

DOI:10.11918/202101086

顾及供需关系的供水管网管段脆弱性评价

曾文¹, 李日鹏¹, 杨之江¹, 周扬², 李宗祥², 李晓丽², 扈震¹

(1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430078; 2. 武汉众智鸿图科技有限公司, 武汉 430223)

摘要: 为了更精细地分析供水管网可靠性, 考虑需求节点与水源的供需依赖关系, 提出基于加权边介数的管段脆弱性评价方法。首先使用需求节点的需求占比和水源的供应占比, 确定节点和水源之间 K 最短路径的总重要性权值, 然后根据这些路径的阻力对重要性权值进行分配。对途经某条管段的全部 K 最短路径的重要性权值进行求和后, 即得到该管段的加权边介数, 用来评价其脆弱性。使用加权边介数、经典边介数、欠缺供应量比和水龄增长比 4 种指标, 对不同类型的两个供水管网进行评价和对比分析, 结果表明, 加权边介数比经典边介数能更好地筛选出脆弱管段。针对两个供水管网的蓄意攻击模拟显示, 相比经典边介数, 使用加权边介数作为攻击策略能使管网更快失效, 表明后者具有更高敏感度。基于加权边介数的管网优化实验进一步验证了该指标对提高管网可靠性的指导作用。

关键词: 供水管网; 管段; 脆弱性评价; 加权边介数; K 最短路径

中图分类号: TU991

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)02-0025-06

Pipe vulnerability assessment of water distribution networks considering supply-demand relationship

ZENG Wen¹, LI Ripeng¹, YANG Zhijiang¹, ZHOU Yang², LI Zongxiang², LI Xiaoli², HU Zhen¹

(1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China;

2. Wuhan Hope Top Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: To analyze the reliability of water distribution networks (WDNs) more precisely, taking account of the supply-demand relationship between demand nodes and water sources, a method was proposed for pipe vulnerability assessment of WDNs based on weighted edge betweenness (WEB). First, the demand proportions of all demand nodes and the supply proportions of all water sources were used to determine the total importance weight of the K shortest paths between the demand nodes and the water sources, and then an importance weight was allocated to each of these paths according to their resistance. The WEB indicator of a pipe was defined as the sum of the importance weights of all K shortest paths passing through it, which can be used to evaluate its vulnerability. Using four indicators i. e., WEB, classical edge betweenness, demand shortfall ratio, and water age increment ratio, two WDNs with different properties were evaluated and compared. Experimental results show that WEB could better screen out fragile pipes than classical edge betweenness. Deliberate attack simulations for the two WDNs show that using WEB attack strategy could make WDNs fail faster compared with classical edge betweenness attack strategy, which indicates that WEB has higher sensitivity. Network optimization experiments based on WEB further verified its guiding effect for improving the robustness of WDNs.

Keywords: water distribution networks; pipes; vulnerability assessment; weighted edge betweenness (WEB); K shortest paths

供水管网是一个庞大且复杂的系统^[1], 受限于投资成本等因素, 在进行管网设计和运维管理时, 管理者需要重点关注管网中的脆弱环节^[2]。管段是管网的最重要组成部分之一, 进行管段的脆弱性分析, 对管网的设计、运维和改造都具有重要意义。管段脆弱性评价研究, 主要分为基于水力模拟的方法

和基于拓扑结构分析的方法。基于水力模拟的方法通过水力模型模拟所有可能的管段故障后果评价管段对管网正常运行的重要性。由于考虑多管段故障组合计算量十分庞大, 通常将故障场景限制为单管段故障, 枚举各个管段发生故障后管网的欠缺供应量比评价管段的脆弱性^[2]。这类方法的评价结果比较精细, 贴合实际工况, 但依赖于水力模型的调校精度^[3], 并且必须针对每根管段执行独立的水力模拟来评估故障影响^[4], 计算量耗费很高。

由于水力模拟评价方法的计算复杂性, 许多学者尝试通过拓扑结构来分析管网组件的重要性。

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 武汉市科技计划应用基础前沿项目(2018010401011293);

武汉市科技计划企业技术创新项目(2019010702011304)

作者简介: 曾文(1969—), 男, 博士, 教授

通信作者: 扈震, huzhenstars@163.com

Gutiérrez-Pérez 等^[5]通过 PageRank 和 HITS 两种算法评价和筛选供水管网中的关键节点。Yazdani 等^[6]采用介数中心性来评价管网中节点的脆弱性,并将各节点介数与最大介数差的平均值作为衡量管网鲁棒性的指标。Agathokleous 等^[7]在考虑了网络拓扑时序变化的基础上,通过边介数评价管段和管网局部区域的脆弱性。但这些经典的图论方法没有考虑到供水管网中不同节点的角色和地位,以及需求节点与水源节点之间的供需依赖关系,因此,并不完全适用于供水管网的结构分析。为此,Giustolisi 等^[8]对需求节点和水源节点进行了区分,通过为水源增加虚拟节点等方式增强水源的地位,然后通过边介数评价管段的中心性。但这种方法没有考虑到不同供水路径的重要性,未能精细反映管网真实的结构特征,同时需要修改管网拓扑,不太便于分析。针对上述不足,本研究将供水管网拓扑连接和节点供需关系相结合,考察需求节点的供水路径,提出一种新的评价指标——加权边介数(weighted edge betweenness, WEB)来评价供水管网中管段的脆弱性。

1 边介数中心性

介数中心性最早由 Freeman^[9]于 1977 年提出,刻画了网络中一节点对于其他节点沿着最短路径传输信息的控制能力,是复杂网络理论中常用的节点重要性衡量指标。Girvan 等^[10]将其扩展至网络的边,提出了边介数的概念,以衡量网络中边的重要性,其定义为

$$C_e^B = \sum_{s \neq t \in V} \frac{\sigma_{s,t}(e)}{\sigma_{s,t}} \quad (1)$$

式中: C_e^B 为边 e 的介数, $\sigma_{s,t}(e)$ 为从节点 s 到节点 t 经过边 e 的最短路径数, $\sigma_{s,t}$ 为从节点 s 到节点 t 的最短路径总数, V 为网络的节点集合。

在社交、生物等网络中,节点是信息共享和交换的主体,因此,重要性评价主要聚焦于网络的节点上。而在供水管网中,管段是管网的最主要组成部分,承载着管网中水的传输,显著影响管网的水力状况和功能^[8]。因此,边介数更符合供水管网的可靠性分析需求。管段的中心性越强,其对管网中水的传输控制能力越强,当其发生故障时,对管网的影响越大,即管段的脆弱性越大。

2 加权边介数

水源是供水管网供水的基础,需求节点的用水依赖于其与水源间的连通路程,需求节点之间的连通路程并不能保证管网的正常供水,因此,将边介数

计算中的节点对修改为需求节点与水源节点组成的节点对,更符合供水管网实际情况。由于求解每一个需求节点与各个水源之间的所有供水路径计算代价过大,将需求节点与水源间的供水路径数量限制为 K 。实验表明, K 通常取为网络节点数的 5% ~ 10% 就可以达到统计上比较鲁棒的度量结果^[4]。本研究使用水源与需求节点间的 K 最短路径代表实际的供水路径, K 取为节点总数的 10%。

将供水路径需要克服的阻力作为路径的距离,并采用 Herrera 等^[11]提出的对于供水路径阻力的度量,参考普遍采用的 Darcy-Weisbach 水头损失公式^[12]。水源 s 与需求节点 t 之间的第 k 条最短路径的距离可表示为

$$d_{s,t}(k) = \sum_{m=1}^M \frac{f_m L_m}{D_m} \quad (2)$$

式中: M 为第 k 条最短路径上的管段数目, f_m 为管段 m 的摩阻系数, L_m 为管段 m 长度, D_m 为管段 m 直径。

另一方面,不同的供水路径其重要性也各不相同。供水路径的重要性主要与其两端连接的水源和需求节点有关。假设需求节点 t 连接 s_1 和 s_2 两个水源, s_2 的供应比例大于 s_1 ,即节点 t 的用水更依赖于水源 s_2 ,此时 s_2 与节点 t 之间的路径相比 s_1 与节点 t 之间的路径更加重要。若水源 s 连接两个节点 t_1 和 t_2 ,节点 t_2 的需求大于节点 t_1 ,则节点 t_2 和水源 s 的连通路程发生故障后,事故的影响更大,节点 t_2 与水源 s 之间的路径相比节点 t_1 与水源 s 之间的路径更加重要。因此,根据水源在整个管网中的供应比例和需求节点在整个管网中的需求占比对供水路径进行加权,可以更精细刻画供水路径的重要性。

水源 s 的供应比例可表示为

$$c_s = \frac{p_s}{\sum_{s \in S} p_s} \quad (3)$$

式中: c_s 为水源 s 的供应比例, p_s 为水源 s 的供应量, S 为水源集合。

需求节点 t 的需求比例可表示为

$$q_t = \frac{a_t}{\sum_{t \in T} a_t} \quad (4)$$

式中: q_t 为需求节点 t 的需求比例, a_t 为节点 t 的需水量, T 为需求节点集合。

水源 s 和节点 t 之间供水路径的重要性总权值 $w_{s,t}$ 可表示为

$$w_{s,t} = c_s q_t \quad (5)$$

由于水源 s 与 t 之间共有 K 条供水路径,而通常水流总是选择流通阻力更小的路径,水流对路径

选择的不确定性本质上是各条路径的流通阻力不同^[13]。因此,根据这 K 条供水路径的距离进行反比例加权。

则水源 s 和需求节点 t 之间的第 k 条路径的权值 $w_{s,t,k}$ 可表示为

$$w_{s,t,k} = \frac{g_{s,t}(k)}{\sum_{k=1}^K g_{s,t}(k)} w_{s,t} \tag{6}$$

式中

$$g_{s,t}(k) = \frac{1}{d_{s,t}(k)} \tag{7}$$

管段 e 的加权边介数 $B_{WE}(e)$ 计算公式为

$$B_{WE}(e) = \frac{\sum_{s,t \in (S,T)} \sum_{k=1}^K w_{s,t,k}(e)}{\sum_{s,t \in (S,T)} \sum_{k=1}^K w_{s,t,k}} \tag{8}$$

式中: S 为水源集合, T 为需求节点集合, K 为常量, $w_{s,t,k}(e)$ 为水源 s 到需水节点 t 并且经过管段 e 的第 k 条最短路径的权值, $w_{s,t,k}$ 为水源 s 到需水节点 t 的第 k 条最短路径的权值。

加权边介数值越大,管段损坏对管网的功能影响越大,即管段脆弱性越大。

3 实验与分析

使用 Net3 和 ZJ 两个管网作为研究对象。这两个管网规模较为接近,同时分别代表枝状和环状两种不同布局类型的管网。管网 Net3 是供水管网分析开源库 WNTR 提供的示例管网数据^[14],包含两个水源,环路较少,整体布局呈狭长枝状。管网 ZJ 是肯塔基大学提供的开放管网数据^[15],包含 1 个水源,环路较多,整体布局呈较均匀网格状。两管网具体特征参数如表 1 所示。

表 1 两个管网特征
Tab. 1 Characteristics of two WDNs

管网	管段数	节点数	水源数
Net3	117	92	2
ZJ	164	113	1

首先,使用欠缺供应量比、水龄增长比、经典边介数和 WEB 对上述两个管网进行管段脆弱性评价,对比其脆弱性分布,然后分别采用经典边介数和 WEB 作为攻击依据进行供水管网蓄意攻击模拟,验证 WEB 的敏感度。最后,基于 WEB 对管网管段进行优化,对比优化前后的管段脆弱性分布。

3.1 脆弱性分布

使用经典边介数和 WEB 对管网 Net3 和管网 ZJ 的所有管段进行脆弱性评价,并分别与使用管段欠

缺供应量比、水龄增长比的评价相比照。管段欠缺供应量比指的是一管段发生故障后,采用压力驱动的水力模拟方式计算出 24 h 内管网不能满足的用水需求量占总需求量的比例,因为考虑了延时运行工况,可以认为比较符合实际状况^[16]。而水龄增长比是指管段故障后 24 h 内所有节点总水龄的增量占故障前 24 h 内所有节点总水龄的比例^[17]。

两个管网的管段脆弱性评价结果分级分别见图 1、2。对于管网 Net3,按照欠缺供应量比(图 1(a))和水龄增长比评价指标(图 1(b)),存在一条连接水源 River 的脆弱性显著的路径,该路径上的管段脆弱性明显高于管网其他区域的管段,即发生故障时对管网的影响更大。使用 WEB 的评价(图 1(d))也识别出一条连接水源 River 的脆弱性显著的路径,与欠缺供应量比和水龄增长比的评价结果基本一致。而经典边介数评价(图 1(c))识别出的脆弱性最高的管段普遍位于远离水源的管网较末端区域,与欠缺供应量比和水龄增长比的评价结果相差较大。由此也可以看出,越靠近水源的管段其脆弱性往往越大。但图 1 中靠近水源 River 处存在一个三角环,该环中的管段脆弱性小于其直接相连的无环下游管段。这是因为环中的任一管段发生故障时,水流的传输可以经由环中其他管段替代,而其直接相连的下游管段虽同为大多数节点供水的必经之路但却不存在其他替代路径,因此,该下游管段的脆弱性相对更大。

同样,对于管网 ZJ,WEB 与欠缺供应量比和水龄增长比的评价结果也较为一致,都将连接唯一水源与管网主体的管段评价为最脆弱。而经典边介数识别出的最脆弱管段位于管网中部。管网 ZJ 虽然整体呈网格状,但只有一个水源通过一根管段与管网主体相连,该管段发生故障后管网将完全失效,WEB 和欠缺供应量比的评价结果更符合实际。

两个管网的实验结果都表明,WEB 相比经典边介数的评价结果更接近欠缺供应量比和水龄增长比的评价结果,原因主要在于经典边介数将水源与所有需求节点等同看待,没有考虑供水管网的水力特征,在评价中未能体现水源的中心地位。

3.2 敏感度分析

在复杂网络中常使用蓄意攻击模拟来分析管网的鲁棒性。蓄意攻击模拟通过逐步移除网络中最脆弱的组件方式对网络进行攻击,然后通过网络性能评价指标的变化衡量网络的鲁棒性。使用不同脆弱性评价指标,网络性能变化幅度不同,体现出评价指标的敏感度差异。敏感度较高的指标更有利于管网鲁棒性分析。

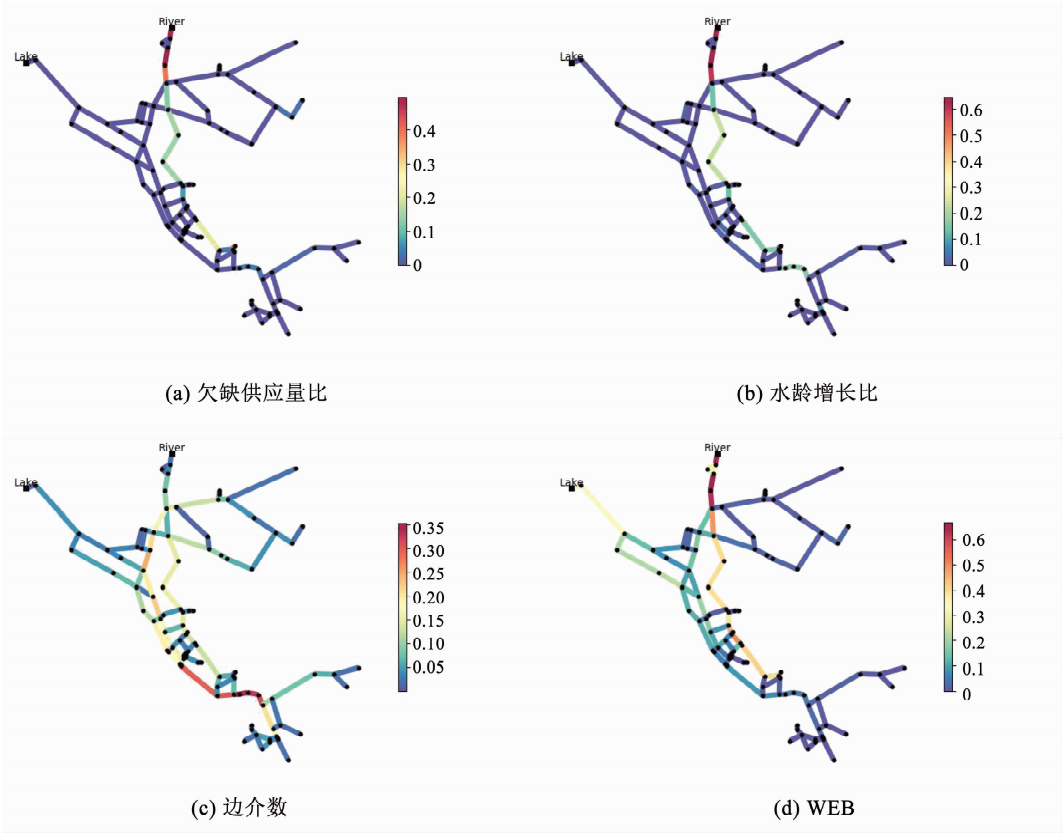


图 1 管网 Net3 管段脆弱性分布

Fig. 1 Pipe vulnerability distributions of WDN Net3

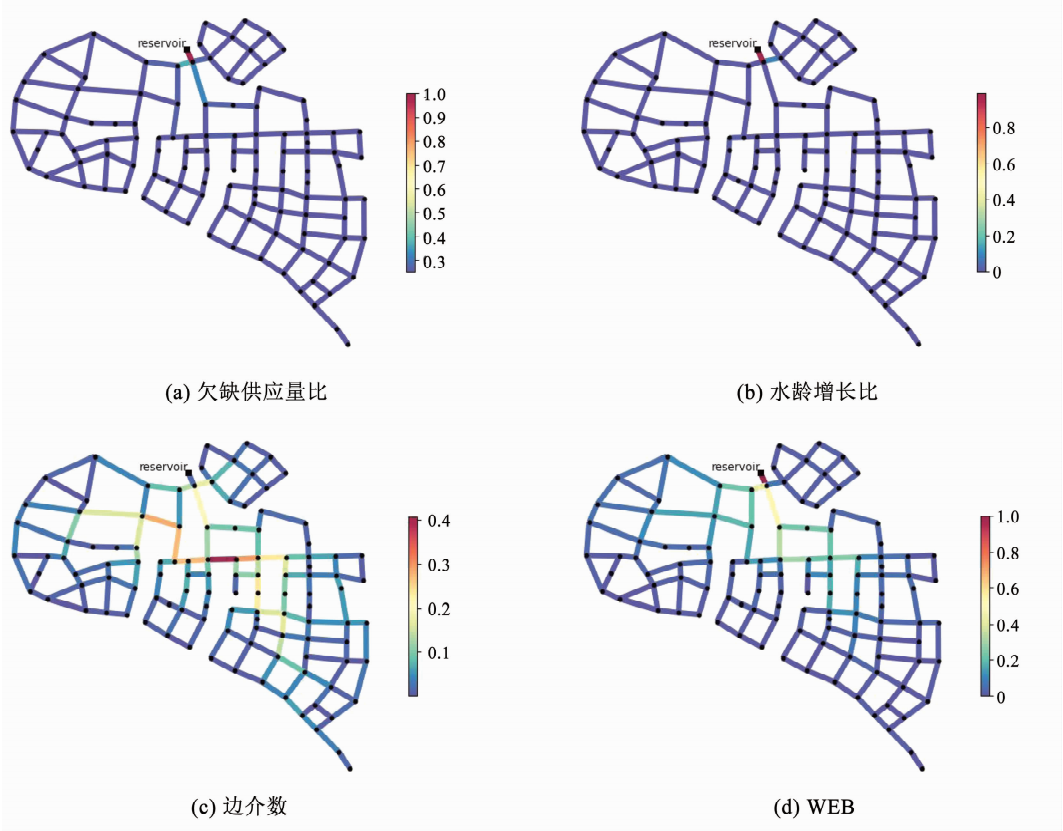


图 2 管网 ZJ 管段脆弱性分布

Fig. 2 Pipe vulnerability distributions of WDN ZJ

针对实验管网 Net3 和 ZJ,分别采用经典边介数和 WEB 指标选择最脆弱管段实施蓄意攻击模拟,以最大连通子图规模比和平均节点效率比两个指标衡量供水管网的性能变化。

最大连通子图规模定义为包含至少一个水源节点的最大连通子图的节点数。最大连通子图规模比为

$$r_s = \frac{s'}{s}$$

(9)

式中 s 和 s' 分别为攻击前和攻击后的最大连通子图规模。

定义平均节点效率为

$$c_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{d_i}$$

(10)

式中: n 为所有需求节点的总数, d_i 为节点 i 到任一水源的最短路径距离。

相应地,平均节点效率比定义为

$$r_c = \frac{c'}{c}$$

(11)

式中 c 和 c' 分别为攻击前和攻击后的平均节点效率。

将管段按脆弱性评价结果从高到低从管网中移除。表 2 为针对管网 Net3 的实验结果。使用经典边介数指标,移除前 5% 管段后,最大连通子图规模比和平均节点效率比变化都较小,说明管网性能未受到显著影响,管网仍保持较高服务能力。而使用 WEB,移除 5% 的管段后,最大连通子图规模比已降为 0,说明此时管网所有节点都已经与所有水源断开连接,管网已经完全失效。

表 2 管网 Net3 模拟攻击结果

Tab. 2 Attack simulation results of WDN Net3

网络性能指标	最大连通子图规模比		平均节点效率比	
	移除比例 1%	移除比例 5%	移除比例 1%	移除比例 5%
边介数	0.773	0.773	0.948	0.947
WEB	0.989	0	0.495	0

表 3 为针对管网 ZJ 的攻击实验结果。使用经

典边介数作为攻击策略,移除前 5% 管段后,最大连通子图规模比未变化,平均节点效率比变化较小,管网仍保持着较高的服务能力。而使用 WEB 作为攻击策略,仅移除 1% 的管段后,上述两个指标即下降为 0,管网完全失效。这是因为管网 ZJ 虽然呈网格状,但只有一个水源与管网主体连接,与水源直接相连的管段为最脆弱管段,移除该管段后,管网中所有节点便与水源失去联系,这与实际情况相符。

表 3 管网 ZJ 模拟攻击结果

Tab. 3 Attack simulation results of WDN ZJ

网络性能指标	最大连通子图规模比		平均节点效率比	
	移除比例 1%	移除比例 5%	移除比例 1%	移除比例 5%
边介数	1	1	0.993	0.976
WEB	0	0	0	0

从两个管网的实验结果容易看出,WEB 相比经典边介数在管网可靠性评价上具有更高敏感度。

3.3 基于 WEB 的管网优化

WEB 值较大的管段属于管网的薄弱环节,针对这些管段的优化,可以提升管网整体鲁棒性。本研究以添加平行管段的优化方法为例,印证 WEB 指标评价对管网优化的作用。具体做法是选择 WEB 值最大的若干管段,添加管径、管长和管材都相同的平行管段,以形成新的环路,然后重新计算所有管段的 WEB 指标,通过对比优化前后的管段脆弱性分布考察整体鲁棒性提升状况。

对管网 Net3,按 WEB 值从大到小选取前 15% 的管段,添加平行管段,优化后的管段脆弱性分布见图 3(b)。可以看出,最脆弱的管段仍主要位于水源附近,但管段脆弱性已经显著降低,全部管段 WEB 值从 0~0.67 变为 0~0.36。

管网 ZJ 本身存在很多环状连接,故仅选取 WEB 值前 5% 的管段添加平行管段。图 4(b)显示,与水源直接相连的管段仍最脆弱,但脆弱性也显著降低,全局看管段 WEB 值从 0~1 变为 0~0.5。

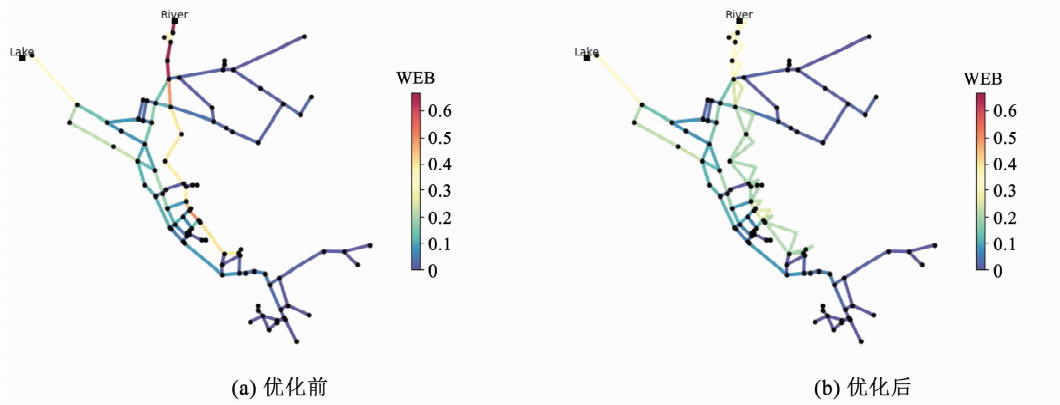


图 3 管网 Net3 优化前后管段脆弱性分布

Fig. 3 Pipe vulnerability distributions of WDN Net3 before and after optimization

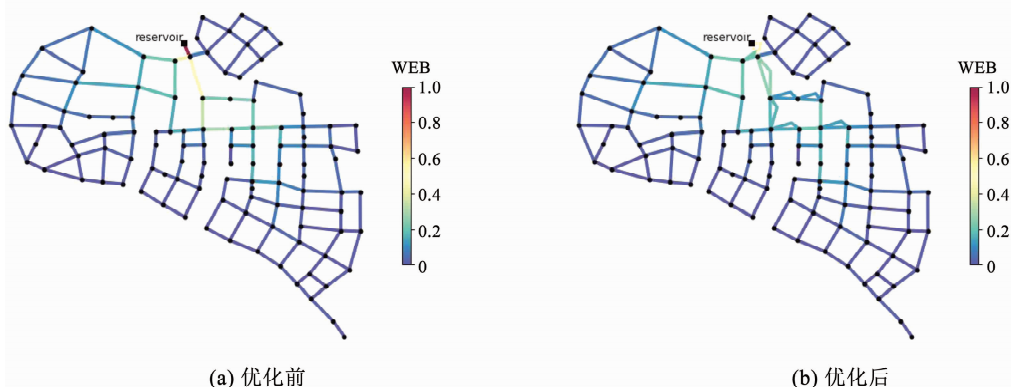


图 4 管网 ZJ 优化前后管段脆弱性分布

Fig. 4 Pipe vulnerability distributions of WDN ZJ before and after optimization

针对两个管网的实验表明,WEB 指标对管网优化可以发挥明显指导作用。

4 结 语

基于需求节点与水源之间的 K 最短路径,结合供水管网的水力属性和物理属性信息,提出了适用于供水管网的管段脆弱性评价新指标——WEB。WEB 考虑了需求节点和水源的供需依赖关系,以及水源节点和需求节点在管网中不同的角色和重要性,能更加精细地反映各个管段在供水管网功能结构稳定性中的作用。实验表明,相比经典边数指标,WEB 更加接近管网实际运行状况,有助于识别管网中脆弱性大的管段。同时可以发现,供水管网中越靠近水源的管段,其脆弱性往往更大,但与水源的距离并不是唯一的影响因素,还与其可替代性有关,若该管段处于一个环中,则其发生故障时管网中将存在其他路径替代,此时其脆弱性反而可能小于其无环的下游管段。WEB 可以作为一种较好的供水管网可靠性分析指标,为管网设计验证、加固和改造提供参考依据。

WEB 与基于水力模拟的欠缺供应量比、水龄增长比的评价结果较为接近,但属于代理指标法范畴,计算更加简单快捷,更适合于管网优化设计等需要反复迭代计算可靠性的场景。

后续的研究可以进一步挖掘供水管网自身特性,如在计算供水路径时加入部分流向的约束信息,进而基于含有向边和无向边的混合图分析管段脆弱性;还可以进一步考虑水箱、阀门等组件对于管网供水的影响,更精细地评价管段的脆弱性。

参考文献

- [1] DIAO K, FARMANI R, FU G, et al. Clustering analysis of water distribution systems: identifying critical components and community impacts[J]. Water Science and Technology, 2014, 70(11): 1764. DOI: 10.2166/wst.2014.268
- [2] MARLIM M S, JEONG G, KANG D. Identification of critical pipes using a criticality index in water distribution networks[J]. Applied Sciences, 2019, 9(19): 4052. DOI: 10.3390/app9194052
- [3] HERRERA M, ABRAHAM E, STOIANOV I. Graph-theoretic

- surrogate measures for analysing the resilience of water distribution networks[J]. Procedia Engineering, 2015, 119: 1241. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.985
- [4] BERARDI L, UGARELLI R, RØSTUM J, et al. Assessing mechanical vulnerability in water distribution networks under multiple failures[J]. Water Resources Research, 2014, 50(3): 2586. DOI: 10.1002/2013WR014770
- [5] GUTIÉRREZ-PÉREZ J A, HERRERA M, PÉREZ-GARCÍA R, et al. Application of graph-spectral methods in the vulnerability assessment of water supply networks [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 57(7/8): 1853. DOI: 10.1016/j.mcm.2011.12.008
- [6] YAZDANI A, JEFFREY P. Complex network analysis of water distribution systems[J]. Chaos, 2011, 21(1): 016111. DOI: 10.1063/1.3540339
- [7] AGATHOKLEOUS A, CHRISTODOULOU C, CHRISTODOULOU S E. Topological robustness and vulnerability assessment of water distribution networks[J]. Water Resources Management, 2017, 31(12): 4007. DOI: 10.1007/s11269-017-1721-7
- [8] GIUSTOLISI O, RIDOLFI L, SIMONE A. Tailoring centrality metrics for water distribution networks [J]. Water Resources Research, 2019, 55(3): 2348. DOI: 10.1029/2018WR023966
- [9] FREEMAN L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. Sociometry, 1977, 40(1): 35. DOI: 10.2307/3033543
- [10] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community structure in social and biological networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(12): 7821. DOI: 10.1073/pnas.122653799
- [11] HERRERA M, ABRAHAM E, STOIANOV I. A graph-theoretic framework for assessing the resilience of sectorised water distribution networks[J]. Water Resources Management, 2016, 30(5): 1685. DOI: 10.1007/s11269-016-1245-6
- [12] BROWN G O. The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance [C]//ASCE Civil Engineering Conference and Exposition. Reston: ASCE Press, 2003: 34. DOI: 10.1061/40650(2003)4
- [13] 伍悦滨, 王芳, 田海. 基于信息熵的给水管网系统可靠性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2): 251
WU Yuebin, WANG Fang, TIAN Hai. Entropy-based reliability analysis in water distribution systems [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(2): 251. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.02.020
- [14] KLISE K A, MURRAY R, HAXTON T. An overview of the water network tool for resilience (WNTR) [C]//Proceedings of the 1st International WDSA/CCWI Joint Conference. Kingston: Queen's University, 2018: 8
- [15] DANDY G. ZJ Network [EB/OL]. [2020-12-25] http://www.uky.edu/WDST/Systemages/43System_Page_ZJNetwork.html
- [16] CREACO E, FRANCHINI M, ALVISI S. Evaluating water demand shortfalls in segment analysis [J]. Water Resources Management, 2012, 26(8): 2301. DOI: 10.1007/s11269-012-0018-0
- [17] HERNANDEZ E, ORMSBEE L E. Application of segment based robustness assessment for water distribution networks [C]//Proceedings of the 1st International WDSA/CCWI Joint Conference. Kingston: Queen's University, 2018: 31

(编辑 刘 彤)