

# 基于 SD 和 GM(1,1)模型的西安市 污水回用方案研究

李云排, 周维博, 刘雷

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以系统动力学原理为基础, 利用系统动力学软件(Vensim)构建了西安市污水回用系统动力学模型(SD模型), 并结合灰色 GM(1,1)模型对市区人口、GDP、城市工业总产值等主要变量进行模拟分析, 对不同污水回用发展方案进行了模拟分析预测。结果表明: 保证在 2020 年污水二级处理率达到 90%, 再生回用率达到 45% 的发展方案能有效缓解城市缺水状况, 逐步改善城市水环境, 实现经济与环境的协调发展。

**关键词:** 系统动力学模型; GM(1,1)模型; 污水回用; 西安市

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0154-04

## Study on scheme of sewage reuse in Xi'an based on SD and GM (1, 1) model

LI Yunpai, ZHOU Weibo, LIU Lei

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Based on the theory of system dynamics, the paper used system dynamics software (Vensim) to construct system dynamics model (SD model) for sewage reuse of Xi'an, and selected the main variable factors such as population, GDP, gross industrial output value etc. for simulation analysis combined with GM (1, 1) model, made the simulation analysis prediction of sewage reuse with different development schemes. The result shows that guarantee in 2020 the sewage secondary treatments rate of development plan will reach 90%, recycle and reuse rate reach 45% so as to alleviate the urban water shortage effectively, improve the urban water environment gradually, and achieve a coordinated development of economy and environment.

**Key words:** system dynamics model; GM (1, 1) model; sewage reuse; Xi'an city

## 0 引言

城市污水作为非常规水源, 经过二级处理或深度处理实现再生回用, 不仅能缓解城市水资源短缺的压力, 而且能减少污染物的排放、减轻水环境的污染, 同时还能缓解城市排水管网的超负荷现象, 具有明显的经济效益、社会效益和环境效益。国内外已有很多学者开展了不同程度的污水再生利用研究, 1971 年 Bishop 等人将污水纳入水资源系统进行回用研究<sup>[1]</sup>, 2001 年 Valette 等人将系统动力学模型运用于污水再生利用模拟分析<sup>[2]</sup>, 2003 年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>, 2005 年徐志嫻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>, 2007 年杜鹏飞等

人建立了城市污水回用非线性优化模型<sup>[5]</sup>。本文综合以上研究方法, 结合 GM(1,1)模型, 构建了西安市污水再生回用 SD 模型, 并利用组合模型对西安市污水再生回用发展方案及其对经济发展的影响进行了研究。

## 1 研究区概况

西安市是陕西省的省会, 位于关中平原腹地, 地处秦岭北麓、渭河以南, 属温带半干旱、半湿润大陆性季风气候区。全市多年平均水资源总量为 23.47 万 m<sup>3</sup>, 其中地表水资源量为 19.73 万 m<sup>3</sup>, 多年平均降水量为 740.4 mm, 全市人均拥有地表水资源量不足 350 m<sup>3</sup>/a, 远低于 1 000 m<sup>3</sup>/a 的国际公认临界值。随着城市规模日益扩大, 城市人口迅速膨胀, 缺

收稿日期: 2012-08-05; 修回日期: 2012-08-30

作者简介: 李云排(1988-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 主要从事市政给排水研究。

通讯作者: 周维博(1956-), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士生导师, 从事水资源与水环境及节水灌溉方面的教学与研究工作。

水状况越来越突出,严重制约了社会经济的发展,因而西安市大力发展污水再生回用事业,充分利用城市淡水资源,缓解城市发展危机。截止 2010 年底,全市再生水处理能力达 16 万 m<sup>3</sup>/d,全年新建再生水管道 3.06 km,累计建成 28.86 km,第一、二、三污水处理厂年再生水利用量共计 790 万 m<sup>3</sup>,拥有西安热电有限责任公司等 15 家大型企业用户<sup>[6]</sup>。

## 2 GM(1,1)模型的构建

GM(1,1)模型是基于时间序列的数学模型,它采用“累加”的方法,提高时间序列的有序性,按照累加的序列增长趋势建立灰色因子的预测模型,然后采用“累减”的方法进行逆运算,最后得到预测结果。

首先,设原始时间数列  $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ , 其累加生成序列  $X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$ 。按  $X^{(1)}$  序列建立微分方程模型为:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u$$

上式对应的时间响应函数为:

$$X^{(1)}(t+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a}$$

确定参数  $a, u$  按模型递推,便得到预测的累加序列,进行检验后“累减”便可以得到预测值<sup>[7]</sup>。本文以西安市 2005 - 2010 年的市区人口、GDP、工业总产值为基础数据构建 GM(1,1)模型,并在 MATLAB 中编程计算得到以下预测模型:

$$\text{GDP: } \hat{a}(t+1) = (1 - e^{-0.18345052t}) \times 7747.9619 \times e^{0.18345052t}$$

$$\text{人口: } \hat{x}^{(0)}(t+1) = (1 - e^{-0.01004242t}) \times 53775.026 \times e^{0.01004242t}$$

$$\text{工业总产值: } \hat{x}^{(0)}(t+1) = (1 - e^{-0.20000736t}) \times 7128.8457 \times e^{0.20000736t}$$

## 3 SD 模型的构建

西安市污水再生回用的 SD 模型的构建分为以下几个步骤:①分析问题、确认目标;②分析各变量的因果关系并绘制系统的因果反馈图;③构建系统动力学模型;④检验模型有效性;⑤输入不同的模拟方案;⑥仿真模拟与分析。

### 3.1 模型影响因素分析

西安市污水再生回用系统是一个涉及社会、经济、环境、资源等多重因素的复杂大系统,构建 SD 模型时必须考虑污水回用与这些因素的相互作用,

才能更好地动态分析系统在各时段的变化状态。其主要影响因素详见表 1。

表 1 城市污水回用系统影响因素

影响因素	主要参数	主要指标
社会文化与发展	城市人口	人口自然增长率、城市总人口
	工业产值	工业总产值、工业产值增长速度
水资源开发程度	城市 GDP	城市 GDP 及其增长速度、缺水程度
	水资源开发程度	地表水与地下水开发程度
供水情况	自来水供水	水资源开发程度、城市缺水程度等
	污水回用	城市污水处理量、污水处理投入资金等
需水量	生活需水量	城市人口、人均用水定额
	工业需水量	工业总产值、万元产值用水量、重复利用率
回用水量	工业回用水量	工业回用水率、工业新鲜用水量
	生活回用水量	冲厕用水、冲厕用水定额
	市政回用水量	洗车用水、冲洗道路用水量、绿化用水量等
	其它回用水量	回补地下水量、景观用水量、农业回用水量等

### 3.2 模型中各变量因果关系的分析

在西安市污水再生回用 SD 模型中,社会经济与城市污水再生回用、城市总供水相互联系、相互影响、相互制约。若再生水作为城市供水水源,将使城市总供水量得以增加,能有效缓解城市缺水程度,降低水资源短缺对城市 GDP 的影响,从而使再生水回用工程的投资得到有效保证,污水再生回用量得到提高。因此污水再生回用 SD 模型中存在的主要因果链可表示为:污水回用量  $\uparrow$ ,城市总供水量  $\uparrow$ ,缺水程度  $\downarrow$ ,城市 GDP  $\uparrow$ ,污水二级处理投资  $\uparrow$ ,二级处理量  $\uparrow$ ,污水回用量。根据此因果关系链建立起相关的污水再生回用子系统、污水再生回用需水子系统和城市供需水子系统。

### 3.3 模型的构建

选取其中有代表性的变量建立起上述 3 个子系统 SD 模型,然后以此 3 个子系统为基础,增加相关变量,分析变量之间的定量关系,结合大量历史数据,利用 Vensim 软件构造西安市污水回用 SD 模型,见图 1。

### 3.4 变量关系表达式确定

此模型涉及的关系表达式较多,现主要列出城市 GDP、污水再生回用和二级处理投资有关的方程如下:

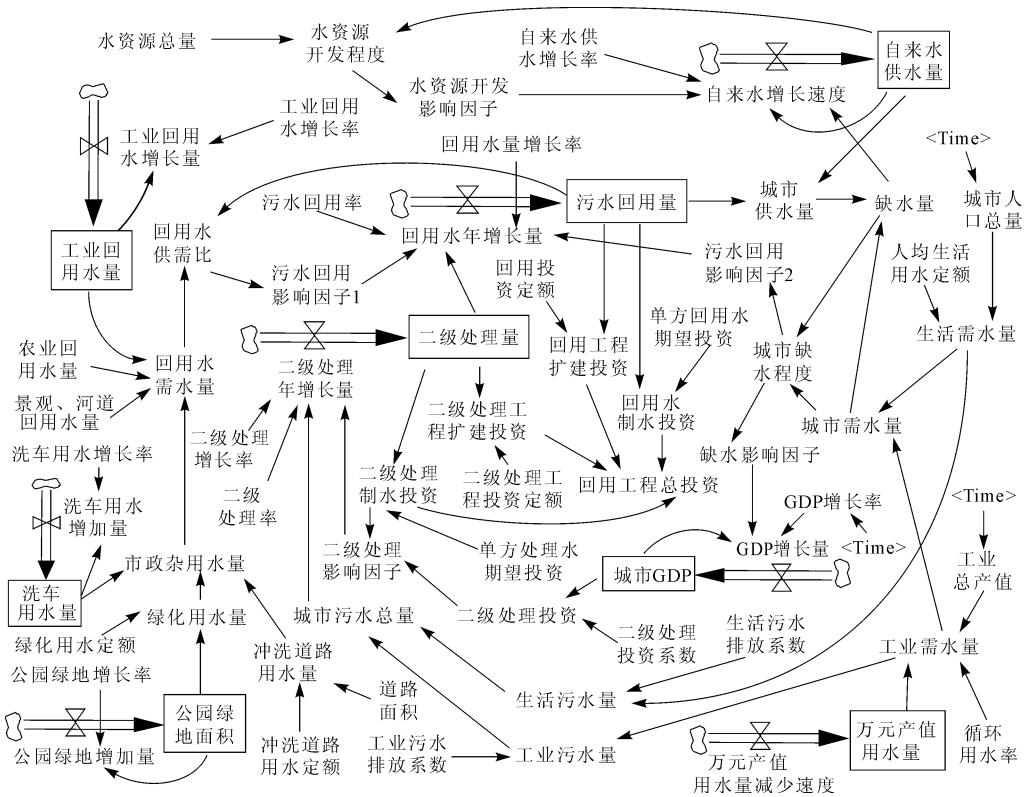


图1 西安市污水再生回用 SD 模型

- (1) 城市污水总量 = 生活污水量 + 工业污水量
- (2) 二级处理制水投资 = 二级处理量 × 单方处理水期望投资
- (3) 二级处理量 = 城市污水总量 × (二级处理率 + 二级处理增长率 × DT) × 二级处理影响因子
- (4) 二级处理影响因子 = IF THEN ELSE(二级处理投资 ≥ 二级处理制水投资, 1, 期望投资/二级处理制水投资)
- (5) 城市 GDP<sub>k</sub> = 城市 GDP<sub>j</sub> + 城市 GDP 增长量
- (6) 城市 GDP 增长量 = 城市 GDP<sub>j</sub> × GDP 增长率 × 缺水影响因子 × DT
- (7) 缺水影响因子 = WITH LOOK UP(城市缺水程度)
- (8) GDP 增长率 = REFERENCE MODE(Time)
- (9) 污水回用量 = 二级处理量 × (污水回用率 + 回用水增长率 × 污水回用影响因子 1 × 污水回用影响因子 2 × DT)

式中:IF THEN ELSE 为条件函数,可用来定义不同条件下的函数形式变化;WITH LOOK UP 为查找函数,表示当自变量在特定的取值范围时,函数输出特定的值;REFERENCE MODE 表示随时间变化的一组输入参数,GM(1,1)模型预测的每个变量的值可用它进行输入;下标 k 表示方程中当前状态,j 表示

前一状态,DT 表示时间长度,本模拟时间步长为 1 年。

### 3.5 模型参数值确定

模拟以 2010 年为基准年,历史数据采用《西安市统计年鉴》(2005 - 2010 年)<sup>[8]</sup>,模拟至 2015 年。模型中的参数和主要变量的初值均采用西安市 2010 年统计数值,部分决策变量的变化率参考《西安市城市污水再生利用规划(2006 - 2020 年)》<sup>[9]</sup>确定。

### 3.6 模型的有效性检验

SD 模型的检验过程可划分为模型的方程检验、量纲检验和历史检验。在建立城市污水再生回用模型的过程中,Vensim 软件已通过方程检验和量纲检验,充分说明模型的结构是可行。因此主要进行模型的历史检验,即将历史参数输入模型进行模拟,计算仿真结果与历史数据的相对误差,验证其吻合的程度,对模型的可靠性和准确性做出判断。由于模型比较复杂,数据较多,因此选用 2005 - 2010 年的西安市城市人口、GDP、工业总产值 3 个参数进行模拟比较,验证模型的有效性,详见表 2。

通过模拟值与实际值的比较,所考察变量的仿真值与历史值基本吻合,且最大误差不超过 3%,满足精度要求,模型具有可靠的有效性,因此可利用已建立的 SD 模型进行仿真模拟。

表 2 实际值与模拟值的比较 亿元, %, 万人

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010
城市 实际值	1313.93	1538.94	1856.63	2318.14	2724.08	3241.69
GDP 模拟值	1313.93	1560.03	1874.21	2252.12	2705.52	3250.43
误差	0.00	1.37	0.95	-2.85	-0.68	0.27
工业 实际值	1308.56	1557.35	1979.86	2388.14	2827.07	3562.88
总产 模拟值	1308.56	1578.23	1928.42	2355.33	2876.26	3513.46
值 误差	0.00	1.34	-2.60	-1.37	1.74	-1.39
城市 实际值	533.21	540.97	549.19	554.73	561.58	562.65
总人 模拟值	533.21	542.83	548.25	553.82	559.33	565.36
口 误差	0.00	0.34	-0.17	-0.16	-0.40	0.48

## 4 系统仿真模拟与分析

在模拟西安市污水回用系统的基本行为时,主要选取对污水回用工程和社会经济影响较大的因素进行方案设计。本文选取污水再生回用增长率、二级处理增长率两个指标作为控制变量,通过调整两种变量的值形成不同的组合方案进行模型仿真模拟。具体方案设计见表 3。输入 4 个方案的决策变量,其他参数保持不变,对 GDP、二级处理量、回用水量、制水成本、工程总投资等进行模拟预测分析,比较不同方案好坏,模拟结果见表 4。

表 3 方案设计 %

方案	设计目标		设计内容	
	二级处理	再生回用	二级处理增长率	回用增长率
a	80	30	1.30	2.85
b	90	45	2.30	4.35
c	100	60	3.30	5.85

表 4 不同方案的模拟结果 亿元, 万 m<sup>3</sup>/a

年份	方案	GDP	二级处理量	回用水量	回用比	工程总投资	总制水成本
2015	a	6403.4	65358.6	10294.2	0.26	3.78	4.48
	b	6624.8	69804.8	16229.6	0.42	5.22	5.21
	c	6676.1	74251.0	22832.2	0.59	7.92	5.98
2020	a	11446.5	77096.3	23128.5	0.55	8.96	6.17
	b	12054.8	86733.4	39030.8	0.93	18.29	7.98
	c	12180.4	96370.4	57822.3	1.38	28.61	10.02

根据 SD 模型预测结果发现:方案 a 的总投资最小,但是城市 GDP、二级处理量和污水回用量都较小,不利于西安市的社会经济和环境的的发展;方案 c 虽然 GDP 增长较快,但是在 2015 - 2020 年期间,工程扩建投资金额占了城市 GDP 的 0.2% 以上,且在 2020 年再生水量超过了预测需水量,造成资源浪费,不利于城市的综合发展;方案 b 的 GDP 增长速度与方案 c 相差不大,但是工程扩建投资仅占城市 GDP 的 0.15% 左右,污水二级处理率和污水再生回

用率也分别达到 90% 和 45%,城市污水能得到很好的处理和再生利用,对整个城市的环境和社会经济发展都非常有利,综合考虑推荐方案 b 为西安市污水再生回用的发展方案。

## 5 结 语

(1) 本研究通过 GM(1,1) 模型得到城市社会经济因素等变量输入到 SD 模型中,大大提高了模型的精度,对研究西安市的污水回用规划具有更好的指导意义。

(2) 对不同方案的仿真模拟发现,西安市污水再生回用事业不能盲目发展,只有合理的发展方案才能有效促进西安市的社会经济和环境的的发展。

(3) 通过对方案 b 的研究发现,2010 - 2015 年受缺水率的影响西安市 GDP 增长速度只能保持在 13% 左右的增长率,基本符合西安市“十二五”规划<sup>[10]</sup>提出的到 2015 年,全市生产总值比 2010 年翻一番,在 2015 - 2020 年期间,城市污水得到很好的再生利用,在一定程度上缓解了城市水资源短缺现状,城市 GDP 仍能以较快速度增长,到 2020 年末,全市生产总值比 2015 年再翻近一番。

### 参考文献:

- [1] Bruce Bishop A, David W Hendrichs. Water reuse systems analysis [J]. Sanitary Engineering Division Proceedings of ASCE, 1971, 97(1):41 - 57.
- [2] Valette F, Xu P, Brissaud F, et al. Technical - economic modeling of water management: wastewater reuse in French island [J]. Water Science Technology, 2001, 43(10):67 - 74.
- [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.
- [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.
- [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.
- [6] 西安市水务局. 2010 西安市水资源公报 [Z]. 西安:西安市水务局,2010.
- [7] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析 [M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [8] 西安市统计局. 西安市统计年鉴 2005 - 2010 [M]. 北京:中国统计出版社,2006 - 2011.
- [9] 西安市市政设计研究院. 西安市城市污水再生利用规划 [R]. 西安:西安市市政设计研究院,2007.
- [10] 西安市发展和改革委员会. 西安市国民经济和社会发展规划第十二个五年规划纲要 [R]. 西安:西安市发展和改革委员会,2011.