

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.003

区域洪涝灾害风险估算模型及其应用

赵 君¹,张晓民²,陈雅倩¹,李 静¹

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;2.中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司,北京 100120)

摘要:为了减轻洪涝灾害造成的损失,针对系统存在的风险指标,研制区域洪涝灾害风险估算模型.应用马尔科夫链进行某种趋势外推型的风险预测,并估算洪涝灾害无实测值的状态.采用贝叶斯统计理论和方法,通过先验分布结合样本信息来推求后验分布,以最大概率原则判别风险估算的趋势,按照估算结果及当地的实际情况,适度调整针对洪涝灾害的策略,尽可能控制并减轻其造成的影响.应用实例验证了该模型的可行性.

关键词:区域洪涝灾害;风险估算模型;马尔科夫链;贝叶斯统计

中图分类号: P333.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)01-0009-05

我国洪涝灾害发生比较频繁,大约占 2/3 的国土区域面临不同类型和不同危害程度洪涝灾害的威胁.从系统论的角度出发,估算区域洪涝灾害风险发生的概率和后果的严重程度,是建立适合我国国情的洪涝灾害风险评估体系与管理制度的重点.目前,区域洪涝灾害风险估算模型在国内外水文领域的学术界已成为研究热点且成果颇多^[1-4].但大部分研究较少考虑历史情况对现在以及未来趋势的影响,也没有把贝叶斯统计理念引入风险估算系统.

本文以长江流域为例,根据区域洪涝灾害系统的风险指标,将传统风险估算方法中的机制模型和统计模型相结合,通过马尔科夫链对洪涝灾害情况进行风险估算,利用贝叶斯统计原理修正估算结果,并综合分析洪涝灾害事件重现期,探讨整个流域洪涝灾害风险发展趋势.

1 区域洪涝灾害风险估算模型

区域洪涝灾害风险估算模型由预测及修正 2 个子模型构成.马尔科夫链模型是预测子模型,是风险估算模型的基础,主要用于指标值的估算.贝叶斯统计模型是修正子模型,是风险估算模型技术的改进部分,主要用于估算结果的修正^[5-6].

1.1 马尔科夫链模型

从时间序列的角度看,风险可以用一族随机变量来描述,其估算也可应用随机过程的理论进行分析.针对洪涝灾害系统往往无后效性的特点,选用马尔科夫链对区域洪涝灾害风险演变进行估算.设随机过程 $\{X_t, t \in T\}$,若对任意的整数 $n, t_k \in T, k = 1, 2, \dots, n$,且 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$,和任意的 n 个实数 $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, y$,条件概率满足式

$$P\{X_{t_n} = y | X_{t_{n-1}} = x_{n-1}, X_{t_{n-2}} = x_{n-2}, \dots, X_{t_1} = x_1\} = P\{X_{t_n} = y | X_{t_{n-1}} = x_{n-1}\} \quad (1)$$

则称 $\{X_t, t \in T\}$ 为马尔科夫链,并有状态转移概率 $P\{X_{t_{n+1}} = x_j | X_{t_n} = x_i\} = p_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$,表示在 t_n 时刻系统处于状态 x_i 的条件下,在 t_{n+1} 时刻系统转移到状态 x_j 的转移概率,当转移概率 p_{ij} 与起始时刻 t_n 无关时,称 $\{X_t, t \in T\}$ 为齐次马尔科夫链.其本质是一类用来描述已知现在、未来的概率分布与过去的状态无关的随机现象的重要随机过程,不仅可以指出洪涝灾害变化的宏观规律,同时还可以进一步作为阐明过程发展微观机制的基础^[7-9].其构建通常应用频率逼近法估计转移概率.将洪涝灾害损失指数的序列分成若干种状态,并记为 $i_1, i_2, \dots, i_n$,可能发生转移的时间记为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 的组合,则损失指数由状态 i 经过 m 步转移到状态 j 的 m 步转移概率为

$$P_{ij}^{(m)} = \frac{M_{ij}^{(m)}}{M_i} \tag{2}$$

式中： $M_{ij}^{(m)}$ ——状态 i 经过 m 步转移到 j 的次数； M_i ——状态 i 出现的次数。假设序列中最后一个状态是 k ，当 $m = 1$ 时，由于最后一个时刻的状态转向不确定，因此计算 M_k 时需要去掉最后一个数据，而 $m > 1$ 时，各 M_i 计算的原则依此类推。而转移概率矩阵是将马尔科夫链中的各步转移概率依次排序得到的矩阵，即

$$P^{(m)} = \begin{bmatrix} p_{11}^{(m)} & \cdots & p_{1n}^{(m)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}^{(m)} & \cdots & p_{nn}^{(m)} \end{bmatrix} \tag{3}$$

应用一步及多步转移概率矩阵，可以建立预测模型，由现在的某洪涝灾害损失指数状态预测未来的损失指数状态及其概率分布，公式为

$$A(n) = A(0)P^{(m)} \tag{4}$$

式中： $A(0)$ ——初始状态概率向量； $A(n)$ ——经 m 步转移后的状态概率向量； $P^{(m)}$ —— m 步转移概率矩阵。

1.2 贝叶斯统计模型

贝叶斯统计是在推断中使用先验分布的方法，它除了应用非贝叶斯统计推断时依据的模型和数据信息，还须应用总体分布未知参数的信息。由于这类信息在试验以前就有，故称其为先验信息^[10-11]。贝叶斯统计推断要求先验信息能以未知参数的概率分布表示，并综合考虑主客观信息，模式为：先验分布 + 样本信息 $\Rightarrow$ 后验分布。定义是：设随机试验 E 的样本空间为 Ω ， A 是 Ω 中的任一事件， $B_1, B_2, \cdots, B_s$ 是 Ω 中的一个完备群，则事件 A 能且只能与互不相容的 $B_1, B_2, \cdots, B_s$ 之一同时发生，若 $P(A) > 0, P(B_i) > 0 (i = 1, 2, \cdots, s)$ ，则有

$$P(B_i|A) = \frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{i=1}^s P(B_i)P(A|B_i)} \tag{5}$$

具体到区域洪涝灾害风险估算模型研究方面：先验概率 $P(B_i)$ 的推求，一般来说，在没有任何信息的条件下，可以认为出现某一级别洪涝灾害风险的可能性相等，但根据情况的不同，可以利用已经搜集到的资料和积累的经验确定 $P(B_i)$ 数值。样本信息是由马尔科夫链模型得出的状态概率向量；后验概率 $P(B_i|A)$ 则为二者乘积，以最大概率原则来判别区域洪涝灾害风险估算趋势。

1.3 估算结果分析

若洪涝灾害损失指标状态序列是齐次马尔科夫链 $\{x_i, i = 1, 2, \cdots, n\}$ ，对一切状态 x_i, x_j ，存在不依赖于 x_i 的常数，使得 $\lim_{m \rightarrow \infty} p_{ij}^{(m)} = \pi_j$ ，则称其具有遍历性， π_j 是稳定状态概率 ($j = 1, 2, \cdots, n$)， $(\pi_1, \pi_2, \cdots, \pi_n)$ 是平稳分布。遍历性具有十分重要的直观意义，即无论系统从哪一个状态出发，经过充分长时间 ($m \rightarrow \infty$) 的转移后，到达状态 j 的概率都近似于某个常数 π_j 。其判定依据是当转移概率阵 P 为正规概率阵时，必定存在唯一的平稳分布，即具有遍历性。因此，依照遍历性原理可以得出未来各个洪涝灾害损失指数状态出现频率的一个稳定值，其稳定状态概率由方程组

$$\begin{cases} \pi_j = \sum_{k=1}^n p_{kj} \cdot \pi_k & (j = 1, 2, \cdots, n) \\ \sum_{j=1}^n \pi_j = 1 \end{cases} \tag{6}$$

求出，再假设由状态 i 出发，最终进入状态 j 的概率

$$p_{ij} = \sum_{m=1}^{\infty} p_{ij}^{(m)} \tag{7}$$

如果 $p_{ii} = 1$ ，称状态 i 为常返态。若状态 i 是一个马尔科夫链的常返遍历状态，状态 i 就具有有限的平均返回时间 $u_{ii} = 1/\pi_i$ ，对于洪涝灾害风险来说，平均返回时间即某种程度的洪涝灾害事件的重现期。

2 应用实例

2.1 流域概况

长江是我国第一大河,全长 6 300 km,流域面积 180.35 万 km²,江河两岸人口稠密、耕地集中,为经济最发达的地区之一.大部分为亚热带季风气候,水量丰富,径流中雨水补给量占年径流量的 75%~80%,地下水占 20%~25%,还有少量冰雪融水.洪水一般由暴雨形成,汛期(4—10 月)降水量占全年的 80%左右,7 月和 8 月是长江干流的主汛期,汛期的出现时间随雨带由东南向西北推移^[12].从 1153 年以来,流域洪水不断,造成损失巨大.这些洪水一般分为全流域性洪水和区域性洪水,前者如 1931 年和 1954 年的洪水,后者一般由长江上中游连续而集中的特大暴雨形成,如 1935 年的洪水.

2.2 数据预处理

以长江流域历史洪涝灾害数据(1736—1908 年)作为风险估算的基础数据,在众多指标中,选用比较稳定、数据缺失少且能较客观反映受灾次数变化情况的受灾县·次指标,按照河流丰枯状态预测中所应用的分级标准(表 1),将各年受灾县·次指标的数值转换得到其对应的状态值.

表 1 受灾县·次指标状态转换标准

Table 1 State transfer standards for afflicted county·time index

状态值	分级标准	数值区间(受灾县·次)
1	$x < \bar{x} - 1.0s$	$x < 10.8$
2	$\bar{x} - 1.0s \leq x < \bar{x} - 0.5s$	$10.8 \leq x < 32.65$
3	$\bar{x} - 0.5s \leq x < \bar{x} + 0.5s$	$32.65 \leq x < 76.35$
4	$\bar{x} + 0.5s \leq x < \bar{x} + 1.0s$	$76.35 \leq x < 98.2$
5	$x \geq \bar{x} + 1.0s$	$x \geq 98.2$

2.3 区域洪涝灾害风险估算模型

a. 马尔科夫链模型.先假设数据截至 1903 年,应用马尔科夫链模型预测后 5 个年份各年的状态值,再与实际状态值比较

以验证模型可信度.应用 1903 年以前的 168 个数据及式(2),(3)计算出 1~5 步转移概率矩阵 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ,其中行号代表起始状态,列号代表终止状态.如 x_1 中第 1 列第 1 行的 0.275 9 即为未来一年中,由状态 1 转移到状态 1 的概率.由 x_1 可知 1903 年的状态向量是 $A(0) = (0,0,0,0,1)$,根据式(4)及各步转移概率矩阵,可得未来 5 年各年的状态概率向量 $A_1, \cdots, A_5$:

$$x_1 = \begin{bmatrix} 0.275\,9 & 0.413\,8 & 0.172\,4 & 0.034\,5 & 0.103\,4 \\ 0.275\,0 & 0.375\,0 & 0.225\,0 & 0.025\,0 & 0.100\,0 \\ 0.080\,0 & 0.160\,0 & 0.380\,0 & 0.180\,0 & 0.200\,0 \\ 0.166\,7 & 0.111\,1 & 0.333\,3 & 0.166\,7 & 0.222\,2 \\ 0.096\,8 & 0.096\,8 & 0.354\,8 & 0.096\,8 & 0.322\,6 \end{bmatrix}$$

$$x_2 = \begin{bmatrix} 0.275\,9 & 0.379\,3 & 0.275\,9 & 0.000\,0 & 0.069\,0 \\ 0.225\,0 & 0.350\,0 & 0.225\,0 & 0.000\,0 & 0.175\,0 \\ 0.140\,0 & 0.180\,0 & 0.300\,0 & 0.140\,0 & 0.240\,0 \\ 0.111\,1 & 0.166\,7 & 0.222\,2 & 0.222\,2 & 0.277\,8 \\ 0.096\,8 & 0.096\,8 & 0.419\,4 & 0.193\,5 & 0.161\,3 \end{bmatrix}$$

$$x_3 = \begin{bmatrix} 0.206\,9 & 0.310\,3 & 0.275\,9 & 0.103\,4 & 0.103\,4 \\ 0.200\,0 & 0.425\,0 & 0.275\,0 & 0.000\,0 & 0.075\,0 \\ 0.160\,0 & 0.180\,0 & 0.320\,0 & 0.080\,0 & 0.260\,0 \\ 0.166\,7 & 0.055\,6 & 0.500\,0 & 0.111\,1 & 0.111\,1 \\ 0.129\,0 & 0.129\,0 & 0.129\,0 & 0.258\,1 & 0.322\,6 \end{bmatrix}$$

$$x_4 = \begin{bmatrix} 0.310\,3 & 0.379\,3 & 0.172\,4 & 0.069\,0 & 0.069\,0 \\ 0.225\,0 & 0.275\,0 & 0.300\,0 & 0.050\,0 & 0.125\,0 \\ 0.140\,0 & 0.220\,0 & 0.340\,0 & 0.060\,0 & 0.220\,0 \\ 0.111\,1 & 0.055\,6 & 0.444\,4 & 0.166\,7 & 0.166\,7 \\ 0.064\,5 & 0.161\,3 & 0.193\,5 & 0.225\,8 & 0.322\,6 \end{bmatrix}$$

$$x_5 = \begin{bmatrix} 0.2759 & 0.4138 & 0.1379 & 0.1034 & 0.0690 \\ 0.2250 & 0.3500 & 0.2000 & 0.0500 & 0.1500 \\ 0.1000 & 0.2000 & 0.4200 & 0.0400 & 0.2200 \\ 0.1111 & 0.1111 & 0.2778 & 0.2222 & 0.2222 \\ 0.1613 & 0.0323 & 0.2903 & 0.1935 & 0.2581 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= (0.1000, 0.1000, 0.3667, 0.1000, 0.3333) \\ A_2 &= (0.1000, 0.1000, 0.4333, 0.2000, 0.1667) \\ A_3 &= (0.0667, 0.1667, 0.2000, 0.2333, 0.3333) \\ A_4 &= (0.0667, 0.1667, 0.2000, 0.2333, 0.3333) \\ A_5 &= (0.1724, 0.0345, 0.3103, 0.2069, 0.2759) \end{aligned}$$

b. 贝叶斯统计模型. 从 1904—1908 年的状态概率可知, 由于未考虑已发生的情况, 在 1904 年和 1905 年先后出现了状态概率相等的不合理事件, 于是根据 1736—1903 年的历史资料推求先验概率, 168a 出现状态 1 的有 29 次、状态 2 的有 40 次、状态 3 的有 50 次、状态 4 的有 18 次、状态 5 的有 31 次, 那么

$$P(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5) = (0.1726, 0.2381, 0.2976, 0.1072, 0.1845)$$

利用上式修正状态概率向量, 即

$$\begin{aligned} A'_1 &= (0.0776, 0.1071, 0.4906, 0.0482, 0.2765) \\ A'_2 &= (0.0777, 0.1071, 0.5804, 0.0964, 0.1384) \\ A'_3 &= (0.1247, 0.1721, 0.2151, 0.1548, 0.3333) \\ A'_4 &= (0.0583, 0.2012, 0.3018, 0.1268, 0.3119) \\ A'_5 &= (0.1463, 0.0404, 0.4541, 0.1090, 0.2503) \end{aligned}$$

c. 模型验证. 从 1904 到 1908 年, 如果延续现有的趋势不变, 最有可能出现的状态依次是 3, 3, 5, 5, 3, 而实际值是 3, 4, 4, 5, 3, 其中 1904 年、1907 年和 1908 年的预测值与实际值完全相符, 1905 年和 1906 年有点偏差, 由其状态概率可知, 这 2 个年份预测值的隶属度按照大小排序依次是 3, 5, 2, 4, 1 和 5, 3, 2, 4, 1, 都存在趋近于 4 的趋势, 可以认为结果具有一定的可信度. 于是根据式(5)求出 5 个状态的平稳分布, 即

$$(0.1646, 0.2393, 0.2952, 0.1193, 0.1816)$$

由此可知, 如果现有趋势不变, 长江流域受灾县·次将会趋于一个稳定值, 其 5 个状态的概率分别是 0.1646, 0.2393, 0.2952, 0.1193, 0.1816. 于是计算每个状态的平均返回时间, 即重现期:

$$\begin{aligned} U_1 &= 1/0.1646 = 6.0744 \approx 6.07(a) \\ U_2 &= 1/0.2393 = 4.1791 \approx 4.18(a) \\ U_3 &= 1/0.2952 = 3.3878 \approx 3.39(a) \\ U_4 &= 1/0.1193 = 8.3825 \approx 8.38(a) \\ U_5 &= 1/0.1816 = 5.5063 \approx 5.51(a) \end{aligned}$$

即状态 1, 2, 3, 4, 5 分别平均每 6.07, 4.18, 3.39, 8.38, 5.51 a 出现 1 次.

2.4 调控对策

1904—1908 年的风险估算结果表明, 长江流域的洪涝灾害状况一直是向高风险趋势发展, 如果不进行调控, 可能对 1908 年以后人民群众的生产生活和经济社会的可持续发展造成极大破坏, 这在历史进程中也得到了验证. 而扭转洪涝灾害加剧态势, 可采取工程与非工程措施: 建设流域骨干工程; 对低洼地进行治理; 对行洪区进行调整改造; 建设安全工程; 对小水库进行除险加固. 健全防汛指挥调度组织系统, 树立正确的防洪思想; 加强水文测报和洪水预报; 科学制定各类防洪调度预案; 进行防汛信息化建设, 并根据洪涝灾害的级别启动分级响应程序, 更好地为防汛工作服务.

3 结 论

基于马尔科夫链及贝叶斯统计的区域洪涝灾害风险估算模型是一个结构合理, 以物理概念为依据的风

险估算模型,它可结合地区的实际情况选择不同的风险指标,利用马尔科夫链模型估算洪涝灾害风险,并采用贝叶斯理论修正区域洪涝灾害风险估算模型,根据齐次马尔科夫链的遍历性计算洪涝灾害的重现期.应用结果表明,区域洪涝灾害风险估算模型计算过程简单且结果接近实际.

参考文献:

- [1] 胡政,孙昭民.灾害风险评估与保险[M].北京:地震出版社,1999.
- [2] 姜树海,范子武,吴时强.洪灾风险评估和防洪安全决策[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [3] 刘新立.区域水灾风险评估的理论与实践[M].北京:北京大学出版社,2005.
- [4] 王仲珏,冯平.基于时变可靠度的水工建筑物防洪风险估算[J].天津大学学报,2008,41(11):1333-1336. (WANG Zhong-jue, FENG Ping. Flood risk assessment of water construction based on time-dependent reliability theory [J]. Journal of Tianjin University, 2008,41(11):1333-1336. (in Chinese))
- [5] 赵永军,冯平,曲兴辉.河道防洪堤坝水流风险的估算[J].河海大学学报,1998,26(3):71-75. (ZHAO Yong-jun, FENG Ping. Investigation on hydraulic risk of flood control dams [J]. Journal of Hohai University, 1998,26(3):71-75. (in Chinese))
- [6] 冯平,王仲珏,刘增明.长距离输水工程综合水毁风险的估算方法及其应用[J].水利学报,2007,38(11):1388-1392. (FENG Ping, WANG Zhong-jue, LIU Zeng-ming. Method for assessing integrated failure risk due to flood in long distance water transfer project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(11):1388-1392. (in Chinese))
- [7] 张宸,林启太.模糊马尔科夫链状预测模型及其工程应用[J].武汉理工大学学报,2004,26(11):63-66. (ZHANG Chen, LIN Qitai. Forecast computational model of fuzzy Markov chain and engineering practical method [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004,26(11):63-66. (in Chinese))
- [8] 刘海波,陈孝思,秦玉才,等.随机过程在灾变预报中的应用[J].系统工程理论与实践,1996(9):20-24. (LIU Hai-bo, CHEN Xiao-si, QIN Yu-cai, et al. Application of stochastic process in disastrous forecasting [J]. Systems Engineering-theory & Practice, 1996(9):20-24. (in Chinese))
- [9] 郑小华,屈振江,栗珂.基于随机过程理论的长江巨洪发生概率预测模式与应用[J].暴雨灾害,2009,28(3):266-270. (ZHENG Xiao-hua, QU Zhen-jiang, LI Ke. Yangtze large flood probability random process model prediction research based on the theory for stationary random processes [J]. Torrential Rain and Disasters, 2009,28(3):266-270. (in Chinese))
- [10] 张铭,李承军,张勇传.贝叶斯概率水文预报系统在中长期径流预报中的应用[J].水科学进展,2009,20(1):40-44. (ZHANG Ming, LI Cheng-jun, ZHANG Yong-chuan. Application of the Bayesian statistic hydrological forecast system to middle-and long-term runoff forecast [J]. Advance in Water Science, 2009,20(1):40-44. (in Chinese))
- [11] 胡春玲,胡学钢.一种基于随机抽样的贝叶斯网络结构学习算法[J].计算机科学,2009,36(2):199-202. (HU Chun-ling, HU Xue-gang. Stochastic sample based algorithm for learning Bayesian networks [J]. Computer Science, 2009,36(2):199-202. (in Chinese))
- [12] 王雪臣.中国极端气候事件的风险分析及保险适应机制研究:以长江中游洪涝灾害为例[M].北京:气象出版社,2008.

Risk estimation model for regional flood disasters and its application

ZHAO Jun¹, ZHANG Xiao-min², CHEN Ya-qian¹, LI Jing¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: In order to reduce flood disaster loss, a risk estimation model for regional flood disasters was established according to the risk indexes in system. The Markov chain was employed to extrapolate some trend of risk prediction and to estimate the non-measured value state of flood disasters. The Bayes statistical theory and method was adopted to inquire the posterior distribution through the prior distribution and sample information and to distinguish the trend of risk estimation based on the maximum probability principle. The strategies for flood disasters were appropriately adjusted according to the estimated results and the local actual situations so as to control and reduce the caused impact as much as possible. The feasibility of the proposed model was validated by case study.

Key words: regional flood disaster ; risk estimation model ; Markov chain ; Bayes statistics