

# 基于系统动力学仿真模拟评价 武汉市水资源承载力

陈 威,周 钺

(武汉科技大学城市建设学院,武汉 430065)

**[摘要]** 水资源承载力对一个国家或地区的经济增长、社会进步有着至关重要的影响,是水科学与系统科学交叉研究的热点。以武汉市为例,采用系统动力学方法将水资源子系统、经济子系统、社会子系统、生态环境子系统、水污染子系统进行有机结合,建立仿真模型,并用密切值法对所得指标值进行综合分析评价。最终得到了《武汉市国民经济和社会发展第十二个五年总体规划纲要》实施过程中的最佳方案。

**[关键词]** 水资源承载力;密切值法;系统动力学;评价

**[中图分类号]** TV211.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742-(2014)03-0103-05

## 1 前言

水资源承载力系统是一个复杂的系统,涉及资源、社会、环境、经济和水污染等诸多因素,为促进国民经济和社会的可持续发展,对水资源承载力进行正确评价,优选出合理利用方案是城市化进程中非常重要的一环<sup>[1]</sup>。水资源承载力的影响因素众多、关系复杂,具有多指标、多属性的特点,且各因素间的影响程度不同,因此合理的综合评价方法将直接影响到优选结果。

近年来,不少学者运用模糊数学理论、灰色系统模型、back propagation(BP)神经网络等方法进行方案优选,都取得了较好的效果。但是,上述方法的理论基础复杂、计算过程繁琐,而且评价结果受人为因素的影响较大<sup>[2]</sup>。针对以上问题,本文以系统动力学原理建立模型并用密切值法来分析模拟结果,将两者有机结合引入到城市水资源承载力的评价与决策研究中,探寻一种简单可行、科学可靠的水资源承载力综合评价的新方法。

## 2 水资源承载力评价

水资源承载力所涉及的面比较广,对其研究不

能在单一的系统中来分析,还需要全盘考虑资源、社会、环境、经济和水污染等因素之间的联系,因此采用系统动力学的方法将所需要考虑的各种因素全部纳入到模型中,来模拟获取不同策略下的各项评判指标值;再使用密切值法对模拟得到的各项评判指标值进行综合分析,进而得出不同策略对水资源承载力的影响<sup>[3-7]</sup>。

### 2.1 系统动力学建模

将各种因素纳入系统动力学模型,并分成5个子系统:水资源子系统、经济子系统、社会子系统、生态环境子系统、水污染子系统<sup>[8-11]</sup>。通过分析模型各子系统内各项指标之间的相互联系和制约的关系,结合水资源承载力系统结构分析图将各子系统联系起来<sup>[12]</sup>,得到水资源—经济—社会—生态环境的耦合系统,构建出了相对完整的水资源承载力系统动力学仿真模型系统流图。该系统动力学仿真模型中包含5种变量:状态变量、速率变量、辅助变量、常数变量和表函数,这些变量之间由41个方程相互连接,构成了10条反馈回路,用系统动力学专用软件Vensim软件建立模型,如图1所示。

**[收稿日期]** 2013-10-19

**[作者简介]** 陈 威,1974年出生,男,湖南长沙市人,博士,副教授,主要研究方向为水处理理论与技术;E-mail:1050796704@qq.com

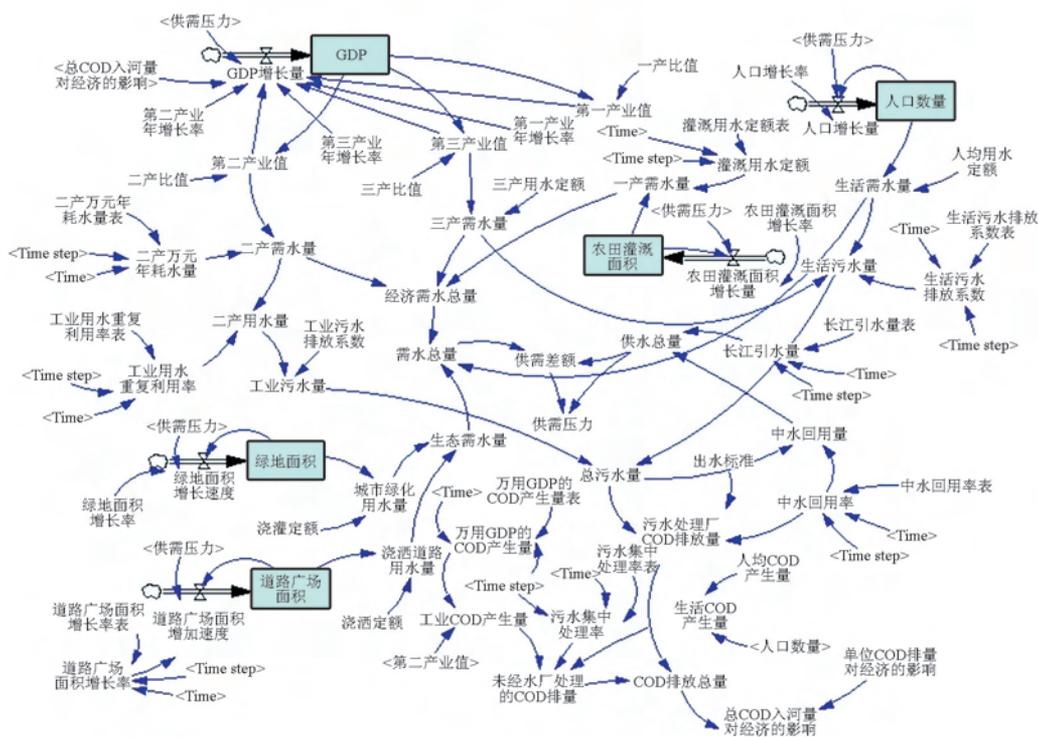


图1 水资源承载力系统动力学仿真模型流图

Fig.1 The carrying capacity of water resources system dynamics simulation model flow chart

注:COD为化学需氧量

其中,水资源子系统包括了一产需水量、二产需水量、三产需水量、生活需水量、需水总量、经济需水总量、长江引水量、供水总量、中水回用量、城市绿化用水量、浇洒道路用水量、生态需水量;经济子系统包括国内生产总值(GDP)、一产产值、二产产值、三产产值、万元耗水量、农田灌溉面积、用水定额;社会子系统包括人口数量、人口增长率、人均用水定额;生态子系统包括绿地面积、道路广场面积、绿地面积增长速度、道路广场面积增长率、绿地面积增长率;水污染子系统包括工业用水重复利用率、中水回用率、污水量、工业污水排放系数、污水集中处理率。

## 2.2 密切值法评价

对水资源承载力的评价是一种典型的多指标综合性问题,目前采用的多种指标综合计算模型存在着计算繁琐等多种制约因素。为此,本文采用直接有效的多指标综合法——密切值法<sup>[13]</sup>。

密切值法是多目标决策的一种优选方法,将多个指标简化成一个可从总体上衡量其优劣的综合指标<sup>[14]</sup>。其显著的优点在于可以对区域内的可持续利用水平进行优劣排序,目前广泛地应用于环境质量评价等领域中,也是水资源承载力评价的理想方

法<sup>[15]</sup>,该方法模型建立如下。

### 2.2.1 方案评价的指标矩阵

1)建立矩阵。

$$A = (a_{ij})^{m \times n} \quad (1)$$

式(1)中, $a_{ij}$ 为第*i*个方案第*j*项指标值;*m*为方案数;*n*为目标数。

2)指标矩阵规范化。目标有正向和逆向之分,其各自的量纲各不相同。为便于矩阵分析比较,将逆向的目标转化为正向目标,使得有量纲的数值变为无量纲的数值。

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij}}{(\sum_{i=1}^m a_{ij}^2)^{\frac{1}{2}}}; & \text{当}j\text{为正向指标时} \\ \frac{-a_{ij}}{(\sum_{i=1}^m a_{ij}^2)^{\frac{1}{2}}}; & \text{当}j\text{为负向指标时} \end{cases}$$

$$(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

这样得到了规范化指标矩阵: $R=(r_{ij})^{m \times n}$ 。

### 2.2.2 求最优点和最劣点

“最优点”和“最劣点”分别为所有方案点集各个评价指标的最好和最差点的集合,求出各个方案点集与这些最优和最劣点的距离,便可以为某一定时间水资源提供一个综合评价的依据。

令  $r_j^+ = \max_{m \geq i \geq 1} \{r_{ij}\}$ ;  $r_j^- = \max_{m \geq i \geq 1} \{r_{ij}\}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )  
那么“最优点”为

$$A^+ = (r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+) \quad (3)$$

“最劣点”为

$$A^- = (r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-) \quad (4)$$

### 2.2.3 求各方案密切值

密切值计算公式为

$$C_i = \frac{d_i^+}{d^+} - \frac{d_i^-}{d^-} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式(5)中,  $d_i^+$  与  $d_i^-$  分别表示的是评价点  $A_i$  与  $A^+$  之间的欧氏距离;  $d^+$  与  $d^-$  分别表示  $m$  个“最优点距”的最小值和  $m$  个“最劣点距”的最大值, 其表达式如式(6)~式(9)所示。

$$d_i^+ = [\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^+)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$d_i^- = [\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^-)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$d^+ = \min_{m \geq i \geq 1} \{d_i^+\} \quad (8)$$

$$d^- = \max_{m \geq i \geq 1} \{d_i^-\} \quad (9)$$

通过密切值的计算和排序可以得出各个方案的相对优劣。密切值越小, 方案越优。

## 3 实例应用

以武汉市历年的统计年鉴和水资源公报提供的相关数据为对象, 用系统动力学模型和密切值法联合分析武汉市水资源状况, 根据《武汉市国民经济和社会发展第十二个五年总体规划纲要》以2015年为水平年, 做出水资源承载力评价。

### 3.1 模型有效性检验

以历史回顾检验法检验系统动力学模型的有效性。以武汉市2003年到2007年的统计相关数据作为控制变量来预测2008年到2012年的人口、GDP与已有的2008年到2012年的数据进行比较(见表1和表2), 预测值和实际值的误差最大为  $4.64\% < 5.0\%$ , 在合格范围内, 说明所建立的系统动力学模型能有效反映实际系统, 使用该方法合理, 具有比较高的可靠性。

表1 模型历史回顾检验结果

Table 1 The historical test results of the model

变量		2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
总人口	实际值/万人	833.24	835.55	836.73	827.24	822
	模拟值/万人	821.86	814.95	799.36	798.82	783.92
	相对误差 $e/\%$	1.37	2.47	4.45	3.44	4.63
GDP	实际值/亿元	4 115.51	4 620.86	5 565.93	6 762.20	8 102.30
	模拟值/亿元	4 051.10	4 406.68	5 373.91	6 470.75	7 744.98
	相对误差 $e/\%$	1.57	4.64	3.45	4.31	4.41

表2 预测精度范围标准

Table 2 Standard precision scope

项目	好	合格	勉强	不合格
$e/\%$	<3.5	<5.0	<10.0	$\geq 10.0$

### 3.2 方案设计

设计现状延续型、开源型、节流治污型、产业结构调整型和开源节流并调整产业结构型(综合型)5种方案, 来分析未来武汉市水资源发展状况。

1) 现状延续型, 即以武汉市近五年(2008—2012年)的水资源状况结合《武汉市国民经济和社会发展第十二个五年总体规划纲要》所确定的发展产业结构、工业用水重复利用率和城市化进程, 设定该方案中的一、二、三产比例, 用水定额, 道路广场面积增长率, 人口增长率, 中水回用率为平均增

速变化。

2) 开源型, 在方案一的基础上加大从长江的引水量。

3) 节流治污型, 包括节流和治污两方面。节流为提高用水效率, 推行节约用水和循环用水, 降低人均用水定额, 提高工业重复利用率, 降低三产用水定额和二产万元年耗水量; 治污是提高污水集中处理率和中水回用率。

4) 产业结构调整型, 在方案一的基础上优化产业结构, 降低一产和二产的比例, 提高三产比例。

5) 综合型, 综合以上4种方案, 考虑开源节流治污和产业结构调整等综合因素, 优化产业结构, 加大长江引水量, 降低用水定额并提高工业用水重复利用率。

5种方案控制变量参数值如表3所示。

表3 5种方案控制变量参数值

Table 3 Five kinds of plan control variable parameter value

变量	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
长江引水量/( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	370 000	450 000	370 000	370 000	450 000
工业用水重复利用率/%	88.5	88.5	90	88.5	90
灌溉用水定额/( $\text{m}^3 \cdot \text{亩}^{-1}$ )	300	300	250	300	250
污水集中处理率/%	95.5	95.5	97	95.5	97
中水回用率/%	20	20	40	20	40
人均用水定额/( $\text{L} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$ )	300	300	250	300	250
人均COD产生量/( $\text{g} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$ )	80	80	80	80	80
二产万元年耗水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$ )	156.4	156.4	140	156.4	140
三产用水定额/( $\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$ )	316	316	316	316	316
浇灌定额/( $\text{L} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ )	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
产业比例	3:46:51	3:46:51	3:46:51	2:42:56	2:42:56

注:以上数据来源为武汉市统计年鉴和水资源公报(1亩 $\approx$ 666.67  $\text{m}^2$ )

### 3.3 系统动力学仿真结果

用系统动力学专用软件 Vensim 软件建立模型,

代入5种方案的控制变量参数值,模拟得到2015年各方案变量的结果,如表4所示。

表4 5种方案模拟变量结果

Table 4 Five kinds of analog variable results

指标	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
GDP/亿元	12 046	12 046	12 046	12 046	13 079
人口数量/万人	833	839	831	833	839
供水总量/( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	400 000	455 232	375 982	373 256	372 548
供需压力	0.07	0.023	0.041	0.051	0.015
总污水量/( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	64 607	64 607	60 801	64 607	60 801
COD排放总量/kg	24 324	24 499	24 265	24 324	24 499

### 3.4 水资源承载力评价结果与分析

根据系统动力学模型分析得到的各方案变量结果,用密切值法对各方案水资源承载力做出评价。

按(2)、(3)、(4)式计算,求得了“最优点” $A^+$ 和“最劣点” $A^-$ 。

$$A^+ = (0.48, -0.45, 0.51, -0.15, -0.43, -0.45)$$

$$A^- = (0.44, -0.45, 0.42, -0.70, -0.46, -0.45)$$

由式(6)、(7)、(8)、(9)求得

$$d_i^+ = (0.56, 0.09, 0.28, 0.38, 0.09),$$

$$d_i^- = (0.03, 0.49, 0.29, 0.19, 0.55),$$

$$d^+ = 0.09, d^- = 0.55$$

由式(5)可求得5种方案的水资源承载力评价的密切值  $C_i$ , 结果如表5所示。

表5 各方案密切值结果

Table 5 Various options osculating value results

方案	C值
方案一	5.95
方案二	0.13
方案三	2.47
方案四	3.70
方案五	0.01

比较5种方案的优劣:方案一在水平年的密切值是最大的,该方案所能承载的社会、经济规模为所有方案中最小,反映出水资源对社会经济发展的制约,表明现状延续型的方案水资源承载能力弱;方案二下的水平年密切值要远优于方案一,可以看出开源措施大大提高了武汉市水资源承载力,由于武汉地处长江中游,水量较为丰富,提高长江引水

量对缓解武汉市供需水压力有相当重大的作用;方案三条件下的水平年密切值在方案一与方案二之间,表明节流治污措施提高了用水效率、降低了耗水量,能带来最小的环境污染,对于水资源承载力有一定的正面作用;方案四下的水平年密切值优于方案一而略小于方案三,表明产业结构的优化有助于提高城市水资源承载力,而单纯的调整优化产业结构的效果还不够明显,需要考虑综合方案;方案五下的水平年密切值为最优,在调整产业结构的同时做到开源节流治污措施同步进行,能够使武汉市的社会经济发展空间达到最大化。

### 3.5 对策和建议

为了保证武汉市社会经济的高速发展,实现水资源的利用和社会经济的可持续发展,对《武汉市国民经济和社会发展的第十二个五年总体规划纲要》实施的过程提出以下建议。

1)加强建设供水工程,增强供水能力。武汉市的水资源总量丰富,但90%以上是过境水。为了满足其经济大力发展的供水需要,必须要加强供水工程的建设,增强武汉市过境水利用能力,提高水资源承载力,促进经济社会的可持续发展。

2)提高水资源的利用效率,推广“循环经济”的概念,大力发展循环用水系统、串联用水系统和回用水系统,加强污废水和冷凝水的回收再利用。

3)进一步调整产业结构,控制高耗水行业的规模和布局,使得水资源供给转向高效低耗型的产业;充分利用武汉市的旅游文化资源,大力发展第三产业,预测到2015年GDP值为1.3万亿元,第一

产业、第二产业、第三产业的比例为2:42:56。

4)提高污水集中处理率,加强水环境综合治理的力度,保证水环境安全。

### 参考文献

- [1] 牛志强,王延辉,刘明珠.河南省水资源承载力系统动力学模型及其应用[J].水电能源科学,2009,27(1):48-50.
- [2] 王雷,吴明,贾冯睿,等.城市生态系统水资源利用的系统动力学分析[J].辽宁石油化工大学学报,2012,32(3):33-36.
- [3] 王武科,李同升,徐冬平,等.基于SD模型的渭河流域关中地区水资源调度系统优化[J].资源科学,2008,30(7):983-989.
- [4] 宇鹏.基于系统动力学水资源承载力评价研究[J].工业安全与环保,2013,39(2):38-41.
- [5] 薛冰,宋新山,严登华.基于系统动力学的天津市水资源模拟及预测[J].南水北调与水利科技,2011,9(6):43-47.
- [6] 黄莉新.江苏省水资源承载力评价[J].水科学进展,2007,18(6):879-883.
- [7] Srdjevic B, Medeiros Y D P, Faria A S. An objective multi-criteria evaluation of water management scenarios[J]. Water Resources Management,2004,18:35-54.
- [8] 程莉,汪德耀.苏州市水资源承载力研究[J].水文,2010,30(1):47-55.
- [9] 卢超,王蕾娜,张东山,等.水资源承载力约束下小城镇经济发展的系统动力学仿真[J].资源科学,2011,33(8):1498-1504.
- [10] 杨巧宁,孙希华,张婧,等.济南市水资源承载力系统动力学模拟研究[J].水利经济,2010,28(2):16-20.
- [11] 赵筱青,饶辉,易琦,等.基于SD模型的昆明市水资源承载力研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(12):339-342.
- [12] 童玉芬.北京市水资源人口承载力的动态模拟与分析[J].中国人口·资源与环境,2010,20(9):42-47.
- [13] 秦成,王红旗,田雅楠,等.资源环境承载力评价指标研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(12):335-338.
- [14] 丁冉,肖伟华,于福亮,等.水资源质量评价方法的比较与改进[J].中国环境监测,2011,27(3):63-68.
- [15] 王玉梅,丁俊新.山东省水环境承载力动态变化趋势分析[J].水资源与水工程学报,2011,22(6):50-55.

## Evaluation of water resources carrying capacity in Wuhan City based on system dynamics simulation

Chen Wei, Zhou Cheng

(Institute of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**[Abstract]** Water resources carrying capacity has a vital influence on the economic growth and social progress in a country or region, it's a hotspot of research on water between science and system science. Taking Wuhan City for example, combine the water resources subsystem,

(下转112页)