

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.03.004

溃坝生命损失评估模型研究

王志军^{1,2}, 宋文婷³

(1. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室教育基地(河南理工大学), 河南 焦作 454003;
2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 3. 河南理工大学物理化学学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 鉴于溃坝生命损失评估的复杂性, 借鉴国内外生命损失评估的相关研究成果, 研究溃坝时警报与撤离过程, 建立了评估暴露人口数量的警报与撤离模型以及死亡率评估模型; 基于我国历史溃坝调查资料, 提出以溃坝洪水特征为依据的淹没范围分区思想, 建立了淹没区划标准及相应死亡率函数, 提出适用于我国的溃坝生命损失评估方法及估算公式。实例应用表明, 该方法及估算公式能比较客观地评估我国的溃坝生命损失情况。

关键词: 溃坝; 洪水; 生命损失评估; 风险人口撤离; 溃坝死亡率; 刘家台水库

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)03-0205-06

Study of estimation model of loss of life caused by dam break

WANG Zhijun^{1,2}, SONG Wenting³

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
3. School of Physics and Chemistry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Research achievements on the estimation of loss of life caused by dam breaks are summarized in this paper, with consideration of the complexity of such estimation. Warning and evacuation processes were studied. Warning and evacuation models as well as a mortality estimation model were established to estimate the number of exposed people. The idea of dividing the hazard zones based on flood characteristics is proposed on the basis of historical data on dam breaks in China. Criteria for dividing the hazard zones and mortality functions were established, as were a method and estimation formulas for estimating the loss of life caused by dam breaks in China. An application shows that the proposed method and estimation formulas can objectively evaluate the loss of lives caused by dam breaks in China.

Key words: dam break; flood; estimation loss of life; evacuation of risk population; mortality of dam break; Liujiatai Reservoir

溃坝一般会造成严重后果, 最严重的是生命损失, 另外还会造成幸存者心理恐慌、社会不安定等社会问题, 其影响难以用经济指标来度量。1975 年我国的板桥、石漫滩水库大坝溃决造成 22 564 人死亡, 损失惨重。国外在溃坝生命损失方面研究取得的成果较多, 主要有美国垦务局(USBR)的 Brown & Graham 法、DeKay & McClelland 法、Graham 法^[1], 芬兰的 RESCDAM 法^[2], 加拿大的 Assaf 法, 美国犹他州州立大学的 McClelland & Bowles 法^[3]。而我国在溃坝生命损失评价方面的研究尚处于起步阶段, 还没有系统的成果^[4]。文献[5]结合我国已溃决的 8 座大坝调查资料, 用国外常用方法进行了验证。结果表明, 国外常用方法评估

收稿日期: 2013-04-12

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划(142300410146); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放基金(WS2013B02); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A440322, 13A610314)

作者简介: 王志军(1979—), 男, 山东梁山人, 博士, 讲师, 主要从事风险分析及安全工程研究。E-mail: wzj0537@163.com

结果与实际情况相差较大,说明国外常用方法不能直接用于我国。这是因为这些方法大多基于溃坝历史数据进行经验统计与回归分析得出,存在以下缺陷:(a)影响人和交通工具及建筑物损害的洪水演进时间、水深、流速的取值为较大范围内的平均值,误差较大;(b)警报时间虽然作为一个单独因素考虑,但没有考虑警报发布前发生的过程事件,没有考虑警报传播比例、警报效率以及撤离人口的比例;(c)没有将人员撤离作为一个单独的过程来考虑,无法预知撤离人口能否成功撤离。

笔者在前人研究成果的基础上,结合我国国情,以概率分析为基础,将可靠度概念引入溃坝生命损失评估,重点研究了警报、撤离及暴露人口死亡率等关键问题,通过建立警报与撤离模型以及死亡率评估模型,提出适用于我国的溃坝生命损失评估模型。

1 溃坝生命损失评估方法的框架结构

溃坝导致人员伤亡的主要因素包括洪水严重性、警报情况、撤离情况、自救能力、避难场所、救援以及其他环境不确定性因素,如水温、漂浮物、残疾、疲劳、能见度、风力等。如果针对某个人进行死亡评估,由于不确定性因素太多,很难找到一定的规律。为消除不确定性因素的影响,以一定数量人口组成的群体为研究对象,根据洪水与人口的关系,定义3种主要人口群体:风险人口、暴露人口、死亡人口。风险人口是指溃坝事故发生前溃坝下泄洪水淹没范围内的所有人口;暴露人口为洪水到达前未成功撤离而遭遇洪水袭击的人口;死亡人口为遭遇洪水袭击而死亡的人口,也就是生命损失。根据“风险人口→暴露人口→生命损失”的评估过程,可以推求出溃坝死亡人数,即生命损失。但关键是推求暴露人口与风险人口之间以及生命损失与暴露人口之间的比例。进一步分析可知,如果知道风险人口的撤离比例,就可以求出暴露人口,而如果知道了暴露人口的死亡率,就可以求出生命损失。基于以上分析,构建溃坝生命损失评估方法框图(图1)。

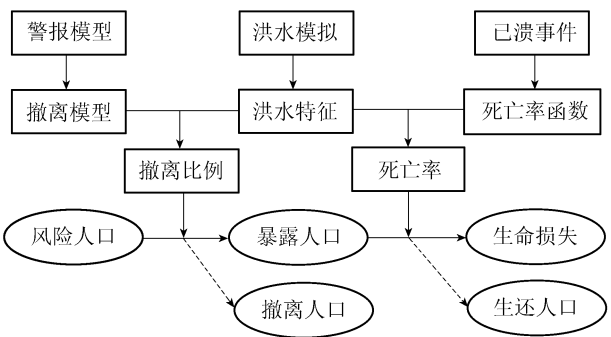


图1 溃坝生命损失评估方法框图

Fig. 1 Framework of method for estimation of loss of life caused by dam breaks

2 警报与撤离模型

建立警报与撤离模型的目的是评估风险人口中成功撤离的比例,以确定暴露人口数。在提前预料溃坝情况下,通过分析警报与撤离过程,确定警报率、撤离率及成功撤离率。

2.1 警报率

警报率 R_{warned} 为警报发布后收警报的人口占风险人口的比例,主要受警报形式与警报发布时间的影响。国外早在20世纪80年代就针对不同的警报形式产生不同警报率的问题进行了警报与撤离的研究。1988年,Rogers等^[6]进行了紧急警报传播测试研究,随后Sorensen等^[7]根据收集的紧急警报案例得到警报时间与被警报人口比例的关系曲线,同时给出了人们从事活动对不同警报形式的警报率的影响系数。笔者借鉴其研究成果,建立警报率曲线,见图2。

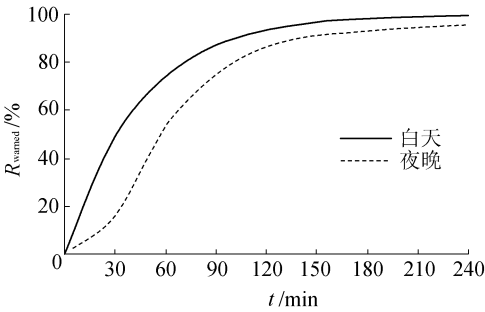


图2 警报率曲线

Fig. 2 Warning rate curve

2.2 撤离率

收到警报后撤离的人口占收警报人口的比例称为撤离率 R_{evac} ,它在很大程度上决定最终成功撤离人口的比例。目前还没有人给出 R_{evac} 的具体数值,也很难进行实验模拟,只能根据紧急撤离案例进行分析。历史溃坝及洪水事件表明, R_{evac} 主要受溃坝的突发性、人们对警报的信任程度及对溃坝洪水严重性的理解程度等因素的影响^[4]。国内外学者研究了紧急情况下人口的撤离情况^[8-11],根据这些紧急撤离案例的总结分析,笔者提出了 R_{evac} 建议表(表1)。

2.3 成功撤离率

收到警报后有 2 种撤离方式:(a)为了到较远的地点避难沿着地面进行的撤离,称为横向撤离;(b)利用建筑物避难而进行的撤离,称为竖向撤离。

2.3.1 横向撤离

洪水到达前可用时间 T_{FA} (即风险人口开始撤离到洪水到达之间的时间)大于撤离需要时间 T_{ER} (即风险人口为成功逃离风险区进行撤离需要的时间),则风险人口成功逃离的可能性会很大,否则,风险人口将极有可能遭遇洪水,成为暴露人口。撤离路线以及撤离方式对能否成功撤离起很大的作用。假定撤离路线是最优的,即撤离需要的时间最少。撤离的交通方式有步行、自行车、普通机动车、摩托车及小汽车等 5 种方式,失效标准以水深 D (m)和流速 V (m/s)的乘积 DV (m^2/s)来表示,当洪水超过相应的失效标准时,该类交通方式将基本失去作用。根据相关统计资料得到上述 5 种交通方式的平均速度与抵抗洪水的能力,依次为步行(平均速度 6 km/h, $DV=0.7 m^2/s$)、自行车(平均速度 16 km/h, $DV=0.7 m^2/s$)、普通机动车(平均速度 40 km/h, $DV=0.7 m^2/s$)、摩托车(平均速度 50 km/h, $DV=0.7 m^2/s$)及小汽车(平均速度 70 km/h, $DV=0.6 m^2/s$)。

2.3.2 竖向撤离

风险人口选择自己所在的或附近的建筑物作为避难场所,其撤离所需的时间是很短的,因此可以认为洪水到达前风险人口已经转移到该建筑物,竖向撤离能否成功取决于建筑物抵抗洪水的能力。1985 年美国陆军工程师团(USACE)通过试验给出了不同种类建筑物的损害标准^[13]。2000 年,RESCDAM 项目(1999 年由芬兰环境研究所开展的欧盟项目“Development of rescue actions based on dam-break flood analysis”简称)^[14]进行了建筑物损害试验,提出了以水深与流速为自变量的建筑物损害标准曲线。目前我国还没有建筑物损害的相关标准,参照国外的实验成果,建立我国建筑物损害的参考标准为:泥土结构平房 $D\geq 0.9 m$ 且 $DV\geq 2 m^2/s$,砖结构平房 $V\geq 2 m/s$ 且 $DV\geq 7 m^2/s$;2 层楼房 $V\geq 2.4 m/s$ 且 $DV\geq 15 m^2/s$,3 层楼房 $V\geq 2.4 m/s$ 且 $DV\geq 22 m^2/s$,四层楼房 $V\geq 2.54 m/s$ 且 $DV\geq 29 m^2/s$,对于更高的楼房,其抵抗洪水的能力相当强,可以认为不能被损坏。

2.4 警报与撤离模型的计算公式

提前预料溃坝情况下会发布警报,称为有警报;若提前未预料溃坝,则不会发布警报,称为无警报。无警报情况下不需要考虑警报与撤离过程。根据对警报与撤离过程的分析,提出暴露人口与风险人口之间的关系式。

2.4.1 横向撤离

有警报

$$N_{EXP} = \begin{cases} (1 - R_{warned}R_{evac})N_{PAR} & (T_{FA} > T_{ER}) \\ N_{PAR} & (T_{FA} \leq T_{ER}) \end{cases} \tag{1}$$

无警报

$$N_{EXP} = N_{PAR} \tag{2}$$

2.4.2 竖向撤离

有警报

$$N_{EXP} = \begin{cases} (1 - R_{warned}R_{evac})N_{PAR} & (Z_{BD} > Z_{FD}) \\ N_{PAR} & (Z_{BD} \leq Z_{FD}) \end{cases} \tag{3}$$

无警报

$$N_{EXP} = \begin{cases} (1 - F_s)N_{PAR} & (Z_{BD} > Z_{FD}) \\ N_{PAR} & (Z_{BD} \leq Z_{FD}) \end{cases} \tag{4}$$

式中: N_{EXP} ——暴露人口数; N_{PAR} ——淹没区内风险人口数; Z_{BD} ——建筑物抵抗洪水能力参数; Z_{FD} ——洪水强度; F_s ——高层建筑中处于洪水位以上人口的比例。

3 暴露人口死亡率评估

死亡率 R_d 主要受洪水特征的影响,但同时还受到大量不确定性因素,如水温、漂浮物、自救能力、年龄、

表 1 撤离率 R_{evac} 建议值

Table 1 Recommended evacuation rates

突发性	信任度	理解程度	$R_{evac}/\%$	
			建议范围	建议值
是	高	明确	83 ~ 92	85
		模糊	65 ~ 78	70
	低	明确	16 ~ 27	20
		模糊	1 ~ 12	5
否	高	明确	90 ~ 99	95
		模糊	78 ~ 89	85
	低	明确	57 ~ 68	60
		模糊	34 ~ 43	40

残疾、疲劳、可见度、风力等的影响。这些因素中每个因素所起的作用可能显著也可能不显著。为简化建模过程,从概率论角度出发,将一定洪水条件下人的死亡作为随机事件处理。设有 n 个人同时暴露于洪水中,彼此之间很难进行相互救助,1 个人的死亡与否基本上不受他人的影响,可以认为每个人是相互独立的,人在洪水中可能死亡也可能生还。将人在洪水中的死亡情况作为随机事件 X ,则

$$X = 1 \text{ death or } 0 \text{ survival} \tag{5}$$

显然, X 服从(0-1)分布。设 Y 为暴露人口在洪水中的死亡情况,则

$$Y = X_1 + \cdots + X_k + \cdots + X_n = \sum_{k=1}^n X_k \tag{6}$$

Y 服从参数为 $(n-p)$ 的二项分布, p 为单个人的死亡概率。根据 De Movivre-Laplace 中心极限定理可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left[\frac{Y - np}{\sqrt{np(1-p)}} \leq x\right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \tag{7}$$

即正态分布是二项分布的极限分布。 n 个人的死亡情况 Y 近似服从正态分布,有

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\sigma > 0) \tag{8}$$

$$F(y) = P(Y \leq y) = \int_{-\infty}^y f(t) dt = \Phi_N\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right) \tag{9}$$

式中: μ ——洪水特性参数均值; σ ——均方差; Φ_N ——正态分布函数。

一定洪水条件下人口死亡率近似服从正态分布, R_D 可以用对数正态分布函数表达。为建立死亡率函数,收集了我国 11 座已溃大坝的 23 个案例、国外 27 座已溃大坝的 37 个案例以及 13 个自然洪水案例^[5,15]。受资料信息量的限制,目前只采用水深作为死亡率函数的自变量,对其他因素如流速,可在收集更多资料后进行研究。按照洪水特征将整个淹没区分为不同的危险区,危险区是具有某一洪水特征及相应死亡模式的区域,对不同的危险区分别建立死亡率函数。

3.1 溃决区及其死亡率函数

溃决区为濒临大坝且被洪水淹没的一定区域,洪水强度比较大,破坏性较强,该区域内的建筑物及树木等避难场所几乎全部被洪水毁坏,人生还的可能性很小。根据 RESCDAM 项目建筑物损害试验^[14-15],当 $V \geq 2 \text{ m/s}$ 且 $DV \geq 7 \text{ m}^2/\text{s}$ 时,砖结构平房将会损坏;根据 RESCDAM 项目洪水中的稳定性试验^[14],当 $DV \geq 2.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 时,人在洪水中的失稳概率为 100%。将 $V \geq 2 \text{ m/s}$ 且 $DV \geq 2.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 作为溃决区划分标准,人在洪水中失稳后,由于洪水流速与水深较大,很难生还,所以溃决区内暴露人口的死亡率近似为 100%,即 $R_D = 1$ 。

3.2 洪水快速上升区及其死亡率函数

洪水快速上升区内洪水强度比溃决区相对要小,建筑物会部分倒塌,暴露人口有一定的撤离时间,但由于洪水上升较快,撤离时间十分有限,洪水上升到一定高度后人们将很难撤离。上升速率 W 建议为从洪水到达至水深上升到 1.5 m 的平均上升速率,1.5 m 接近正常人的最低身高。洪水到达水深 1.5 m 这段时间称为紧急撤离时间,以 $t_{1.5}$ 表示。 $t_{1.5}$ 的长短在很大程度上决定人们能否成功逃离。当 $t_{1.5} \leq 30 \text{ min}$ 时,洪水平均上升速率大于 3 m/h。在洪水上升速率较大的情况下,只有洪水的最大深度达到一定程度才可能对暴露人口造成威胁,根据 RESCDAM 项目洪水中的稳定性试验^[14],确定洪水快速上升区的最大水深不低于 2.1 m。

根据以上分析,得到洪水快速上升区的划分标准:上限 $DV < 2.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 或 $V < 2 \text{ m/s}$;下限 $W \geq 3 \text{ m/h}$ 且 $D \geq 2.1 \text{ m}$ 。

根据国内外 16 个洪水快速上升区的实测数据^[5,15],建立 R_D 与 D 之间的关系式为

$$R_D = \Phi_N\left[\frac{\ln(D) - 1.43}{0.277}\right] \tag{10}$$

3.3 浅水低流速区及其死亡率函数

浅水低流速区为淹没区域内除了溃决区及洪水快速上升区以外的区域。该区域内洪水的破坏性已大幅度减弱,洪水上升较慢(洪水上升速率 $W < 3 \text{ m/h}$),流速也较慢,暴露人口会有更多的撤离时间,发现安全避难场所的机会也更多。根据国内外 77 个浅水低流速区的实测数据^[5,15],确定 R_D 与 D 之间的关系式为

$$R_D = \Phi_N\left[\frac{\ln(D) - 7.159}{2.59}\right] \tag{11}$$

危险区划分涉及溃坝洪水淹没区域内的洪水特征,主要为最大水深 D 、最大流速 V 以及 W ,要获得这些数据,必须以空间地形为基础进行溃坝及洪水演进模拟。通过溃坝及洪水演进模拟,获取下游淹没区域内洪水的时空分布状况,为溃坝生命损失评估提供基础资料。

4 应用实例

刘家台水库位于河北省保定市西北约 55 km 界河上游的易县,控制流域面积 174 km²,总库容 4 054 万 m³,相应水位 138.40 m。1958 年 2 月动工,1959 年 7 月基本建成。水库大坝为黏土心墙土坝,长 295 m,坝顶高程 138.8 m,最大坝高 35.8 m,坝顶宽 5 m,防浪墙高 1 m。1963 年 8 月 8 日凌晨 3:55 由于漫顶导致溃决,造成下游 1.0~15.0 km 范围内的界河沟谷中约 943 人死亡^[5]。溃坝前一天发出转移通知,溃坝前 1 h 也曾发出鸣枪警告,但终因溃坝发生在夜间,且过早地发布转移通知,使人们对警报不信任,曾撤离的居民部分又返回村庄,加之下游居民没有意识到溃坝洪水的严重性,导致伤亡惨重。刘家台溃坝洪水严重性与生命损失空间分布见图 3。

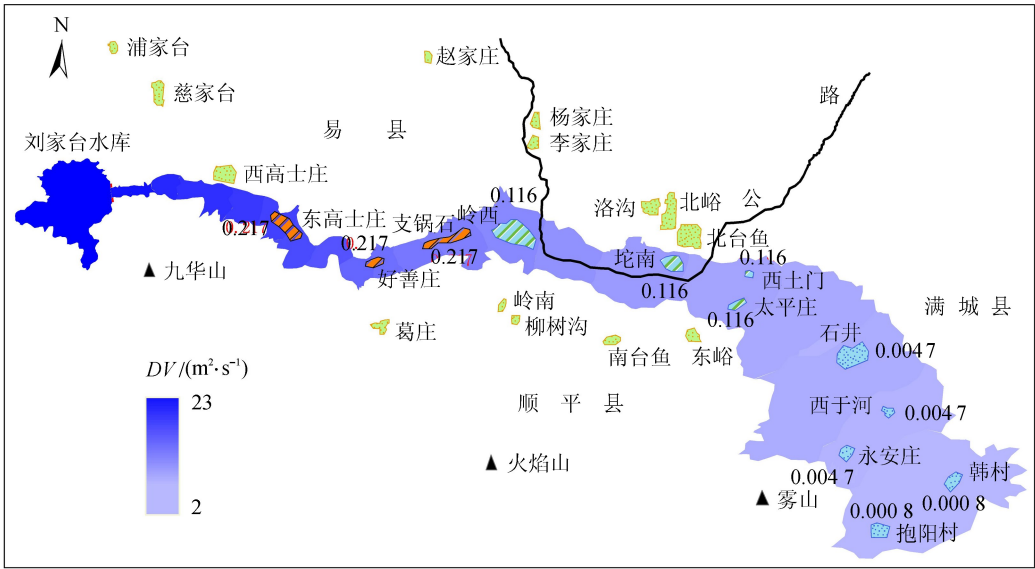


图 3 刘家台溃坝洪水严重性与生命损失空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of flood severity and loss of life caused by Liujiaitai Reservoir dam break

采用本文方法对刘家台水库溃坝生命损失进行评估,评估过程中的参数取值及最终评估结果见表 2。

表 2 刘家台水库大坝溃坝生命损失评估结果

Table 2 Estimation results of loss of life caused by Liujiaitai Reservoir dam break

序号	范围/km	所属区域	警报时间/h	警报率	撤离率	水深/m	R_D	损失率 f
1	1.0~7.0	溃决区	2.0	0.87	0.90	>3.0	1.000 0	0.217 0
2	7.0~15.0	快速上升区	0.8	0.61	0.90	3.5	0.261 1	0.116 0
3	15.0~30.0	浅水低流速区	0	0	0.30	2.2	0.006 7	0.004 7
4	30.0~50.0	浅水低流速区	0	0	0.50	0.6	0.001 6	0.000 8

表 3 为 Graham 法、文献[5]方法以及本文方法的评估结果。由表 3 可知,本文方法评估值与实际值的平均绝对误差(MAE) 低于 Graham 法,高于文献[5]方法,平均绝对百分比误差(MAPE) 均明显低于 Graham 法与文献[5]方法。因此,采用本文方法得到的评估结果与实际情况非常相符,较好地反映了客观实际。

表 3 3 种评估方法结果对比

Table 3 Comparison of results of three estimation methods

评估区 编号	实际值	Graham 法			文献[5]方法			本文方法		
		评估值	绝对误差	相对误差/%	评估值	绝对误差	相对误差/%	评估值	绝对误差	相对误差/%
1	0.189	0.300	0.111	58.7	0.180	0.009	4.8	0.217 0	0.028 0	14.8
2	0.104	0.040	0.064	61.5	0.130	0.026	25.0	0.116 0	0.012 0	11.5
3	0.005	0.010	0.005	100.0	0.001	0.004	80.0	0.004 7	0.000 3	6.0

生命损失率与其对应的风险区人口相乘求得生命损失,经计算刘家台溃坝事故生命损失评估值为1 054人,实际死亡人数为937人,绝对误差117人,相对误差12.5%。由图3可知,在距离水库较近(约3 km)的东高士庄和较远(约18 km)的抱阳村,洪水严重程度分别(DV)为 $20.6\text{ m}^2/\text{s}$ 和 $3.2\text{ m}^2/\text{s}$,生命损失率分别为0.217和0.0008,说明溃坝生命损失程度与距离水库的远近有很大关系,距离远损失率小,距离近则损失率大,因此,在制定溃坝救援应急预案时,要首先转移离水库较近的人口,增大救援效率,尽可能减少生命损失。

5 结 语

由于问题的复杂性,溃坝生命损失评估是溃坝后果评估中最困难的部分。本文结合溃坝生命损失评估的相关试验成果及大量溃坝历史资料,通过研究警报、撤离及暴露人口死亡率等关键问题,建立了适用于我国的溃坝生命损失评估模型。通过实例应用表明,提出的方法及得出的估算公式能比较客观地评估我国溃坝生命损失情况。

参考文献:

- [1] GRAHAM W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[J]. *Sedimentation & River Hydraulics*,1999,6(5):1-43.
- [2] REITER P. Loss of life caused by dam failure;the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki [R]. Helsinki;PR Water Consulting Ltd,2001.
- [3] ABOELATA M A. Conceptualization and development of a dam break life-loss estimation model[D]. Logan; Utah State University,2005.
- [4] 李雷,王仁钟,盛金保,等. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 周克发. 溃坝生命损失分析方法研究[D]. 南京:南京水利科学研究院,2006.
- [6] ROGERS G O,SORENSEN J H. Diffusion of emergency warning[J]. *The Environmental Professional*,1988,10:281-294.
- [7] SORENSEN J H,MILETI D S. Warning and evacuation;answering some basic questions[J]. *Industrial Crisis Quarterly*,1988,2: 195-209.
- [8] CHOWDHURY A,MUSHTAQUE R,BHUYIA A U,et al. The Bangladesh Cyclone of 1991:why so many people died[J]. *Disasters*,1993,17(4):291-304.
- [9] LINDELL M K,PRATER C S,PERRY R W,et al. EMBLEM;an empirically based large-scale evacuation time estimate model [R]. College Station;Hazard Reduction & Recovery Center Texas A&M University,2002.
- [10] PETRUCCELLI U. Urban evacuation in seismic emergency conditions[J]. *International Transportation Engineering Journal*,2003,73(8):34-38.
- [11] PFISTER N. Community response to flood warnings;the case of an evacuation from Grafton,March 2001[J]. *The Australian Journal of Emergency Management*,2002,17(2):19-29.
- [12] 宋敬衡,何鲜峰. 我国溃坝生命风险分析方法探讨[J]. 河海大学学报:自然科学版,2008,36(5):628-633. (SONG Jingxiang,HE Xianfeng. Discussion on analysis method for risk of life loss caused by dam failure in China[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*,2008,36(5):628-633. (in Chinese))
- [13] US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Business depth damage analysis procedure[R]. Portland,Oregon;Engineer Institute for Water Resources,1985:85-100.
- [14] RESCDAM. The use of physical models in dam-break flood analysis;rescue actions based on dam-break flood analysis[R]. Helsinki,Finland;Final Report of Helsinki University of Technology,2000:57.
- [15] JONKMAN S N,VRIJLING J K,VROUWENVELDER A C W M. Methods for the estimation of loss of life due to floods;a literature review and a proposal for a new method [J]. *Natural Hazards*,2008,46(3):353-389.
- [16] 李雷,彭雪辉,周克发. 溧阳市沙河水库东副坝溃坝生命损失估算[J]. 水利水电科技进展,2008,28(1):46-49. (LI Lei,PENG Xuehui,ZHOU Kefa. Estimation of life loss induced by eastern auxiliary dam breach at Shahe Reservoir in Liyang City [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2008,28(1):46-49. (in Chinese))