

# 基于系统动力学模型的石家庄污水再生利用规划

黄 徽, 杜鹏飞, 曾思育

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 为给规划方案比选提供依据,在污水再生利用规划中应用了系统动力学模型。针对石家庄特点,设计多情景,并以非线性优化方法得到具体再生水水源和回用对象的配水方案。以优化方案作为模型输入,利用系统动力学模型进行情景模拟,得到各方案污染物排放量等方面的动态变化情况。综合评价结果表明:对环境容量满足程度较高的方案最优:预计到2020年,再生水利用量将达到2.4亿 $m^3$ ,可有效缓解了城市供水压力;从2010年到2020年,所需污水再生利用建设累计投资占各年GDP的0.052%,能够为经济发展水平所接受。

**关键词:** 污水再生利用规划; 系统动力学; 石家庄

中图分类号: X 703.1; X 321

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2010)03-0391-05

## Shijiazhuang city wastewater reclamation and reuse planning based on system dynamic's model

HUANG Hui, DU Pengfei, ZENG Siyu

(Department of Environmental Science and Engineering  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Dynamic simulation of various wastewater reuse development scenarios were used to compare reuse plans for Shijiazhuang's wastewater characteristics. The method uses nonlinear optimization to analyze the wastewater reuse sources and user water distribution with the optimal steady stable results as the input, a dynamic system model was used to analyze the effects of various flow changes on indexes such as pollutants discharges. Scenarios found to meet the environment limits better had the most comprehensive benefits. The water reuse will reach 240 million  $m^3$  in 2020, to effectively relieve the stresses on the urban water supply with the required accumulated investment equal to 0.052% of GDP from 2010 to 2020, which is acceptable for economic development level.

**Key words:** wastewater reuse plan; system dynamics; Shijiazhuang city

生利用的研究<sup>[1-2]</sup>。李梅将系统动力学应用于污水再生利用的系统分析和预测<sup>[3]</sup>,徐志婧等人用系统动力学方法建立了分散式污水再生回用系统模型<sup>[4]</sup>,但是没有为城市污水再生利用规划提供直接的支持。

本研究针对缺水程度较高的中国北方城市石家庄的特点,结合非线性优化<sup>[5]</sup>等其他方法,将系统动力学模型应用于污水再生利用的规划,具有普遍的现实意义。

## 1 规划方法

### 1.1 规划总体流程

1) 识别石家庄市再生水潜在用户,进行污水再生利用的系统概化设计和多发展情景设计。

2) 以建设费用最小为目标,使用非线性优化方法,对方案优化,得到各情景下最优配水方案。

3) 以优化得到的再生利用量、建设投资等结果作为模型输入,使用系统动力学模型进行情景模拟,得到各方案污染物排放量等方面的动态变化情况。

4) 综合评价各方案,提出最优发展模式。

### 1.2 非线性优化方法

城市污水回用方案设计的核心部分是建立多个再生水水源和多个污水回用潜在用户之间合理的水量分配关系。

选择建设费用作为目标函数,包括再生水厂建设费用和输配水管网投资两部分,再生水厂建设费用和各水厂水量相关,管网投资和各管段输配水量相关,具体参数根据城市具体情况确定。

收稿日期: 2009-09-09

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAB17B01);

国家“九七三”重点基础研究项目(2006CB403407)

作者简介: 黄徽(1985—),男(汉),辽宁,硕士研究生。

通讯作者: 杜鹏飞,副教授, E-mail: dupf@tsinghua.edu.cn

污水再生利用对缓解城市缺水问题有重要意义。国内外已有很多城市开展了不同程度的污水再



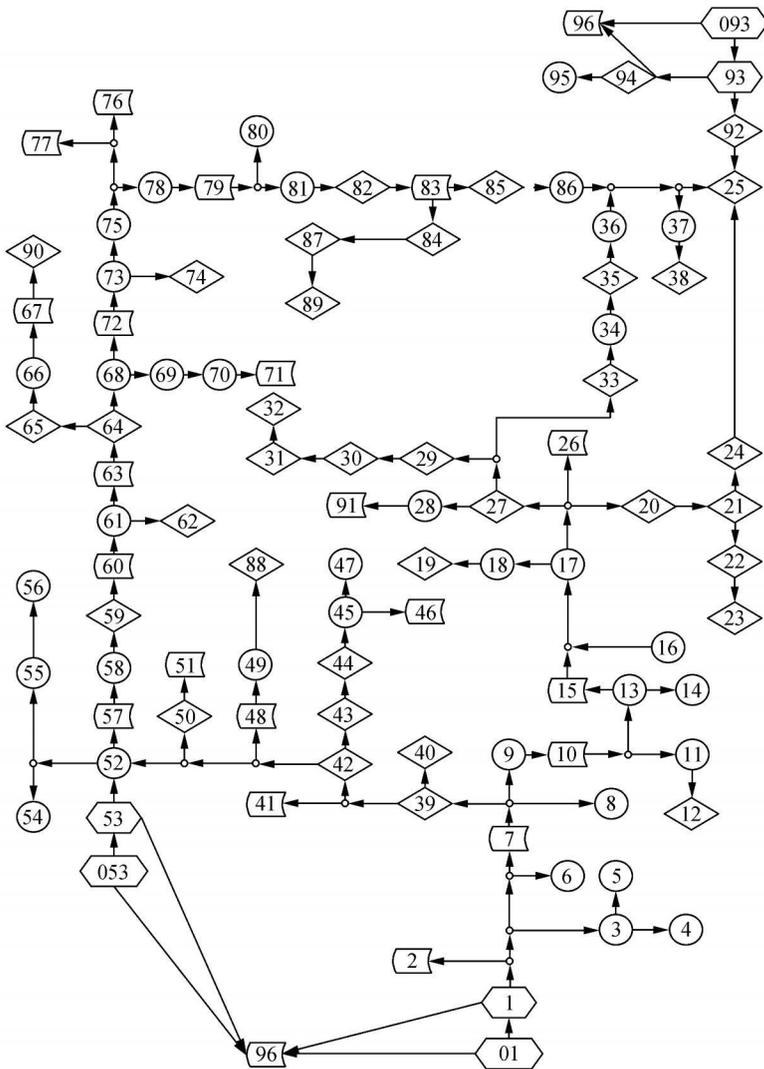


图 2 石家庄污水再生利用系统概化图

### 3.2 多情景设计

以 2010 年为方案设计水平年, 针对石家庄市的具体情况, 进行污水再生利用的发展情景设计, 如表 1 所示。其中, 环境容量以化学需氧量(COD)计, 环境容量满足程度为环境容量与污染物排放量的百分比, 100% 即满足环境容量要求。

表 1 石家庄市污水再生利用情景构建

情景	生态用水 亿 m <sup>3</sup>	地下水替代量 亿 m <sup>3</sup>	环境容量满足程度 %
1	1.6	0.15	—
2	1.6	0.30	—
3	1.6	0.30	20
4	1.6	0.30	40

### 3.3 再生水厂和管网成本优化

以污水再生利用工程建设费用最小为设计目标, 利用非线性优化方法, 计算达到各情景设计要求

时, 建设费用最低的再生水配置方案。

#### 3.3.1 目标函数

优化的目标函数由再生水厂的建设费用和再生水管网造价组成, 根据石家庄管道造价数据, 回归得到再生水厂投资和管道造价为:

$$C_1 / \text{万元} = 223.86 [Q_1 / (\text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1})]^{1.1777}, \quad (1)$$

$$C_2 / (\text{万元 km}^{-1}) = 9.8229 [Q_2 / (\text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1})]^{0.3132}, \quad (2)$$

$$C_3 / (\text{万元 km}^{-1}) = 0.5103 [Q_3 / (\text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1})]^{0.7127}. \quad (3)$$

其中:  $C_1$  为再生水厂投资;  $Q_1$  为再生水厂生产量;  $C_2$  为球墨铸铁管单位长度造价;  $Q_2$  为管段流量;  $C_3$  为玻璃钢管单位长度造价;  $Q_3$  为管段流量。

#### 3.3.2 优化结果

优化结果包含不同情景下各再生水厂出水量、各用户的配水量、各管段的流量、城市再生利用总量

和建设费用等,部分优化结果如表2所示。

表2 各情景优化结果(部分)

对象	水量/( $\text{万 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ )					建设费用 万元	单方水 投资 元	污染物 排放量 t
	桥西再生水 厂出水量	大学城水系 配水量	排放下游 合计水量	主城区再 生利用量	再生利用 总量			
需水量	3 650	78.75	—	17 155	—	—	—	—
情景1	1 143	42.97	25 145	1 500	1 500	4 652	3.10	30 174
情景2	2 364	78.75	23 645	3 000	3 000	7 331	2.44	28 374
情景3	3 650	78.75	20 727	5 918	5 918	11 814	2.00	24 872
情景4	3 650	78.75	16 000	17 155	10 645	26 759	1.56	13 992

情景1和情景2在地下水替代的约束下,污水再生利用量分别为 $1500 \text{ 万 m}^3$ 和 $3000 \text{ 万 m}^3$ ,其余污水向下游排放。情景3和情景4考虑了基于下游环境容量的污染物削减约束,致使污水再生利用量增加。情景4的污染物削减已经达到最大,各再生水厂满负荷运行,除满足城市再生水需求,还向下游排放 $6510 \text{ 万 m}^3$ 的再生水。表中主城区再生利用量包括工业、绿化和景观生态3种类型的再生水量,再生利用总量包括工业、绿化、景观生态和下游生态4种类型的再生水量。

### 3.4 未来发展模拟

通过模型调试取值,使污水处理增长速度基本满足污水增长对污水二级处理的需求,使城市供水增长速度基本满足城市需水量增长对供水的需求。各情景下污水再生利用发展的模拟结果如下。

为满足城市发展对水资源的需求,石家庄市自来水供水量将在近15 a里持续增长。污水再生利用为石家庄市提供了城市发展的第二水源,各情景变化曲线表明,再生水的使用可以有效降低对自来水供水量的需求,缓解水资源供需压力。图3中,在情景1的发展状态下,石家庄市2010年累计需要增加的自来水供水量为 $2067 \text{ 万 m}^3$ ,到2020年为 $14072 \text{ 万 m}^3$ ,城市供水压力很大。而情景4的发展状态下,石家庄市2020年累计增加自来水供水量仅为 $1383 \text{ 万 m}^3$ ,对缓解水资源压力起到巨大的

作用。

再生水利用量的变化呈快速增长趋势。由于再生水与自来水之间为替代关系,因此再生水利用量变化图中各情景曲线的空间分布与自来水增长情况正好相反。图4中,在情景1的发展状态下,石家庄市2010年的污水再生利用量为 $1496 \text{ 万 m}^3$ ,占城市供水总量的2.4%;到2020年为 $5274 \text{ 万 m}^3$ ,占城市供水总量的6.3%。在情景4的发展状态下,石家庄市2010年的污水再生利用量为 $10892 \text{ 万 m}^3$ ,占城市供水总量的16.1%;到2020年为 $24038 \text{ 万 m}^3$ ,占城市供水总量的27.2%。

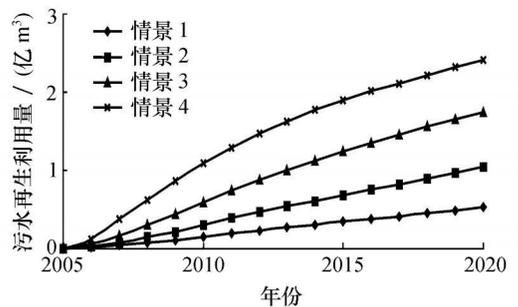


图4 各情景下再生水利用量变化情况

污染物排放量与再生水利用量之间呈负相关变化关系,见图5,即再生水利用量高的情景方案,污染物排放量低,再生水利用量低的情景方案,污染物排放量高。

情景模拟的结果还包括不同发展模式下,污水

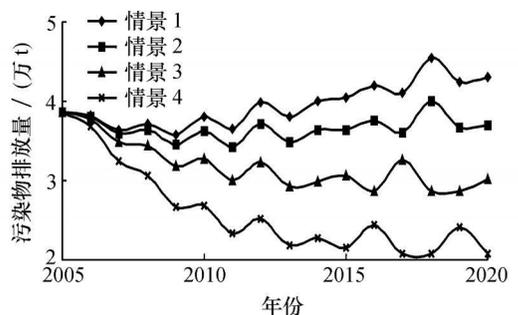


图5 各情景下污染物排放变化情况

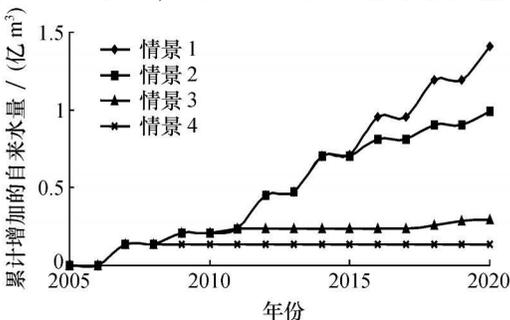


图3 各情景下新增自来水水量累计变化情况

再生利用的投资情况, 情景 4 中, 到 2020 年, 石家庄市主城区 GDP 为 2410 亿元, 工业总产值为 2700 亿元。从 2010 年到 2020 年, 污水再生利用建设累计投资为 9.09 亿元, 占各年 GDP 的 0.0519%, 其投资比例能够为经济发展所接受。

### 3.5 各情景比选

城市污水再生利用规划方案综合评价指标体系的目标是寻求综合最优方案, 指标分 2 级, 一级指标包括水资源、经济、环境、工程和社会等 5 个, 二级指标包括缺水程度和新增自来水供水量等一共 17 个<sup>[6]</sup>。综合方案非线性优化计算结果、系统动力学模型模拟结果和定性指标分析结果, 得到不同情景方案综合评价的指标结果。

评价结果表明: 情景 4 下的优化方案综合效益最优, 推荐采用。评价结果同样说明, 情景 1 的综合效益次优, 情景 2 和情景 3 具有相近的综合效益, 可以作为备选方案。当决策目标发生改变(导致评价指标权重改变), 或城市污水再生利用的资源、经济和社会背景发生改变(导致系统约束条件或优化目标函数发生改变), 应调整情景设计使优化方案符合城市发展的实际进程。

## 4 结 论

本研究把利用非线性优化方法得到的污水再生利用配水方案作为输入参数, 将系统动力学模型应用于石家庄市污水再生利用规划中, 在不同发展情景下, 模拟了回用量等动态变化情况, 为综合评价提

供缺水量和新增自来水量等 17 项依据, 比选得到了最优发展模式, 为规划提供了依据。

### 参考文献 (References)

- [1] Haarhoff J, Van der Merwe B. Twenty-five years of wastewater reclamation in Windhoek, Namibia [J]. *Wat Sci Tech*, 1996, **33**(10-11): 25-35.
- [2] Crook J, Surampalli R Y. Water reclamation and reuse criteria in the U.S [J]. *Wat Sci Tech*, 1996, **33**(10-11): 451-462.
- [3] 李梅. 城市污水再生回用系统分析及模拟预测 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.  
LI Mei. System Analysis, Simulation and Prediction on Municipal Wastewater Reclamation and Reuse [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003. (in Chinese)
- [4] 徐志嫻, 黄廷林. 分散式污水再生回用系统优化分析 [J]. 西安建筑科技大学学报, 2005, **37**(2): 164-168.  
XU Zhiqiang, HUANG Tinglin. Optimization of the decentralized sanitation and reuse system [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2005, **37**(2): 164-168. (in Chinese)
- [5] 杜鹏飞, 孙昊, 曾思育, 等. 基于多水源多用户分析的城市污水回用非线性优化模型 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, **47**(6): 830-833.  
DU Pengfei, SUN Hao, ZENG Siyu, et al. Optimization model for wastewater reclamation and reuse planning based on anlye of multiple resources and users [J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2007, **47**(6): 830-833. (in Chinese)
- [6] 孙昊. 基于 NLO 和 SD 模型的城市污水再生利用规划研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006.  
SUN Hao. Approach to Municipal Wastewater Reclamation and Reuse Planning Based on NLO and SD Model [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)