

系统动力学模型用于城市需水量预测

刘俊良^{1,2}, 臧景红², 何延青¹

(1. 河北建筑工程学院 城市建设系, 河北 张家口 075024; 2. 哈尔滨工业大学 环保科技股份有限公司博士后工作站, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 将系统动力学方法运用于城市需水量预测,其建立的模型可以全面地考虑各种主要因素对城市需水量的影响,较好地解决社会及经济发展水平等影响城市需水量预测所产生的误差问题。结果表明,应用系统动力学模型预测城市需水量,系统性强,预测结果准确度高。

关键词: 系统动力学; 城市需水量; 预测模型

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2005)06-0031-04

Application of System Dynamics Model for Urban Water Demand Prediction

LIU Jun-liang^{1,2}, ZANG Jing-hong², HE Yan-qing¹

(1. Dept. of Urban Construction, Hebei Institute of Architectural Engineering, Zhangjiakou 075024, China; 2. Post-doctor's Work Station of Environmental Technology Co. Ltd., Harbin Institute of Technology, Harbin 150078, China)

Abstract: System dynamics method was used for urban water demand prediction, the model established was able to give an overall considerations to all factors affecting urban water demand, and give a favorable solution to the errors in prediction of water demand due to social and economic development level. The result shows that application of system dynamics model to predict urban water demand has the advantages of strong systematicness and high accuracy of prediction result.

Key words: system dynamics; urban water demand; prediction model

城市用水量预测在水资源规划和管理中起着非常重要的作用,它是供水决策、投资的重要参考指标。

美国麻省理工学院 Jay W. Forrester 教授于 1956 年创立了系统动力学(简称 SD, System Dynamics),它以现实存在的系统为前提,根据历史数据、实践经验和系统内在的机制关系借助计算机模拟建立起动态仿真模型,对各种影响因素可能引起的系统变化进行试验,从而寻求改善系统行为的机会和途

径,使系统动力学模型成为实际系统的“实验室”^[1,2]。这是一种不需在真实系统上试验,节省人力、物力、财力和时间的科学方法。

1 城市需水量预测模型的建立

1.1 建立仿真模型

① 指标体系

城市需水量预测模型的指标体系见表 1。

② 仿真模型流图

仿真模型流图见图 1。

表1 预测城市需水量仿真模型的指标体系

Tab.1 Variable and parameter system of emulational model for forecasting urban water demand

量	参数
状态变量	城市新鲜水供应总量、节水量、用水人口
速率变量	新鲜水供应总量规划增加率、节水率、人口增长率
辅助变量	新鲜水供应总量实际增加率、建设时间、城市实际新鲜水供应总量、供水紧张程度城市缺水量、城市需水量、人均综合用水定额、污水再生回用量占城市实际新鲜水供应总量的百分比、污水再生回用量
常量	规划时间、管网漏失率、期望节水量、实施时间、人口增长系数、污水排放系数、污水处理率、污水再生回用率

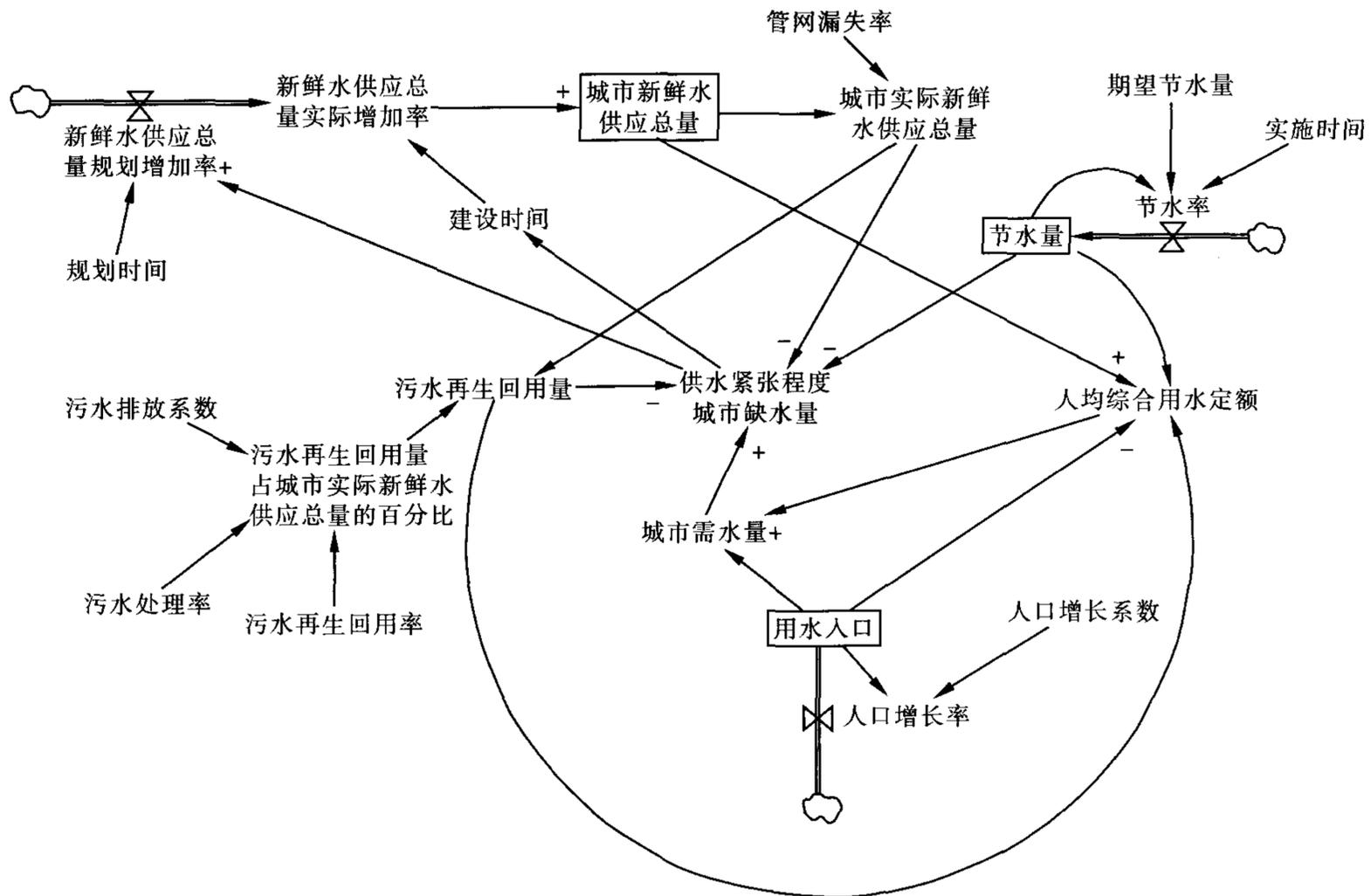


图1 预测城市需水量仿真模型流图

Fig.1 Flow chart of emulational model for forecasting urban water demand

③ 模型涉及到的主要方程

流图只说明了系统中各变量间的逻辑关系与系统构造,并不能显示其定量关系,为此需要建立系统动力学方程。

a. 城市新鲜水供应系统

新鲜水供应总量规划增加率 = 供水紧张程度城市缺水量 / 规划时间

新鲜水供应总量实际增加率 = DELAY3 (规划增加率, 建设时间)

建设时间 = 供水紧张程度城市缺水量 / 每年通过建设增加的城市供水量

城市新鲜水供应总量 = INTEG (新鲜水供应总量实际增加率, 城市新鲜水供应总量的初始值)

城市实际新鲜水供应总量 = 城市新鲜水供应总量 × (1 - 管网漏失率)

b. 人口和城市需水系统

人均综合用水定额 = (城市新鲜水供应总量 + 节水量 + 污水再生回用量) / 用水人口

城市需水量 = 人均综合用水定额 × 用水人口

用水人口 = INTEG (人口增长率, 用水人口的初始值)

人口增长率 = 人口增长系数 × 用水人口

c. 节水系统

节水量 = INTEG (节水率, 节水量的初始值)

节水率 = (期望节水量 - 节水量) / 实施时间

d. 污水再生回用系统

污水再生回用量占城市实际新鲜水供应总量的百分比 = 污水排放系数 × 污水处理率 × 污水再生回用率

污水再生回用量 = 城市实际新鲜水供应总量 × 污水再生回用量占城市实际新鲜水供应总量的百分比

e. 各子系统间的连接

供水紧张程度城市缺水量 = 城市需水量 - 城市实际新鲜水供应总量 - 污水再生回用量 - 节水量

1.2 模型的检验与评估

① 模型的合理、有效性检验

将由前面主要方程所建立的系统动力学模型用计算机语言表达后上机运行,应用 Vensim 软件所提供的编译检错和跟踪功能检验了模型的表达正确性,由观测运行结果判断了模型的合理性。把河北省 11 个省辖市 1991 年—2001 年的系统状态变量的仿真值与历史统计数据进行比较,得到二者拟合程度较好的结论,从而验证了模型的有效性。例如,该 11 个省辖市城市新鲜水供应总量 2001 年为 $1\ 302.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,模型以其 1991 年的供水总量 ($1\ 130.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 为初始值进行仿真模拟,模拟后的 2001 年供水总量值为 $1\ 260.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,相对误差为 3.28%,在 5% 以内,所以拟合程度良好。

② 结构和参数灵敏度检验

通过变化模型方程和模型参数值,得知这种变化对模型行为的影响很小,而且在特定干扰和随机干扰下,系统都能实现特定的目标,从而对模型进行了结构和参数灵敏度检验。

③ 方程式极端条件检验

为了了解模型的非线性特性和揭露模型中的弱点,对模型中各方程式在其变量的可能变化的极端条件下进行检验,特别是对速率方程严格进行极端条件的检验,发现模型中各方程式仍然有意义,可知模型中的每一个方程都是“强壮”的,从而验证了模型的“强壮性”。例如,检验人口增长率方程,它等于人口增长系数乘以用水人口,模型仿真时取人口增长系数为河北省 11 个省辖市 1991 年—2001 年的平均值(为 0.041),假如把其值定为 1,也就是假设每年人口都成倍增长,可发现方程人口增长率(万人) = 人口增长系数 × 用水人口(万人)仍有意义。

④ 极端条件下的模拟

该步骤主要是检查在极端条件下或极端的政策下的模型行为是否合理。系统动力学认为,虽然极端条件下的模拟结果在实际系统中未必会产生,然而此检验对提高系统动力学模型的有效度和信度很有意义。一个模型若在极端条件下不能产生合理、合乎逻辑的行为模式,其可靠性就值得怀疑。由于建模目的是预测城市需水量,所以可观察城市需水量在人口增长系数设定为 1 的极端条件下的变化。当人口增长系数为 0.041 时城市需水量为 $1\ 357.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,当其取值为 1 时城市需水量仍为 $1\ 325.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。所以该模型在极端条件下的模拟仍可产生合理的行为模式,这一步也同时进行了参数灵敏度检验。

2 仿真结果分析

运用模型对河北省 11 个省辖市的城市需水量进行仿真预测,该模型所选参数如下:每年通过建设增加的城市供水量为 $1\ 825 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$;城市新鲜水供应总量的初始值为 $412\ 669 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$;用水人口的初始值(即预测起始年份 1991 年的用水人口)为 794.9 万人;节水量的初始值为 $15\ 805.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

根据《河北省城市供水、节水和污水处理“十五”计划及 2010 年远景目标规划(纲要)》,确定了污水排放系数、污水处理率、污水再生回用率、人口增长系数、期望节水量和管网漏失率等几项指标的参数值。

2.1 仿真结果

根据以上参数值以 1991 年为初始年拟合了 2001 年的城市需水量,并预测了 2010 年、2020 年、2030 年的值,由于模型的基本结构是具有因果关系的一阶反馈回路,在对城市需水量预测的同时,也得到了其他一些重要变量的变化情况。但根据系统动力学建模原理,预测精确度最高的仍是城市需水量,其他变量只可在结果分析时作为参考。具体结果如表 2 所示。

从表 2 可知,2001 年—2020 年间用水需求量快速增长,平均达到 $91.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,但当人民生活水平和经济发展到一定阶段后,受当地各种资源和自然环境承载力的约束,其发展速度会逐渐变缓,故其需水量也呈缓慢增长态势,2020 年—2030 年间只增长了 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

表2 城市需水量预测仿真模型的仿真结果
Tab.2 Results of emulational model for forecasting urban water demand

指标	1991年	2001年	2010年	2020年	2030年
污水排放系数		0.80	0.75	0.70	0.65
污水处理率		0.75	0.85	0.90	0.92
污水再生回用率		0.05	0.20	0.30	0.35
人口增长系数		0.041 0	0.026 8	0.019 2	0.019 2
期望节水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)		28 938.1	35 000.0	40 000.0	45 000.0
管网漏失率		0.133	0.120	0.110	0.090
人均综合用水定额/ ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	552.53	414.66	406.32	405.98	338.36
城市新鲜水供应总量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	1 130.6	1 260.2	1 253.6	1 246.7	1 228.2
城市缺水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	150.4	167.6	150.4	137.1	110.5
城市需水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	1 203.3	1 357.9	1 469.9	1 540.8	1 555.3

人均综合用水定额在2001年—2020年间基本上不变,在2020年—2030年间缓慢降低。可见虽然随着人们生活水平的提高和经济的发展人均用水需求会越来越大,但在大力开展需水管理后,提高了用水效率,加强了水资源合理使用,所以其人均用水定额不仅不增长,反而会呈下降趋势。美国研究人员认为,实施全国节水后,城市人均用水量为 $125 \text{ m}^3/\text{a}$ 便可满足生活、工业和商业用水。预测河北省2030年人均综合用水定额为 $338.36 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$,所以还要加强水资源的合理利用。

2.2 模型的改进和创新

由于建模过程中,有些数据很难搜集(如城市社会总产值、供水紧张程度对产值增长的影响、社会投资对供水量增长的影响等),所以上述系统动力学建模过程中没有考虑这些因素。如果能获得这些数据,则建议改进模型(见图2)。

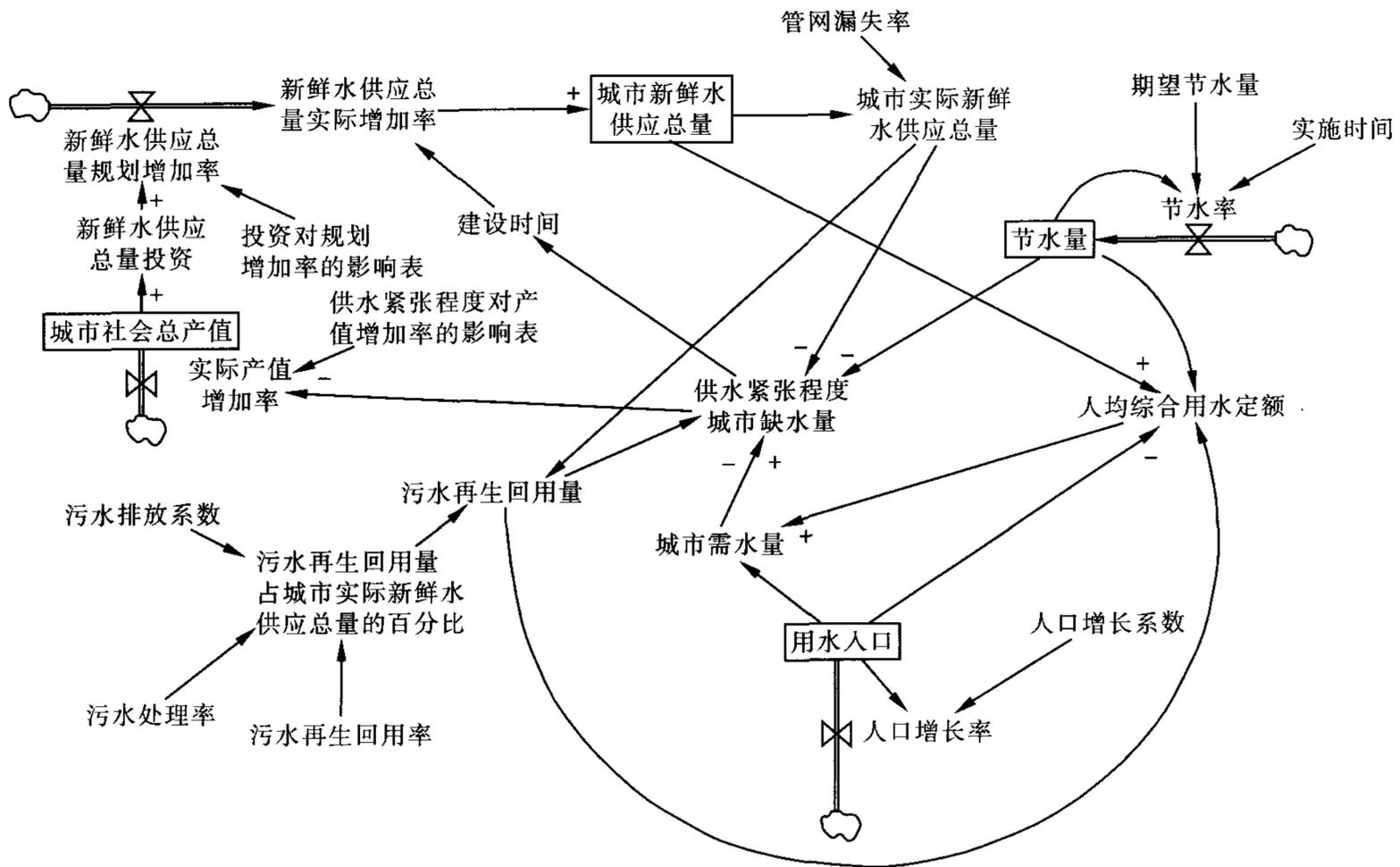


图2 城市需水量预测改进仿真模型流图

Fig.2 Flow chart of improved emulational model for forecasting urban water demand

3 结论

用系统动力学方法建立了城市需水量预测仿真模型,并对河北省11个省辖市的城市需水量进行了预测。从而为水资源的科学管理提供依据,促进用水合理化,保持水资源可持续发展。

参考文献:

- [1] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [2] 杨建强,罗先香. 水资源可持续利用的系统动力学仿真研究[J]. 城市环境与城市生态,1999,12(4)26-29.

E-mail: junliangliu@etang.com
收稿日期:2005-01-10