

文章编号:1001-5485(2010)06-0010-04

基于系统动力学的节水型城市激励机制研究

何力,刘丹,黄薇

(长江科学院 水资源综合利用研究所,武汉 430010)

摘要:随着供用水矛盾的日益突出,城市大量挤占农村和生态环境用水,从缓解供用水矛盾、改善生态环境的角度看,开展节水型城市建设势在必行。利用系统动力学方法仿真模拟天津市2005-2030年在基本方案、产业结构调整、水价调控、定额调整、城市非常规水源利用、综合节水等不同模式下的水资源供需状况,以定量分析方法确定各激励机制的节水效应,为进一步完善天津市节水型城市建设管理模式提供参考。

关键词:系统动力学;节水型城市;激励机制;仿真模拟

中图分类号:TV21

文献标识码:A

1 概述

节水型城市是指一个城市通过对用水和节水的科学预测和规划,调整用水结构,加强用水管理,合理配置、开发、利用水资源,形成科学的用水体系,使其社会、经济活动所需用的水量控制在本地自然界提供的,或者当代科学技术水平能达到或可得到的水资源的量的范围内,并使水资源得到有效地保护^[1]。随着城市供用水矛盾的日益凸显,城市挤占农业和生态用水的现象越来越严重,从保证城镇供水、改善生态环境的角度出发,各城市纷纷开展节水型城市建设,先后建立起一批国家级的节水型城市,取得了明显的节水效果,积累了一定的实践经验。

目前有关节水型城市建设的研究主要集中在经验总结和激励机制的定性分析方面^[1-5]。本文以天津市为例,运用系统动力学方法,通过系统仿真模拟,定量分析天津市节水型城市建设各种激励机制的节水效应,为完善其节水型城市建设的管理模式提供参考。

2 系统动力学方法

系统动力学(system dynamics,简称SD)是一种将结构、功能和历史相结合,以反馈控制理论为基

础,借助计算机进行仿真模拟,定量地研究高阶次、非线性、多重反馈复杂时变系统的系统分析理论和方法。它以反馈回路来描述系统的结构,把一阶反馈回路作为系统模型的基本结构或基本单元;可以较好地把握系统的各种反馈关系,将系统与环境、系统内部各子系统之间相互作用的复杂关系通过一系列微分过程和函数关系加以表述,从而实现对系统结构、功能乃至发展趋势进行模拟和预测。系统动力学模型从本质上看是带时间滞后的一阶差微分方程,由于建模时借助于“因果分析图”和“流图”,其中“积量”、“流率”和其它辅助变量都具有明显的物理意义。其主要概念就是以一种宏观的角度来思考、解决问题,避免因微观的角度而局限于片段的思考,并且透过仿真的方式来探讨问题,由不同的变量与情境来观察其结果的变化,以达到分析问题的目的。系统动力学与其它分析工具最大的不同点在于它具备处理非线性、信息回馈、时间滞延、动态复杂性问题的能力^[6,7]。其建模的主要技术路线为:

(1) 系统分析。确定建模目的,划定系统边界。

(2) 结构分析。变量定义,确定流位变量和流率变量,进行反馈结构分析。系统动力学的主要变量有:表示积累效应的变量称为流位变量(L);表示积累效应变化快慢的变化速度变量称为流率变量(R);从积累效应变量到变化速度变量及变化速度之间的中间变量称为辅助变量(A)。

(3) 建立模型。建立方程,构建因果关系图和

①建设部,国家经贸委. 节水型城市目标导则(R). 北京:1996.

收稿日期:2009-07-21; 修回日期:2009-11-27

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划重大项目:东、中线一期工程沿线区域生态影响评估技术研究(2006BAB04A15);水利部江湖治理与防洪重点实验室开放基金资助项目(R2007-04)

作者简介:何力(1982-),男,陕西安康人,硕士研究生,主要从事水文水资源方面的研究,(电话)15972116586(电子信箱)heli_18@163.com。

系统流程图。

(4) 模型试验。模型调试、检验,模型检验包括直观、运行和一致性检验。

(5) 模型应用与政策实验。

3 实例研究——以天津市为例

3.1 天津市概况

天津是我国四大直辖市之一,地处水资源匮乏的华北平原东北部,多年平均降水量 575 mm,人均水资源量仅 160 m³,加上入境和外调水量,人均水资源占有量也不超过 370 m³,是我国最为缺水的城市之一。2005 年常住人口 1 043 万,人均 GDP 达到 3.51 万元,经济社会比较发达。当地水资源条件已经难以支撑其经济社会发展,地下水严重超采,生态和农业用水无法保证。为了缓解供水压力,先后建成了引滦入津、引黄济津等外流域调水工程,这些工程在一定程度上缓解了供水压力,但国民经济缺水、生态环境恶化的情势难以有效改观。正在实施的南水北调东、中线工程也将向天津市供水,按照南水北调“三先三后”原则,天津市也必须大力节水。基于城市缺水的现实,天津市较早开展节水型社会建设,是国家建设部命名的“国家节水型城市”,用水效率和城市节水管理水平处于全国前列,但仍需继续加强节水型城市建设,进一步完善管理措施。

3.2 系统边界确定

本文以 2005 年为现状年,建立天津市节水 SD 模型,仿真模拟天津市(市域)2005—2030 年水资源供需系统,包括经济社会子系统、供水子系统、需水子系统。建模所需的基础资料包括经济社会发展数据、水资源供用数据、水资源量数据及相关规划数据等^{②③}。

3.3 调控方案及作用机理

在基本方案的基础上进行调控得到相应的激励机制方案,为了保证系统的完整性,将农业用水和农村生活用水也包含在内,但不参与具体机制调控。本文中的非农需水量是指城镇生产、生活、生态需水量,不包括农村生产和生活需水量;常规水源指地表水和地下水,非常规水源指再生水和海水利用量。各种方案的调控模式及作用机理如下:

(1) 基本方案。天津市水资源供需系统自然演变的模式,即按照既有模式发展,是其它各方案调控的基础。

(2) 产业结构调整模式。保持其它控制变量及

GDP 总量基本不变,加快发展第三产业,使天津市产业结构模式逐步实现从“二三一”向“三二一”的转变。在 GDP 总量不变的情况,使用水定额较小的第三产业比重增加,能够减少城镇总需水量。

(3) 水价调控机制。充分考虑天津市城镇居民的支付能力,将生活水价逐步提高到使水费占家庭可支配收入 3% (基本方案 2.5%) 的水平;非农行业水价按照与生活水价相同的增幅增加。在提高水价的同时降低管网漏失率,预计 2030 年城市管网漏失率降到 4%。水价达到合理的水平后会促进用水户减少浪费,增加重复利用量,更换节水器具;还会促使企业加大节水改造,降低用水定额;部分高耗水企业迫于成本压力,回转移至境外,从而减少总需水量。同时提高水资源费,鼓励供水企业加大管网检漏力度,减少漏失率。

(4) 用水定额调整机制。在基本方案的基础上进一步降低城镇生活及二、三产业用水定额,或加快定额降低的速度;2010 年后二、三产业用水定额均在基本方案的基础上降低 15%。随着科技发展、产业升级、定额管理制度的完善,天津市水效率仍可进一步提高。

(5) 城市非常规水源利用调控机制。在保证总供水量基本不变的情况下,增加非常规水源供水量以置换常规水源;基本方案中再生水利用规模较大,进一步增加的潜力有限,本方案主要扩大海水利用规模。天津市经济社会发达,海水利用和再生水利用条件优越,以非常规水源置换常规水源,达到间接节水的目的。

(6) 节水综合激励机制。综合采用上述各类调控模式与激励机制,分析其与基本方案相比对非农需水量的影响和由此产生的综合节水效应。该机制是上述几种机制的综合,各机制间相互促进,可得到更好的节水效果。

3.4 结构分析及模型构建

根据天津市经济社会发展、水资源供需特点,参考相关规划构建天津市城市节水 SD 基本方案模型。模型共包括 63 个变量,15 对流量变量和流率变量,21 个反馈回路。模型流程图如图 1 所示。

系统动力学方程构建的方法有通过历史统计资料做算术平均取平均值、多元统计回归法、表函数、其他分析子模型嵌套等。本模型共有 63 个变量,系统方程很多,因此仅给出系统动力学方程的一般形式^[7]。

② 天津市人民政府. 天津市国民经济和社会发展统计公报 2000—2008 年.

③ 天津市水利局. 天津市水资源公报 2000—2007 年.

4 结果分析

4.1 模拟结果

城市节水主要包括直接节水和间接节水,直接节水是指在不影响经济发展和居民生活水平的前提下通过节水减少总需水量;间接节水是指总供水量不变的情况下,由于增加了非常规水源的利用量,置换出更多的常规水源用于改善生态环境。

按照系统动力学建模方法,在基本方案的基础上按上节模式进行调控,得到天津市 2005 - 2030 年水资源供需系统 6 种方案的仿真模拟结果。各激励机制与基本方案的人口、经济总量及总供水量基本保持不变,分析各机制的直接和间接节水量,各激励机制从 2010 年开始发挥作用,因此本文仅给出各方案 2020 年、2030 年的非农需水量和常规水源供水量,如表 2。

表 2 天津市非农需水量及常规水源供水量模拟结果

Table 2 The simulated results of non-agricultural water demand and conventional water sources supply in Tianjin 亿 m³

节水调控模式 与激励机制	2020 年		2030 年	
	非农 需水量	常规水源 供水量	非农 需水量	常规水源 供水量
基本方案	29.6	14.2	38.73	14.2
产业结构调整模式	29.1	14.2	37.2	14.2
水价调控机制	26	14.2	32.7	14.2
用水定额调整模式	27	14.2	34.8	14.2
城市非常规水源利用机制	29.6	13.2	38.73	11.1
节水综合激励机制	25.6	11.3	31.6	11.3

4.2 节水效应分析

2020 年、2030 年各激励机制的城市节水量和节水率(节水量占非农需水量的比例)如表 3 所示。可以看出:节水综合激励机制从直接和间接两个方面节水,其节水效果最为明显;水价激励机制是促进城市节水最重要的经济杠杆,天津市水价偏低,通过合理提高水价能够有效抑制需水量,其节水效果居第二;天津市现状年用水效率较高,但随着科技发展、产业

表 3 节水激励机制的节水效应分析

Table 3 The water-saving effect of water-saving incentive mechanism

节水调控模式 与激励机制	2020 年		2030 年	
	节水量 /亿 m ³	节水率 /%	节水量 /亿 m ³	节水率 /%
产业结构调整模式	0.5	1.52	1.7	4
水价调控机制	3.6	12.2	6.03	15.6
用水定额调整模式	2.6	8.8	3.93	10.1
城市非常规水源利用机制	1	3.4	3.2	8.3
节水综合激励机制	6.9	23.3	10.13	26.2

升级及管理制度的进一步完善,仍有较大的节水潜力,因此其节水效果居第三;天津市再生水和海水利用条件优越,规划利用量较大,可供调控的空间有限,其节水效果居第四;天津市二、三产业用水定额绝对差值较小,产业结构调整节水效果最差,但 2030 年城市节水量仍达到非农需水量的 4%。

5 结 论

通过上述模拟结果分析可以看出,尽管现状年天津市用水效率较高,处于全国前列,但是城市仍有很大的节水空间。基于缺水的现实及发达的经济社会条件,未来天津市应该在用好南水北调水量的情况下,从直接和间接两个方面进行节水:一方面通过调整产业结构、加强定额管理、充分发挥水价在促进节水中的杠杆作用,减少水资源浪费、进一步提高用水效率,达到减少总需水量的目的;另一方面,利用城市废污水处理率高、海水利用特别是直接利用条件较好的有利条件,通过政策扶持、市场运作,大规模利用非常规水源,减少常规水源利用量。

参考文献:

- [1] 张秀生,肖国哲. 太原市创建节水型城市的回顾与思考[J]. 山西水利, 2001, (5): 18 - 19. (ZHANG Xiu-sheng, XIAO Guo-zhe. The review and consideration of Taiyuan' water-saving city establizing [J]. Shanxi Water Resources, 2001, (5): 18 - 19. (in Chinese))
- [2] 邢 燕. 关于天津建设节水型城市的探讨[J]. 海河水利, 2003, (5): 49 - 51. (XING Yan. The discussion of Tianjin' water-saving city establizing [J]. Haihe Water Resources, 2003, (5): 49 - 51. (in Chinese))
- [3] 徐樵利. 论创建节水型城市的战略意义[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2003, 37(4): 558 - 561. (XU Qiao-li. On the strategic significance about establizing water-saving cities[J]. Journal of Central China Normal University (Nat. Sci.), 2003, 37(4): 558 - 561. (in Chinese))
- [4] 吴海峰. 南水北调中线节水型城市带建设研究[J]. 中州学刊, 2006, (6): 10 - 13. (WU Hai-feng. The research of water-saving cities along South-to-North Water diversion Middle Route Project[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2006, (6): 10 - 13. (in Chinese))
- [5] 李 征,郑莉莉. 加快建设节水型社会 实现水资源可持续利用——济宁市创建节水型城市的几点思考[J]. 济宁师范专科学校学报, 2006, 27(5): 101 - 104. (LI Zheng, ZHENG Li-li. Accelerate building the water-saving society realize the sustainable uilization of wter rsource[J]. Some Thinking Establishing the Water-saving City of Ji-ning. Journal of Jining Teachers College, 2006, 27(5): 101 - 104. (in Chinese))

(下转第 22 页)

- AcadeAne Press Inc, 2003:14-18.
- [8] 李凤兰, 罗俊礼, 赵顺波. 不同骨料的高强混凝土早期徐变性能研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(2): 45-47. (LI Feng-lan, LOU Jun-li, ZHAO Shun-bo. Early stage creep of high-strength concrete of different aggregates[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(2): 45-47. (in Chinese))
- [9] 龚 静. 混凝土坝时效变形变化规律研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007. (GONG Jing. Study on variation laws of time-dependent deformation of concrete dams[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese))

(编辑: 曾小汉)

Study on Variation Laws of Time-dependent Deformation of Concrete Dams

HE Jin-ping^{1a, 1b}, SHI Yu-qun^{1a, 1b}, GONG Jin²

(1a. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 1b. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China
2. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of SPC, Chengdu 610072, China)

Abstract: From the analysis on the characteristics of time effect factors in current concrete dam deformation monitoring models, this paper presented the method which applies a pre-modeling approach to optimize the preset factors of time effect, and then got some characteristics of time effect deformation by taking contrastive analysis on the simulated results obtained from actual model of horizontal displacement of some concrete dam. The investigation showed that: improperly preset factor may lead to the time effect deformation, which deviates from its basic physical meaning; when the regression constants' absolute value of deformation simulated results is very great, there would be a time effect deformation deformity; by classifying the time effect deformation in terms of their characteristics, the qualitative evaluation criteria of dam's structural state could be established, and the qualitatively monitoring index of dam safety monitoring could be set also.

Key words: concrete dam; monitoring model; time effect deformation; regression factor

(上接第 13 页)

- [6] 王其藩. 系统动力学(修订版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (WANG Qi-fan. System Dynamics (Revision)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [7] 贾仁安, 丁荣华. 系统动力学-反馈动态性复杂分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (JIA Ren-an, DING Rong-hua. System Dynamics-Analysis of Feedback Dynamic Complexity [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))

(编辑: 周晓雁)

Research on Incentive Mechanism of Water-saving Cities Based on System Dynamics

HE Li, LIU Dan, HUANG Wei

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: With the contradictions of water use and supply are increasingly intensified, a large quantity of water for the ecological environment and agriculture are crowded out by urban. For easing the water conflicts and improving the ecological environment, to carry out water-saving city construction is imperative. In this paper, the integrated water resources supply and demand of Tianjin in 2005-2030 are simulated under different modes of the basic program, industrial reconstruction, price control, quota adjustment and urban non-conventional water sources utilization. The effect of water-saving incentive mechanism is analyzed quantitatively. The result obtained by the paper may provide a reference for further improving the city construction and management of water-saving city.

Key words: system dynamics; water-saving cities; incentive mechanism; simulation