

Multi-Objective Risk Decision Model of Flood Resources Utilization

Xianfeng Huang¹, Yingqin Chen², Guohua Fang¹, Lixiang Zhu³

¹College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing

²Department of Civil Engineering, Hohai University Wentian College, Ma'anshan

³Lianyungang Bureau Water Conservancy, Lianyungang

Email: hxfhuang2005@163.com

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Copyright © 2014 Xianfeng Huang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Xianfeng Huang et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: The region of river downstream is the famous flood passage. Flood resources utilization is the strategic initiatives of alleviating water shortages and flood contradictory in the region. How to safely and rationally use flood is the key point to research the flood resources utilization. In the paper, the risk factors of flood resources utilization are identified in the downstream of Yishusi Basin. The risks of dam safety and discharged flow exceeding the safety discharge are evaluated. On the basis, the risk decision model is established, which aims at the maximizing comprehensive benefits of flood resources utilization, considering the economic benefits and risks loss of flood resource utilization. The calculation results of the model are taken as the basis for reservoir flood level adjustment. Finally, taking Shilianghe reservoir in Jiangsu Province as a case study, the research provides a reference for flood resources utilization in the coastal plain area.

Keywords: Flood; Risk Estimates; Risk Decision Model; Multi-Objective

洪水资源利用多目标风险决策模型研究

黄显峰¹, 陈颖钦², 方国华¹, 朱丽向³

¹河海大学水利水电学院, 南京

²河海大学文天学院土木工程系, 马鞍山

³连云港市水利局, 连云港

Email: hxfhuang2005@163.com

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

摘要: 流域下游地区是著名的洪水走廊, 过境洪水资源利用是该地区缓解水资源短缺和洪涝多发矛盾的战略举措。如何安全合理的利用过境洪水, 既不增加防洪压力又能适量利用, 是研究洪水资源利用必须解决的关键问题。本文对沂沭泗流域下游地区过境洪水资源利用风险因素进行识别, 针对水库大坝安全风险和下泄流量超过安全泄量风险进行了风险估计, 在此基础上, 以过境洪水资源利用综合效益值最大化为目标, 综合考虑洪水资源利用经济效益和风险损失, 构建过境洪水资源利用风险决策模型, 将风险决策模型计算得到的洪水资源利用综合效益值作为水库汛限水位调整的依据, 最后以连云港市石梁河水库为例进行研究, 为我国沿海平原地区过境洪水资源利用风险管理决策提供了借鉴。

作者简介: 黄显峰(1980-), 男, 湖北, 河海大学水利水电学院, 副教授, 博士, 主要从事水资源系统分析研究。

关键词: 洪水; 风险估计; 风险决策模型; 多目标

1. 引言

流域下游地区过境洪水大多从流域内的骨干行洪河道排入大海, 没有得到利用。研究过境洪水资源利用及风险决策是研究洪水资源利用必须解决的问题。国外对洪水资源利用风险的研究起于 20 世纪 80 年代。Loucks 等通过分析洪量与防洪库容之间的关系, 得出了一定防洪库容情况下不同量级洪水与其造成损失间的关系^[1]。Anselmo 等详细介绍了采用水文水力耦合模型对意大利某洪水易发区进行洪水风险评估的过程。国内在水库汛限水位动态控制风险研究领域的成果较多^[2]。黄强等认为水库调度风险是一种自然的、微观的和可测度的风险, 并建议用定性定量相结合的风险分析方法来解决水库调度风险问题^[3]。王本德等在论述水库预蓄效益与风险分析必要性的基础上, 提出了一种风险率计算方法和一种以经济效益与风险率为目标的水库预蓄水位模糊优化控制模型, 可供汛期分期抬高汛限水位或实时决策控制预蓄水位时使用^[4]。

目前洪水资源利用风险研究主要集中在洪水保险、洪泛区管理、水库汛限水位动态控制及风险决策等方面^[5-8], 对于如何将时间和空间耦合进行风险评估和决策, 确定最佳蓄水位的研究尚不多见。本文针对以上问题, 以沂沭泗流域下游连云港市为背景, 构建过境洪水资源利用风险决策模型, 将风险决策模型计算得到的洪水资源利用综合效益值作为水库汛限水位调整的依据。

2. 洪水资源利用风险因素识别

风险识别是风险分析的基础环节。能否正确识别风险因素对风险管理能否取得好的效果有重要影响。利用层次分析法确定洪水利用主要风险因子。通过建立洪水资源利用风险因素指标体系, 最终确定影响洪水资源利用的关键风险因子。结合流域下游地区的水文地质、工程环境和社会环境的实际, 建立符合该区域特点的洪水资源利用风险因素识别体系。经过理论分析和专家咨询, 利用层次分析法将风险因素识别体系分为 3 个层次, 目标层、准则层和指标层。该评价体系包括 6 大方面: 抬高水库汛限水位的风险、水

库上游来水不确定性风险、不利生态环境影响风险、水质不确定性风险、洪水调度管理风险、本地洪水不确定性风险。采用层次分析法对上述风险因素进行识别, 确定主要风险因素。通过分析, 确定流域下游地区影响洪水资源利用的主要风险因子有调度过程中水库水位超校核水位的风险和水库下泄流量超下游河道安全泄量风险等。

3. 洪水资源利用风险估计

应用已有洪水资料对不同水库汛限水位调洪演算计算风险率, 统计出该汛限水位下最高库水位超过设计标准的风险率。基于以上思想对水库汛限水位调整后大坝安全风险率和下泄流量超下游河道安全泄量风险率进行计算^[9]。

3.1. 大坝安全风险率

大坝安全风险率指在水库现有泄流设施条件下, 调整水库汛限水位, 水库调蓄洪水后库水位超过设计标准水位的概率, 计算公式如下:

$$f_1(H_i) = \frac{n}{N+1} \quad (1)$$

式中, $f_1(H_i)$ 为汛限水位为 H_i 出现超设计标准水位的风险率; N 为资料系列中历次洪水的总数; n 为对给定的汛限水位 H_i , 调洪演算发生库水位超设计标准水位 Z_d 的洪水次数。

3.2. 下泄流量超过安全泄量风险率

下游安全泄量是一个具体数值, 当下泄流量大于它时就会给沿岸构成危险, 流量越大损失越大。在计算下泄水量危害性风险率时用模糊数学的方法, 计算公式如下:

$$f_2(H_i) = \sum_{V_i \in A} \mu_A(V_i) \times p(V_i) \quad (2)$$

式中, $f_2(H_i)$ 为汛限水位 H_i 时下泄流量超下游河道安全泄量风险率; $p(V_i)$ 为汛限水位 H_i 时下泄流量隶属于区间 V_i 的概率; $\mu_A(V_i)$ 为不同区间 V_i 的隶属度。区间隶属度函数表达式为:

$$A = 0/v_1 + 0.05/v_2 + 0.2/v_3 + 0.8/v_4 + 0.95/v_5 + 1/v_6 \quad (3)$$

4. 洪水资源利用多目标风险决策模型

4.1. 模型构建思路

决策模型的建立以流域下游地区大型水库汛限水位调整利用过境洪水资源为背景, 寻找并确定最佳汛限水位调整方案。风险决策模型的建立以效益值最大化为目标, 综合考虑洪水资源利用效益和风险损失, 以两者的线性组合值作为评价某一汛限水位合理性的指标。水库汛限水位调整是指通过论证将水库汛限水位抬高, 减少汛期弃水增蓄洪水资源。计算增蓄水量的经济效益和汛限水位抬高可能带来的风险损失。洪水资源利用效益计算包括农业、工业、第三产业和城镇生活供水效益。风险损失包括大坝安全风险和下泄流量超下游河道安全泄量风险。

决策模型的建立应该能够在经济效益与风险损失的动态变化中计算洪水利用的综合效益, 寻找综合效益最大值, 确定水库汛限水位调整的最佳值。

4.2. 模型目标函数

水库汛限水位风险决策函数包括: 兴利风险效益目标、防洪风险效益目标。风险损失与风险效益是矛盾关系, 采用风险决策模型综合求解, 模型中将风险损失以经济损失计算, 以总风险效益最大为目标, 模型目标函数如下:

$$F(H_i) = \sum_{j=1}^n B_j(H_i) - \sum_{j=1}^m L_j(H_i) \quad (4)$$

式中, $B_j(H_i)$ 为汛限水位为 H_i 时的洪水资源化利用风险效益值; $L_j(H_i)$ 为汛限水位为 H_i 时的风险损失值; n 、 m 分别为风险效益和风险损失的项数。

汛限水位 H_i 时风险效益计算公式如下:

$$B_j(H_i) = \sum_{j=1}^4 B_j(H_i) \quad (5)$$

式中, $B_j(H_i)$ 为水库洪水资源利用经济效益, 主要包括农业、工业、第三产业和城镇生活用水四方面效益。

汛限水位 H_i 时风险损失计算公式如下:

$$L_j(H_i) = \sum_{j=1}^2 L_j(H_i) \quad (6)$$

式中, $L_j(H_i)$ 为大坝安全风险损失和下游堤防安全风

险损失。

5. 实例研究

连云港市位于江苏省东北部, 东临黄海, 属于淮河流域沂沭泗水系下游地区, 辖区分属沂河水系、沭河水系和滨海诸小河水系, 承担上游近 8 万 km^2 流域面积的泄洪任务, 是著名的“洪水走廊”。流域内主要洪水入海通道新沂河、新沭河经本市入海, 除此之外, 还有灌河、蔷薇河、盐河、善后河、青口河和龙王河等区域性河流, 以及 50 余条地方骨干河道, 河网发达。以连云港市石梁河水库汛限水位调整为例, 进行洪水资源利用风险决策研究。石梁河水库校核洪水位为 27.95 m, 对应洪峰流量为 9640 m^3/s , 设计洪水位为 26.81 m, 对应洪峰流量为 7367 m^3/s 。

在大坝安全风险率计算中取石梁河水库设计洪水位 26.81 m 为设计标准水位, 对不同频率洪水调洪演算以接近或超过该水位为准, 将该洪水频率作为汛限水位下大坝安全风险率。在计算下泄流量超过下游河道安全泄量的风险时, 以石梁河水库下泄流量不超过新沭河安全泄量为准, 考虑淤积对下游新沭河实际泄水的影响, 河道安全泄流量取 2000 m^3/s 。

洪水资源利用经济效益包括农业、工业、第三产业、城镇生活四个方面, 比例分别为 64%、19%、13%、4%; 根据国内相关研究资料^[10], 用水效益的分摊系数分别取值 0.45、0.1、0.3 和 0.3; 根据连云港市统计年鉴居民年可支配收入 $r = 12,000$ 元; 恩格尔系数 $e = 0.4$; 人均年用水量 $p = 588 \text{ m}^3$ 。

根据以上确定的效益计算模型参数对连云港市洪水资源利用效益进行计算, 计算成果见表 1。

在大坝安全风险损失计算中, 洪水灾害间接损失系数 $k = 25\%$, 单位面积直接损失 $\beta = 72 \text{ 万}/\text{km}^2$, 淹没面积取 $A = 200 \text{ km}^2$ 。在下泄流量超下游河道安全泄量风险损失计算中, 洪水灾害间接损失系数 $k = 0.25$, 单位面积直接损失值 $\beta = 20 \text{ 万}/\text{km}^2$, 淹没面积取新沭河左岸石梁河水库下游至入海口沿河地区 $A = 55 \text{ km}^2$ 。抗洪抢险救灾间接费用 C_p 取直接经济损失值的 15%。

在洪水利用损失计算中, 大坝安全风险损失占总风险损失的比例最大达到 80%~90%, 对总效益的影响较大。从大坝安全风险率随汛限水位变化关系分析, 汛限水位在 23.5 m 到 24.7 m 之间时变化时, 大坝安全风险率增加较小从 1.53% 到 5.32%, 汛限水位超过

Table 1. Benefit calculation of flood resources
表 1. 洪水资源利用效益计算表

汛限水位(m)	增蓄水量 (万 m ³)	农业		工业		第三产业		城镇生活		总效益值 (万元)
		水量 (万 m ³)	效益值 (万元)	水量 (万 m ³)	效益值 (万元)	水量 (万 m ³)	效益值 (万元)	水量 (万 m ³)	效益值 (万元)	
23.50	0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
23.60	543	347.5	15.31	103.2	32.08	70.6	123.9	21.7	44.87	216.2
23.70	1093	699.6	30.83	207.7	64.59	142.1	249.5	43.7	90.33	435.3
23.80	1650	1056.1	46.54	313.5	97.51	214.5	376.7	66.0	136.37	657.1
23.90	2214	1417.1	62.45	420.7	130.83	287.8	505.4	88.6	182.98	881.7
24.00	2785	1782.4	78.55	529.2	164.57	362.1	635.8	111.4	230.15	1109.0

24.7 m 以后风险率增长迅速, 从 24.7 m 到 25.3 m, 大坝安全风险率从 5.32% 增加至 14.0%。汛限水位 24.9 m 时洪水利用总效益达到最大, 该水位是汛限水位调整的上限值。

结合洪水资源利用各项效益和各风险损失计算结果, 可得到洪水资源利用总效益值与汛限水位抬高的关系曲线, 见图 1。

综合考虑风险损失与效益, 可拟定 3 种不同洪水资源利用方案。

方案 1: 风险率较小、效益一般的洪水利用方案 (汛限水位 $H_i = 24.5$ m)

方案 2: 风险率适中、效益较高的洪水利用方案 (汛限水位 $H_i = 24.9$ m)

方案 3: 风险率很高、效益一般的洪水利用方案 (汛限水位 $H_i = 25.3$ m)

三种方案的风险率、效益状况、风险损失情况见表 2。

从表中可以看出, 在方案 1 中, 石梁河水库汛限水位为 24.5 m 时, 增加蓄水量 5743 万 m³, 总效益为 1207.9 万元, 大坝安全风险率为 4.22%。在方案 2 中, 石梁河水库汛限水位为 24.6~25.1 m, 增加蓄水量 6974~9519 万 m³。当汛限水位取 24.9 m 时, 对应增蓄水量 8233 万 m³, 总效益达到汛限水位调整的最大值 1679 万元, 风险率为 6.41%。方案 3 中, 汛限水位 25.3 m 对应增蓄水量为 1.08 亿 m³, 总效益值为 1021 万元,

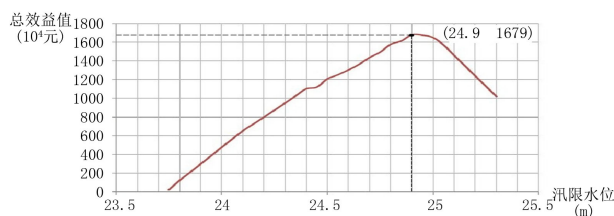


Figure 1. Curve with the limited water level of flood resources utilization benefit

图 1. 洪水资源利用总效益随汛限水位变化曲线

总效益小于方案 1 和方案 3, 且大坝安全风险率 14.0% 远大于方案 1 和方案 2。通过比较可知方案 2 的综合风险率适中且综合效益最大, 是水库汛限水位调整利用洪水资源较为理想的选择方案。

6. 结论

本文通过对风险因素识别和估计建立了洪水资源利用多目标风险决策模型。在风险因素识别中通过对风险因子权重的划分, 确定洪水资源利用的主要风险因素。风险估计计算了大坝安全风险率和下泄流量超下游河道安全泄量风险率。从农业、工业、第三产业和城镇生活供水四个方面计算了洪水资源利用效益; 计算了大坝安全风险和下泄流量超河道安全泄量风险损失。综合风险效益与风险损失, 得到水库汛限水位调整的不同方案, 通过比较找到了较合理的洪水利用方案。本文研究成果对提高洪水资源利用效益, 解决水资源供需矛盾具有一定的指导作用, 同时也为

Table 2. Efficiency and loss calculation of different flood limit water level
表 2. 不同汛限水位洪水利用效益损失表

方案	汛限水位 (m)	风险效益		风险损失			总效益 (万元)	
		增蓄水量(万 m ³)	经济效益(万元)	大坝安全风险率与风险损失		其他风险损失 (万元)		
				风险率	风险损失(万元)			总风险损失 (万元)
方案 1	24.5	5743	2287	4.22%	874	206	1080	1208
方案 2	24.9	8233	3278	6.41%	1326	272	1599	1679
方案 3	25.3	10,800	4314	14.01%	2900	393	3293	1021

我国平原地区雨洪资源利用风险管理体系构建提供了借鉴。

致谢

感谢江苏省连云港市水利局在本文数据收集过程中提供的帮助, 感谢江苏省自然科学基金、水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金和水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放基金的支持, 感谢第十一届中国水论坛推荐!

基金项目

江苏省自然科学基金(项目号: BK20130849); 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金(2010B068); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放基金资助(201204)。

参考文献 (References)

- [1] LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R. and HAITH, D. A. Water resources systems planning and analysis. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1981.
- [2] ANSELMO, V., GALEATI, G., PALMIREI, S., et al. Flood risk assessment using an integrated hydrological and hydraulic modeling approach: A case study. *Journal of Hydrology*, 1996, 175 (1-4): 533-554.
- [3] 黄强, 苗隆德, 王增发. 水库调度中的风险分析及决策方法[J]. *西安理工大学学报*, 1999, 15(4): 6-10.
HUANG Qiang, MIAO Longde and WANG Zengfa. Analysis and decision methods for the risk in reservoir operation. *Journal of XI'an University of Technology*, 1999, 15(4): 6-10. (in Chinese)
- [4] 王本德, 周惠成, 程春田等. 水库预蓄效益与风险控制模型

- [J]. *水文*, 2000, 20(1): 14-18.
WANG Bende, ZHOU Huicheng, CHENG Chuntian, et al. A study on river sediment tour gauging and testing suited to reform of China's hydrological system. *Hydrology*, 2000, 20(1): 14-18. (in Chinese)
- [5] 万俊, 高革命, 潘甘, 陈惠源. 考虑预报预泄时白盆珠水库汛期蓄水运用方式研究[J]. *武汉水利电力大学学报*, 2000, 33(1): 10-13.
WAN Jun, GAO Gemin, PAN Gan and CHEN Huiyuan. Operation manner researches of water storage of Baibengzhu Reservoir during flood season concerned flood forecast and flood pre-discharge. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 2000, 33(1): 10-13. (in Chinese)
- [6] 王本德, 郑德凤, 周惠成等. 汛限水位动态控制方案优选方法及指标体系研究[J]. *大连理工大学学报*, 2007, 47(1): 113-118.
WANG Bende, ZHENG Defeng, ZHOU Huicheng, et al. Study of index system and fuzzy optimum model on schemes of dynamic flood control limited water level of a reservoir. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47(1): 115-118. (in Chinese)
- [7] 傅湘, 王丽萍, 纪昌明. 极值统计学在洪灾风险评价中的应用[J]. *水利学报*, 2001, 7: 8-12.
FU Xiang, WANG Liping and JI Changming. Application of statistics of extremes of flood hazard risk evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 7: 8-12. (in Chinese)
- [8] 刘艳丽. 径流预报模型不确定性研究及水库防洪风险分析[D]. 大连理工大学, 2008.
LIU Yanli. Uncertainty analysis of rainfall-runoff models and risk assessment of reservoir flood control. *Dalian University of Technology*, 2008. (in Chinese)
- [9] 王本德, 周惠成. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 中国水利水电出版社, 北京, 2006.
WANG Bende, ZHOU Huicheng. Theory, method and application on dynamic control of reservoir limit water level. *China Water Power Press*, Beijing, 2006. (in Chinese)
- [10] 吴浩云, 刁训娣, 曾赛星. 引江济太调水经济效益分析——以潮州市为例[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 888-892.
WU Haoyun, DIAO Xundi and ZENG Saixing. Analysis of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake: Case study in Huzhou City. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 888-892. (in Chinese)