

北京市水资源承载力系统动力学模拟

冯海燕 张昕 李光永 穆乃君 陈瑾

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 利用系统动力学(SD)方法建立了北京市水资源承载力 SD 模型,选取工业、农业总产值和可承载的城镇人口数量作为北京市水资源承载力的衡量指标,在现状延续、节水兼污水再生回用、节水兼境外调水和综合型 4 种方案下模拟 2003—2020 年北京市水资源承载能力的动态变化,寻求提高北京市水资源承载力的途径。结果表明:现状延续型用水模式水资源承载能力十分脆弱,难以满足未来北京市社会经济发展的需求,承载的城镇人口自 2010 年开始递减,城市规模开始萎缩;采用污水回用或境外调水模式,虽然工农业总产值维持快速发展,但仍然承载不了与之对应的城市人口规模。在建设节水型社会的前提下,实施污水回用和境外调水的综合型方案,到 2020 年可承载的工业、农业总产值和城镇人口分别达 10 698.6 亿元、679.5 亿元和 1 778.3 万人;综合型方案是提高北京市水资源承载力的满意方案。

关键词 水资源;承载力;系统动力学(SD)模型;北京市

中图分类号 TV 213.9;N 941.3

文章编号 1007-4333(2006)06-00106-05

文献标识码 A

A system dynamic model and simulation for water resources carrying capacity in Beijing

Feng Haiyan, Zhang Xin, Li Guangyong, Mu Naijun, Chen Jin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract A system dynamic model for water resources carrying capacity of (WRCC) in Beijing was developed using the system dynamics method. Total industrial and agricultural production value and urban population were chosen as evaluation indexes of WRCC in this study. The approach is searched to improve WRCC of Beijing based on simulating the dynamic change of WRCC under four various schemes, existing continuation, water saving and reuse, water saving and diversion from other basin and integrated scheme, from the years 2003 to 2020. The calculation result indicates that WRCC under the existing continuation scheme is very weak and can not meet the socio-economic development of Beijing in the future. The carrying capacities of urban population will decrease since the year 2010. Although the industrial and agricultural production values are developing rapidly to wastewater reuse or water diversion from other basin scheme, the carrying capacities of urban population cannot meet the scale of the urban population of Beijing programming. The carrying capacities for the industrial and agricultural production values and the urban population in the year 2020 will reach 1069.86 billion Yuan, 67.96 billion Yuan and 17.78 million, respectively, by means of a comprehensive scheme of water saving, waste water reuse and water transfer from other basins. The integrated scheme is the best one for elevating water resources carrying capacity in Beijing.

Key words water resource; carrying capacity; system dynamic model; Beijing

水资源短缺制约了首都社会经济的发展,而且造成了水环境的日益恶化,水问题将成为北京市未来可持续发展中的突出问题;因此,正确评价水资源

承载力对北京市社会经济发展具有重要意义。水资源承载力作为一个单项研究在国外较少,大多将其纳入可持续发展理论研究中。水资源承载力研究

收稿日期:2006-03-25

作者简介:冯海燕,硕士研究生;张昕,教授,通讯作者,主要从事水资源水环境评价研究,E-mail:zhangxin@cau.edu.cn

21 世纪初期北京水资源可持续利用规划领导小组. 21 世纪初期首都水资源可持续利用专题报告汇编. 北京,2001

涉及水资源系统和社会经济、环境系统组成的复杂大系统,目前多采用多目标方法,即通过数学规划得到系统在一定条件下的最优解。系统动力学(SD)方法能够跟踪研究对象的动态变化过程,除不受线性约束外,并不追求最优解,而是以现实存在为前提,通过调整系统参数和结构,寻求改善系统行为的机会和途径。近年来,利用 SD 方法在水资源方面构建的模型有全球水资源模型、水资源综合利用生态—经济模型、水库运转模型等^[1-3]。在我国,已有学者利用 SD 模型对本溪市、乌鲁木齐市、陕西关中地区、青海共和盆地等进行了水资源承载力研究^[4-7]。本研究采用 SD 方法,旨在通过对北京市未来水资源承载能力变化趋势的模拟,寻求提高北京市水资源承载力的最佳方案。

1 北京市水资源承载力系统模型构建

1.1 系统动力学原理

系统动力学模型的本质是一阶微分方程组^[8]。在 SD 模型中状态方程是欧拉法数值积分的表示,其一般形式为

$$L.K = L.J + DT(IR.JK - OR.JK) \quad (1)$$

式中:L.K、L.J 为状态变量,IR.JK、OR.JK 为速率变量,K 表示现在时刻,J 表示与 K 相邻的前一时刻,JK 表示 J 时刻到 K 时刻的时间段,DT 为仿真步长且 DT=JK。式(1)可变形为

$$\frac{L.K - L.J}{DT} = IR.JK - OR.JK$$

借助计算机模拟技术分析系统的动态行为,预测系统的发展趋势。

1.2 模型结构

本研究将系统的边界定义为整个北京市。理论上闭合边界是没有任何流可以穿越的,但北京市的水资源是一个开放的系统,与外部区域之间存在着物质、能量和信息的交流,所确定的边界并非严格意义上的地理界限。根据建模目的将系统分为可利用水资源、农业用水、工业用水、大生活用水、污水处理及其回用 5 个子系统。为描述各子系统内部结构及子系统之间的相互关系,利用 SD 专用软件 Vensim 建立北京市水资源承载力 SD 模型流图(图 1)。SD 模型中主要变量为状态变量和速率变量。状态变量为可利用水资源量、工农业总产值、农村人口、城市绿地面积和道路面积,每一状态变量对应相应的速

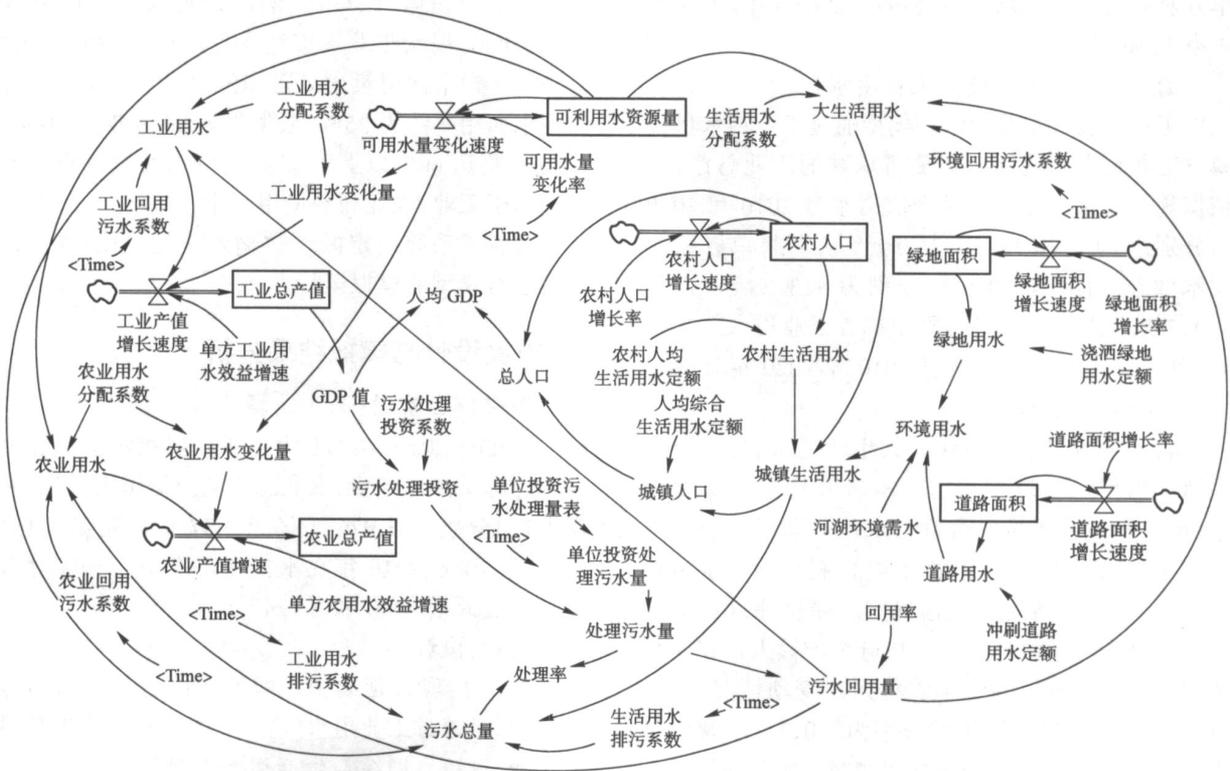


图 1 北京市水资源承载力 SD 模型流图

Fig. 1 System dynamics flow chart of water resources carrying capacity in Beijing

率变量。取工业总产值、农业总产值及其可承载的城镇人口数量为水资源承载力衡量指标。

1) 可利用水资源子系统。目前北京市可用水资源量主要来自地表水和地下水,规划中也包括境外调水。该子系统主要变量有可用水资源量、可用水量变化率以及分配于工业、农业、大生活用水的分配系数。可用水资源量初始值取现状年(2003年)北京市可用水量,为35.8亿 m^3 ;工业、农业、大生活用水分配系数依据现状年实际配水系数,分别取24%、38%、38%^[9];可用水量变化率考虑现状年和规划年可用水量的线性变化。

2) 农业用水子系统。农业用水指农田灌溉和农牧渔业用水总和。随着农业各产业结构的调整以及节水农业的发展,农业用水(从1997年开始为农牧渔业用水)由1997年的18.12亿 m^3 降低为2003年的13.8亿 m^3 ,农业总产值却由1997年的170.9亿元增至2003年的237.9亿元,单方农业用水效益由9.43元/ m^3 上升到17.24元/ m^3 ^[9-10]。模型通过农业用水量和单方农业用水效益增速预测可承载的农业产值。由于单方农业用水效益受农业节水灌溉方式及农业结构调整等诸多因素影响,难以量化,故单方农业用水效益增速取1997—2003年的年均增长率1.30元/($m^3 a$)。

3) 工业用水子系统。工业用水包括一般工业、火电工业和农村工业用水。模型通过工业用水量和单方工业用水效益增速预测可承载的工业总产值。依据规划北京市工业万元产值需水量2010和2020年分别达24.2和12.2 m^3 /万元^[11],可得单方工业用水效益2010和2020年分别为413.2元/ m^3 和819.7元/ m^3 ,借助现有资料中单方工业用水效益推算,单方工业用水效益增速2010和2020年分别达18.3和54.3元/($m^3 a$)。

4) 大生活用水子系统。大生活用水包括农村、城镇生活用水和环境用水。本研究将全市绿化用水、市区及城近郊冲刷道路用水及河湖系统最小生态环境需水量^[12]作为环境用水,农村生活用水由农村人口、人均生活用水定额确定。根据北京市统计年鉴2000年统计口径,将人口分为城镇人口和农村人口,分析2000—2003年农村人口变动情况,得出北京市农村人口平均年增长率为-0.11%,现状年北京市农村人均生活用水定额176L/(人·d)^[9-10],规划2010、2020年农村人均生活用水定额分别为218和266L/(人·d)^[11]。绿化用水和冲刷道路用

水分别由城市绿地面积和道路面积与浇灌定额和道路浇洒定额确定,北京市河湖系统最小生态环境需水量为0.7041亿 m^3 ^[12]。

水资源承载力研究是以维护生态良性循环和可持续发展为前提的,城市人口数量在很大程度上决定了城市的规模,因此考虑在保证环境用水和农村生活用水的前提下,通过城镇生活用水量和城镇人均综合生活用水定额来预测可承载的城镇人口数量。现状年城镇人均生活综合用水定额为254L/(人·d),规划2020年城镇人均生活综合用水定额标准为185~300L/(人·d)^[13]。由于城市化及人民生活水平的不断提高,预测2020年城镇人均生活综合用水定额达300L/(人·d)。

5) 污水处理及再生水回用子系统。城市污水由生活污水和工业废水组成。污水总量由城市用水量与排污系数决定,规划2005—2010年北京市生活排污系数为0.85,2010年后为0.9;工业排污系数为0.8(见第1页注)。污水处理量主要由污水处理投资决定,城市污水建设项目的实施主要受投资的制约。近年来,北京市污水处理系统年投资均在20亿元左右^[14],本文中污水处理系统投资、污水处理管网维护和运行费用近似认为污水处理投资费用,经计算,现状年北京市污水处理投资为GDP的0.67%。污水回用量由处理量和回用率决定,目前的污水回用率约为25%,根据规划2008年达50%,2020年将达60%以上^[15]。再生污水通过各分配系数回用于工业、农业和环境用水中。

将各子系统确定的参数输入模型流程图(图1),便可进行模型的模拟运行。

2 方案设计与模拟结果分析

模拟分2阶段:第1阶段2003—2010年,第2阶段2011—2020年,DT为1年。现状年水资源承载力指标工业总产值、农业总产值及城镇人口(含流动人口)分别为3976.8亿元、237.9亿元和1151万人^[10],规划2010年在水文保证率 $P=50\%$ 时可利用水资源量为40.88亿 m^3 ^[11]。

2.1 方案设计

方案1:现状延续型。即不考虑污水回用和境外调水,且单方工业用水效益增速、农村人均生活用水定额、城镇人均综合生活用水定额均延续现状年不变。

方案2:节水兼污水再生回用型。根据预测,单

方工业用水效益增速 2010 和 2020 年分别为 18.3 和 54.3 元/ (m³ a); 污水回用率 2008 和 2020 年分别为 50 %和 60 %; 农村人均生活用水和城镇人均综合生活用水定额 2020 年分别为 266 和 300 L/ (人 d)。

方案 3: 节水兼境外调水。启动调水工程, 暂不考虑污水回用, 即回用率为 0; 其他参数取值同方案 2。不同时期的调水量见表 1 (本文中采用保证率 $P = 50 %$ 时的规划调水量(见第 1 页注))。

表 1 不同时期的境外调水量^[15]

Table 1 Upstream inflow in various periods

年 份	调水量/亿 m ³	调水来源
2003—2005	0	水库建设规划
2006—2010	0.36	长操水库
2010—2020	11.77 ~ 13.77	长操水库、拒马河引水与南水北调中线工程

方案 4: 综合型。在建设节水型社会的前提下同时实施污水回用与境外调水。

以上方案中, 农村人口变化、单方农业用水效益增速、环境用水量变化均相同, 模拟结果见图 2。

2.2 模拟结果分析

1) 模拟结果表明: 4 种方案下可承载的工业总产值均随时间呈增长趋势(图 2(a)), 但第 1 阶段方案 2、3、4 工业总产值增速小于方案 1, 其原因是根据长远规划, 该阶段后 3 种方案单方工业用水效益增速小于现状年增速, 另外, 方案 2 由于治理污水投资有限, 污水处理及回用量较小, 相应工业回用量也小; 方案 3 从长操水库引水, 水量仅为 0.36 亿 m³, 分配于工业的水量较少; 方案 4 虽然同时利用污水和境外调水, 但总量仍较小。因此该阶段 4 种方案的工业总产值增速主要由单方工业用水效益增速决定。

第 2 阶段方案 2、3、4 工业总产值增速均大于方案 1。该阶段加大了工业节水力度, 发展低耗水工业, 使后 3 种方案单方工业用水效益增速大于方案 1, 而且随着经济的快速增长, 方案 2 污水处理量及其回用率提高, 使工业回用污水量增加。方案 3 由于长操水库、拒马河引水与南水北调中线工程联合调度, 使工业用水量提高, 工业总产值增长迅速。尤其是方案 4, 同时回用污水和联合调水, 到 2020 年工业总产值 10 698.6 亿元, 为方案 1 的 1.33 倍。

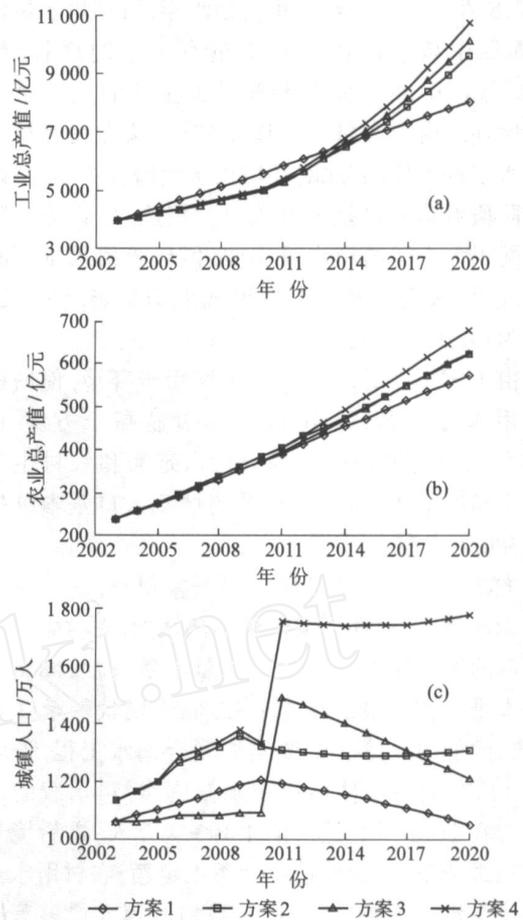


图 2 不同方案下可承载的工业总产值(a)、农业总产值(b)和城镇人口(c)

Fig. 2 Total industrial production value (a), total agricultural production value (b) and carrying capacity of total urban population (c) under various schemes

2) 由图 2(b)可以看出: 第 1 阶段 4 种方案农业总产值增速基本相同, 到 2010 年均 370 ~ 380 亿元。模型中 4 种方案单方农业用水效益增速相同, 故农业产值增速均由农业用水量决定。该阶段方案 2 农业回用污水量较小, 方案 3 境外调水量也较小, 即使方案 4 同时利用污水和外调水, 但由于总量较小使分配于农业的用水量较少, 对总的农业产值增速影响不明显。

第 2 阶段方案 2、3、4 加大了发展节水农业的力度, 同时随着污水利用率的提高以及拒马河引水与南水北调工程的实施, 使分配给农业的用水量明显增加, 因而后 3 种方案农业总产值大幅上升。方案四可承载的农业产值增长最快, 到 2020 年达 679.6 亿元, 为方案一的 1.2 倍。

3) 由图 2(c)可以看出: 方案 1 可承载的城镇人口在第 1 阶段有所增加但增长不大, 到 2010 年为

1 207.8 万人。由于现状年为枯水年,可利用水量偏小,规划中该阶段可利用水量有一定的增长,到2010年达40.88亿 m^3 ,分配于大生活的用水量也相应增加。由于农村人口逐年减少,该方案农村生活用水定额不变,而此时环境用水量增长较小,所以第1阶段城镇人口呈上升趋势。相反,尽管第2阶段分配于大生活的用水量不变,但环境用水量不断增加,故可承载的城镇人口出现下降趋势,到2020年仅为1 051.9万人。

由于方案2处理污水大量回用于环境,使城镇生活用水量增加,承载的人口明显高于方案1。2010年后随着城镇生活综合用水定额和农村生活用水定额的不断增长,可承载的城镇人口基本维持在1 300万人左右。

方案3第1阶段城镇人口增幅很小,这一时期境外调水量少,而环境需水量不断增加,农村生活用水定额的增长使农村生活用水量不断增加,城镇人口基本维持在1 080万人左右,低于现状年承载城镇人口的能力。第2阶段实施联合调水工程,调水量为11.77亿 m^3 ,使城镇用水量剧增,可承载的城镇人口在2011年达最大值1 493.4万人;之后境外调水量维持不变,而城镇生活用水定额、农村用水量和环境需水量不断增大,可承载的城镇人口显著递减,2020年仅为1 209.3万人。

方案4由于污水回用和境外调水同时利用,使可利用水总量剧增,承载城镇人口能力总体呈逐年增大。虽然城镇生活用水量逐年增加,但由于农村、城镇生活用水定额的增加,2011—2020年城镇人口基本稳定在1 750万人左右。按照北京市城市总体规划,2020年城镇人口规模规划控制在1 600万人左右^[13],方案四可承载城镇人口规模远远超出了规划的规模。

3 结 论

现状延续型用水模式水资源承载能力十分脆弱,难以满足未来北京市社会经济需求,承载的城镇人口自2010年开始递减,城市规模开始萎缩。在建设节水型社会的前提下,分别实施污水回用或境外调水,虽然工农业总产值维持快速发展,但仍然承载不了与之对应的城市人口规模。只有在建设节水型社会的同时实施污水回用和境外调水,水

资源承载力各项指标均稳步提高,到2020年可承载的工业、农业总产值及城镇人口均达到最大值。综合型方案是提高北京市水资源承载力的最佳方案。

参 考 文 献

- [1] Simonovic S P. World water dynamics: global modeling of water resources[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66: 249-267
- [2] Fedorovskiy A D, Timchenko I Ye, Sirenko L A, et al. Method of system dynamics in simulating the problems in the comprehensive use of water[J]. *Hydrobiological Journal*, 2004, 40(2): 87-96
- [3] Ahmad S, Simonovic S P. System dynamics modeling of reservoir operations for flood management[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2000, 14(3): 190-198
- [4] 魏斌,张霞.城市水资源合理利用分析与水资源承载力研究——以本溪市为例[J]. *城市环境与城市生态*, 1995, 8(4): 19-24
- [5] 王建华,江东,顾定法,等.基于SD模型的干旱区域城市水资源承载力预测研究[J]. *地理学与国土研究*, 1999, 15(2): 18-22
- [6] 惠泱河,蒋晓辉,黄强,等.二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J]. *地理研究*, 2001, 20(2): 191-198
- [7] 王薇,雷学东,余新晓,等.基于SD模型的水资源承载力计算理论研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2005, 16(3): 11-15
- [8] 王其藩.高级系统动力学[M].北京:清华大学出版社, 1995: 1-19
- [9] 北京市水利局.北京市水资源公报:1989—2002年[EB/OL]. [2006-02-25]. <http://www.bjwater.gov.cn/xww/report>
- [10] 北京市统计局.北京统计年鉴2004[M].北京:中国统计出版社,2004:484-505
- [11] 阮本清,魏传江.首都圈水资源安全保障体系建设[M].北京:科学出版社,2004:87-88
- [12] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等.生态环境蓄水量理论、方法与实践[M].北京:科学出版社,2003:173-174
- [13] 北京市发展改革委员会.北京城市总体规划(2004—2020年). [EB/OL]. [2005-08-05]. <http://www.bjpc.gov.cn/fzgh/cszgh/ght/200508/t249.htm>
- [14] 北京市污水处理系统年投资20亿元. [EB/OL]. [2005-10-19]. <http://www.chinaenvironment.com/urgl/2005-10/19/19106.html>
- [15] 焦志忠.构建循环水务建设节水防污型社会[N]. *科学时报*, 2005-10-19(1-4)