

吴汉美, 段国凡, 李春娥. 洪涝灾害后城镇景观长距离输水系统水文风险评估[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 43–46, 78. [WU Hanmei, DUAN Guofan and LI Chune. Hydrological risk assessment of Urban Landscape Long Distance Water Delivery System after Flood Disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 43–46, 78. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.008.]

洪涝灾害后城镇景观长距离输水系统水文风险评估^{*}

吴汉美, 段国凡, 李春娥

(重庆大学城市科技学院, 重庆 402167)

摘要: 对输水系统运作过程存在风险采取准确评估, 可有效维护洪涝灾害后城镇景观设施完整性。该文提出一种基于 MS-AR 模型的长距离输水系统水文风险评估方法, 首先分析输水节点结构重要性与网络结构抗毁性的耦联关系, 推算平均节点结构重要度, 明确节点对系统损坏贡献水平, 利用节点结构重要度离散性质表示输水系统网络结构抗毁性, 获取长距离输水系统结构可靠系数; 其次使用 Ditlevsen 界限, 构建水文风险评估模型, 得到系统正确水文参数, 增强风险评估精度; 最后采用 MS-AR 模型, 将参数进行迭代实现最大似然估计, 并获取质量模拟序列, 完成风险评估过程。

关键词: 洪涝灾害; 长距离输水系统; 风险评估; 抗毁性; MS-AR 模型

中图分类号: TV694; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)02–0043–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.008

近年来, 我国很多城市因为频繁遭受强降水, 导致洪涝灾害频发, 伴随城镇建设规模的不断扩大, 其综合防灾减灾能力存在的问题逐步显露, 这样不但会影响社会经济的正常发展, 也会对部分地区的城镇景观带来巨大冲击, 景观设施安全性无法得到保证^[1]。因此, 洪涝灾害后城镇景观的有效治理成为现阶段相关领域研究的重要问题。

为了实现洪涝灾害的有效治理, 许多景观均兴建了一些大型输水系统, 长距离输水系统就是其中的关键组成部分。长距离输水系统水源与目的地之间的输水长度高达数百公里^[2], 为洪水疏散提供可靠保障。但在运行过程中, 由于管线较长、拓扑结构复杂等多种因素, 对其水文风险采取有效评估是十分必要的。

由此, 本文提出一种基于 MS-AR 模型的长距离输水系统水文风险评估方法。通过研究长距离输水系统抗毁性, 将节点位置差异作为输水节点结构重要性, 构建耦合中心性、容毁性的节点结构重要性描述, 获取系统结构可靠指数; 建立水文风险评估模型, 利用二维 Gumbel 分布完成水文参数计算, 增强风险评估准确率; 运用 MS-AR 模型达到准确评估水文风险目标, 降低城镇景观洪涝灾害后的修复难度。

1 长距离输水系统抗毁性分析

长距离输水系统网络结构抗毁性, 即系统受

到随机性故障或准确性攻击时, 网络结构可以保持在一个可以承受的水准。如果全部的损坏均发生在节点内, 以节点在网络中位置进行抗毁性分析^[3], 从而认定节点是否处于中心以及是否具备不可代替性。

因为节点在输水网络拓扑结构内的方位差别会对网络结构抗毁性造成重要影响, 将此种现象作为输水节点结构重要性, 并从节点的方位、节点被并行中心节点取代水平对其进行剖析。

输水节点中心性表示某个输水建筑物位于所连接建筑物的中心程度。位于中心的输水建筑物一旦遭受损坏, 和它相近的部分输水建筑物也会受到负面影响, 无法进行正常运转。所以, 可以利用相近输水建筑物个数和相关性权衡节点中心性。

若长距离输水系统是一个由 n 个节点及 m 条边构成的有向网络, 关于随机两点 i 、 j , 将其记作:

$$\zeta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 指向节点 } j; \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 不指向节点 } j. \end{cases} \quad (1)$$

节点的度是指输水建筑物与其余建筑物相连的数量, 可将节点的度描述为:

^{*} 收稿日期: 2020–09–09 修回日期: 2020–11–20

基金项目: 重庆市基金项目课题“大数据背景下基于生态弹性理论和神经网络的新型化城镇景观水系统节能环保研究”(KJQN201902505); 国家自然科学基金青年基金项目(51905824)

第一作者简介: 吴汉美(1987–), 女, 汉族, 重庆人, 硕士, 讲师, 主要从事景观水节能环保、建筑、市政工程管理、风险控制研究。E-mail: wuhanmei815326@163.com

$$K_i = \sum_{j=1}^n \zeta_{ij} \quad (2)$$

节点的度表现了此节点和周边节点之间构建关联的能力,在输水网络内,节点的度越大,证明和它连接的节点数目越多,节点的重要性就越强。

节点的度无法完全呈现出连接节点之间的互相关系,为了清晰的表现节点的相关性,加入网络凝聚度准则。网络凝聚度是在节点度的前提下^[4],考虑节点对之间的最短路径是否经过处在中心方位的节点,如果经过该节点,则节点的中心性越强,收缩后会降低网络的最短距离均值,让全局网络可以亲密的集合在一起。网络凝聚度越大,节点之间相关性多好,节点的重要性越高。

将进行节点收缩后的网络凝聚度表示成:

$$\alpha = \frac{1}{nl}; \quad (3)$$

$$l = \sum_{i,j \in U} \frac{2d_{\min,ij}}{n(n-1)} \quad (4)$$

式中: n 表示输水网络内节点个数, l 为节点之间最短路径均值, $d_{\min,ij}$ 为利用边个数表示的网络内随机两个输水建筑物 i 、 j 之间的最短距离, U 表示网络内全部节点构成的集合。

节点中心度是节点的连接能力和相关性的直接表现,将其利用节点收缩后网络凝聚幅值进行描述:

$$Z(i) = 1 - \frac{\alpha_0}{\alpha_i} \quad (5)$$

式中: α_0 表示节点在无收缩状态下的网络凝聚度, α_i 为节点 i 收缩后的网络凝聚度。

按照式(3)与式(4)的关联系,将式(5)采取简化,可得到:

$$Z(i) = 1 - \frac{\alpha_0}{\alpha_i} = 1 - \frac{\frac{1}{nl_0}}{\frac{1}{(n-K_i)l_i}} = 1 - \frac{(n-K_i)l}{nl_0} \quad (6)$$

输水节点中心度主要决定于节点度数及节点在网络内的方位。在同样条件下,度数越高的节点进行收缩后,网络内节点与边的个数会逐步减少,网络凝聚性越好,该节点处在中心方位的概率越高,在网络内仅包含一个节点的情况下,中心度为 1。

节点的中心性只能凸显出相近建筑物之间的关联,没有考虑并行中心建筑物互相代替的可能^[5]。所以,使用节点容毁性来描述某个中心节点的损耗,此节点所处路径能够被其余中心节点的所处路径进行取代。如果取代成功,那么结构重要性随之降低。

在长距离输水系统内,假设一个建筑物 i 处在中心方位,其上级的随机节点是 f , 其下级的随机节点是 k , 经过此输水建筑物的全部路径数量是 pq 。在建筑物 i 被破坏的情况下,则 p 内节点和 q 内节点构成的路径全部是损坏状态。如果节点 i 具备并行中心节点,那么节点 i 将拥有一个可代替路径。设定节点 j 与节点 k 之间的代替路径总数是 $t(j, k)$, 那么节点 i 的代替路径总数是:

$$s_i = \sum_{(f,k)=(1,1)}^{(p,q)} t(f,k), (1 \leq f \leq p, 1 \leq k \leq q) \quad (7)$$

在获取各个节点的可代替路径的前提下,将节点容毁度记作:

$$R(i) = \frac{s_i}{s_i + 1} \quad (8)$$

节点 i 所处路径的容毁度表现了节点的可代替性,容毁度越小,节点可代替性越低,证明节点的重要性越高。

输水节点在输水系统内的结构重要水平取决于节点中心水准与节点容毁度,针对随机节点,其结构重要度就是决定因素的耦合关联:

$$C(i) = Z(i)(1 - R(i)) \quad (9)$$

在长距离输水系统中,其网络结构是不变的,节点结构重要性与网络结构状态相关,全局网络的节点结构重要度均值就是该系统节点重要性的平均水准^[6],借此权衡输水网络结构抗毁度:

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C(i) \quad (10)$$

\bar{I} 的值越趋近于 1,证明长距离输水系统内重要节点个数越多,抗毁性越差。

随机性故障及准确性攻击大部分生成于主要节点内,因此使用每个节点结构重要性比例对节点贡献度进行描述:

$$q(i) = \frac{C(i)}{\bar{I}} \quad (11)$$

$q(i)$ 的值越低,证明此节点对系统损坏程度越低,若 $q(i) > 1$ 时,此节点对系统损坏程度达到最高峰。

输水系统内节点结构重要度散布状态越集中,节点的级联失效反应越低,反之增高^[7]。所以,采用二阶中心动差来表示节点结构重要度的离散性质:

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C(i) - \bar{I})^2 \quad (12)$$

通过以上过程,能够明确长距离输水系统结构的可靠程度,为后续水文风险评估提供理论借鉴。

2 水文风险评估模型构建

根据传统的概率理论,可以把长距离输水系统中线总干渠内的 n 个跨河交叉建筑物当作串联系统内的 n 个部件。各个交叉建筑物的失效,就会让系统不能正常工作。所以,将串联系统失效几率描述为:

$$P_{\beta} = P\{Q_1 \cup Q_2 \cdots \cup Q_n\} \quad (13)$$

式中: Q_1, Q_2, \cdots, Q_n 为系统每个单元的失效事件。在计算式(13)时一定要使用数值方法算出 n 维分布函数 $\phi n(\cdot)$ 。通常状况下,此种计算手段是很难实现的。但按照相关推论,能够得到失效几率的临界值^[8],以此实现上述数值计算,将获得的失效几率下限记作:

$$P_{\beta} \geq P(Q_1) + \sum_{i=2}^n \max\{P(Q_1) - \sum_{j=1}^{i-1} P(Q_1 \cap Q_j); 0\} \quad (14)$$

$$P(A \cup B) \geq \max[P(A), P(B)] \quad (15)$$

关于随机事件 A 、 B ,其关系为式(15),因此可将 P_{β} 的上限定义为:

$$P_{js} \leq \sum_{i=1}^n P(Q_i) - \sum_{i=2, j < i}^n \max[P(Q_i \cap Q_j)]。 \quad (16)$$

把式(14)与式(16)统一称作 Ditlevsen 界限, 利用该界限就能将求解 n 维分布函数转变成求解二维分布函数。本文运用二维 Gumbel 随机分布模型, 进一步获取长距离输水系统准确的水文参数, 提高水文风险评估正确率。

二维 Gumbel 模型是一种边际分布模型^[9], 该模型的一般表达形式为:

$$F(X \leq x, Y \leq y) = F(x) F(y) \exp \theta / \ln F(x) + 1 / \ln F(y)^{-1}。 \quad (17)$$

式中: $F(x)$ 、 $F(y)$ 依次为随机变量 X 与 Y 的边际分布函数, 具体表示为:

$$F(X \leq x) = \exp \frac{x - u_x}{\alpha_x}; \quad (18)$$

$$F(Y \leq y) = \exp \frac{y - u_y}{\alpha_y}。 \quad (19)$$

式中: Gumbel 分布参数 α 、 u 可通过矩法进行求解:

$$\alpha = \frac{6}{\pi} S, u = M - 0.577 \alpha。 \quad (20)$$

M 与 S 分别为样本的平均值及平均方差。

在式(17)中, $\theta(0 \leq \theta \leq 1)$ 是随机变量 X 、 Y 的关联系数, 将其表示成:

$$\theta = 21 - \cos \pi \frac{\rho}{6}, 0 \leq \rho \leq 2/3。 \quad (21)$$

式中: ρ 表示积矩相关系数, 并将其拓展为:

$$\rho = \frac{E(X - \mu_x)(Y - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y}。 \quad (22)$$

在 $\rho = 0$ 的情况下, 关联系数 $\theta = 0$, 证明随机变量呈互相独立的状态, 此时 Gumbel 联合分布可描述成两个随机变量边际分布乘积之和:

$$F(x, y) = F(x)F(y)。 \quad (23)$$

3 MS-AR 模型下长距离输水系统水文风险评估

MS-AR(马尔可夫状态切换-自回归)模型的建模思路为: 针对具备复杂结构的时序 $\{x_t\}$, 假设其演变形态用 M 个 P 阶自回归过程进行模拟, 再加入形态参变量 S_t , S_t 表示时间序列在时段 t 所具备的结构模式, 它是拥有状态空间 J 的一阶马尔可夫过程, 也就是目前状态仅和前一个状态相关, 和过去其他状态无关^[10]。因此设定模型的残差服从正态分布, 那么将 MS-AR 模型表示为:

$$\begin{cases} x_t = c^{S_t} + \sum_{k=1}^p \varphi_k^{S_t} x_{t-k} + \sigma^{S_t} \varepsilon_t, S_t \in J; \\ \varepsilon_t \sim i. i. d. N(0, 1); \\ Pr(S_t = j | S_{t-1} = i) = P_{ij}; \\ \sum_{j=1}^M P_{ij} = 1。 \end{cases} \quad (24)$$

式中: c^{S_t} 表示系统处在状态 S_t 下自回归模型的截距项, $\varphi_k^{S_t}$ 是状态 S_t 的自回归系数, σ^{S_t} 是状态 S_t 的残差平均方差, Pr 是系统在 $t-1$ 时段由状态 i 移动至状态 j 的几率。把最大似然估计求解 θ 的流程记作:

$$\xi_{i,t-1} = Pr(S_{t-1} = i | \Omega_{t-1}; \theta) (i \in J) \quad (25)$$

式中: Ω_{t-1} 是处在 $t-1$ 时段下探测的全部序列样本集合, 也可将其当作 t 时段的数据集。

通过式(24)可以看到, 在 t 时段中, 系统处在第 j 个状态的条件密度函数为:

$$\begin{aligned} \eta_{j,t} &= f(x_t | S_t = j, \Omega_{t-1}; \theta) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma^{S_t}} \cdot \exp \left\{ - \frac{(x_t - c^{S_t} - \sum_{k=1}^p \varphi_k^{S_t} x_{t-k})^2}{2(\sigma^{S_t})^2} \right\}。 \end{aligned} \quad (26)$$

利用式(25)与式(26)能够获取 t 时段的状态混合密度函数:

$$f(x_t | \Omega_{t-1}; \theta) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{ij} \xi_{i,t-1} \eta_{j,t}。 \quad (27)$$

通过上述公式的推算结果, 可对参数 θ 使用迭代法完成最大似然估计, 待评估参数集合 θ 的似然函数是:

$$L(\theta | \Omega_T) = \sum_{t=1}^T \lg f(x_t | \Omega_{t-1}; \theta)。 \quad (28)$$

在运用极大似然方法估计自回归模型参数的过程中, 要求模拟的时间序列必须是高斯过程^[11], 而真实的输水时间序列并不能完全符合该条件, 所以对现有的输水时序构建 MS-AR 模型之前, 首先应该对输水时序数据采取高斯检测, 若输水时序流程为非高斯形态, 就要利用某个转换方法将原本模态改变成服从高斯分布的时间序列^[12], 将转换过程表示为:

$$x_t^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{x_t - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0; \\ \ln x, & \lambda = 0。 \end{cases} \quad (29)$$

式中: λ 表示一个待转换参数。

针对长距离输水系统的质量状况变量 $\{x_t\}$, 假设给予的输水质量准则的操控限值是 x_c , 则将长距离输水系统的风险描述为:

$$R_z = Pr(x_t \geq x_c)。 \quad (30)$$

式中: x_t 代表输水断面的某个检测标准, Pr 是事件 $x_t \geq x_c$ 的概率函数。

利用建立的 MS-AR 模型获得长距离输水系统的质量状况变量的模拟序列 $\{z_n, n = 1, 2, \dots, N\}$, N 表示随机模拟的验证次数。验证次数越多, z 的频率分布就越靠近实际的概率分布值。如果序列 $\{z_n\}$ 内超出输水质量准则限值 x_c 的个数是 N_z , 那么长距离输水系统水文风险评估值为:

$$R_z = N_z / N。 \quad (31)$$

通过上述过程, 可以有效解决不确定性条件下的长距离输水系统精准管理和风险分析问题, 从而提升系统综合防洪风险系数, 保障长距离输水系统的稳定运行。

4 仿真实验

为了验证方法的可靠性, 对本文方法与传统 BMA 方法进行仿真实验对比。仿真软件为 Matlab。本文选取某市中心区域部分供水网络进行研究, 该供水覆盖面积为 3 km^2 , 为约 1 000 居民提供优质水源。由于选取的管网面积较小, 同时处于主城中心, 任意节点之间高差不大, 故近似将各节点放到同一平面上, 各个节点充当水源节点角色, 其拓扑图如图 1 所示。

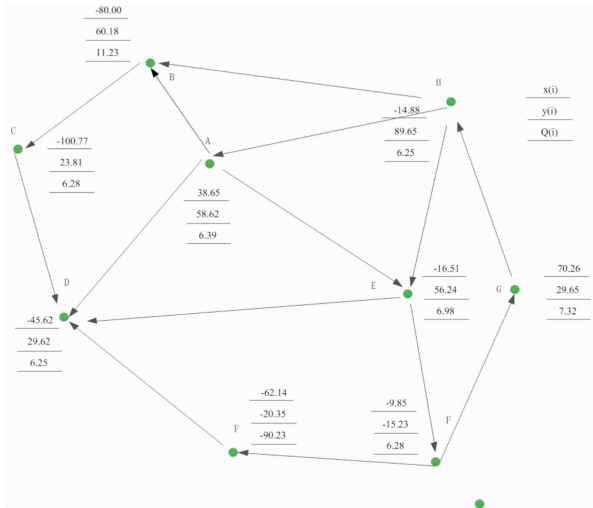


图1 供水网络拓扑图

A 作为中心节点，与网络中其它节点间均有业务传输，管辖着地市级调度中心，辖区内供水站等。因此，节点在供水网中的地位高，自身权值较大，且在网络拓扑结构中连通度大，位置重要，节点的综合重要度最大(表1)。

表1 节点重要度评价结果

节点编号	节点重要度
A	0.995
B	0.924
C	0.865
D	0.463
E	0.624
F	0.785
G	0.951

图2为两种方法关于长距离输水系统水文风险评估的精度对比。从图2中可以看到，本文方法的风险评估准确率较高，且伴随实验次数的增长，其变化曲线依旧呈现出相对稳定的状态，证明该方法可以在保持评估精度的同时，还能维护系统输水网络的平稳运作，实用性较高。传统BMA方法在初始阶段的正确率和本文方法相差不多，但在多次实验后，其稳定性逐步下滑，关键在于没有对长距离输水系统的全局网络抗毁性进行有效分析，导致其风险评估正确率不高。

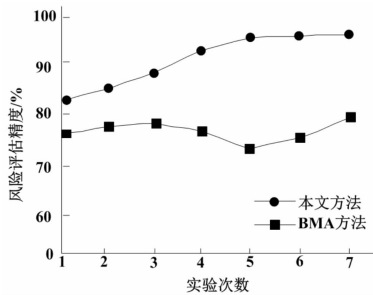


图2 长距离输水系统水文风险评估精度对比

图3是两种方法风险评估效率对比，从图中可知，本文方法评估用时较短，可以充分实现长距离输水系统水文风险的高效率风险评估，而传统BMA方法的评估耗时较多，证明该方法实施风险评估时，无法满足洪涝灾害后输水的有效进行。

综合对比看出，本文方法的风险评估准确性及效率均优于传统方法。

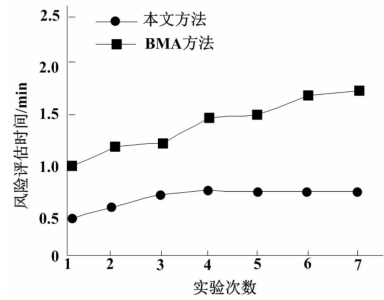


图3 长距离输水系统水文风险评估效率对比

针对节点重要度的情况，增加链路条数，构建“可行虚拟网络图”，获取优化后的供水网络拓扑图如图4所示。

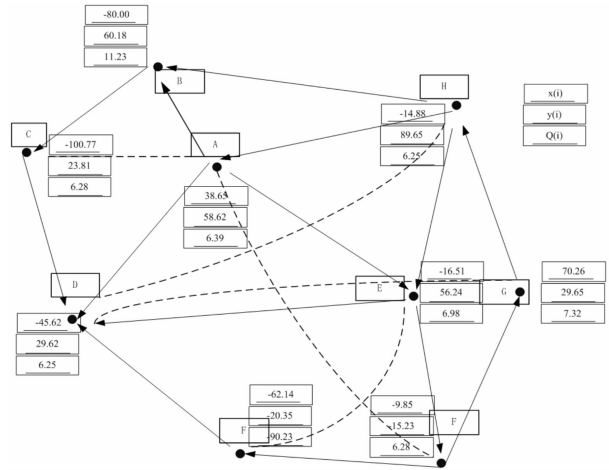


图4 优化后的供水网络拓扑图

由图1以及图4可以看出，原拓化中节点A接收来自其它节点的数据，并直接向周围节点发送数据，业务量多且承载的重要业务比例大。优化后，连接节点A的线路增加，原有AD链路上的供水业务部分转移到AC链路上，AE上的业务部分由链路AF承担。以适应业务传输的要求并提高网络抗毁性。与原基础网络相比，优化结构后网络中重要度高的节点的连接线路增加，使链路承载的业务量降低，并且减少链路承载的业务重要度，减少因一条链路失效造成的损失，从而提升供水网抗毁性。

6 结论

针对城镇景观洪涝灾害后的长距离输水风险评估问题，本文提出一种基于MS-AR模型的长距离输水系统水文风险评估方法。通过分析抗毁性得到长距离输水系统结构可靠水准，为水文风险评估提供先决条件；构建水文风险评估模型，得到准确的长距离输水系统水文参数，提升风险评估准确性；对输水时序数据进行高斯检验，再运用MS-AR模型完成长距离输水系统水文风险的正确评估。

(下转第78页)

information value model is used to evaluate geo-hazard susceptibility. Furthermore, the iterative self-organizing clustering model is used to classify the results of geo-hazard susceptibility evaluation. Finally, the evaluation results are compared with the actual geo-hazards, and the accuracy of geo-hazard susceptibility evaluation is quantitatively evaluated. The results show that the susceptibility evaluation results of geo-hazards coincide with the actual occurrence of geo-hazards, the evaluation results are reliable, the evaluation methods have high accuracy and applicability. Rock and soil type, slope structure, water action and human engineering activities are the most important controlling factors for the development of geo-hazards. The established evaluation method improves the theoretical system of geo-hazard susceptibility evaluation, which can provide theoretical guidance and technical reference for regional geo-hazard susceptibility evaluation. The evaluation results can provide scientific basis for the prevention and control of geo-hazards and territorial spatial planning in this region.

Key words: geo-hazard; susceptibility; AHP; Weighted Information Value Model; ISODATA Cluster Algorithm; Three Gorges Reservoir Area

+++++

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] 谢五三, 宋阿伟, 田红. 中小河流域暴雨洪涝灾害风险评估及效果检验[J]. 气象科学, 2018, 38(2): 264-270.
- [2] 庞明, 廖小罕, 岳焕印, 等. 面向中国洪涝灾害应急监测的无人机空港布局[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 854-864.
- [3] 王晶, 薛联青, 张敏, 等. 不同降水频率下淮河流域洪涝灾害风险评估[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 1-5.
- [4] 姬华生, 周志彬, 符必昌. 某长距离输水管道系统水力特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 27-30.
- [5] 王彦祥, 颜炳魁, 田颖玲, 等. 长距离输水管线停泵水锤分析及防护[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7): 57-61.
- [6] 王丹, 张强, 陶付领, 等. 大型输水工程网络三维场景建设
- [7] 宋松柏, 王小军. 基于 Copula 函数的水文随机变量和概率分布计算[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 687-693.
- [8] 李智, 刘玉菲, 任星芮男, 等. 基于 SWMM 的城市洪涝风险管理研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11): 35-42.
- [9] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2019, 38(5): 625-636.
- [10] 徐绪堪, 王京. 基于犹豫模糊集的城市型水灾害风险评估[J]. 统计与决策, 2019, 35(5): 51-55.
- [11] 温欣岚, 罗占业, 樊美娜, 等. 链式风险评估方法研究及工程应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(3): 154-160.
- [12] 徐得潜, 张倩. 基于 AHP-CRA 的合流制污水管道风险评估[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1149-1154.

Hydrological Risk Assessment of Urban Landscape Long Distance Water Delivery System after Flood Disaster

WU Hanmei, DUAN Guofan and LI Chune

(City College of Science and Technology, Chongqing University, Chongqing 402167, China)

Abstract: It can effectively maintain the integrity of urban landscape facilities after flood disaster by accurately assessing the risk in the operation process of long-distance water delivery system. we present a hydrological risk assessment method based on ms-ar model. Firstly, the coupling relationship between the structural importance of water delivery nodes and the invulnerability of network structure is analyzed, the average structural importance of nodes is calculated, the contribution level of nodes to the system damage is determined, and the invulnerability of network structure of water delivery system is expressed by using the discrete property of node structural importance, and the structural reliability coefficient of long-distance water delivery system is obtained; secondly, the structure of long-distance water delivery system is constructed by using Ditlevsen boundary. Finally, ms-ar model is used to iterate the parameters to achieve the maximum likelihood estimation, and obtain the quality simulation sequence of long-distance water delivery system to complete the risk assessment process. The simulation results show that this method can get accurate hydrological risk assessment results of long-distance water delivery system, and provide effective help for urban landscape flood restoration.

Key words: flood disaster; long distance water conveyance system; risk assessment; damage resistance; MS-AR model