

## 水源与饮用水保障

戴雷杰. 城市供水管网拓扑结构评价指标探讨[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 49-55,61.

DAI L J. Discussion on evaluation indices of topology structure for urban water supply pipelines network[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 49-55,61.

## 城市供水管网拓扑结构评价指标探讨

戴雷杰\*

(上海市供水调度监测中心,上海 200080)

**摘要** 【目的】 管道分布承载了大量的地理环境因素和丰富的拓扑学与图论知识,由于城市不同区域间供水管道的结构差异性与运输效率的不同,使得针对城市供水管网的拓扑结构分析及其评价指标的选取工作变得尤为重要。目前已有大量网络系统的研究着眼于拓扑结构的分析,但针对于供水网络系统管道的拓扑研究还相对较少。为拓宽供水管网的研究领域并进一步提高未来调度的效率【方法】 研究基于图论和复杂网络研究的理论选取典型城市——上海市为研究对象,针对上海市 11 个供水区域的管网拓扑结构进行研究,探讨了连接度、成环率及单管风险率 3 个拓扑指标在供水输配系统安全评价中的适用性,通过 space-L 法建模并计算各供水区域拓扑指标得分,提出各区域间差异的原因并针对 3 个指标进行评价。【结果】 从结果来看,连接度与成环率 2 个指标呈现明显的空间差异性,整体而言,浦东威立雅的连接度与成环率是划分区域中最高的,崇明则是 2 个指标值最低的区域。金山区的枫泾镇单管风险率最高。【结论】 文章对拓扑指标的研究对供水管网安全评价具有重要意义,可以帮助识别薄弱环节、评估应急响应能力,提高供水的安全性和可靠性。此外,文章率先在供水管网中引入成环率、单管风险率等指标,其评价方法可为其他城市提供借鉴。

**关键词** 供水管网 拓扑指标 连接度 成环率 单管风险率 指标评价

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)04-0049-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.006

## Discussion on Evaluation Indices of Topology Structure for Urban Water Supply Pipelines Network

DAI Leijie\*

(Shanghai Municipal Water Supply Control & Monitoring Center, Shanghai 200080, China)

**Abstract** [Objective] Pipeline distribution carries a large number of geographical environmental factors and rich knowledge of topology and graph theory. Due to the structural differences and transportation efficiency of water supply pipelines in different areas of a city, the topological structure analysis of urban water supply networks and the selection of evaluation indices have become particularly important. At present, a large number of network system researches focus on the analysis of topology structure, but there are relatively few researches on the topology of pipeline in water supply network system. In order to broaden the research field of water supply network and further improve the efficiency of future dispatching, [Methods] this study selected Shanghai, a typical city, as the research object based on the theory of graph theory and complex network research, and studies the pipe network topology of 11 water supply areas in Shanghai. The applicability of three topological indices of connectivity, ring formation rate and risk rate of single pipe in safety evaluation of water supply transmission and distribution system was discussed. space-L method was used to model and calculate the topological index scores of each water supply region, and the reasons for the differences among regions were proposed and

[收稿日期] 2024-07-08

[基金项目] 上海市水务局科研项目(沪水科 2023-08)

[通信作者] 戴雷杰(1974—),男,高级工程师,研究方向为供水管理和调度技术,E-mail:daileijie@163.com。

evaluated according to the three indices. [Results] The result showed that the two indices of connectivity and ring formation rate show obvious spatial differences. On the whole, the connection degree and ring formation rate of Pudong Veolia were the highest among the divided regions, while Chongming was the lowest of the two indices. Fengjing Town of Jinshan District had the highest single pipe risk rate. [Conclusion] The study of topological indices in this paper is of great significance to the safety evaluation of water supply network, which can help to identify vulnerable links, evaluate emergency response ability, and improve the safety and reliability of water supply. In addition, this paper takes the lead in introducing indicators such as ring formation rate and single pipe risk rate in water supply network, and its evaluation method can provide reference for other cities.

**Keywords** water supply network topological index connectivity ring formation rate single pipe risk rate index evaluation

供水管网是一座城市不可或缺的基础设施系统之一,也是城市供水系统的核心组成部分,其安全运行对保障城市供水至关重要。随着我国城市化进程不断提高,我国政府也在逐年加大对城市基础设施的投入,供水管网的规模也随之扩大<sup>[1]</sup>。城市水管网的布置方式通常呈环状,该方式可以使管网内压力分布较为均匀,且保证连接程度较高,但该布置方式在多数情况下会使管道的总长度较长。《2021年中国城市建设状况公报》<sup>[2]</sup>统计数据显示,2021年我国城市供水管道长度达 105.99 万 km,同比增长 5.26%,日趋复杂的城市供水管网也为相关管理部门对市政管网的监控和维护工作带来了压力和挑战。管道分布承载了大量的地理环境因素和丰富的拓扑学与图论知识<sup>[3]</sup>,考虑到城市不同区域间供水管道的结构差异性与运输效率的不同,因此针对城市供水管网的拓扑结构分析及其评价指标的选取工作变得尤为重要。

近年来,将图论相关知识与网络系统相结合的研究已成为一大热点。例如,在轨道交通网络领域,一些学者应用聚类系数、节点度等拓扑学指标量化分析了网络的形态特征。何宁等<sup>[4]</sup>通过 5 个城市的轨道网络拓扑结构,总结归纳了其结构特性,并最终应用于南京市地铁网络的方案比选中。在复杂网络方面,目前主要是通过构建网络系统的 space-L 模型,统计网络中最短路径及其分布等指标。在供水管网的相关研究中,随着拓扑学的发展,国外有一些学者<sup>[5]</sup>应用聚类系数和网格系数等拓扑指标量化分析了供水管网的性能。Agathokleous 等<sup>[6]</sup>构建中间密度指数来评价管网拓扑对供水网络脆弱性的影响。已有研究<sup>[7]</sup>验证可以将供水管网抽象比作复杂网络,其中供水管网的管道可抽象为复杂网络的边,供水管网中的管道连接处、水库等可以抽象为复杂网络的节点。

目前已有大量网络系统的研究着眼于拓扑结构的分析,但国内外针对于供水网络系统管道的拓扑研究还相对较少且不够深入和全面。为拓宽供水管网的研究领域并进一步提高未来调度的效率,本研究基于图论和复杂网络研究的理论选取我国典型城市——上海市为研究对象,并将其划分成 11 个供水区域,分别为城投水务集团供水区域、浦东威立雅供水区域、南汇自来水公司供水区域、浦东新区水司供水区域、临港、奉贤、嘉定、金山、青浦、松江和崇明供水区域,分析其网络特性指标,为后续应用于供水输配安全评价提供参考。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

截至 2022 年底,上海市供水管网输配水管线(DN75 以上)总长度为 40 018 km,管网大多呈环状,供水日均总量为 801 万 m<sup>3</sup><sup>[8]</sup>。随着经济发展与城市扩张,供水管网的规模也逐渐扩大,管网的复杂程度也明显增加。

目前全市的供水输配主要由 15 家供水企业承担,其中主城区的供水输配以黄浦江为界分属于城投水务集团和浦东威立雅有限公司两家供水企业承担,各郊区的供水输配由 1~2 家供水企业承担。根据各供水企业特点和管理属性,本次研究中将全市的供水输配系统划分为 11 个供水区域。具体各区域分布如图 1 所示,各区域供水输配系统分片成网,相对较为独立。

### 1.2 研究方法 with 指标选取

在供水管网系统中,若忽略其构造和水力特征,仅考虑管网节点与管段之间的关联关系时,则称为管网图<sup>[9]</sup>。在图论理论中,由于图是由顶点和边构成的,相应的在管网图中称为节点与管段。要想理解网络结构内部的关联,改善网络行为的走向,就需要了解网络结构的特性,建立相关的网络结构模



图1 上海市主要供水区域分布

Fig. 1 Distribution of Main Water Supply Facilities in Shanghai City

型<sup>[10]</sup>。目前常用的建模方法包括 space-L、space-P 等。space-L 建模方法基于网络的物理或地理空间进行建模,它强调节点之间的实际距离和位置关系,在构建网络时充分考虑了节点的空间属性,因此节点之间的距离和连接关系都被精确地表示,这种方法通常适用于具有明确空间布局的网络,如交通网络、城市基础设施网络等。space-P 建模方法是一种抽象的网络表示方法,它主要关注节点之间的连接关系,而忽略节点的具体空间位置,这种方法在计算效率上通常较高,适用于大规模网络的分析,然而,由于忽略了空间信息,可能导致某些分析结果的偏差。为了更好地体现城市供水管网各节点之间联系与结构,本研究中采用 space-L 法构建城市各供水区域管网的结构拓扑图。

运用图论将供水管网进行简化,即把管段作为网络的边,把管网中的节点作为网络节点,构建出供水管网拓扑结构 space-L 模型,具体选取的指标如下。

### 1.2.1 连接度( $\gamma$ )

$\gamma$  是指管网中实际连接数量占可能存在的最大连接数量的比例,用以描述一个网络系统中不同节点的连通程度,计算如式(1)。

$$\gamma = \frac{e}{3 \times N - 6} \quad (1)$$

其中: $e$ ——管段数;  
 $N$ ——节点数。

通常情况下, $\gamma$  值为 0(网络中不存在任何连接关系时)~1(网络内部完全连通时),且值越大表示网络内的连通性越好。但一般来说,实际网络中  $\gamma$  的值远远小于 1,以往能够发现的最大  $\gamma$  为 0.5。此外, $\gamma$  与供水管网的发展程度息息相关,换言之, $\gamma$  越大,管网的发展程度相对更高,供水范围也相应更广。

### 1.2.2 成环率( $\alpha$ )

$\alpha$  是指管网中实际连接循环或回路的数量占可能存在的最大数量的比例,计算如式(2)。

$$\alpha = \frac{e - N + 1}{2 \times N - 5} \quad (2)$$

$\alpha$  越大,同样条件下管网发生事故时的影响程度会较小。需要注意的是,计算  $\gamma$  和  $\alpha$  这 2 个公式都不适用于节点数小于 3 的情况。

### 1.2.3 单管风险率

单管风险率是指单个管道突发事故导致损失的大小,以单管管损引起供水中断的户数来计。一般以街镇为单位,若有单管,则统计街镇人口数,最后按影响人数占区域总人数的比例相加。

上述指标所要用到的数据均来源于 2022 年供水管线(WATER\_PIPE 和 WATER\_PIPE\_JQ),各供水区域的管线及节点数量如表 1 所示。在 ARCGIS 软件中完成如下操作:(1)筛选出区域内管径大于

表 1 各供水区域的管线及节点数量

Tab. 1 Number of Pipelines and Nodes in Each Water Supply Zone

供水区域	管线/个	节点/个
浦东威立雅	59 927	54 350
城投水务	210 263	201 009
奉贤	30 909	29 396
嘉定	27 221	26 488
金山	17 958	17 497
南汇	33 675	32 830
浦东新区	7 983	7 814
青浦	34 600	33 700
崇明	4 868	4 815
松江	50 167	46 255
临港	25 309	24 802

等于 DN300 的管线;(2) 去除孤立管线;(3) 生成合规管线;(4) 生成管线节点,最终删除重复数据后可呈现出该区域的所有管线及节点。按照各指标的计算公式计算出各区域的管网  $\gamma$ 、 $\alpha$  及单管风险率。

## 2 拓扑指标的计算结果与评价结果

在本研究中,由于  $\gamma$  与  $\alpha$  2 个指标可以宏观表征管网的拓扑结构,故将二者作为定量指标进行分级评价,并以此作为上海市 11 个供水区域相关拓扑结构的评价标准。

### 2.1 $\gamma$

#### 2.1.1 计算结果

各供水区域计算所得的  $\gamma$  结果如图 2 所示。由图 2 可知,11 个供水区域的管网  $\gamma$  为 33%~37%,属于可被发现的最大  $\gamma$  范围内,故该指标计算结果属于正常范畴,同时也说明上海各供水区域间的管道连通建设差异并不明显,发展均衡。其中,浦东威立雅管网的管道  $\gamma$  最高,为 36.76%;崇明的  $\gamma$  最低,为 33.71%。造成上述差距的原因可能是以下几个方面:一是管网布局合理性层面,浦东威立雅供水区域位于上海中心城区,人口密度大,供水压力大,根据上海市的城市规划和用水需求,造就前者的管网密度相较地理位置更为偏远的崇明更大,管网的覆盖率也会相应更高;二是管网维护的管理水平层面,通常情况下,维护的管理水平越高,管网的  $\gamma$  也会越高,而浦东威立雅在城市供水、管网铺设等方面发展更为成熟,故该指标的计算结果也符合该特点。

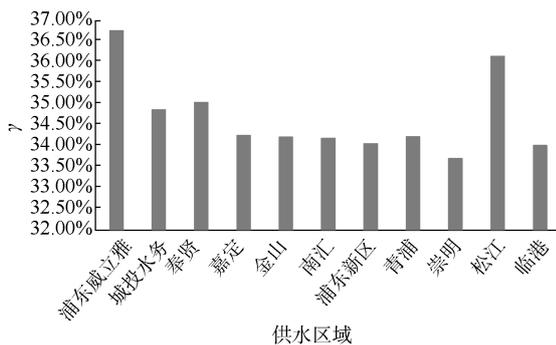


图 2 各供水区域  $\gamma$

Fig. 2  $\gamma$  of Each Water Supply Zone

由图 1 与图 2 可知,管网  $\gamma$  的结果存在着明显的空间差异性。浦东威立雅、城投水务、奉贤、松江四大供水区域的管网  $\gamma$  明显高于其他供水区域。这主要是因为以上区域包含了上海大部分人口居住地,可以更好地满足城市居民的用水需求,即使在某

个区域或节点出现故障,也能够通过其他路径保证供水。

#### 2.1.2 评价结果

根据过往文献与相关研究<sup>[11]</sup>可知,实际网络中  $\gamma$  的值远远小于 1,能够被发现的最大  $\gamma$  为 0.5,而通常情况下供水管网  $\gamma$  指标应为 0.32~0.40,故本研究以此为划分依据,将该指标的评价标准具体划分为以下 4 类(表 2),即  $\gamma$  为 0.38~0.40,管网连通性为“优”; $\gamma$  为 0.36~0.38,管网连通性为“良”; $\gamma$  为 0.34~0.36,连通性为“中”; $\gamma$  为 0.32~0.34,管网的连通程度较差,最终 11 个供水区域连接度评价结果如表 3 所示。

表 2 供水管网  $\gamma$  的评价标准

Tab. 2 Evaluation Criteria for  $\gamma$  of Water Supply Networks

$\gamma$	评价结果
38%~40%	优
36%~38%	良
34%~36%	中
32%~34%	差

表 3 各供水区域  $\gamma$  评价结果

Tab. 3 Evaluation Results of  $\gamma$  of Each Water Supply Zone

供水区域	$\gamma$	评价结果
浦东威立雅	36.76%	良
城投水务	34.87%	中
奉贤	35.05%	中
嘉定	34.26%	中
金山	34.22%	中
南汇	34.19%	中
浦东新区	34.06%	中
青浦	34.23%	中
崇明	33.71%	差
松江	36.15%	良
临港	34.02%	中

由评价结果可以看出,上海全市 11 个供水区域的管网  $\gamma$  都没有能够达到“优”,根据划分标准,供水管网连通性最好的区域为浦东威立雅和松江,评价结果为“良”,其余区域除崇明以外的  $\gamma$  评价结果均为“中”,而崇明的供水管网的  $\gamma$  为“差”。该结果说明上海市供水管网系统的连通性还有很大提升空间,在缩小区域管网  $\gamma$  差距的同时如何进一步提升

全市的供水效率,是未来研究的重点。

## 2.2 $\alpha$

### 2.2.1 计算结果

各供水区域计算所得的  $\alpha$  结果如图 3 所示。从结果来看,11 个供水区域的  $\alpha$  均在 10% 以下。由于  $\alpha$  在计算时,考虑的是所有有可能形成环路的管道的情况,故最终结果数值较小。其中,最高的依旧是浦东威立雅供水区域,而崇明的  $\alpha$  处于最低。该指标反映的是管网的冗余性,也侧面印证了网络系统的连通性。 $\alpha$  越高,说明供水管网的连通性越好,各个节点之间的路径越多,同时也意味着网络系统的冗余性越强,对故障和灾害的抵抗能力越强。

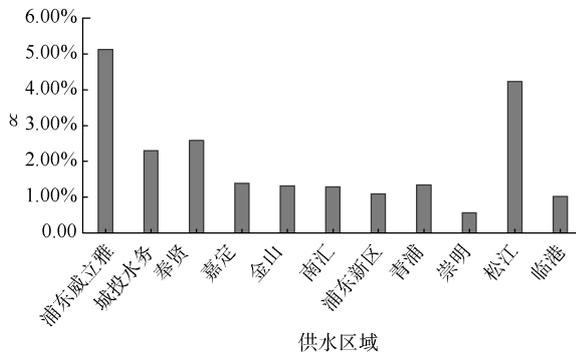


图 3 各供水区域  $\alpha$

Fig. 3  $\alpha$  of Each Water Supply Zone

在此基础上,将计算结果进行最值归一化处理,即把所有数据映射为 0~1,具体处理结果如表 4 所示。由表 4 归一化后的结果可知,各供水区域的  $\alpha$  差异十分明显。临港、崇明、浦东新区等区域相较于浦东威立雅、松江等区域的  $\alpha$  明显降低,其原因可能涉及多个方面,如区域规划不同、地理条件限制、经济成本考虑等。

### 2.2.2 评价结果

根据  $\alpha$  最值归一化处理后的结果,以浦东威立雅为最高判别标准,崇明为最低标准,对上海市 11 个供水区域进行评价划分,具体分类结果及评价结果如表 5 和表 6 所示。

由表中的评价结果可知,全市各供水区域的  $\alpha$  发展程度不一,从“差”至“优”,4 个等级均有出现。其中,与  $\gamma$  评价结果一致的是,浦东威立雅和松江依然是众多供水区域中评级最高的,评价结果达到“优”。此外,城投水务和奉贤 2 个区域均为“中”,其余区域目前的  $\alpha$  还处于较差的阶段。

需要说明的是,将  $\alpha$  的结果采用最值归一化处

表 4 各供水区域  $\alpha$  计算结果及数据处理结果

Tab. 4 Calculation Results and Data Processing Results of  $\alpha$  in Each Water Supply Zone

供水区域	$\alpha$ 计算结果	最值归一化后结果
浦东威立雅	5.13%	1.00
城投水务	2.30%	0.38
奉贤	2.58%	0.44
嘉定	1.39%	0.18
金山	1.32%	0.17
南汇	1.29%	0.16
浦东新区	1.09%	0.12
青浦	1.34%	0.17
崇明	0.56%	0.00
松江	4.23%	0.80
临港	1.02%	0.10

表 5 供水管网  $\alpha$  的评价标准

Tab. 5 Evaluation Criteria for  $\alpha$  of Water Supply Network

$\alpha$ 最值归一化后结果	评价结果
0.75~1.00	优
0.50~0.75	良
0.25~0.50	中
0.00~0.25	差

表 6 各供水区域  $\alpha$  的评价结果

Tab. 6 Evaluation Results of  $\alpha$  in Each Water Supply Zone

供水区域	最值归一化后结果	评价结果
浦东威立雅	1.00	优
城投水务	0.38	中
奉贤	0.44	中
嘉定	0.18	差
金山	0.17	差
南汇	0.16	差
浦东新区	0.12	差
青浦	0.17	差
崇明	0.00	差
松江	0.80	优
临港	0.10	差

理,以浦东威立雅为最高判别标准,崇明为最低标准,对上海市 11 个供水区域的  $\alpha$  结果进行评价划分,主要是为了横向比较的差异化评价,有助于相关管理部门对上海市不同区域的供水管网拓扑结构的

差异有更清晰的认识。

$\alpha$  这一指标最初源自通信网络系统,国内外针对这个指标在供水管网中的研究应用较少,目前对其结果没有统一的评价标准,在此背景下,本论文率先在供水管网中引入该指标,仅针对研究区域内部进行分级划分,评价方法可为其他城市开展评价、研究和管理提供借鉴。

### 2.3 单管风险率

该指标以街镇为单位,统计各街镇人口,按影响人数占区域总人数的比例作为评价方法,最终计算所得各街镇的单管风险率如表7所示。表格中所列举的街镇即全市所有供水区域中有单管供水风险的,其余区域均没有单管供水情况。由表7可知,金山区的枫泾镇单管风险率最高,为10.94%;崇明区的绿华镇在这些街镇中风险率最低,仅为1.42%。该指标的评价方法与区域人口数量密切相关,人口密度越高,供水管网的单管风险率也可能越高。

表7 供水区域街镇单管风险率计算结果

Tab. 7 Calculation Results of Single Management Risk Rate for Communities and Towns of Water Supply Zone

供水区域	街道/镇	人口/人	总人口/人	单管风险率
崇明区	庙镇	5.04万	61.09万	8.24%
崇明区	竖新镇	4.10万	61.09万	6.71%
崇明区	三星镇	3.98万	61.09万	6.51%
崇明区	港沿镇	4.97万	61.09万	8.14%
崇明区	中兴镇	3.01万	61.09万	4.93%
崇明区	绿华镇	0.87万	61.09万	1.42%
崇明区	港西镇	2.80万	61.09万	4.58%
崇明区	建设镇	3.14万	61.09万	5.15%
崇明区	新海镇	1.06万	61.09万	1.74%
青浦区	沈巷	9.55万	123.78万	7.72%
青浦区	金姚	5.36万	123.78万	4.33%
青浦区	商塌	5.36万	123.78万	4.33%
青浦区	练塘	6.26万	123.78万	5.06%
青浦区	重固	5.70万	123.78万	4.60%
青浦区	赵屯	9.22万	123.78万	7.45%
青浦区	白鹤	9.22万	123.78万	7.45%
金山区	枫泾镇	6.39万	58.43万	10.94%
金山区	漕泾镇	3.36万	58.43万	5.75%
嘉定区	封浜	7.92万	120.80万	6.56%
嘉定区	外冈	8.42万	120.80万	6.97%

## 3 讨论

### 3.1 造成不同供水区域指标评价差异的原因

通过计算上海市各供水区域的管网  $\gamma$  与  $\alpha$

2个指标,有助于相关管理部门对市政管网的网络布局和连通情况有进一步的了解,同时也对整个上海市不同区域的供水管网拓扑结构的差异有更清晰的认识。从结果来看,  $\gamma$  与  $\alpha$  2个指标呈现明显的空间差异性。整体而言,浦东威立雅的  $\gamma$  与  $\alpha$  都是划分区域中最高的,崇明则是2个指标值最低的所在区域。因此,根据各指标的划分标准,导致2个区域最终的评价结果也相差较大。上述差异可能与区域的管道布局、人口密度分布、地理位置等因素有关。当区域内人口密度增大时,用水需求也随之上涨,供水管网在布设时也会增加用户节点,从而导致管段数量的增加,管网规模因此扩大,最终使得供水管网的  $\gamma$  与  $\alpha$  提升。同样的,由于浦东威立雅、城投水务位处上海市中心城区,区域内的管网密度也相应更大,其管网连通性明显提高。通过对2个指标进行分级评价,可以看出上海市供水管网拓扑结构发展特点是由中心向外扩展。对于地理位置相对偏远的区域,其管网建设仍需加强,以适应城市发展的速度和需求。

另一方面,通过对单管风险率的计算与分析,可以预测管道发生故障可能造成的损失,为供水管网的维护和更新提供重要的依据。由于本研究中单管风险率的定义是反映单管管损引起供水中断的户数,因此人口数量是该指标的决定性因素。而在实际情况中,不同的管网划分范围会有对应的指标计算方法,有无出现单管情况常常是评判该指标的前提。

### 3.2 拓扑指标的选取对供水管网安全评价的意义

通过对不同拓扑结构指标的分析 and 比较,可以评估供水输配系统的安全性、可靠性和稳定性。常规的城市供水输配系统安全评价通常包括水源、水质、供水管道、应急能力及运营管理等多层次的评估,但对拓扑结构相关指标的重视程度不足,对于管网的动态评价也缺少更新。因此本研究所讨论的拓扑结构指标针对供水输配系统中管道的连接性能、区域整合度等作出了直观的反映,对于安全评价具有一定的适用性。

首先,拓扑指标可以帮助识别供水管网中的薄弱环节。通过分析供水管网的网络结构、节点连通性和路径  $\alpha$  等拓扑特征,可以确定供水系统中的关键节点和关键路径。这些关键节点和关键路径可能是供水系统中的瓶颈,其破坏或故障可能导致整个

供水系统的运行中断或水质问题。通过识别这些脆弱环节,可以采取加强其防护和管理,提升供水系统的安全性。

其次,拓扑指标可以用于评估供水管网的应急响应能力。当供水系统发生突发事件或紧急情况时,如自然灾害、人为破坏或供水设备故障,系统的应急响应能力直接关系到供水的连续性和安全性。通过分析供水管网的拓扑特征,可以评估供水系统在应急情况下的供水调度能力以及备用供水设备的利用程度等关键指标。这些指标可以帮助决策者制定有效的应急预案,提高系统的抗灾能力和应急响应能力。

最后,拓扑指标对供水管网的物理安全和数据安全具有重要意义。供水管网涉及大量的基础设施和设备,在物理上容易遭受破坏和破坏。通过分析供水系统的拓扑特征,可以确定潜在的安全风险点,并采取措施加强其安保工作。此外,供水管网也涉及大量的数据和信息传输,如果数据受到恶意攻击或泄露,可能会对供水系统的运行和信息安全造成威胁<sup>[12]</sup>。通过分析供水管网的拓扑特征,可以评估系统的信息安全风险,以便采取相应的网络安全措施。

#### 4 结论

本研究通过选取典型的网络拓扑结构指标即 $\gamma$ 、 $\alpha$ 与单管风险率,应用space-L模型,计算各指标并针对 $\gamma$ 与 $\alpha$ 这2个指标引入相应的划分方法,对指标进行分级评价,以表征上海市各供水区域的供水输配的网络布局 and 连接情况。最终得出以下结论:(1)浦东威立雅、奉贤、松江3个区域的 $\gamma$ 、 $\alpha$ 较高,临港、崇明、浦东新区等区域相对较低,该结果呈现明显的空间差异性;(2)金山区的枫泾镇单管风险率相对最高,该指标与所属街镇的人口占比有很大关联,一般占比越高,单管风险率越大;(3)本论文率先在供水管网中引入 $\alpha$ 、单管风险率指标,评价方法可为其他城市开展评价和研究提供借鉴;(4)拓扑指标的选取对供水管网安全评价具有重要意义,可以帮助识别脆弱环节、评估应急响应能力和加强物理与数据安全保障。这有助于保证供水系统的正常运行,并提高供水的安全性和可靠性。需要注意的是,拓扑结构指标只是评价城市供水输配系统安全性的一个方面,还需要综合考虑其他因素,如设备

性能、水质监测、应急管理。因此,在实际应用中需要综合运用多种指标和方法进行评价和分析。

#### 参考文献

- [1] 黄常. 基于网络拓扑分析的城市供水管网脆弱性评估研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.  
HUANG C. Research on vulnerability assessment of urban water supply network based on network topology analysis [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2021年中国城市建设状况公报[EB/OL]. (2022-09-30) [2024-07-08]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/tjgb/index.html>.  
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Communique on the status of urban construction in China in 2021 [EB/OL]. (2022-09-30) [2024-07-08]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/tjgb/index.html>.
- [3] 于志斌. 城市供水管网地理信息系统的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2015.  
YU Z B. Design and implementation of geographic information system for urban water supply network [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [4] 何宁, 李彬. 城市快速轨道的网络分析和规划[J]. 城市规划汇刊, 1997(3): 59-63.  
HE N, LI B. Network analysis and planning of urban express rail [J]. Urban Planning Forum, 1997(3): 59-63.
- [5] ZARGHAMI S A, GUNAWAN I, SCHULTMANN F. Integrating entropy theory and cospanning tree technique for redundancy analysis of water distribution networks [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 176: 102-112. DOI: 10.1016/j.res.2018.04.003.
- [6] AGATHOKLEOUS A, CHRISTODOULOU C, CHRISTODOULOU S E. Topological robustness and vulnerability assessment of water distribution networks [J]. Water Resources Management, 2017, 31(12): 4007-4021.
- [7] 张正培. 基于复杂网络理论的城市供水管网的建模与分区分层[D]. 上海:上海交通大学, 2015.  
ZHANG Z P. Modeling and zoning stratification of urban water supply network based on complex network theory [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [8] 上海市统计局, 国家统计局上海调查总队. 2023年上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.  
Shanghai Municipal Bureau of Statistics, Shanghai Investigation Team of the National Bureau of Statistics. Shanghai statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [9] 严熙世, 刘遂庆. 给排水管网系统[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(下转第61页)

- 2022, 222; 118840. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118840.
- [ 4 ] DONG H Y, QIANG Z M, LIAN J F, et al. Deiodination of iopamidol by zero valent iron (ZVI) enhances formation of iodinated disinfection by-products during chloramination [ J ]. *Water Research*, 2018, 129: 319 – 326. DOI: 10.1016/j.watres.2017.11.032.
- [ 5 ] YALKOWSKY S H, HE Y, JAIN P. Handbook of aqueous solubility data [ M ]. Florida: CRC Press, 2013.
- [ 6 ] MAO Y X, DONG H Y, LIU S G, et al. Accelerated oxidation of iopamidol by ozone/peroxymonosulfate (O<sub>3</sub>/PMS) process: Kinetics, mechanism, and simultaneous reduction of iodinated disinfection by-product formation potential [ J ]. *Water Research*, 2020, 173: 115615. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115615.
- [ 7 ] KORMOS J L, SCHULZ M, TERNES T A. Occurrence of iodinated X-ray contrast media and their biotransformation products in the urban water cycle [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(20): 8723–8732.
- [ 8 ] OOLTON R L, KOHN T, CWIERTNY D M. Pharmaceuticals and personal care products in effluent matrices: A survey of transformation and removal during wastewater treatment and implications for wastewater management [ J ]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12(11): 1956–1978.
- [ 9 ] TIAN F X, XU B, LIN Y L, et al. Chlor(am)ination of iopamidol: Kinetics, pathways and disinfection by-products formation [ J ]. *Chemosphere*, 2017, 184: 489 – 497. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.012.
- [ 10 ] SEITZ W, JIANG J Q, SCHULZ W, et al. Formation of oxidation by-products of the iodinated X-ray contrast medium iomeprol during ozonation [ J ]. *Chemosphere*, 2008, 70(7): 1238–1246.
- [ 11 ] LI J, JIANG J, PANG S Y, et al. Transformation of X-ray contrast media by conventional and advanced oxidation processes during water treatment: Efficiency, oxidation intermediates, and formation of iodinated byproducts [ J ]. *Water Research*, 2020, 185: 116234. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116234.
- [ 12 ] GUO K H, ZANG J S, LI A L, et al. Ultraviolet irradiation of permanganate enhanced the oxidation of micropollutants by producing HO· and reactive manganese species [ J ]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, 5: 750 – 756. DOI: 10.1021/acs.estlett.8b00402.
- [ 13 ] YANG T, MAI J M, ZHU M Y, et al. Enhanced permanganate activation under UVA-LED irradiation: Unraveled mechanism involving manganese species and hydroxyl radical [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(24): 17720–17731.
- [ 14 ] GUAN X H, HE D, MA J, et al. Application of permanganate in the oxidation of micropollutants: A mini review [ J ]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2010, 4(4): 405–413.
- [ 15 ] PEREIRA V J, WEINBERG H S, LINDEN K G, et al. UV degradation kinetics and modeling of pharmaceutical compounds in laboratory grade and surface water via direct and indirect photolysis at 254 nm [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(5): 1682–1688.
- [ 16 ] THORNLEY W A, BITTERWOLF T E. Photochemistry of the permanganate ion in low-temperature frozen matrices [ J ]. *Inorganic Chemistry*, 2015, 54(7): 3370–3375.
- [ 17 ] ZIMMERMAN G. Photochemical decomposition of aqueous permanganate ion [ J ]. *The Journal of Chemical Physics*, 1955, 23: 825–832. DOI: 10.1063/1.1742130.
- [ 18 ] GUO K H, WEI W R, WU S N, et al. Abatement of structurally diverse micropollutants by the UV/permanganate process: Roles of hydroxyl radicals and reactive manganese species [ J ]. *ACS Environmental Science & Technology Water*, 2022, 2(4): 593–603.
- [ 19 ] GAO Z C, LIN Y L, XU B, et al. Effect of UV wavelength on humic acid degradation and disinfection by-product formation during the UV/chlorine process [ J ]. *Water Research*, 2019, 154: 199–209. DOI: 10.1016/j.watres.2019.02.004.
- [ 20 ] GAO Z C, LIN Y L, XU B, et al. A comparison of dissolved organic matter transformation in low pressure ultraviolet (LPUV) and ultraviolet light-emitting diode (UV-LED)/chlorine processes [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2020, 702: 134942. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134942.

## (上接第 55 页)

- YAN X S, LIU S Q. Water supply and drainage network system [ M ]. Beijing: Architecture & Building Press, 2008.
- [ 10 ] 王炳波. 复杂网络拓扑结构度量指标及应用研究 [ D ]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- WANG B B. Research on the measurement index and application of complex network topology [ D ]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [ 11 ] 王炜, 徐吉谦, 杨涛. 城市交通规划理论及其应用 [ M ]. 南京: 东南大学出版社, 1998.
- WANG W, XU J Q, YANG T. Urban transport planning theory and its applications [ M ]. Nanjing: Southeast University Press, 1998.
- [ 12 ] 高天智, 陈宽民, 李凤兰. 城市轨道交通网络的拓扑结构分析 [ J ]. 长安大学学报 (自然科学版), 2018, 38(3): 97–106.
- GAO T Z, CHEN K M, LI F L. Topological analysis of urban rail transit network [ J ]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2018, 38(3): 97–106.