

技术总结

# 基于快速网络社区算法的供水管网区块化研究

王彤<sup>1,2</sup>, 冯雪峰<sup>3</sup>, 赵明<sup>2,4</sup>, 刘翔翔<sup>3</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 天津三博水科技有限公司, 天津 300070; 3. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 4. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为使供水管网分区更具有理论基础和科学性,进行了基于快速网络社区算法的供水管网区块化研究。简化后的供水管网被抽象为复杂网络系统,同时管网中节点和管段的连接关系被转换为无向图;运用计算程序将连接关系紧密的节点划分为同一社区,得到节点的社区结构,以此为主要依据并结合实际情况对供水管网进行区块化;在此基础上,通过水力模拟计算得出优化的管网区块化方案。结果表明,分区后的管网较分区前水压更为均衡,实现了分区计量;低水龄节点比重上升,水质得到保障。

**关键词:** 快速网络社区算法; 供水管网; 区块化; 水压; 水质

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0037-07

## Water Supply Network Blocks Based on a Fast Algorithm for Detecting Community Structure in Networks

WANG Tong<sup>1,2</sup>, FENG Xue-feng<sup>3</sup>, ZHAO Ming<sup>2,4</sup>, LIU Xiang-xiang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Tianjin Sambo Water Technology Co. Ltd., Tianjin 300070, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 4. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** A water supply network blocks method based on a fast algorithm for detecting community structure in networks was proposed to partition the pipe network scientifically and theoretically. The simplified hydraulic model of a water supply network was abstracted as a complex network system, and the connectivity relation between the nodes and the links in the network was converted into undirected graphs. Using the algorithm, the nodes with dense connections were divided into the same community. Then, the community structure of the nodes was obtained and used as the basis in partitioning the water supply network according to the actual situations. The water supply network blocks were optimized through the hydraulic simulation. The results showed that the pressure of the water supply network was more balanced after the partition. The partition metering was achieved, the number of low water age nodes increased, and the water quality was improved.

**Key words:** fast algorithm for detecting community structure in networks; water supply network; blocks; water pressure; water quality

城市供水管网作为城市的生命线,对城市的稳定发展起着至关重要的作用。随着城市的发展,供水管网复杂度不断提高,规模日趋庞大,运行管理的难度也随之增加。为了解决供水管网管理困难的局面,哈尔滨工业大学赵洪宾教授根据我国目前城市配水系统的特性,于2001年提出了配水系统分区供水(DBS)的理念<sup>[1]</sup>。DBS 区块化供水将现有的供水管网分割成虚拟或实际的多个独立供水子区域,使供水干管与支管分离,使其分别实现输水与配水功能,方便对供水管网的水量、水压、水质进行监控。同时,在各区块的进水管和出水管上安装流量计和其他监测设备,以实现供水系统方便、快捷、有效的管理。但是,现行的大多数分区方案都是基于人工经验,结合水源性质、城市地形与行政区域等对供水管网进行分区。国外学者 Girvan 和 Newman<sup>[2]</sup>在2002年率先提出对网络社区的分割方法即 GN 算法,GN 算法能够准确划分社区范围,但其用于大规模复杂网络时计算量较大,导致算法时间过长;为提高算法运算速度,Clauset 和 Newman 等人<sup>[3]</sup>于2004年提出了基于 GN 算法的快速网络社区算法,用于大型复杂网络中社区结构的发掘。国内学者将供水管网与网络社区结构相结合,将快速网络社区算法用于供水管网的分区,取得了不错的成果。如张正培<sup>[4]</sup>利用网络搜索算法对环流网结构中的社区结构进行挖掘;刁克功<sup>[5]</sup>使用快速网络社区算法对分区计量供水管网(DMA)进行社区结构划分;高金良等<sup>[6]</sup>将 AP 聚类算法及迪杰斯特拉(Dijkstra)算法用于供水管网压力分区(PMA)方式。笔者将快速网络社区算法用于 DBS 区块化供水中作为辅助分区的依据,以取代传统的人工经验划分的方式,对均衡供水水压、改善供水水质有着重要意义。

## 1 城市供水管网中的社区结构

对于城市供水管网来说,其基本敷设原则是依附道路网而建。复杂系统分解定理在城市形态学中已有应用,而供水管网与城市道路网的形态基本一致,因此可将供水管网的社区结构看作一种复杂系统,使用聚类分析法发现管网的构造特征。

城市供水管网由一个或几个水源点出发,通过输水管道与成千上万个用户相连。管网结构复杂、

规模庞大,通常使用水力模型对其运行状态进行模拟,作为管网分区或动态调度的依据。在水力模型中,阀门、管段及泵站等组件抽象为连接;管线交点、端点及流量较大的用水点抽象为节点<sup>[5]</sup>。这样构建的城市供水管网社区结构具有以下特征:

① 结构复杂。供水管网水力模型具有复杂多变的结构特征,节点数量众多,再加上节点之间连接方式不同,环状管网与枝状管网互相交错,造成了管网结构复杂的特点。

② 网络演化。供水管网依附城市道路网而建,而道路网的发展与城市的发展扩张密不可分,管网构造随时间变化,不断有新节点产生和旧节点消失。

③ 连接多样。节点之间的连接可以有不同的权重和方向,对应管网中节点之间不同的连接方式以及水流方向。

④ 动力学特性复杂。供水管网是非线性动态系统,节点流量、压力及管段流量处于动态变化中。

⑤ 节点多样。不同用水类型的节点有着不同的水量模式,某一节点处的水量可以是单独的,也可以是叠加的。

⑥ 多重复杂性融合。供水管网演化过程中其自身模型结构也在不断变化,这一变化又导致了动力学特性的改变。

## 2 分区算法及拓扑结构简化

### 2.1 分区算法

供水管网水力模型以管网拓扑结构为基础,可以用无向图来表示。无向图不区分管网内阀门、泵站、管道等组件的类型和属性,而是将其统一抽象为边。水源点、管线交点、端点及用水点等设备被抽象为节点,这样就能将管网拓扑结构关系转换为无向图。对于拓扑结构中管段流量、管长及管径等属性,考虑到算法的复杂性,需要经过一定处理使其对分区划分结果影响最小化。实际情况中可采用避开社区之间管径、水量较大的连接管以及关闭水量相对小的连接管等方式。经上述处理后的管网拓扑结构不包含节点和管段水量、水流方向、管长和水力特性等参数,仅将节点以及节点间的连接关系作为参数来生成无向图。无向图用  $G = (V, E)$  表示,式中  $V$

代表节点集合,  $E$  代表边的集合。引入模块度  $Q$  作为衡量社区划分层次的指标:

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

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

$$A_{vw} = \begin{cases} 1 & v \text{ 和 } w \text{ 相连接} \\ 0 & v \text{ 和 } w \text{ 不连接} \end{cases} \quad (3)$$

$$k_v = \sum_w A_{vw} \quad (4)$$

$$\delta(c_v, c_w) = \begin{cases} 1 & c_v = c_w \\ 0 & c_v \neq c_w \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $Q$  为模块度;  $c_v, c_w$  表示不同的社区,  $v, w$  代表社区  $c_v, c_w$  内的点;  $m$  为边总数;  $A_{vw}$  为邻接矩阵;  $k_v, k_w$  分别为节点  $v, w$  的度, 是指连接到节点  $v, w$  的边数;  $\frac{k_v k_w}{2m}$  代表在顶点  $v$  和  $w$  之间存在连接的概率。

GN 算法<sup>[2]</sup>将所有初始节点视为一个整体, 然后通过不断移除不符合设定条件的边来缩小模块度  $Q$  直至其为零, 此过程中需要预先设定目标分区数目; 而快速网络社区算法的思路与此相反, 所有的初始节点都被视为独立的社区, 然后通过不断合并符合条件的节点到一个社区内来使模块度  $Q$  最大化, 最终的结果是所有节点都被合并到一个社区内。

为了进一步简化算法, 定义:

$$\delta(c_v, c_w) = \sum_i \delta(c_v, i) \delta(c_w, i) \quad (6)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2m} [\sum_{vw} A_{vw} \delta(c_v, i) \delta(c_w, j)] \quad (7)$$

$$a_i = \frac{1}{2m} [\sum_v k_v \delta(c_v, i)] \quad (8)$$

将上述公式代入式(1)可得:

$$Q = \sum_i (e_{ii} - a_i^2) \quad (9)$$

式中,  $e_{ii}$  表示两端节点都在社区  $i$  内的边占总边数的比例;  $e_{ij}$  表示连接社区  $i$  和社区  $j$  内节点的边占总边数的比例;  $a_i$  表示至少有一端节点在社区  $i$  内的边占总边数的比例。

将社区  $i$  和社区  $j$  合并能够增加模块度  $Q$  的值:

$$\Delta Q_{ij} = 2(e_{ij} - a_i a_j) \quad (10)$$

初始状态时每个节点都作为一个独立的社区, 按下列方法计算  $\Delta Q_{ij}$  和  $a_i$  的值:

$$\Delta Q_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2m} - \frac{k_i k_j}{(2m)^2} & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 相连接} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 不连接} \end{cases} \quad (11)$$

$$a_i = \frac{k_i}{2m} \quad (12)$$

之后以邻接矩阵  $A_{vw}$  作为输入, 计算流程如下:

① 定义数组  $Q$  存储  $\Delta Q$ 。

② 定义数组  $M$  存储矩阵  $\Delta Q_{ij}$  每行的最大值以及相应的  $i, j$  值。

③ 定义数组  $V$  存储  $a_i$ 。

④ 由公式(11)和(12)计算  $\Delta Q_{ij}$  和  $a_i$  的初值, 将矩阵  $\Delta Q_{ij}$  每行的最大值存储于  $M$  中。

⑤ 从矩阵  $M$  中查找  $\Delta Q_{ij}$  的最大值, 并记录相应的  $i, j$  值。

⑥ 从数组  $Q$  中删除第  $i$  行和第  $i$  列。

⑦ 更新数组  $Q$  中第  $j$  行和第  $j$  列, 更新规则如下:

若社区  $k$  与  $i$  和  $j$  都相连, 则  $\Delta Q_{jk} = \Delta Q_{ik} + \Delta Q_{jk}$ ;

若社区  $k$  与  $i$  相连, 则  $\Delta Q_{jk}^* = \Delta Q_{ik} - 2a_j a_k$ ;

若社区  $k$  与  $j$  相连, 则  $\Delta Q_{jk}^* = \Delta Q_{jk} - 2a_i a_k$ 。

⑧ 重复步骤⑤~⑧, 直到只剩一个社区。

## 2.2 管网拓扑结构简化方法

一个完全按照实际情况建立的水力模型是一个由成千上万的离散组件构成的十分复杂的网络结构, 然而这些元素并不是所有分析都不可或缺的。大量的无关要素, 如太多的支线管网、同一管道上过于密集的节点等, 会显著影响算法的执行效率, 造成计算速度和容错能力下降。根据模型的用途对水力模型进行简化, 可以有效降低算法时间复杂度。常用的简化方式有管道移除、分支修剪、平行管道合并、串联管道合并等。简化操作如下:

① 管道移除。移除符合设定条件的管道, 例如小于某个管径的管道, 而不会使管道断开。

② 分支修剪。分支修剪也称为支流坍塌, 是删除死端连接和相关节点的过程。分支修剪是一种有效的简化过程, 通过移除管网中大量小型支线管网, 可以达到简化管网结构, 提高运算效率的效果。移除的支线管网在分区结果中划分到其起始端点所在社区中。

③ 平行管道合并。平行管道合并是将两个具有相同端点的管道合并为一个当量管道, 该简化过程基于水力等效特征。平行管道合并是在管网社区结构简化过程中效果较其他几种简化方式并不显著。

④ 串联管道合并。删除只有两个相邻管道的

节点并把这两条管道合并为一条。

通过上述过程的简化处理,管网的拓扑结构复杂度显著降低。将简化后的节点与管道数据处理成为邻接矩阵的形式。邻接矩阵包含了节点的编号信息以及节点之间的连接关系,它们以上三角矩阵的形式存储。将邻接矩阵作为输入,经过运算可以得到节点社区关系树状图。按照实际分区需要对树状图进行切分,结合人工经验对部分区域进行合并,即可确定管网最终的分区结果。

### 3 工程案例

以C市实际供水管网为例,收集管网运行基础信息并建立水力模型,然后以模型拓扑结构为依据进行社区划分。管网运行现状供水高峰和低峰时刻压力分布见图1(1 m水柱产生的压力约为9.8 kPa,下同)。可以看出,为满足管网末端最低压力,供水管网整体压力较高。供水压力过高会造成能量浪费,而且过高的供水压力是造成管网背景漏失的主要影响因素。同时,整个供水管网还存在压力分布不均的问题,西区压力普遍较低,东区压力则偏高。以快速网络社区算法计算得出的社区结构为指导,对C市管网进行分区。



图1 C市现状供水管网平均压力分布

Fig.1 Average pressure distribution of water supply network in C City

#### 3.1 管网的简化

C市管网规模较小,支线管网多为200 mm以下管径。移除管网中200 mm以下的管道,并作分支修剪,去掉管网中的复杂支线,保留供水主干管。将阀门等组件替换为管道,然后合并相似管道,删除多余节点。简化后管网由简化前10 000多个节点减少到1 000个左右,同时管网主要拓扑结构特征保持不变,不影响算法执行结果。

#### 3.2 使用算法分区

简化后的管网模型仅包含节点与管道,对应复

杂网络社区中节点与边要素。将节点与节点之间的连接关系数据转化为邻接矩阵,导入程序进行计算,计算结果以系统树形式输出。考虑到实际分区时需要调整部分分区边界以及对一些社区进行合并和拆分处理,初步分区数应大于最终分区数,因此将社区结构系统树切分为20个社区,如图2所示。

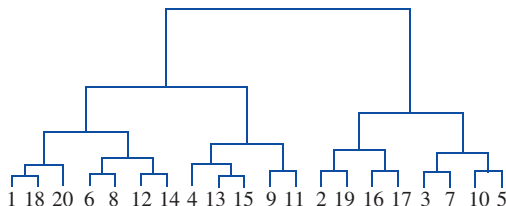


图2 社区结构系统树

Fig.2 Systematic tree of community structure

图2中数字表示社区编号,处于树状图同一分支下的社区之间连接关系更强。每个社区中包含一定数目的节点与拓扑结构中的节点相对应。将各个社区所包含节点分别标记在管网拓扑结构中,结合不同社区间连接管的数目,对拓扑结构进行简化处理,最终得到各个社区之间的连接关系,如图3所示。

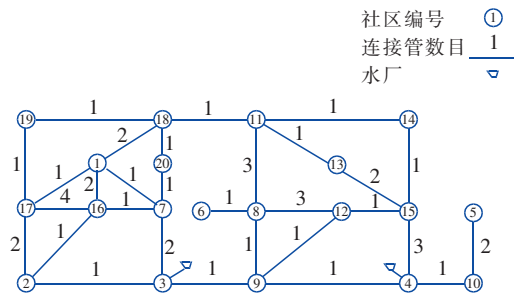


图3 社区结构的简化

Fig.3 Simplification of community structure

图3中,社区编号用序号来表示,序号相连代表社区间存在连接关系,线段上方的数字表示不同社区间连接管段的数目。可以看出,社区16和17、8和11、12以及4和15之间连接管较多,其他分区之间大都由1~2根干管相连。对该地区地理特征调查发现,社区18和11以及社区3和9之间有一条贯穿全管网的河流,管网水力模拟结果表明,两座水厂的供水分界线在靠近河流偏右侧位置,因此以河流为界,首先将整个管网分为东、西两个大区。社区16与17之间有4条供水主干管相连,数量最多,关闭这些管道会造成供水压力不足,所以合并为一个分区以避免上述情况发生。社区18和社区3处在东



西两区分界线附近,分析管网拓扑结构发现,社区 18 有大量节点位于供水主干管上,且与社区 1 和社区 20 相邻,因此将干管部分作为一个独立分区处理,其余节点与社区 1 合并为一个分区。社区 20、7 和 3 规模均较小,同时社区 7 与社区 3 属于关系树状图同一分支下,由管网拓扑结构可知社区 20、7 和 3 彼此相连,将这 3 个分区合并为一个大区较为合理。社区 2 本身面积较大,与合并后的社区 16、17 在干管处分开,将干管部分划入社区 16、17,剩余节点单独作为一个分区处理。社区 6 规模较小且位于分区末端,将其与社区 8 合并。社区 5 同样位于管网末端,其与社区 10 之间连接紧密而社区 5 和 10 的整体与其他管网仅有一条干管相连,应当将其合并作为一个大区。社区 13 和 14 同时位于供水干管一侧,其管网构造跨度大且较稀疏,合并后利于管理。对于社区 8,鉴于其位置结构的特殊性,其与社区 11、12 均有 3 条管道相连,而社区 12 中部仅有 3 条干管且构造简单,故将社区 8 拆散成为两个部分,西侧部分与社区 11、6 以及社区 9 组成一个大区;东侧部分与社区 12 合并为一个区。社区 15、4 彼此之间界限分明,与其他邻近社区也有明显分界,故将其分别作为单独社区处理。通过上述方式将整个供水管网划分为 12 个供水分区,即西一区(社区 18),西二区(社区 19),西三区(社区 1、18),西四区(社区 16、17),西五区(社区 2),西六区(社区 3、7、20),东一区(社区 13、14),东二区(社区 8、12),东三区(社区 6、8、9、11),东四区(社区 15),东五区(社区 4),东六区(社区 5、10)。

考虑到分区边界确定后,水源的供水范围随着供水分区的划分而产生变化,再结合人工经验对边界适当调整,使管网整体供水压力平稳,最终分区结果见图 4。

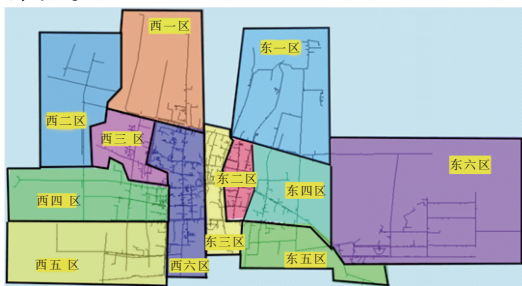


图 4 C 市最终分区结果

Fig. 4 Final partition results of C City

按照分区结果,在各分区边界处新安装部分阀门和流量计,同时利用已装流量计和现有阀门,给出 C 市 DBS 区块化供水阀门关闭建议及新装流量计方案,见图 5。

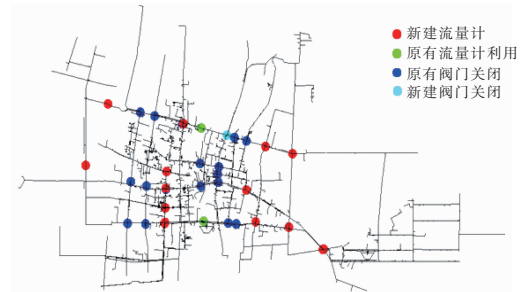


图 5 C 市区块化阀门关闭及新建流量计情况

Fig. 5 Closure of block valves and new flowmeters in C City

如图 5 所示,利用 13 个新建流量计、1 个新建阀门以及现有 15 个阀门和 2 个流量计实现区块化划分。在水力模型中依照方案关闭干管处相应阀门,并进行水力模拟分析区块化效果。

### 3.3 分区结果

按照分区结果,将各供水区域之间连接管段关闭,利用水力模型进行模拟计算。分区后 C 市管网平均供水压力见图 6。



图 6 分区后供水管网平均压力分布

Fig. 6 Distribution of average pressure in water supply network after partition

不难发现,分区后管网压力分布有了明显变化。与图 1 相比,分区后管网压力更均衡。西区低压部分管网压力由以前小于 20 m 水头上升到 22 m 左右,满足了大多数用户的用水需求。东区压力较高的部分管网在分区后自由水头也呈一定程度下降。各个供水阶区区块化前后供水低峰、高峰及正常时刻压力对比结果如表 1 所示。

相比区块化之前,区块化后各分区低峰时刻压力呈现下降趋势,这对降低管网压力、减少漏损以及预防爆管事故的发生有重要意义。高峰时刻除西区

部分区域压力有所下降外,其他区域压力均有明显提升,减轻了高峰时刻供水压力,可以适当降低东区水厂出厂压力以达到节能的效果。正常时刻压力以18:00作为代表,分区后的压力满足C市供水要求,不影响管网正常运行。

表1 各阶区区块化前后压力对比

Tab.1 Comparison of pressure of each order area before and after blocking m

项 目		低峰时刻 (03:00)	高峰时刻 (09:00)	正常时刻 (18:00)
西一区	区块化前	19.40	23.85	22.01
	区块化后	19.38	22.50	21.54
西二区	区块化前	18.63	21.69	20.28
	区块化后	18.63	20.19	19.75
西三区	区块化前	19.51	23.81	22.07
	区块化后	19.57	22.63	21.75
西四区	区块化前	19.28	23.39	21.78
	区块化后	19.28	22.01	21.31
西五区	区块化前	19.23	23.40	21.77
	区块化后	19.23	22.10	21.31
西六区	区块化前	19.44	24.22	22.44
	区块化后	19.44	22.89	21.98
东一区	区块化前	21.11	26.76	24.60
	区块化后	20.41	24.89	24.26
东二区	区块化前	21.17	26.86	24.83
	区块化后	20.94	28.81	25.26
东三区	区块化前	19.89	25.64	23.67
	区块化后	19.99	28.12	23.75
东四区	区块化前	21.24	27.84	25.63
	区块化后	20.81	29.03	25.41
东五区	区块化前	21.13	28.17	25.90
	区块化后	20.69	29.04	25.44
东六区	区块化前	20.44	26.49	21.15
	区块化后	20.19	27.28	21.09

评价分区效果的另一项参数是管网水质。在供水管网中,水质的变化主要反映在水龄的变化上。水龄是指管网中水从水源流到该节点的平均时间长短。水在管网中停留时间越长,水在管道中发生的物理、化学、微生物等反应越复杂,水质恶化越严重<sup>[7]</sup>。对供水系统分区后,出厂水3d后各管道水力停留时间进行分析,结果见表2。可以看出,区块化后,对于大多数分区来说,水龄>58h的节点比例下降。其中,西一区水龄改善最为明显,0~45h水龄的节点增量达5.93%。西二区、西六区、东五区、东六区节点次之,水龄都有较为显著的降低。对于东三区、东四区的节点,虽然在水龄>58h的部

分变化不明显,但是0~45h部分的节点比例也有升高。可以看出,分区后管网整体水龄均有改善。

表2 区块化前后各阶区管网水龄分布

Tab.2 Comparison of water age of each order area before and after blocking %

项 目		0≤T≤45 h	45 h<T≤58 h	T>58 h
西一区	区块化前	86.91	8.54	4.55
	区块化后	92.84	2.89	4.27
西二区	区块化前	51.88	21.80	26.32
	区块化后	52.26	22.18	25.56
西三区	区块化前	96.23	1.94	1.83
	区块化后	95.02	3.56	1.42
西四区	区块化前	97.21	1.17	1.62
	区块化后	97.39	1.26	1.35
西五区	区块化前	95.48	0.48	4.04
	区块化后	94.18	2.26	3.55
西六区	区块化前	97.88	0.85	1.26
	区块化后	98.29	0.56	1.15
东一区	区块化前	88.85	3.08	8.08
	区块化后	88.85	3.21	7.95
东二区	区块化前	91.66	5.42	2.92
	区块化后	90.98	6.51	2.51
东三区	区块化前	97.99	1.44	0.58
	区块化后	98.10	1.27	0.63
东四区	区块化前	95.97	2.64	1.39
	区块化后	96.11	2.50	1.39
东五区	区块化前	94.60	2.61	2.79
	区块化后	95.16	1.86	2.98
东六区	区块化前	90.13	2.79	7.08
	区块化后	90.56	2.79	6.65

### 3.4 管网分区的经济分析

城市供水管网漏损是供水行业普遍存在的严重问题。管网漏失率的高低关系到供水企业的产销差,而提高供水管网的数据处理能力和改善供水管网的结构布局能够有效降低漏损现象。对供水管网而言,压力控制是减少漏损最有效的方法。研究表明,管网压力与漏失量呈指数关系,且指数在[0.5, 1.5]区间<sup>[8]</sup>,其近似关系式为 $Q = 0.01824 \times H^{1.2434}$ ,其中 $Q$ 为漏失量( $\text{m}^3/\text{s}$ ), $H$ 为管网平均压力(MPa)。以各分区平均时压力为代表,计算可得区块化后管网理论漏失量减小44.48  $\text{m}^3/\text{d}$ 。经调查知该市现状供水总量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,这样每天能节省约0.02%的供水量。按制水成本为3.2元/ $\text{m}^3$ 计算,每年能节约5万元制水费用。排除理想化因素,区块化带来的经济效益仍十分可观。

此外,管网水龄的降低所带来的经济效益虽然不能直接体现在制水成本上,但会对居民用水安全和制造业生产成本产生间接的影响,提高了人们生活水平,节约了能源。

#### 4 结论

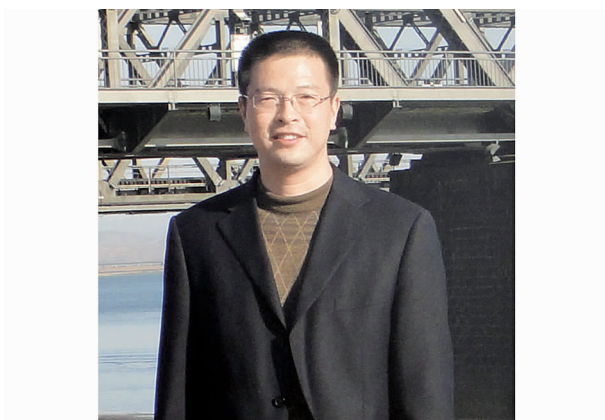
① 提出了一种基于快速网络社区算法的供水管网分区方法。与传统的经验分区方式不同,该方法将管网抽象为复杂网络并用聚类分析法划分其社区结构,以划分结果作为分区的依据,取得了良好的效果。

② 分区过程中考虑到 C 市的地理条件,如地形标高、河流、铁路等因素对管网分区的影响,对基于社区结构的分区模式进行优化,如合并某些分区,以及对部分分区进行拆分处理,这些调整使得分区更为科学有效。

③ 对分区后的管网利用水力模型进行水压与水质模拟计算,并与分区前进行比较,发现分区后管网压力更为均衡,管网漏失量下降,节约了制水成本。而分区后的节点水龄相比分区前也有了明显改善,水在管道中的停留时间缩短,供水安全性提高。

#### 参考文献:

- [1] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.  
Zhao Hongbin. Theory and Analysis of Water Supply Pipe Network System [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2003 (in Chinese).
- [2] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [3] Clauset A, Newman M E J, Moore C. Finding community structure in very large networks[J]. Physical Review E, 2004. DOI:10.1103/PhysRevE.70.066111.
- [4] 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,2014.  
Zhang Zhengpei. Modeling, Partitioning and Layering of Urban Water Supply Network Based on Complex Network Theory [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014 (in Chinese).
- [5] 刁克功. 分区管理模式给水管网的水力分析与模拟技术研究[D]. 北京:北京工业大学,2011.  
Diao Kegong. Analyses and Modeling of Zonal Management Oriented Water Distribution System [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011 (in Chinese).
- [6] 高金良,姚芳,叶健. 结合图论的供水管网 PMA 分区方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(8):67-72.  
Gao Jinliang, Yao Fang, Ye Jian. Optimization of water supply network PMA partition by graph theory [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(8): 67-72 (in Chinese).
- [7] 赵明. 输配水系统水力与水质安全研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.  
Zhao Ming. Study on Hydraulic Safety and Water Quality Safety for Transmission and Distribution System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese).
- [8] 马悦,高金良. 管网供水压力与漏失量关系研究[J]. 供水技术,2013,7(5):15-18.  
Ma Yue, Gao Jinliang. Study on the relations of water supply pressure and leakage [J]. Water Technology, 2013, 7(5): 15-18 (in Chinese).



作者简介:王彤(1965-),男,陕西汉中,博士,副教授,研究方向为给排水系统优化。  
E-mail: wangt@chd.edu.cn  
收稿日期:2017-08-11