

System Analysis, Simulation and Prediction on Urban Wastewater Reclamation and Reuse

Wenlong Zhang, Yi Li*, Chao Wang, Fenglai Jin

College of Environment, Hohai University, Nanjing
Email: 1223zhangwenlong@163.com, *envly@hhu.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Abstract: In order to coordinate into conventional water resources system, the wastewater reuse system should be technologically designed to maximize the profit of operation. The composition, structure and influencing factors of urban wastewater reclamation and reuse system were systematically analyzed in this study. A system dynamic (SD) model for urban wastewater reclamation and reuse planning was established to simulate the dynamic development of solutions and their influence on economic for the next decade. The annual growth rates of secondary treatment and wastewater reuse were set as 3.5% and 2%, respectively. The secondary treatment rate, wastewater reuse rate, and COD reduction would be up to 91.2%, 25.4%, and 244.58 billion tons in 2022, respectively. With the investment of wastewater reuse larger than 0.04% of annual GDP, all of result could meet the national plans.

Keywords: System Dynamics Model; Wastewater Reuse; China; Systematical Analysis

城市污水再生利用系统分析及模拟预测

张文龙, 李 轶*, 王 超, 金凤来

河海大学环境学院, 南京
Email: 1223zhangwenlong@163.com, *envly@hhu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 9 月 30 日; 修回日期: 2013 年 11 月 20 日; 录用日期: 2013 年 11 月 26 日

摘 要: 本文利用系统分析法全面地分析了城市污水再生利用系统的组成、结构和影响因素, 在此基础上建立了城市污水再生利用系统 SD 模型, 通过不同回用方案对未来十年我国城市污水再生利用前景进行了方案的模拟与预测。结果表明: 在污水二级处理年增长率为 3.5%, 污水回用增长率为 2% 的情况下, 2022 年污水二级处理率将达到 91.2%, 污水回用率为 25.4%, COD 减排削减到 2445.8 亿 t, 均达到了国家规划目标要求, 但是回用工程每年的投资至少占 GDP 的 0.04% 以上。

关键词: SD 模型; 污水再生利用; 全国范围; 系统分析

1. 引言

城市污水作为非常规水资源, 其潜在可利用量与城市污水排放量大体相当, 如果得到充分利用, 可以有效缓解城市的水资源紧张压力^[1]。城市污水再生回

作者简介: 张文龙, 博士研究生, 研究方向为城市污水再生利用。
李轶, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源保护与生态修复。
*通讯作者。

用作为一条解决水资源短缺的有效途径, 已受到世界各国的普遍关注。污水回用系统是一个涉及社会、经济和环境等领域的一个复杂的系统问题。在考虑污水回用的同时应该综合考虑影响污水回用的诸多因素及其相互关系。运用系统动力学方法对污水再生回用系统进行仿真模拟预测, 是一种行之有效的办法, 该

方法通过对系统行为和结构的分析, 对系统趋势模拟, 寻求系统理想的发展方案^[2]。本文运用系统动力学方法, 建立城市污水再生回用系统的 SD 模型, 研究我国污水再生回用的发展趋势。

2. 污水再生回用系统 SD 模型结构

系统动力学模型(SD 模型)的关键在于认识系统基本结构和基本行为^[3]。污水再生回用系统影响因素众多且相互联系、相互作用, 并组成一个有机整体。针对污水再生回用系统的这一特点, 从增强层次性、可识别性角度出发, 将模型分为 2 个子系统, 即再生水供水系统、再生水需水系统。城市污水再生回用系统以污水回用量、再生水需要量、缺水量为主要变量, 同时考虑经济、政策、用户接受程度、城市发展规划等因素对系统的影响。以下按照子系统划分分析模型的基本结构。

2.1. 再生水供水子系统

再生水供水子系统的因果关系如图 1 所示, 系统中再生水的供水量通过城市污水量、二级处理水量、(再生水需要量)来确定。一般说来, 污水回用量最大能达到城市污水量的 70%, 二级处理规模与城市现有经济发展水平和污水处理水平密切相关。目前我国大部分整体的污水二级处理率偏低, 而当前再生水回用的前提是污水二级处理, 污水回用是一个动态发展的过程。系统同时考虑了再生水需求量、城市缺水程度、经济投资等因素对回用量的影响, 把二级处理率和回用率作为特性指标, 考虑了回用水量的增大促进了城市 GDP 增长, GDP 增长又会对再生回用系统建设投资增加有促进作用, 从而能进一步增加再生水回用量, 这样构成了系统的一条反馈回路。

2.2. 再生水供水子系统

再生水需水子系统考虑了城市生态用水、城市生活及市政杂用水、工业再生水用量三方面。再生水需水子系统的因果关系(图 2), 由于目前我国正在进行大规模的生态环境建设, 生态建设用水量所占比例越来越大, 这部分用水量不可忽视; 城市生活用水中考虑了居民冲厕用水、绿化用水、道路用水和公共建筑用水, 工业用水中主要考虑了冷却补水和洗涤用水。城市用水包括生活需水量和工业需水量, 再生水的补充

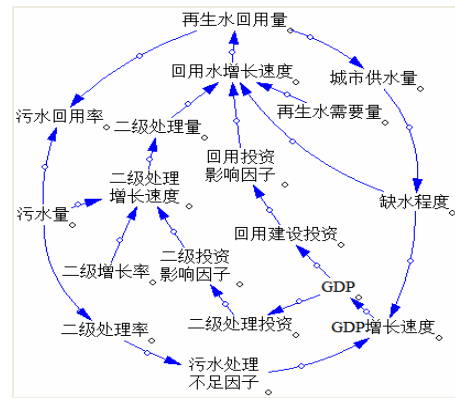


Figure 1. Reclaimed-water supply subsystem
图 1. 再生水供水子系统流程图

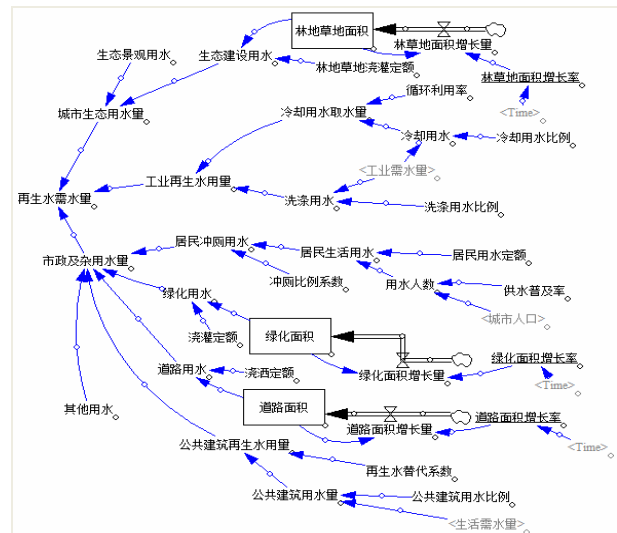


Figure 2. Reclaimed-water demand subsystem
图 2. 再生水需水子系统流程图

可以减少对自来水的取用量, 城市用水的供需差以缺水程度来体现, 缺水一方面影响工业产值的增长速度, 另一方面要求城市供水量增加。那么如果回用量增加, 从而会增大供水量, 系统在正负反馈中取得动态平衡^[4,5]。

2.3. 模型中变量关系的确定

模型采用 Vensim 软件进行可视化编程, 变量间的函数关系和参数值可以直接输入模型中, 选取再生水生产量的相关方程式为例, 如下:

- I RWR = RW/SHV
- I RWC.k = RWC.j + RWG.k
- I RWCR = RWC/SHV
- I RWG = IF THEN ELSE (RWCR ≥ 1, 0, SHV)

$$(1 - RWCR) \times RWGR \times RWCCoef)$$

$$I \quad RWGR = (1 + SWR) \times (1 - RWSDR) \times RWGRTable$$

$$D \quad RWGRTable = \text{Reference Mode}$$

$$I \quad RWSDR = RW/RWD$$

$$I \quad RWCCoef = \text{IF THEN ELSE} (RWIR \geq 1, 1, RWIR)$$

$$I \quad RWIR = RWIA/RWIE$$

$$I \quad RWIAG = GDP \times RWIAGR$$

$$D \quad RWIAGR = \text{Const.}$$

$$I \quad GDP.k = GDP.j + GDPG.k$$

$$I \quad GDPG = GDP \times GDPGR \times (1 - 0.5 \times SWR)$$

$$E \quad RWIUnit = \text{Const.}$$

$$I \quad RWIA.k = RWIA.j + RWIAG.k$$

$$I \quad RWIE = RWC \times RWIUnit$$

$$D \quad GDPGR = \text{Const.}$$

方程说明中 D 表示决策变量, I 表示内部变量, E 表示外部变量。方程式中下标 k、j 表示时间, j 表示前一状态, k 表示当前状态, Const. 表示常数。其他变量含义由于篇幅所限暂略。

3. 模型参数确定及模型验证

模型建立后, 在进行模拟之前, 首先对模型中的所有参数(常数、表函数及状态变量方程的初始值)赋值, 需要确定研究区域, 本次研究确定了我国城市地区作为研究对象。

3.1. 参数初始值、常数的赋值

模型中的参数(如常数、表函数及状态变量方程的初始值)和主要变量的取值参考相关年鉴资料和国内相关研究成果, 具体情况见表 1。

3.2. 模型的验证

模型的验证是模型应用的基础和前提, 通常 SD 模型的检验包括量纲一致性检验、历史数据验证和灵敏度验证等。选取变量进行验证, 所考察变量的仿真值与历史值基本吻合, 最大误差不超过 10%, 认为模型仿真结果与实际值拟合较好, 模型具有较好的适用性, 可以投入使用。

4. 方案设计及模型预测结果分析

根据系统的主反馈回路和对系统的调试, 以及决策变量的确定原则, 选择了回用增长率、二级处理增

Table 1. Values of major variables

表 1. 参数取值说明表

变量	变量取值	单位
再生水单方投资	1.1	元
GDP	472881.6	亿元
城市人口	69079.0	万人
公共绿地面积	482600.0	万 m ³
单位污水 COD 含量	4.5	t/万 m ³
二级处理单方投资	4.7	万元/m ³
自来水供水量	513.4	亿 m ³
自来水投资影响因子	1.0	无量纲

长率、二级处理投资比等指标作为控制变量, 通过调整每个变量和几种变量的组合, 进行模型仿真模拟, 本文设计了两种方案进行分析和模拟。

4.1. 方案一

方案一为污水回用延续现状方案, 确定决策变量污水回用增长率为 0, 污水二级处理增长率为 4%, 并输入模型。点击 Vensim 软件中的 SET 命令, 可输入或改变决策变量的值。

4.1.1. 城市需水量预测

决策变量输入模型后, 便可以进行模拟。点击 Control panel 命令, 模拟结果可以以图形形式输出, 分析数据集, 输出界面如图 3。

城市需水总量在 2012 年为 816.6 亿 m³, 在 2022 年达到 2507.7 亿 m³; 工业需水 2012 年为 369.8 亿 m³, 在 2022 年达到 1901.5 亿 m³; 生活需水 2012 年为 446.8 亿 m³, 在 2022 年达到 605.8 亿 m³。工业用水和生活用水均随着时间呈上升趋势。生活用水曲线的增长速度在 2012 年前的上升趋势略小于 2012 年至 2022 年间的增长速度; 工业用水在 2002~2012 年间的增长速度小于 2012~2022 年间的增长速度, 这是由于随着工业技术水平的提高、节水措施的实施, 万元产值用水量逐年下降, 但达到一定程度时下降的速度会减慢, 工业用水的重复利用率同样达到一定程度后提高的幅度变小, 但工业产值却呈指数型增长, 增长速度快。2002、2012、2022 年万元产值用水量分别为: 239m³/万元, 104m³/万元, 98m³/万元。

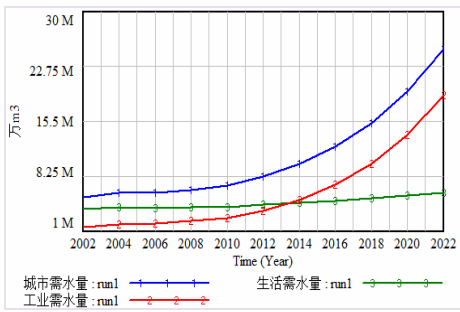


Figure 3. Urban water demand forecast
图 3. 城市需水量预测

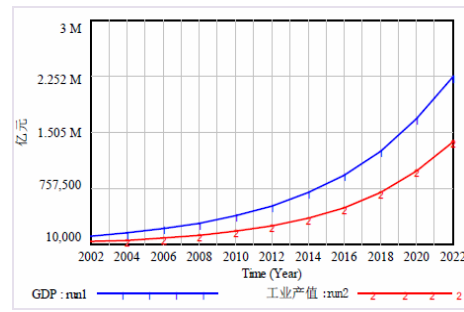


Figure 4. Economic development forecast
图 4. 经济发展状况预测

4.1.2. 缺水量

经过模型模拟得出在 2022 年我国城市缺水量将达到 309.8 亿 m³ (2011 年城市供水量为 513.4 亿 m³)。城市缺水通常从供需两方面来解决, 在供水方面是增加常规水和非常规水源资源的供水量来解决; 城市用水方面则通过城市节水来解决, 由于此方案中没有考虑污水回用, 所以供水的增加只有依靠增加自来水供水量来解决, 由此可见, 我国城市缺水现象还是比较严重的。缺水全部靠增加自来水解决还是有一定困难的。

4.1.3. 经济发展情况

根据相关规划及模型的反复调试, 确定工业产值以 10% 的速度增长, 国民生产总值 GDP 以 7% 的速度增长。工业产值和国民生产总值的发展均受到缺水的影响。GDP 和工业产值发展趋势见图 4, 工业产值在 2014 年为 357134 亿元, 2022 年为 1,371,970 亿元; 国民生产总值 GDP 在 2014 年将达到 696,642 亿元, 2022 年 2,246,100 亿元。

4.1.4. 再生水需求量预测

由图 5 可看出, 市政及杂用水、工业再生水、城市生态用水三个方向的再生水用量都随时间呈上升趋势, 生态用水上升速度较快。这是由于随着城市的发展, 城市生态建设是城市规划中一项重要的任务。城市的基础设施建设加快, 人民生活水平提高, 城市的绿化、道路和居住环境将得到改善, 根据模型模拟结果, 全国城市林地草地面积在 2022 年将要达到 38,335 km², 道路面积达到 12743.5 km², 绿化、道路用水量必将增大, 市政及杂用水在 2014 年达到 241,407 万 m³, 在 2022 年达到 381,878 万 m³。工业再生水用量上升趋势平稳, 工业再生水用量随着工业

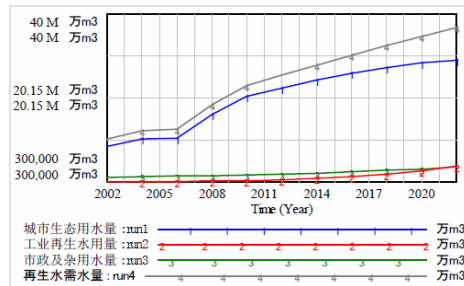


Figure 5. Reclaimed water demand forecast
图 5. 再生水需求量预测

用水的增加按一定比例增加在 2014 年达到 109,510 万 m³, 在 2022 年达到 405,790 万 m³。生态用水在 2014 年达到 243,912 万 m³, 在 2022 年达到 2,898,500 万 m³。再生水总需求量在 2014 年达到 2,790,030 万 m³, 2022 年将达到 3,686,160 万 m³。

4.2. 方案二

方案二是在 2022 年污水二级处理率达到 90%, 污水回用率达到 25%(参考相关规划及文献内容), 通过模型调试, 确定模型中的决策变量污水二级处理年增长率在 2002~2022 年为 3.5%, 污水回用增长率为 2%。

4.2.1. 回用量与二级处理量

方案二运行下, 污水回用量和二级处理量的有关指标见表 2。

从表 2 得出, 污水回用率和二级处理率都达到了较大值, 到 2022 年污水二级处理率 91.2%, 处理量达到 1223.5 亿 m³, 回用率达到 25.4%, 回用量达到 461.2 亿 m³, 达到了污水处理率 90%、回用率 25% 的规划要求。要实现这一目标, 需要每年在二级处理的建设投入比例占 GDP 的 0.16%, 深度处理的建设投入比例占 GDP 的 0.04%。随着经济的高速发展和 GDP 增加, 在 2014 年后这两方面的投资比例逐渐减小, 这是由

Table 2. Recycling and secondary processing index
表 2. 回用与二级处理指标

时间	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022
污水回用率	1.0	1.7	2.1	6.9	6.3	8.2	15.3	20.5	22.1	23.7	25.3
再生水回用量(亿 m ³)	4.2	7.9	9.6	33.6	33.7	50.5	113.1	154.9	200.8	300.5	461.2
回用水期望投资(亿元)	38.5	50.2	75.8	112.3	132.4	154.5	210.2	271.5	392.4	515.7	764.6
污水二级处理率	20.5	35.1	54.8	61.5	70.1	75.2	80.7	84.6	85.9	88.7	91.2
二级出水规模(亿 m ³)	87.0	137.5	198.0	265.1	338.3	547.9	671.2	818.9	999.4	1000.6	1223.5
二级处理期望投资(亿元)	192.5	255.8	346.1	502.5	642.4	831.8	1114.6	1493.6	2001.4	2681.9	3593.8

于污水二级处理和再生回用的建设形成了一定规模,减轻了后期建设的负担。

4.2.2. 缺水量

方案一与方案二的缺水量与自来水供水量的比较见图 6、7。方案二利用再生水回用后,增加了城市供水量,城市缺水程度得以缓解。城市缺水量逐渐下降,到 2014 年为 0。到 2022 年,城市自来水的供水量为 1085.7 亿 m³,回用水量达到 461.2 亿 m³,城市自来水供水量比方案一减少了 590.3 亿 m³。到 2018 年,回用于市政和工业的再生水达到极限,缺水现象又开始增大,此时自来水供水量为 857.4 亿 m³,比方案一的自来水供水量减少 310.5 亿 m³。

4.2.3. 经济发展状况

工业产值和城市 GDP 值的发展趋势见图 8、9。污水的再生水利用使工业产值有一定的提高。在 2014 年,由于再生水的回用,城市供需水量达到平衡。由于缺水将造成工业产值的损失在利用再生水后逐渐减小。方案一的工业产值在 2014 年为 357,134 亿元,2022 年为 1,371,970 亿元,方案二的工业产值在 2014 年为 388,860 亿元,2022 年为 1,581,050 亿元,比方案一当年产值提高了 8.88%和 15.23%。如图 8。

城市 GDP 值也受缺水程度的影响,污水回用后,GDP 值有一定的提高,2014 年 GDP 值为 754,710 亿元,2022 年为 2,566,720 亿元,比同年方案一的 2014 年的 696,642 亿元,2022 年 2,246,100 亿元分别提高了 8.34%和 14.27%。见图 9。

4.2.4. COD 排放量

方案二下在 2022 年污水二级处理率达到 91.2%,较方案一 COD 排放量大幅度削减,如图 10 所示。方

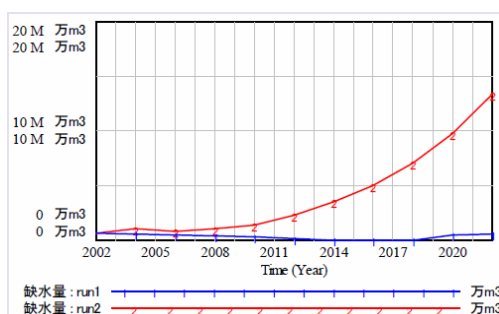


Figure 6. Water deficit forecast
图 6. 缺水量比较预测

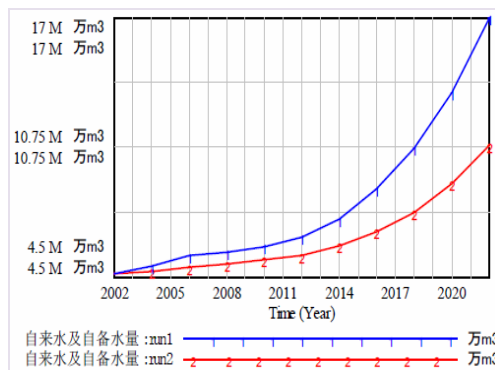


Figure 7. Comparison of water amount
图 7. 自来水及自备水供给量比较

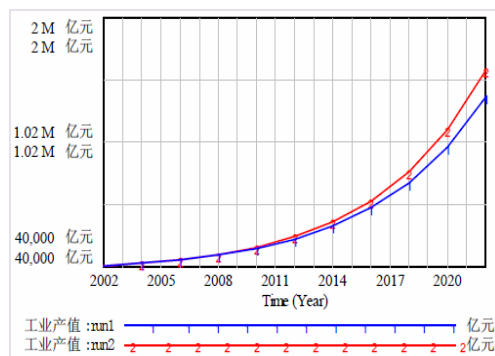


Figure 8. Industrial production forecast
图 8. 工业产值预测

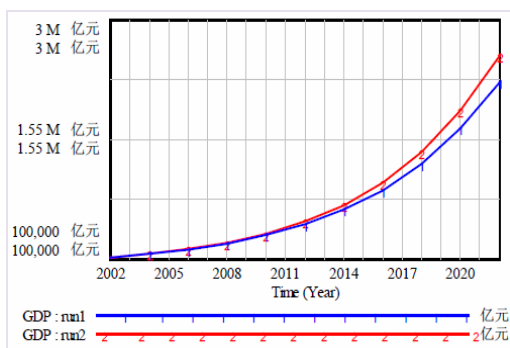


Figure 9. GDP development forecast
图 9. GDP 发展预测

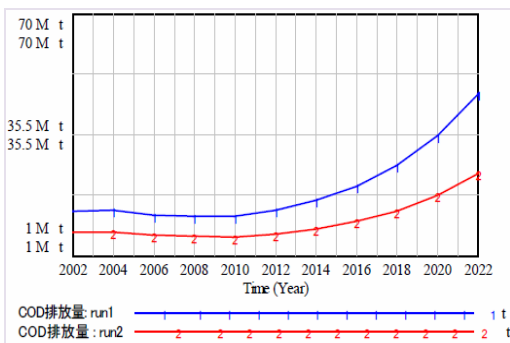


Figure 10. COD emissions forecast
图 10. COD 排放量预测

案一由于二级处理量随污水量的增加而增加, COD 排放量在 2014 年 1676.65 亿 t, 2022 年 4700.71 亿 t, 方案二在 2014 年 COD 排放量 857.45 亿 t, 2022 年 COD 排放量 2445.77 亿 t。污水二级处理率与污水回用率的提高大大减轻了对环境的污染。

5. 结论

城市污水再生回用系统 SD 模型的结果表明, 模型可以真实的模拟城市污水回用系统, 并可以通过不同方案的设计, 预测系统在规划方案下的发展趋势。在对我国城市污水回用的规划应用中得出, 污水回用将能使城市的缺水状况得以有效地缓解, 并能促进城市的经济发展, 但是城市的污水处理和深度处理的工程建设需要与经济发展相协调, 需要一个循序渐进的过程。

6. 致谢

感谢第十一届中国水论坛推荐, 感谢国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-002)资助。

参考文献 (References)

- [1] 马志毅. 城市污水回用概述[J]. 给水排水, 1997, 23(12): 61-63.
- [2] Jay, W.F. Urban dynamic. London: The MIT Press, 1969: 38-115.
- [3] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 45-53.
- [4] 刘昌明, 何希吾. 我国 21 世纪上半叶水资源供求分析[J]. 中国水利, 2000, 1: 19-22.
- [5] 西宁市统计局. 西宁统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.