汇流参数取值对尾矿库防洪安全的影响分析*

陈星[1,2,3],廖文景[1,3,4],张明云[5],刘婷[1,2,3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.五矿集团国创中心科技(湖南)有限公司, 湖南 长沙 410012;
4.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
5.中冶武勘工程技术有限公司, 湖北 武汉 430080)

摘要:尾矿库多位于水文资料稀缺的山区,其设计洪水推求广泛采用推理公式法,其中汇流参数 m 值的确定直接影响工程规模、安全可靠性与经济效益。然而,在实际工程设计与安全评价中,m 值确定常未得到足够重视,导致计算结果出现偏差,影响工程合理性与安全性。汇流参数不仅取决于流域下垫面等自然条件,还与洪峰流量、汇流历时等要素存在动态耦合关系与非线性反馈作用。以德尔尼铜矿尾矿库为例,依据《水利水电工程设计洪水计算规范》和《青海省水文手册》分别确定 m 取值区间,系统探讨 m 值变化对汇流时间、洪峰流量及平均流速的响应规律。研究结果表明,汇流参数对洪峰流量的调控作用显著,该响应机制尚缺乏充分关注。鉴于尾矿库汇水区多属特小流域,建议在系统分析地形地貌与植被覆盖特征、实地勘察的基础上,秉承"本地化适配与多维度验证"的理念,科学确定 m 取值,以提升尾矿库设计及建设的科学性与可靠性。

关键词:推理公式法;洪水计算;水文手册;汇流参数;尾矿库

中图分类号:TD64 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0186-08

Influence of Confluence Parameter Values on Flood Control Safety of Tailings Ponds

Chen Xing[1,2,3], *Liao Wenjing*[1,3,4], *Zhang Mingyun*[5], *Liu Ting*[1,2,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Minmetals National Innovation Center Technology (Hunan) Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
4.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
5.WSGRI Engineering & Surveying Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430080, China)

Abstract: Tailings ponds are mostly located in mountainous areas with scarce hydrological data, and the rational formula method is widely adopted for their design flood derivation, in which the determination of the confluence parameter m value directly affects the engineering scale, safety and reliability, and economic benefits. However, in actual engineering design and safety evaluation, the determination of the m value has often not received enough attention, leading to deviations in calculation results and affecting the rationality and safety of the project. Confluence parameters not only depend on natural conditions such as the underlying surface of the basin, but also have a dynamic coupling relationship and nonlinear feedback effect with elements such as peak discharge and confluence duration. According to the *Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects* and the *Hydrological Manual of Qinghai Province*, the m value ranges were determined respectively, and the response laws of confluence time, peak discharge, and average flow velocity to the variation of the m value were systematically investigated. The results shows that the confluence parameter has a significant regulatory effect on peak flood discharge, and this response mechanism has not received sufficient attention. Given that the catchment areas of tailings ponds are mostly small-scale watersheds, it is recommended to scientifically determine the m value based on systematic analysis of topographic and geomorphological characteristics, vegetation coverage characteristics, and field investigations, following the concept of "localized adaptation and multidimensional verification", so as to improve the scientificity and reliability for the design and construction of tailings ponds.

Key words: Rational formula method, Flood calculation, Hydrological manual, Confluence parameter, Tailings pond

---

* **收稿日期**:2026-01-07
基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(2024ZYT007);中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2025GZKJ02)
作者简介:陈星(1984—),男,安徽濉溪人,高级工程师,主要从事非煤矿山尾矿库安评、设计及相关科创工作。E-mail:hhuchenxing@163.com

0 引言

小流域设计洪水计算是防洪规划中的基础性技术工作,广泛服务于水利设施、交通、城镇防护体系及工矿企业安全建设,其应用场景具有多目标性、参数差异性、空间分散性与工程规模普遍性等特征。全国尾矿库溃坝事故成因统计分析表明,漫坝失事占 51.5%,其中库水位超限引发坝体失稳占 20%,灾害链根源指向防洪能力的结构性赤字,洪水计算构成尾矿库的核心可靠性模块,凸显防洪能力建设对尾矿库安全的决定性作用。金属矿山尾矿库库区流域(不含截洪设施以上区域)一般属于汇水面积小于 10 km^2 的特小流域,特小流域设计洪水计算作为尾矿库工程的关键技术环节,其精准性将直接影响尾矿库防洪体系的有效性。受客观条件限制,尾矿库多分布于偏远地带,选址于深山或戈壁,此类地区通常缺乏水文站点,导致实测流量数据、降雨资料序列缺失或观测序列长度不足,难以支撑基于频率分析的洪水计算需求,在此背景下,推理公式法在我国尾矿库工程的设计洪水推求中占据了主导地位。幸新涪等[1]指出,流域面积小于 10 km^2 时,采用推理公式法更为合理可靠。

对于目标流域,一旦暴雨过程和净雨量确定,汇流参数 m 便成为推理公式法汇流计算环节的关键控制变量。推理公式汇流参数 m 反映流域下垫面对汇流过程的阻水作用,其与植被条件、汇水面积 F、流域长度 L、流域坡降 J、地表糙度等均有关系。对于同一流域,m 并非恒定值,不同暴雨洪水对应的 m 值也有差异。m 取值一般通过建立 θ-m 关系得到[2],可将各影响因素反映其中。

陈家琦等[3]对 m 值查算表进行修订,解决了辅助参数超过 90 时 m 值难以确定的问题。许强[4]基于不同频率设计洪水计算发现,汇流参数 m 值随流域特征因子、设计洪峰及汇流历时增大呈正相关增长。因汇流参数物理机制尚不明确,不同流域研究结论存在分歧,索明生等[5]对暴雨洪水分析表明,m 值对计算结果影响显著,洪峰流量与 m 值近似呈同倍率增长,且在相同暴雨条件下,m 值增大直接导致洪峰流量计算结果增大。

根据现行具有强制效力的国家标准《尾矿库安全规程》[6]的要求,在进行洪水计算时,必须将各省发布的水文图集或由专业权威机构所认可的计算方法作为核心依据。与一般水利小流域相比,尾矿库洪水计算受三向坡面围限地貌单元影响,呈现多源分布式汇流特征,尾矿堆积诱发溯源淤积,有效汇流长度逐年衰减。汇流参数 m 作为推理公式的主导敏感性变量,理论层面应表征流域坡度场、暴雨强度-历时谱、糙率分布及土壤入渗能力的系统耦合效应。然而其实质为反演拟合产物,公式理想化假设(如线性汇流、均匀降雨)的偏差被全息压缩至 m 值,致使其物理语义产生边界模糊化。

当前尾矿库洪水计算中,因对汇流参数的认识不足,技术人员常直接套用区域水文手册推荐值或简化公式确定该参数。尾矿库汇水区多属特小流域,水文手册的传统方法在此类场景下适用性有限,盲目采用易导致洪水计算结果偏离实际,进而影响工程经济性与设计合理性。为引导从业者重视汇流参数 m 的科学取值,使其计算结果更贴合我国现阶段经济发展需求,本研究以德尔尼铜矿尾矿库为实证对象,分别依据国家标准《水利水电工程设计洪水计算规范》[7]与地方性《青海省水文手册》[8]的推求值,系统解析不同取值对洪水计算关键指标的影响规律。研究成果旨在为尾矿库洪水计算提供方法论参照,对优化洪水计算方法具有指导意义,并对相似流域水文分析具有推广价值,同时提供了可迁移的技术路径。

1 推理公式法简介

陈家琦等[3]在国内首次提出推理公式法,该方法至今仍是我国小流域设计洪水计算的核心方法之一。推理公式法是基于暴雨数据间接推求设计洪峰流量的早期方法之一,其理论基础源自原水利水电科学研究院提出的径流成因卷积理论。该方法的推导过程基于一个关键假设:将流域汇流曲线或净雨过程简化为矩形过程,并设定形成洪峰的净雨历时等于流域汇流时间,在此简化条件下,结合全流域均匀产流的假定,最终导出了用于推求洪峰流量的计算公式。1981 年起,中国水利科学研究院针对该公式在各地应用中的问题,对其结构形式和参数体系进行优化,显著提升了计算适应性。赵银玲等[9]采用降雨-径流相关图法建立净雨与出口断面洪水的直接对应关系,规避了传统初损稳渗法强度概化引入的偏差。针对公式为超越方程的求解难题,周学国等[10]通过初值优化推导出简化计算公式。

在小流域设计洪水计算中,该方法凭借其相对简捷的计算流程与可靠的精度表现,已被水利工程、尾矿库工程实践确定为一种常用且有效的汇流计算

方法[11-12]。从水文学产汇流机理角度分析,虽然降雨在流域内产生径流并完成汇集的过程十分复杂,但流域对洪水的调蓄功能,核心体现在洪水波的演进与变形过程中。具体而言,演进表现为洪水的向前运动,而变形则包括波峰的展宽及其强度的减弱。在极小尺度流域中,调蓄作用以洪峰衰减为主要特征,而其洪水波整体推进的影响通常可忽略不计。推理公式法是以流域产汇流理论为依据,融合机理推导与地区经验建立的计算方法[13-15],可归于经验特征拟合型汇流模型。

2 德尔尼铜矿尾矿库

2.1 等别及主要安全设施

德尔尼铜矿尾矿库位于青海省果洛藏族自治州玛沁县,设计总库容 1 900 万 m^3,设计总坝高 85 m,按照现行《尾矿设施设计规范》[16]《尾矿库安全规程》中尾矿库等级划分标准,该库为三等库。初期坝采用碎石堆筑,坝顶标高为+4 011.0 m,坝底标高为+3 977.0 m,坝高为 34 m,坝顶宽 4.5 m。外坡比 1∶2.0,外坡面采用块石护坡,在+4 002.0 m 标高设马道,宽 2 m。在初期坝内坡及库区铺设 1.0 mm 厚的 HDPE 防渗膜。设计堆积坝最终堆积标高为+4 062.0 m,堆坝高度为 51 m。采用采矿废石进行碾压堆筑子坝,子坝轴线长度自下而上延长,自 300 m 延长至 421 m,共堆筑 15 级子坝,各级子坝堆筑高度 2.7~3.3 m 不等。

堆积坝在+4 025 m 标高处修建两座排渗辐射井,井深 21 m,内径 3.6 m,井筒采用 C25 级钢筋混凝土,井底采用 C30 级混凝土封底,设置 6 层水平排渗管,排渗管向辐射井方向倾斜坡度 4%,长度 30~70 m,同层排渗管夹角 30°,相邻层排渗管水平投影夹角 15°。辐射井设排水管为 Φ127 mm 钢管,由辐射井向一级子坝坝脚排水沟以 0.5%坡度倾斜。



图 1 德尔尼铜矿尾矿库

Fig.1 Derni copper mine tailings pond

库内现用防洪设施为 1 号排水井(见图 2),接 1 号排水涵管,再接库内排水隧洞。库内设有八柱钢筋混凝土框架式排水井 4 座,相继与库内排水涵管连接。2 号、3 号、4 号“排水井-排水涵管”组合已封堵。1 号井进水口标高为+4 050.95 m,井高 19 m,井径 3.0 m,井座内径 2.8 m,井架横梁断面尺寸为 0.3 m×0.25 m,上下两个横梁间距为 2.5 m,排水井立柱截面宽 0.5 m,厚 0.5 m。排水井与岸坡之间有浮桥相连。

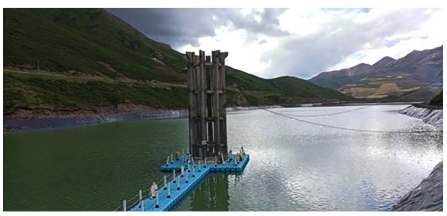


图 2 库内 1 号排水井

Fig.2 No.1 drainage well in the tailings pond

库内现用 1 号排水涵管为圆拱直墙型,钢筋混凝土结构,断面的宽度 B、高度 H 分别为 1.7 m、1.8 m,直墙高 1.0 m,排水管坡度为 0.042 9。库内排水隧洞为圆拱直墙型断面,断面尺寸为 1.7 m×1.4 m ($B\times H$),直墙高 1.2 m,最小底坡为 0.028,根据围岩情况,分别采用钢筋混凝土、喷射混凝土及锚喷支护。

在库尾修建拦洪坝,用以拦截上游洪水、减小库内防洪压力。拦洪坝由废石填筑而成,坝高 10.0 m,坝顶标高为+4 069.10 m,坝顶宽 4.5 m。上游迎水面为钢筋混凝土面板,坡比 1∶1.64;下游库内侧为块石贴坡面,坡比 1∶2.2。拦洪坝顶设置防浪墙,防浪墙宽 1.0 m,高 1.00~1.13 m。在库区右岸东侧修建一条长 2 078.8 m、圆拱直墙型断面尺寸为 3.6 m×3.8 m 的排洪隧洞,直墙高 2.8 m,洞身全线全断面喷锚衬砌,作为永久支护。进水口位于拦洪坝上游东侧,底标高为+4 062.80 m,出水口底标高为+3 976.80 m,底板平均坡度为 4.137%。隧洞出水口接明渠。

2.2 地形地貌、植被

玛沁地处青藏高原东部,阿尼玛卿山脉横亘县境北侧,山地与盆地相间分布,黄河自西、南、东三面环绕,地势总体上呈西高东低和北高南低态势,黄河由西入境,先向南流,经达日县、甘德县、久治县,再折向东经红原县、玛曲县,继而转向北,再折向西经

青海省河南县、同德县,之后从北部流出境外。区内平均海拔约+4 500 m,最高点为玛积雪山的玛卿岗日峰,海拔为+6 282 m,终年积雪,最低点在拉家盆地黄河河谷,海拔约+3 000 m。

库区所在德勒尼次日其沟为山间沟谷地形,沟谷呈"U"形,地势相对平坦,植被发育,总体地形呈南高北低。沟内河流阶地不发育,主要地貌形态为河漫滩,较大支沟口处有洪积扇分布,最大扇轴长120 m,宽200 m,前缘坎高小于1 m。沟谷两侧为相对高差200～600 m的中高山地貌,山体浑圆,坡度为35°～55°,坡体上植被发育;在+4 500 m以上地带,寒冻风化作用强烈,植被稀疏。

3 汇流参数

根据《尾矿设施设计规范》及《尾矿库安全规程》相关条款,上述技术要求已通过洪水计算原则、参数本地化验证等核心条款予以体现。

3.1 水文手册 m 值

各省(自治区、直辖市)编纂的《水文图集》《水文手册》及《暴雨洪水查算手册》构建了小流域简易水文计算的范式化工具链。1984年,原水利电力部颁布的《暴雨径流查算图表》实现了跨行业经验收敛,为交通基础设施、中小型水利水电工程及尾矿库等无资料区的设计洪水计算提供了核心参数化解决方案。伴随雨洪观测网络空间密度提升与数据序列延长,青海省于2015年启动全域水文学本底更新,促成了《青海省水文手册》(2018年版)的诞生,增强了无资料区洪水计算的时空泛化能力。

青海位于青藏高原腹地,作为我国乃至亚洲关键的生态安全屏障和重要水源补给区,素有"三江源头""中华水塔"之称。该区域属典型的高原大陆性气候,降水时空分布不均,对全球气候变化响应敏感。

进行推理汇流计算,首先需要确定流域的汇流参数 m 值。对于资料短缺地区的汇流参数计算,可在已有站点的 m 值基础上,根据流域特征、降雨、植被等条件,建立回归公式推算其汇流参数。同时,根据分区内流域特征、降水、地形、植被等条件,给出了分区的经验取值范围。流域特征系数 θ 的数值增大通常意味着汇流时间缩短,汇流速度加快。实地观测数据也证实,流域降雨洪水往往具有汇流历时较短、汇流过程更迅速的特点。基于上述规律,可通过建立水文站点 m 值与流域特征系数 θ、降水特征、植被覆盖度等多影响因子的多元回归方程,估算资料匮乏地区的流域汇流参数。

汇流参数受河长、坡度、降水特征、植被状况及地貌类型等多重因素影响[17-19]。在青海各水文区域,对于青东南山地半干旱半湿润区,观测到的汇流参数最大,建议取值范围为1.39～4.80,该区域普遍具有较大流域特征系数,降水相对丰沛,砂质土壤和裸露地表分布较广,导致降雨后汇流速度快,因而汇流参数较大。相反,祁连山地半干旱半湿润区的汇流参数值最小,建议取值范围为1.10～3.60,该区域流域特征系数相对较小,植被覆盖条件良好,汇流历时较长,汇流参数相对较低。

$$m=0.037x_1+0.002x_2 \tag{1}$$

式中:x_1 为百年一遇最大1 h降雨,取30.7 mm;x_2 为流域特征系数 θ,$\theta=L/J^{1/3}$,L 为流域长度,J 为流域坡降。

表1 流域特征参数

Table 1 Watershed characteristic parameters

流域	汇水面积 F/km²	流域长度 L/km	流域坡降 J	流域特征系数 θ
库内区域	11.35	4.84	0.103	10.33
拦洪坝上游	3.80	2.08	0.223	3.43

在确定德尔尼铜矿尾矿库汇流参数 m 值时,依据分区汇流参数 m 值估计表,开展了详细的实地踏勘,并综合评估了流域特征系数、降水特性、植被覆盖、地形起伏及地貌形态等多要素的协同作用。经计算分析,库内区域汇流参数取值1.143,拦洪坝上游汇流参数取值1.157。

3.2 国家标准 m 值

《水利水电工程设计洪水计算规范》根据雨洪特性、河道特性、土壤植被条件将小流域下垫面划分为四类。Ⅰ类:北方半干旱地区,植被条件较差,洪水陡涨陡落。Ⅱ类:南北方地理景观过渡区,植被条件一般,以稀疏针叶林、幼林为主的土石山区,或流域内耕地较多。Ⅲ类:南方、东北湿润山丘区,植被良好,以灌木林、竹林为主的石山区,中小洪水多为矮胖型。Ⅳ类:雨量丰沛的湿润山区,植被优良,多为深山原始森林区,壤中流较丰富,河床呈山区型,有跌水,洪水多为陡涨缓落。

各类别汇流参数 m 推荐值见表 2。根据德尔尼铜矿尾矿库所在沟谷植被、地形地貌、下垫面及流域特征系数等条件综合研判,库内区域及拦洪坝上游均划归Ⅱ类区,库内区域汇流参数取值 0.70,拦洪坝上游汇流参数取值 0.63。

表 2 推理公式法汇流参数 m 推荐值

Table 2 Recommended m values of the concentration parameters for the rational formula method

类别	不同流域特征系数下的 m 值			
	θ=1～10	θ=10～30	θ=30～90	θ=90～400
Ⅰ	1.00～1.30	1.30～1.60	1.60～1.80	1.80～2.20
Ⅱ	0.60～0.70	0.70～0.80	0.80～0.90	0.90～1.30
Ⅲ	0.30～0.40	0.40～0.50	0.50～0.60	0.60～0.90
Ⅳ	0.20～0.30	0.30～0.35	0.35～0.40	0.40～0.80

4 洪水计算及调洪演算

鉴于青海省水文站点分布密度较低,在观测数据有限的地区应用推理公式法时,首要步骤是依据流域地形特征、降水特性、植被覆盖及地貌类型等要素综合推求汇流参数。推理公式法计算框架主要涵盖设计暴雨推求、基于推理的产流量计算以及推理汇流过程模拟 3 个核心组成部分。推理汇流计算的核心任务在于求解洪峰流量、流域汇流时间、平均流速等关键洪水要素。根据推理公式,洪峰流量采用下列公式计算得出:

$$Q_m=\begin{cases}0.278\dfrac{h_\tau}{\tau}A, & t_c>\tau,\text{全流域汇流造峰}\\ 0.278\dfrac{h_R}{\tau}A, & t_c\leqslant\tau,\text{部分流域汇流造峰}\end{cases}\tag{2}$$

式中:Q_m 为洪峰流量;τ 为汇流时间;A 为流域面积;t_c 为净雨历时;h_τ 为造峰净雨深,$h_\tau=H_p(t)-\mu t$,$H_p(t)$为历时 t 的设计暴雨量,μ 为流量系数;h_R 为洪水净雨深。

4.1 洪水计算

流域汇流历时为自距流域出口最远处的水体沿最大流程 L_{max}到达流域出口断面所需的平均时间,流域汇流速度即水体沿最大流程 L_{max}行进的平均速度。库区沉积干滩面平均坡度为 0.81%,干滩长度为 350～400 m,运行水位为+4 050.95 m,滩顶最低标高为+4 053.80 m,防洪高度为 2.85 m。

德尔尼铜矿尾矿库为三等库,其防洪能力应满足最小安全超高不小于 0.7 m,最小干滩长度不小于 70 m 的要求。对于汇水面积较小的尾矿库工程,通常采用 1/6 h、1 h、6 h 和 24 h 作为标准暴雨历时,以便通过暴雨参数推求相应的设计洪水。对于 500 年一遇洪水(P=0.2%)时,计算结果见表 3、表 4。表中,T 为暴雨标准历时,H° 为概率点雨量平均值,C、N 分别为与频率和历时相关的地区经验系数,$\eta_{0.2\%}$为设计暴雨点面雨量折减系数,H 为标准历时设计雨量。

表 3 拦洪坝上游区域面雨量计算

Table 3 Areal rainfall calculation for the area upstream of the flood control dam

T/h	H°	C	N	$\eta_{0.2\%}$	H
1/6	21.98	—	—	0.874 5	19.22
1	45.11	0.071 2	0.297	0.874 5	39.45
6	63.45	0.028 3	0.368	0.936 8	59.44
24	75.60	0.008 8	0.486	0.973 0	73.56

表 4 库内区域面雨量计算

Table 4 Areal rainfall calculation for the tailings pond area

T/h	H°	C	N	$\eta_{0.2\%}$	H
1/6	21.98	—	—	0.904 3	19.88
1	45.11	0.071 2	0.297 0	0.904 3	40.79
6	63.45	0.028 3	0.368 3	0.955 8	60.64
24	75.60	0.008 8	0.486 0	0.983 4	74.35

代入相关参数后,德尔尼铜矿尾矿库库内及拦洪坝前洪水计算结果见表 5。

表 5 洪水计算结果

Table 5 Flood calculation results

流域	m 值	汇流时间	洪峰流量	平均流速
拦洪坝上游	0.630	0.998	83.38	0.85
	1.157	0.413	191.37	2.03
库内区域	0.700	1.004	31.76	0.63
	1.143	0.521	63.68	1.21

洪水计算中,汇流参数 m 值对洪水过程线峰值、峰现时间和洪量分配具有显著影响。若高估 m 值,会导致洪峰计算值偏大,引发过度设计,增加建设成本;反之,则低估洪水危害,导致排洪设施设计泄流能力不足,暴雨期增加漫顶溃坝风险。

4.2 调洪演算与水力计算

通过水量平衡计算,可求泄洪过程,从而确定泄流量和调洪库容。尾矿库内任一时段 Δt 的水量平衡方程式如下:

$$\frac{1}{2}(Q_s+Q_z)\Delta t-\frac{1}{2}(q_s+q_z)\Delta t=V_z-V_s\tag{3}$$

式中:Q_s、Q_z 分别为时段始、终来洪流量;q_s、q_z 分别为时段始、终泄洪流量;V_s、V_z 分别为时段始、终蓄洪量。

沉积滩面平均坡度为 0.81%,运行水位为+4 050.95 m,滩顶最低标高为+4 053.80 m。库内调洪演算结果见表 6。

表 6 库内调洪演算结果

Table 6 Flood routing calculation results for the tailings pond

m 值	最大下泄流量/(m^3/s)	最高洪水位/m	安全超高/m	干滩长度/m
0.700	7.73	+4 051.89	1.91	236
1.143	15.10	+4 052.39	1.41	174

由表 6 可知,发生 500 年一遇暴雨洪水条件下,采用不同 m 值时,库内干滩长度相差 62 m,对尾矿坝渗流及坝体抗滑稳定性有着显著影响。

拦洪坝高 10.0 m,坝顶标高为+4 069.10 m。由于拦洪坝前调洪库容较小,在校核"拦洪坝-排洪隧洞"防洪能力时不考虑其调洪库容。经计算,风壅高为 0.25 m,波浪爬高为 0.65 m,校核安全加高为 0.4 m,拦洪坝要求的最小超高为 1.3 m。根据水工隧洞水力计算,当 $H/a>1.5$ 时(H 为上游水深,a 为洞高),即当水头 $H>1.5a$ 时为有压流。计算隧洞有压流态下的泄流能力,采用如下计算公式:

$$Q=\mu\omega\sqrt{2g(T_0-h_p)} \tag{4}$$

式中:Q 为泄流能力;ω 为隧洞出口断面面积;T_0 为上游水面与隧洞出口底板高程差 T 及上游行近流速水头之和;h_p 为隧洞出口断面水流的平均单位势能。

计算得出,在满足安全加高 0.4 m 的条件下,隧洞的过流能力为 127.9 m^3/s,大于汇流参数 m 取 0.630 时拦洪坝上游洪峰流量 83.38 m^3/s,能够完全截流其上游洪水,但远小于汇流参数 m 取 1.157 时拦洪坝上游洪峰流量 191.37 m^3/s,洪水将翻越拦洪坝进入库内,增加库内防洪压力,甚至发生洪水漫顶乃至溃坝。

5 汇流参数对洪水计算响应分析

根据前述分析结果,库区范围内的汇流参数 m 值可在 0.700~1.143 之间变动,而拦洪坝上游区域的 m 值取值区间为 0.630~1.157。m 值的变动对相应汇流时间、洪峰流量及平均流速所造成的影响,详见表 7 与表 8。

根据表 7 和表 8 的结果可以看出,汇流时间随 m 值的增大而缩短,而洪峰流量与平均流速则随 m 值的增加而增大。在库内区域,汇流时间、洪峰流量和平均流速的变化幅度在 1.9~2.0 倍之间;在拦洪坝上游区域,各参数的变化幅度在 2.3~2.4 倍之间。综合前述分析,库内干滩长度变化差值达 62 m,且在不同 m 值条件下,拦洪坝上游存在洪水翻越拦洪坝进入库区的安全风险。结果表明,汇流参数 m 的取值显著影响洪水计算结果,并进一步对尾矿库的工程设计、施工建设及运行安全产生关键性作用。

表 7 库内区域洪水计算结果

Table 7 Flood calculation results for the tailings pond area

m 值	汇流时间 τ/h	洪峰流量 Q_m/(m^3/s)	平均流速 $\bar{v}$/(m/s)
0.700	1.004	31.76	0.63
0.800	0.842	37.11	0.75
0.900	0.718	43.91	0.87
1.000	0.623	50.75	1.01
1.100	0.549	57.59	1.15
1.143	0.521	63.68	1.21

表 8 拦洪坝上游洪水计算结果

Table 8 Flood calculation results for the area upstream of the flood control dam

m 值	汇流时间 τ/h	洪峰流量 Q_m/(m^3/s)	平均流速 $\bar{v}$/(m/s)
0.630	0.998	83.38	0.85
0.700	0.807	101.91	1.04
0.800	0.676	121.39	1.24
0.900	0.577	143.72	1.45
1.000	0.507	162.82	1.67
1.100	0.444	185.92	1.89
1.157	0.413	191.37	2.03

本文定义敏感度系数计算公式如下:

$$\mu_\kappa=\left(\frac{\Delta\Omega}{\Omega}\right)/\left(\frac{\Delta m}{m}\right) \tag{5}$$

式中:μ_κ 为敏感度系数;Δm 为汇流参数变化值;Ω 代表汇流时间、洪峰流量或平均流速值;$\Delta\Omega$ 为汇流时间、洪峰流量或平均流速相应变化值。

库内区域及拦洪坝上游各参数敏感性分析结果见表 9、表 10。由表 9、表 10 可知,汇流时间对参数 m 的敏感性系数在库区与拦洪坝上游均表现出持续下降的趋势,变化规律显著;平均流速的敏感性系数则保持相对稳定,未发生明显变动。

表 9 库内区域各参数敏感度分析

Table 9 Sensitivity analysis of parameters in the tailings pond area

Δm	汇流时间敏感度系数 μ_τ	洪峰流量敏感度系数 μ_q	平均流速敏感度系数 μ_v
0.100	−1.62	53.50	1.20
0.100	−1.24	68.00	1.20
0.100	−0.95	68.40	1.40
0.100	−0.74	68.40	1.40
0.043	−0.65	141.63	1.40

表 10 拦洪坝上游各参数敏感度分析

Table 10 Sensitivity analysis of parameters in the area upstream of the flood control dam

Δm	汇流时间敏感度系数 μ_τ	洪峰流量敏感度系数 μ_q	平均流速敏感度系数 μ_v
0.070	−2.73	264.71	2.71
0.100	−1.31	194.80	2.00
0.100	−0.99	223.30	2.10
0.100	−0.70	191.00	2.20
0.100	−0.63	231.00	2.20
0.057	−0.54	95.61	2.46

值得特别注意的是,洪峰流量敏感性响应存在区域差异:库区范围内,该系数在经历初始上升后趋于平稳,最终急剧升高;而在拦洪坝上游区域,则呈现先略微下降、继而保持稳定、最后陡然降低的变化过程。尽管二者变化模式存在差异,但其敏感性结构均在参数 m 临界值处发生显著转变,这一共性揭示了不同区域水文响应机制的关键区别。

6 结论

汇流参数是洪水计算中的关键敏感性因子,显著制约着洪峰流量大小、峰现时间早晚以及洪水过程线的形态特征。在尾矿库工程实践中,需充分考虑尾矿库特小流域属性,并结合具体地形条件、植被覆盖状况、流域特征与排洪系统布置形式,对 m 值进行科学率定与修正,不宜直接采用地区经验值或全国性规范中的推荐取值范围。若参数取值存在偏差,将可能导致安全储备降低或工程投资效益不佳,此问题必须引起尾矿库设计、安全评价及相关科研人员的高度重视。

(1) 响应特性分析表明,不同流域汇流时间对于参数 m 的敏感程度均随其取值增大而逐步减弱,呈现出明确一致的递减规律;相比之下,平均流速对参数 m 的敏感程度则波动较小,整体保持稳定。

(2) 洪峰流量对汇流参数的响应在不同区域呈现显著差异,且在汇流参数达到临界值时其敏感性结构发生明显突变,揭示了不同区域水文响应机制的内在区别。尤其需要关注洪峰流量随 m 值变化的响应规律,特别是在缺乏调蓄能力的流域中,该参数的取值直接决定了水工建筑物的结构尺寸与断面设计。

(3) 对于具有上游截洪设施的尾矿库,上游汇水面积超过 10 km^2 是一个关键节点[1]。在此情况下,汇流参数 m 的取值对行洪能力计算尤为敏感,其确定过程必须慎之又慎。

尾矿库所在特小流域受强烈地形约束,其下垫面属性与降雨空间变异性均与常规水库流域存在显著差异[20-21],因此迫切需要构建有效耦合地形特征的暴雨-洪水动态响应模型。可综合无人机遥感、卫星影像与地面传感设备等多源信息,建立高分辨率地形、植被及土壤数据库,通过优化算法实现 m 值率定与反演,以提高该参数在水文资料缺乏地区的计算可靠性。在实际工程设计中,应坚决遵循“本地化适配与多维度验证”相结合的原则,杜绝因参数误用导致漫坝溃坝事故或工程经济效益降低的风险。

参考文献(References):

[1] 幸新涪,周火明,秦维,等.基于流量-面积比值的小流域设计洪水计算方法对比研究[J].长江科学院院报,2018,35(1):57-62.
Xing Xinfu, Zhou Huoming, Qin Wei, et al. Comparison of calculation methods for design flood of small catchments based on flow-area ratio [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2018,35(1):57-62.

[2] 杨敏,李妍.新旧手册图集推理公式法的应用分析[J].陕西水利,2022(12):52-54+57.
Yang Min, Li Yan. Application analysis of the inference formula method of the new and old manuals atlas [J]. Shaanxi Water Resources,2022(12):52-54+57.

[3] 陈家琦,张恭肃.推理公式汇流参数 m 值查用表的补充[J].水文,2005(4):37-38.
Chen Jiaqi, Zhang Gongsu. Supplement to the lookup table for the concentration parameter m in the rational formula [J]. Journal of China Hydrology,2005(4):37-38.

[4] 许强.推理公式法在山区洪水变化规律分析中的应用[J].水科学与工程技术,2017(3):53-56.
Xu Qiang. Application of inference formula method in analysis of flood changing law in a mountainous watershed [J]. Water Sciences and Engineering Technology,2017(3):53-56.

[5] 索明生,张靖梅.推理公式中汇流参数对洪水计算的影响分析[J].杨凌职业技术学院学报,2013,12(2):39-41.
Suo Mingsheng, Zhang Jingmei. Analysis of the influence of confluence parameter in inference formula on flood calculation[J]. Journal of Yangling Vocational & Technical College,2013,12(2):39-41.

[6] GB 39496—2020 尾矿库安全规程[S].

[7] SL 44—2006 水利水电工程设计洪水计算规范[S].

[8] 李其江.青海省水文手册[M].西宁:青海人民出版社,2018.
Li Qijiang. Hydrological manual of Qinghai Province[M]. Xining:Qinghai People's Publishing House,2018.

[9] 赵银玲,吴铁林,王素荣.基于产汇流理论的设计洪水推理公式方法改进[J].人民长江,2018,49(20):29-34.

Zhao Yinling, Wu Tielin, Wang Surong. Improvement of reasoning formula method for design flood based on runoff generation and confluence theory[J]. Yangtze River,2018,49(20):29-34.

[10] 周学国,滕凯,邹伟.小流域设计洪水计算方法的简化[J].东北水利水电,2001,19(7):17-18.
Zhou Xueguo, Teng Kai, Zou Wei. Simplified method of design flood calculation in small river basin[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2001,19(7):17-18.

[11] 张丽霞,梁新平.推理公式法在资料匮乏地区小流域洪水计算中的应用[J].东北水利水电,2023(1):25-26.
Zhang Lixia, Liang Xinping. Application of inference formula methodin flood calculation of small watershed in data deficient area[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2023(1):25-26.

[12] 何锡阳,李河,张向向.推理公式法在周口店遗址洪水设计中的应用[J].海河水利,2024(2):71-74.
He Xiyang, Li He, Zhang Xiangxiang. Application of the rational formula method in flood design for the Zhoukoudian site[J]. Haihe Water Resources,2024(2):71-74.

[13] 胡娟娟,翁朝晖,徐峰.湖北省特小流域洪水汇流参数复合综合分析[J].水利水电技术,2016,47(8):97-101.
Hu Juanjuan, Weng Zhaohui, Xu Feng. Comprehensive analysis of flood concentration parameters for extremely small watersheds in Hubei Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(8):97-101.

[14] 赵玲玲,刘昌明,王梓尹,等.中小流域暴雨洪水计算及参数地理综合研究进展[J].热带地理,2023,43(11):2119-2134.
Zhao Lingling, Liu Changming, Wang Ziyin, et al. Storm and flood prediction and progress in parameter synthesis research in small and medium-sized watersheds[J]. Tropical Geography,2023,43(11):2119-2134.

[15] 李若晴.小流域设计洪水计算中的推理公式法研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
Li Ruoqing. Research on the reasoning formula method in design flood calculation for small watersheds[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2023.

[16] GB 50863—2013 尾矿设施设计规范[S].

[17] 魏国晋,何灼伦,王统旭,等.推理公式法在青海省应用的误差分析[J].人民黄河,2021,43(9):48-51+78.
Wei Guojin, He Zhuolun, Wang Tongxu, et al. Application and error analysis of hydrological reasoning formula method in Qinghai Province[J]. Yellow River,2021,43(9):48-51+78.

[18] 盖永岗,付健,李超群.推理公式计算淤地坝设计洪峰时暴雨递减指数取值研究[J].人民黄河,2021,43(10):67-69+80.
Gai Yonggang, Fu Jian, Li Chaoqun. Study on storm decline index in rational formula used in design flood peak of warping dam[J]. Yellow River,2021,43(10):67-69+80.

[19] 杨淑萍.黄土地区小流域设计洪水计算公式对比分析研究[J].建设科技,2022(22):38-40.
Yang Shuping. Comparative analysis of design flood calculation formulas of small watershed in loess region[J]. Construction Science and Technology,2022(22):38-40.

[20] 李允军,宋星原,葛恒凤,等.淮安市龙王山水库流域洪水预报研究及应用[J].三峡大学学报(自然科学版),2005,27(3):209-212.
Li Yunjun, Song Xingyuan, Ge Hengfeng, et al. Research and application of flood forecast to Longwangshan Reservoir in Huai'an City [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2005,27(3):209-212.

[21] 党记刚.水土保持措施对陕西某河流流域产汇流参数的影响研究[J].中国新技术新产品,2023(2):123-125.
Dang Jigang. Study on the influence of soil and water conservation measures on runoff and concentration parameters in a river basin in Shaanxi[J]. New Technologies and New Products of China,2023(2):123-125.