

基于多水源多用户分析的城市污水回用模型

杜鹏飞¹, 孙 昊¹, 曾思育¹, 张天柱¹, 郭 勇²

(1 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2 水利部海河水利委员会, 天津 300170)

摘 要: 为城市污水回用规划方案设计, 提出一种进行多水源与多用户之间配水方案优化的方法。通过识别影响污水回用的城市内部约束和外部约束, 构建了全面反映污水回用资源和环境效益的非线性优化模型。城市水资源缺口、对地下水开采的替代量、污染物的削减量和排放下游的生态用水量是影响污水回用的关键因素。该模型能够通过设定不同的决策目标来设计不同的回用情景。对邯郸市计算实例进行了模型应用。应用结果体现了污水回用对城市可持续发展能力的支撑作用。

关键词: 污水回用规划; 多水源多用户; 非线性优化

中图分类号: X 32; X 52

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2007) 06-0830-04

Optimization model for wastewater reclamation and reuse planning based on analysis of multiple resources and users

DU Pengfei¹, SUN Hao¹, ZENG Siyu¹, ZHANG Tianzhu¹,
GUO Yong²

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

2 Haihe River Conservancy Commission, Tianjin 300170, China)

Abstract A municipal wastewater reclamation and reuse planning method was developed to optimize reclaimed wastewater distribution between multiple resources and users. Based on identification of the internal and external constraints on wastewater reuse in urban setting were identified to develop a nonlinear optimization model to maximize the benefits of water resources in wastewater recycling system. The key factors affecting water reuse are shortages of municipal water supplies, ground water substitution, pollution reduction, and downstream ecological water needs which provide different scenarios for different purposes. The test results in Handan reveal the ability of reuse systems to facilitate sustainable development of cities

Key words: wastewater reclamation and reuse planning; multi resources and users; nonlinear optimization

城市污水再生回用可以有效缓解城市的水资源供需矛盾, 同时有利于水环境保护和水生态修复。早在 1983 年, 我国开始研究针对不同污水水源和回用对象的处理技术和工程应用示范^[1]。从城市尺度开展的污水回用规划研究较少^[2]。太原、大连、石家庄、西安、西宁、北京等城市相继开展了污水回用规划研究^[3-4]。李梅等人建立了城市污水回用系统动力学模型^[5], 从宏观上分析和预测污水回用的影响。田一梅等人将非线性规划应用于供水系统综合规划^[6], 得到涉及污水回用的水资源分配方案。

本文提出了污水回用的非线性优化算法, 应用该模型能够对多个再生水水源和回用用户进行时空上的合理布局, 实现基于不同决策目标的优化计算。

1 城市污水回用系统分析

城市污水回用系统的作用能否有效发挥, 可以用弥补城市水资源缺口、对地下水开采的替代量、污染物的削减量和排放下游的生态用水量等 4 个关键因素来衡量, 它们体现了污水回用对提高城市水资源承载力和水环境承载力, 增强城市可持续发展能力的重要支撑作用。

城市污水回用系统是城市传统水资源系统的延伸和反馈(见图 1)。

影响系统的城市内部约束包括再生水水源制约, 不同用户的水质、水量要求, 经济影响因素, 社会影响因素; 城市外部约束包括水环境容量和下游生态需水量。这些约束共同决定了系统的效率和灵活性、稳定性。污水回用的配水方案设计应该在各约束的范围内进行。

收稿日期: 2006-05-10

基金项目: 国家环保总局、水利部全球环境基金(GEF)海河流域专项治理项目(TE 053183)

作者简介: 杜鹏飞(1970—), 男(汉), 辽宁, 副教授。

E-mail: dupf@tsinghua.edu.cn

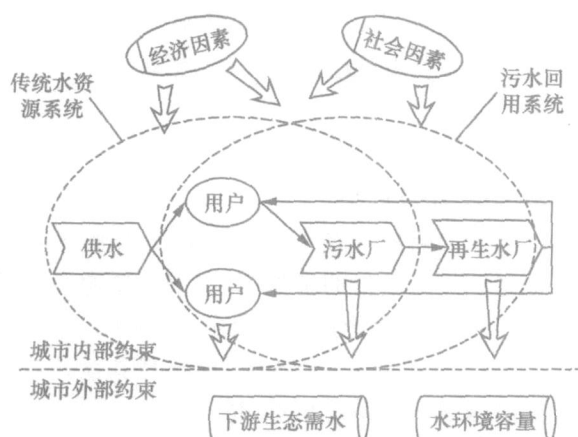


图1 城市污水回用系统结构及约束

2 优化模型的构造

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, 建立非线性优化模型。

2.1 目标函数

目标函数由2部分组成, 输水管道造价和再生水厂建设费用, 其中加压泵站建设费用包含在再生水厂建设费用中。其基本形式^[6-7]为

$$\min Z = \sum_i \sum_r \alpha_r Q_{ij} \beta_r L_i + \sum_k \alpha_k Q_k \beta_k \quad (1)$$

式中: Z 为总建设费用, 万元; α_r 、 β_r 为第 r 种管材的费用因数; Q_k 、 L_i 分别为第 r 种管材在第 i 段管道的输送水量和管长; α_k 、 β_k 为第 k 种水质的再生水厂建设费用因数; Q_k 为第 k 种水质的再生水量。

2.2 系统约束

系统约束主要由影响污水回用的城市内部和外部因素解析而来, 实际应用中可根据研究对象的特点和数据支持的情况灵活采用。

1) 用户需求约束。再生水作为替代水源, 给每个用户输送的总水量不大于用户的需求量。

$$\begin{cases} \sum_i Q_{ij} - \sum_r Q_{jr} - \sum_m Q_{pjm} \leq Q_{DEMj}, \\ j, r = 1, 2, \dots, N_U, \quad m = 1, 2, \dots, N_P \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_{ij} 为从某点 i 到用户 j 的水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; Q_{pjm} 为从某点 j 到中转节点 m 的水量, 中转节点为再生水在运输过程中的分叉点, $\text{万 m}^3/\text{a}$; Q_{DEMj} 为用户 j 需水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; N_U 为再生水用户数; N_P 为中转节点数。

2) 水量平衡约束。各点输入水量、输出水量之间的物质平衡关系。

a) 对于污水处理厂, 有

$$\begin{cases} Q_{Ti} - \sum_j Q_{TRij} - Q_{TDi} = 0, \\ i = 1, 2, \dots, N_T, \quad j = 1, 2, \dots, N_R \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_{Ti} 为污水处理厂 i 处理水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; Q_{TRij} 为从污水处理厂 i 到再生水厂 j 的水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; Q_{TDi} 为从污水处理厂 i 到下游的水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; N_T 为污水处理厂数; N_R 为再生水厂数。

b) 对于再生水厂, 有

$$\begin{cases} \sum_j Q_{TRij} - \sum_r Q_{jr} - \sum_m Q_{pjm} = 0, \\ j = 1, 2, \dots, N_R, \quad r = 1, 2, \dots, N_P, \\ m = 1, 2, \dots, N_U \end{cases} \quad (4)$$

c) 对于中转节点, 有

$$\begin{cases} \sum_j Q_{pjm} - \sum_r Q_{jr} - \sum_m Q_{pjm} = 0, \\ j, m = 1, 2, \dots, N_P, \quad r = 1, 2, \dots, N_U \end{cases} \quad (5)$$

3) 处理能力约束。再生水厂的处理规模不大于其处理能力。

$$\begin{cases} \sum_j Q_{TRij} \leq Q_{CAPj}, \\ i = 1, 2, \dots, N_T, \quad j = 1, 2, \dots, N_R \end{cases} \quad (6)$$

式中 Q_{CAPj} 为再生水厂 j 处理能力, $\text{万 m}^3/\text{a}$ 。

4) 水资源紧缺约束。再生水使用总量不小于由于城市水资源紧缺而需要通过污水回用增加的水资源量。

$$\begin{cases} \sum_i \sum_j Q_{TRij} - \sum_r Q_{RDj} - \sum_r Q_{EDr} \geq Q_U, \\ i = 1, 2, \dots, N_T, \quad j = 1, 2, \dots, N_R, \\ r = 1, 2, \dots, N_E \end{cases} \quad (7)$$

式中: Q_{RDj} 为从再生水厂 j 到下游的水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; Q_{EDr} 为从景观生态水用户 r 到下游的水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; Q_U 为由于水资源紧缺, 城市需要的最低再生水使用量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; N_E 为景观生态水用户数。

5) 地下水替代约束。再生水使用总量不小于需要替代的城市地下水使用量, 其中到景观生态水用户水量等于该用户自身消耗量加上该用户排放下游水量。

$$\begin{cases} \sum_i \sum_j Q_{TRij} - \sum_r Q_{RDj} - \sum_r \sum_m Q_{Emr} \geq Q_G, \\ i = 1, 2, \dots, N_T, \quad j = 1, 2, \dots, N_R, \\ m = 1, 2, \dots, N_U, \quad r = 1, 2, \dots, N_E \end{cases} \quad (8)$$

式中: Q_{Emr} 为从某点 m 到景观生态水用户 r 的水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$; Q_G 为需要使用再生水来替代的地下水

开采量, $\text{万 m}^3/\text{a}$ 。

6) 污染物削减约束。使用再生水能够避免再生水中所含污染物排放下游, 为满足下游环境容量提出通过使用再生水进一步削减污染物的要求, 再生水使用总量不小于该要求。

$$\begin{cases} \sum_i \sum_j C_{\text{Tni}} Q_{\text{TRij}} \geq M_n, \\ i = 1, 2, \dots, N_{\text{T}}, \quad j = 1, 2, \dots, N_{\text{R}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: C_{Tni} 为污水处理厂 i 出水中第 n 种污染物的质量浓度, $\text{t}/\text{万 m}^3$; M_n 为满足环境容量要求, 需通过使用再生水削减的第 n 种污染物质, t/a 。

7) 下游生态用水约束。为满足下游生态用水需求, 城市应向下游排放足够多的污水处理厂二级出水 and 再生水。

$$\begin{cases} \sum_i Q_{\text{TDi}} + \sum_j Q_{\text{RDj}} + \sum_r Q_{\text{EDr}} \geq Q_{\text{D}}, \\ i = 1, 2, \dots, N_{\text{T}}, \quad j = 1, 2, \dots, N_{\text{R}}, \\ r = 1, 2, \dots, N_{\text{E}} \end{cases} \quad (10)$$

式中 Q_{D} 为满足下游生态用水需求, 需要城市向下游排放的水量, $\text{万 m}^3/\text{a}$ 。

8) 非负约束。系统中流动水量非负。

表 1 城市污水回用非线性规划模型扩展分析中的可变约束

约束类型	约束方程	目标函数
费用条件	$\sum_i \sum_j \alpha Q_{\text{ij}}^{\beta_{\text{L}}} + \sum_k \alpha Q_{\text{k}}^{\beta_{\text{k}}} \leq Z$	$\min \left(\sum_i \sum_j \alpha Q_{\text{ij}}^{\beta_{\text{L}}} + \sum_k \alpha Q_{\text{k}}^{\beta_{\text{k}}} \right)$
水资源紧缺条件	$\sum_i Q_{\text{TRij}} - \sum_j Q_{\text{RDj}} - \sum_r Q_{\text{EDr}} \geq Q_{\text{U}}$	$\max \left(\sum_i Q_{\text{TRij}} - \sum_j Q_{\text{RDj}} - \sum_r Q_{\text{EDr}} \right)$
地下水替代条件	$\sum_i Q_{\text{TRij}} - \sum_j Q_{\text{RDj}} - \sum_r \sum_m Q_{\text{Emr}} \geq Q_{\text{G}}$	$\max \left(\sum_i Q_{\text{TRij}} - \sum_j Q_{\text{RDj}} - \sum_r \sum_m Q_{\text{Emr}} \right)$
污染物削减条件	$\sum_i \sum_j C_{\text{Tni}} Q_{\text{TRij}} \geq M_n$	$\max \left(\sum_i \sum_j C_{\text{Tni}} Q_{\text{TRij}} - M_n \right)$
下游生态用水条件	$\sum_i Q_{\text{TDi}} + \sum_j Q_{\text{RDj}} + \sum_r Q_{\text{EDr}} \geq Q_{\text{D}}$	$\max \left(\sum_i Q_{\text{TDi}} + \sum_j Q_{\text{RDj}} + \sum_r Q_{\text{EDr}} - Q_{\text{D}} \right)$

4 案例研究

选取邯郸市为模型应用的对象进行实例研究, 污水回用系统的概化设计(见图 2)。污水回用潜在用户包括 5 个工业用水用户、4 个景观生态用水用户和 13 个绿化用水用户。

邯郸市主城区共 3 座污水处理厂, 拟在各污水厂内建设再生水厂, 出水水质符合回用用途的最高水质要求。污水回用情景设计的重点是在确定研究对象的基础上, 识别核心因素和关键驱动因子。结合邯郸市的具体情况, 本研究从弥补城市水资源缺口、

$$Q_{\text{ij}}, Q_{\text{Pij}}, Q_{\text{TRij}}, Q_{\text{EDi}}, Q_{\text{TDi}}, Q_{\text{RDi}} \geq 0 \quad (11)$$

$$\begin{cases} \sum_j Q_{\text{ij}} - \sum_r Q_{\text{jr}} - \sum_m Q_{\text{pjm}} \geq 0, \\ j, r = 1, 2, \dots, N_{\text{U}}, \quad m = 1, 2, \dots, N_{\text{P}} \end{cases} \quad (12)$$

3 优化模型的扩展

以污水回用成本最小为目标函数, 反映了在满足其他系统约束条件的情景下, 研究对象的经济最优结果。同理, 如果经济条件给定, 将污水回用总投资作为系统约束条件加以控制, 而选择其他具有目标特征的函数作为系统目标, 也可以寻求在该特征目标下的最优结果。

根据这个思路, 对前面构造的非线性优化模型进行扩展。其中: 可变约束部分见表 1; 固定约束包括用户需求条件、水量平衡条件、处理能力条件、非负条件。固定约束只能以系统约束条件的方式在模型中出现; 可变约束具有目标特征, 在强制满足的情况下表现为污水回用的系统约束, 在作为决策依据的情况下表现为污水回用的系统目标。

应用中可以根据决策需要从中挑选某个条件作为优化的目标函数, 其他条件作为系统约束来构建优化模型。

对地下水开采的替代量、污染物的削减量 3 个方面进行方案情景设计(见表 2), 其中环境容量以 C_{r} 的化学含氧量 COD_{Cr} 计。以费用条件为目标函数建立非线性规划模型, 运用 GAM S 软件编制程序进行模型运算, 得到各情景下的污水回用优化方案(见表 3)。

优化模型为邯郸市提供了城市污水再生利用在不同情景下的优化发展模式, 使城市供水能够在较少开发新水资源的前提下得到有效满足, 从而保证经济发展, 地下水超采现象受到遏制, 城市水环境逐步改善。

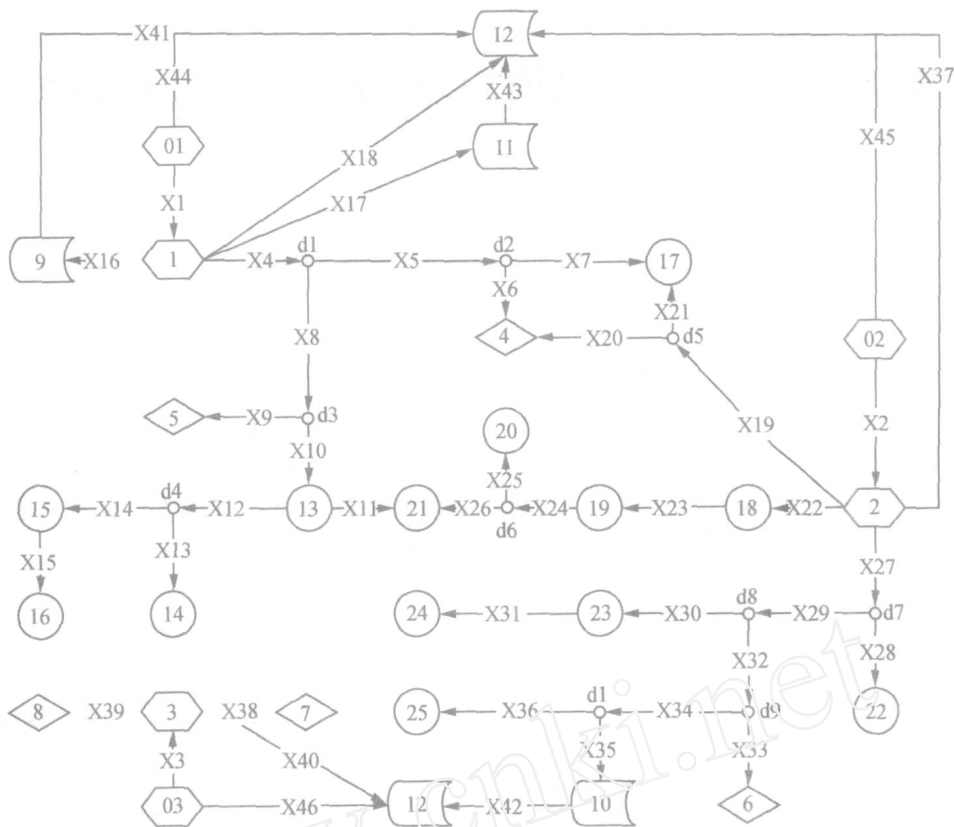


图 2 再生水厂同水质情况下系统设计

情景 1 是弱回用情景, 考虑了 2010 年南水北调未能正常通水的情况, 污水回用对主城区供水缺口的弥补, 污水回用总量 1 151 万 m³。

情景 2 提出地下水替代需求, 这一需求以优先向离再生水厂距离较近的用水大户分配再生水的方式实现, 污水回用总量 2 607 万 m³。

情景 3 在情景 2 的基础上提出了污染物削减约束, 这导致再生水厂增加再生水的供应量, 景观生态回用得到采纳, 污水回用总量 3 482 万 m³。

情景 4 在情景 3 的基础上提出更强的污染物削减约束, 导致工业、绿化、景观生态等各用途的再生水使用量增加, 更多的用户纳入污水再生利用系统, 污水回用总量 9 980 万 m³。

情景设计为城市污水再生利用指出了可供选择的各种发展方向和发展目标, 方案优化为不同的发展方向寻找达到目标的最佳途径, 供决策参考采用。

表 2 邯郸市污水回用情景设计

情景	城市缺水 量 / 万 m ³	地下水替代 量 / 万 m ³	环境容 量 / t	污染削减 比例 / %
1	1 151	—	1 152 7	—
2	0	2 607	1 152 7	—
3	0	2 607	1 152 7	35%
4	0	2 607	1 152 7	70%

注: 情景 1 为南水北调通水前, 其他情景均为南水北调通水后;
污染削减比例为环境容量与污染物排放量的百分比。

表 3 情景优化结果

情景	水量 / (万 m ³ · a ⁻¹)							建设费用 万元 · a ⁻¹	污染物排放量 t · a ⁻¹
	污水厂排 放下游量	再生水排 放下游量	工业 回用	绿化 回用	景观生 态回用	污水回 用总量	地下水 替代量		
1	8 829	0	1 151	0	0	1 151	1 151	841	10 595
2	7 373	0	2 607	0	0	2 607	2 607	2 080	8 848
3	1 266	4 436	3 482	0	796	8 714	3 482	7 358	3 294
4	0	4 117	4 252	13	1 598	9 980	4 265	9 607	1 647

(下转第 846 页)

- [7] 吴桢芬, 王华, 胡建杭 城市生活垃圾热解/燃烧特性的实验研究 [J]. 工业加热, 2005, 34(4): 1 - 4
WU Zhenfen, WANG Hua, HU Jianhang Study on thermal decomposition/combustion properties of municipal solid waste [J]. *Industry Heat*, 2005, 34(4): 1 - 4 (in Chinese)
- [8] 王树荣 生物质热裂解制油的试验与机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 1999
WANG Shurong Experimental study and mechanism analysis on pyrolysis of biomass for bio-oil production [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1999 (in Chinese)
- [9] 李水清 固体废物热裂解制取洁净燃料和化学原料的基础研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002
LI Shuiqing Pyrolysis of solid wastes for clean fuels and chemicals: lab- and pilot-scale studies [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002 (in Chinese)
- [10] Kim S Pyrolysis kinetics of waste PVC pipe [J]. *Waste Management*, 2001, 21(7): 609 - 616
- [11] 胡荣祖, 史启祯 热分析动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001
HU Rongzu, SHI Qizhen Kinetics of Thermal Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)

(上接第 833 页)

5 结 论

本文构建了能够用于多水源和多用户分析的城市污水回用非线性优化模型, 解决了回用方案设计中存在的主观性和片面性问题, 能够在不同的决策目标下进行方案的优化设计。模型以邯郸市为例进行不同情景下的方案优化计算, 得到良好验证, 优化结果为邯郸市提供了能够满足不同回用目标的多水源多用户配水方案。

参考文献 (References)

- [1] 周彤 污水回用决策与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
ZHOU Tong Decision and Technology of Wastewater Reuse [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002 (in Chinese)
- [2] 顾培亮, 吕永波 城市污水资源化多级优化系统的研究 [J]. 中国给水排水, 1990, 6(3): 4 - 10
GU Peiliang, LU Yongbo The research of the multi-level optimization of the urban sewage reclamation [J]. *China Water & Wastewater*, 1990, 6(3): 4 - 10 (in Chinese)
- [3] 徐志嫻, 李梅 西安市污水再生回用的发展规划 [J]. 中国给水排水, 2004, 20(5): 93 - 96
XU Zhiqiang, LI Mei Development planning on wastewater reclamation and reuse in Xi'an city [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(5): 93 - 96 (in Chinese)
- [4] 刘小英, 黄廷林, 李梅 西宁市污水再生回用的可行性研究 [J]. 中国给水排水, 2004, 20(8): 88 - 90
LIU Xiaoying, HUANG Tinglin, LI Mei Feasibility study on wastewater reclamation and reuse in Xining city [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(8): 88 - 90 (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 田一梅, 赵新华, 张雅君 城市自来水与中水系统综合规划的优化研究 [J]. 给水排水, 2001, 27(5): 23 - 27
TIAN Yimei, ZHAO Xinhua, ZHANG Yajun Optimization of unified planning of urban water supply and intermediate water systems [J]. *Water & Wastewater Eng*, 2001, 27(5): 23 - 27 (in Chinese)
- [7] 黄廷林, 刘小英, 李梅 西北地区污水再生处理工程投资模型 [J]. 中国给水排水, 2005, 21(8): 1 - 4
HUANG Tinglin, LIU Xiaoying, LI Mei Investment model for wastewater reclamation project in northwest China [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(8): 1 - 4 (in Chinese)