量系列和相应的洪水总量系列的相关系数, 其结果为 $r=0.795\,9$。将 $r=0.7959$ 代入式(6)得 $\mu(r)=0.266\,9$。将 $\mu(r)=0.266\,9$ 代入式(7)有:

$$P(Q\cup W)=P(Q)+0.7331[P(W)-P(Q)\cdot P(W)] \tag{9}$$

由式(9)则可计算出不同洪峰流量和洪水总量共同作用下的洪水风险。例如, 对于仅考虑洪峰流量下百年一遇的洪水(洪峰流量为 1 356 m^3/s), 在不同的洪量的共同作用下的洪水风险如表 3 所示。

表 1　小西山站洪水特征值频率分布

特征值	频率/%												
	0.001	0.01	0.1	0.2	0.333	0.5	1	2	3	5	10	20	25
洪峰流量/(m^3·s^{-1})	6043	4381	2797	2345	2014	1765	1356	974	771	542	288	131	105
洪水总量/10^3 m^3	48.54	35.16	22.38	18.73	16.07	14.08	10.75	7.68	6.04	4.17	2.09	0.72	0.51

特征值	频率/%												
	30	40	50	60	70	75	80	85	90	95	97	99	99.9
洪峰流量/(m^3·s^{-1})	92.7	82.6	79.8	79.6	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3
洪水总量/10^3 m^3	0.45	0.37	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

洪峰流量的统计参数为: 均值= 158.9 m^3/s, $Cv=1.6$, $Cs=3.5Cv$; 洪水总量的统计参数为: 均值= 989.1 m^3, $Cv=2.1$, $Cs=3Cv$。

表 2 洪峰流量($Q_m \geq Q_0$) 与洪水总量($W \geq W_0$) 同时出现的概率分布(部分) %

洪峰流量 / ($m^3 \cdot s^{-1}$)	洪水总量/ $10^3 \times m^3$															
	16.0	14.0	12.0	10.0	8.0	6.0	4.2	4.0	3.8	3.6	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4
1800	0.0016	0.0024	0.0039	0.0059	0.0090	0.0145	0.0237	0.0258	0.0281	0.0303	0.0326	0.0349	0.0372	0.0395	0.0418	0.0441
1600	0.0024	0.0036	0.0057	0.0087	0.0133	0.0213	0.0349	0.0379	0.0413	0.0447	0.0481	0.0514	0.0548	0.0582	0.0616	0.0650
1400	0.0032	0.0048	0.0077	0.0118	0.0179	0.0288	0.0470	0.0511	0.0557	0.0602	0.0648	0.0694	0.0739	0.0785	0.0830	0.0876
1200	0.0048	0.0072	0.0114	0.0175	0.0267	0.0428	0.0700	0.0761	0.0829	0.0897	0.0965	0.1033	0.1101	0.1169	0.1236	0.1304
1000	0.0066	0.0099	0.0157	0.0241	0.0367	0.0588	0.0960	0.1045	0.1138	0.1231	0.1324	0.1417	0.1510	0.1603	0.1697	0.1790
800	0.0097	0.0146	0.0232	0.0356	0.0542	0.0867	0.1420	0.1545	0.1683	0.1820	0.1958	0.2096	0.2233	0.2371	0.2509	0.2646
600	0.0152	0.0230	0.0365	0.0560	0.0853	0.1367	0.2234	0.2431	0.2647	0.2864	0.3080	0.3297	0.3514	0.3730	0.3947	0.4163
400	0.0251	0.0379	0.0602	0.0923	0.1405	0.2253	0.3681	0.4005	0.4362	0.4719	0.5076	0.5433	0.5790	0.6147	0.6504	0.6860
420	0.0265	0.0399	0.0634	0.0972	0.1480	0.2373	0.3876	0.4218	0.4594	0.4969	0.5345	0.5721	0.6097	0.6473	0.6849	0.7224
380	0.0278	0.0419	0.0666	0.1021	0.1554	0.2492	0.4071	0.4430	0.4825	0.5220	0.5615	0.6009	0.6404	0.6799	0.7194	0.7589
360	0.0291	0.0439	0.0698	0.1071	0.1629	0.2612	0.4267	0.4643	0.5057	0.5470	0.5884	0.6298	0.6711	0.7125	0.7539	0.7953
340	0.0305	0.0460	0.0730	0.1119	0.1703	0.2731	0.4462	0.4855	0.5288	0.5721	0.6153	0.6586	0.7019	0.7451	0.7884	0.8317
320	0.0318	0.0480	0.0762	0.1168	0.1778	0.2851	0.4657	0.5068	0.5520	0.5971	0.6423	0.6874	0.7326	0.7777	0.8229	0.8681
300	0.0331	0.0500	0.0794	0.1216	0.1852	0.2971	0.4853	0.5280	0.5751	0.6222	0.6692	0.7163	0.7633	0.8104	0.8574	0.9045
280	0.0357	0.0539	0.0856	0.1312	0.1997	0.3203	0.5233	0.5694	0.6202	0.6709	0.7216	0.7724	0.8321	0.8739	0.9246	0.9753
260	0.0400	0.0604	0.0959	0.1470	0.2238	0.3589	0.5863	0.6380	0.6948	0.7517	0.8085	0.8654	0.9222	0.9791	1.0359	1.0928

表 3 洪峰流量为百年一遇(1 356 m^3/s)时不同洪量共同作用下的洪水风险

频率与重现期	洪水总量/ $10^3 m^3$												
	14.0	12.0	10.75	10.0	8.0	6.0	4.2	4.0	3.8	3.6	3.4	3.2	3.0
$P(W)$/%	0.5114	0.8122	1.0000	1.2446	1.8925	3.0393	4.9650	5.4026	5.8840	6.3654	6.8468	7.3283	7.8097
$P(Q)\cdot P(W)$/%	0.0053	0.0085	0.0100	0.0130	0.0200	0.0319	0.0521	0.0566	0.0617	0.0667	0.718	0.0771	0.0819
$P(Q\cup W)$/%	1.3710	1.5891	1.7258	1.9028	2.3727	3.2047	4.6016	4.9191	5.2683	5.6275	5.9667	6.3158	6.6652
重现期/ a	72	63	58	53	42	31	22	20	19	18	17	16	15

由表 3 可以看出, 考虑洪峰、洪量共同作用时, 洪水的风险比单考虑洪峰流量时要大, 其风险的大小与所相应的洪水总量的大小有关。要求的洪水总量越大, 防洪标准越高, 发生超标洪水的风险越小; 相反, 要求的洪水总量越小, 防洪标准越低, 发生洪水超标洪水的风险越大。同样, 由式(8) 也会得到类似的结果。由此可见, 在防洪工程的风险分析中, 应同时洪峰与洪量的共同影响, 否则就会造成对洪水风险的估计不足。例如, 单独考虑洪峰或洪量的情况下, 百年一遇的设计洪水, 在考虑洪峰、洪量共同作用的情况下, 仅相当于 58 年一遇。由于在风险分析中同时考虑了洪峰和洪量两个因素, 因此在防洪水利计算也应同时考虑洪峰与洪量两个因素。

3 结 语

暴雨洪水由于其产汇流条件复杂多变使其成为一个相当复杂的过程。传统的单因素洪水风险分析方法, 是建立在洪水因素完全相关或同频率的基础上的, 这显然与实际情况不相符。以概率论的基本原理出发, 建立多参数的洪水风险分析模型, 将会使洪水风险的估计更符合实际, 使防洪工程的设计更安全。文中所给出的加权组合概率模型, 不仅考虑了洪水因素不同频率的情况, 而且避免了确定条件概率分布的繁琐计算问题(实际上由于资料所限, 即使确定了条件概率分布, 也都进行了正态化处理, 是近似的) , 从而简化了计算。由于风险分析中考虑了两个因素, 因此在水利计算方法中洪峰、洪量也应同时考虑洪峰、洪量的影响。文中所给出的模型仅考虑了洪峰流量和洪水总量两个参数, 但很容易推广到多参数的情况。

参考文献:

[1] Sackl B Bergmann H. A Bivariate Flood Model and Its Application[A]. In: Sing V P (ed). Hydrologic Frequency Modeling[C]. Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analyses, Baton Rouge USA. 1986. 571- 582.

[2] 冯平, 崔广涛, 胡明罡. 暴雨洪水共同作用下的多变量防洪计算问题[J]. 水利学报, 2000, (2): 49- 53.

[3] 中山大学数学力学系 概率论及数理统计》编写小组. 概率论及数理统计(上册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1980. 119- 125.