

基于虚拟城市模型的城市形态 对污水系统影响研究

梁 珊¹, 邓 羽², 贾 宁¹, 刘 毅^{1*}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要:城市形态与污水设施的运行之间关系密切,探讨城市形态对城市内污水设施的影响对解决现有设施存在的水力失效及未来情景应对能力欠佳等问题具有重要价值。因此,论文测算了现阶段中国地级城市的城市形态,设置了城市形态情景和排水情景,使用Kruscal算法进行管网定线、SWMM软件模拟系统性能,构建自上而下的虚拟城市空间与污水系统耦合模型,探索了不同形态城市的污水系统生命周期成本、结构和性能的一般性规律,构建了系统经济性、有效性和适应性指标体系以综合评估城市污水系统。研究发现,在城市人口36.24万、面积35 km²的规模下,污水系统的生命周期成本约为6亿~7亿元。方形、长条形和星形的流速失效比分别为0.55、0.67、0.55,充满度失效比分别为0.35、0.42、0.36。在排水情景改变下,污水量变小时,系统流速失效情况均更为严重,而充满度失效情况均有所改善;当污水量变大时,流速失效情况均有所改善,而充满度失效情况更为严重。分析系统结构特性,发现越分散的污水系统连通性越好,长条形城市的污水系统相较于方形和星形城市更为集中。对指标作相关性分析,发现越分散的污水系统经济性和有效性更好,但适应性更差。从系统经济性和有效性角度出发,方形和星形城市更有利。从污水系统适应性角度出发,长条形城市优于方形和星形城市,结合2010—2015年的城市形态分析,长条→长条(变化前后城市形态均为长条形,以此类推)、星形→长条、方形→长条的86个城市的城市发展方向不够合理,各城市在未来扩建或新建规划中应在因地制宜基础上考虑内部污水设施,选择合理的城市形态。

关 键 词:虚拟城市;污水系统;城市形态;排水情景;综合评估

中国拥有世界最大规模的人口和第二大规模的污水系统设施(Batt et al, 2007),后者也是城市基础设施的重要组成和确保城市水系统安全的重要支撑。污水设施短期内难以重构的特性是污水设施需求优化的一大挑战,一方面,污水系统面临因城镇化(Astaraie-Imani et al, 2012; Deng et al, 2013)、气候变暖(Pingale et al, 2014; Foti et al, 2014)以及节水行为(Beal et al, 2011; Makki et al, 2015)等带来的污水量改变的问题,现有污水系统能否适应未来排

水情景的改变,适应性能到底如何还需探明;另一方面,目前城市污水设施的运行还存在严重问题,由于污水排放在一天当中具有峰值,高峰期污水量过大易造成管网充满度过大损害管网寿命,低峰时段又因为管段内污水流速过低容易产生淤塞(白桦, 2016)等问题。能否从城市规划层面解决上述问题?城市形态与城市基础设施之间存在强相关性,据作者调查,中国2010年地级城市空间形态紧凑度与城市管网密度、污水处理率、设施规模密度

收稿日期:2018-05-04;修订日期:2019-01-10。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(71473148);“十二五”水体污染控制与治理重大科技专项城市主题集成课题(2014ZX07323001)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 71473148; "12th Five-Year" Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment: "Integration of Urban Water Pollution Control And Water Treatment Technology", No. 2014ZX07323001.]

第一作者简介:梁珊(1993—),女,陕西宝鸡人,硕士生,城市空间形态与污水系统关系研究。E-mail: caulsjy@163.com

*通信作者简介:刘毅(1975—),男,辽宁人,教授,主要从事复杂性科学与环境经济复合系统模拟应用研究。

E-mail: yi.liu@tsinghua.edu.cn

引用格式:梁珊,邓羽,贾宁,等. 2019. 基于虚拟城市模型的城市形态对污水系统影响研究[J]. 地理科学进展, 38(3): 441-451. [Liang S, Deng Y, Jia N, et al. 2019. Impact of urban morphology on sewage systems based on a virtual city modeling approach. Progress in Geography, 38(3): 441-451.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.03.013

和污水处理厂负荷率等的配置水平均存在显著相关性,城市越紧凑,污水设施系统规模越小。不同的城市人口时空分布会带来不同的城市污水时空分布,可能使污水系统在峰值期出现的水力问题得到改善。因此,在城市空间结构与形态层面研究污水系统设施的运行,具有一定现实意义。

城市形态直接影响城市内部各组成部分的总体布局,关系城市生产、生活质量、城市改造和城市合理发展方向等(崔功豪等, 1990; Kotharkar et al, 2012; 李旋旗等, 2012; 赵会兵等, 2016)。国外对于城市形态与交通的环境影响之间关系的研究较多(Giuliano et al, 2003; Borrego et al, 2006; Hong et al, 2014; Kashem et al, 2014),主要是模拟不同土地利用模式和道路结构下交通出行的碳排放和空气污染状况。其次是与公共健康暴露之间关系的研究(Schweitzer et al, 2010; Schindler et al, 2014; Mansfield et al, 2015),主要通过对面板数据进行多元回归分析和虚拟城市模拟等方法来探究不同城市形态对公共健康的影响。也有与住宅能耗间关系的研究。如Ewing等(2008)考虑电力传输和分配损失等因素分析城市形态对住宅能耗的影响,认为紧凑型可节省能耗。国内关于城市形态和城市环境要素间关系的研究主要集中在应对气候变化和空气污染(杨磊等, 2011; 崔胜辉等, 2015; 范晨璟等, 2017)等领域。方法上大多使用面板数据、以表征城市形态的指标与环境要素间的相关性分析为主(秦波等, 2013; 余倩楠等, 2015; 陈珍启等, 2016),也出现了少量通过构建模型模拟环境响应的研究(龙瀛等, 2011)。卢思佳等(2010)研究了表征城市外轮廓的指标与城市投入要素之间定量化的相关性,发现城市越紧凑,人口密度越大,交通网络越均衡,人均城市要素占用量越少。郭腾云等(2009)也发现,随着城市紧凑度的提高,城市资源要素的配置和利用水平及城市效率均有一定提高。潘竟虎等(2015)认为,H形和星形形态对消除大气污染的效果最好。但尚缺乏使用建模方法从城市形态本身出发研究其对城市基础设施的规模、运行效率等方面影响的理论性研究。国外有一些关于城市空间形态与城市给水设施间关系的理论探讨:Filion(2008)使用虚拟城市和LCA(生命周期评价)的方法,研究几种典型城市形态下给水管网空间分布与能耗的关系,认为放射状多中心城市形态人均给水能耗最低;Farmani等(2014)结合虚拟城市 and 情景分析的方法,基于小城镇给水管网扩建构建不同城市形态,探究不同人口

增长情景下的水量、水质、成本及设施效率,认为均匀扩展最具成本效益;Wong等(2015)基于北美真实街道形状概化而成的给水管网布局形态,以虚拟城市 and 自底向上建模的方法研究其空间分布与能耗的关系。因此使用虚拟城市探究城市形态和城市污水系统的结构以及运行性能间关系具有一定可行性。

基于以上研究背景,本文通过研究现阶段中国地级城市的城市形态特征,设计具有代表性城市形态特征的虚拟城市,以城市地块为基本单元,构建自上而下的城市空间与污水系统耦合模型,通过大规模采样的方法去探索不同形态城市的污水设施成本、结构和性能的一般性规律,并从污水系统的经济性、有效性以及适应性角度出发去评估城市污水系统,进而再以城市污水系统的综合评估结果反馈指导未来城市规划以及城市形态管理,从而辅助提升城市污水系统的未来排水情景应对能力并优化其利用现状。

1 研究方法

1.1 研究对象

城市形态、城市人口数量和城市面积具有相互对应且相互制约的关系,因此虚拟城市的人口数量和城市面积参数的选择非常重要,本文将真实城市的人口、面积和设施规模之间的对应关系特征应用到案例城市的参数选择上来,通过研究2015年中国各分类地级城市的城区人口规模、建成区面积、人口密度、污水处理厂座数和处理能力,得到一般性小城市的人口密度和污水处理设施一般规模,小城市平均建成区面积 53 km^2 (含工业用地),人口33万。最终确定虚拟城市人口约为36.24万,城市面积约为 35 km^2 。对城市打格子形成排水DU(排水地块),每个格子代表一个排水DU,规模为 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$,人口聚集在DU上,每个DU周围有4条道路。DU单元的基础属性包括编号、高程、坐标、排污总量以及日排污过程线。其中为避免高程差异影响,增加方案间可比性,设置统一高程,必要时按照水力计算要求加设泵站。使用MATLAB计算各DU间的邻接关系和路由关系,按照不同的情景设置将DU拼装成逻辑关系上的虚拟城市。

1.2 情景设置

1.2.1 形态情景

为了获得虚拟城市形态的设置依据,本文截取了2010和2015年全国所有地级城市建成区的边界

图,并据此计算了2个年份所有地级城市建成区边界的面积-长轴相对指数(SL),该指数是将标准正方形与研究形状比较得出一个相对指数;表示图形偏离标准正方形的程度,数值越大,越接近于正方形,可以有效刻画城市形态的外轮廓特征;对照其数值特征与城市建成区实际形状对中国地级城市进行分类,将SL指数在0~0.20范围的城市定义为长条形,0.20~0.32范围内的城市定义为星形,大于0.32的城市定义为方形城市,发现2015年中国地级城市外轮廓主要是不规则的星形,有141个,其次是长条形86个,最后是方形49个。

$$SL = \frac{S}{L^2} \quad (1)$$

式中: S 为建成区面积; L 为建成区长轴。各城市的 S 和 L 数据均通过ArcGIS测量工具获得。SL数值越小,城市越不紧凑。

对全国地级城市分别按照东北、华北、华东、华中、华南、西南和西北7大区以及2017年最新出台的城市等级划分,得到各区域和各等级2010和2015年城市形态比例图,如图1所示。综合各地域比例看,除西南和华北地区,均为方形比例下降;除华南和西南地区,均为长条形比例上升。如图2所示,综合各等级比例来看,星形城市比例均上升,2线、3线城市城市的正方形比例下降较高。表1对各个

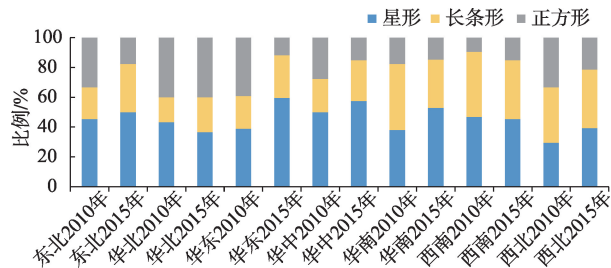


图1 2010和2015年中国各区域地级城市形态分类

Fig.1 Regional classification of urban morphology of China, 2010 and 2015

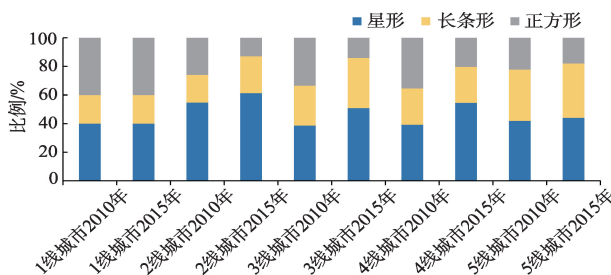


图2 2010和2015年中国各等级地级城市形态分类

Fig.2 Hierarchical classification of urban morphology of China, 2010 and 2015

地级城市2010—2015年的城市形态变化进行了归类,按城市数量多少依次为,星形→星形>长条→长条>方形→星形>方形→方形>星形→长条→长条→星形>星形→方形>方形→长条→长条→方形,整体来看,各区域城市建成区边界形态均在朝着非紧凑化发展。

据此确定3种代表现阶段中国地级城市的城市形态,即正方形、长条形和星形,作为本文研究的形态情景。如图3所示,为了增加方案间可比性,三种形态情景中排污DU总数均为 $20 \times 20 = 400$,道路DU总数=800,总面积=35 km²,总人口=36.24万人,单位DU人口数=906人,单位DU排污流量=4.09 L/s。

1.2.2 排水情景

污水设施系统具有建成后长期使用的特点,因此在建造之初考虑系统对于未来排水情景改变的适应性尤其重要,因此本文设置了排水情景,参考白桦(2016)的研究成果,如图4,城市排水情景应该考虑人口变化、气温变化以及节水行为的因素,根据情景作用的强度又分为人口高、中、低增长情景;节水高、低情景;气温不变、低增长、高增长情景。因此在各形态原始排水情景排污量的基础上乘以图中变化系数即可得到本研究中的排水情景水量范围。

综合以上3类变化因素,分别取最大和最小的变化系数,即人口低增长情景、高节水情景和气温不变情景的乘积,即0.508作为最小变化系数;人口高增长情景、低节水情景和气温增加高增长情景的乘积,即2.025作为最大变化系数,在根据原有定额污水量水力计算得到的污水系统的基础上输入变化的污水量来探究系统的适应性。

1.2.3 污水输入

污水输入数据为DU污水排放量,参考白桦(2016)的研究成果,DU污水排放量按照DU人口定额计算,其核算需要人均生活用水量、人口数量、污水排放系数和总变化系数4个输入,即第 i 个DU的生活污水排放量可根据式(2)进行计算:

$$WW_{resi} = \frac{WU_{per} \times Pop_i \times K_z \times K_d}{24 \times 3600} \quad (2)$$

式中: WU_{per} 为人均生活用水排放量; Pop_i 为DU人口数量; K_z 为总变化系数,根据污水平均流量 Q 通过式(3)计算取值; K_d 为污水排放系数(取值0.8); WW_{resi} 为生活污水排放量(L/s),全年排放,无季节性差异。查文献知污水管道一般设计流量为 $Q=100$ L/s,人均生活污水量:300 L/(d·人)。

表1 2010—2015年中国各地级城市形态变化分类

形态变化	东北(33)	华东(77)	华南(34)	华中(40)	西北(27)	西南(32)	华北(30)
方形→方形(30)	鞍山、四平、绥化	丽水、枣庄、德州、福州、厦门、蚌埠、亳州	海口、梅州、汕头	娄底、信阳、漯河、商丘	克拉玛依、汉中、西安、吴忠、嘉峪关	资阳	天津、长治、巴彦淖尔、保定、邯郸、邢台、北京
方形→星形(42)	阜新、辽阳、朝阳、沈阳、营口、长春、辽源	湖州、宁波、衢州、济宁、泰安、聊城、潍坊、菏泽、日照、赣州、泰州、扬州、淮安、龙岩、宿州、阜阳、安庆	北海、玉林、河源	周口、郑州、洛阳、安阳、开封、新乡、驻马店	渭南、固原、庆阳	玉溪、保山	乌兰察布、呼和浩特、沧州
方形→长条(10)	抚顺	东营、盐城、宿迁、南通、马鞍山、池州	—	—	咸阳	—	忻州、石家庄
长条→长条(52)	丹东、通化、佳木斯、七台河、鹤岗	舟山、温州、杭州、临沂、镇江、三明、南平、芜湖、淮南	防城港、广州、中山、汕尾、肇庆、江门、阳江、揭阳	张家界、黄石、宜昌、荆门、平顶山、鹤壁、焦作	西宁、铜川、宝鸡、延安、天水、平凉、兰州、金昌	重庆、昭通、宜宾、广元、攀枝花、雅安、南充、遂宁、拉萨、六盘水、贵阳	大同、阳泉、承德、张家口
长条→星形(23)	本溪、白山	威海、南昌、景德镇、宜春、九江、吉安、上饶、常州	三亚、梧州、南宁、惠州、韶关、清远、东莞	永州、襄阳	乌鲁木齐、银川	巴中、铜仁	运城
长条→方形(2)	—	—	—	—	—	眉山	—
星形→星形(74)	锦州、铁岭、葫芦岛、松原、牡丹江、哈尔滨、黑河	绍兴、台州、金华、上海、淄博、青岛、莱芜、滨州、抚州、新余、萍乡、连云港、南京、苏州、无锡、宁德、合肥、铜陵、黄山、滁州、六安	河池、桂林、柳州、湛江、深圳、珠海、潮州、佛山、茂名	湘潭、邵阳、怀化、株洲、益阳、郴州、黄冈、孝感、咸宁、鄂州、武汉、十堰、许昌、南阳	榆林、安康、张掖、酒泉、白银	昆明、丽江、达州、乐山、绵阳、自贡、内江、成都、广安、德阳、安顺	太原、赤峰、通辽、鄂尔多斯、乌海、秦皇岛、鄂尔多斯
星形→长条(24)	大连、白城、伊春、鸡西、大庆	嘉兴、烟台、济南、泉州、漳州、莆田、淮北	贵港、百色、云浮	岳阳、常德、长沙、三门峡	商洛、定西	曲靖、遵义	包头
星形→方形(16)	盘锦、吉林、齐齐哈尔	鹰潭、徐州	钦州	衡阳、濮阳	武威	临沧、泸州	朔州、晋中、临汾、衡水、廊坊

注:括号内数字表示城市数量。

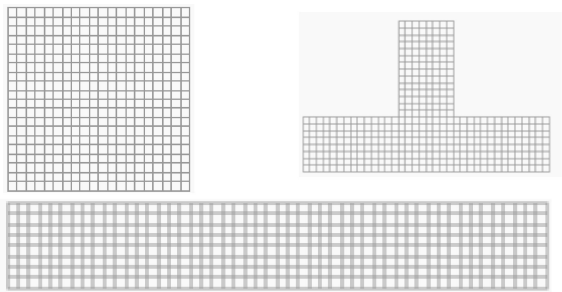


图3 3种形态情景示意图
Fig.3 Three urban morphology scenarios

$$Kz = \frac{2.7}{Q^{0.11}}$$

(3)

1.3 模型构建

根据构建的虚拟城市污水系统,引用白桦(2016)的污水系统构建模型,使用图论以及Kruscal算法,通过遍历所有排污单元以管网总长最小为目标生成最小生成树以构成污水系统定线方案。然

后进行水力计算,泵站设置为每种情景生成大量不同拓扑结构的污水系统方案集,测算出每个方案集的生命周期成本和拓扑结构,最后放入到SWMM模型中,为每个排污DU输入排水过程线,去模拟一天24 h内的管网运行性能,利用输出的生命周期成本、运行性能等指标来综合评估方案的经济性、有效性以及适应性。

1.4 指标体系

为了表征污水系统的结构、生命周期成本和性能等方面特性,本文指标体系分为4部分,分别为系统结构、系统经济性、系统有效性和系统适应性。

1.4.1 系统结构

污水系统拓扑结构是在图论理论下,对于图形中点和边以及互相关系进行描述,使用边介数(Chopra et al, 2014)和全局效率进行表征:边介数指系统中任意两点通过指定边的最短路径总和,表示边在全局中的重要程度,数值越小,说明重要边数

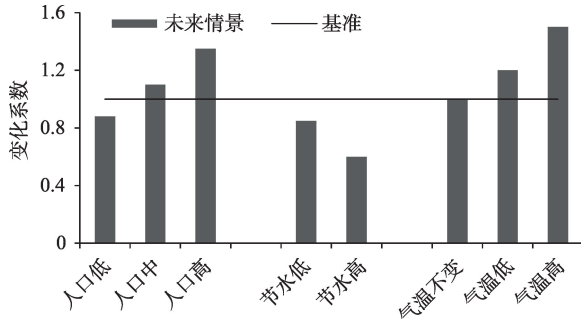


图4 各情景要素中城市排水系数变化

Fig.4 Variation of urban drainage coefficient in each drainage scenario

目越少,说明系统越分散;全局效率,在图论理论下代表系统的连通性,即全局效率越高,系统连通性越高,系统效率越高。

1.4.2 系统经济性

污水系统的成本包括管网、泵站和污水处理厂,其生命周期成本又包括建设成本和运行维护成本,按30 a计算。单位 10^3 万元。计算公式如下:

$$LIC = LIC_{pipe} + LIC_{pump} + LIC_{wwtp} \quad (4)$$

$$LIC_{pipe} = \sum npipe [CC_{pipe} + \frac{(1+0.06)^{30} - 1}{0.06 \times (1+0.06)^{30}} OMC_{pipe}] \quad (5)$$

$$LIC_{pump} = \sum npump [CC_{pump} + \frac{(1+0.06)^{30} - 1}{0.06 \times (1+0.06)^{30}} OMC_{pump}] \quad (6)$$

$$LIC_{wwtp} = \sum nwwtp [CC_{wwtp} + \frac{(1+0.06)^{30} - 1}{0.06 \times (1+0.06)^{30}} OMC_{wwtp}] \quad (7)$$

式中: LIC为系统全生命周期成本; LIC_{pipe} 为管网的全生命周期成本; $npipe$ 指所有管段; LIC_{pump} 为泵站的全生命周期成本; LIC_{wwtp} 为污水处理厂的全生命周期成本; CC_{pipe} 为管网的建造成本; OMC_{pipe} 为管网的运行维护成本; CC_{pump} 为泵站的建造成本; OMC_{pump} 为泵站的运行维护成本; CC_{wwtp} 为污水处理厂的建造成本; $nwwtp$ 指所有污水处理厂; OMC_{wwtp} 为污水处理厂的运行维护成本。

管网的建造成本计算公式(董颖等, 2008)为:

$$CC_{pipe} = (-34.4 + 8.8 \times H + 1.0 \times H^2 + 121.1 \times D \times H + 180.7 \times D^{4.31538}) \times L \quad (8)$$

泵站的建造成本计算公式(董颖等, 2008)为:

$$CC_{pump} = 79418.5 \times pump_H \times pump_Q^{0.52} \quad (9)$$

污水处理厂的建造成本计算公式(刘杰等,

2010)为:

$$CC_{wwtp} = 0.0053 \times WWTP_Q^2 + 1.1202 \times WWTP_Q + 1.5011 \quad (10)$$

管网运行维护成本计算公式(董颖等, 2008)为:

$$OMC_{pipe} = CC_{pipe} \times 0.03 \quad (11)$$

泵站运行维护成本计算公式(董颖等, 2008)为:

$$OMC_{pump} = CC_{pump} \times 0.05 \quad (12)$$

污水处理厂的运行维护成本计算公式(刘杰等, 2010)为:

$$OMC_{wwtp} = 0.8217 \times WWTP_Q^{-0.2397} \times WWTP_Q \times 365/1000 \quad (13)$$

式(8)-(13)中: H 为埋深; D 为管径; L 为管段长度; $pump_H$ 为提升高度; $pump_Q$ 为设计流量; $WWTP_Q$ 为污水处理厂设计流量。

1.4.3 系统有效性

污水系统的输水性能采用管道充满度失效比例和流速失效比例来表征,管段在24 h内充满度只要大于0.75或24 h内流速持续小于0.6 m/s的管段即为失效管段,分别计算每种方案中充满度失效比例和流速失效比例作为衡量系统有效性的指标,具体的计算公式如下:

$$V_failure = \frac{\text{number}(\max(\text{Link_Velocity}) < 0.6)}{\text{number}(\text{all_Link})} \quad (14)$$

$$C_failure = \frac{\text{number}(\max(\text{Link_Capacity}) > 0.75)}{\text{number}(\text{all_Link})} \quad (15)$$

式中: $V_failure$ 指系统流速失效比; $\max(\text{Link_Velocity})$ 管段24 h内最大流速; $C_failure$ 指系统充满度失效比; $\max(\text{Link_Capacity})$ 管段24 h内最大充满度; all_Link 指所有管段。

1.4.4 系统适应性

污水系统的适应性是指污水系统在未来排水情景改变情况下的适应程度,本文使用排水情景改变前后管道充满度失效比和流速失效比的比值来衡量,比值大于1说明系统在排水情景改变后失效比变大,小于1则说明系统在排水情景改变后失效情况好转,即此数值越大,系统适应性越差。具体的计算公式如下:

$$\text{flexibility_L_V} = \frac{\text{low_V_failure}}{V_failure} \quad (16)$$

$$\text{flexibility_H_V} = \frac{\text{high_V_failure}}{V_failure} \quad (17)$$

$$\text{flexibility_L_C} = \frac{\text{low_C_failure}}{C_failure} \quad (18)$$

$$\text{flexibility_H_C} = \frac{\text{high_C_failure}}{C_failure} \quad (19)$$

式中: flexibility_L_V 指系统低排水方案下流速失效适应性; low_V_failure 指系统低排水方案下流速失效比; V_failure 指系统原始排水方案下流速失效比; flexibility_H_V 指系统高排水方案下流速失效适应性; high_V_failure 指系统高排水方案下流速失效比; flexibility_L_C 指系统低排水方案下充满度失效适应性; low_C_failure 指系统低排水方案下充满度失效比; C_failure 指系统原始排水方案下充满度失效比; flexibility_H_C 指系统高排水方案下充满度失效适应性; high_C_failure 指系统高排水方案下充满度失效比。

2 结果与讨论

本文利用Kruscal算法为每种形态情景构建不同的污水系统定线方案,每种情景下采样1000次,形成1000套污水系统方案集,每种情景下所有指标均在1000次之内达到滑动平均值差异小于0.0001的收敛状态,说明了本文所构建的模型可靠。为了评估不同城市外轮廓下城市污水系统的差异性,首先对于3种形态情景下的系统生命周期成本、结构、有效性指标和适应性指标在SPSS软件中做了独立样本Kruskal-Wallis检验,结果均在 <0.001 水平上拒绝原假设(指标在形态类别上相同),即不同城市形态的污水系统的结构、经济性、有效性和适应性是显著不同的,也说明城市形态会影响城市污水系统的特征。

2.1 污水系统的一般性规律

2.1.1 不同情景下系统性能

本文对不同形态情景和排水情景下城市污水系统的24 h运行性能进行了模拟,结果如图5所示。在原始排水情景中,方形城市污水系统的流速失效比均值为0.55,充满度失效比均值为0.35;长条形城市污水系统的流速失效比均值为0.67,充满度失效比均值为0.42;星形城市的流速失效比均值为0.55,充满度失效比均值为0.36。在0.508变化系数作用下的低排水情景中,方形城市污水系统的流速失效比均值为0.70,充满度失效比均值为0.25;长条形城市污水系统的流速失效比均值为0.68,充满度失效比均值为0.27;星形城市的流速失效比均值为0.70,充满度失效比均值为0.27。在2.025变化系数作用下的高排水情景中,方形城市污水系统的流速失效比均值为0.47,充满度失效比均值为0.54;长条形城市污水系统的流速失效比均值为0.47,充满度

失效比均值为0.53;星形城市的流速失效比均值为0.47,充满度失效比均值为0.54。

可以看出,当污水量变小时,流速失效情况变得更严重,而充满度失效情况均有所改善;当污水量变大时,流速失效情况有所改善,而充满度失效情况更加严重。因为污水量变小时,管道内污水流速动力减弱,进而流速变慢,24 h持续小于0.6 m/s的管道数量会增加,而由于水量减少,管道内污水的充满度自然会减小,充满度大于0.75的管道数量会减少,但如果管道内污水流速缓慢到一定程度,也会造成污水因为流不出去而带来管道充满度增大的状况,而本文研究并未出现此状况,原因可能是水量的减少还达不到让管道内污水淤塞的程度;当污水量变大时,管内污水流速动力加强,进而流速变快,流速失效状况改善,而由于管内水量增大,本文研究也出现了充满度失效更为严重的情况。

2.1.2 系统结构与性能间关系

为了探明污水系统的结构和性能间的关系,表征污水系统结构的指标选择尤其重要,而系统结构是系统形态变量的外在反映,其表征指标的合理性与准确性是后续研究的基础,为了检验这种合理性,本文对所选择的2个结构性指标边介数和全局效率作相关性分析,如图6所示,系统边介数和全局效率呈现显著负相关,在 $R^2=0.867$ 水平下可拟合出线性关系,即系统的边介数越小,系统越分散,系统连通性越好,效率越高,符合常理,因此本文所选择的代表系统结构的指标合理,可以准确刻画污水系统的结构。

在此基础上,本文对结构性指标与系统经济性、有效性和适应性指标作相关性分析,结果如表2所示,系统边介数与生命周期成本、流速失效比、充满度失效比均呈显著正相关,与高、低水量排水情景改变前后系统流速和充满度失效比值均呈负相关,全局效率与其他指标相关性和边介数正好相反,符合边介数与全局效率之间负相关性的特点。据此推论,污水系统越分散,生命周期成本越低,流速失效比和充满度失效比越低,即分散的污水系统经济性和有效性更好。而污水系统越分散,高、低排水情景改变下系统充满度和流速的失效比相较于原始比值越高,即分散的污水系统的适应性反而更差。

2.2 城市外轮廓对城市污水系统的影响评估

2.2.1 系统结构和经济性评估

对不同形态情景中污水系统的生命周期成本、

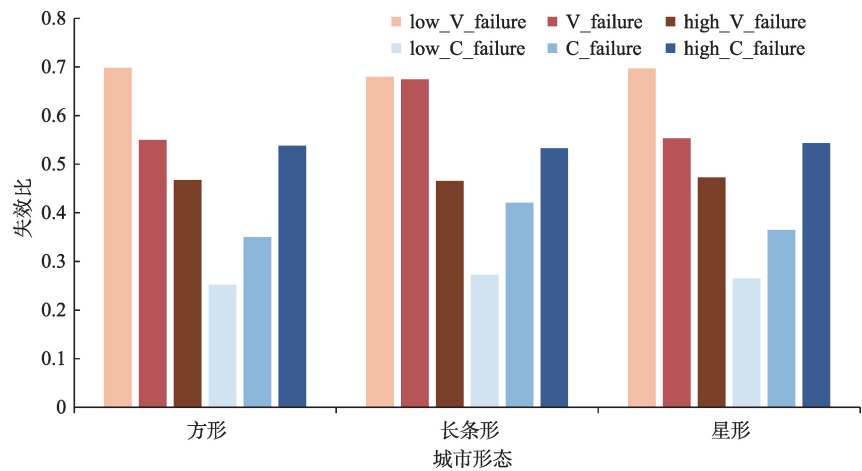


图5 各形态城市在不同排水情景下污水系统性能表现

Fig.5 Performance of sewage systems under different drainage scenarios

边介数和全局效率指标作条形图,如图7所示,在本文研究的城市规模下,污水系统的生命周期成本大致在6亿~7亿元区间内,其中长条形的城市污水系统生命周期成本最高,其次是星形城市,方形城市最低。长条形的系统边介数显著高于方形和星形城市,而方形和星形城市的污水系统边介数相差不大,即长条形城市的污水系统较为集中,方形和星形城市的污水系统更为分散。分析全局效率指标,方形和星形城市的全局效率相差不大,二者均高于长条形城市,即方形和星形城市较长条形城市流通效率更高。

分析城市污水系统的生命周期成本,包括管网、污水厂和泵站3个部分,在本文设置的统一高程的虚拟城市中,各情景中泵站差异很小,因此影响系统生命周期成本的决定性因素不是泵站,而污水厂的生命周期成本主要取决于进水量,本文中各情景下污水量保持一致,因此污水厂也不是影响系统生命周期成本的关键性因素,所以说本研究中城市污水系统生命周期成本的差异性主要来自于管网的影响,分析管网生命周期成本的计算公式,发现其主要受到管网长度和管径的影响。结合长条形城市污水系统更为集中而生命周期成本更高的特点,可以认为传输相同的污水量,集中的系统需要

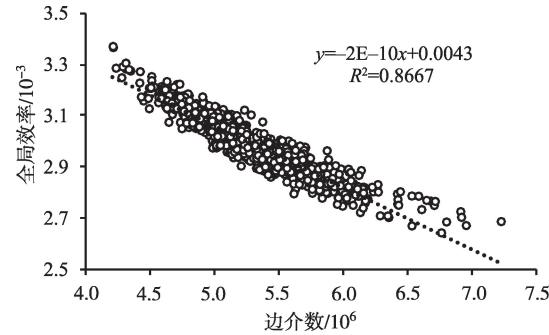


图6 污水系统结构指标间关系

Fig.6 Relationship between structural indicators of sewage systems

更粗的管径、更长的传输路径,而分散的系统可以通过将污水量分流来分散传输压力,从而节约管网资源。即拥有更紧凑型的城市外轮廓如方形和星形的城市,有着更为分散的设施系统,可以有效节约设施资源,因此从系统经济性方面评估,方形和星形的城市更有利。

2.2.2 有效性评估

为了对不同形态城市污水系统运行的性能有效性进行评估,本文对方形、长条形和星形城市的污水系统24 h流速失效比、充满度失效比结果作条形图,如图8所示,对流速失效比来说,长条形城市污水系统的失效情况显著高于方形和星形城市,而

表2 系统结构、生命周期成本与性能指标间相关性

Tab.2 Correlation between system structure, life cycle cost, and performance indicators

Pearson 相关性	生命周期成本	V_failure	C_failure	flexibility_L_V	flexibility_H_V	flexibility_L_C	flexibility_H_C
边介数	0.392**	0.509**	0.211**	-0.591**	-0.591**	-0.144**	-0.288**
全局效率	-0.406**	-0.439**	-0.179**	0.516**	0.521**	0.129*	0.250**

注:**、*分别表示在0.01水平(双侧)、0.05水平(双侧)上显著相关。

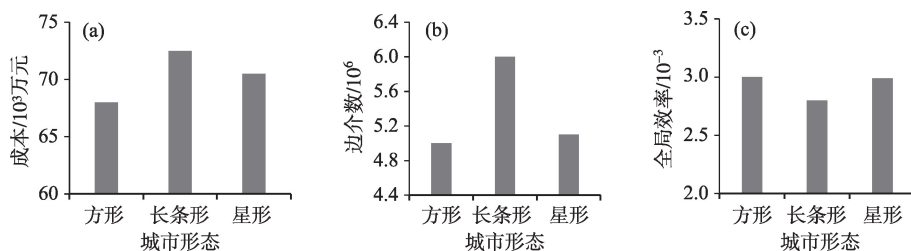


图7 不同形态城市污水系统生命周期成本和结构指标结果条形图

Fig.7 Structure and life cycle cost of sewage systems under different urban morphology scenarios

对于充满度失效比来说,3种外轮廓城市的结果差异较小,可以认为城市外轮廓对于城市污水系统的流速影响更大;但长条形城市污水系统的充满度的失效比仍然高于方形和星形城市,结合上述3种情景中污水系统的结构特点,系统更为集中的、连通性能更差的长条形的流速失效状况与充满度失效状况相较方形和星形城市均更为严重,因此从系统有效性方面进行评估,方形和星形城市更有利。

2.2.3 适应性评估

按照前述对污水系统适应性的定义,计算不同形态城市的污水系统排水情景改变前后流速和充满度失效比比值并作出条形图,如图9所示,低排水情景下,3种形态情景下污水系统的流速失效比相对原始比值均大于1,充满度失效比相对原始比值均小于1;而高排水情境下,3种形态情景下污水系统的流速失效比相对原始比值均小于1,充满度失效比相对原始比值均大于1,说明低排水情景下,污水系统的流速失效状况更严重,充满度失效状况有所改善,系统在充满度方面适应性更强;高排水情景下,污水系统的流速失效状况有所改善,而充满度失效状况更严重,系统在流速方面适应性更强。

对比3种基准形态下的污水系统性能失效比在排水情景改变前后比值,发现长条形城市在高、低排水情景中 flexibility_L_V 和 flexibility_H_V 均显著小于方形和星形城市;在低排水情景中,3种形态

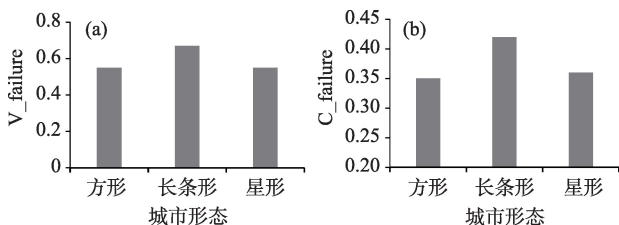


图8 不同形态城市污水系统有效性指标结果条形图

Fig.8 Effectiveness of sewage systems under different urban morphology scenarios

情景中 flexibility_L_C 的数值差异较小,但长条形城市还是低于方形和星形城市,在高排水情景中,长条形城市的 flexibility_H_C 也低于方形和星形城市。因此从污水系统适应性方面评估,长条形城市优于方形和星形城市。

3 结论与展望

本文截取了2010年和2015年全国所有地级城市建成区的边界图,并据此计算了2个年份所有地级城市建成区边界形态,据此构建虚拟城市。基于城市形态和城市污水系统之间的关系,本文以虚拟城市地块为基本单元,构建自上而下的城市空间与污水系统耦合模型,设置形态情景与排水情景,通过大规模采样的方法探索了污水设施生命周期成本、结构和性能的一般性规律,并从污水系统的经济性、有效性以及适应性角度去评估城市污水系统,进而再以城市污水系统的综合评估结果反馈指导未来城市规划以及城市形态管理,从而辅助提升

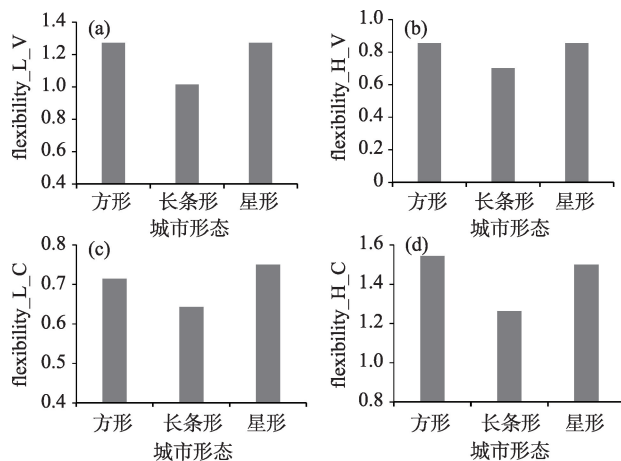


图9 不同形态城市污水系统适应性指标结果条形图

Fig.9 Adaptability of sewage systems under different urban morphology scenarios

城市污水系统的未来排水情景应对能力并优化其利用现状,其主要研究结论与展望如下:

(1) 中国地级城市外轮廓可以划分为星形、长条形和方形3类,2015年分别有141、86和49个。2010—2015年,从地区看,除西南和华北地区外,方形城市比例均有所下降,除华南和西南地区外,长条形城市比例均有所上升;从城市等级看,所有等级城市星形比例都有所上升,而2线、3线城市的方形比例下降较大。对各地级城市2010—2015年的城市形态变化进行归类,按城市数量由多到少依次为:星形→星形、长条→长条、方形→星形、方形→方形、星形→长条、长条→星形、星形→方形、方形→长条和长条→方形。整体来看,各区域城市建成区边界形态均在朝着非紧凑化方向发展。

(2) 在人口36.24万、面积35 km²的城市规模下,污水系统的生命周期成本约为6亿~7亿元。方形、长条形和星形城市的流速失效比分别为0.55、0.67、0.55,充满度失效比分别为0.35、0.42、0.36。在排水情景改变下,污水量变小时,系统流速失效情况均变得更严重,而充满度失效情况均有所改善,当污水量变大时,流速失效情况均有所改善,而充满度失效情况更严重。

(3) 分析系统结构性能,发现系统边介数和全局效率呈现显著负相关,即越分散的污水系统连通性越好。对系统结构、生命周期成本、性能指标作相关性分析,边介数与生命周期成本、流速失效比、充满度失效比均呈显著正相关,与高、低排水量下系统流速和充满度失效比相较于原始比值呈负相关;全局效率与其他指标相关性和边介数正好相反,即污水系统越分散,越节约设施资源,系统有效性越好,但适应性越差。对不同城市形态进行综合评估,从系统经济性和有效性角度出发,认为方形和星形的城市更有利,但从污水系统适应性更长远的角度出发,长条形城市优于方形和星形城市。但考虑设施运行的实际情况,经济性和有效性应该是优于适应性考虑的。

(4) 结合2010—2015年各地级城市的形态变化趋势,从污水系统经济性和有效性角度判断,目前长条→长条、星形→长条、方形→长条的86个城市的城市发展方向不够合理。而中国快速城市化进程中各城市建成区可能在短时间内快速扩张,因此优化布局城市发展形态极其重要。从污水系统优化视角审视,建议有条件的城市在未来新建或扩建规划中应优先考虑方形和星形城市形态,对于具有

相对稳定形态的城市可尽量使污水系统分散布局,让城市规划与内部设施形成有机统一,使更优的城市形态带动城市内部设施发挥最佳效能。

(5) 本文概化的3种城市形态能否准确刻画现阶段中国地级城市的特征、对各地级城市的形态归类是否合适还需进一步完善,关于各虚拟形态城市的污水系统运行效率的结论也需实证研究来支撑。另外来自数据获取、指标计算、形态概化过程中的系统误差也可能影响研究结论。希望下一步研究在克服以上不足的基础上做到以下几点:一是用更加系统化的方法分析和概化城市外轮廓形态特征;二是将城市形态与污水系统的耦合研究应用于具有典型形态特征的实际城市;三是将静态的城市形态差异扩展为动态的城市扩张,探究城市扩张方式对污水系统的影响;四是加强城市空间形态应对城市水系统变化的规划应用研究,借鉴“紧凑型城市”“海绵城市”等新兴城市规划理念,研究如何将理论成果应用于城市规划实践。

参考文献(References)

- 白桦. 2016. 不确定条件下分流制城市排水系统优化设计方法研究 [D]. 北京: 清华大学. [Bai H. 2016. Research on the optimization design method of separated urban drainage system under uncertainty. Beijing, China: Tsinghua University.]
- 陈珍启, 林雄斌, 李莉, 等. 2016. 城市空间形态影响碳排放吗? 基于全国110个地级市数据的分析 [J]. 生态经济, 32(10): 22-26. [Chen Z Q, Lin X B, Li L, et al. 2016. Does urban spatial morphology affect carbon emission? A study based on 110 prefectural cities. Ecological Economy, 32(10): 22-26.]
- 崔功豪, 武进. 1990. 中国城市边缘区空间结构特征及其发展: 以南京等城市为例 [J]. 地理学报, 45(4): 399-411. [Cui G H, Wu J. 1990. The spatial structure and development of Chinese urban fringe. Acta Geographica Sinica, 45(4): 399-411.]
- 崔胜辉, 徐礼来, 黄云凤, 等. 2015. 城市空间形态应对气候变化研究进展及展望 [J]. 地理科学进展, 34(10): 1209-1218. [Cui S H, Xu L L, Huang Y F, et al. 2015. Progress and prospect of study on urban spatial patterns to cope with climate change. Progress in Geography, 34(10): 1209-1218.]
- 董颖, 吴喜军. 2008. 排水管道费用函数研究 [J]. 市政技术, 26(5): 407-409. [Dong Y, Wu X J. 2008. Research of expenses function for drainage pipeline system. Municipal Engineering Technology, 26(5): 407-409.]
- 范晨璟, 田莉, 李经纬. 2018. 城市形态对空气质量影响研究

- 的国内外进展[J]. 城市发展研究, 24(12): 92-100. [Fan C J, Tian L, Li J W. 2018. Research progress of impacts of urban form on air quality. *Urban Development Studies*, 24(12): 92-100.]
- 郭腾云, 董冠鹏. 2009. 基于GIS和DEA的特大城市空间紧凑度与城市效率分析[J]. 地球信息科学学报, 11(4): 482-490. [Guo T Y, Dong G P. 2009. Study on the relationships between metropolitan spatial compact ratios and their efficiency in China in 1990 and 2000. *Geo-information Science*, 11(4): 482-490.]
- 李旋旗, 花利忠. 2012. 基于系统动力学的城市住区形态变迁对城市代谢效率的影响[J]. 生态学报, 32(10): 2965-2974. [Li X Q, Hua L Z. 2012. Landscape aesthetic assessment based on experiential paradigm assessment technology. *Acta Ecologica Sinica*, 32(10): 2965-2974.]
- 刘杰, 郑西来, 高超, 等. 2010. 城镇污水处理厂用地、运行及建设费用研究[J]. 环境工程学报, 4(11): 2522-2526. [Liu J, Zheng X L, Gao C, et al. 2010. Study on area, operating and construction costs of urban wastewater treatment plants. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 4(11): 2522-2526.]
- 龙瀛, 毛其智, 杨东峰, 等. 2011. 城市形态、交通能耗和环境影响集成的多智能体模型[J]. 地理学报, 66(8): 1033-1044. [Long Y, Mao Q Z, Yang D F, et al. A multi-agent model for urban form, transportation energy consumption and environmental impact integrated simulation. *Acta Geographica Sinica*, 66(8): 1033-1044.]
- 卢思佳. 2010. 1990年以来中国城市空间形态的变化特征及影响因素分析[C]//中国城市规划学会. 规划创新: 2010中国城市规划年会论文集. 重庆: 重庆出版社. [Lu S J. 2010. China's urban space form variation characteristics and influence factors analysis since 1990 // Urban Planning Society of China. Planning and innovation: 2010 China urban planning annual conference proceedings. Chongqing, China: Chongqing Publishing House.]
- 潘竞虎, 戴维丽. 2015. 1990—2010年中国主要城市空间形态变化特征[J]. 经济地理, 35(1): 44-52. [Pan J H, Dai W L. 2015. Spatial-temporal characteristics in urban morphology of major cities in China during 1990–2010. *Economic Geography*, 35(1): 44-52.]
- 秦波, 戚斌. 2013. 城市形态对家庭建筑碳排放的影响: 以北京为例[J]. 国际城市规划, 28(2): 42-46. [Qin B, Qi B. 2013. The impact of urban form on household building carbon emission: A case study of Beijing. *Urban Planning International*, 28(2): 42-46.]
- 余倩楠, 贾文晓, 潘晨, 等. 2015. 长三角地区城市形态对区域碳排放影响的时空分异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 25(11): 44-51. [She Q N, Jia W X, Pan C, et al. 2015. Spatial and temporal variation characteristics of urban forms' impact on regional carbon emissions in the Yangtze River Delta. *China Population, Resources and Environment*, 25(11): 44-51.]
- 杨磊, 李贵才, 林姚宇, 等. 2011. 城市空间形态与碳排放关系研究进展与展望[J]. 城市发展研究, 18(2): 12-17. [Yang L, Li G C, Lin Y Y, et al. 2011. Progress and prospect on relationship research between urban form and carbon emission. *Urban Studies*, 18(2): 12-17.]
- 赵会兵, 江源通, 郑拴宁. 2016. 城市形态对城市风环境品质影响的研究进展[J]. 环境科学与技术, 39(S2): 59-65. [Zhao H B, Jiang Y T, Zheng S N. 2016. Research progress of the effects of urban form on urban wind environment quality. *Environmental Science & Technology*, 39(S2): 59-65.]
- Astaraie-Imani M, Kapelan Z, Fu G, et al. 2012. Assessing the combined effects of urbanisation and climate change on the river water quality in an integrated urban wastewater system in the UK [J]. *Journal of Environmental Management*, 112: 1-9.
- Batt A L, Kim S, Aga D S. 2007. Comparison of the occurrence of antibiotics in four full-scale wastewater treatment plants with varying designs and operations [J]. *Chemosphere*, 68(3): 428-435.
- Beal C, Stewart R A, Spinks A, et al. 2011. Using smart meters to identify social and technological impacts on residential water consumption [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 11(5): 527-533.
- Borrego C, Martins H, Tchepel O, et al. 2006. How urban structure can affect city sustainability from an air quality perspective [J]. *Environmental Modelling & Software*, 21(4): 461-467.
- Chopra S S, Khanna V. 2014. Understanding resilience in industrial symbiosis networks: Insights from network analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 141: 86-94.
- Deng Y, Cardin M A, Babovic V, et al. 2013. Valuing flexibilities in the design of urban water management systems [J]. *Water Research*, 47(20): 7162-7174.
- Ewing R, Rong F. 2008. The impact of urban form on U.S. residential energy use [J]. *Housing Policy Debate*, 19(1): 1-30.
- Farmani R, Butler D. 2014. Implications of urban form on water distribution systems performance [J]. *Water Resources Management*, 28(1): 83-97.
- Filion Y R. 2008. Impact of urban form on energy use in water distribution systems [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(4): 337-346.
- Foti R, Ramirez J A, Brown T C. 2014. A probabilistic framework for assessing vulnerability to climate variability and change: The case of the US water supply system [J]. *Climatic Change*, 125(3-4): 413-427.
- Giuliano G, Narayan D. 2003. Another look at travel patterns and urban form: The US and Great Britain [J]. *Urban Stud-*

- ies, 40(11): 2295-2312.
- Hong J, Shen Q, Zhang L. 2014. How do built-environment factors affect travel behavior? A spatial analysis at different geographic scales [J]. *Transportation*, 41(3): 419-440.
- Kashem S B, Irawan A, Wilson B. 2014. Evaluating the dynamic impacts of urban form on transportation and environmental outcomes in US cities [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(8): 2233-2244.
- Kotharkar R, Bahadure P N, Vyas A. 2012. Compact city concept: Its relevance and applicability for planning of Indian cities [C]// PLEA2012: conference, opportunities, limits & needs towards an environmentally responsible architecture. Lima, Peru.
- Makki A A, Stewart R A, Beal C D, et al. 2015. Novel bottom-up urban water demand forecasting model: Revealing the determinants, drivers and predictors of residential indoor end-use consumption [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 95: 15-37.
- Mansfield T J, Rodriguez D A, Huegy M J, et al. 2015. The effects of urban form on ambient air pollution and public health risk: A case study in Raleigh, North Carolina [J]. *Risk Analysis*, 35(5): 901.
- Pingale S M, Jat M K, Khare D. 2014. Integrated urban water management modelling under climate change scenarios [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 83: 176-189.
- Schindler M, Caruso G. 2014. Urban compactness and the trade-off between air pollution emission and exposure: Lessons from a spatially explicit theoretical model [J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 45(2): 13-23.
- Schweitzer L, Zhou J P. 2010. Neighborhood air quality, respiratory health, and vulnerable populations in compact and sprawled regions [J]. *Journal of the American Planning Association*, 76(3): 363-371.
- Wong H G, Speight V L, Filion Y R. 2015. Impact of urban form on energy use in water distribution systems at the neighbourhood level [J]. *Procedia Engineering*, 119(1): 1049-1058.

Impact of urban morphology on sewage systems based on a virtual city modeling approach

LIANG Shan¹, DENG Yu², JIA Ning¹, LIU Yi^{1*}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Urban sewage systems in China have been developing rapidly in recent years, with problems of system hydraulic failure in peak period, challenge from change of drainage scenario caused by population change, climate change, and water saving behavior; and urban form is closely related to the operation of urban facilities. This study set up urban morphology scenarios and drainage scenarios, built a top-down virtual model of urban space and sewage system, used Kruskal algorithm for network routing and SWMM software for system simulation, and sampled a large number of sewage system solutions, to explore life cycle cost, structure, and operation of urban sewage systems, and assess urban sewage systems with regard to economic performance, effectiveness, and adaptability. The study found that life cycle cost is about 600–700 million yuan for the city. The velocity failure rate of square, rectangular, and star-shaped cities is 0.55, 0.67, and 0.55 respectively, and the capacity failure rate is 0.35, 0.42, and 0.36. Under the low discharge sewage scenario, velocity failure of the system turns more serious, and capacity failure of the system is improved. Under the high discharge sewage scenario, velocity failure is improved, but capacity failure is more serious. More dispersed sewage systems have better connectedness and the sewage system of rectangular city is more centralized than the square and star-shaped cities. Correlation analysis showed that the more dispersed sewage system is more economical and effective, but the adaptability is worse. Finally, from the perspective of system economy and effectiveness, square and star-shaped cities perform better. With regard to the adaptability of sewage system, rectangular city is superior to square and star-shaped cities. Based on the urban forms of the 86 Chinese urban areas examined in this study, the development trend is unreasonable. It is hoped that the conclusion can provide some reference for future urban planning and urban form management.

Keywords: virtual city; sewage system; urban form; drainage scenario; comprehensive evaluation