



DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.019

# 基于复杂网络理论的城市供排水系统规划优化

刘广奇<sup>1,2</sup>, 赵志伟<sup>1</sup>, 白桦<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037)

**摘要:** 基于复杂网络理论,研究城市水系统中关于设施布局和节点重要性问题,簇系数可以表征城市水系统中重要设施的空间布局情况,该值越小表示空间布局越合理。城市水系统中的节点度值表征了该节点的重要程度,通过对高度值节点的梳理,可以形成城市管网系统重要节点的分布,从而为主干管网系统的布置提供依据。将该方法应用于某典型案例城市,从多个规划方案中推荐运行效率更优的方案,实现了城市水系统规划的优化。

**关键词:** 复杂网络; 城市水系统; 簇系数; 节点度

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0113-06

## Optimization of Urban Water System Planning Based on Complex Network Theory

LIU Guang-qi<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhi-wei<sup>1</sup>, BAI Hua<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Based on complex network theory, the problems of facility layout and node importance in urban water system were explored. Cluster coefficient can represent the spatial layout of important facilities in urban water system, and the smaller the value is, the more reasonable the spatial layout is. Degree of the node in urban water system represents the importance of the node. By combing the high degree nodes, distribution of the important nodes in urban pipe network system can be formed, which provides a reference for the layout of the main pipe network system. Through the application of this method in the case cities, the scheme with better operational efficiency among multiple planning schemes was recommended, and thus the optimization of urban water system planning was realized.

**Key words:** complex network; urban water system; cluster coefficient; degree of node

城市作为以非农业产业和人口聚集形成的高密度建设区,需要强有力的市政设施作为其发展的重要基础,而这些设施往往以复杂网络的形式存在,例如电力系统、交通系统、水系统等等。首先将网络作为一个整体并利用严格的数学方法进行研究的匈

牙利数学家 Erdos 和 Renyi,他们将大型网络看成一个随机图,并建立了一套随机图理论。20 世纪 90 年代末,分别发表在 Nature 和 Science 上的 2 篇文章打破了随机图理论长达 40 年的统治地位,在揭示网络小世界性质的同时,引发了研究者运用复杂网络

理论针对实际网络的大规模实证研究<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着数据获取及大型计算技术的不断进步,复杂网络分析成为研究城市区域可持续性的一种热门工具,其在高速公路、城市道路、航空系统、铁路地铁、电力系统等的的应用最多<sup>[3-9]</sup>。

复杂网络理论来源于图论,并结合了系统科学、社会学等理论,主要研究复杂系统中个体之间相互作用所产生的系统形体性质和行为。相比于传统系统分析方法,复杂网络分析方法具有两大优势:①分析对象不是网络中的个体行为者,而是个体之间的关系,强调系统性和全局观;②复杂网络分析可以讨论子系统或个体在整个系统中的地位和作用,识别关键节点或核心短板,为系统调控提供决策支持。目前国内外未发现针对复杂网络理论在城市水系统中的应用研究,旨在为城市供排水系统的空间布局 and 规划优化提供量化的分析方法,从而进一步提高规划的科学性和可实施性。

## 1 评价方法

### 1.1 网络概化

根据城市水系统特点,网络概化可以分为3个层次,分别是模式层、拓扑层和网络层。其中,模式层网络用一个节点表征水系统中的所有相同元素,特点是简明扼要;拓扑层网络按照系统元素的重要程度组织表达方式,特点是层次分明;网络层则集成了系统元素的类别、空间、规模等属性,特点是贴近实际。3个层次的网络概化情况如图1所示。

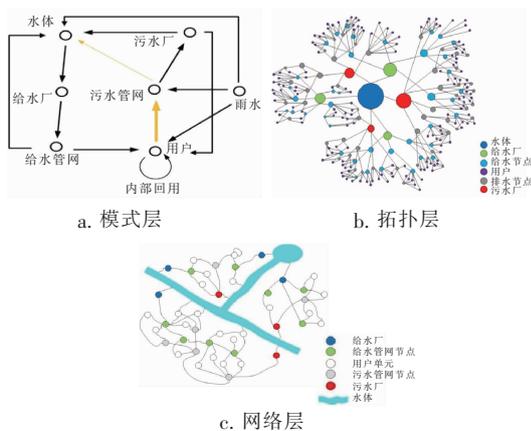


图1 模式层、拓扑层和网络层的网络概化示意

Fig.1 Schematic diagram of network sketch of pattern layer, topological layer and network layer

本研究中,城市供排水系统的管网布设复杂,设

施和重要节点之间存在相互影响,为更好地体现供排水系统的相互关系,采用网络层概化方式,构建城市水系统复杂网络模型。基于规划区域的城市路网规划图,结合给水厂、污水厂、泵站等主要涉水设施的空间位置,用网络节点表示水系统要素,以节点间连接线表示各要素之间的关系,网络化表达其布局方案。图2为某污水系统的规划方案及其网络概化情况,供水、再生水系统的网络概化方式相似。

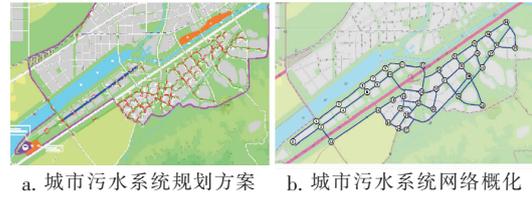


图2 某污水系统的规划方案及其网络概化示意

Fig.2 Planning scheme and network sketch of urban wastewater system

### 1.2 评价机理

复杂网络理论用不同的指标反映网络不同方面的性能和特征。其中,“簇系数”和“节点度”应用最广泛,前者可较好地表征布局方案的“集中/分散”程度,后者可用于识别网络中“关键节点和区域”。基于此,研究采用“簇系数”评价城市水系统的布局结构,采用“节点度”识别供排水管网的重点区域。

#### 1.2.1 簇系数

簇系数可反映网络的局部集聚水平和集团特性。以城市污水系统规划为例,对于一个有  $n$  个污水处理厂的规划方案,每一个污水处理厂的簇系数(表示为  $C_i$ )都可以用式(1)进行计算,一个规划方案的集中-分散程度可以用式(2)进行表达。

$$C_i = \frac{\sum(\text{与之连接的节点水量})}{\sum(\text{规划区域内的节点总水量})} = \frac{\sum_{m=1}^K F_m}{\sum_{m=1}^N F_m} \quad (1)$$

$$C_{\text{char}} = \max(C_i) \quad (2)$$

式中:  $C_i$  为污水处理厂的簇系数;  $C_{\text{char}}$  为整个规划方案的集中-分散程度;  $F_m$  为每个网络节点的水量;  $K$  和  $N$  分别为与计算污水处理厂相连接的节点数目和与整个系统的节点数目;  $i$  为规划污水处理厂的编号,为  $[1, n]$  之间的正整数。供水系统和再生水系统也可以开展类似的计算。

不难看出,  $C_{\text{char}}$  为  $[0, 1]$  之间的正整数,当其数值越接近于 1 时,表明系统越集中;反之,当其数值

越接近于0时,表明系统越分散。例如,对于一个30万人口的城市,规划方案A、B和C的簇系数分别为1、0.43和0.63(见图3)。C方案看起来有4个污水厂,主观推断其簇系数最低,而实际上B方案的簇系数要低于C方案,系统结构更平均,从网络的角度来看更加均衡、稳定。

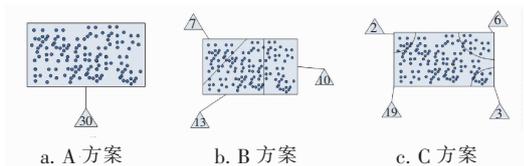


图3 不同污水系统的布局方案示意

Fig. 3 Layout plan of different wastewater systems

从系统理论角度考虑,当一个市政设施“功能失效”时,如果整个系统受到的影响越小(影响可以是面积大小、元素数量、通量规模等),那么说明规划方案更加稳定和均衡,即安全系数更高。从这个角度出发, $C_{char}$ 越小,布局方案越好。

### 1.2.2 节点度

对于由节点(管网检查井)和边(连接通道)组成的复杂网络系统,每一个节点都有一个“度”以表征其重要程度。例如,在道路交通系统中,一个十字路口的“度”代表其连接道路上的车流量大小,可以用车道数量或道路宽度进行表征;在航空交通系统中,一个城市(或航站楼)的“度”代表其连接航路上的繁忙程度,可以用起降航班数或运营旅客数来计算。类似的,在供排水管网系统中,一个节点的“度”代表了其周边管网的疏密程度及该区域的重要程度,可用其连接管道的管径值进行计算。

根据以上分析,在水系统构成的复杂网络中,一个节点的度值按照式(3)~(5)计算。

$$D_{k,j} = \sum_{i=1}^N d_{k,i,j} \quad (3)$$

$$D_{k,j,norm} = \frac{\max(D_{k,j}) - D_{k,j}}{\max(D_{k,j}) - \min(D_{k,j})} \quad (4)$$

$$D_k = \sum_{j=1}^M (r_j \times D_{k,j,norm}) \quad (5)$$

式中: $D$ 为节点的度值; $k$ 为节点的编号; $N$ 为节点在某一个子系统中连接管段的数量; $M$ 为纳入计算的子系统数量; $r$ 为各个子系统加权计算时的权重值; $d$ 为管径值。最终, $D_k$ 的计算值为 $[0,1]$ 范围内的小数。

其中,式(3)计算节点的一个子系统(如污水系

统)的度值;式(4)对计算结果进行归一化,以便于比较分析;式(5)对节点的子系统度值进行加权计算,得出其总度值。

### 1.3 评价内容

子系统:包括供水系统、污水系统、再生水系统。

指标计算:根据水系统特点,各个子系统的簇系数根据设施规模进行计算;由于不同子系统存在满流和非满流设计的区别,为统一起见,采用管径值计算各个节点的度值。

## 2 规划方案

为验证上述方法的可行性与有效性,基于《密云新城市政基础设施专项规划(2006—2020)》进行案例应用和结果分析。根据规划方案中供水量、污水排放量、再生水需求量的预测结果和空间分布,提出4种具有代表性的水系统规划方案(见表1)。

表1 密云新城水系统4种规划方案的主要内容

Tab. 1 Main contents of four planning schemes for water system of Miyun New City

项目	规划内容	规划方案			
		1	2	3	4
供水子系统	集中供水 规划扩建现状密云自来水厂( $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),规划新建密云地表水厂( $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),规划停用靳各寨水厂( $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )	√	√		
	分散供水 保留现状密云自来水厂( $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),异地扩建地下水厂( $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),规划新建密云地表水厂( $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),保留靳各寨水厂( $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )			√	√
污水子系统	集中处理 规划新建污水处理厂( $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),规划停用现状污水处理厂( $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )和工业三期污水处理厂( $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )	√		√	
	分散处理 规划新建污水处理厂( $5.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),保留现状污水处理厂( $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),停用工业三期污水处理厂( $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )		√		√
再生水子系统	河道生态补水( $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )	√	√	√	√
	市政杂用( $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )		√	√	√
	冬季采暖锅炉用水( $0.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )			√	√
	居民家庭冲厕用水( $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )				√

注:再生水子系统使用的数据为年平均值。

规划方案1是“集中供排水+少量再生利用”，规划方案2是“集中供水+污水分散处理+部分再生利用”，规划方案3是“分散供水+污水集中处理+部分再生利用”，规划方案4是“分散供水+污水分散处理+全部再生利用”。

### 3 评价结果与分析

#### 3.1 簇系数

根据复杂网络的构建方法,案例区域共有177个节点,其空间分布如图4所示。4种规划方案供水、污水和再生水系统的簇系数计算结果见表2。

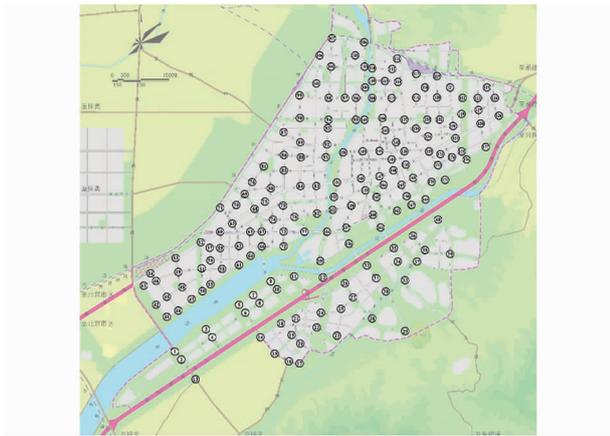


图4 规划区复杂网络节点的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of complex network nodes in planning area

表2 4种规划方案簇系数的计算结果

Tab.2 Calculation results of cluster coefficient of four planning schemes

项目	供水系统	污水系统	再生水系统	加权求和
规划方案1	0.67	1.00	1.00	0.868
规划方案2	0.67	0.55	0.67	0.622
规划方案3	0.33	1.00	1.00	0.732
规划方案4	0.33	0.55	0.57	0.466

从水系统整体评价的角度出发,按照城市供水、排水和再生水系统的重要性,粗略采用0.4、0.4和0.2的权重加权3个子系统的计算结果,则规划方案1的求和最大,为0.868;规划方案4的求和最小,为0.466,仅为方案1的54%。

从复杂网络角度分析,规划方案4中供水、污水和再生水系统的布局相对都更分散,意味着其供水管网水龄更短、水压更均衡,污水管网大管径管道比例更小、造价更低,再生水回用距离更近、管道长度更短。故其簇系数在一定程度上可以反映出规划方案4更合理。

#### 3.2 节点度值

对于节点的度值,与簇系数类似,如果供水、污水和再生水子系统按照一定的权重进行加和计算,177个节点的度值计算结果如图5所示。表3为规划方案4中节点编号1~40(城市的一个片区)的度值归一化计算结果。

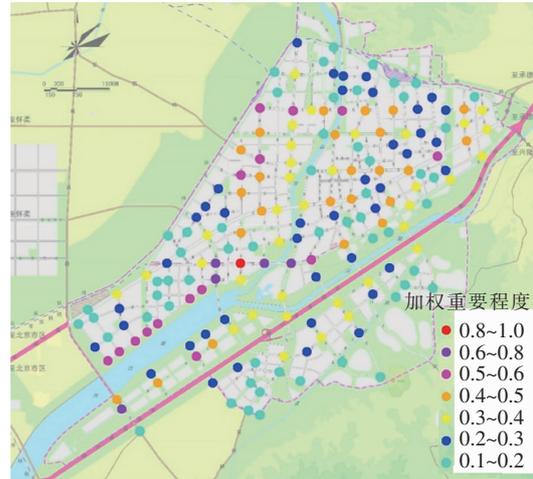


图5 案例区域复杂网络节点度值的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of degree values of complex network nodes in case area

表3 规划方案4中1~40号节点度值的归一化计算结果

Tab.3 Normalization calculation results of degree value of nodes 1-40 in planning scheme 4

节点编号	供水系统	污水系统	再生水系统
1	0.00	0.51	0.80
2	0.55	1.00	0.00
3	0.00	0.00	0.80
4	0.55	0.44	0.00
5	0.00	0.00	1.00
6	0.55	0.40	0.40
7	0.00	0.00	0.80
8	0.55	0.40	0.00
9	0.00	0.00	0.80
10	0.55	0.30	0.00
11	0.27	0.11	0.80
12	0.27	0.00	0.80
13	0.00	0.25	0.00
14	0.00	0.30	0.43
15	0.00	0.17	0.20
16	0.00	0.17	0.20
17	0.00	0.05	0.20
18	0.00	0.27	0.30
19	0.00	0.14	0.15

续表3 (Continued)

节点编号	供水系统	污水系统	再生水系统
20	0.00	0.13	0.20
21	0.00	0.32	0.00
22	0.00	0.10	0.10
23	0.00	0.14	0.15
24	0.45	0.27	0.20
25	0.18	0.29	0.10
26	0.41	0.19	0.00
27	0.36	0.25	0.18
28	0.14	0.14	0.00
29	0.16	0.05	0.00
30	0.23	0.05	0.25
31	0.43	0.24	0.28
32	0.36	0.17	0.48
33	0.07	0.29	0.00
34	0.30	0.24	0.08
35	0.50	0.14	0.00
36	0.27	0.14	0.05
37	0.00	0.21	0.00
38	0.00	0.16	0.00
39	0.16	0.05	0.05
40	0.59	0.05	0.10

图6为案例区域关键节点的网络分布。可以看出,由整个网络中关键节点(度值最高的40个节点,占比为23%)形成的重点区域表现出“一核、一环、一带”的空间特征。

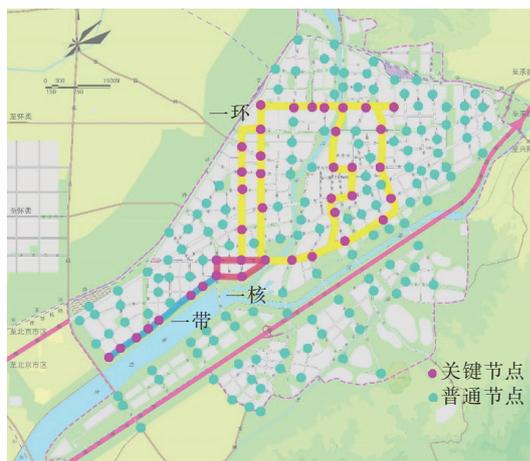


图6 案例区域关键节点网络的分布

Fig.6 Network distribution of key nodes in case area

“一核”:指三河交叉处(潮河、白河和潮白河)北侧,由水源路、盛南路、云腾路围成的滨河区域,供水、污水和再生水系统管道的管径分别为400~600、1200~1600和400~600 mm,属于各子系统

大型管道交叠汇聚的地区。

“一环”:指规划区域北侧、白河两岸,由果园西路、星云路、新北路、车站路、新中街等节点围成的环状区域。

“一带”:指规划区域西北角、潮白河北侧沿河区域,其是污水干管、再生水配水管主要铺设的地区。

### 3.3 方案优化

基于以上分析,对规划方案4提出以下几方面的优化建议。

**污水子系统:**在“一带”区域(污水管道的管径为1600 mm)增设污水调蓄和净化设施,提高重点管线的系统冗余度;在“一环”区域中,结合排水分区和管线走向,可以选择园林东路和园林路交叉口(污水管道的管径为1600 mm)、滨河路和新南路交叉口(污水管道的管径为1600 mm)、水源路和南山路交叉口(污水管道的管径为1600 mm)等位置设置一处或多处调蓄设施,提高规划区北侧区域污水系统的稳定性。

**再生水子系统:**除潮白河东岸的三期工业区用水外,应优先围绕“一环”区域增加居民再生水用户,在新北路和潮河交叉口处进行生态补水(再生水管道的管径为250~300 mm),在水源路沿线结合人工湿地建设开展白河的多点生态补水(再生水管道的管径为400~600 mm)。

**供水子系统:**现状保留的给水配水管多处于“一环”及其内部区域,应根据管网建设年限、管材等因素开展管网性能普查及老旧管道改造,以保证系统的稳定性。规划新建的给水配水管多位于重点区域以外,在保证环状管网系统逐步完善的情况下,应注意潮河以东区域的水龄控制。

**管廊子系统:**可沿“一核、一环、一带”建设综合管廊,以便于关键节点的日常维护和系统管理。

## 4 结论

① 复杂网络的分析方法不仅能够应用于交通、电力等领域,也可以应用于以城市供排水系统为代表的地下管网系统,簇系数可以很好地表征供排水系统中重要设施的空间分布特征,节点度值可以表达网络系统中节点的重要性。

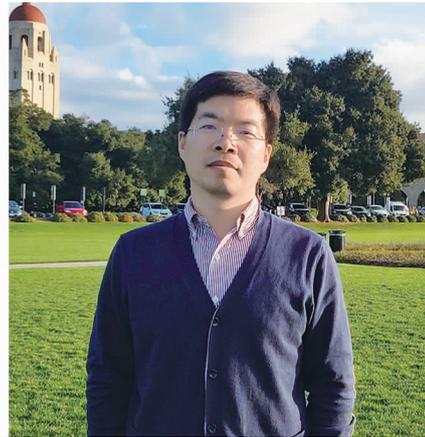
② 在城市供排水系统的评价中,簇系数越小表征设施空间布局越合理,但是无限分散的水厂布置会带来投资成本和运维难度的增加,因此本方法适用于对既定规划方案的评价。节点度值越高证明

该节点对系统的重要性越高,在安全保障和设施冗余方面要留有充足空间,高度值的节点可以作为城市管网系统中主干管道的布置路由,或对规划中假定的主干管网系统布置进行校核反馈。

③ 本研究建立的基于复杂网络理论的城市水系统评价方法具有一定的科学性和实用性,通过在典型案例城市的应用,可以从多个规划方案中推荐空间布局更合理的方案,从而为城市水系统规划提供决策支持。

#### 参考文献:

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998. DOI: 10. 1038/30918.
- [2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999. DOI: 10. 1126/science. 286. 5439. 509.
- [3] Urich C, Sitzenfrei R, Möderl M, *et al.* An agent-based approach for generating virtual sewer systems [J]. Water Sci Technol, 2010, 62(5): 1090 - 1097.
- [4] Zhang J H, Xu X M, Hong L, *et al.* Networked analysis of the Shanghai subway network, in China [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2011, 390(23/24): 4562 - 4570.
- [5] Yazdani A, Jeffrey P. Complex network analysis of water distribution systems [J]. Chaos, 2011, 21(1): 016111.
- [6] Yazdani A, Otoo R A, Jeffrey P. Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(12): 1574 - 1582.
- [7] Floyd J, Iaquinto B L, Ison R, *et al.* Managing complexity in Australian urban water governance: Transitioning Sydney to a water sensitive city [J]. Futures, 2014, 61: 1 - 12.
- [8] Haghghi A. Loop-by-loop cutting algorithm to generate layouts for urban drainage systems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2013. DOI: 10. 1061/(ASCE)WR. 1943-5452. 0000294.
- [9] Mödel M, Butler D, Rauch W. A stochastic approach for automatic generation of urban drainage systems [J]. Water Sci Technol, 2009, 59(6): 1137 - 1143.



作者简介:刘广奇(1980 - ),男,山东寿光人,博士研究生,教授级高级工程师,现任中国城市规划设计研究院水务院副院长,主要从事城镇水务基础设施规划研究。

E-mail: liuggq@nwqc.gov.cn

收稿日期:2020-05-12

节水优先、空间均衡、  
系统治理、两手发力