水利水运工程学报
HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

中国大型灌区工程风险分析与安全评价研究

李昭辉，李子阳，马福恒，岑威钧

Analysis and safety evaluation of large-scale irrigation area projects in China

LI Zhaohui, LI Ziyang, MA Fuheng, CEN Weijun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20220606001

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于GIS的大型灌区移动智慧管理系统研发
Development of mobile intelligent management system for large-scale irrigation district based on GIS
水利水运工程学报. 2019(4): 50 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.007

里运河堤防险工险段典型失效模式分析
Analysis of failure modes for typical dangerous sections of Li Canal levee
水利水运工程学报. 2019(2): 104 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.015

大坝安全监测系统评价体系
Technical framework for dam safety monitoring system evaluation
水利水运工程学报. 2019(4): 63 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.009

2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策
Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions
水利水运工程学报. 2021(5): 101 https://doi.org/10.12170/20201119001

基于改进节点虚流量法的渠道工程施工期渗流场分析
Analysis of seepage field based on improved node virtual flow method in a large-scale canal project during construction period
水利水运工程学报. 2017(6): 22 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.004

特高拱坝动态安全风险分析系统研发及应用
Development and application of dynamic safety risk analysis system for super-high concrete arch dam
水利水运工程学报. 2020(1): 112 https://doi.org/10.12170/20181201002

扫码进入官网，阅读更多精彩文章　　关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220606001
李昭辉, 李子阳, 马福恒, 等. 中国大型灌区工程风险分析与安全评价研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(5): 1-8. (LI Zhaohui, LI Ziyang, MA Fuheng, et al. Analysis and safety evaluation of large-scale irrigation area projects in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(5): 1-8. (in Chinese))

中国大型灌区工程风险分析与安全评价研究

李昭辉[1], 李子阳[2,3], 马福恒[2,3], 岑威钧[4]

(1. 河南省赵口引黄灌区二期工程建设管理局, 河南 开封 475000; 2. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029; 4. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 中国大型灌区输水线路长, 建筑物数量庞大且种类繁多, 部分骨干工程老化失修严重, 一些灌区往往处于带病或超期服役状态, 安全状况不容乐观。在介绍中国大型灌区安全现状的基础上, 重点论述了大型灌区工程风险源识别、安全评价、加固改造等方面的研究现状, 并对大型灌区工程安全管理模式的发展趋势和若干关键问题进行了归纳总结, 认为今后应在灌区风险识别和控制技术、服役条件下建筑物混凝土损伤演化、风险管控机制及数字化和智慧化管理等方面进行深入研究, 确保大型灌区工程安全长效运行。

关 键 词: 大型灌区; 风险识别; 安全评价; 加固改造; 运行管理

中图分类号: TV698 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2023)05-0001-08

大型灌区因具有较为完备的基础设施和相对稳定的水源, 能够大力推动所在地区农业和农村经济发展, 并为工业化和城镇化的供水需求提供可靠保障。此外, 大型灌区在水资源配置和生态环境改善方面也发挥着重要作用[1-2]。相较于中小型灌区, 大型灌区建筑物数量庞大且种类繁多, 地质和环境条件复杂, 加之现有的大型灌区工程多建于 20 世纪 50—70 年代, 工程设计标准普遍偏低, 受环境和荷载的长期作用, 工程运行风险问题不断显现。部分骨干建筑物如渡槽、倒虹吸、节制闸等混凝土结构老化失修, 处于带病或超期服役状态, 无法完全发挥其设计功能。因此, 开展大型灌区多种类型复杂风险源的有效识别及安全评价是当下灌区工程长期安全运行面临的关键问题之一。

本文在阐述中国大型灌区发展概况和安全现状的基础上, 归纳总结大型灌区工程风险种类及风险源的识别方法, 重点论述大型灌区工程安全评价和加固改造技术研究进展, 并对未来发展趋势和亟待解决的关键问题提出一些认识和见解。

1 中国大型灌区发展概况和安全现状

1949 年以来, 中国灌区工程建设取得了长足发展, 大致可分为 3 个阶段。第 1 阶段(1949—1980 年), 主要修建大型灌区及相关农业基础设施, 灌溉面积从仅有的 1 590 万 hm^2 增加到 4 889 万 hm^2; 第 2 阶段(1981—1990 年), 由于农业结构和管理机制的改革, 灌区用水更多供给工业和居民需要, 灌溉面积减至 4 839 万 hm^2, 减少了 50 万 hm^2; 第 3 阶段(1991 年至今), 国家在灌区建设、改造和管理等方面的投入持续

收稿日期: 2022-05-26
基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFB3900603); 黄河水科学研究联合基金(U2243244); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y722003)
作者简介: 李昭辉(1971—), 男, 河南舞钢人, 正高级工程师, 主要从事水利工程建设与安全管理研究。
E-mail: lzh8852598@163.com 通信作者: 李子阳(E-mail: zyli@nhri.cn)

增加,除了兴修一些重点灌区工程外,还着力于大型灌区的改造升级。根据《2020 年全国水利发展统计公报》,中国设计灌溉面积 133 hm^2 及以上的灌区共 22 822 处,其中 2 万 hm^2 及以上的大型灌区 454 处,耕地灌溉面积达 1 782 万 hm^2,占中国总耕地灌溉面积的 25.8%[3]。

目前,已有许多大型灌区工程达到或超过了设计使用年限,输水效率低,灌区内的渡槽、倒虹吸、节制闸等建筑物不同程度地处于带病或超期服役状态,工程运行风险不断显现。由于灌区工程为线性结构体系,单个建筑物的病险很可能引发连锁安全问题,直接影响灌区工程效益的正常发挥。大型灌区内常见的工程病险现象有渠坡滑坡、结构变形、混凝土开裂、渗漏破坏等。以红旗渠灌区为例,该灌区设计灌溉面积 3.6 万 hm^2,灌区内共涉及林州市 13 个乡镇。由于受当时经济和技术条件的限制,建造之初工程质量把控不严,经过 50 余年的运行,渠道渗漏和渠体变形严重,渡槽砌石勾缝脱落,闸墩局部砂浆流失。2014 年 6 月,赵所管理段软弱坡积物滑动引发渠体坍塌,堵塞渠道,渠水外溢,导致附近村庄被淹,造成了重大经济损失。早期建造的一些灌区工程,在长期服役过程中普遍出现多种运行风险,各建筑物出现不同程度的老化病害及功能劣化。对存在安全隐患或病险的灌区工程,需要及时进行加固改造。

总体而言,目前中国大型灌区工程的安全运行状况受多种风险因素的影响,为反映大型灌区工程的实际运行情况,准确判断工程安全状态,需要开展风险分析和安全评价,为除险加固、续建配套和现代化提升建设提供指导。

2 大型灌区工程风险及分析方法

2.1 灌区工程风险分类

大型灌区建筑物点多面广、老化病害各异,其安全评价工作的关键在于采用有效手段开展风险识别,同时对病害特征进行记录和量化。常见的灌区工程风险包括:

(1)建筑物风险。建筑物风险是由工程本身质量出现缺陷而导致的,主要可分为渠道结构风险和渠系建筑物结构工程风险两类。渠道结构工程风险主要包括渠坡滑坡、渠顶损毁、渠基渗漏破坏、坡面保护措施损坏等,其中渠坡失稳是其面临的首要安全问题,导致渠坡失稳的原因主要有地质缺陷导致的坡体质量差、坡面超负荷加载、坡面保护措施破损等。渠系建筑物结构风险主要包括建筑物失稳、进出口岸破坏、接触渗漏、老化侵蚀等。一些病险除与建筑物自身结构有关外,还受到长时间环境因素等外部运行条件影响。

(2)自然灾害风险。暴雨洪水、冰冻和地震等自然灾害往往会对工程造成损害,尤其是极端自然条件,更易对灌区建筑物安全产生重大影响和破坏。长时间的强降雨会对渠道和渠系建筑物产生入渗和较大冲刷,可能导致渠道或渠系建筑物渗透破坏或失稳破坏,甚至出现暴雨漫浸、洪水泛滥等现象。山区灌区还面临着滑坡泥石流造成的渠道淤积风险。寒冷地区的冰冻灾害也会对混凝土材料性能产生劣化作用,尤其是冻融循环更易引发混凝土局部开裂,进而可能影响建筑物的整体安全。地震灾害则往往造成建筑物倒塌、输水外泄、机电设备故障等严重破坏。

(3)运行管理风险。运行管理问题在大型灌区工程中尤为显著,灌区内任何一个节点的隐患都可能影响整个系统的正常运行,如总渠节制闸的长期失修或不当操作可能引起干渠、支渠无法正常供水。这类问题往往表现为专业维护缺乏、监测设施布置不到位、管理制度不健全、险情处置不及时等。

(4)社会风险。此类风险一般由个人或者团体的不当行为造成,往往会带来工程损失或其他方面的不良影响,若不及时采取措施,很可能引起连锁反应,引发群体破坏事件。如大规模在渠道投放垃圾或污水引起的水体污染、灌区内工程设施的人为破坏等;灌区内的大量牲畜活动,亦可能对灌区正常运行带来风险隐患。

2.2　灌区工程风险源识别与分析方法

大型灌区工程风险因素众多, 在对影响灌区工程安全的风险因素进行失效模式分析的基础上, 应合理选用现场检测、试验研究、统计分析、数值模拟等方法, 对大型灌区工程风险源进行识别。

大型灌区工程一般建有水闸、泵站、倒虹吸、渡槽等多种输配水建筑物, 对这些主体混凝土或浆砌石结构的破损、老化、病害等进行隐患识别, 主要包括结构变形和位移、材料性能指标(强度、抗渗性等)、外观质量和内部缺陷(裂缝、碳化深度等)、钢筋锈蚀程度等。目前, 国内外一些学者开展了结构隐患探测技术的相关研究工作。Ohno 等[4] 利用声发射技术分析了混凝土中的裂缝类型, 并对不同外界环境下的混凝土损伤演化规律进行归纳总结; 顾冲时等[5] 对回弹法、雷达法等无损检测方法的适用性进行研究, 指出应根据建筑物的实际几何尺寸合理选用检测方法。在实际工程质量检测过程中, 声发射技术、超声波 CT 成像、三维激光扫描等方法凭借数据获取快、实时性强、精度高等优点, 应用领域不断扩大, 成为当下结构检测的重要手段。

对于灌区工程中的大量渠道, 其工程风险源的识别可以借鉴堤防工程。郝燕洁等[6] 针对堤防工程隐患特征及其破坏模式进行研究, 总结了堤防工程隐患检测技术常用方法及其优缺点, 为工程隐患快速探测和险情识别提供了技术支撑。除了现场巡查及检测等手段外, 亦可结合数值模拟和数据统计分析等方法对灌区建筑物风险源进行有效识别。史越英[7] 根据南水北调中线工程范围广、不确定因素多等特点, 利用空间聚类分析, 识别出各渠段存在的地下水污染风险、交通事件风险等 5 类潜在风险源。此外, 亦可借鉴大坝、堤防等建筑物的风险识别方法, 从工程风险因素、人为风险因素、环境风险因素等角度, 探讨工程风险标准划分、风险识别和评估等风险分析[8] 方法。同时, 也可借助可靠性分析和人工神经网络等风险识别方法, 开展堤防漫顶、管涌等失效模式分析, 并采用故障树分析法全面掌握堤防工程的实时运行状态[9]。

上述风险源识别方法大多只考虑了风险源的静态特征, 未能综合考虑风险源的发展模式和发展路径。大型灌区工程服役条件复杂, 在环境和荷载多重影响下其运行状态不断发生变化。因此, 大型灌区工程的风险源识别应贯穿整个运行过程, 并及时做好定检工作。此外, 应采用系统动力学等方法对风险源成因和风险源相互作用关系进行探究。

3　大型灌区工程安全评价方法与加固改造技术

3.1　大型灌区工程安全评价体系

目前许多学者针对灌区工程安全评价已进行了相关研究, 其中既有针对灌区内渡槽、泵站等单一建筑物的安全评价, 也包括整个灌区工程的综合安全评价。王永平等[10] 根据实地调查和专家咨询结果对渡槽工程的安全状态进行分析, 构建了包含结构变形、稳定、承载力、水力条件和运行年限等在内的灌区渡槽工程安全评价体系; 武慧芳等[11] 分析了引黄灌区内泵站的安全运行状态, 结合建筑物老化、变形等破坏特点, 构建了多层次的泵站建筑物安全评价体系。现有的灌区单一建筑物安全评价多从工程自身安全出发, 主要考虑变形、稳定、渗流等方面的安全评价指标, 相比单一建筑物安全评价, 灌区工程建筑物类型众多, 且互为影响, 需要构建更为系统全面的安全评价体系。雷声隆等[12] 对中国大型灌区工程的老化程度进行调查研究, 总结了中国大型灌区工程老化损坏的状况, 并建立了灌区不同建筑物的评价体系和标准; 杨道富[13] 选择混凝土强度、钢筋锈蚀程度、老化碳化程度、结构剩余承载能力等主要指标构建了灌区混凝土建筑物完好率评估体系; 彭祖赠等[14] 针对灌区内建筑物的动态损伤发展划分了不同等级, 分析了环境因素、工程维修等情况下的损伤机理, 基于建筑物群建立了评价体系。

上述研究主要探讨渡槽、泵站等灌区单一建筑物的结构特点和安全特性, 建立各自评价指标。实际上, 灌区是个系统水利工程, 尤其是大型灌区工程, 除了包含上述建筑物外, 还有渠道、堤防和水闸等。虽然各建筑物有其自身的结构特点和运行条件, 但这类建筑物主要安全问题可以归纳为结构失稳、开裂破坏、局

部渗漏、沉降变形等,同时还包括暴雨洪水、地震、冰冻灾害等外部极端事件的影响。此外,灌区运行管理不当也可能引起灌区工程运行风险。因此,根据灌区运行模式,综合考虑影响灌区建筑物的安全特征,建立灌区安全评价指标体系,主要包含渠道结构风险、渠系建筑物结构风险、暴雨洪水风险、地震及冰冻风险,以及运行管理风险等 5 类评价指标,具体可包含渠坡滑坡、主体失稳、洪水冲刷、建筑物震损、运行维护等多个评价指标(见图 1)。

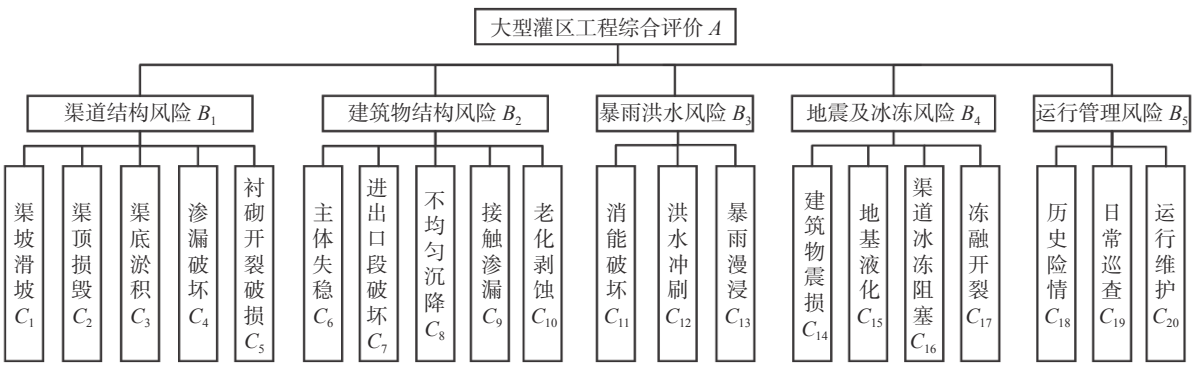

图 1 灌区工程安全评价指标体系

Fig. 1 Safety evaluation index system of irrigation area projects

3.2 大型灌区工程安全评价方法

随着人工智能和机器学习的不断发展,一些新型综合评价方法相继提出。考虑到传统层次分析法在实际应用中容易出现判断矩阵一致性检验困难的问题,一些学者引入粒子群算法、蛙跳算法等优化算法,对层次分析法中的一致性检验指标进行智能寻优,解决了重复构造判断矩阵的问题。针对评价体系中包含较多评价指标导致主、客观赋权结果差异大这一现象,有学者提出了基于遗传算法优化的投影寻踪降维方法,可提高赋权结果的一致性。基于支持向量机、双向循环神经网络等智能算法的新型评价方法摒弃了传统评价方法中的专家经验打分,根据评价指标的历史数据进行深度学习,针对性地构建评价模型,有效降低了评价结果的主观性[15-16]。

近年来,一些新算法或组合模型相继用于大型灌区工程安全评价中,以此开展了适合灌区单一建筑物的安全评价研究。戚国强等[17] 提出了一种改进层次模糊综合评价方法,并将其应用于灌区水闸工程安全评价,该方法能够定量确定各因素对水闸安全的影响程度,从而为科学评价灌区水闸的安全运行状态提供了有效方法;吴梦娟等[18] 引入区间数对传统层次分析法进行改进,克服了不确定性偏差,使评价结果更加客观;游黎等[19] 根据粗糙集理论和集成分析法确定灌区评价指标权重,结合博弈论进行组合赋权,评价结果与灌区实际情况较为相符,提出的改进大型灌区工程安全评价方法具有良好的适用性;王锦辉等[20] 改进了突变理论评价方法,减少了主观因素对评价结果的影响,提出了一种大型灌区工程安全综合评价新模型。

无论是广泛应用于安全评价的人工智能算法,还是一些其他领域的新算法或者组合模型,在实际应用过程中都应注重工程实用性和操作便捷性。以基于 BP 神经网络的系列安全评价方法为例,构建神经网络模型时,需要依据工程特点和风险现状,确定模型参数并优选输入因子。另外,应结合灌区各类建筑物的老化病害特点,将合理的评价指标体系与实用的指标量化方法相结合,构建科学可行的大型灌区工程安全综合评价模型。

3.3 大型灌区加固改造技术

中国大型灌区加固改造与工程兴建并行发展。2001 年,中国有 402 处大型灌区纳入续建配套和节水改造工作规划。2001—2005 年,水利部陆续批复了 32 处新的大型灌区改造,共计 434 处大型灌区列入规划。2018 年,累计完成灌区内建筑物加固改造 24 万处,对超过 7 万 km 的骨干渠道进行防渗和加固处理。

2022 年, 中国预计开展约 90 处大型灌区和 480 余处中型灌区的现代化改造, 完善灌溉水源工程、渠系工程和计量监测设施, 推进标准化规范化管理, 新增、恢复和改善灌溉面积 160 余万 hm^2。截至 2022 年底, 国内典型大型灌区的改造工程有内蒙古河套灌区、安徽淠史杭灌区、赵口引黄灌区等。大型灌区改造的重心主要集中在骨干工程改造上, 灌区内的骨干工程包括渠道(总干渠、干渠、支渠)和渠系建筑物(倒虹吸、泵站、水闸等), 针对不满足安全运行和达不到供水需求的渠道进行加固和改造, 因地制宜选择衬砌形式, 保障渠道的防渗和抗冻胀性能, 有效提高了灌溉水利用系数。对滑坡严重的地区选用暗涵代替渠道进行输水, 同时增设防护措施。对灌区内缺少的建筑物进行续建配套, 将老化损坏、局部开裂、渗漏破坏严重的建筑物进行修复或改造。

在大型灌区建设过程中, 陆续出现了新的加固及改造技术。由于结构形式和主要功能的差异性, 灌区渠道和水闸、倒虹吸、渡槽等建筑物加固改造的侧重点有所不同。针对灌区渠道而言, 滑坡、渠身渗漏、衬砌破损等为常见病害, 亦可能出现输水能力不足、渠底淤积和冰冻阻塞等问题。水闸、渡槽等渠系建筑物主体为混凝土结构, 主要病害包括主体失稳、混凝土老化侵蚀、结构破损、渗漏破坏等。针对上述问题, 一些学者开展了加固及改造技术的相关研究。杨刚等[21] 针对渠坡崩塌、渗漏等病害问题, 将电焊网作为增强材料, 同时铺设水泥砂浆进行渠道加固, 提高了边坡稳定性并可起防渗减糙作用; 徐光儒[22] 对灌区渠道不同的防渗方案进行比选, 建议采用聚苯乙烯材料有效减轻混凝土的冻胀破坏; 董丕业等[23] 对灌区加固及改造相关方案进行了探讨和总结, 指出采用六边形衬砌板可减少不均匀沉降、同时保证运输过程中的低损坏; 黄智敏等[24] 综合考虑了某实际水闸工程的泄流情况和运行条件, 通过多方案比选确定了包含消力墩、消力坎等消能工的优化改造方案; 钟汉华等[25] 分析了灌区渡槽不同工况下的运行状态, 并对加固方案进行比选, 选用预应力混凝土加固方案有效保证了渡槽结构稳定。

目前针对大型灌区的加固及改造工作主要是对其进行维修, 以满足灌区的水资源供给需求。已建老旧灌区的系统性病险整治和改造升级是灌区现代化建设的发展所需、时代所求。中国灌区分布较为广泛, 受不同地理因素、开发条件、管理模式等方面的影响, 灌区现代化改造应注重自然条件、工程建设和运行管理的协调性, 以灌区的实际所需为导向, 实现工程运行条件整体提升、水资源调度配置全面优化、安全管理机制系统完善等大型灌区现代化改造目标, 为农业灌溉、工业及城镇居民用水等提供安全、可靠、经济、高效的供水服务。

4　亟待解决的若干关键问题

尽管大型灌区工程风险分析、安全评价及加固改造方面已取得了一些研究成果, 部分成果已在实际工程中得到推广应用, 但仍存在一些问题需要进一步研究。

(1)灌区工程在长期服役过程中往往持续受到多种风险因素的影响, 不同建筑物的主要失效模式不尽相同, 如何有机融合不同建筑物失效模式进行综合风险分析, 继而确定其失效风险还有待深入研究。另外, 考虑到暴雨洪水、低温冻融、地质灾害等环境影响因子变化, 灌区的风险状态具有动态连续性的特点, 现有的风险源识别方法大多用于判断静态风险, 难以描述时变下的动态风险。在研究灌区某一阶段安全风险的同时, 应加强对风险形成及演化路径的深入研究, 并基于联系和动态的观点系统分析各安全风险状态之间的关联性, 构建大型灌区运行风险状态诊断模型, 实现大型灌区工程风险的动态识别和科学评估。

(2)灌区作为有效提供可靠水源的重要水利工程, 除工程自身效用及安全外, 还涉及生态和环境影响评价。目前灌区安全评价大多是从工程安全角度建立评价指标, 后续应考虑纳入生态、环境等非工程评价指标, 构建更加科学系统的大型灌区安全评价指标体系, 为大型灌区安全精准评价奠定基础。此外, 现有大型灌区安全评价方法需要依据专家的主观分析和决策, 后续应加强专家评判标准和客观定量分析的有机结合, 实现大型灌区工程安全性态的科学评价, 同时也为中国大型灌区安全评价标准规范的制定提供支撑。

(3)灌区建筑物混凝土劣化直接导致材料性能降低,从而大幅折减灌区建筑物的服役寿命,例如碳化引起钢筋锈蚀和混凝土剥蚀,硫酸盐侵蚀降低混凝土强度、碱集料反应加速混凝土开裂等。目前缺少长效服役条件下灌区建筑物混凝土劣化特性研究,后续可加强大型灌区工程不同结构型式建筑物在服役环境变化下的材料性能劣化、结构开裂与建筑物寿命预测等方面的研究,有助于进行针对性的灌区加固改造和功能提升,为保障大型灌区长效运行提供科学指导。

(4)随着中国社会经济和科技的快速发展,越来越多的大型灌区投入建设或加固改造,传统的粗放管理模式无法实现灌区的全方位精准监管,不能满足大型灌区高效安全运行的需求。“十四五”规划指出加快推进智慧水利建设,推动新阶段水利高质量发展,其中包括通过建设智慧灌区信息化管理系统、灌区作物需水和旱情监测、水资源调度等功能,同时对大型灌区骨干工程进行智能监控和精准运行管理,实现灌区运行数字化和管理智慧化,助力大型灌区安全管理的现代化。

5 结 语

大型灌区工程风险分析与安全评价是一项多学科交叉的复杂课题。本文探讨了中国大型灌区发展概况和安全现状,分析了大型灌区的主要风险,归纳总结出一系列适用于复杂灌区工程的风险源识别方法。在此基础上,研究了大型灌区工程安全评价体系和评价方法,并阐述了大型灌区工程加固及改造发展概况和技术手段。灌区工程风险源识别与安全评价研究的目的是使已建、在建或改建的灌区能够安全长效服役,从而有力支撑农村经济发展和生态环境建设。当下仍需在灌区建筑物失效模式分析、灌区工程风险动态诊断和评价、混凝土老化机理揭示、智慧灌区建设和管理等方面不断深入探索和创新,为大型灌区现代化运行和管理提供完善的理论和方法体系。

参 考 文 献:

[1] TANG L S, LI Y, ZHANG J H. Partial rootzone irrigation increases water use efficiency, maintains yield and enhances economic profit of cotton in arid area[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1527-1533.

[2] KRAFT G J, CLANCY K, MECHENICH D J, et al. Irrigation effects in the northern lake states: wisconsin central sands revisited[J]. Ground Water, 2012, 50(2): 308-318.

[3] 中华人民共和国水利部. 2020年全国水利发展统计公报[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Statistical bulletin of national water resources development in 2020[R]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.(in Chinese))

[4] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(12): 2339-2346.

[5] 顾冲时, 苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 1-12.(GU Chongshi, SU Huaizhi. Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 1-12.(in Chinese))

[6] 郝燕洁, 张建强, 郭成超. 堤防工程险情探测与识别技术研究现状[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 73-78.(HAO Yanjie, ZHANG Jianqiang, GUO Chengchao. Research status of danger detection and identification technology of dike engineering[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 73-78.(in Chinese))

[7] 史越英. 南水北调中线工程污染源风险评估及控制研究[J]. 中国水利, 2017(13): 14-16.(SHI Yueying. Risk assessment on pollution sources for Middle Route Scheme of South-to-North Water Diversion Project and studies on control options[J]. China Water Resources, 2017(13): 14-16.(in Chinese))

[8] 顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 26-35.(GU Chongshi, SU Huaizhi, LIU Hezhi. Review on service risk analysis of dam engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 26-

35. (in Chinese))

[9] 杨端阳, 王超杰, 郭成超, 等. 堤防工程风险分析理论方法综述[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 59-65. (YANG Duanyang, WANG Chaojie, GUO Chengchao, et al. Theories and applications of risk analysis of levee engineering: a review[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 59-65. (in Chinese))

[10] 王永平, 马小刚, 陆立国. 宁夏引黄灌区渡槽工程安全综合评价研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 89-94. (WANG Yongping, MA Xiaogang, LU Liguo. Aqueduct safety evaluation of Ningxia Yellow River irrigation area[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 89-94. (in Chinese))

[11] 武慧芳, 陆立国, 王红雨. 宁夏引黄灌区泵站建筑物安全评价研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(5): 143-148. (WU Huifang, LU Liguo, WANG Hongyu. Security evaluation of pumping station buildings to Ningxia Yellow River irrigation area[J]. Yellow River, 2015, 37(5): 143-148. (in Chinese))

[12] 雷声隆, 徐云修, 姜开鹏, 等. 全国大型灌区工程老化状况与对策[J]. 中国农村水利水电, 1997(7): 17-23, 48. (LEI Shenglong, XU Yunxiu, JIANG Kaipeng, et al. On hydraulic structures aging situation and strategies of large-scale irrigation areas in China[J]. China Rural Water and Hydropower, 1997(7): 17-23, 48. (in Chinese))

[13] 杨道富. 基于灌区建筑物完好率评估标准体系的研究[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(3): 57-61. (YANG Daofu. Study on the system of appraisal standards of intact rate of buildings in irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(3): 57-61. (in Chinese))

[14] 彭祖赠, 雷声隆, 徐云修. 工程群体老化病害结构及其预测与控制[J]. 水利学报, 1998(4): 48-54. (PENG Zuzeng, LEI Shenglong, XU Yunxiu. Formation of aging and faults and its forecast and control for hydraulic structure group[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(4): 48-54. (in Chinese))

[15] 刘帅, 盛金保, 王昭升, 等. 基于模糊神经网络的水电施工安全隐患评价[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 105-111. (LIU Shuai, SHENG Jinbao, WANG Zhaosheng, et al. Evaluation method for hidden safety dangers of hydropower construction based on fuzzy neural network[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 105-111. (in Chinese))

[16] ZHANG Z X, LI Y, WANG X G, et al. Assessment of river health based on a novel multidimensional similarity cloud model in the Lhasa River, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127100.

[17] 戚国强, 李凯. 基于改进层次模糊综合评价的水闸工程安全评价[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 111-114. (QI Guoqiang, LI Kai. Safety evaluation on sluice gate based on modified fuzzy comprehensive evaluation theory[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(5): 111-114. (in Chinese))

[18] 吴梦娟, 靳春玲, 贡力. 基于灰色Euclid理论的西部地区引水明渠安全评价[J]. 人民黄河, 2018, 40(10): 139-143. (WU Mengjuan, JIN Chunling, GONG Li. Safety evaluation of water diversion open channel in Western China based on gray Euclid theory[J]. Yellow River, 2018, 40(10): 139-143. (in Chinese))

[19] 游黎, 费良军, 武锦华. 基于集对分析法的大型灌区运行状况评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 132-135. (YOU Li, FEI Liangjun, WU Jinhua. Study on evaluation of current condition of large-scale irrigation areas based on the set pair analysis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 132-135. (in Chinese))

[20] 王锦辉, 费良军, 王光社, 等. 改进突变理论对大型灌区运行状况的综合评价[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(5): 429-433. (WANG Jinhui, FEI Liangjun, WANG Guangshe, et al. Comprehensive evaluation of operational conditions of large-scale irrigation district by improved catastrophe theory[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(5): 429-433. (in Chinese))

[21] 杨刚, 冯飒, 简平, 等. 四川红层地区渠道加固整治实用技术研究与应用[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(增刊2): 148-152. (YANG Gang, FENG Sa, JIAN Ping, et al. Study and application on a practical technology of channel reinforcement and regulation in Sichuan red bed area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(Suppl2): 148-152. (in Chinese))

[22] 徐光儒. 宁夏灌区西干渠砌护改造方案分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(1): 39-41, 46. (XU Guangru. Analysis on the reconstruction scheme of the west main canal in Ningxia Irrigation Area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(1): 39-41, 46. (in Chinese))

[23] 董丕业, 李群智, 杨成忠, 等. 位山灌区续建配套与节水改造有关问题的探讨[J]. 节水灌溉, 2010(2): 64-65, 68. (DONG Piye, LI Qunzhi, YANG Chengzhong, et al. Discussion on problems related to continued construction and water-saving transformation in Weishan Irrigation District[J]. Water Saving Irrigation, 2010(2): 64-65, 68. (in Chinese))

[24] 黄智敏, 陆汉柱, 付波, 等. 东山拦河闸加固改造工程消能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 152-156.（HUANG Zhimin, LU Hanzhu, FU Bo, et al. Study on rebuilding of Dongshan barrage downstream energy dissipater[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(1): 152-156.（in Chinese））

[25] 钟汉华, 冷涛, 郑玲. 引丹灌区某渡槽数值计算分析及病险处理[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 58-61, 66.（ZHONG Hanhua, LENG Tao, ZHENG Ling. Numerical analysis and risky treatment of some aqueduct of Danjiangkou reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 58-61, 66.（in Chinese））

Analysis and safety evaluation of large-scale irrigation area projects in China

LI Zhaohui[1], LI Ziyang[2, 3], MA Fuheng[2, 3], CEN Weijun[4]

(1. *Construction Administration Bureau of Phase II Project of Zhaokou Yellow River Diversion Irrigation Area*, *Kaifeng* 475000, *China*; 2. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*; 3. *Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources*, *Nanjing* 210029, *China*; 4. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Large-scale irrigation area projects have long water transmission lines, a huge number of various hydraulic structures, and backbone projects, some of which are in serious disrepair. Some irrigation area projects are often in a state of illness or extended service, and the safety situation is not optimistic. On the basis of introducing the safety status of large-scale irrigation area projects in China, the research status of risk source identification, safety evaluation, reinforcement and reconstruction in large-scale irrigation area projects are emphatically discussed, and the development trend and existing problems of engineering safety management mode in large-scale irrigation area projects are summarized. It is considered that in the future, in-depth research should be made on risk identification and control technology, damage evolution of building concrete under service conditions, risk management and control mechanism, digital and intelligent management, etc., so as to ensure the safe and long-term operation of large-scale irrigation area projects.

Key words: large-scale irrigation area projects; risk identification; safety evaluation; reinforcement and reconstruction; operation management