

文章编号:0559-9350(2019)03-0283-11

中国高坝枢纽泄洪雾化研究进展与前沿

练继建, 刘 丹, 刘 昉

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 高坝枢纽泄洪安全防护是水利工程领域的重要课题之一。具有高水头、大流量、窄河谷特征的中国高坝枢纽, 泄洪伴生的雾化问题非常突出。面向中国水电工程向高海拔低气压地区发展的现实需求, 复杂环境下的泄洪雾化机理、以及高精度的遥测预测方法和科学化的危害防治技术急需突破。文章基于国内外相关研究成果和工程实践应用, 构建了中国高坝枢纽雾雨场源及防护体系; 凝炼了当前高坝枢纽泄洪雾化的发展成果和技术瓶颈; 全面阐释了关键科学技术问题的突破方法。研究成果以推进泄洪雾化研究从经验走向科学, 为重大水利水电工程设计及其长期安全运行提供理论和技术支撑。

关键词: 高坝雾化; 场源特征; 复杂泄流环境; 原型遥测; 细观试验; 精细预测; 危害防治

中图分类号: TV135.2

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180468

1 研究背景

高坝枢纽泄洪雾化可视为一种非自然的危害性气象事件, 贯穿于大坝泄洪全周期, 表现为弥漫的大雾和宣泄的暴雨。近30年来, 中国大批高坝或超高坝相继开始建设运行, 坝址多集中在水能资源丰富的西南西北高山峡谷地区, 并向高海拔地区发展。高水头大流量的泄洪需求、高海拔低气压的复杂气候环境、以及高边坡窄河谷的复杂地形环境, 使得中国高坝泄洪环境越来越复杂, 泄洪雾化引发的安全问题越凸显, 并成为高坝泄洪安全的挑战性难题之一^[1-2]。

高坝枢纽泄洪雾化伴生着水-气两相流的复杂交互作用, 其雾化效应受多因素影响, 既受枢纽布置、结构设计、调度方式等主观形成的水力条件影响, 同时也受气象气压、地形地物等客观条件的影响。高坝枢纽泄洪雾化严重的工程往往具备“高水头、大流量、窄河谷”等共性特征。国外工程的单宽泄洪功率相对较小、且河谷相对较宽, 因此泄洪雾化的研究和报道较少^[3]。自1970年代开始, 中国黄龙滩、白山和乌江渡等工程相继发生严重雾化危害, 使得学术界和工程界开始关注泄流雾化问题^[1]。国内众多学者就雾化问题, 侧重性地开展了相关研究, 并在定性描述、定性分析、定量评测和定区防护等方面取得了重要成果。刘宣烈和梁在潮等^[4-5]是开展雾化研究的早期学者, 就雾化影响域分区, 主雾源分类和雾化范围预测等方面做了探索研究。高坝枢纽泄洪雾化预测主要是识别雾雨区的影响域和防护工况的设置, 进而指导工程分区防护设计。大比尺模型试验方面, 吴时强、陈惠玲和陈瑞等^[6-7]就雾化工程模型律的选择及雨强缩尺效应等开展了基础研究, 研究成果有效提升了雾化问题模型化预测的可行性。大尺度数值模拟方面, 练继建和张华等^[8-10]早期建立的水电站挑流雾化随机喷溅数学模型和比较完整的水电站底流泄洪雾化数学模型, 以及刘之平等^[11]发展的泄洪雾化人工神经网络预测模型, 均在工程应用中长期反馈发展。原型观测方面, 二滩水电站(1999年)和锦屏I级水电站(2014—2015年)等典型工程的雾化原观资料, 也进一步丰富了中国高坝特高坝工程雾化

收稿日期: 2018-05-21; 网络出版日期: 2019-03-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190320.1636.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401704); 国家自然科学基金-雅砻江联合基金项目(U1765202)

作者简介: 练继建(1965-), 教授, 主要从事工程水力学与水利水(风)电工程安全研究。E-mail: jilian@tju.edu.cn

研究的基础数据库^[12]。

中国高坝枢纽泄洪具有地形复杂各异性、气象环境多变性和调度方式多样性等特点，因此，对其泄洪雾化预测的精确度、可信度和灵活度，提出了非常高的要求。本文阐述了中国高坝枢纽泄洪雾雨场源及防护体系，并研析了泄洪雾化原型观测、物理模型和数值模拟方面的主要成就与发展前沿，凝炼了“复杂环境下高坝枢纽泄流雾化机理与遥测-预测-危害防治技术研究”的核心攻关难题，旨在为泄洪雾化的深层次研究和预测从理论走向实际，从经验走向科学，奠定良好基础。

2 中国高坝枢纽雾雨场源及防护体系

中国高坝枢纽雾雨场源及防护体系构建，以二滩水电站和锦屏 I 级水电站，以及水布垭水利枢纽和去学水电站的研究资料为基础，以泄洪源、泄洪水舌、雾雨源、雾雨场、雨强分区、防护分区为核心构件，体系示意图 1。

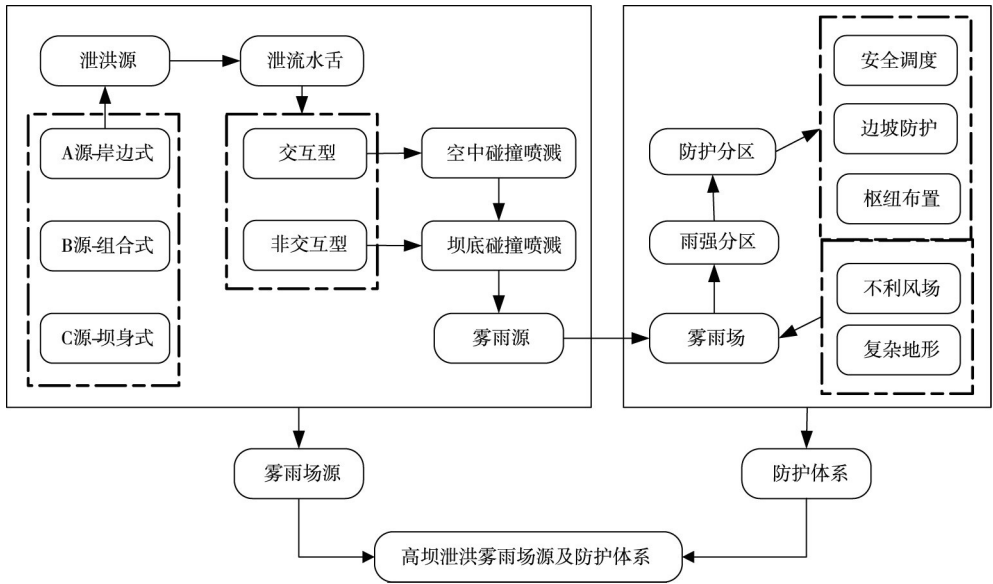


图 1 中国高坝枢纽雾雨场源与防护体系

高坝泄水建筑物的常见泄洪源分为 A 源-岸边式泄洪，B 源-坝身岸边组合式泄洪，C 源-坝身式泄洪。其中，岸边式和组合式泄洪设计应用相对广泛，岸边式泄洪设计常用于土石坝类工程，如水布垭水利枢纽（左岸 5 孔溢洪道）和去学水电站（右岸 1 条溢洪道+1 条泄洪洞）等^[13-14]；组合式泄洪设计常见于高拱坝工程，如二滩水电站（7 表孔+6 中孔+右岸 2 条泄洪洞）和锦屏 I 级水电站（4 表孔+5 深孔+右岸 1 条泄洪洞）等^[11-12]。

泄洪水舌是雾化源的载体，运动过程分为交互型和非交互型，交互型的水舌增加了空中碰撞的雾雨源生产过程。高速水舌自泄洪源下泄，消能水舌在局限的空间内经历掺气、碰撞、喷溅等过程，伴随相态转换，形成雾雨源。高坝泄洪雾雨源与泄洪方式相关，见图 2。高坝底流消能雾雨源包括 1 区-坝面溢流面水流自掺气和 2 区-水跃区水流强迫掺气，且 2 区为主雾雨源区，典型应用工程包括金安桥水电站和官地水电站^[15-16]。高坝挑流消能雾雨源包括 3 区-空中水舌自掺气，4 区-水舌碰撞强迫掺气，5 区-水舌入水强迫掺气，且 4 区和 5 区为主雾化源区，典型应用包括二滩水电站和锦屏 I 级水电站^[11-12]。

高坝枢纽泄洪雾化宣泄暴雨场的分布特征受水力条件、气象条件和地形条件综合作用影响。①水力条件相关性受流量和水位等首要因素影响外，还与消能方式、挑坎体型、调度方式等直接相关；底流消能的雾化危害和潜在危害程度较小，可根据实际需要做雾化效应评估，如向家坝水电站

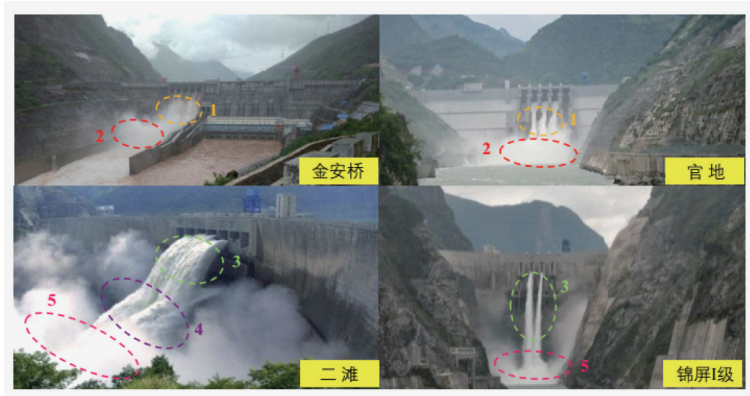


图2 典型高坝枢纽泄洪雾雨场源分区

需要对距离其消力池末端约 500 m 的水富县城及受空气湿度影响的云南天然气化工厂的雾化影响进行了评估研究^[17]；挑流消能水利枢纽的泄洪雾化危害和潜在危害程度较大，需要特别重视，水舌空中适度碰撞可提高水舌消能效果，降低水舌冲击区防护标准，但会增加雾源并加剧雾化效应，许唯临等对表中孔碰撞消能方式和表中孔无碰撞泄洪消能方式进行了对照分析，并就锦屏 I 级水电站的挑坎设计进行了试验研究^[18]；部分新型消能工可以增强水舌的扩散效应，但也会加剧雾化效应，如纳子峡水电站溢洪道水工模型试验表明，相同泄流条件下，通过挑坎体型优化可减轻厂房的雾化问题^[19]。② 气象条件相关性受泄洪时段和环境风场影响，二滩工程雾化原型观测发现工程阴雨天和早晚的自然蒸发作用弱，雾化范围较晴天和中午大，中午比早晚雾雨范围小^[11]；环境风在泄洪方向上的分量，对雾雨范围纵向扩散长度影响较大，与泄洪方向垂直的风分量，环境风对雾雨范围横向扩散高程影响较大；此外，湿度和空气阻力变化也会作用于扩散水舌和喷溅水滴^[20]。③ 地形条件相关性，不考虑自然风作用，通过概化地形条件模拟的雾化影响范围表明，纵向雾雨影响域沿泄洪中心线通常表现为近似对称分布，高程雾雨影响域表现为河道狭窄区的水雾爬高明显；缓坡大暴雨区范围和降雨梯度小于陡坡，横向雾雨影响域在河道转弯处凹岸的雨强和梯度较凸岸大^[20]。④ 雾雨场尺度相关性，坝身式泄洪雾雨场纵向范围长，高度范围大，包络区域内坝区专用建筑防护要求高；岸边式泄洪，包络区域内的对岸山坡是重点防护区；坝身式泄洪雾雨场和岸边式泄洪雾雨场空间一般不叠加；厂房选址、开关站选址等要考虑避开雾雨场影响区，并合理配套排水设施；在调度方式相对最佳的情况下，与总泄量呈现正相关关系； $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强线纵向包络区范围在相同泄量条件下，受调度方式的影响明显^[1,12,21]。

雾雨场的空间特征是附属环境风场和地形特征的雾雨源本体运动组合，雾雨包络区的分区防护基于雨强界线划分，常见的雨强界线包括 3 种组合：① 2 、 10 和 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[22]；② 0.5 、 10 和 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ；③ 200 和 $600 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[23]。工程建设筹备期的雾雨场预测手段包括工程经验类比、大比尺模型试验和数值模型计算等方法，主要服务于工程的枢纽布置优化和边坡分区防护措施优化。工程服役期内的雾雨场反馈分析手段包括原型观测，数值模型反馈预测，物理模型反演等方法，主要服务于工程运行期的安全调度优化和病险工程的再优化修复。目前，泄洪雾化的综合防护体系包括雾雨影响域的科学预测、水利枢纽的优化布置、薄弱区域的有效防护，调度方案的合理制定，以及应急措施的有效实施。泄洪雾化危害防治往往依据泄洪雾化影响预报结果，按照不同级别影响，采取相应的防护措施。对于分级标准，周辉、吴时强等^[23]根据原型观测和模型试验成果首次提出了泄洪雾化影响分级标准和分区防护措施，在锦屏 I 级、溪洛渡等水电站泄洪雾化防护措施中均按照其标准和分区防护措施设计并实施。但限于当时水电站泄洪规模和下游地形复杂程度，一些分级标准的合理性和分区防护措施的有效性尚待进一步研究论证。例如，从二滩工程的预测和运行情况来看，存在 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强内包络区范围预测不足的情况^[24]；且在有效预测的情况下， $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强的内包络区范围也很大，如何经济有效地开展该区域的防护仍需要进一步讨论。

此外,泄水建筑物科学的运行调控也是减轻泄洪雾化危害的重要和有效手段,目前这方面的研究很少涉及。根据高海拔低气压泄洪雾化特性,针对不同地形条件和不同气候,研究提出合理的水电站运行调控方式,探讨通过泄水建筑物运行调控方式减轻泄洪雾化所带来危害的途径,提出低雾化影响的泄水建筑物运行调控准则,将成为时效可控的雾化安全防护技术;高海拔、低气压、高边坡地区,特殊环境下泄洪雾化分级标准也缺乏充分的研究。因此也有必要利用高坝枢纽泄洪雾化原型观测资料及模型试验成果,修正这些分级标准,细化防护措施。

3 原型观测研究进展与前沿

原型观测是认知泄洪雾化现象的基础,为泄洪雾化理论研究和工程设计积累了坚实的基础。早期的雾化问题工程相对集中,主要的致灾源考虑雾雨长历时的累计效应和雾化强降雨的瞬态效应,集中表现为:①输电线路短路,典型工程包括刘家峡水电站;②坝区边坡失稳,典型工程包括李家峡水电站;③车间厂房淹水,典型工程包括黄龙滩水电站等;④运行机组停机,典型工程包括青铜峡水电站等;⑤道路交通中断,典型工程包括风滩水电站等;⑥健康生活威胁,典型工程包括柘溪水电站等^[1]。刘宣烈等在早期掺气水舌运动特征研究和泄洪雾化工程原观测试分析的基础上,概化了包含浓雾暴雨区、薄雾降雨区和淡雾水汽飘散区的雾化影响域分区,并提出了以最大坝高为基准的雾化分区范围预报公式^[4]。之后,随着预测和防护水平的提高,雾化问题工程的数量相对减少,但也有时有发生,如水布垭水利枢纽2016年7月9日遭遇了百年一遇强降雨和50年一遇泄洪工况,出现了严峻的雾化致灾险情^[13]。因此,“大暴雨、大洪水、强雾化”等特殊工况下的泄洪雾化安全防控也需要重视。

原型观测中,二滩水电站的坝身泄洪和泄洪洞泄洪的测定实测最大雨强值分别为 $2071\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $1537\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,分别对应2[#]—6[#]表孔+3[#]—5[#]中孔联合泄洪工况($Q=7748\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)和1[#]、2[#]泄洪洞联合泄洪工况($Q=7378\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)^[11];锦屏I级水电站的坝身泄洪和泄洪洞泄洪的实测最大雨强值分别为 $534\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $331\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,分别对应2/4[#]深+2/3[#]表联合泄洪工况($Q=4100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)和泄洪洞开度75%泄洪工况($Q=2130\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)^[12];溪洛渡水电站的坝身底孔系列泄洪工况中,在2[#]、4[#]、5[#]和7[#]深孔全开($Q=5000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$),左右岸实测最大雨强分别为 $4704\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $4412\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ^[25]。测试工程的最大雨强值为所布置测点在测试工况下的最大值,不同测点的定位测试雨强数据,在指导工程雾化安全防控之外,也为高坝泄洪雾化的数值模拟预测提供了参数率定的基础依据。

雾化雨原型测试传统方法主要有摄影摄像法、电测自记法和人工直读法。自记电测仪器的设计研发有必要考虑超高强度降雨和斜向降雨的测试需求^[26]。目前的原型观测多是对雾化雨量的定点观测。从泄洪雾化机理研究角度来看,仅仅观测定点的雾化雨量,还难以确定泄洪消能过程各环节产生的雾源量。为了进一步明确泄洪雾化机理,推进泄洪雾化研究从经验走向科学,需要对泄洪雾化水汽浓度空间分布规律进行原型观测,但其观测的难度极大,目前仍缺乏泄洪雾化区域水汽浓度原型遥测的技术。

关于泄洪雾化水汽浓度分布和雾滴粒度特性的原型观测研究很少,而气象和消防领域的水雾浓度和粒度的观测研究相对较多。杜效云等^[27]提出利用高灵敏度的 β 射线投射法测量高坝枢纽泄洪雾化浓度,该方法属于点位或线位测量,很难测量雾化的二维分布,且具有放射性,对环境危害较大,较可见光和红外光,毫米波对云、雾和固态物体有更强的穿透能力;Lovberg等^[28]提出一种基于稀疏阵列的毫米波辐射测量仪;Kim等^[29]通过傅立叶时域变换和有限元方法求解了毫米脉冲波在雾和雨层中辐射传递方程,得到了毫米脉冲波在雾和雨层中传输的特性;Yunlong Li等^[30]在荷兰Cabauw试验场地用35GHz毫米云雷达、可见度传感器以及前向散射光谱仪(粒子尺寸分布)进行了雾测量实验。目前的毫米波雾场测量技术只能得到毫米波传播路径上的雾场浓度均值,且只适用于能见度几百、上千米的薄雾场,并不适用于泄洪雾化这样的高浓度、快速时变梯度的雾场测量。

随着气象卫星多光谱探测器的发展,基于多光谱组合的遥测技术已经成为雾场测量的研究热

点。Hunt等理论证明了应用中红外(3.7 μm)和热红外(11.0 μm)双通道的亮度温度差可以有效地从多光谱图像中识别、提取夜间雾场^[31]；Simpson等指出双通道红外图像并不适合云雾层厚度小于100m的情况^[32]。可见光到近红外光波段(0.4~1.1 μm)更多地被用于日间雾多光谱图像的识别^[33-35]。应用多光谱雾场图像可反演雾场的微物理特性参数，如光学厚度、垂直(几何)厚度、有效粒子半径等^[36-38]。总体来看，目前的多光谱组合雾场遥测技术普遍针对自然雾，且雾场多光谱辐射传输特性与其微物理特性参数关系的数学模型、数值仿真以及反演算法研究有待深入。针对高坝枢纽泄洪雾化这种大浓度、大变化梯度、局地化的雾场，未见多光谱组合遥测方法的报道。另一方面，多光谱组合遥测技术用于雾场监测也有其他方法无法比拟的优点，该方法不但能反演雾场的微物理特性参数，而且能得到雾场水汽浓度的二、三维分布。李晓望等提出一种基于云顶温度、云高、云光学厚度卫星产品数据，利用大气物理学相关知识计算云粒子中光传播方程的三维云景直接可视化方法^[37]。星载多光谱探测器不能控制接收雾场散射光辐射的方位和角度，属于被动接收，通过在遥测系统中引入主动光源，并优化、控制多波段光源与接收系统的相对位置关系，有望获得更加丰富的雾场散射光信号，用于高坝枢纽泄洪雾化测量，反演出雾场浓度二维、三维分布。

除泄洪雾化水汽浓度的测量之外，雾场粒度特性也是雾化研究关注的问题，以往原型观测中很少测量雾场的粒度特征。粒度特征的测量多数是基于图像和光学方法^[39]。光学散射(衍射)法是目前非接触测量固体、液滴和气泡颗粒最有效的方法。小角前向散射法是目前公认在流体或雾场中测量粒度或粒度分布最为有效的方法。天津大学是国内采用激光散射方法研究粒子测量最早的单位。自1980年代开始，天津大学在粒子测量的原理、关键器件与系统、数据处理模型与算法、校准与标定等方面进行了系统深入研究，研究成果居于领先地位，1987年完成了国家科委项目“DP-01型快速滴谱仪”的研制，1991年研制出LPS-I型激光粒度仪，此后相继开发多种型号的激光喷雾粒度测试仪^[40-41]。图像法一般采用基于Mie散射的PIV方法^[42]，但对于高浓度或高速度的流场测量比较困难。多普勒法(PDV或LDV)，是由多普勒频移得到粒子速度，同时得到粒度，但重建二维或三维粒子场的粒度和速度非常困难^[43]。已有雾场粒度测量方法，对雾场空间分布测量范围有限，主要集中在小型喷嘴及雾场，对于空间分布范围大的雾场实现起来非常困难^[44]。如何发挥激光散射定点测量和多波段光谱遥测的组合优势是泄洪雾场原型观测需要进一步深入研究的问题。

随着中国水电工程的持续性开发建设，复杂气候地形环境下的高坝枢纽泄洪雾化原型观测有必要持续开展，并向着观测技术遥测化，观测样本特色化、观测尺度多样化等方向综合突破。基于主-被动多波段光谱组合(可见光-毫米波组合)的雾化浓度空间分布的遥测技术和激光散射雾化浓度粒度测量及遥测标定技术的研发应用，有望突破泄洪雾化区域水汽浓度遥测技术，获取大坝雾化区域水汽浓度二维分布，为反演泄洪雾化的变化规律研究提供数据支撑，进而为复杂环境下的高坝枢纽泄洪雾化机理研究和科学预测调度提高基础数据支撑。

4 物理模型研究进展与前沿

泄洪雾化室内物理试验具有直观的特点，室内物理试验是研究高坝枢纽泄洪雾化重要的手段之一，室内物理试验包括用于机理研究的专项试验和大比尺模型试验。

在泄洪雾化机理研究方面，主要包括掺气水舌运动形态和水舌入水喷溅过程。刘宣烈等在1980年代开展了掺气水舌形态和扩散特征的模型试验研究，提出了考虑空气阻力作用的掺气水舌挑距计算方法^[45-47]；之后通过水舌喷溅模拟专项试验，概化水舌喷溅过程为撞击、溅水和流动形成阶段，假定喷溅水滴形状为圆球体，运动形式为反弹斜抛，以溅水出射角和初始抛射速度重值为基础，计算了水舌喷溅空间影响尺度^[4,48]。梁在潮和刘士和等根据雾化形态划分了雾化运动模式，提出了在重力、浮力、空气阻力和水舌风作用下的水滴反弹斜抛运动计算方法，并用以进一步计算水滴喷溅横纵向影响范围^[49]。练继建等开展的随机喷溅试验和柳海涛等开展的随机溅水试验，均属自设计的试验装置，测试对象为喷溅水滴的空间分布特征，为雾化喷溅雾源数学模型的研究提供率定数据^[50-51]。

刘昉和张晓军等采用LSA-III型激光粒度测试仪开展高速水射流液束雾滴谱的试验研究,实测发现 $20 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的射流液束存在明显的二次雾化过程,且射流液束下侧雾滴的SMD大于上侧,分析了原型泄洪水舌下侧液滴成泼洒状,且平均直径明显大于上侧雾状液滴的现象^[52-53]。

大比尺模型雾化试验方面,考虑表面张力相似准则,水工模型和原型雨强影响域根据几何比尺换算,但雨强相似律确定比较困难,受限因素包括:(1)雨雾滴谱存在“变态”相似现象;(2)气流动力边界不相似;(3)雨滴、雾滴的碰并和扩散过程不相似等。从雾化原型和模型对比结果分析,工程不同比尺模型的雾化雨强相似比尺离散性大(见图3),可相差 $10 \sim 100$ 倍。根据系列比尺模型测试研究,吴时强等推荐雾化雨强比尺按几何比尺的1.53次方换算的方法,并将其作为泄洪雾化雨强的外包络线控制值^[6]。陈瑞等开展了江垭和构皮滩工程的雾化系列比尺模型试验研究,对抛洒区、溅水区和雾流降雨区的雨强相似律进行了分区率定,提出了一种联合优势雨频和优频雨强的溅水区雨强引申经验公式^[7]。但是由于不同雾源形成的降雨相似关系存在差异,因此需深化对不同雾源降雨的相似关系研究。

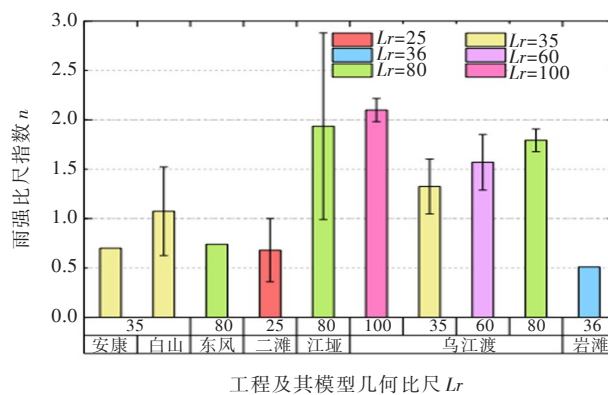


图3 雾雨强度比尺指数与模型几何比尺的关系

高坝枢纽泄洪雾化过程中,目前对高海拔低气压环境下水舌水滴喷溅、碰并、破碎及雾化规律影响机制的研究目前仍处于空白。高坝泄洪水舌的水滴掺气、散裂、破碎、喷溅、飘逸、碰并的微动力机制,以及雨雾源量和雨雾滴谱等微细观机理和响应机制需要做进一步阐释。

5 数值模拟研究进展与前沿

基于泄洪雾化原型观测反馈分析,建立泄洪雾化数值模型,以预测雾化影响范围,是目前解决雾化问题的有效手段之一。

练继建和张华等早期建立的挑流雾化计算模型融合了泄水建筑物体型设计参数、水力设计及调度参数、复杂地形参数、以及环境风和自然风影响;以主要雾化源-水舌空中碰撞喷溅和入水碰撞喷溅为研究对象;采用蒙特卡罗方法和四阶龙格-库塔法,计算挑流泄洪雾化区的地面降雨强度,进而结合雾化雨强标准确定雾化影响范围,通过漫湾、李家峡、乌江渡、二滩等工程的反馈验证,在乌东德、构皮滩、洪口和白鹤滩等工程上实践应用^[17, 54-55];底流雾化计算模型以主要雾化源——水跃区强逼掺气为研究对象,综合雾雨转换碰并、以及雾滴的凝结蒸发等微物理过程,得到水雾雾源量的计算式以及雾源下游场的水雾浓度和雨强分布特征,进而获得相对湿度和温度特征,通过湾塘水电站和葛洲坝二江泄水闸右区工程的反馈验证,在向家坝的泄洪雾化影响研究中应用;向家坝泄洪雾化数值预测结果指出,洪水频率大于5%并附加不利风场(风向NW和平均风速 $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的各工况均不会对距离消力池末端约500 m的水富县城及受空气湿度影响的云南天然气化工厂产生明显影响^[17]。向家坝的数值预测成果与2012年10月—2013年9月,向家坝的原型观测反馈资料一致^[56]。

戴丽荣等早期应用BP神经网络模型对挑流泄洪雾化范围和降雨强度进行预测,可以快速地给出暴雨区长度、暴雨区宽度、毛毛雨区长度和毛毛雨区宽度^[57]。刘之平、孙双科和柳海涛等根据水滴出射速度与粒径之间存在一定的相关性,对水滴随机喷溅数学模型做了发展研究,对雾雨扩散进行了模拟研究,并发展了将泄洪流量、入水流速、入水角度以及三维河谷地形坐标等作为输入变量,预测雾化降雨强度分布的泄洪雾化人工神经网络预测模型^[10,58];模型在丰满、两河口等工程中实践应用,推荐丰满水电站重建工程的优化调度次序依次为中区4[#]—6[#]溢流表孔、右区7[#]~9[#]溢流表孔,左区1[#]—3[#]表孔,两河口水电站溢洪道和泄洪洞联合泄洪工况的优化调度方案是适度增大溢洪道流量^[59-60]。刘士和等基于水滴运动过程中会变形的物理特征,得到溅抛水滴运动的阻力系数,对溅抛水滴运动进行了数值模拟,并分析了水滴直径对溅抛长度的影响等^[61-62]。黄国兵等提出一种基于雾化原型观测资料的雾化降雨强度模糊综合评判方法,针对江垭大坝左岸导流洞下游岸坡雨强进行了预报分析^[63]。张华等综合WRF模式和流体理论,通过WRF对河谷地形和风场进行了精细模拟^[64-65],为泄洪雾化模拟研究提供了新思路。

目前的泄洪雾化数值模型预测研究工作,未涉及高海拔低气压环境下的雾化特性,因此急需建立低气压和复杂地形环境下泄洪雾化数值模型研究,开展复杂地形环境下坝区小微尺度的风速、温度、压强、湿度物理量等的大气模式WRF和CFD模块的耦合数值模拟,建立包括暴雨区和雾流扩散影响区的精确高效的泄洪雾化数值模型。

6 复杂环境下高坝枢纽泄流雾化的前沿问题研究

目前,综合原型观测、室内试验、机理分析和数值模型等方法,通过发挥多学科交叉融合的优势,开展高坝枢纽泄流雾化相关问题的基础应用研究非常关键。从水利工程的主要环境影响角度出发,刘之平等提出,目前需要开展“泄洪消能雾化对周边环境的影响及缓解技术”的课题研究^[66]。从基础研究为工程需求服务的角度出发,“复杂环境下高坝枢纽泄流雾化机理与遥测-预测-危害防治技术研究”是中国高坝雾化问题,尤其是高海拔高坝雾化问题,急需研究的重要课题。“复杂环境下高坝枢纽泄流雾化机理与遥测-预测-危害防治技术研究”通过研发泄流雾化原观技术,研究泄流雾化细观机理,研究泄流雾化预测理论方法,研究泄流雾化危害防治技术,旨在突破复杂环境下高坝泄洪雾化研究的理论和技术瓶颈,推进泄洪雾化研究从经验走向科学,为重大水利水电工程设计和长期安全运行提供理论和技术支撑。“复杂环境下高坝枢纽泄流雾化机理与遥测-预测-危害防治技术研究”的构架体系见图4,关键科学技术问题分述如下:

(1)研发主-被动多波段光谱组合泄流雾化水汽浓度原观遥测技术。针对高坝泄流雾化水汽浓度大、变化梯度大的特点,开展基于自主研发设计的主-被动多波段光谱组合(可见光-毫米波组合)的雾化浓度空间分布的遥测技术的研究。具体包括:研究高坝泄流雾化场多波段光谱辐射(散射、透射、折射)传输特性,明确光探测器获得的多波段光谱强度信息与雾化场微物理参数信息的对应关系;研究多波段光谱遥感图像中雾化场参数的识别、提取方法,进行多光谱雾化场遥感图像信息的融合、反演雾化场微物理参数(雾场厚度、水汽浓度分布)的算法研究;研究主-被动多波段光源和接收系统的优化布局与测试定位技术。

(2)研发激光散射雾化浓度粒度测量及遥测标定技术。基于自主研发设计的激光散射法和自有组合频谱技术,针对泄流雾化高浓度、宽粒度分布特性,开展激光散射的雾化浓度粒度同步测量方法的研究。具体包括:研发轻小型防水激光散射浓度粒度测试仪,实现泄流雾场水汽浓度和粒度的精确自动测量及数据无线传输;基于激光散射浓度粒度测试仪室内试验和原型定位测试,研究泄流雾化水汽浓度遥测的标定技术及误差评定方法,形成高坝泄流雾化区域水汽浓度现场检测系统,获取大坝雾化区域水汽浓度空间(二维或三维)分布,为反演泄流雾化的变化规律研究提供数据支撑。

(3)开展低气压高速泄流雾化细观特征和微动力机制探索试验。针对高海拔低气压环境下水电站

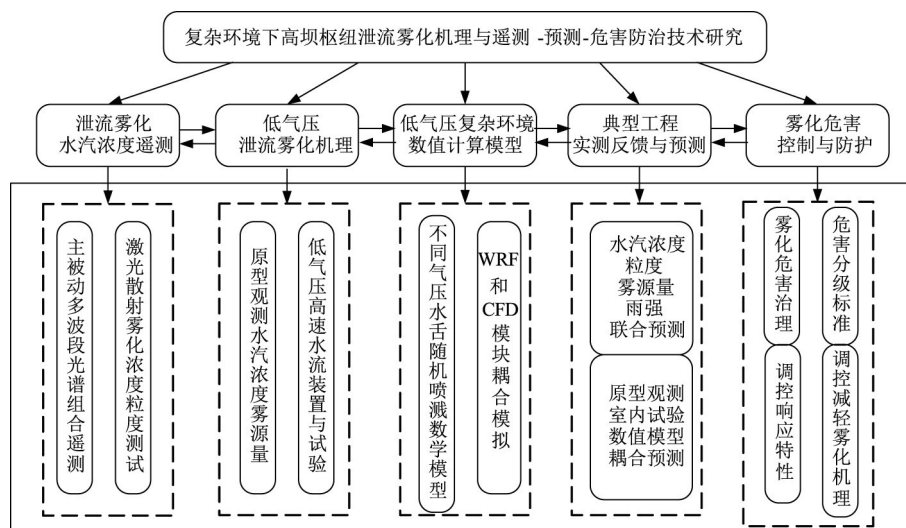


图4 复杂环境下高坝枢纽泄流雾化前沿问题的研究构架体系

泄流雾化特征，基于自主研发设计的低气压高速水流试验装置(流速达 $30 \sim 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)，研究不同气压环境下泄流水舌水滴掺气、散裂、破碎、喷溅、飘逸、碰并的动力机制，研究揭示不同气压环境下泄流雾化机理和雾源量的影响规律。

(4)开展低气压和复杂地形环境耦合的泄流雾化数值模型研发。自主研究建立适用于不同气压环境的挑流水舌随机喷溅数学模型，模拟喷溅水滴的散裂、飞溅、飘逸过程和泄流消能过程各环节产生的雾源量；开展复杂地形环境下坝区小微尺度的风速、温度、压强、湿度物理量等的大气模式WRF和CFD模块的耦合数值模拟，研究建立包括暴雨区和雾流扩散影响区的精确高效的泄流雾化数值模型。

(5)开展典型工程泄流雾化变化规律的原型实测和预测研究。应用自主研制的泄流雾化水汽浓度粒度检测系统开展已建和在建大型水电站的原型观测，结合传统的雾化雨量观测，建立水电工程泄流雾化水汽浓度、粒度、雾源量和雨强联合实测方法；建立原型实测、室内试验、数值模型耦合的泄流雾化雨强和水汽浓度预测方法，反演和预测不同气压环境下典型工程的泄流雾化变化规律。

(6)开展复杂环境下泄流雾化危害防治措施的深化研究。针对高海拔、低气压、复杂地形环境下电站泄流雾化影响，探讨不同雾化降雨条件下边坡稳定性及防护措施有效性，优化防护结构型式，研究提出低气压地区泄流雾化分区及分级防护标准；根据高海拔低气压雾化特性，针对地形条件和不同气候，研究提出合理的水电站运行调控方式，探讨泄水建筑物运行调控方式减轻泄流雾化所带来的危害的途径，提出低雾化影响的泄水建筑物运行调控准则。

7 结论

近30年来，高坝枢纽泄洪雾化研究取得了丰富成果，为中国高坝特高坝工程的泄洪雾化危害防治提供了有效的技术支撑。然而，已有泄洪雾化研究大多是以经验性模型为主，理论和机理的认识深度不够。高坝枢纽泄洪雾化研究需要实现新突破和新发展。

(1)基于随机喷溅理论的经验半经验雾化数值预测模型，在雾化近影响域(雾雨区界)的预测精度较高，但由于其对雾源量的处理是经验性的，所以在预测远区雾流扩散精度上有所欠缺，需要进一步提升。因此，需要重视开发适用于高坝枢纽泄洪雾化区域水汽浓度测试的新装置，实现原型泄洪雾化规律的多尺度监测，获取典型工程大坝雾化区域的水汽浓度空间(二维或三维)分布，为反演泄洪雾化的变化规律研究提供数据支撑。

(2)与此同时,高海拔低气压环境对泄洪雾化的影响研究也需要重视,测试不同气压环境下高速泄洪水舌水滴掺气、散裂、破碎、喷溅、飘逸、碰并的微动力机制,填补高海拔低气压环境对泄流雾化影响识别和泄洪各环节的雨雾滴谱和雨雾源量微物理特性研究的国际空白,有望科学化高坝枢纽泄洪雾化的理论和应用体系,为保障中国西南水电高坝特高坝的泄洪安全提供理论和技术支撑,进而促进世界水环境资源开发应用的和谐持续健康发展。

参 考 文 献:

- [1] 练继建,杨敏.高坝泄流工程[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] 庞博慧,马洪琪.高海拔地区气压环境对高速流水舌挑距的影响[J].水力发电学报,2018,37(2): 88-95.
- [3] 王环玲,徐卫亚.高坝泄洪雾雨的强度和雾流分布范围研究进展[J].三峡大学学报(自然科学版),2010,32(5): 1-6.
- [4] 刘宣烈,安刚,姚仲达.泄洪雾化机理和影响范围的探讨[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),1991(S1): 30-36.
- [5] 梁在潮.雾化水流计算模式[J].水动力学研究与进展,1992(3): 247-255.
- [6] WU SH Q, WU X F, ZHOU H, et al. Analysis and application of the scale effect of flood discharge atomization model[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(1): 64-71.
- [7] 陈端.高坝泄洪雾化雨强模型律研究[D].武汉:长江科学院,2008.
- [8] 张华.水电站泄洪雾化理论及其数学模型的研究[D].天津:天津大学,2003.
- [9] LIAN J J, LI CH Y, LIU F, et al. A Prediction method of flood discharge atomization for high dams[J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(2): 274-282.
- [10] LIU H T, LIU ZH P, XIA Q F, et al. Computational model of flood discharge splash in large hydropower stations [J]. Journal of Hydraulic Research, 2015, 53(5): 576-587.
- [11] 刘之平,刘继广,郭军.二滩水电站高双曲拱坝泄流雾化原型观测报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2000.
- [12] 练继建.锦屏水电站水力学原型观测试验与泄流安全实时监测预警系统研制[R].天津:天津大学,2016.
- [13] 贡建兵,皮军华.水布垭水电站大坝2016年“7·19”水毁事件反思与对策[J].大坝与安全,2018(2): 20-26.
- [14] 练继建.硕曲河去学水电站工程泄洪雾化数学模型研究[R].天津:天津大学,2018.
- [15] 练继建.金安桥水电站原型观测试验研究[R].天津:天津大学,2017.
- [16] 练继建.官地水电站水力学原型观测试验研究[R].天津:天津大学,2016.
- [17] 张华.水电站泄洪雾化理论及其数学模型的研究[D].天津:天津大学,2003.
- [18] 李乃稳,许唯临,周茂林,等.高拱坝坝身表孔和深孔水流无碰撞泄洪消能试验研究[J].水利学报,2008,39(8): 927-933.
- [19] 练继建.纳子峡水电站泄洪洞消能及溢洪道泄水雾化危害研究处理[R].天津:天津大学,2018.
- [20] 练继建,刘昉,黄财元.环境风和地形因素在挑流泄洪雾化数学模型中的影响[J].水利学报,2005,36(10): 1147-1152.
- [21] 柳海涛,孙双科,郑铁刚,等.两河口水电站泄洪雾化影响分析[J].水力发电,2016,42(11): 54-57.
- [22] DL/T5346-2006混凝土拱坝设计规范[S].北京:中国电力出版社,2007.
- [23] 周辉,吴时强,陈惠玲.泄洪雾化的影响及其分区和分级防护初探[C]//全国水力学与水利信息学学术大会.2005.
- [24] 王锋辉.二滩水电站泄洪雾化及防护[J].大坝与安全,2011(5): 42-46.
- [25] 杜兰,卢金龙,李利,等.大型水利枢纽泄洪雾化原型观测研究[J].长江科学院院报,2017,34(8): 59-63.
- [26] 戴晓兵,李延农.水利水电工程泄洪雾化降雨强度观测器[J].水文,2010,30(6): 42-44.
- [27] 杜效云,程和森.用 β 射线测定高坝泄洪雾化浓度[J].核技术,1996(3): 182-185.

- [28] LOVBERG J, CLARK S, WIKNER D, et al . Application of sparse phased arrays to millimeter wave radiometry [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS 96. Remote Sensing for a Sustainable Future, International . IEEE Xplore, 1996, 2: 881-884 .
- [29] KIM A D, SHIMARU A . Optical and millimeter wave pulse propagation through fog and rain layers[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998 . IGARSS 98. 1998 IEEE International. IEEE, 1998: 33-35 .
- [30] LI Y, HOOGEBOOM P, RUSSCHENBERG H . Observations and modeling of fog by cloud radar and optical sensors[C]//European Microwave Conference . 2014: 1824-1827 .
- [31] HUNT G E . Radiative properties of terrestrial clouds at visible and Infra-Red thermal window wave-lengths[J] . Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1973, 99 (420): 346-369 .
- [32] SIMPSON J J, GOBAT J I . Improved cloud detection in GOES scenes over land[J] . Remote Sensing of Environment, 1995, 52(1): 36-54 .
- [33] 吴一青 . 基于遥感影像的大雾识别方法研究[D] . 上海: 华东师范大学, 2009 .
- [34] 周红妹, 葛伟强, 柏桦, 等 . 气象卫星大雾遥感自动识别技术研究[J] . 热带气象学报, 2011, 27(2): 152-160 .
- [35] 陆衍 . 遥感影像云雾分离的BP神经网络方法研究[J] . 上海国土资源, 2015(3): 95-97 .
- [36] BENDIX J . A satellite-based climatology of fog and low-level stratus in Germany and adjacent areas[J] . Atmospheric Research, 2002, 64(1/4): 3-18 .
- [37] 李晓望, 王文珂, 李思昆 . 基于气象卫星数据的三维云景可视化方法[J] . 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2055-2059 .
- [38] 吴晓京, 陈云浩, 李三妹 . 应用MODIS数据对新疆北部大雾地面能见度和微物理参数的反演[J] . 遥感学报, 2005, 9(6): 688-696 .
- [39] FANSLER T D, PARRISH S E . Spray measurement technology: a review[J] . Measurement Science & Technology, 2015, 26(1): 012002 .
- [40] WEI Y, GE B, WEI Y . Noise effect in an improved conjugate gradient algorithm to invert particle size distribution and the algorithm amendment[J] . Applied Optics, 2009, 48(9): 1779 .
- [41] 张以谟, 毛义, 田学飞 . 粒子尺寸分布的激光衍射测量研究[J] . 光电工程, 1990(1): 1-8 .
- [42] LAD N, AROUSSI A, ADEBAYO D . Flow mapping of multiphase flows using a novel single stem endoscopic particle image velocimetry instrument[J] . Measurement Science & Technology, 2011, 22(6): 064003 .
- [43] ALBRECHT H E, BORYS D I M, DAMASCHKE D I N, et al . Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques[M] . Springer Berlin Heidelberg, 2003 .
- [44] 吴伟亮, 沈彦成, 钟策 . 横向气流中喷雾粒径的变化规律[J] . 燃烧科学与技术, 2014(6): 478-482 .
- [45] 刘宣烈, 张文周 . 空中水舌运动特性研究[J] . 水力发电学报, 1988(2): 48-56 .
- [46] 刘宣烈, 张文周 . 空气阻力对挑流水舌的影响[J] . 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1982(2): 70-80 .
- [47] 刘宣烈, 刘钧, 姚仲达, 等 . 空中掺气水舌运动轨迹及射距[J] . 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1989(2): 23-30 .
- [48] 刘宣烈 . 泄流雾化入水喷溅物理及数学模拟研究[R] . 天津: 天津大学, 1989 .
- [49] 刘士和, 梁在潮 . 水利枢纽中雾化流的模拟与防范[J] . 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(3): 1-4 .
- [50] 刘昉, 练继建, 张晓军, 等 . 挑流水舌入水喷溅试验研究[J] . 水力发电学报, 2010, 29(4): 113-117 .
- [51] 柳海涛, 孙双科, 王晓松, 等 . 溅水问题的试验研究与随机模拟[J] . 水动力学研究与进展, 2009, 24(2): 217-223 .
- [52] 张晓军 . 泄流雾化雾滴谱及风速场问题研究[D] . 天津: 天津大学, 2010 .
- [53] 刘昉, 张晓军, 张龔 . 水射流雾滴谱试验研究[J] . 水力发电学报, 2012, 31(1): 118-122 .
- [54] 刘昉 . 挑流泄洪雾化数学模型改进与影响因素分析研究[D] . 天津: 天津大学, 2004 .
- [55] 黄财元 . 高拱坝泄洪雾化数学模型及人工神经网络模型研究[D] . 天津: 天津大学, 2006 .
- [56] 张超然, 牛志攀 . 向家坝水电站泄洪消能关键技术研究与实践[J] . 水利水电技术, 2014, 45(11): 1-9 .
- [57] 戴丽荣, 张云芳, 张华, 等 . 挑流泄洪雾化影响范围的人工神经网络模型预测[J] . 水利水电技术, 2003,

- 34(5): 7-9.
- [58] 柳海涛, 孙双科, 刘之平, 等. 泄洪雾化预测的人工神经网络方法探讨[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1241-1245.
 - [59] 刘志国, 柳海涛, 孙双科, 等. 丰满水电站重建工程挑流消能方案泄洪雾化研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(1): 108-113.
 - [60] 柳海涛, 孙双科, 郑铁刚, 等. 两河口水电站泄洪雾化影响分析[J]. 水力发电, 2016, 42(11): 54-57.
 - [61] 刘士和, 曲波. 泄洪雾化溅水区长度深化研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(5): 5-8.
 - [62] 孙笑非, 刘士和. 雾化水流溅抛水滴运动深化研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(1): 61-66.
 - [63] 张宇鹏, 黄国兵, 徐勤勤. 挑流泄洪雾化降雨强度的模糊综合评判预报[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(1): 1-3.
 - [64] 欧海庆. 非均匀风速场的挑流泄洪雾化数值模拟的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
 - [65] 何贵成. 基于 WRF 模式和 SPH 的泄洪雾化数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
 - [66] 刘之平, 刘晓波. 水利工程环境安全保障及泄洪消能技术研究[J]. 中国环境管理, 2017, 9(5): 107-108.

Research progress and frontiers on flood discharge atomization of Chinese high dam projects

LIAN Jijian, LIU Dan, LIU Fang

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The flood discharge security and protection of high dam projects is a hot issue in the field of hydraulic engineering. For high dam projects with characteristics of high water head, large discharge and narrow canyon in China, the problem of flood discharge atomization is very serious. With Chinese hydropower projects construction extending to high altitude area with low pressure, the atomization mechanism under complex environment, forecasting methods with higher precision and scientific hazard prevention technologies are in urgent need of breakthrough. The article constructed the field source characteristics and protection system of atomized rainfall on the basis of research achievements and engineering applications of flood discharge atomization at home and abroad. Moreover, the article abstracted the development achievements and technical bottleneck in this field, and expounded the methods to break through key scientific and technical issues. Series studies and results are intended to promote flood discharge atomization research from experience to science and provide theoretical and technical supports for structural design and long-term safe operation of large water resources and hydropower engineering.

Keywords: high dam atomization; field source characteristics; complex discharge environment; prototype telemetry; microscopic test; refined prediction; hazard prevention and control

(责任编辑: 李福田)