

基于SD的水质型缺水地区水系统的模拟分析 ——以上海杨浦区为例

高成康, 包存宽*, 蒋大和, 董家华, 霍 莉

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对雨量丰富的南方地区出现水质型缺水问题, 采用系统动力学方法, 对其水系统做模拟分析。以上海杨浦区为分析实例, 根据其特征设立模型, 包括5个子系统、6个调控参数。通过调整调控参数, 运行模型得到所需的3种不同方案。在此基础上, 找出影响需水系统的主要因素为: 水价、污水治理系数、节水意识、工艺改革。基于三种方案的作用参数和模拟结果, 为解决水资源这一“瓶颈”问题, 实现杨浦区水系统的供需平衡和区域的协调发展, 提出具体的调整政策。其中, 该政策的调控参考值(对应年: 1990/1995/2000/2005/2010/2015/2020)为: 水价 $TPW = 1.3/2.7/2.9/3.5/4.7/5.2/6.8$; 污水治理率 $TRWW = 0.73/0.79/0.84/0.85/0.93/0.96/0.97$; 节水意识为 $INDEX1 = 2.5$ (2005年后), $INDEX2 = 1.021$ (2005年前); 工艺改革系数为 $TRT = 1/1.1/1.28/1.35/1.5/1.65/1.66$ 。在实施相应措施的基础上, 采用协调发展方案, 预测到2020年上海杨浦区总需水量约 $14.0 \times 10^9 t$, 而预计工程供水能力可达到约 $13.9 \times 10^9 t$, 基本达到水系统的供需平衡, 实现区域水资源的协调发展。

关键词: 水质型缺水地区; 水系统; 系统动力学; 模拟分析

文章编号: 1000-0585(2007)05-0967-08

1 引言

目前, 国内外对区域水系统的研究方法主要是运用神经网络预测法、灰色非线性预测、面积定额法、人均综合用水量指标法、指数平滑法与回归分析法等^[1~6]。主要针对干旱地区的需水问题, 而有关水质型缺水问题的讨论较少。另外, 这些方法多是半定量的、得出的结论为宏观指导性的, 对具体问题并没有提供值得借鉴的建议^[7~9]。水系统是个综合的、复杂的宏观系统, 而水质型缺水问题又具有较强的人为因素, 其结构更为复杂, 功能的综合性和过程的随机性更强。本文拟从整体上考虑水质型缺水问题, 打破水量丰富区域水资源问题被忽视的局面。针对其原因, 采用系统动力学(System Dynamic, 简称SD)建立模型, 模拟各种调整政策下的水资源状况, 提供相应的具体措施。

系统动力学由美国麻省理工学院(MIT)福瑞斯特(Jay W. Forrester)教授提出。从最初应用于企业管理到目前广泛应用于社会、经济、政策领域。SD模型多应用于宏观的政策分析中, 如区域经济、社会、环境等综合大系统的发展状况, 得到宏观指导性的建

收稿日期: 2006-07-02; 修订日期: 2007-05-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)《城市发展中的基础科学问题》子课题(2005CB724201)

作者简介: 高成康(1977-), 女, 河南周口人, 在读博士生。研究方向: 城市生态规划和评价。

E-mail: gaochengkang@sohu.com

* 通讯作者: 包存宽, 博士, 副教授, 环境管理与可持续发展学科责任教授。

议。然而,针对具体问题,分析其状况并寻找相应的改进措施,这方面的研究相对较少。同样,采用此方法解决水质型缺水问题相关研究更少^[10~14]。

针对雨量丰富的南方地区出现水质型缺水问题,本文采用SD法^[15],对其水系统做模拟分析。并以上海杨浦区为分析实例,根据其特征设立模型,为解决水资源这一“瓶颈”问题,提出具体的调整政策,以期实现杨浦区水系统的供需平衡和区域的协调发展。

2 杨浦区水系统分析

2.1 水系统的状况

杨浦区位于东亚副热带的季风区,雨量充沛。据1956~1999年实测平均年降水量1145mm,折算成平均年径流量约为5000万 m^3 ^[16]。区内大小河道11条,总里程31.11km,水域面积92.46万 m^2 ,主要水系有两个:新江湾城水系和杨树浦港水系,包括淀山湖、苏州河、虬江、南横引河等河流与湖泊,见图1。

杨浦区在上海属于城市建设相对落后的一个区,辖区内有52个较大的污染源,污水排放量达2100万 m^3 /年。据2003年的环境质量统计,地表水环境功能区达标率仅为30%,区域内河道水质大部分劣于类功能区水质标准^[17]。

2.2 水系统的问题分析

杨浦区水系统特点及存在的问题:

(1) 雨水相对充沛,区内河道分布较多,总供水量充足;(2) 水污染严重且主要是由于生活排污所致,造成可利用的水量相对短缺;(3) 水价不合理导致水资源过度浪费,节水环节的偏废中断了用水系统的信息反馈回路。

水量丰富、水质较差造成可利用的水资源相对短缺,使杨浦区成为水质型缺水;水价格和节水环节的主导作用决定了该城区水系统受人为因素影响大,尤其是对主观性强、人为控制的参数(节水意识、生活水平、水价等)要充分考虑其随机性、动态性;虽然针对水质型缺水这一具体问题,但它涉及到相关方针、政策的提出,并与城区的协调发展密切相关。这些特征决定了杨浦区水系统中的各因素之间存在复杂关系,各因素之间的非线性关系意味着常规的预测与模拟方法是不可行的,而SD模型的特点和功能说明它可为之建立相应的模型来模拟分析^[18]。

3 杨浦区需水系统的模型

3.1 建模的目的与系统边界

该模型主要用于研究系统内部的反馈结构与其动态行为关系,并通过外部政策或其他参数的改变,来实现整个系统的可持续发展,并保证模型与实际情况相吻合。正确划定系统边界,力争把那些与建模密切相关的量都划入界限^[5]。此模型所研究的界限为上海杨浦

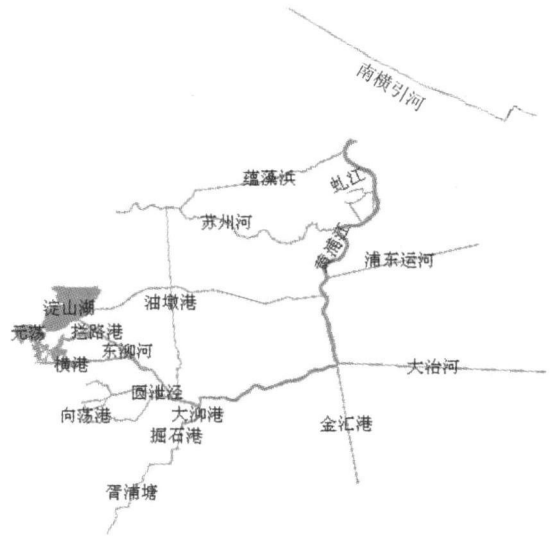


图1 杨浦区水系图

Fig. 1 Map of water system in Yangpu district

区，但该区的经济、资源等与外界有着复杂的联系，所以在参数的赋予与调整过程中，充分考虑与其他区域之间的合作。

3.2 模型变量、相关数据选取及预测原则

(1) 针对性，面向具体的问题，把冗余的细节滤掉，集中于问题与矛盾，选取合理的变量和参数建立简明完整的模型；(2) 完整性，依据所选的变量和参数，使所建模型能够形成一个完整的系统，具有完整的、合理的模型结构与机理；(3) 实用性，结合实际情况，使建立的模型能够解决实际问题；(4) 真实性原则，保证所选数值的真实性，预测的结果才有可能符合实际情况；(5) 准确性原则，数值的选取要准确，若数值稍有偏差通过复杂模型的系列反馈回路运行后，可能会扩大偏离程度。而参数的选取除参考上述原则外，还要充分考虑参数的灵敏性。

3.3 模型结构

上海杨浦区水系统模型有5个状态变量，形成5个子系统；QWND、QNW、RF、PV3、QWLD等21个主要辅助参数形成反馈模型；有RWW、PW、CSW、RT、RRW、RF共6个调控参数^[19, 20]，通过对其调控形成三种所需方案。其中，5个子系统分别为：人口子系统、第二产业需水子系统、第三产业需水子系统、生活需水子系统、总需水子系统。模型作用结构：总人口（POP，万人）通过人均用水量影响总需水量（TQW，t）与预计工程供水能力（QWS，t），而人均用水量又受节水意识、水价、生活水平等调控参数的作用；第二、三产业需水量（QWI，t；QWT，t）由各自的单位产值需水量决定其具体的行为变化，并通过工艺改革、污水回用、水价、节水意识（根据市民的用水方式、用水器具的选择来表达）等调控参数来实现总值的改变；这5个状态变量相互影响，共同作用形成复杂的因果反馈回路，具体模型结构见图2。

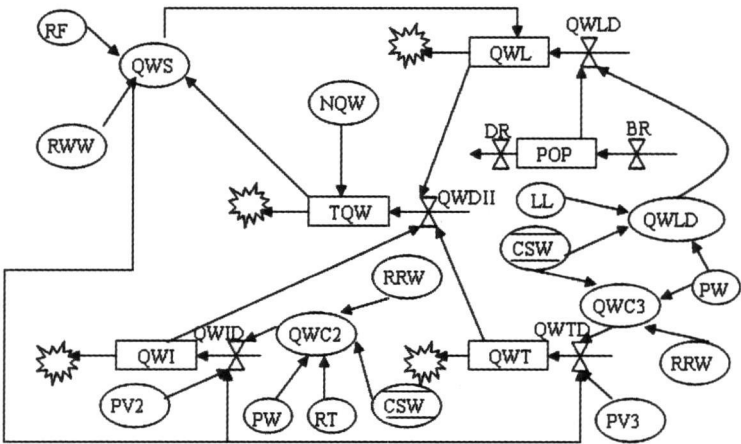


图2 模型结构的流程图

Fig. 2 Flow chart of model structure

注：图中主要字母代表的含义，QWS- 预计工程供水能力；QWL- 生活用水量；POP- 人口；TQW- 城市需水量；QWI- 工业用水量；QWT- 第三产业用水量；QWC2- 第二产业单位产值耗水量；QWC3- 第三产业单位产值的耗水量；RWW- 污水净化系数；RF- 循环水比例；LL- 生活水平；CSW- 节水意识；PW- 水价；RRW- 废水回用系数；RT- 工艺改革。模型图中，方形图为状态变量；椭圆图为各种参数；纺锤图为速率变量；星状图为各种变量的汇。

3.4 方程的简介

根据结构图，运用DYNAMO语言建立模型，初始年为1990年，终止年2020年，步长为1年。上海杨浦区水系统模型由83个方程、26个参数组成，包括状态变量方程、速率方程、辅助变量方程、剪刀函数方程和表函数方程等形式，其中主要方程有：

(1) 状态变量方程，状态变量指能对输入和输出变量进行积累的变量，计算状态变量（或积累变量）的方程称为状态变量方程。在一个因果链中的状态变量具有改变整个动

力学性质模式的能力, N 方程紧跟状态变量, 主要为状态变量方程赋予初始值, 如:

$$L \quad POP.K = POP.J + DT \times (BR.JK - DR.JK)$$

$$N \quad POP = POPI$$

(2) 速率方程, 速率方程用于把影响系统状态的诸因素——来自系统内外的信息、计划与决策, 转化成改变系统状态的行为。其中代表输入与输出的变量为速率, 没有标准的格式, 包括状态变量与常数的乘积、状态变量与时间的商、多个状态变量之和以及多个状态变量之积等多种复杂形式。该模型多用两个变量的乘积, 如:

$$R \quad QWID.KL = PV3.K \times QWC3.K$$

(3) 辅助变量方程, 任务就是把系统内部的机理和变量之间的关系加以量化, 无标准形式。包括常数项、状态变量、表函数、剪刀函数、速率或其他辅助变量的任意组合。现给出两种不同形式: 表函数与剪刀函数。其中, 表函数通过一系列的数值来反映不同时期、不同方案的状况, 多随时间变化, 用水价 (PW) 的调控过程来说明:

$$A \quad PW.K = TABLE(TPW, TIME.K, 2020, 5)$$

$$T \quad TPW = 0.98/2 \quad 12/2 \quad 13/2 \quad 75/3 \quad 00/3 \quad 35/3 \quad 82$$

方程中 TPW—所描述的变量; TIME.K—伴随变量; 2020—终止年; 5—间隔周期

剪刀函数主要用于政策参数的调控, 即在模拟实施不同政策过程中, 更换或改变原来的函数或数值来反映政策的变化, 如:

$$A \quad CSW.K = CLIP(INDEX1, INDEX2, SWITCH1, TIME.K)$$

$$C \quad INDEX1 = 1.39$$

$$C \quad INDEX2 = 1.01$$

$$C \quad SWITCH1 = 2005$$

第一个为剪刀函数的基本形式, 第二、三个方程分别为第一、二个参数的赋值, 第三个参数指政策调控的实施年, 方程组涵义为: 在 2005 年以前节水意识的赋值为 1.01, 相对较低; 而 2005 年以后的节水意识较高, 参数值为 1.39, 在调控过程中不仅仅是体现节水意识, 还要综合考虑水价、环保意识、政策等因素, 表现为两个跳跃式的调控参数^[15]。

3.5 模型的检验

由于 SD 模型的本身特性, 不能用常规的拟合优度、复合相关系数估计等方法检验。根据其特点, 采用适用性检验和一致性检验两种方法相结合来验证模型是否合理。

(1) 适用性检验。首先, 分析所建模型, 满足水质型缺水地区水系统受人为因素影响的特点, 并充分考虑政策、经济、科技等与水系统的反馈作用, 模型适用与水质型缺水地区水系统的复杂结构。另外, 调整参数为极值, 分析得出的政策在实际中是否适用和存在, 定量检验模型的适用性。调整参数水价 (PW) 从低值 0.98 元/t 到 3.4 元/t, 根据模型运行的结果发现: 废水回用比例系数从 0.23 升到 0.65, 污水排放系数则从 0.72 降至 0.31。这个两个系数的变化通过科技、工艺改革等措施是能够实现的, 可知参数极值的变化使结果仍然适用, 验证该模型具有很强的适用性。

(2) 一致性检验。验证了模型的适应性, 采用一致性检验进一步验证模型是否合理。对运行结果和实际值作对比, 检验是否一致。以人口和工业总产值为参比对象, 具体见表 1。从上述分析和表 1 中可看出, 所建模型在结构上和运行机理上均适合水质型缺水地区水系统的特性和作用; 模拟值与实际统计值的误差在 (-5%, 5%) 之内, 一致性得到验证, 适用性检验和一致性检验保证了所建模型的合理性。

表 1 模拟值与实际值的对比检验

Tab 1 Comparative test between simulated values and actual values

年份	人口 (万人)			工业总产值 (亿元)		
	模拟值	实际值	误差 (%)	模拟值	实际值	误差 (%)
1997	106.6	107.44	-0.782	263.30	251.80	4.368
1998	106.6	107.89	-1.196	280.73	289.41	-3.092
1999	106.6	108.09	-1.378	289.31	302.99	-1.569
2000	106.4	107.95	-1.436	300.78	313.02	-4.080
2001	106.3	107.89	-1.474	329.05	313.11	4.8442
2002	106.1	107.93	-1.696	349.52	365.49	-4.569
2003	106.0	105.17	-2.006	376.87	393.04	-4.291

注：表中的实际值来自《上海统计年鉴》，考虑到数据的稳定性和真实性，选择人口数据为杨浦区户籍人口；工业总产值实际值因资料统计标准差异，1997、1998年的通过拟合并咨询相关专家给出的。

4 杨浦区水系统的模拟分析

运行模型、调整调控参数，形成三种不同方案：不改变任何参数，以当前水资源利用模式为基准，对水系统模拟形成第一种方案；调整方案，以分析调控参数对水系统的作用效果为目的来调整相关参数，并为最终寻求协调发展模式提供基础；协调发展方案，满足当前和未来要求的水资源利用模式。

4.1 以当前模式为基准的方案

从图3中可看出，生活需水量(QWL)、第二产业需水量(QWI)、第三产业需水量(QWT)、预计工程供水能力(QWS)的发展趋势均为上升。生活需水量呈线性提高，因其主要受生活水平(LL)和人口增长的影响。第二产业需水量的增加速率逐渐减小，因杨浦区的第二产业即将完成向第三产业转移和向高科技产业转化。第三产业需水量在加速增加，其原因是第三产业的比例增加和节水措施不完善。

预计工程供水能力在各种因素的作用下表现为与第三产业相似的加速增长趋势。

4.2 调整方案

调整各参数，得到相应的多种调整方案，对二者之间的关系分析表明：对需水量作用强度依次为水价、污水治理率、节水意识、工艺改革。其中，水价是调控水资源供需的一个有效的经济杠杆，尤其是市场经济起主导作用的情况下，对水资源供需具有调节与促进功能。水污染治理率是影响城市水资源供需系统的直接作用因子，是保持平衡的根本保证^[19]。

为对比以当前模式为基准的方案和协调方案，图4描述其中一种调整方案：水价

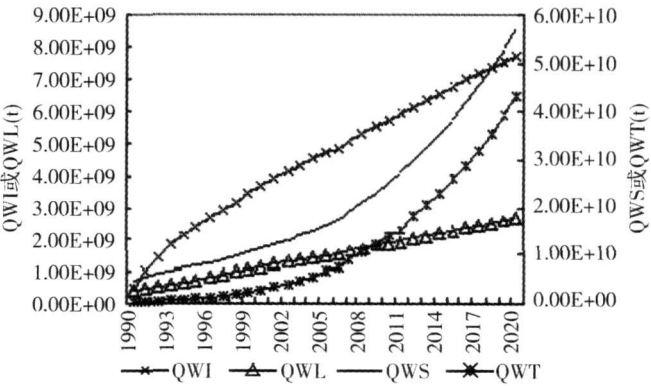


图 3 目前发展模式的模拟结果
Fig. 3 Results of the pattern based on the present state

TPW = 2.3/2.7/3.7/4.0/4.5/4.8/5.3; 污水净化率 TRWW = 0.59/0.72/0.82/0.90/0.92/0.93/0.93; 节水意识 INDEX1 = 1.8, INDEX2= 1.021; 工艺改革系数 TRT = 1/1.1/1.28/1.3/1.35/1.4/1.41, 其他调控参数保持不变, 非调控参数做随机处理。

该方案的模拟结果: 各需水量有所降低, 但趋势仍逐年增加。其中, 调整产业结构使第二产业需水量的降幅最大, 但预计工程供水能力仍不能利用调水或过境来满足需水要求。

4 3 协调发展模式

是以实现水质型缺水区的水系统供需平衡为目的, 调整适度的参数形成近似协调发展的一种模式。该方案的调控参数值为: 水价 TPW= 1.3/2.7/2.9/3.5/4.7/5.2/6.8; 污水治理率 TRWW= 0.73/0.79/0.84/0.85/0.93/0.96/0.97; 节水意识为 INDEX1= 2.5, INDEX2= 1.021; 工艺改革系数为 TRT= 1/1.1/1.28/1.35/1.5/1.65/1.66, 其他调控参数同方案二。

通过对杨浦区水系统一定措施的调控, 实现区域协调发展。协调方案相应的变量轨迹见图 5, 相对于上述两种模式不仅各需水量减少, 其趋势也发生改变。第二产业需水量在 2008 年最后增长速度减弱, 用量趋于稳定, 归因于政策的调整。生活需水量不仅增速减缓, 约 2008 年之后趋于平稳。第三产业需水量总值和增速都有所减少, 总需水量约 $14.0 \times 10^9 \text{t}$, 而到 2020 年工程供水能力可达到约 $13.9 \times 10^9 \text{t}^{[11]}$, 基本达到供需平衡, 可认为是近似协调发展方案。

4 4 政策分析

根据上述三种方案分析和调控参数的作用强度, 为解决水质型缺水问题, 提供以下参考政策建议, 对杨浦区水系统规划的实施进行适当调控。

合理提高水价, 可促进各企业采取工艺改革、污水治理等措施实现节水, 充分挖掘水质型缺水区的节水潜力。这个措施对第二、三产业需水量的影响最大, 可明显降低它们的用水量^[20, 21]。根据对近似协调发展模式的模拟分析, 参考的水价为 2010 年- 4.7 元/t、2015 年~ 5.2 元/t、2020 年~ 6.8 元/t。

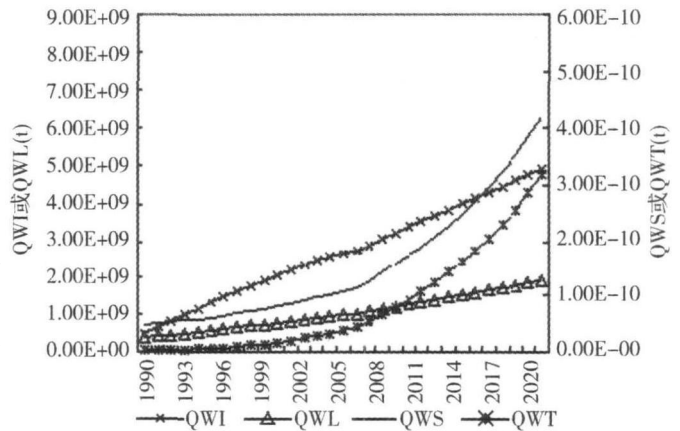


图 4 调整方案的模拟结果

Fig. 4 Results of the pattern based on adjusted scheme

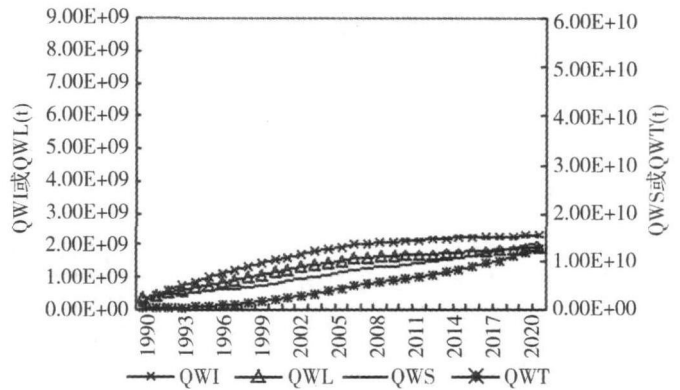


图 5 协调发展模式的模拟结果

Fig. 5 Results of coordinated developmental pattern

提高污水治理率, 可有针对性地解决水质型缺水问题, 因污水治理率是影响水资源重复利用的直接因素。另外, 通过各种宣传媒体, 使节水意识得到相应的提高, 也是有效的政策。总之, 这些政策措施是相辅相成的, 通过对其实施调控, 可改善当前水资源不合理利用的状况, 解决水质型缺水这一“瓶颈”问题。

5 结论

通过对所建模型的模拟分析, 发现对需水量作用要素主要为水价、污水治理率、节水意识、工艺改革。调整调控参数得到杨浦区不同情形下的三种方案, 并寻求到实现水资源供需平衡的发展模式, 提出具体的合理调控政策, 为解决杨浦区水质型缺水这一“瓶颈”问题提供了科学依据。

但是, 对由突发性污染事故引起的水质型缺水来作考虑, 说明该模型具有一定的局限性; 同时, 4 个主要调控参数之间有一定的相关性, 但具体的关联度未能定量表达, 这也是今后解决水质型缺水问题的研究对象之一。

参考文献:

- [1] 杨维, 王恩德, 陈畅. 应用 BP 神经网络预测城市需水量的探析. 资源调查与环境, 2003, 24(3): 217~ 221.
- [2] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻. 水科学进展, 2002, 13(4): 507~ 514.
- [3] 刘苏峡, 等. 基于水量平衡的流域生态耗水量的计算——以海河为例. 自然资源学报, 2004, 19(5): 662~ 671.
- [4] Pukuda T, Shibata T. Theory and application of neural networks for industrial control systems. IEEE Trans on IE, 1992, 39(6): 472~ 489.
- [5] 郭宗楼, 刘肇. 水利水电工程环境影响综合评价的人工神经网络专家系统. 环境科学研究, 1998, 11(5): 29~ 33.
- [6] 陈卫, 等. 城市水系统良性运作的节水减污技术关键. 水资源保护, 2004(1): 40~ 43.
- [7] 蒋业放, 梁季阳. 水资源可持续利用规划耦合模型与应用. 地理研究, 2000, 19(1): 37~ 44.
- [8] Abu Zeid, Mahmoud A. Water and sustainable development: The vision for world water life and the environment. Water Policy, 1998, 1(1): 9~ 19.
- [9] 惠泱河, 等. 二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究. 地理研究, 2001, 20(2): 191~ 198.
- [10] 谷国锋. 区域经济系统研究中的动力学方法与模型. 东北师范大学学报自然科学版, 2003, 35(4): 88~ 93.
- [11] Meadows D H, *et al.* The Limits to Growth. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1972.
- [12] Wang Qifan, John D Sterman. A Disaggregate Population Model of China. Proceedings of The 1983 International System Dynamics Conference, Vol. II: 841~ 861.
- [13] Forrester Jay W, Nathaniel J Mass, Charles J Ryan. The system dynamics national model: Understanding socio-economic behavior and policy alternatives. Technological Forecasting and Social Change, 1976, (9): 51~ 68.
- [14] Forrester Jay W, *et al.* Implication for National and Regional Economic Policy. Presented in Conference on Long Wave, Depression, and Innovation, Florence, Italy, 1983, October: 26~ 28.
- [15] 王其藩. 系统动力学. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [16] 上海统计局编. 上海统计年鉴 2004. 北京: 中国统计出版社, 2004. 62~ 296.
- [17] 上海市杨浦区河道管理所, 河海大学水文水资源及环境学院. 上海市杨浦区水资源普查报告. 2001, (2): 40~ 93.
- [18] 阮仁良. 上海市水资源和水环境的可持续发展. 水资源保护, 2003, (1): 21~ 24.
- [19] 周长青, 等. 用水计划与水价对华北工业企业用水的影响——以河北省为例. 地理研究, 2006, 25(1): 103~ 111.
- [20] 贾绍凤, 康德勇. 提高水价对水资源需求的影响分析. 水科学进展, 2000, 11(1): 49~ 53.
- [21] 袁汝华, 胡维松, 黄秋洪. 国外水价制度分析及对我国水价改革之借鉴. 河海大学学报(社会科学版), 1999, 1(1): 34~ 39.

Simulation and analysis of water system in the pollution-induced water shortage region based on SD

GAO Cheng-kang, BAO Cun-kuan, JIANG Da-he, DONG Jia-hua, HUO Li

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: At present, the studies of water system mainly focus on water problems in arid region, while the pollution-induced water shortage problems are almost neglected. The relevant methods are mostly half-quantitative, and the results are almost macro-scope related suggestions. The pollution-induced water shortage problems takes on some characteristics, e.g. man-made effect, all-around in function and randomness in process. The paper considers comprehensively the pollution-induced water shortage problem in southern China where water resources are abundant. And based on System Dynamic (short for, SD) water system under different policies is simulated. Taking Yangpu district in Shanghai as a case, according to its characteristics the model which includes five subsystems and six control parameters is built. The model runs and produces three kinds of desired schemes by adjusting control parameters. Based on the results the paper identifies the main impact factors of water system: water price, ratio of sewage treatment, consciousness of water saving, and technical reform. Combined with the simulation results, some reasonable policies are put forward in order to realize the balance between supply and demand on water resource, and to realize harmonious development in the region. The corresponding measures mainly refer to a rise in water price, consciousness of water saving and the ratio of sewage treatment, and reform technical in production, which can solve effectively the pollution-induced water shortage problem. Some policies depend on regulated and control reference values (corresponding years: 1990/1995/2000/2005/2010/2015/2020): TPW (water price) = 1.3/2.7/2.9/3.5/4.7/5.2/6.8; TRWW (ratio of sewage treatment) = 0.73/0.79/0.84/0.85/0.93/0.96/0.97; consciousness of water saving, INDEX1 = 2.5 (after the year 2005), INDEX2 = 1.021 (before 2005); at TRT (technical reform) = 1/1.1/1.28/1.35/1.5/1.65/1.66. It is predicted that water system balance between supply and demand will come true in 2010 because then the total demand of water is about 14.0×10^9 (t) and the capacity of water supply arrives at approximately 13.9×10^9 (t). But the model can not reflect the pollution-induced water shortage phenomena due to pollution accidents; and can not provide quantitative relationship between some control parameters, so both problems are the topics of concern in seeking for the solutions to the pollution-induced water shortage problems.

Key words: pollution-induced; water shortage region; water system; system dynamic; simulation and analysis