

# 考虑水质因素的供水管网抗震韧性评估

侯本伟<sup>1</sup>, 黄金美<sup>1,2</sup>, 韩朝<sup>3</sup>, 吴珊<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 北京市工程咨询有限公司, 北京 100124;  
3. 防灾科技学院 土木工程学院, 河北 三河 065201)

**摘要:** 城市基础设施系统抗震韧性分析模型是评估城市防震减灾能力并指导震后恢复工作的重要依据。提出了耦合水力与水质模拟的供水管网抗震韧性评估模型。根据管道地震易损性模型和 Monte Carlo 模拟生成管网地震破坏场景, 并采用动态重要度方法模拟管网震后修复过程。通过管网中余氯浓度的降低表示地震破坏对管网水质的负面影响, 震后管网余氯浓度的变化取决于管道破坏引起的供水路径和水量的变化。采用震后余氯浓度未下降的用户节点供水量, 作为管网系统水质性能评估指标。所提出的模型应用于2个不同布局的 Benchmark 案例管网。研究表明: 管道破损处的水量漏失导致其上游管道的水流量增加、余氯浓度增大, 下游管道的供水路径延长、余氯浓度减小。管网的水质韧性值往往低于水力韧性值, 水力和水质韧性相对差异程度受到管网布局和运行规则的影响, 文中案例管网水质和水力指标计算的抗震韧性损失指标的相对差异在 17%~286% 之间; 运行规则复杂且含有调节水箱的管网, 其水力和水质韧性的差异较大。

**关键词:** 供水管网; 抗震韧性; 韧性指标; 水质模型; 水力模型

中图分类号: P315.9; TU991.33

文献标识码: A

## Seismic resilience evaluation of water supply network considering water quality factors

HOU Benwei<sup>1</sup>, HUANG Jinmei<sup>1,2</sup>, HAN Zhao<sup>3</sup>, WU Shan<sup>1</sup>

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. Beijing Municipal Engineering Consulting, Co., Ltd., Beijing 100124, China; 3. School of Civil Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** Resilience evaluation of infrastructure system provides an essential basis for the resilience enhancement and disaster mitigation of urban communities. This study presents a seismic resilience evaluation model for water supply network that integrates the hydraulic with water quality simulation. The seismic damage scenarios of water supply network are generated according to seismic fragility model of pipelines and the Monte Carlo simulation, and the post-earthquake recovery of pipeline damages is simulated by dynamic importance-based recovery sequence. The negative influence of earthquake hazard on water quality is investigated by the chlorine concentration reduction of water, which depends on the changes in water age and supply path caused by pipeline damages. The water supply of user nodes without quality deterioration after earthquakes is used as the water quality performance index of water supply network. The proposed evaluation model is implemented in two benchmark water supply network with different layouts. Application results show that the water losses of pipeline damages lead to water flow increases and greater chlorine concentration in its upstream pipelines, and lead to prolonged water supply path and smaller chlorine concentration in its downstream pipelines. The water quality resilience of water supply network tends to be lower than that of hydraulic services, and the relative difference between hydraulic and water quality resilience is affected by the layout and operating rules of water supply network. In the application case of water supply network,

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-04-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3003603); 国家自然科学基金项目(51978023)

作者简介: 侯本伟(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事生命线地震工程研究。E-mail: benweihou@bjut.edu.cn

通讯作者: 吴珊(1963—), 女, 副教授, 博士, 主要从事给排水管网模型优化与管理研究。E-mail: wushan@bjut.edu.cn

the relative difference of seismic resilience loss calculated by water quality and hydraulic ranges from 17% to 286%, and there is a large difference between hydraulic and water quality resilience of water supply network whose operating rules are complex and contain regulating tanks.

**Key words:** water supply network; seismic resilience; resilience index; water quality model; hydraulic model

## 0 引言

基础设施系统灾害韧性(resilience)是指社区或系统减轻风险并遏制灾害的影响,开展恢复活动尽可能减小社会和功能中断,同时最大限度地降低未来灾害影响的能力<sup>[1]</sup>。对于地震灾害作用下的韧性评估,不仅关注地震发生瞬时的系统功能状态,还要关注灾后恢复过程中的功能变化。可为系统功能地震损失、恢复过程中的功能变化分析提供依据,并指导基础设施系统的灾前规划和灾后恢复工作。

在供水管网的抗震韧性量化评估研究中,很多学者采用基于水力模型的水力功能指标(水量、压力、水箱水位)或水力衍生指标(影响人口)的服务满足率来评价管网服务性能,并研究供水管网的震后恢复策略和管网更新改造方案<sup>[2-6]</sup>。龙立等<sup>[2]</sup>采用节点压力评估管网抗震韧性,提出了供水管网震后两阶段修复策略。毕熙荣<sup>[3]</sup>以组织维度的视角,采用能接受到供水的用户数量,对管网的抗震韧性进行了评估。韩朝<sup>[4]</sup>采用供水满足率指标评估供水管网抗震韧性,并提出了一种动态重要度排序方法,结果表明,动态重要度方法可以获得与全局优化方法相似的结果,且需要更少的计算成本。LIU等<sup>[5]</sup>采用节点压力评估供水管网抗震韧性,并在研究中证实了动态重要度方法的高效性。在供水管网多指标抗震韧性评估中,CIMELLARO等<sup>[6]</sup>提出了考虑供水中断用户数量、水箱水位和水质指标的供水管网抗震韧性评估框架,该框架仅引入了水质韧性的概念,但未建立水质韧性的量化评估方法。

在供水管网正常运行或异常中断情况下的可靠性和韧性评估中,一般同时考虑水力指标和水质指标。FARMANI等<sup>[7]</sup>在评估供水管网的可靠性时,将TODINI指数<sup>[8]</sup>与水龄相结合,研究表明,大直径管道和大容积水箱在提高压力和水量服务能力的同时,也会由于低流速和低周转率对水龄产生不良影响。DIAO等<sup>[9]</sup>提出了全局韧性(global resilience analysis, GRA)的概念,通过管道故障、需水量增加和污染侵入3种失效模式,采用压力、流量及受污染水量,对管网的连通性、冗余性和抵抗水质波动的韧性进行了评估;研究表明增加管网中水箱的冗余可能会降低系统的水质韧性。在供水管网的水质评价中,一阶衰减模型已被广泛用于供水管网的可靠性或脆弱性评估。赵元等<sup>[10]</sup>采用一阶余氯衰减模型,以余氯和水龄作为评价指标,对节点、管网的脆弱性进行了评估。HATAM等<sup>[11]</sup>采用余氯的一阶衰减模型评估了大肠杆菌监测在检测供水管网污染方面的局限性。

上述研究表明,水量和水质都是影响供水管网服务性能的重要因素,而现有的供水管网抗震韧性评估中,通常仅考虑水力指标评估灾后服务性能,而未考虑水质指标。由于地震破坏引起的管道流量重新分配可能导致水质指标发生显著变化<sup>[11-12]</sup>。本研究提出了考虑水力和水质性能的供水管网抗震韧性评估框架,能够在考虑服务数量和质量的情况下全面了解供水管网的系统性能;并通过水质和水力指标计算的最小服务性能、修复持时、韧性指数和韧性损失,对供水管网震后的水力和水质特征进行了考察,揭示了水力与水质韧性的差异。

## 1 管网抗震韧性模型

供水管网的抗震韧性通常被认为系统抵抗地震损坏、维持服务功能,并尽快恢复至正常运行的能力<sup>[1,5,13]</sup>。基于“韧性三角”计算的韧性指数(resilience index, RI)以及韧性损失(resilience loss, RL),能够反映出供水管网的灾后恢复速度以及整个恢复过程的性能损失,被广泛应用于供水管网的抗震韧性评估中<sup>[1,5,14]</sup>。采用如图1所示系统性能的时间变化曲线 $F(t)$ 计算韧性相关的指标, $F_0$ 表示正常运行状态下的系统性能指标, $F_{\min}$ 表示地震事件造成的系统功能剩余值,体现了系统的抵抗能力或鲁棒性;其中,韧性指数(RI)由系统性能曲线下方面积与性能需求面积的比值表示<sup>[5,14]</sup>,系统的韧性损失(RL)由系统性能曲线上方的阴影面积表示<sup>[5,14]</sup>,其表达式为

$$RI = \frac{1}{t_E - t_0} \int_{t_0}^{t_E} F(t) dt \quad (1)$$

$$RL = \int_{t_0}^{t_E} (F_0 - F(t)) dt \quad (2)$$

式中:  $t_0$  为地震事件发生时间;  $t_E$  为地震事件发生后供水管网恢复活动结束时间;  $T_D$  为震后修复历时,  $T_D = t_E - t_0$ , 体现了系统的震后恢复能力。

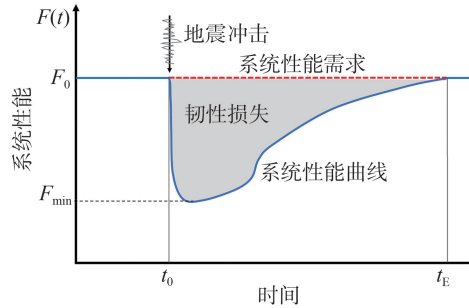


图 1 供水管网震后性能变化曲线

Fig. 1 Post-earthquake performance curve of water supply network

在本研究中,供水管网的水力和水质的系统性能由不同的归一化指标表示,采用供水管网在  $t$  时刻所有节点的实际配水量与需水量之比,表示供水管网在  $t$  时刻的水力服务性能  $F_H(t)$ ;同时考虑水质指标,采用供水管网在  $t$  时刻所有节点的实际配水量中,水质较震前未下降的实际配水量与需水量之比,表示供水管网在  $t$  时刻的水质服务性能  $F_Q(t)$ ,如式(3)、式(4)所示:

$$F_H(t) = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i(t)}{\sum_{i=1}^m Q_{0i}(t)} \quad (3)$$

$$F_Q(t) = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i(t) Q_i(t)}{\sum_{i=1}^m Q_{0i}(t)} \quad (4)$$

式中:  $m$  为管网中节点的数量;  $Q_i(t)$  为节点  $i$  在  $t$  时刻考虑节点水压和配水关系的实际配水量,由 2.2 节管网水力分析模型计算;  $Q_{0i}(t)$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的需水量;  $\omega_i(t)$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的水质指数,由 2.3 节管网水质分析模型计算,当节点  $i$  在震后  $t$  时刻的水质未下降时,  $\omega_i(t) = 1$ ,水质下降时,  $\omega_i(t) = 0$ 。

## 2 供水管网震后性能评价模型

评估管网震后服务性能的基本流程包括:①根据地震动荷载,计算管网中各个管道平均破损率  $RR$  和失效概率  $P_f$ ;根据管道  $P_f$  和 Monte Carlo 随机抽样,产生管网中各个管道的破坏样本。②建立管道破坏点(渗漏或断开)对应的水力模型,将破坏点水力模型写入管网整体水力模型中得到震后管网水力模型,采用压力决定节点流量的关系式求解震后管网水力模型。③基于管网水中余氯的一阶衰减关系,联合求解震后管网水力和水质模型,得到管网中不同位置处的压力、流量和余氯浓度,进而评价震后管网的水力、水质服务能力。

### 2.1 管线地震易损性

管道的地震失效概率可通过基于力学的分析模型,或基于历史地震破坏记录的统计模型<sup>[15-16]</sup>进行评估。由于管道的实际损坏受地震动强度、地质条件和管道特征等因素的影响,呈现出空间不确定性,因此统计模型被广泛使用<sup>[17-18]</sup>。本研究采用地震破坏统计模型,假定震后管道的破坏是随机独立事件,且沿管线长度  $L$  服从泊松分布<sup>[18-19]</sup>,地震作用下管道失效的概率  $P_f$  可表示为

$$P_f = 1 - e^{-RR \cdot L} \quad (5)$$

式中:  $L$  为管线的长度(km);  $RR$  为管线的平均震害率(处/km),由震害记录统计得到。本研究采用日本水道协会建立的地震破坏统计模型<sup>[15]</sup>,管线平均震害率  $RR$  与地震动强度(地震峰值速度  $PGV$ )间的关系可表示为

$$RR = C_p \cdot C_d \cdot C_g \cdot C_l \cdot RR_0 \quad (6)$$

$$RR_0 = 3.11 \times 10^{-3} \times (PGV - 15)^{1.30} \quad (7)$$

式中:  $C_p$ 、 $C_d$ 、 $C_g$ 、 $C_l$ 分别为考管材、虑管径、地形地质和场地液化影响的调整系数,计算方法见文献[15];RR为管线的平均震害率(处/km);RR<sub>0</sub>为标准震害率;PGV以cm/s为单位计算。

## 2.2 震后管网水力模型

根据美国生命线协会研究,地震造成的管道破坏分为渗漏和断开2种类型<sup>[18]</sup>,其中渗漏数量比例约为80%,而断开数量比例约为20%<sup>[20]</sup>。SHI等<sup>[18]</sup>将地震导致的管道渗漏分为5种类型,并给出了不同形式渗漏的发生概率及对应的开口面积。本研究在管道失效概率 $P_f$ 的基础上,采用Monte Carlo模拟对地震引起的管道破坏类型进行抽样<sup>[21]</sup>。将管道破坏样本添加到水力模型后,计算渗漏点( $Q_L$ )或断开点( $Q_{L1}+Q_{L2}$ )的漏水量,从而得到管网的震后水力服务性能。

在水力模型中,通过增加虚拟节点、虚拟管道和止回阀,对渗漏和断开管道的原始拓扑进行修改,如图2所示。虚拟节点的高程设置为管道两端节点的平均高程。同时,添加止回阀,限制水流单向流动。虚拟管道的直径等于受损管道的直径,虚拟管道的长度为1m,摩阻系数为 $10^6$ 。为了模拟泄漏和断开造成的水量损失,图2(a)中虚拟节点的扩散器面积设置为渗漏的漏口面积,图2(b)中虚拟节点的扩散器面积设置为管道的横截面积,渗漏和断开管道的流量通过孔口流出公式计算<sup>[19]</sup>。管道的损坏及修复的状态,采用管道控制规则进行模拟,如表1所示,通过设置管道在各个时刻的打开、关闭的状态,限制管道的输水能力,从而模拟管道的损坏及修复过程。

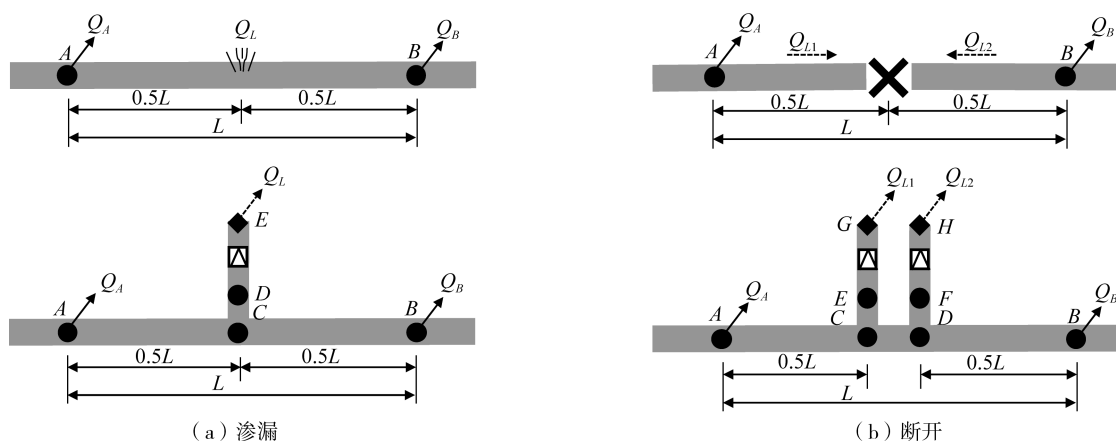


图2 管道破坏示意图及破坏点水力模型

Fig. 2 Diagram of pipeline damages and the hydraulic model of failure points

表1 虚拟管道的控制规则

Table 1 Control rules for fictitious pipes

破坏类型	虚拟管道	虚拟管道状态	
		管道AB破坏	管道AB修复
渗漏	CD	打开	关闭
断开	CD	关闭	打开
	CE	打开	关闭
	DF	打开	关闭

将上述建立的管道破坏点(渗漏或断开)水力模型写入到管网整体水力模型中,完成震后管网水力模型的构建并进行水力参数求解。为避免震后水力分析中的负压问题,采用压力驱动分析(pressure-dependent analysis, PDA)方法<sup>[19,21]</sup>进行供水管网的震后水力模拟,用户节点压力与供水量的关系采用WAGNER等<sup>[22]</sup>提出的PDA模型表达式,并采用EPANET2.2<sup>[23]</sup>软件计算,节点配水量与节点水压满足如下函数关系:

$$Q_i = \begin{cases} 0 & H_i \leq H_{\min} \\ Q_{0i} \cdot \sqrt{\frac{H_i - H_{\min}}{H_{\text{req}} - H_{\min}}} & H_{\min} < H_i < H_{\text{req}} \\ Q_{0i} & H_{\text{req}} \leq H_i \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Q_{0i}$ 为节点  $i$  的需水量(L/s); $Q_i$ 为考虑节点水压和配水关系的节点  $i$  的配水量(L/s); $H_i$ 为节点  $i$  的水压(m); $H_{\min}$ 为节点  $i$  配水量  $Q_i$  大于 0 所需的最低节点水压(m); $H_{\text{req}}$ 为节点  $i$  满足需水量  $Q_{0i}$  的服务水压(m)。

### 2.3 管网水质分析的一阶衰减模型

ROSSMAN 等<sup>[24]</sup>建立了基于质量守恒原理和反应动力学的管网水质模型求解方法,在管道中溶解性物质以流体相同的速度随流体流动,同时以一定的速率发生反应(生成或衰减),管道中物质的迁移方程为

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (9)$$

式中: $C_i$ 为管道  $i$  中物质浓度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $u_i$ 为由管网水力模型计算的管道流速( $\text{m}/\text{s}$ ); $r$ 为反应速率( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ ), $r$ 为浓度  $C_i$  的函数。

氯在管道中的衰减可分为主体水消耗( $k_b$ )和管壁消耗( $k_w$ )两部分,在本研究中,采用一阶衰减模型模拟余氯在管道中的衰减,如式(10)所示,该模型已被广泛用于管网的水质分析中<sup>[9-11]</sup>。

$$r(C_i) = -kC_i = -\left[k_b + \frac{4k_w k_f}{D(k_w + k_f)}\right] \cdot C_i \quad (10)$$

式中: $k$ 为管道中氯衰减系数; $k_b$ 为主体水流中余氯一阶反应速率系数( $\text{s}^{-1}$ ); $k_w$ 为管壁氯反应速率系数( $\text{m}/\text{s}$ ); $k_f$ 为物质传输系数( $\text{m}/\text{s}$ ); $D$ 为管道直径(m)。

在多个管道连接的节点中,认为流体的混合是瞬时、完全的,流出节点的物质浓度等于入流管浓度的流量加权和,其表达式为

$$C_{j|x=0} = \frac{\sum_{i \in I_k} Q_i C_{i|x=L_i} + Q_{k,\text{ext}} C_{k,\text{ext}}}{\sum_{i \in I_k} Q_i + Q_{k,\text{ext}}} \quad (11)$$

式中:下标  $i, j$  分别为节点  $k$  的上下游管道; $I_k$ 为节点  $k$  上游管道集; $L_i$ 和  $Q_i$ 分别为上游管道  $i$  的长度和流量; $Q_{k,\text{ext}}$ 和  $C_{k,\text{ext}}$ 分别为从节点  $k$  进入管网的外部流量和物质浓度; $C_{j|x=0}$ 为下游管道  $j$  起始点浓度; $C_{i|x=L}$ 为上游管道  $i$  末端的浓度。

## 3 震后恢复模型

地震发生后,破坏管线的恢复措施取决于不同的破坏类型,地震后管道恢复行动分为隔离、替换和补漏 3 种类型<sup>[4,14]</sup>。断开管道的恢复需要隔离和替换行动,而渗漏的管道只需要补漏行动。其中隔离行动需要的时间为  $0.5 \text{ h}$ <sup>[4,14]</sup>,替换和补漏恢复行动的时间与直径相关<sup>[4,14]</sup>,计算方法为

$$T = \begin{cases} 0.156 \cdot d^{0.719} & \text{替换} \\ 0.223 \cdot d^{0.577} & \text{补漏} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $T$ 为恢复事件的持续时间(h); $d$ 为管线直径(mm)。

根据韩朝<sup>[4]</sup>和 PAEZ 等<sup>[14]</sup>的研究,地震破坏供水管网的震后恢复过程分为隔离和修复 2 个阶段:在隔离阶段,只对隔离操作进行优先级排序并执行隔离操作,在所有断开管道被隔离后,再进行修复工作;在修复阶段,替换或补漏行动将被执行优先级排序并被执行相应的修复活动。

采用管线动态重要度排序方法确定震后的修复次序<sup>[4,14]</sup>,在每个时间步长  $t$ ,当存在一个可用的维修队伍被分配给未修复的破坏管线时,根据未修复管线的动态重要度(dynamic importance, DI)排序来确定管线的修复次序。管线的动态重要度方法根据当前时刻  $t$  的供水管网的破坏状态,计算每个未修复的破坏管线的重要性,计算公式为

$$\text{DI}_i(t) = \frac{F_{+i}(t) - F(t)}{T_i} \quad (13)$$

式中: $F(t)$ 为在  $t$  时刻供水管网破坏状态下的系统性能; $F_{+i}(t)$ 为在  $t$  时刻管网状态的基础上对破坏管线  $i$  执行恢复行动后供水管网的系统性能; $T_i$ 为修复破坏管线  $i$  所花费的时间; $\text{DI}_i(t)$ 为破坏管线  $i$  的动态重要度,表示  $t$  时刻修复破坏管线  $i$  后供水管网系统性能的提升率。

采用第一节至第三节中的模型方法建立的抗震韧性评估流程图如图 3 所示。考虑到管道损伤的不确定性,供水管网的震后破坏样本由 Monte Carlo 模拟方法生成。对每个地震破坏样本,进行水力水质评估和震

后恢复过程模拟,计算每个破坏样本对应的韧性指标。最后,采用全部破坏样本的韧性指标的均值来表示供水管网的抗震韧性。

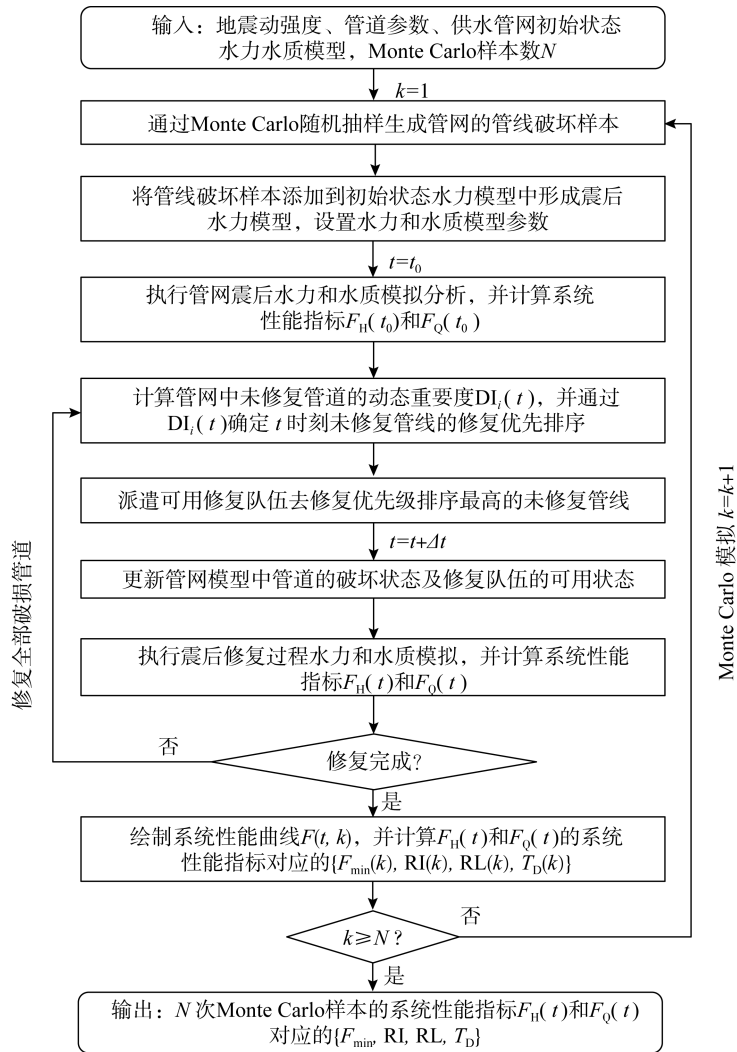


图3 基于 Monte Carlo 模拟的管网抗震韧性评估流程图

Fig. 3 Flowchart for seismic resilience assessment of water supply network by Monte Carlo simulation

## 4 案例分析

### 4.1 参数设置

将韧性分析模型应用于2个不同类型的 Benchmark 案例管网,分别为 Net3<sup>[23]</sup>和 Modena<sup>[25]</sup>,算例管网拓扑结构如图4所示。在算例管网中,Net3 管网采用延时水力模型,由2个水源、3个调蓄水箱供水,包含92个节点117个管道,管网冗余度高;Modena 管网采用静态水力模型,由4个水源供水,包含268个节点317个管道,管网连接均为环状网络,冗余性高。

本研究分别考虑2种地震破坏场景,评估算例管网的韧性;参考 GB/T 17742—2020《中国地震烈度表》<sup>[26]</sup>,考虑了地震烈度9度(工况1:PGV=55.5 cm/s)和10度(工况2:PGV=119 cm/s)2种荷载情景,根据2.1节方法计算管线的地震破坏概率。采用 PDA 模型计算管网震后功能时, $H_{\text{req}}=20\text{ m}$ , $H_{\text{min}}=0\text{ m}$ 。为合理模拟水源的供水能力,对 Modena 管网中的水源进行了等效修改,将模型中的总水头固定的蓄水池,修改为高程固定的蓄水池和等效水泵<sup>[27]</sup>。根据算例管网正常运行情况下节点水质要求,本次模拟中将 Net3 和 Modena 管网的出厂氯浓度分别设置为 0.5、0.4 mg/L。在计算案例管网震后水质时,仅考虑主体水流中的氯衰减<sup>[9,11,28]</sup>,能够反映出管网水质的变化特征,根据 YANG 等<sup>[28]</sup>的研究,氯衰减系数  $k_b$  设置为  $0.055\text{ h}^{-1}$ 。为避免初始条件对管网水质的影响,算例管网水力和水质模拟起始时间为在地震破坏事件发生前7 d。地震发生时间设置在第八天早晨8时( $t_0=176\text{ h}$ ),考虑震后管道损坏资料收集及修复队伍任务部署时间<sup>[4]</sup>,震后修

复工作设置在震后 1 h 后开始( $t=177$  h)。考虑到管网总长度及管道直径对震后管道修复总时间的影响,将 Net3 和 Modena 管网的修复队伍分别设置为 2 队和 1 队,使 2 个管网的震后修复总时间接近,以便于 2 个案例韧性指标的横向比较。Monte Carlo 模拟样本数量通常受到所研究问题的非线性程度、随机变量个数和案例规模的影响。为了确定本研究中 Monte Carlo 模拟的样本数量,对于本研究中的 2 个案例管网,进行了 Monte Carlo 模拟样本数量的收敛性分析,以水力指标的系统性能最小值  $F_{min}$  为例, $F_{min}$  的均值在 600~800 个样本后保持稳定。因此,本文对算例管网进行 1000 次 Monte Carlo 模拟。

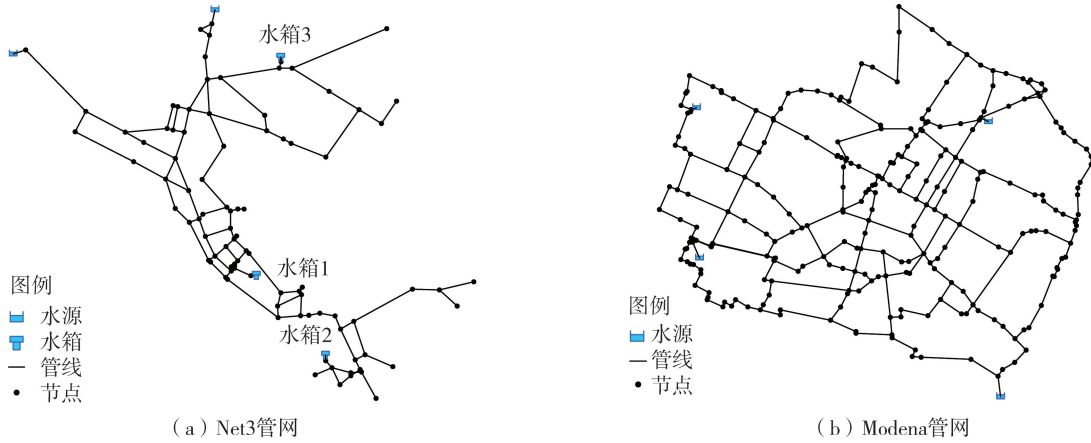


图 4 管网拓扑结构

Fig. 4 Network topology of the application cases

### 4.2 管网抗震韧性指标的特征比较

采用 Monte Carlo 模拟平均值计算管网系统性能指标,包括最小服务性能( $F_{min}$ )、恢复持时( $T_D$ )、韧性指数(RI)和韧性损失(RL),结果如表 2 所示。在相同的地震破坏场景下,不同管网  $F_Q(t)$  与  $F_H(t)$  对应的性能指标的差异( $|F_Q - F_H|/F_H$ )不同。工况 1 地震破坏场景下,Net3 和 Modena 管网  $F_Q(t)$  与  $F_H(t)$  性能指标  $\{F_{min}, RI, RL, T_D\}$  的差异分别为  $\{67\%, 18\%, 286\%, 425\%\}$ 、 $\{1\%, 0\%, 17\%, 15\%\}$ ; Net3 管网的  $F_Q(t)$  与  $F_H(t)$  性能指标的差异大于 Modena 管网的相应差异值。 $\{F_{min}, RI\}$  指标的相对差异小于  $\{RL, T_D\}$  指标的相对差异,RI 指标的差异在 0%~18%之间,RL 指标的差异在 17%~286%之间。由  $\{F_{min}, T_D\}$  指标的相对差异可知,水质的鲁棒性弱于水力的鲁棒性,水质性能的恢复相对于水力性能的恢复更为滞后。

表 2 管网韧性模拟结果

Table 2 Resilience indicators of the application cases of water supply network

地震场景	管网	$F_H(t)$				$F_Q(t)$			
		$F_{min}$	RI	RL	$T_D$	$F_{min}$	RI	RL	$T_D$
工况 1	Net3	0.86	0.93	1.32	4	0.29	0.77	5.10	21
	Modena	0.86	0.95	1.15	20	0.86	0.95	1.35	23
工况 2	Net3	0.64	0.85	4.58	26	0.11	0.77	11.24	49
	Modena	0.61	0.87	9.37	71	0.60	0.88	10.26	84

由表 2 可知,在工况 2 破坏场景下,Modena 管网由水质指标  $F_Q(t)$  计算的 RI(0.88)要大于水力指标  $F_H(t)$  计算的结果(0.87),而事实上震后的水质性能要弱于水力性能,由式(1)计算的韧性指数 RI 受恢复时间  $T_D$  的影响,较长的恢复时间会在造成不合理的计算结果<sup>[29]</sup>。因此相对于韧性指数 RI,采用韧性损失 RL 评估供水管网的韧性更为合理。

### 4.3 案例管网震后系统性能分析

本节通过 Monte Carlo 模拟的代表性破坏样本的系统性能恢复曲线,分析水质指标和水力指标之间差异的原因。根据 1000 次 Monte Carlo 模拟的均值结果,选择 Monte Carlo 模拟样本中  $F_Q(t)$  与  $F_H(t)$  性能指标  $\{F_{min}, RL\}$  均处于均值附近的样本(中值样本)作为代表性破坏样本。工况 2 破坏场景下 1000 个 MCS 样本的中值样本工况中,Net3 管网中断开和渗漏管线数量分别为 4 和 17,Modena 管网中断开和渗漏管线数量分别为 5 和 21,管道破坏点空间分布如图 5 所示,中值工况对应的不同性能指标的震后恢复曲线如图 6 所示。

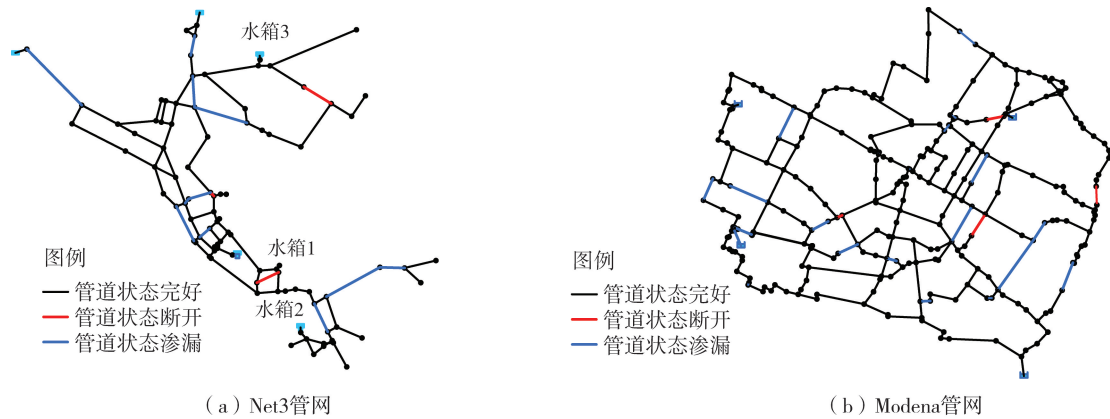


图5 工况2破坏场景下管线失效结果

Fig. 5 Pipeline failure under damage scenario of condition 2

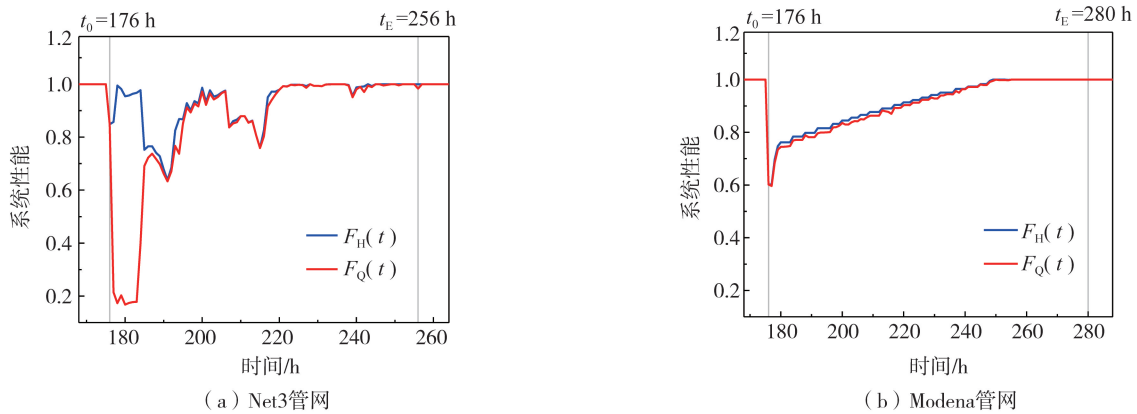


图6 工况2破坏场景下系统性能恢复曲线

Fig. 6 System performance recovery curves under damage scenario of condition 2

### 4.3.1 管网整体水力服务性能

由图6可知,震后 $t_0$ 时刻( $t_0 = 176$  h)管网的水力服务性能 $F_H(t_0)$ 较震前显著下降,Net3和Modena管网分别从1.0下降到0.8485、0.6019。在震后的恢复过程中,当断开的管道被隔离后(Net3: $t = 178$  h, Modena: $t = 179$  h),管网的整体水力服务性能均有较大回升,Net3、Modena管网的 $F_H(t)$ 分别提升恢复到0.9949、0.7474。因此,震后及时隔离断开管道,能够有效减小震后漏水的影响,提高管网的水力服务满足率。

Net3管网中的水箱在震后初期( $t = 176 \sim 181$  h)保障了供水,维持了较高的供水满足率( $t = 178$  h,  $F_H(t) = 0.9449$ ),随着水箱水量的排空( $t = 185$  h),Net3管网的 $F_H(t)$ 也随之下降( $t = 185$  h,  $F_H(t) = 0.7524$ )。结果表明,管网中的分散式水箱有助于维持震后最初几个小时的水力服务性能,当水箱排空后,管网的水力服务性能下降到与没有水箱的管网相当的水平。

由图6中管网 $F_H(t)$ 震后供水性能曲线可知,Modena管网逐步提升至震前水平,Net3管网波动提升至震前水平。原因在于,Modena管网采用静态水力模型,震后每个管网物理状态对应的用水量需求是固定的,而Net3管网采用延时水力模型,震后管网物理状态不变时,其对应的节点用水量在每小时均发生变化。因此,在震后修复过程中,Net3管网压力和水力服务性能曲线呈波动上升状态。

### 4.3.2 管网整体水质服务性能

由图6可知, $F_Q(t)$ 性能曲线在3个算例管网中的变化趋势均不同。图6(a)所示Net3管网中, $F_Q(t)$ 与 $F_H(t)$ 震后性能曲线在水箱供水时段( $t = 176 \sim 184$  h)差异较大,平均差异78.0%。在图6(b)Modena管网中, $F_Q(t)$ 与 $F_H(t)$ 震后性能曲线差异较小,整个恢复过程中的平均差异为0.9%。为分析Net3和Modena管网中 $F_H(t)$ 与 $F_Q(t)$ 性能曲线变化规律的差异的原因,分别选取了典型时刻切片进行了分析,结果如图7和图8所示。

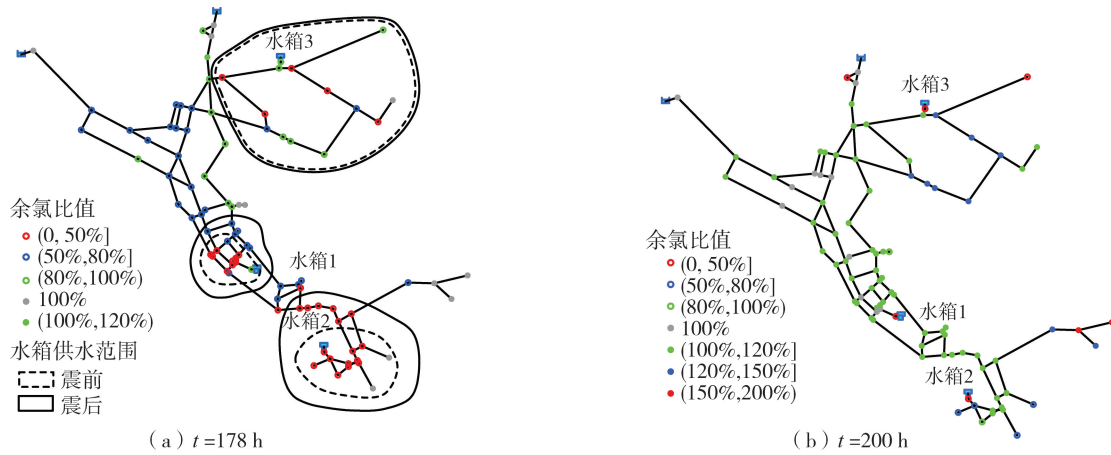


图 7 Net3 中用户节点震后与震前余氯比值

Fig. 7 Ratio of post-earthquake and pre-earthquake residual chlorine at user nodes in Net3

在  $t=178$  h 时刻, Net3 管网  $F_H(t)=0.9449$ ,  $F_Q(t)=0.1723$ , 该时刻 Net3 管网中 80 个节点水质较震前下降, 占总节点数 87%, 这些节点主要位于震后水箱供水区域, 该区域由于管网管线的损坏, 震后由水箱直接供水, 如图 7(a) 所示。尽管水箱的供水保证了用户节点的需水量, 并对应于较大的水力指数  $F_H(t)$  值, 但由于水箱中储存的水的较长水龄和较低的余氯浓度, 使得  $F_H(t)$  与  $F_Q(t)$  性能曲线之间存在较大差异。

在  $t=200$  h 时刻, Net3 管网  $F_H(t)=0.9869$ ,  $F_Q(t)=0.9657$ ,  $F_H(t)$  与  $F_Q(t)$  差异较小, 如图 7(b) 所示。在震前对应时刻, 管网中 3 个水箱提供供水服务, 造成管网部分节点水龄较长, 余氯浓度较小, 而震后水箱水量排空之后无法得到补充, 这些节点由水源直接供水, 水龄较小, 余氯浓度较震前升高, 因此  $F_H(t)$  和  $F_Q(t)$  性能曲线基本保持一致。如: 震前水箱 3 供水区域节点, 震后改由水源直接供水, 该区域节点水质提升显著。

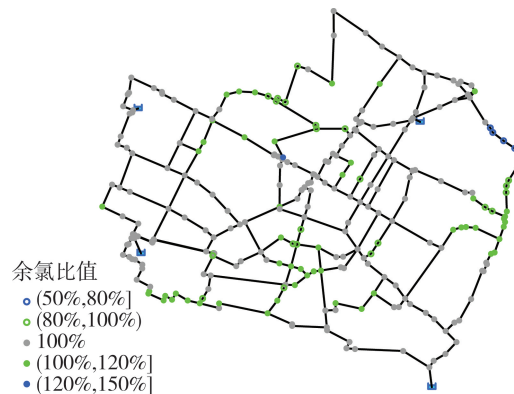


图 8 Modena 管网用户节点震后和震前余氯比值

Fig. 8 Ratio of post-earthquake and pre-earthquake residual chlorine at user nodes in Modena

在  $t=200$  h 时刻, Modena 管网  $F_H(t)=0.8449$ ,  $F_Q(t)=0.8353$ ,  $F_H(t)$  与  $F_Q(t)$  差异较小, 如图 8 所示。由图可知,  $t=200$  h 时刻管网中 52 个节点水质较震前升高, 占总节点数 19%。管道漏损破坏或断开破坏均会造成管道破坏点上游管道的流速增大; 此外, 由于管网环路多, 水源冗余性高, 管道破坏点下游节点仍能通过其他供水路径得到较大的水量供应, 下游管道流速没有显著下降; 因此, Modena 管网震后节点水龄不会显著下降, 震后节点余氯浓度下降较小。上述分析表明, 对于多水源环状冗余的管网, 管线破坏点对管网震后水质影响较小。

## 5 结论

本研究建立了耦合水力和水质的管网抗震韧性评估模型, 通过由水力和水质指标计算的管网的系统最小服务性能 ( $F_{\min}$ )、恢复持时 ( $T_D$ )、韧性指数 (RI) 和韧性损失 (RL), 研究了管网的震后水质性能特征以及水力与水质性能之间韧性指标的差异。根据 2 个 Benchmark 案例管网的应用结果, 主要结论如下:

1) 地震导致的管道损坏在造成管道中水流的水力条件改变的同时, 会改变用户节点的水龄和水质, 管

道破坏点的水量漏失对位于其上、下游区域的管道产生不同的影响。破坏点上游管道水流量增大、水龄减小、氯浓度增大,而破坏点下游管道则出现供水路径延长、供水量不足、水龄增大和水质恶化的情况。

2) 考虑水质性能计算的管网韧性评价指标往往低于仅考虑水力性能的结果,水质的鲁棒性弱于水力的鲁棒性,水质性能的恢复相对于水力性能的恢复更为滞后,水力、水质韧性评价指标的差异程度受管网布局的影响。多水源的管网具有较小的差异,而含调节水箱的管网,水力、水质韧性评价指标的差异较大。

3) 管网中的调节水箱有助于维持震后初期的供水性能,当水箱排空后,管网的水力服务性能下降到与没有水箱的管网相当的水平。在震后水箱供水的时间内,震前由水源供水、震后由水箱供水的用户节点,由于水箱内水龄较长,导致其供应的用户节点水质下降。

4) 考虑水质的抗震韧性评估可以全面了解供水管网的抗震性能,并反映供水管网的震后水质风险。通过水质和水力的韧性评估及结果的差异分析,可以对震后的水质恶化及时的提供预警信息,并为震后的恢复决策提供指导。

本研究主要基于地震下的管道破坏场景,而实际地震事件中还包括其他供水设施(如水箱、水处理厂和泵站)的结构损坏。因此,后续研究中应考虑地震下供水系统中不同供水设施的结构损坏,对供水系统的抗震性能进行更全面的研究。

## 参考文献:

- [1] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [2] 龙立, 郑山锁, 杨勇, 等. 城市供水管网震后修复策略研究[J]. *地震研究*, 2022, 45(3): 352-361.  
LONG Li, ZHENG Shansuo, YANG Yong, et al. Research on the recovery strategy of the urban water supply networks after an earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 2022, 45(3): 352-361. (in Chinese)
- [3] 毕熙荣. 生命线管网系统抗震韧性定量评估及提升策略[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.  
BI Xirong. Quantitative evaluation and promotive strategy of seismic resilience for lifeline pipe networks[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)
- [4] 韩朝. 基于EPANET的供水管网震后功能仿真与韧性评估平台开发研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.  
HAN Zhao. Study on post-earthquake performance simulation and resilience evaluation platform development of urban water supply network based on EPANET[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [5] LIU W, SONG Z Y, OUYANG M, et al. Recovery-based seismic resilience enhancement strategies of water distribution networks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 203: 107088.
- [6] CIMELLARO G P, TINEBRA A, RENSCHLER C, et al. New resilience index for urban water distribution networks[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(8): 0001433.
- [7] FARMANI R, WALTERS G, SAVIC D. Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: Total cost vs. reliability vs. water quality[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2006, 8(3): 165-179.
- [8] TODINI E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach[J]. *Urban Water*, 2000, 2(2): 115-122.
- [9] DIAO K G, SWEETAPPLE C, FARMANI R, et al. Global resilience analysis of water distribution systems[J]. *Water Research*, 2016, 106: 383-393.
- [10] 赵元, 李霞, 庄宝玉, 等. 输配水系统水质脆弱性评估模型的研究[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(21): 51-54.  
ZHAO Yuan, LI Xia, ZHUANG Baoyu, et al. Assessment model for water quality vulnerability of water distribution system[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(21): 51-54. (in Chinese)
- [11] HATAM F, BESNER M C, EBACHER G, et al. Limitations of E. coli monitoring for confirmation of contamination in distribution systems due to intrusion under low pressure conditions in the presence of disinfectants[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(8): 0001256.
- [12] 赵迎迎. 基于实时用水模式的城市供水管网水质模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
ZHAO Yingying. Revealing hydrodynamic dependence of water quality based on real time demand pattern in distribution modeling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [13] SONG Z Y, LIU W, SHU S H. Resilience-based post-earthquake recovery optimization of water distribution networks[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 74: 102934.
- [14] PAEZ D, FILION Y, CASTRO-GAMA M, et al. Battle of postdisaster response and restoration[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(8): 0001239.
- [15] JWWA. Seismic damage prediction of water supply pipelines[R]. Tokyo, Japan: Japan Water Works Association (JWWA), 1998.
- [16] ALA. Seismic fragility formulations for water systems. Part I, Guidelines[R]. Washington, DC, USA: American Lifelines Alliance (ALA), 2001.

- [ 17 ] HAMAMOTO S, ITO L, TOKAI A. Assessment of renewal priority of water pipeline network against earthquake risk[J]. *Water*, 2021, 13(4): 572.
- [ 18 ] SHI P, O' ROURKE T D. Seismic response modeling of water supply systems; MCEER-08-0016[R]. Buffalo: The Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2008.
- [ 19 ] 韩朝, 马东辉, 侯本伟, 等. 基于压力驱动节点配水量模型的供水管网震后水力分析[J]. *中国科学(技术科学)*, 2019, 49(3): 351-362.  
HAN Zhao, MA Donghui, HOU Benwei, et al. Post-earthquake hydraulic analyses of urban water supply network based on pressure drive demand model[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(3): 351-362. (in Chinese)
- [ 20 ] FEMA. Multi-hazard loss estimation methodology Hazus-MH 2.1 advanced engineering building module (AEBM) technical and User's manual[R]. Washington, DC, USA.:Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [ 21 ] HOU B W, MA X T, DIAO K G, et al. Seismic performance assessment of water distribution systems based on multi-indexed nodal importance[J]. *Water*, 2021, 13(17): 2362.
- [ 22 ] WAGNER J M, SHAMIR U, MARKS D H. Water distribution reliability: Simulation methods[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1988, 114(3): 276-294.
- [ 23 ] ROSSMAN L A. EPANET 2.0 User Manual[CP]. Cincinnati, OH. National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, 2000.
- [ 24 ] ROSSMAN L A, BOULOS P F, ALTMAN T. Discrete volume-element method for network water-quality models[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1993, 119(5): 505-517.
- [ 25 ] BRAGALLI C, D'AMBROSIO C, LEE J, et al. On the optimal design of water distribution networks: A practical MINLP approach[J]. *Optimization and Engineering*, 2012, 13(2): 219-246.
- [ 26 ] GB/T 17742—2020 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
GB/T 17742—2020 The Chinese seismic intensity scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [ 27 ] 李立云, 任灿, 侯本伟. 城市供水管网系统抗震能力分析模型对比研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(6): 81-93.  
LI Liyun, REN Can, HOU Benwei. Comparative study on seismic performance analysis models of water distribution system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(6): 81-93. (in Chinese)
- [ 28 ] YANG J, LECHEVALLIER M W, TEUNIS P F M, et al. Managing risks from virus intrusion into water distribution systems due to pressure transients[J]. *Journal of Water and Health*, 2011, 9(2): 291-305.
- [ 29 ] SINGH R R, BRUNEAU M, STAVRIDIS A, et al. Resilience deficit index for quantification of resilience[J]. *Resilient Cities and Structures*, 2022, 1(2): 1-9.