

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.04.002

# 基于拓扑距离聚类的供水管网分区方法

谭涛<sup>1</sup>, 张淼<sup>2</sup>, 蒋云龙<sup>3</sup>, 李树生<sup>4</sup>, 李振博<sup>5</sup>, 杜坤<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 大理市洱海流域截污治污管理服务中心, 云南 大理 671000; 3. 昆明南方水务有限公司, 云南 昆明 650000; 4. 云派思维科技有限公司, 云南 昆明 650000; 5. 昆明通用水务自来水有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 对供水管网进行分区计量简化压力管理,可有效降低漏损率。然而,当前相关研究往往局限于节点拓扑关系,忽略了减压阀和泵站对分区结果的影响。针对该问题,提出了一种基于拓扑距离聚类的供水管网分区方法,该方法将减压阀和泵站作为分区边界的依据,进而提高分区的准确性。首先,将管网映射成为无向图用于构建邻接矩阵,并放大减压阀和泵站节点间的拓扑距离。然后,采用弗洛伊德最短路径算法构建拓扑距离矩阵。最后,基于构建的拓扑距离矩阵采用K-means聚类法对节点聚类,进而实现管网分区。将所提方法应用于3个管网案例并与两种传统方法对比,结果表明,基于拓扑距离聚类的分区法能够得到更准确的分区结果,同时保证分区具有较高的模块度与均匀性。

**关键词:** 供水管网; 减压阀; 泵站; 拓扑距离; K-means聚类法

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)04-0010-07

## Topological Distance-based Clustering Method for Water Supply Network Partitioning

TAN Tao<sup>1</sup>, ZHANG Miao<sup>2</sup>, JIANG Yunlong<sup>3</sup>, LI Shusheng<sup>4</sup>, LI Zhenbo<sup>5</sup>, DU Kun<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Sewage Interception and Pollution Control Management Service Center of Dali City for Erhai Lake Basin, Dali 671000, China; 3. Kunming South Water Co. Ltd., Kunming 650000, China; 4. Yunpai Thinking Technology Co. Ltd., Kunming 650000, China; 5. Kunming CGE Co. Ltd., Kunming 650000, China)

**Abstract:** District metering is a method of simplifying pressure management by partitioning the water supply network, which can effectively reduce leakage rates. However, current research often focuses solely on the topological relationship of nodes, ignoring the influence of pressure reducing valves and pumping stations on partitioning outcomes. To address this issue, a topological distance-based clustering method for water supply network partitioning is proposed. This method uses pressure reducing valves and pumping stations as the basis for partition boundaries, thereby enhancing partitioning accuracy. Initially, the water supply network is modeled as an undirected graph to construct the adjacency matrix, and the

基金项目: 云南省基础研究专项(202401AT070392); 国家自然科学基金资助项目(52260011)

通信作者: 杜坤 E-mail: 765818261@qq.com

topological distances between pressure reducing valves and pumping stations are magnified. Subsequently, the topological distance matrix is generated using Floyd's shortest path algorithm. Finally, nodes are clustered based on the constructed topological distance matrix using the K-means clustering method, thus facilitating the partitioning of the water supply network. The proposed method was applied to three case studies and compared with two traditional methods. The results indicate that the proposed partitioning algorithm based on topological distance clustering, yields more accurate partitioning outcomes while ensuring high modularity and uniformity in the partitioning process.

**Keywords:** water supply network; pressure reducing valve; pumping station; topological distance; K-means clustering method

随着城市的发展,供水管网规模持续扩张,对管网的压力管理、漏损控制以及水质监测等方面的要求也日益提高<sup>[1-2]</sup>。对供水管网进行分区计量,有助于漏损控制、爆管快速检测<sup>[3-4]</sup>。然而,由于复杂的管网拓扑结构,特别是在具有环状管路的大型管网中,手动划分供水管网区域独立计量(DMA)存在诸多挑战。因此,自动分区算法的研究成为当前供水管网研究领域的重要课题<sup>[5-6]</sup>。

国内外学者针对自动分区算法开展了广泛研究,Diao等<sup>[7]</sup>首先提出了基于社区检测的供水管网分区概念,并利用模块度作为关键指标。然而,最大化模块度可能导致不切实际的分区结果<sup>[8]</sup>,如不同社区规模不均匀、差异性大的问题。针对该问题,Zhang等<sup>[9]</sup>提出了一种改进模块度算法,以提高分区结果的均匀性。王彤等<sup>[10]</sup>则采用快速网络社区的方式对供水管网进行分区,通过研究节点的社区结构并结合实际情况来实现管网的划分。Liu等<sup>[11]</sup>比较了不同创建区域独立计量区方法,并强调分区平衡性应作为一个关键指标,即保证各个分区的节点均匀性。传统基于模块度的快速贪心聚类法<sup>[7]</sup>未考虑分区中的节点均匀性,K-means聚类法通过节点拓扑关系进行聚类能够取得更好的节点均匀性,通过更新每个聚类中心来达到此目的。周中健等<sup>[12]</sup>通过在供水管网中引入管网节点的自然邻构建相似度矩阵,有效减少了分区边界管段的数量,从而提高了供水管网分区经济性。陈学志等<sup>[13]</sup>则通过考虑社区结构与环状管道从而使分区过程更快捷且分区结果更精确。Creaco等<sup>[14]</sup>介绍了一种新的模块度公式和算法,用于双重供水管网进行最佳聚类。虽然上述研究在供水管网分区方面作出了重要贡献,但多数仅利用节点之间的拓扑关

系,均未考虑减压阀和泵站对分区结果的影响。因此,如何有效地将减压阀和泵站纳入自动分区过程是当前面临的难题。

鉴于此,提出了一种基于拓扑距离聚类的供水管网分区算法。首先,将管网映射成为无向图用于构建邻接矩阵,并放大减压阀和泵站节点间的拓扑距离。然后,采用弗洛伊德最短路径算法构建拓扑距离矩阵。最后,基于构建的拓扑距离矩阵采用K-means聚类法对节点聚类,进而实现管网分区。为验证该方法的可行性,将其应用于3个管网案例并与两种传统方法对比。由于基于地理距离的分区算法过于简单,以下仅对基于模块度的快速贪心聚类法的传统方法和文中提出的算法进行介绍。

## 1 基于模块度的快速贪心聚类法

Diao等<sup>[7]</sup>首次将基于模块度的快速贪心聚类法应用于供水管网分区,通过聚类实现管网内部节点的紧密连接与不同聚类间连接的稀疏性。该方法通过使用更少的流量计和阀门来实施区域独立计量,从而实现更高效的水资源管理。此外,随着居住社区的不断扩大,供水管网展现出与社区相似的属性。因此,应用快速贪心聚类法来检测和划分供水管网中的社区是合理的,其主要目标是优化评估结果分区质量的模块度( $Q$ )<sup>[15]</sup>。快速贪心聚类法的进一步实施细节,可参阅文献<sup>[7]</sup>。 $Q$ 计算如下:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{vw} \left( A_{vw} - \frac{k_v k_w}{2m} \right) \delta(c_v, c_w) \quad (1)$$

$$m = \frac{1}{2} \sum_{vw} A_{vw} \quad (2)$$

$$k_v = \sum_w A_{vw} \quad (3)$$

$$k_w = \sum_v A_{vw} \quad (4)$$

式中: $m$ 为网络的总边数; $A_{\nu\omega}$ 为邻接矩阵中的一个元素,当节点 $\nu$ 和 $\omega$ 相连时为1,否则为0; $k_{\nu}$ 、 $k_{\omega}$ 分别为节点 $\nu$ 和 $\omega$ 的度,即连接到该节点的边数; $c_{\nu}$ 、 $c_{\omega}$ 分别为节点 $\nu$ 、 $\omega$ 所属的分区,当同属一个社区时, $\delta(c_{\nu}, c_{\omega})$ 为1,否则为0。

## 2 基于拓扑距离聚类的分区法

图1为基于拓扑距离聚类的分区法实施步骤。第一步使用弗洛伊德算法构建拓扑距离矩阵,其中每个元素表示节点之间最短路径中管道的数量。因此,该矩阵有效反映了管网节点之间的连接程度。此外,考虑到减压阀及泵站对聚类结果的影响,将设有减压阀和泵站的管道拓扑距离指定为总管段数(7),其他管道的距离指定为1。在第二步中,基于上述矩阵采用K-means聚类算法对管网进行分区,将具有强连接性的节点进行聚类,以实现自动分区过程。



图1 基于拓扑距离聚类的分区法实施步骤

Fig.1 Partitioning implementation steps of topological distance-based clustering

### 2.1 拓扑距离矩阵生成

弗洛伊德算法是图论和网络分析中的基础技术,即使图中存在负边权重<sup>[16]</sup>,也能有效计算图中所有顶点之间的最短路径。因此,采用此方法求解拓扑距离矩阵。关于弗洛伊德算法的实施细节,可参阅文献[17]。采用弗洛伊德算法的主要优势如下:①该算法可以在一次运行中高效确定每对顶点间的最短路径,适用于同时计算多个最短路径的情况。②该算法的简单性和易于实现性使其能够被具有不同专业知识水平的研究人员和开发人员所使用。③当不存在负权重环时,弗洛伊德算法能处理带有负边权重的图,因此在涉及负权重的实际模型中更具适用性。

### 2.2 基于K-means聚类法的供水管网分区

K-means聚类法的关键优势之一在于其简单和高效。该方法能够高效处理大型数据集,并且易于实现,因此在各种聚类任务中被广泛采用。针对K-

means聚类法的初始质心选择,选用Arthur等<sup>[18]</sup>提出的方法。相较于传统的K-means聚类法,该方法已被证实能够获得更稳定的聚类结果。

K-means聚类法将给定的数据集分为 $K$ 个不同的聚类,通过迭代过程不断减小各个聚类内部的方差,最终达到稳定的聚类结果。基于构建的拓扑距离矩阵,K-means聚类法将供水管网中的节点视为多维空间中的数据点,通过将每个数据点分配到最接近其均值所对应的聚类从而实现供水管网分区。K-means聚类法将拓扑距离较近的节点进行聚类,使得各个聚类内部形成紧密连接,同时保持不同聚类之间的稀疏连接。因此,在供水管网分区中,通过引入拓扑距离矩阵,K-means聚类算法成为解决该问题的有效工具。

## 3 案例分析

采用3种聚类方法进行案例分析,其中聚类方法分别为Hajebi等<sup>[19]</sup>提出的基于地理聚类的分区法、文中提出的基于拓扑距离聚类的分区法,以及由Diao等<sup>[7]</sup>提出的基于模块度的快速贪心聚类分区法,研究的目的在于探究上述3种方法在聚类机制上的差异。针对包含减压阀和泵站的供水管网,对比使用基于地理聚类的分区法和文中提出的算法,评估二者在分区时的有效性。此外,通过使用模块度和均匀性指标,对文中提出的算法和基于模块度的快速贪心聚类法进行性能比较。

### 3.1 案例1:基于拓扑距离聚类的有效性分析

案例1使用两个供水管网来验证所提算法的有效性,供水管网拓扑如图2所示。

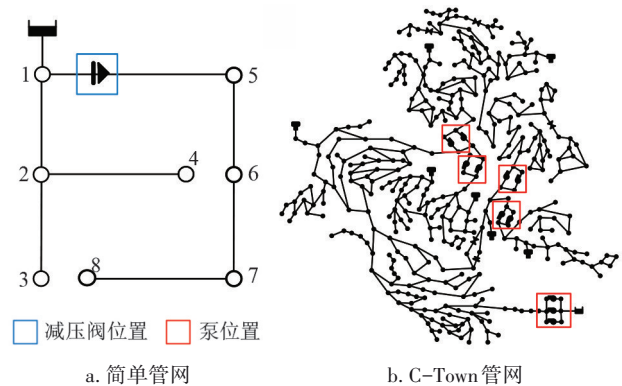


图2 供水管网拓扑

Fig.2 Water supply network topology

其中,图2(a)为含有一个减压阀的简单管网,旨在考虑减压阀对分区的影响;图2(b)为Ostfeld



等<sup>[20]</sup>提出的C-Town管网,该管网包含众多泵站,旨在考虑泵站对分区的影响。

### ① 简单管网分析

采用基于地理聚类的分区法和基于拓扑距离聚类的分区法两种方法对简单管网进行分区,结果如图3所示。

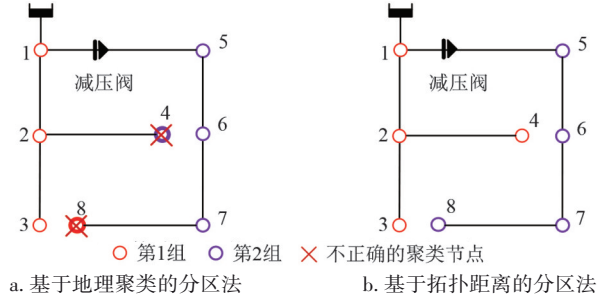


图3 应用于简单管网的两种方法的分区结果

Fig.3 Partitioning results from two methods applied to the simple network

基于地理聚类的分区法错误地将节点4和节点8分到了不正确的组中,导致节点1、2、3和8在同一组,节点5、6、7和4在另一组,其原因是节点8在空间上更靠近节点3,节点4更靠近节点6。这表明基于地理聚类的分区法仅依靠节点的地理距离信息进行聚类,没有考虑将减压阀作为管网分区的一个重要指标。因此,导致了不正确的分区结果。

相比之下,基于拓扑距离聚类的分区法可正确地将节点4与节点1、2和3聚类在一起,将节点8与节点5、6和7聚类在一起。这是由于节点4与节点2直接相连,节点8与节点7直接相连,以及这两个分区之间存在减压阀。这表明基于拓扑距离聚类的分区法考虑了管道连接以及减压阀的存在,因此获得了准确的分区结果。

### ② C-Town管网

由于C-Town管网中的泵站将管网正好分为5个子区域,有助于将C-Town管网进行手动分区。因此,手动方法得到的分区结果可以作为评估其他方法分区结果的标准。不同方法对C-Town管网的分区结果如图4所示(以不同颜色标识DMA分区)。

图4(b)和图4(d)比较了对泵站采用不同拓扑距离进行分区时的结果(分别为388和1),表明放大泵站的拓扑距离能够获得更精确的分区结果。其中数值388为对应管网中管道的总数。如图4(b)所示,基于拓扑距离聚类的分区法产生了与手动方法相同的分区结果,证明了其在处理包括泵站在内的

真实管网中的有效性。另一方面,图4(d)表明,对于没有放大泵站拓扑距离的情况,基于拓扑距离聚类的分区法产生了不精确的分区结果,进一步验证了该法的合理性,强调了扩大泵站拓扑距离对实现更精确管网分区的重要性。

此外,图4(c)表明基于地理聚类的分区法产生了不准确的分区结果,许多缺乏连接的节点被分在一组。这是由于该方法仅仅依赖节点的地理位置,而没有考虑节点之间的连接或管网拓扑,产生的聚类结果与手动方法的结果显著偏离。这表明基于地理聚类的分区法在带有泵站的复杂管网中的有效性较差。

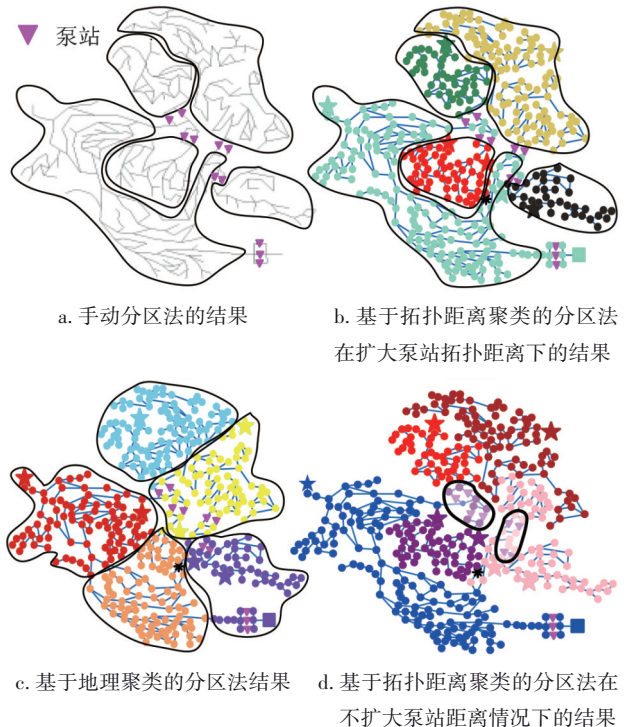


图4 不同分区方法应用于C-Town管网的分区结果

Fig.4 Partitioning results of different methods applied to the C-Town pipe network

### 3.2 案例2:某管网的均匀性及模块度评估

为验证基于拓扑距离聚类的分区法应用于复杂管网分区时的模块度和均匀性,选取具有复杂结构和高度环状特征的Rural管网。Rural管网是从管道系统衍生的实际管网水力模型,Marchi等<sup>[21]</sup>最初用其评估各种进化算法在优化供水管网方面的性能。通过模块度指标和均匀性指标,在Rural管网上比较基于拓扑距离聚类的分区法与基于模块度的快速贪心聚类分区法。Rural管网拓扑见图5。

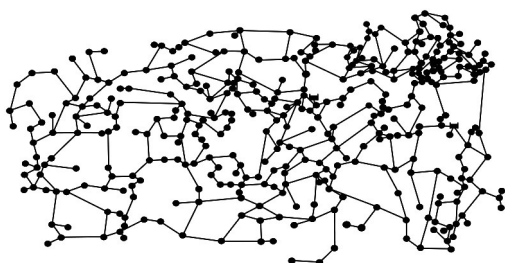


图5 Rural管网拓扑

Fig.5 Rural pipe network topology

图6为针对Rural管网所得到的两种方法的模块度值,其中涵盖了2~15个聚类情况下的数值。

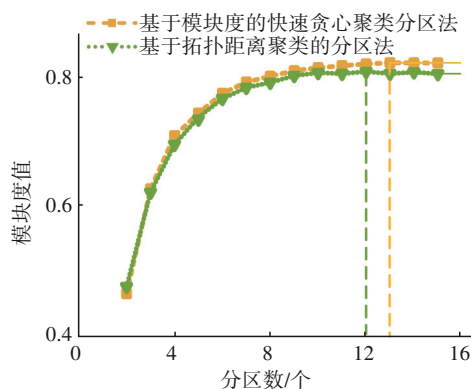


图6 基于两种方法的Rural管网模块度比较

Fig.6 Modularity comparison for different clusters using two methods to Rural pipe network

从图6可知,在不同的聚类规模下,基于拓扑距离聚类的分区法和基于模块度的快速贪心聚类分区法在模块度数值方面非常接近。值得注意的是,当聚类结果为13个时,基于模块度的快速贪心聚类分区法达到了最大的模块度数值(0.821),而基于拓扑距离聚类的分区法在聚类数为12时达到了最大的模块度数值(0.808)。总体而言,在较大的聚类规模下,基于模块度的快速贪心聚类分区法略优于基于拓扑距离聚类的分区法。然而,在较小的聚类规模下(如2个分区),基于拓扑距离聚类的分区法展现出比基于模块度的快速贪心聚类分区法更高的模块度数值。综上,尽管基于拓扑距离聚类的分区法并未对模块度数值进行优化,但依然在模块度方面表现优异。Newman等<sup>[15]</sup>的研究结果表明,当模块度值超过0.3时,所得划分结果具有显著的社区结构。因此,基于拓扑距离聚类的分区法能够有效地将管网划分为与社区结构相符的具有强内部连接的聚类。

为进一步评估算法的性能,对不同的聚类数量

(5、10和15个分区)下两种方法的节点均匀性进行比较,结果见图7。

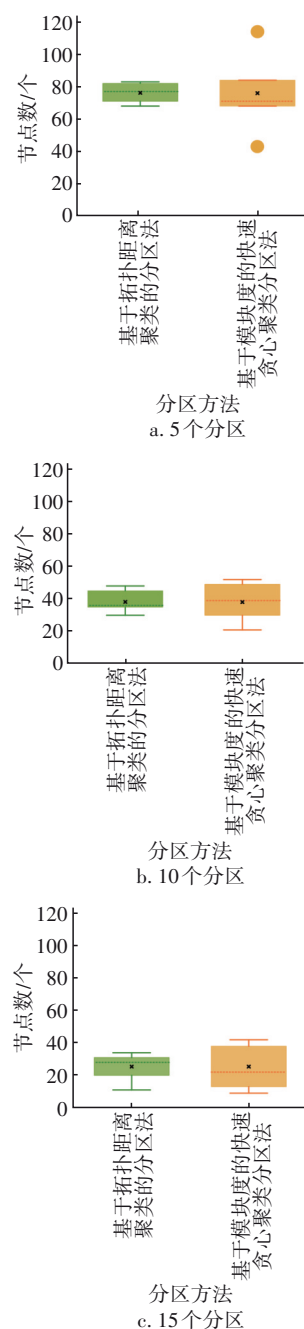
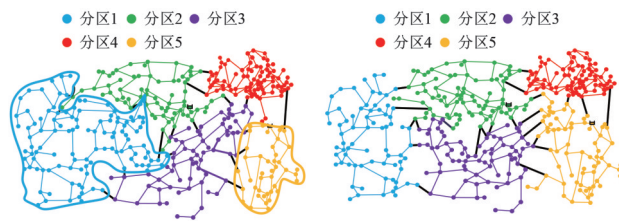


图7 将两种方法应用于不同分区数的Rural管网节点均匀性比较

Fig.7 Node uniformity comparison for two methods applied to Rural pipe network with different clusters

从图7可以看出,基于模块度的快速贪心聚类分区法在3种聚类场景下表现出较大的箱线图,表明在聚类中节点数量的变化较大。此外,值得注意的是,在将管网划分为5个聚类时,观察到基于模块

度的快速贪心聚类分区法存在两个显著的离群值,表明这个特定的聚类方案存在异常的聚类规模,既有过大又有过小的情况。具体而言,分区1(蓝色)表现出过大的节点规模,而分区5(黄色)则表现出规模不足的节点数量[见图8(a)]。这种差异是由渐进性合并过程造成的,其中分区1持续吸收较小的聚类,导致节点数量增加。与此相反,分区5在合并过程中保持其原始规模,从而导致各分区之间出现了显著的节点数量差异。



a. 基于模块度的快速贪心聚类分区法 b. 基于拓扑距离聚类的分区法

图8 基于模块度的快速贪心聚类分区法和基于拓扑距离的聚类分区法的Rural管网聚类结果(分区数为5)

Fig.8 Clustering results of Rural pipe network based on modularity-based fast greedy clustering method and topological distance-based clustering method (number of partitions is 5)

相比之下,基于拓扑距离聚类的分区法在3种不同聚类方案下表现出较小且更一致的箱线图,表明各分区之间的节点数量更为接近[见图8(b)]。由此可见,在不同的分区方案下,基于拓扑距离聚类的分区法能够生成更加均匀分布的聚类情况。这是由于基于拓扑距离聚类的分区法通过对每个聚类实现中心更新,避免了聚类规模过大或过小的情况。因此,基于拓扑距离聚类的分区法保证了更平衡的聚类规模,并有效解决了基于模块度的快速贪心聚类分区法出现的极端差异问题。

综上所述,在复杂管网情况下,相较于基于模块度的快速贪心聚类分区法,基于拓扑距离聚类的分区法具有相似模块度的聚类模式,并且各聚类节点数量变化更为稳定,表明该分区法在应用于大型管网进行聚类时具备相当大的潜力。

#### 4 结论

针对当前研究忽视减压阀和泵站对分区结果的影响,提出基于拓扑距离聚类的分区法。该方法采取对减压阀及泵站在内的连接放大拓扑距离,通过构建拓扑距离矩阵和采用K-means聚类法对管

网实现分区。与传统的基于地理聚类的分区法及基于模块度的快速贪心聚类分区法相比,基于拓扑距离聚类的分区法具有更准确的分区结果,且分区具有较高的模块度与均匀性。

① 当管网中含有减压阀或泵站时,基于拓扑距离聚类的分区法可实现准确的分区结果。相比之下,基于地理聚类的分区法在对简单管网和C-Town管网进行分区时,产生了不准确的分区结果。

② 采用基于拓扑距离聚类的分区法对Rural管网进行分区,其模块度值超过了0.3。尽管模块度不是主要的优化目标,但其会使分区结果具有更大的模块度值。因此,基于拓扑距离聚类的分区法在形成良好结构分区方面具有有效性。

③ 基于拓扑距离聚类的分区法在处理较少聚类规模时表现出比基于模块度的快速贪心聚类分区法更好的聚类均匀性。基于模块度的快速贪心聚类分区法倾向于以模块度为优先,通过合并较小的社区形成更大的社区,但会导致各个分区之间的均匀性较差。相反,基于拓扑距离聚类的分区法可根据不同情况进行独立聚类,确保形成较大社区时无需合并较小社区,提升了聚类的均匀性。

#### 参考文献:

- [1] 林守江,沈钢,彭慧. 供水管网的泄漏及压力管理[J]. 中国给水排水,2006,22(18):86-88.  
LIN S J, SHEN G, PENG H. Management of the leakage pressure of water supply networks [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(18):86-88 (in Chinese).
- [2] 刘俊,孙佳,俞国平. 分区供水技术在漏损控制中的研究现状与进展[J]. 中国给水排水,2010,26(16):7-10,15.  
LIU J, SUN J, YU G P. Current situation and progress of water distribution system zoning technologies for water loss control [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(16):7-10, 15 (in Chinese).
- [3] BUI K X, MARLIM M S, KANG D. Water network partitioning into district metered areas: a state-of-the-art review[J]. Water, 2020, 12(4): 1002.
- [4] DIAO K. Towards resilient water supply in centralized control and decentralized execution mode [J]. AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2021, 70(4): 449-466.
- [5] DI NARDO A, DI NATALE M, GIUDICIANNI C, et



- al. Economic and energy criteria for district meter areas design of water distribution networks[J]. *Water*, 2017, 9(7): 463.
- [6] CREACO E, HAIDAR H. Multiobjective optimization of control valve installation and DMA creation for reducing leakage in water distribution networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019, 145(10): 04019046.
- [7] DIAO K, ZHOU Y W, RAUCH W. Automated creation of district metered area boundaries in water distribution systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2013, 139(2): 184–190.
- [8] ZHANG Q Z, WU Z Y, ZHAO M, et al. Automatic partitioning of water distribution networks using multiscale community detection and multiobjective optimization [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(9): 04017057.
- [9] ZHANG T Q, YAO H Q, CHU S P, et al. Optimized DMA partition to reduce background leakage rate in water distribution networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2021, 147(10): 04021071.
- [10] 王彤,冯雪峰,赵明,等. 基于快速网络社区算法的供水管网区块化研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(5): 37–43.
- WANG T, FENG X F, ZHAO M, et al. Water supply network blocks based on a fast algorithm for detecting community structure in networks [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(5): 37–43 (in Chinese).
- [11] LIU H X, ZHAO M K, ZHANG C, et al. Comparing topological partitioning methods for district metered areas in the water distribution network [J]. *Water*, 2018, 10(4): 368.
- [12] 周中健,王琦,吉瑞博,等. 基于节点自然邻的供水管网DMA分区方法研究[J]. *给水排水*, 2019, 45(7): 118–123.
- ZHOU Z J, WANG Q, JI R B, et al. Partition of DMA within water distribution systems based on natural neighbors of nodes [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45 (7): 118–123 (in Chinese).
- [13] 陈学志,李俊江,丁武,等. 基于 Louvain 算法的供水管网分区研究及应用[J]. *给水排水*, 2023, 49(2): 126–130, 137.
- CHEN X Z, LI J J, DING W, et al. Research and application of water distribution network zoning based on Louvain algorithm [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(2): 126–130, 137 (in Chinese).
- [14] CREACO E, GIUDICIANNI C, MOTTAHEDIN A. Improved community detection for WDN partitioning in the dual topology based on segments and valves [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2023, 25(4): 1341–1357.
- [15] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. *Physical Review E*, 2004, 69: 026113.
- [16] HOUGARDY S. The Floyd–Warshall algorithm on graphs with negative cycles [J]. *Information Processing Letters*, 2010, 110(8/9): 279–281.
- [17] ZHAO L, ZHAO J. Comparison study of three shortest path algorithm [C]//IEEE. *Proceedings of 2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*. Dalian: IEEE, 2017: 748–751.
- [18] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. K-Means++ : the advantages of careful seeding [C]//ACM. *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM–SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*. New Orleans: ACM, 2007. DOI:10.1145/1283383.1283494.
- [19] HAJEBI S, BARRETT S, CLARKE A, et al. Multi-agent simulation to support water distribution network partitioning [C]//ESM 2013. *Proceedings of the Modelling and Simulation 2013–European Simulation and Modelling Conference*. Fernández: ESM 2013, 2013: 163–168.
- [20] OSTFELD A, SALOMONS E, ORMSBEE L, et al. Battle of the water calibration networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2012, 138 (5): 523–532.
- [21] MARCHI A, DANDY G, WILKINS A, et al. Methodology for comparing evolutionary algorithms for optimization of water distribution systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 140 (1): 22–31.

作者简介: 谭涛(1999—), 男, 重庆人, 硕士研究生,  
主要研究方向为供水管网分区。

E-mail: 1090152459@qq.com

收稿日期: 2024-03-07

修回日期: 2024-04-03

(编辑: 丁彩娟)