

堤防的基础之上进行加高培厚,这就导致现有堤防条件复杂,堤基条件、堤身建筑质量差、堤后坑塘多^[7],并且堤防工程以沙基为主,建设过程中很多工程未进行基础处理^[8],这大大增加了堤防失效的风险。虽然很多专家学者围绕堤防失效模式、水文水利条件、灾害损失评估等多维度探讨了堤防的风险性,但基于堤身条件复杂,地质条件差异及现有风险分析方法中较多部分存在的不确定性^[9],至今未达成一致。

所以通过考虑风险评估的重要性及对相关的社会、环境和经济后果的影响,有效地对堤防安全性进行评估并及时对堤防的风险进行预警尤为重要。这不仅能显著减少灾害的发生,更能揭示洪水-人之间的反馈机理。因此,本文总结了堤防不同失效模式,并从风险定义出发梳理了国内外关于堤防风险分析的理论方法,特别对堤防风险评估分析中存在的不确定性进行了探讨,以期对相关研究和堤防风险管理提供一定参考。

2 堤防失效模式

堤防工程各种失效模式的研究是堤防工程风险分析的基本内容,各学者针对所研究河流领域堤防主要破坏形式给出的定义不同。堤防的失效机制主要被分为2类^[10]:一类是结构失效,包括物理扰动对堤防的破坏;另一类是由水力如渗流、漫溢、波浪侵蚀、管涌液化等造成的破坏。

基于以上2种机制,堤防的失效模式一般分为:漫顶、结构失效、管涌和波浪淘刷4种。以上4种任何一种失效模式都会使堤防处于危险之中,如:中国淮河南段多次承受洪水漫顶的灾难,对人民生命财产安全造成严重威胁;荆江大堤常年深受管涌的危害;三峡工程在三期围堰挡水发电期间,当泄洪深孔与导流底孔联合泄流时,坝下右侧的回流导致坝趾处严重淘刷,严重威胁到了坝基和下游纵向围堰的安全等^[11-14]。这4种失效模式发生概率及重要程度有所不同,研究发现,漫溢和管涌造成的破坏占据82%,是堤防系统最主要的失效形式^[15]。洪水漫溢的概率与洪水本身的特性和堤防设计高程相关,而管涌破坏的概率与堤防构成和地基的岩性特别是土壤的易蚀性相关。基于此,Briaud^[16]研究了6种土壤的可蚀性,研究结果表明土壤的可蚀性与其塑性呈负相关,与粒径大小呈正相关。Orlandini等^[17]考虑降雨、河流流量和不同饱和流量的详细数值模拟方法,探讨了堤防破坏风险的水利和岩土机理。

综上所述,堤防的风险评估除了需要考虑堤防

组成材料的特性,特别是土体类型和土体刚度外,还需要考虑上游降水及河流行洪能力的影响。

3 堤防风险定义

虽然在经济、工程等领域对风险分析的讨论较多,但关于风险定义的研究却较少,目前关于风险最著名的定义由Knight^[18]在对概率的研究中提出,他认为可测量的不确定性可以用“风险”一词来表示,而不可测量的用“不确定性”一词来表示。其中风险与客观概率有关,不确定性与主观概率有关。也有学者认为风险可以分为2个不同的尺度:其一为“事实”维度,表示实际测量的风险水平,可以用损失概率(如人数、建筑物、货币价值)来表示;另一个为“社会文化”维度,表示综合考虑价值和人类情感时,对特定风险的评估。

在工程界,大部分学者将风险解释为^[19]:灾害发生所导致潜在的损失和伤害,即包括发生事故的类型、发生该类型事故的可能性及该事故发生所导致的后果,它普遍具有客观性、突发性、不确定性和相对性等特征。而风险评估是通过将风险水平与预先确定的标准、目标风险水平或其他标准进行比较,来对风险的重要性和可接受性进行判断,其实质就是从系统工程的角度,建立经济投入、系统安全与系统破坏可能带来的人员和经济损失之间的关系^[20]。

通常情况下,堤防的风险分析定义为堤防失事模式、不同失事模式发生概率及由此产生的损失,即失事概率与导致后果的乘积^[21],它的任务是对工程中存在的各种风险进行识别、估计和评价,并在此基础上采用各种风险管理技术进行处理与决策,对风险实施有效控制和管理。一般堤防工程风险等级分为风险低、风险较低、风险一般、风险较高、风险高5个等级,根据不同等级风险采用不同的应对措施^[22]。

4 堤防风险分析理论与方法

堤防风险分析方法众多,从常规的定性、定量分析逐步发展为考虑不确定性对其结果的影响。传统的定性分析方法受人为因素影响过大,过分依赖相关经验,难以量化为适用于各种堤防的统一评价标准。常规的定值安全评价方法没有考虑到设计变量的变异性,也难以解决工程特性复杂的情况,所以考虑不确定性因素的堤防分析方法是目前的主流做法。

堤防风险分析中存在的 uncertainty 是堤防项目一直致力解决的问题,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)^[23]将不确定性定义为一个“值”未知的程度。关于不确定性的来源主要有 2 个:随机不确定性和认知不确定性。前者是一种内在或自然的时空变异性,后者是对研究过程、系统或对象不完全了解导致的结果^[24]。洪水风险分析模型包含各种各样的组成部分,并与巨大的不确定性相关联。其不确定性主要包含以下 4 个方面^[2]:①模型阈值的选择;②洪水频率分布函数的选择;③建筑在模型中几何形状表示及不同水位的表示方法的选择;④损失函数的选择。

这 4 个方面的任何一种都会对洪水分析模型产生较大的影响,特别是损伤函数的选择对整体建模结果影响最大。

这些不确定性因素同时也是影响堤防风险分析的最关键因素。在现有对工程实践中随机不确定性的研究中,虽取得了一定效果,但由于缺乏足够的信息,且对认知不确定性的研究尚处于起步阶段,很难最大限度降低随机不确定性。另一方面,各文献所述风险分析模型的验证基本是通过将所观察到的数据与模拟结果进行对比来判断,使很多模型并不具备普适性及较强的预测性。因此,目前许多针对风险分析中不确定性的研究主要侧重于对风险评估模型链的特定部分或整体风险模型的输出敏感性进行描述。基于以上 2 方面的问题,堤防风险分析的发展受到较大限制,所以如何对待不确定性,并对风险评估程序全过程相关的不确定性进行彻底的调查研究是接下来需要研究的重点。

考虑堤防不确定性因素的分析方法,目前大体分为可靠性分析方法、模糊综合评价方法、灰色系统评价方法和人工神经网络方法,其中以概率理论为基础的可靠性设计和安全评价方法在国内外均得到较快的发展,目前应用也是最为广泛^[25]。同时人工神经网络分析方法具有预警误差小、速度快、容错能力大等优点,已逐渐被应用于堤防工程的风险分析之中。

4.1 可靠性分析方法

可靠性的定义为:产品、元件、系统在规定条件和规定时间内完成规定功能的能力或可能性。可靠性分析法是应用概率论、数理统计和可靠度理论等为基础的分析方法。最早它用在研究飞机性能可靠性和必要的安全措施中,之后迅速发展,1947 年 Freudenthal^[26]的论文“结构可靠度”被广泛认为是

结构可靠性理论研究的开始。结构随机可靠性分析又称为概率可靠性分析,其主要方法为确定一个显式的公式来描述工程破坏的临界情况,然后再通过一系列科学计算的手段来确定概率密度,进而通过积分求得最终的失效概率^[27]。如 Wood^[28]基于可靠度的理论分析了堤防安全的不确定性对溃决概率不确定和洪水造成的预期损失的影响。随着可靠度理论在结构工程等领域的发展和应用,将其应用于多种失效机制相互作用的堤防风险成为可能。1976 年,可靠度模型由荷兰的水利工程师首次将其应用于斯凯尔特河的工程实践当中,因此也被称为 Dutch 法。而后 Vrijling^[29]使用这种方法评价了英国的海岸堤防工程。

之后国内也基本以可靠度理论为基础,使用近似解法、数值模拟法和积分法等进行了大量堤防风险评价的研究。如梁在潮等^[30]以可靠度理论为基础,探讨了堤防防洪能力的评估方法,且经过比较分析认为,一次二阶矩法中的验算点法,比较适用于堤防防洪能力风险度的计算。徐卫亚等^[31]采用 Monte Carlo 模拟法完成了堤防几种失效概率的计算。邢万波^[7]、曹云^[32]等考虑堤防实际工程中的不确定性及各种影响因素的随机变异性,以概率论和可靠度为基础,对板桥河左岸堤防加固工程、南京市外秦淮河整治工程堤防进行了风险分析,对堤防汛期管理提出若干建议。焦小超^[2]基于可靠性理论提出的脆弱性曲线方法能更直观地表示堤防失事概率,有效判别堤防工程的安全程度。高延红^[33]根据现有堤防工程存在的主要隐患,以风险理论为基础,建立了基于层次分析法和破坏路径的堤防工程系统风险评价模型。刘亚莲等^[34]利用突变级数评价法利用突变级数法归一公式的内在作用机制确定各评价指标的权重,避免了对各因素进行主观赋权,使评价结果更加科学合理并成功预测加固北江大堤石角墟—蚬壳岗堤段。吴兴征等^[35]基于可靠性理论建立堤防失事极限状态方程,开发了堤防安全评估分析系统。

此外,美国陆军工程兵团(United States Army Corps of Engineers, USACE)^[36]提出了“平均可靠性”模型来计算堤坝失效概率,而 Pinter 等^[37]借用此模型进行了堤防的残余风险分析。虽然可靠度分析方法已取得较大的成绩,但考虑到堤防发生渗透破坏等失事是一个非稳态逐渐发展的过程,且各影响因素之间相互关系复杂,分析模型使用功能函数方程经过过多简化,因此分析结果与实际通常有一定差别。

4.2 模糊综合评价法和灰色系统评价法

堤防工程不确定性因素多而复杂包含水文、水力、土工的模糊性与灰色性,他们的性质和指标通常缺失或不够精确,堤防系统模型过于复杂无法用精确模型描述,因此模糊综合评价法和灰色系统评价法取得了较大的进展。

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法,根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。模糊综合评价法的系统性强、结果清晰,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决。而灰色系统评价方法是灰色模糊集为基础的理论体系,以灰色关联为依托的分析体系,以灰色序列生成为基础的方法体系,以灰色模型(GM)为核心的模型体系,以评估、建模、预测、决策、控制和优化为主体的技术体系的一种分析方法^[38]。

在堤防上王亚军等^[23]建立了模糊综合评判系统结构层次分析法(AHP)模型算法获得了荆南长江干堤的安全特性。张秀勇^[39]基于可靠度理论建立了黄河堤防管涌、流土滑坡等风险分析模型,利用蒙特卡洛-随机有限元分析方法进行了堤防失事概率计算,并应用模糊数学、遗传算法和层次分析法对黄河的堤防进行了安全性综合评价。根据影响堤防工程的因素,建立了堤防工程安全综合评价指标体系,王恩^[40]将层次分析法与模糊综合评价法结合,构建了堤防工程安全模糊层次分析评价模型,并以兴城河城区段左岸及右堤防为例,进行工程安全综合评价,得出此方法简单易用、评价结果合理可靠。宁少晨等^[41]建立岸坡稳定性的灰色斜率关联分析模型,以防洪堤岸坡稳定的安全系数为参考序列,对各影响因素的重要性程度给予量化,并从众多的影响因素中找出主要的因素是坡比,黏聚力和内摩擦角等,从而有利于分析伦潭水利枢纽工程的相关分析。蔡新等^[42]引进灰色理论,以堤基工程地质条件、河势稳定性、渗透稳定性、滑动稳定性、堤防整体性和工程管理为基本要素,构建堤防安全风险评价指标体系及堤防安全评价数学模型。将所建模型用于长江堤段,并对其进行整体安全评价。

堤防系统复杂,涉及范围较广,传统的模糊与灰色关联分析模型难以满足多因素系统分析表现出的复杂性,将其与智能算法结合是进一步解决不确定性系统建模的重要研究途径。

4.3 神经网络分析方法

神经网络为模拟人脑神经的某些机理与

机制的一种网络,可通过传递或转换函数实现单元输入与输出间的非线性映射^[43]。作为一种新兴的、功能较强、能逼近任何非线性系统特点的信息处理方法,目前大量应用于大坝的安全监测与评价,如赵斌等^[44]、杨杰等^[45],同时由于人工神经网络存在训练时间长、学习效率低等一些局限性,很多学者对其进行了改进。如苏怀智等^[46]基于遗传算法的思想,将神经网络学习的含义拓展为拓扑结构和阈值的学习,为大坝安全形态提供了有力的技术支持。陈伟^[47]同样建立了一种基于遗传算法和神经网络相结合的大坝安全监测预报模型,这个模型在收敛速度、稳定性及预报精度上都有着明显的优势。翁静君^[48]使用 L-M 算法对神经网络进行改进,解决了 BP(Back Propagation)网络易于陷入局部最小的问题。

相比大坝而言,我国不同地域的堤防地质情况复杂,运行条件多变,受自然和社会的不确定性因素影响众多,所以其应用于堤防系统安全评价的研究还较少。张我华等^[49]通过分析管涌机理确定影响管涌的关键因素,在此基础上从影响堤防管涌发生的诸多复杂因素中选出既便于测量、观测又对管涌有显著影响的9种因素作为人工神经网络的输入,将管涌发生与否的判别预测指标作为输出,并建立改进的BP神经网络模型判定管涌是否发生。结果表明预测判定的精度较高,是预测判定管涌发生的有效方法。陈亮等^[50]基于RBF神经网络的原理,建立了堤防管涌预测模型,能较好地描述堤防管涌的非线性特征。同样,余功栓^[51]分析了堤坝管涌发生的过程和影响管涌发生的因素,提出一种预测判定管涌发生可能性的机理模型,根据机理模型建立了管涌影响因素与管涌发生指标之间的映射关系。应用管涌相关数据对管涌人工神经网络模型进行训练和预测,预测的结果精度较高,说明人工神经网络是预测判定管涌发生的有效方法。卢丹玫^[34]用灰色关联分析出影响堤防的重要因子后应用人工神经网络改进的BP算法,采用MatLab中的神经网络函数库编写程序建立了南宁市防洪堤边坡稳定性预测的神经网络模型,大大减少了网络的计算时间,使得防洪堤边坡稳定性的评价更为便捷迅速。王秀杰等^[52]提出的突变理论与BP神经网络相结合的堤防安全综合评价模型既考虑系统内部各影响指标间的矛盾关系,又具有较强的鲁棒性,对堤防风险分析具有较好的借鉴意义。

除此之外,Hosseinalizadeh等^[53]通过3种机器学习算法,即纹理判别分析(MDA)、灵活的判别分

析(FDA)和支持向量机(SVM)来预测伊朗 Golestan 省管涌发生概率较高的区域,结果表明 SVM 模型预测最为准确,其次是 MDA 和 FDA 模型。王小茹等^[54]和翟越等^[55]基于神经网络核函数和径向基核函数,提出支持向量机方法,并令其与人工神经网络对比分析,结果证明支持向量机法在有限样本情况下的统计学习成效具有更好的推广能力,并能有效地弥补神经网络方法的不足,同时采用网格搜索法来确定模型参数能大大提高学习效率,在一定程度上解决参数确定困难的缺点。

基于大数据的人工神经网络已大量应用于大坝安全风险监测,但在堤防系统的风险分析中研究不多,最主要的原因是堤防系统数据较难获取,没有足够的样本用于学习,导致风险分析模型运行结果不够准确。另一方面如何通过智能算法描述堤防失效破坏时的动态发展性质,仍需要进一步深入的研究。

4.4 其他方法

堤防风险分析的研究方法众多,常结合事件树分析法和故障树分析法一起使用。事件树方法是根据特定的规则用图形来表示由某些激发事件可能引起的许多事件链,以追踪事件破坏的过程和评价系统的可靠性,是以某一初始事件的发生为条件计算出其概率事件树^[56]。而故障树分析法是由上往下的演绎式失效分析法,利用布林逻辑组合低阶事件,分析系统中不希望出现的状态。故障树分析主要用来了解系统失效的原因,并找到最好的方式降低风险,或是确认某一安全事故或是特定系统失效的发生概率。

马晓忠等^[57]根据洪泽湖大堤工程实际情况,结合洪水事件和破坏模式,构造事件树,利用事件树分析计算单元堤段失事概率。解家毕等^[58]利用事件树法原理应用在堤防方面成功找出影响堤防安全性的各种不确定性的关系,得出定量求解的方法。李松晨等^[59]基于复杂系统脆性理论,结合故障树分析法提取脆性因子,构建了城市防洪系统的脆性模型,并借助 MIKE11 软件进行水动力仿真模拟,以苏州地区为例进行实证计算,验证了理论方法的有效性的同时,为苏州地区城市防洪预警提供了可靠的分析数据。王靖文等^[60]构造了简化的描述堤防失稳的故障树,针对求解故障树得到的堤防失稳模式,建立了相应的极限状态方程,并利用 Monte-Carlo 模拟技术计算了各失效模式下的失效概率,最终得到了堤防总的失稳概率。

也有不少学者用数值模拟的方式进行风险评估,Brimicombe 等^[61]利用水利和地理模型结合信息系统和数字高程模型对洪水风险进行评估,并绘制

了洪水的泛滥面积和深度。Chen 等^[62]使用层次分析法并结合地理信息系统对台湾地区洪水风险进行了评估。梁艳红^[63]将中小河流溃堤洪水数值模拟和地理信息系统进行有机结合,对江西省罗塘河洪水风险进行了评价,并编制了洪水风险图。

堤防问题越来越被相关行业关注,堤防风险分析方法也得以迅速发展。行业学者运用事件树分析法和故障树分析法可以全面追踪堤防破坏的过程、评价系统的可靠性。除此之外,数值模拟和地理信息系统以及相关模型与电子计算机软件的结合更是促进了堤防风险分析的研究方法的发展。但是堤防工程风险分析研究涉及工程结构、安全评估、概率风险分析等不同学科,事件树、数值模拟等风险分析方法一方面针对工况不够全面,另一方面在分析时无法兼顾堤防工段结构、堤基地质条件、水文因素等各个方面,因此,应综合运用各类分析方法建立基于水-雨-工情的堤防风险分析模型是目前研究的重点。

5 结 语

在应对堤防典型险情风险分析的过程中,各国专家学者做了很大的努力,并取得了较多的成果。原始的人为因素占主导的定性定量分析已不适合堤防,相比而言,不确定分析方法在国内外发展迅猛,基于此模糊综合评价法和灰色系统评价法被引入工程项目,并且取得了较大的进展。随着科学技术的进步,人工神经网络以其强大的非线性映射能力渐渐在堤防工程中得到应用,成为了发展前景最好的方向之一。虽然堤防项目特别是风险分析已取得较大的成果,但依旧有着众多尚需解决的问题:

(1) 目前虽然提出了较多的堤防风险分析模型,但共同之处是模型的各个部分都有相当多的不确定性,包括堤防的几何形状、洪水产生频率、降雨量的精确预估、灾害损失函数的选择等等,都会使结果产生较大的偏差,因此如何使不确定性带来的影响最小化是目前需要研究的重点。

(2) 在风险识别分析中,洪水的频率分布基本基于以往统计资料,这往往导致堤防的风险评估不具备时效性,因此应综合考虑现有降雨、径流生成、流域集中、河网分布对堤防的作用。

(3) 神经网络在大坝安全监测与评论领域应用已经较为成熟,考虑堤防系统评价指标较多,各因素间存在相互影响的关系,将神经网络引入到堤防系统风险分析中的研究还较少。

(4) 由于单个系统组件长期数据的缺失, 目前堤防的风险分析基本从风险的概念和模型输出结果出发, 预先建立相应分析模型, 并输入数据进行模型验证。随着技术的发展, 各种水文水利条件及堤防土质情况数据日益完善, 应考虑无需先假设一个结构模型, 直接基于调查数据建模, 在数据中找到系统组件之间的相关性, 作为堤防风险分析的起点。

(5) 对堤防失事后果评价方面的研究较少, 至今专门针对堤防失事后果的分析评价很少, 大多是针对大坝失事风险评价标准方面的研究, 国内学者现在对洪灾后生命损失、经济损失、间接损失采用的估算方法大多数是参考国外经验。

参考文献:

- [1] SEALY K S, STROBL E. A Hurricane Loss Risk Assessment of Coastal Properties in the Caribbean: Evidence from the Bahamas [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 149: 42-51.
- [2] 焦小超. 基于脆弱性曲线方法的堤防工程风险评价研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
- [3] DOWNTON M W, ZOE J, MILLER B, *et al.* Reanalysis of US National Weather Service Flood Loss Database [J]. *Natural Hazards Review*, 2005, 6(1): 13-22.
- [4] JONGEJAN R, MAASKANT B. Applications of VNK2, a Fully Probabilistic Risk Analysis for All Major Levee Systems in the Netherlands [M] // *Comprehensive Flood Risk Management*. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [5] European Commission. A European Flood Action Programme [EB/OL] (2014-08-27) [2019-06-10]. http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/impacts.htm.
- [6] Association of State Floodplain Managers (ASFPM). Flood Mapping for the Nation: A Cost Analysis for the Nation's Flood Map Inventory [EB/OL]. (2013-04-16) [2019-06-10] http://www.floods.org/ace_files/documentlibrary/2012_NFIP_Reform/Flood_Mapping_for_the_Nation_ASFPM_Report_3_1_2013.pdf.
- [7] 邢万波. 堤防工程风险分析理论和实践研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [8] 金海元. 堤防工程风险管理及其在堤防中的应用探析 [J]. *城市建设理论研究*, 2016(29): 30-31.
- [9] WINTER B, SCHNEEBERGER K, HUTTENLAU M, *et al.* Sources of Uncertainty in a Probabilistic Flood Risk Model [J]. *Natural Hazards*, 2018, 91(2): 431-446.
- [10] RAHIMI S, WOOD C M, COKER F, *et al.* The Combined Use of MASW and Resistivity Surveys for Levee Assessment: A Case Study of the Melvin Price Reach of the Wood River Levee [J]. *Engineering Geology*, 2018, 241: 11-24.
- [11] 徐伟, 刘茂, 杨杰, 等. 基于 HEC-RAS 的淮河南段洪水漫顶风险分析 [J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(7): 13-18.
- [12] 毛宁, 毛昶熙. 堤坝下游管涌险情发生的临界流速和渗流量及其防汛应用 [J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(7): 43-46.
- [13] 陈红霞, 郭均立. 三峡工程坝下回流淘刷防治措施的研究 [J]. *长江科学院院报*, 2000(3): 10-13.
- [14] 缪吉伦, 张永祥, 周家俞. 治河工程中护岸导流新结构研究综述 [J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(3): 1-4.
- [15] ARDER L F, RUTHERFORD C J, BERNHARDT M L, *et al.* Preliminary Observations of Levee Performance and Damage Following the 2015-16 Midwest Floods in Missouri and Illinois [C] // *Proceedings of the Annual Conference 2016 of Association of State Dam Safety Officials*. Dam Safety 2016. September 11-14, 2016: 86-170.
- [16] BRIAUD J L. Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(10): 1425-1447.
- [17] ORLANDINI S, MORETTI G, ALBERTSON J D. Evidence of an Emerging Levee Failure Mechanism Causing Disastrous Floods in Italy [J]. *Water Resources Research*, 2016, 51(10): 7995-8011.
- [18] KNIGHT F. Risk, Uncertainty and Profit [J]. *Social Science Electronic Publishing*, 1921(4): 682-690.
- [19] 王栋, 朱元甦. 防洪系统风险分析的研究评述 [J]. *水文*, 2003, 23(2): 15-20.
- [20] 陈进, 黄薇. 防洪工程系统风险分析方法探讨 [J]. *长江科学院院报*, 2001(5): 37-40.
- [21] 贾超. 结构风险分析及风险决策的概率方法 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [22] 王亚军, 张楚汉, 金峰, 等. 堤防工程综合安全模型和风险评价体系研究及应用 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(1): 101-108.
- [23] IPCC. Glossary of Terms. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [24] BEVEN K J, ASPINALL W P, BATES P D, *et al.* Epistemic Uncertainties and Natural Hazard Risk Assessment-Part 1: A Review of the Issues [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015(12): 7333-7377.
- [25] 吴兴征, 赵进勇. 堤防结构风险分析理论及其应用 [J]. *水利学报*, 2003, 34(8): 79-85.
- [26] FREUDENTHAL A M. The Safety of Structures [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1947, 112(1): 125-159.
- [27] 张伟. 可靠性分析的基本假定和计算方法 [J]. *山西建筑*, 2007(30): 104-105.
- [28] WOOD E. An Analysis of Flood Levee Reliability [J]. *Water Resources Research*, 1975, 13(3): 665-671.
- [29] VRIJLING J K. Probabilistic Design of Water Defense

- Systems in the Netherlands[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2001, 74(3): 337-344.
- [30] 梁在潮,李泰来. 江河堤防防洪能力的风险分析[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(2): 7-10.
- [31] 徐卫亚,邢万波,魏文白,等. 堤防失事风险分析和风险管理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 47-55.
- [32] 曹云. 堤防工程风险分析理论和实践研究 [O]. 南京: 河海大学; 2005.
- [33] 高延红. 基于风险分析的堤防工程加固排序方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [34] 刘亚莲,周翠英. 堤坝失事风险的突变评价方法及其应用[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(5): 5-8.
- [35] 吴兴征,丁留谦,张金接. 防洪堤的可靠性设计方法探讨[J]. 水利学报, 2003, 34(4): 94-100.
- [36] U. S. Army Corps of Engineers. *Risk Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies*. ETL-1110-2 556 [R]. Washington D C: USACE, 1999.
- [37] PINTER N, HUTHOFF F, DIERAUER J, *et al.* Modeling Residual Flood Risk Behind Levees, Upper Mississippi River, USA [J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 58: 131-140.
- [38] 卢丹玫. 基于灰色理论的神经网络方法在防洪堤边坡稳定性分析中的应用[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
- [39] 张秀勇. 黄河下游堤防破坏机理与安全评价方法的研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [40] 王恩. 模糊层次分析法在河道堤防工程安全评价中的应用[J]. 山西建筑, 2017, 43(10): 221-222.
- [41] 宁少晨,戚蓝. 灰色斜率关联模型在堤防岸坡稳定影响因素分析中的应用[J]. 江西农业学报, 2007, 19(3): 89-90, 94.
- [42] 蔡新,严伟,李益,等. 灰色理论在堤防安全评价中的应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 62-66.
- [43] 吴云芳. 大坝安全监测神经网络模型研究和子系统开发[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [44] 赵斌,吴中如,张爱玲. BP模型在大坝安全监测预报中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 1999(6): 1-4.
- [45] 杨杰,顾冲时,吴中如. 大坝变形监测的BP网络模型与预报研究[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(1): 25-29.
- [46] 苏怀智,吴中如,温志萍,等. 遗传算法在大坝安全监测神经网络预报模型建立中的应用[J]. 水利学报, 2001, 32(8): 44-48.
- [47] 陈伟. 遗传算法与神经网络在大坝安全监测中的应用研究——以小浪底大坝为例[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [48] 翁静君. 人工神经网络在大坝安全监控中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [49] 张我华,余功栓,蔡袁强. 堤与坝管涌发生的机理及人工智能预测与评定[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(7): 109-115.
- [50] 陈亮,赵正信,陈建生,等. 基于RBF神经网络的堤防管涌预测方法[J]. 探矿工程-岩土钻掘工程, 2007, 34(11): 5-8.
- [51] 余功栓. 人工智能技术在大坝安全分析中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [52] 王秀杰,孙瑀,苑希民,等. 突变理论与BP神经网络相结合的堤防安全综合评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(7): 167-173.
- [53] HOSSEINALIZADEH M, KARIMINEJAD N, RAHMATI O, *et al.* How Can Statistical and Artificial Intelligence Approaches Predict Piping Erosion Susceptibility? [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 1554-1566.
- [54] 王小茹,何怀东,游凌云. 堤坝管涌发生的预测方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(2): 169-172.
- [55] 翟越,刘浪,于澍. 堤防管涌发生可能性识别的网格搜索-支持向量机方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1497-1503.
- [56] 杨杰. 大坝安全监控中若干不确定性问题的分析方法与应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [57] 马晓忠,彭雪辉,张友明,等. 基于单元堤段洪泽湖大堤风险分析[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 143-147.
- [58] 解家毕,孙东亚. 事件树法原理及其在堤坝风险分析中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 133-137.
- [59] 李松晨,杨高升,杨帆,等. 基于脆性理论的城市防洪系统探究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 154-158, 165.
- [60] 王靖文,刘茂,李剑峰. 基于故障树和Monte-Carlo模拟的堤防失稳概率分析研究[J]. 中国公共安全(学术版), 2008(1): 57-61.
- [61] BRIMICOMBE A J, BARTLETT J M. Linking Geographic Information Systems with Hydraulic Simulation Modeling for Flood Risk Assessment: The Hong Kong Approach [M]//GOODCHILD M F. *GIS and Environmental Modelling*. New York: Oxford University Press, 1996.
- [62] CHEN Y R, YU B. Integrated Application of the Analytic Hierarchy Process and the Geographic Information System for Flood Risk Assessment and Flood Plain Management in Taiwan [J]. *Natural Hazards*, 2011, 59(3): 1261-1276.
- [63] 梁艳红. 基于Mike Flood的中小河流溃堤洪灾风险分析[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2017.