

我国城市水环境产业发展规模和市场容量的 SD 模型

褚俊英,陈吉宁,邹骥 (清华大学环境科学与工程系,北京 100084, E-mail:jjin@263.net)

摘要:采用 SD 方法,建立了城市水环境产业与人口、经济、资源和环境之间相互关系的动态、非线性模型 (SDMU WEIC),在不确定分析基础上,预测了未来城市水环境产业的发展规模、市场容量和市场结构,表明城市水环境产业将为建筑、通用机械设备和水处理专用设备等提供广阔的市场,从而促进消费,带动国民经济其他行业的发展。本文还进一步预测了不同城市人口比例和水价增长速度,对城市水环境产业发展的影响。

关键词:水环境产业;SD 模型;发展规模;市场容量;市场结构

中图分类号:X196 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2002)04-07-0001

Future Scale and Market Capacity of Urban Water Environmental Infrastructure in China: A System Dynamic Model

Chu Junying, Chen Jining, Zou Ji (Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, E-mail:jjin@263.net)

Abstract: With the application of system dynamics, a dynamic, nonlinear model (SDMU WEIC) was developed in this paper in order to reflect the relationships of population, economic, resources and environment. Through a systematic procedure of model validation and uncertainty analysis, the model was applied for predicting and analyzing the future market capacity and constituents of urban water infrastructure. It illustrated the volumes and trends of potential capital market in construction, general mechanical equipments and water treatment instruments as well as their relevant influencing factors including water pricing and urbanization rate. Several different scenarios were further under test to reveal the sensitivity of different uncertain components.

Keywords: urban water environmental infrastructure; system dynamic; future market capacity; market structure

随着城市水环境危机的不断加重,以城市给水和排水为核心的城市水环境产业在国民经济和社会发展中的基础和关键性作用日益突出。本文旨在利用系统动力学 (System Dynamic, SD) 自身的优势,建立非线性的产业发展动态模型,即中国城市水环境产业系统动力学模型 (System Dynamic Model of Urban Water Environmental Industries In China, SDMU WEIC),并结合不确定性分析方法,系统地分析城市水环境产业与人口、经济、资源和环境之间关系和未来的发展趋势,这将对正确认识我国水环境产业的发展特点、制定合理的政策提供理论基础。

1 研究方法

SD 方法是由美国麻省理工学院教授

Forrester 在 60 年代创立的,该方法的突出特点是注重系统内部结构和反馈机制,即一种因素的改变可能对其他因素构成影响,并通过反馈影响到初始变量。该方法可综合运用定量、定性、综合和推理方法,应用于开放性、非线性及多反馈的复杂时变系统的模拟,当前广泛应用于城市发展模式模拟^[1]、企业发展决策^[2]以及战争过程模拟^[3]等方面。

然而,该方法也存在一定的局限性。SD 模型数据需求量较大,在数据、信息量较少的情况下难以适用;SD 方法还要求对系统组成及其作

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70073040)

作者简介:褚俊英(1976~),女,博士生,主要研究方向为环境产业发展研究。

收稿日期:2001-05-09;修订日期:2001-08-31

用关系有清晰的认识,建立明确的数学关系表达,对于高度复杂的系统,这种关系往往难以识别.此外,SD模型的参数估计往往偏于经验性.为此,对于城市水环境产业这样一个复杂多变、数据稀疏的系统,建立合理的、置信度较高的模型也必然成为难点.

为解决上述难点,一方面,本文将研究范围缩小到数据相对较多、地位比较突出的市政给水和排水领域,并着眼于市政给水厂和污水厂的建设和运营;另一方面,也更为重要的,本文在SD方法基础上增加了不确定性分析的内容.通常,导致模型不确定性的因素包括初始条件的不确定性、模型参数的不确定性、模型结构的不确定性和未来预测的不确定性^[4].其中,初始条件不确定性和结构不确定性在SD建模过程中可逐步识别,而参数不确定性通常被忽略.对于参数不确定的识别,本文采用蒙特卡罗方法^[5]随机大量取样,并通过HSY算法^[4,6]进行参数选择和灵敏度分析,并在其基础上进行预测.

2 模型的基本结构

对系统基本结构和基本行为的认识和把握是建立SD模型的关键.SDMUWEIC以市政给水量和污水处理量作为模型主要变量,注重供需之间的作用关系,同时考虑收入、价格、资源、资金等因素对系统的影响.该模型数据的主要来源是《中国城市建设统计年报》、《水资源公报》、《中国统计年鉴》及其它相关文献资料.

MUWEIC共涉及7个水平变量、51个辅助变量、8个速率变量、9个表函数以及23个常数(参数),整个模型共有12个反馈环,其中负反馈有5个.为了增强可识别性和系统性,模型可分为4个子系统,即市政生活需水子系统、市政工业需水子系统、市政给排水子系统(又可细分为市政给水子系统和市政排水子系统)和市场容量子系统,如图1所示.下文将对各个子系统的主要因果关系进行分析.

2.1 市政生活需水子系统

市政生活需水子系统的因果关系如图2所示.市政生活用水通常既包括居民用水又包括城市公共用水.用水人口和人均生活用水需求

的增长都将导致市政生活用水需求的增加.其中,用水人口受到总人口和城市化进程的影响,人均生活用水需求仅考虑居民收入弹性和价格弹性的影响^[7].一般,居民收入增加将使得淋浴设备更为普及、洗车用水增加等,造成人均生活用水需求增加;水价的提高,将刺激企业和居民分别为降低生产成本和消费支出进行节水,人均生活用水需求相应减少,因此,人均生活用水需求在这种增加与减少中取得动态平衡.

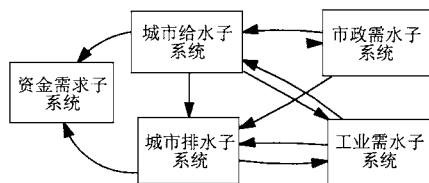


图1 MUWEIC的基本结构关系

Fig.1 The basic structure of MUWEIC



图2 市政生活需水子系统因果关系

Fig.2 Causal diagram of municipal water demand subsystem

2.2 市政工业需水子系统

市政工业需水子系统的因果关系如图3所示.市政工业用水需求与工业增加值和工业万元增加值用水需求这2个变量相关^[8].其中,工业增加值通过GDP和工业增加值占GDP的比例得出,GDP的增加受到给水和排水不足的制约.随着经济结构的调整和改善,工业用水重复利用和管理水平的提高,工业万元增加值用水需求减少趋势明显.

2.3 市政给排水子系统

市政给排水子系统的因果关系如图4所

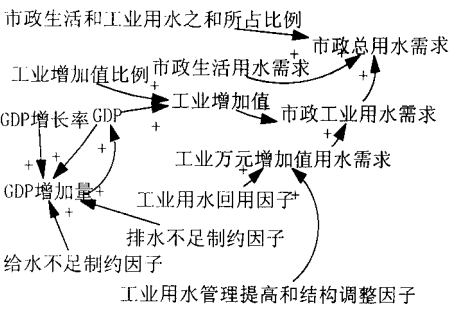


图 3 市政工业需水子系统因果关系

Fig. 3 Causal diagram of industry water demand subsystem

示.市政给水能力的增加受到水资源总量、可得难易程度以及经济发展水平的影响.市政给水量既受到给水能力又受到总用水需求的限制.城市污水处理能力的增加与现有污水处理能力、经济发展水平以及期望污水处理率相关.

2.4 市场容量子系统

随着城市水环境产业的发展,城市给水厂和污水厂的建设和运行将产生巨大的资金需求,形成一定的资本市场容量,如图 5 所示.

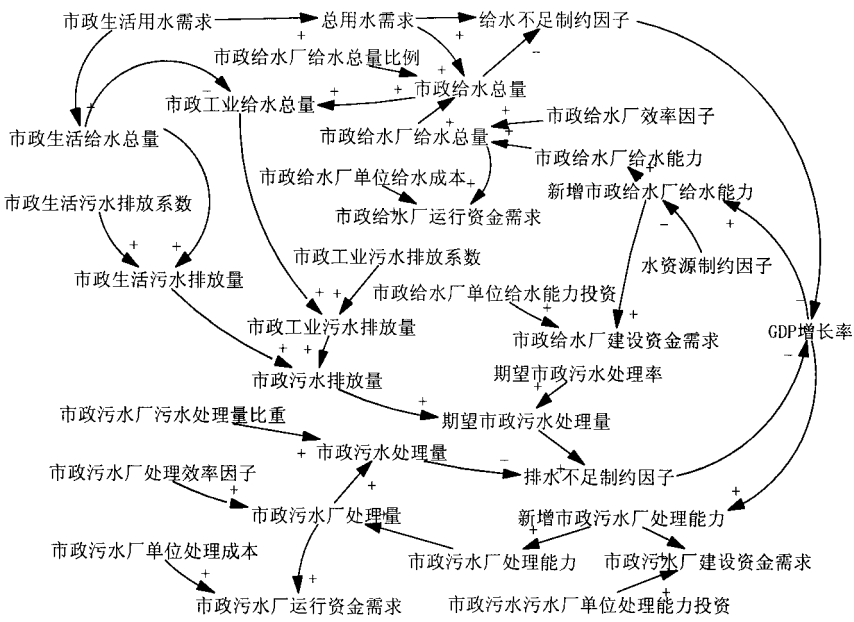


图 4 市政给排水子系统因果关系

Fig. 4 Causal diagram of urban water supply and wastewater treatment subsystem

的机械、建筑等行业的产品和服务需求,拉动经济的增长.建设资本市场还可细分土建费、自控费、通用设备费、专用设备费、技术费和其他费用[9]等,其比例关系形成一定的资本市场结构.另一方面,随着城市水环境产业资本的不断积累,其运行、维护费用等组成的运行资本市场也将占有举足轻重的地位.由于数据的不充分性,水环境产业管网改造费用、乡镇的城市化将现有乡镇设施转化为市政水环境产业而并未增添新厂的情况在模型中未予以考虑.

3 参数识别、灵敏度分析与模型验证

传统 SD 模型参数识别,主要包括计量经济学回归方法、经验估值、专家调研等方法.其中,

一方面,城市水环境产业的建设资金需求构成建设资本市场容量,将增加与其密切相关

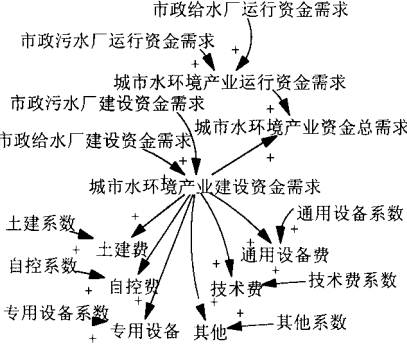


图 5 市场容量子系统

Fig. 5 Causal diagram of market capacity subsystem

计量经济学方法往往仅适用于线性系统或能转化为线性系统的非线性系统,后 2 种方法的应用则具有较大的主观性.对于灵敏度分析,SD 模型通常的做法是人工调节其中某个参数,通过目标函数值和参数的相对变化程度来确定参数的灵敏性,在参数较多情况下,该方法不仅繁琐,也缺乏一定的科学性.

本文借助不确定性分析的思想,采用 HSY 算法进行参数识别和灵敏度分析.首先,根据建模的目的,确定有多个变量组成的加权目标函

数,并确定可接受的目标函数上下限.其次,将模型参数在初始确定范围内利用蒙特卡罗方法随机大量取样,分别存储可接受和不可接受参数,可求得可接受参数分布.最后,利用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)法对可接受和不可接受参数矩阵进行分析,可得到参数灵敏度排序.

模型主要参数分布特征和灵敏度排序如表 1 所示,可以看出,可识别性最强和灵敏度最大参数都与城市人口相关,也说明了该变量在本模型的重要政策意义.

表 1 SDMUWEIC 主要参数分布特征和灵敏度¹⁾

Table 1 Distributional characters and sensitivities of major parameters in SDMUWEIC

自变量	均值	方差	方差/均值	识别性	d/d^*	灵敏度
自然增长率系数 1	44.88	0.24	0.01	2	0.91	1
自然增长率系数 2	- 0.02	0.00	0.00	1	0.61	7
市政污水厂处理效率因子	0.73	0.02	0.03	4	0.70	4
市政污水厂单位污水处理能力投资	1594.91	225.75	0.14	6	0.86	2
市政给水厂单位给水能力投资	1393.65	229.50	0.16	7	0.68	5
市政给水厂处理效率因子	0.75	0.16	0.21	8	0.50	8
市政生活污水排放系数	0.90	0.03	0.03	4	0.62	6
市政工业污水排放系数	0.84	0.01	0.01	2	0.77	3

1) d 为可接受参数概率分布与不可接受参数概率分布的最大距离; d^* 为 90 %置信区间的 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 检验距离.

模型验证是模型应用的基础和前提.通常,SD 模型验证的方法包括边界正确性检验、结构评估、量纲一致性检验、极端条件检验和历史数据验证等^[2].由于上述一些检验方法在建模过程中已得到验证,本文仅采用最后一种验证方法,将模拟变量与历史数据比较进行.通常,验证指标包括平均绝对误差(MAE)、平均相对误

差(MAPE)和 R_2 等.本文选用 MAPE 对“市政给水总量”和“市政污水处理能力”2 个主要变量进行验证,具体结果如表 2 所示.可见,MAPE 基本在可接受范围之内(绝对值不足 15 %),正负交替现象表明无系统性正负偏差出现,故模型结构和参数具有一定的可信度.

4 情景分析与结果讨论

表 2 SDMUWEIC 主要变量的相对误差和平均相对误差

Table 2 APE and MAPE of major variables in SDMUWEIC

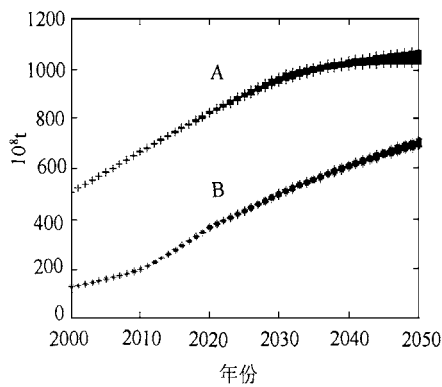
变量	APE/ %									MAPE/ %
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	
市政给水总量	1.81	0.96	1.19	1.40	- 3.29	- 1.59	- 0.30	- 4.21	- 4.25	- 0.92
市政污水处理能力	1.14	2.75	2.34	- 14.26	- 5.47	0.77	8.12	3.20	- 10.45	- 1.65

4.1 模型预测结果

市政给水量和污水处理量的预测结果曲线如图 6 所示.随着时间的推进,预测的不确定性也逐渐增大.在 2030 年以前,2 条曲线上升较快,2030 年以后逐渐趋向平缓,造成这种现象

的主要原因包括水价的逐步调整利于居民节水、经济结构调整趋向合理、工业重复利用率提高以及城市人口增长缓慢等方面.

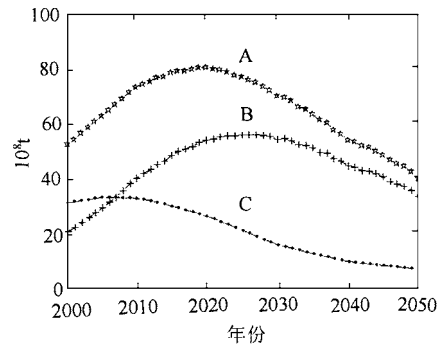
市政给水厂和污水厂建设资本市场容量的年均值曲线如图 7 所示.可以看出,3 条曲线都



A. 市政给水量 B. 市政污水处理量

图 6 市政给水量和污水处理量预测结果

Fig.6 Prediction on volumes of municipal water supply and wastewater treatment



A. 市政污水厂和给水厂总资本市场容量年均值
B. 市政污水厂资本市场容量年均值
C. 市政给水厂资本市场容量年均值

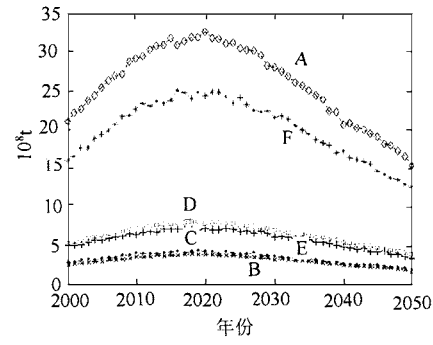
图 7 市政污水厂和给水厂资本市场容量预测结果

Fig.7 Predictions on potential capital market of municipal water supply plants and wastewater treatment plants

出现了先升后降的趋势,市政给水厂、污水厂及总的建设资本市场容量转折点分别出现在 2008、2025 和 2020 年,这说明 2030 年前期是我国市政水环境产业建设资本市场形成的关键阶段,随着经济发展和人口增长的趋向缓和,市政水环境产业建设资本市场逐渐趋向饱和,年均值最高接近 80 亿元.此外,在 2005 年与 2010 年之间,市政污水厂的建设资本市场容量将超过给水厂.

根据市政给水厂和污水厂的现有状况,考虑到项目规模、处理方法以及所处地域的关系,建设资金各部分所占比例通常在一定的范围内

如表 3 所示^[9],预测未来建设资金的需求结构如图 8 所示.从一定意义上,未来市政给水厂和污水厂的建设,将为建筑、水泵、风机等通用机械设备以及脱水机、刮泥机等水处理专用设备提供广阔的需求市场,促进消费,带动建筑、电机、机械及其他行业的发展.

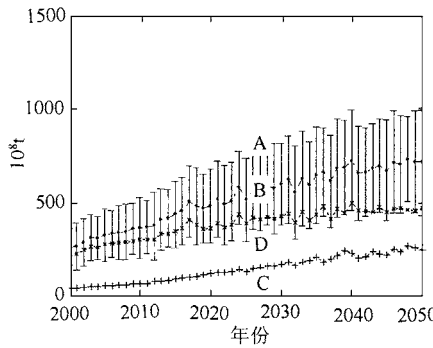


A. 土建市场容量年均值 B. 自控设备市场容量年均值
C. 通用设备市场容量年均值 D. 专用设备市场容量年均值
E. 技术市场容量年均值 F. 其他市场容量年均值

图 8 市政污水厂和给水厂资本市场结构预测

Fig.8 Trends of potential capital market structure with municipal water supply plants and wastewater treatment plants

随着市政给水厂和污水厂处理能力的不断增加,其运行资金需求相当可观,如图9.运行



A. 总运行资金需求年均值范围 B. 总运行资金需求年均值
C. 污水厂运行资金需求年均值 D. 给水厂运行资金需求年均值

图 9 市政污水厂和给水厂运行资金需求预测

Fig.9 Predictions of operational finance demand of municipal water supply plants and wastewater treatment plants

资金年均值呈现上升趋势,数量远远大于资本市场容量,从 2000 年到 2050 年,市政给水厂和污水厂的运行总资金需求量年均值从 260 亿元上升为 760 亿元.巨大的资金需求对现有市政

水环境产业的融资方式和管理体制提出挑战, 外私人资本的合理进入已成为关注的焦点. 探索政府与市场相结合的融资方式, 推动国内 点^[10,11].

表 3 市政给水厂和污水厂建设资本市场组成

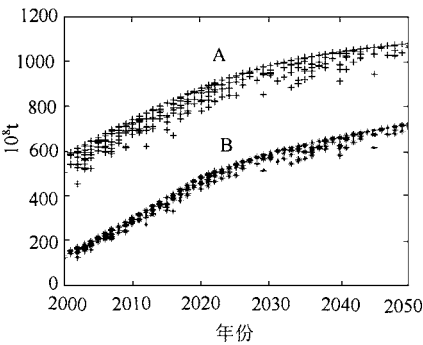
Table 3 Constituents of potential capital market of municipal water supply plants and wastewater treatment plants						
类别	土建费	自控设备	通用设备	专用设备	技术费	其他费
系数/ %	33 ~ 47	3.5 ~ 6.0	6.0 ~ 12.0	8.5 ~ 11.5	3 ~ 4.5	27.5 ~ 38.5

4.2 城市人口比例影响分析

未来城市人口比例范围如表 4 所示. 在该范围内正态随机取样, 预测结果见图 10. 从整体上看, 市政给水量和污水处理量年均值相对于原有状况有所增大, 预测的不确定性也随之增加. 建设和运行资金需求平均增大 7 % ~ 10 %, 如图 11 所示. 因此, 城市化进程的加快, 将增大城市水环境产业的需求, 推动产业发展.

表 4 城市人口比例变动范围

Table 4 Range of urbanization rate			
年份	2000	2010	2050
比例/ %	32 ~ 42	40 ~ 50	60 ~ 70

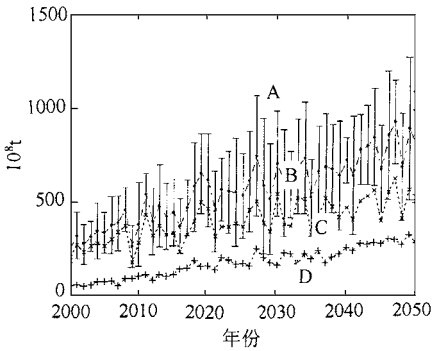


A. 市政给水量 B. 市政污水处理量
图 10 城市人口比例不确定条件下市政给水量和污水处理量预测

Fig.10 Prediction on outputs of municipal water supply and wastewater treatment under uncertain urbanization rate

4.3 水价增长率影响分析

水价增长率的变动范围如表 5 所示, 其合理性判断的一个重要标准是居民的承受能力, 如图 12 所示. 水价占居民收入的比例, 基本呈现下降趋势, 并在 2010 ~ 2020 年之间达到最大, 但仍然不足 1.5 %, 一般而言, 居民可以承受.

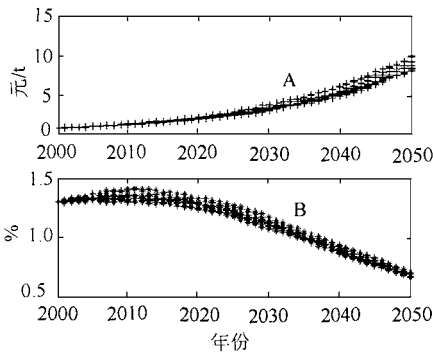


A. 总运行资金需求年均值范围 B. 总运行资金需求年均值
C. 污水厂运行资金需求年均值 D. 给水厂运行资金需求年均值
图 11 城市人口比例不确定条件下市政污水厂和给水厂运行资金需求预测

Fig.11 Predictions on operational finance demand of municipal water supply plants and wastewater treatment plants under uncertain urbanization rate

表 5 市政生活水价增长率范围

Table 5 Range of municipal water price increase rates			
年份	2000	2010	2050
增长率/ %	2 ~ 4	4 ~ 6	4 ~ 6

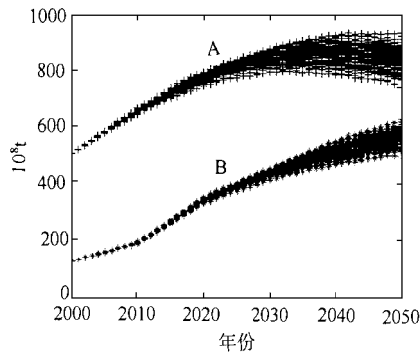


A: 水价; B: 水价占居民收入的百分比
图 12 水价及其占居民收入的百分比

Fig.12 Municipal water prices and the proportions of water expenditure to municipal income

由于水价的提高, 如图 13 所示, 市政给水量和污水处理量在 2010 ~ 2050 年明显减少, 到

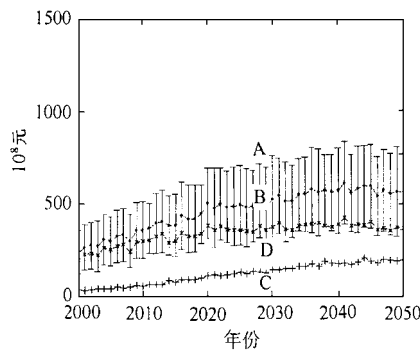
2050 年,两者需求分别减少 30 %和 20 %左右,相当于节水 220 亿 t 和减少污水处理量 150 亿 t.同时,市政给水厂和污水厂的运行资金需求将有所减少,如图 14 所示.因此,合理的水价是刺激城市水环境产业良性发展的灵活、有效的手段.通常水价的制定应公平有效,有利于促进水资源的可持续利用.本文在有效需求、融资、水资源等因素综合权衡的基础上,认为未来年份水价的年增长率在 4 %~6 %较为适宜.



A. 市政给水量 B. 市政污水处理量

图 13 水价增长率不确定条件下市政给水量和污水处理量预测

Fig.13 Prediction on outputs of municipal water supply and waste water treatment under uncertain municipal water price increase rate



A. 总运行资金需求年均值范围 B.总运行资金需求年均值
C.污水厂运行资金需求年均值 D.给水厂运行资金需求年均值

图 14 水价增长率不确定性下市政污水厂和给水厂运行资金需求预测

Fig.14 Prediction on operational finance demand of municipal water supply plants and wastewater treatment plants under uncertain municipal water price increase rate

势和市场容量预测结果如表 6 所示.

表 6 市政给水量和污水处理量以及资本市场容量预测¹⁾

Table 6 Prediction on outputs and market capacity of municipal water supply and waste water treatment						
年份		2010	2020	2030	2040	2050
建设资金均值 / 亿元	A	74.0	80.2	69.6	53.4	39.7
	B	91.6	91.3	71.6	53.1	39.2
	C	60.4	64.8	50.1	36.5	25.6
运行资金均值 / 亿元	A	368.6	484.9	621.5	730.5	762.5
	B	376.6	615.7	705.3	727.6	802.5
	C	358.4	500.9	521.9	568.1	560.6
总资金均值 / 亿元	A	442.6	565.1	691.1	783.9	802.1
	B	468.2	707.0	776.9	780.7	841.7
	C	418.8	565.7	572.0	604.6	586.1
市政给水量均值 / 亿 t	A	667.2	827.0	965.6	1032.1	1064.5
	B	719.3	857.8	964.8	1011.0	1079.7
	C	653.9	774.5	847.1	860.1	841.3
市政污水处理量均值 / 亿 t	A	192.8	341.9	503.2	642.5	747.5
	B	338.6	570.0	789.1	965.6	1083.8
	C	186.7	314.7	435.7	526.6	591.5

1) A. 模型预测结果 B. 未来城市人口比例不确定性下预测结果 C. 未来水价增长率不确定性下的预测结果

参考文献:

- 1 Jay W Forrester. Urban Dynamics. London: The MIT Press, 1969.38 ~ 115.
- 2 John D Sterman. Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/ McGraw Hill, 2000.407 ~ 843.
- 3 Wang Keding, Huang Zili. The Sysytem Dynamics (SD) is used for researching on battle simulation. Journal of System and Systems Engineering, 2000, 9(3): 367 ~ 372.
- 4 Beck M B. Water Quality Modeling: A Review of The Analysis of Uncertainty. Water Resources Research, 1987, 23(8): 1393 ~ 1442.
- 5 徐钟济. 蒙特卡罗方法. 上海: 山海科学技术出版社, 1985. 1 ~ 29.
- 6 Chen J, Beck M B. Quality Assurance of Multi-Media Model for Predictive Screening Tasks. USA: Environmental Protection Agency, 1999.3 ~ 58.
- 7 胡连起, 张悦. 城市家庭需水量管理参数分析. 中国给水排水, 1999, 15(7): 27 ~ 29.
- 8 Vaughan C Jones, Hohn J Boland, James E Crews, C Frederick De Kay, John R Morris. Municipal Water Demand: Statistical and Management Issues. Boulder, Colo: Westview Press, 1984.61 ~ 96.
- 9 王凯军, 王晓惠. 中国水工业的水处理技术和设备的产业化分析. 给水排水, 1997, 25(6): 71 ~ 73.
- 10 K T Yeo, Robert L K Tiong. Positive Management of Differences for Risk Reduction in BOT Projects. International Journal of Project Management, 2000, 18: 257 ~ 265.
- 11 John C Wise. A Guidebook of Financial Tools. USA: Environmental Protection Agency, 1994.1 ~ 178.

综上, 3 种情况下城市水环境产业发展趋